

РЕГИОНАЛЬНАЯ ЦЕЛЕВАЯ ПРОГРАММА РАЗВИТИЯ РЕЧНОГО ТРАНСПОРТА СИБИРИ

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»

А.В. Зачёсов, И.С. Дерябина

DEVELOPMENT OF RIVER TRANSPORT OF SIBERIA REGIONAL GRANT PROGRAMME

Siberian State University of Water Transport (SSUWT) 33, Schetinkina St., Novosibirsk, 630099, Russia

Aleksandr.V. Zachyosov (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of SSUWT)

Irina S. Deryabina (Assoc. Prof. of SSUWT)

ABSTRACT: The article considers main stages of the development of the grant programme and the guidance documents following this program related to the operation of river transport. Prospects for the development of cargo transportation and the use of the transport fleet in areas of Siberia, associated with plans for the further use of water transport in these areas, as well as the structure of the management process and the relationship of levels in the management process are presented in the paper. Authors set the basic principles of the "Minor Rivers" grant programme.

Keywords: *management structure, programme development principles, employees*

Рассмотрены основные этапы разработки целевой программы и руководящие документы, входящие в эту программу, связанные с работой речного транспорта. Представлены перспективы развития перевозок грузов и использования транспортного флота в районах Сибири, связанные с планами дальнейшего использования водного транспорта в этих районах, структура процесса управления, взаимосвязь уровней в процессе управления. Определены основные принципы программы «Малые реки».

Правительство Российской Федерации своим распоряжением от 29 ноября 2008 г. №1734-р утвердило Транспортную стратегию РФ на период до 2030 г. Стратегия определяет основные направления государственной транспортной политики на долгосрочный период и охватывает все виды транспорта, в том числе морской и внутренний водный.

Кроме этого в течение переходного периода в РФ от административно-плановой, директивной системы управления к рыночной экономике по инициативе Минтранса РФ подготовлено ряд руководящих документов непосредственно связанных с работой речного транспорта: «Внутренние водные пути России», «Развитие международных транспортных коридоров», «Концепция развития внутреннего водного транспорта Российской Федерации» и другие. В этих документах намечены основные пути развития речного транспорта, обозначены конкретные направления совершенствования работы в целом по водному транспорту страны. К сожалению, в этих документах не в полной мере учитываются особенности работы отрасли в пароходствах Восточных бассейнов.

Перспективы развития перевозок грузов и использования водного транспорта в районах Сибири связаны с планами дальнейшего хозяйственного освоения этих районов при недостаточно развитой сети других видов транспорта [1].

В условиях постоянного роста количества перевозок для нужд хозяйства Сибири, обновление и пополнение материально-технической базы речного транспорта важным становится проблема повышения качества, эффективности перевозок и работы флота.

Успешное решение этих проблем на современном этапе тесно связано, в том числе, с вопросами управления технологическим процессом работы флота на базе использования новых математических методов планирования и технических средств управления.

В решении проблем совершенствования речного транспорта в целом по Российской Федерации, в том числе и пароходствах Восточных бассейнов, накоплен определенный положительный опыт работы научных организаций. Этот опыт может быть использован при формировании Федеральных целевых программ развития транспорта.

Выполнение такой работы распоряжением Правительством страны поручено Минтрансу России совместно с заинтересованными федеральными органами исполнительной власти приступить к реализации концепции развития внутреннего водного транспорта Российской Федерации, имеется ввиду разработка региональной целевой программы по развитию речного транспорта Сибири. Такой программы в настоящее время нет, хотя необходимость в её существовании не вызывает сомнений. По мнению авторов настоящего исследования в этом направлении необходимо начать с эскизного проекта, обосновать структуру, принципы и последовательность выполнения основных разделов программы. По каждому разделу от-

работать приёмы, методы, средства достижения цели.

Всё управление работой речного транспорта Сибири предполагается разделить на ряд контуров управления, каждый контур носит рамочный характер, включает комплекс задач управления по определенным направлениям общих по форме, но различных по содержанию.

По каждой задаче контура анализируется её информационное обеспечение, обосновываются оптимальные методы решения и рекомендуются способы численного получения конкретного результата.

Количество контуров управления в зависимости от бассейна устанавливается исследователем самостоятельно и включает следующие стандартные направления; в частности, по основным сегментам рынка транспортных услуг (малые реки, северный завоз, график движения флота, перегрузочные работы), а также другие важные составляющие развития речного транспорта региона; транспортные коридоры, северный морской путь, транспортно-логистические технологии отдельных районов, развитие материально-технической базы отрасли; водные пути, транспортные средства и прочие составляющие.

Структура процесса управления, взаимосвязь уровней в процессе управления представлена на рисунке. Показан для примера контур управления «Малые реки».

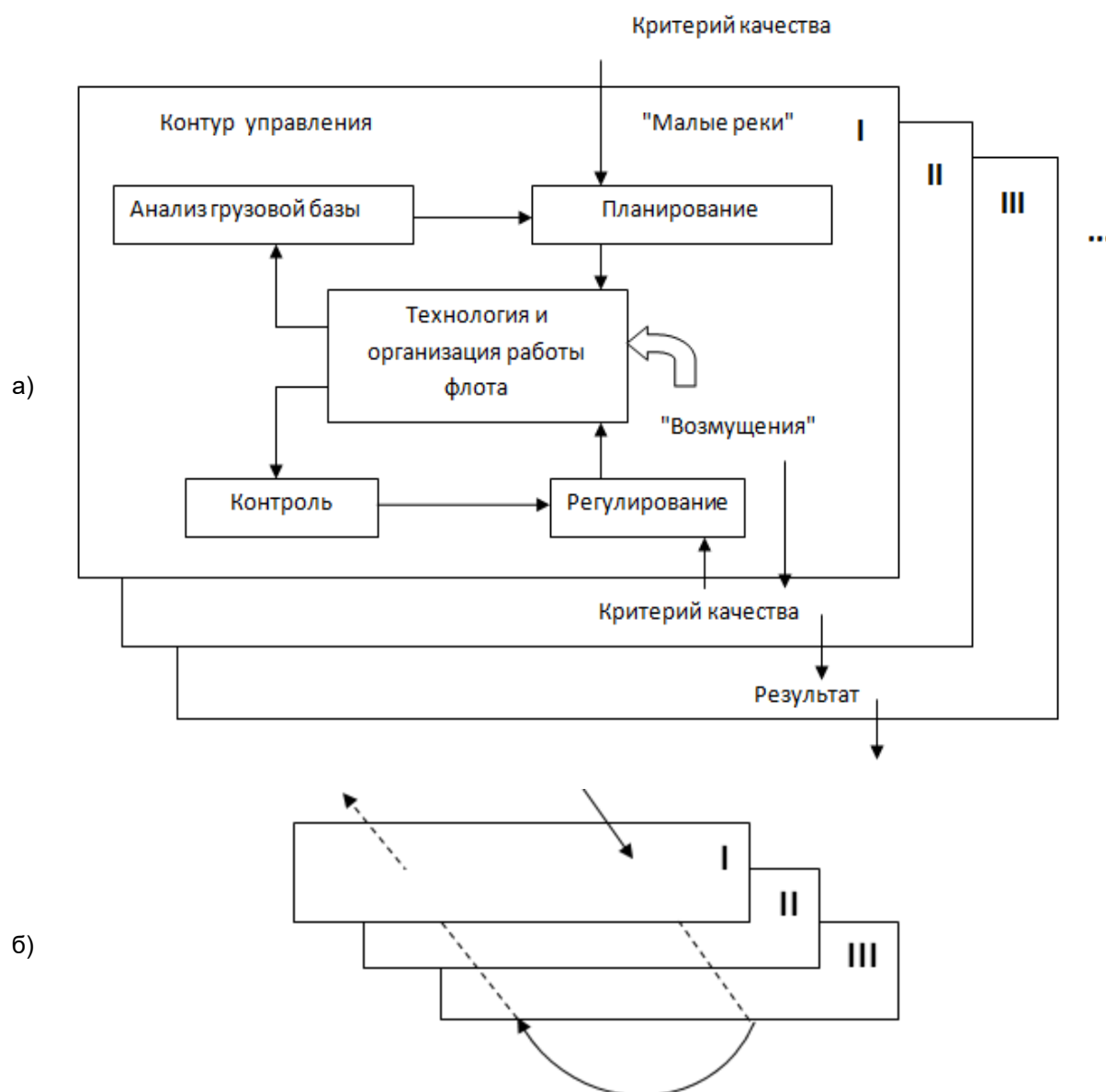


Рисунок - Общая структура процесса управления: а) контур управления одного уровня; б) взаимосвязь уровней в процессе управления

Основополагающими принципами программы являются: непрерывность, преемственность, единство [2].

Реализация принципа непрерывности означает всесторонний и непрерывный во времени охват управлением всей системы в целом и её отдельных элементов. Наиболее чётко во временном аспекте этот принцип проявляется, например, в контуре управления «График движения флота» (навигация, квартал, месяц, декада, сутки).

Преимственность решений во временном и объёмно-структурном аспектах определяет соотношение решений по уровням управления.

«Предыдущие» (вышестоящие или ранее принятые) решения определяют «последующие».

Преимственность принятых решений обеспечивается, с одной стороны, непрерывностью их принятия по периодам, с другой - иерархией решений и скользящим характером формирования.

Единство служит основой принятия решений управления на всех уровнях и во всех сферах деятельности на базе общих задач управления технологическим процессом работы флота.

Обеспечение непрерывности, преимущественности и единства принятия решений осуществляется с помощью следующих средств:

- использование сквозной системы показателей для всех уровней. Сквозная система показателей характеризует не только интегральные параметры транспортного процесса по его конечным результатам, но и параметры отдельных элементов;

- обеспечение принципиального единства структуры показателей по объектам управления;

- использование единого критерия на всех уровнях управления и единообразных ограничений.

Для разработки региональной целевой программы развития речного транспорта Сибири предлагается организовать временный коллектив из сотрудников научных, проектных, производственных и общественных организаций утвержденный Росморречфлотом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Концепция развития внутреннего водного транспорта Российской Федерации. -М.: Изд-во «По Волге», 2003. -23 с.

2 Транспортная стратегия-2030 // -Речной транспорт XXI век.-2008. -№5. -С. 55-58.

REFERENCES

1 The concept of the Russian Federation inland water transport development [Konceptsiya razvitiya vnutrennego vodnogo transporta Rossiyskoy Federatsii]. Moscow. "Po Volge" Publ. 2003. 23 p.

2 Transport Strategy-2030 [Transportnaya strategiya-2030]. *River Transport XXI Century [Rechnoy transport XXI vek]*. 2008. No. 5. pp. 55-58.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: контуры управления, принципы разработки программы, коллектив исполнителей

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ: Зачёсов Александр Венедиктович, канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «СГУВТ»

Дерябина Ирина Сергеевна, доцент ФГБОУ ВО «СГУВТ»

ПОЧТОВЫЙ АДРЕС: 630099, г.Новосибирск, ул.Щетинкина, 33, ФГБОУ ВО «СГУВТ»

ЗАДАЧИ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА ОРГАНИЗАЦИИ ЗАВОЗА ГРУЗОВ В ЗОНЫ ЗАПОЛЯРЬЯ

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»

Д.Ю. Сахнов

ISSUES OF THE SYSTEM APPROACH TO ORGANIZATION OF CARGO TRAFFIC TO THE POLAR REGIONS

Siberian State University of Water Transport (SSUWT) 33, Schetinkina St., Novosibirsk, 630099, Russia
Dmitriy Yu. Sakhnov (Senior Lecturer of SSUWT)

ABSTRACT: This paper discusses problems of rational use of the cargo fleet. A systematic approach allows deeper understanding of the present day technology of the fleet and ports operation, and comprehensive study of the relationship between individual tasks at different levels of management as well.

Keywords: Arctic, Siberia, water transport, system approach, fleet operation management

Рассмотрены задачи оптимального использования флота. Системный подход в этом вопросе позволяет глубже понять современную технологию работы флота и портов, всесторонне изучить взаимосвязи между отдельными задачами на разных уровнях управления.

Создание промышленного потенциала в Арктических районах на базе реализации социально-ориентированной стратегии развития транспорта и формирование производственно-транспортных комплексов, обладающих развитой сетью путей сообщения и транспортно-

логистической инфраструктурой, станет важным этапом в обеспечении подъема экономики и повышения уровня жизни населения северных районов.

Анализ теории и практики транспортного обеспечения северного завоза грузов позволяет обобщить имеющиеся научные исследования и опыт практической деятельности транспортных предприятий. По результатам выполненного анализа можно систематизировать задачи обоснования схем завоза грузов в северные районы и на их основе рекомендовать методы решения этих задач, исходя из обеспечения оптимальных вариантов транспортного обслуживания этих регионов, включая территории пионерного освоения.

Комплекс задач по транспортному освоению пионерных территорий в районах Крайнего Севера можно рассматривать как локальную управляемую подсистему, входящую в общую транспортную систему страны, основной целью которой является удовлетворение потребностей хозяйственного комплекса региона в перевозках с наименьшими затратами.

Этой подсистеме присущи все черты управляемой системы, она подвержена влиянию внешней среды, обладает внутренними взаимосвязями, имеет индивидуальную структуру, включает перечень задач, решение которых позволяет достичь поставленной цели.

Подсистема является комплексной. Входящие в неё задачи, в большей части, многовариантные и оптимизационные.

Одним из эффективных методов получения оптимального варианта использования технических средств речного транспорта на любом уровне управления, как следует из многочисленных исследований ученых отрасли [1, 2, 5], является системный подход, когда частные решения для отдельных задач получают из общего решения, а не наоборот, что имеет место в практике эксплуатационной работы судоходных компаний.

Системный подход позволяет глубже понять современную технологию работы флота и портов, всесторонне изучить взаимосвязи между отдельными задачами на разных уровнях управления, наметить пути поиска неиспользованных резервов, повысить качество планирования.

Работа флота является составной частью основной деятельности пароходства (судоходной компании), отражает форму организации технологического процесса перевозки грузов, представляет интерес как объект исследований, обладает совокупностью элементов, является планово-управляемым объектом с конкретной

целью и критерием, функционирует на конкретной территории, в определенный промежуток времени, решает определенный круг задач. Основные системные свойства транспортного флота по направлениям представлены на рисунке [1].

При решении задачи оптимального использования флота системность означает получение решения в составе основной деятельности пароходства. Плановость использования флота определяется местом и ролью его в эксплуатационной деятельности, наличием тоннажа и тяги, необходимостью управления его работой. Целенаправленность выражается через общую цель: работы речного транспорта – обеспечение перевозок грузов при наи-



Рисунок – Системные свойства использования транспортного флота

меньших затратах при определенном критерии оптимальности. Вариантность определяется различными типами судов и составов, работающих на разных участках водного пути с различными показателями эффективности. Динамичность транспортного процесса подтверждается зависимостью принимаемого решения в конкретный период времени от предыдущего состояния этого процесса. Иерархичность достигается за счет взаимосвязей на разных уровнях управления. Оптимальные решения, принимаемые на каждом уровне управления, подчиняются решениям, которые приняты на более высоких уровнях. Транспортный процесс носит вероятностный характер, что необходимо учитывать при выработке управленческих решений.

Структура подсистемы транспортного обслуживания регионов пионерного освоения может быть представлена в виде взаимоувязанных блоков.

Основные из них следующие:

- Аналитический блок. Оценка современного состояния транспортного обслуживания азиатского Севера.

- Исследовательский блок. Комплексное обоснование схем перевозок и использования транспортных средств.

- Организационный блок. Организационные положения эффективного использования транспортных средств, включая элементы логистики.

В составе аналитического блока рассматриваются вопросы современного состояния и перспективы развития производительных сил азиатского Севера, исследуются особенности транспортного освоения зоны Заполярья с его сложностями и необходимостью решения транспортных связей в этой части России, предлагается систематизировать комплекс задач и отдельные задачи в этом регионе и исходя из этого рассматриваются возможные пути и методы решения этих задач с целью оптимизации использования транспортных схем перевозок и работы транспортных средств.

В исследовательском блоке разрабатываются научно-методические положения по комплексному обоснованию схем перевозок, технологии и организации использования транспортных средств, методические основы совершенствования работы этих средств в условиях рыночных отношений.

В частности, рассматриваются особенности завоза грузов в Арктические районы, экономико-математические модели поэтапного решения оптимизационных задач, методология оценки конкурентоспособности судоходной компании на рынке транспортных услуг, оптимизации использования транспортного флота в условиях неопределенности.

В составе организационного блока представлены материалы по взаимодействию транспортных средств в водотранспортных узлах, организационные структуры управления перевозками на современном этапе в увязке с работой логистических структур и рекомендаций по технологии и организации работы флота при завозе грузов в пункты рек Заполярья.

Планирование работы парокходства может быть приближено к оптимальному, если оно будет основано на применении для решения эксплуатационно-экономических задач современных методов математического моделирования производственных процессов.

Ретроспективный анализ деятельности парокходств (судоходных компаний) показывает, что круг задач, решаемых в каждом из них, достаточно многообразен, однако он характеризуется относительной стабильностью в течение года по количеству решаемых задач и по их содержанию. Все эксплуатационно-экономические задачи можно сгруппировать в три основных направления:

- плановые задачи, доля которых в общем количестве составляет 45-48%;
- учетные 32-35%;
- задачи контроля и анализа 15-20% [2].

При этом плановые задачи занимают доминирующее положение, и порядка 75-80% этих задач относится к классу многовариантных и, следовательно, оптимизационных. Сущность плановых задач состоит в установлении рационального порядка использования имеющихся в судоходных компаниях технических средств (флот, перегрузочная техника), обоснование и внедрение прогрессивных технологий перевозок и производства перегрузочных работ, а также использования транспортного пути с целью обеспечения плановых заданий на перевозку грузов и пассажиров, при наименьших затратах, то есть нахождение оптимальных планов использования ресурсов для конкретных условий работы флота и портов.

В настоящее время плановые задачи решаются с применением метода вариантов, который обладает рядом недостатков. Основные из них следующие:

- количество рассматриваемых вариантов ограничено;
- каждый из вариантов, включаемых в расчет, готовится расчетчиком и, следовательно, не свободен от субъективных признаков;
- нет уверенности в том, что оптимальный вариант использования ресурсов находится среди намеченных для расчетов, а выбранный вариант является оптимальным.

Нейтрализовать перечисленные недостатки возможно, если использовать для решения эксплуатационно-экономических задач идеи теории исследования операций, которые в последние несколько десятилетий подтвердили эффективность в решении управленческих задач. Разработанные методы решения на этой основе позволяют находить оптимальные варианты использования ресурсов путем целенаправленного поиска оптимального плана без перебора всех возможных вариантов.

Применение теории исследования операций для решения эксплуатационно-экономических задач оказываются полезными, если выполняются следующие условия:

- экономико-математическая модель адекватно описывает реальный производственный процесс;
- исходная информация задачи правильно и с достаточной степенью точности характеризует все составляющие параметры задачи, включенные в экономико-математическую модель;
- метод, выбранный для решения поставленной задачи, обеспечивает надежное и достоверное получение результата.

В случае невыполнения в полном объеме или частично какого-либо условия результат решаемой задачи оказывается неудовлетворительным, дискредитируется система получения оптимального решения на базе использования методов математического программирования, что нередко случается в производственной практике из-за неподготовленности операторов к работе с технологией подготовки задачи к решению с использованием теории исследования операций.

Чтобы избежать негативных последствий при подготовке к решению многовариантных задач, решаемых в управлении парокходств (судоходных компаний), предлагается все эксплуатационно-экономические задачи разделить на три основные группы: детерминированные, вероятностные и динамические.

В первую группу задач включаются те, которые имеют строго определенные параметры задачи, работая с которыми в определенной последовательности, можно заранее предопределить исход этой последовательности, уверенно получить объективный результат.

Общий вид таких задач представляется следующей зависимостью [2]

$$\sum_{j \in U} C_j X_j = \text{extr};$$

$$\sum_{j \in U} a_{ij} X_j \leq b_i, \quad i \in J; \quad X_j \geq 0.$$

Во вторую группу включаются задачи, которые могут иметь в исходной информации некоторые параметры, значения которых принимаются с определенной вероятностью. При этом неопределенность может возникнуть в зависимости от действия ряда случайных факторов, иногда предсказуемых заранее, а иногда и неизвестных.

Общий вид таких задач можно описать следующими зависимостями

$$\sum_{j \in U} M[C_j(p) X_j] = \text{extr};$$

$$\sum_{j \in U} a_{ij}(p) X_j \leq b_i(p); \quad i \in J, \quad p \in P; \quad X_j \geq 0.$$

В третью группу входят задачи, в которых один или несколько параметров, описывающих содержание задачи, изменяются во времени.

Общий вид таких задач формулируется следующим образом

$$f_N(x) = \max[C_N(x_N) + f_{N-1}(x - x_N)]; \quad X_j \geq 0.$$

Работа речного транспорта, транспортный процесс в условиях рыночных отношений однозначно признается непостоянным в пространстве и во времени.

В этом случае большая часть плановых задач судоходной компании оказываются во второй или третьей группах задач.

В случае неопределенности и учета возможного риска рекомендуется рассматривать оптимизационные задачи через вероятностные экономико-математические модели. При этом величина или степень риска оценивается по двум показателям: среднее ожидаемое

значение и степень отклонения ожидаемого значения от средней величины.

Оценка степени отклонения ожидаемого значения от средней величины осуществляется исходя из показателей дисперсии и среднего квадратичного отклонения.

Модели динамического программирования при решении оптимизационных многовариантных задач на речном транспорте используются для решения вопросов обновления и пополнения флота и перегрузочной техники, а также при распространении и внедрении в последние годы идей непрерывного планирования во времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Рагулин, И.А. Управление работой речного флота Сибири: проблемы теории и практики / И.А. Рагулин. - Новосибирск: Сибирская издательская фирма Наука, 2003. -308 с.
- 2 Зачёсов, В.П. Математическое моделирование в эксплуатационно-экономических расчетах / В.П. Зачёсов. -Новосибирск: Новосиб инст. инж водн. трансп., 1990. - 112 с.
- 3 Серова, В.А. Новый этап развития транспортной системы Арктики / В.А. Серова // -Север и рынок: формирование рыночного порядка. -2014. -Т.5. -№42. -С. 69-72.
- 4 Концепция развития внутреннего водного транспорта Российской Федерации. -М.: Изд-во «По Волге», 2003. -23 с.
- 5 Комаров, К.Л. Транспортное освоение Сибири: стратегия XXI века / К.Л. Комаров, Е.Б. Кибалов. - Новосибирск: Изд-во Сиб. гос. унив. путей сообщ., 2001. - 30 с.
- 6 Масленников, С.Н. Перспективы водного транспорта в освоении Сибирской Арктики / С.Н. Масленников // -Транспортное дело России. -2017. -№6(133). -С. 122-124.
- 7 Зачесов, А.В. Судходство в ограниченных условиях плавания / А.В. Зачесов. -Новосибирск: Изд-во Новосибир. гос. акад. вод. трансп., 2011. -172 с.
- 8 Сахнов, Д.Ю. Проблемы включения рек Сибири в транспортно-логистическую систему Заполярья / Д.Ю. Сахнов // -Науч. пробл. трансп. Сиб. и Дальн. Вост. -2018. -№1. -С. 44-46.
- 9 Некрасов, Н.А. Экономические проблемы внутреннего водного транспорта и перспективы его развития / Н.А. Некрасов, А.М. Варакса, И.Г.Фюттик // -Идеи и идеалы. -2017. -№3(33). -С. 145-153.

REFERENCES

- 1 I.A. Ragulin. Managing the work of the Siberian river fleet: problems of theory and practice [Upravlenie rabotoy rechnogo flota Sibiri: problemy teorii i praktiki]. Novosibirsk. Sibirskaya izdatel'skaya firma Nauka Publ. 2003. -308 p.
- 2 V.P. Zachesov. Mathematical modeling in operational and economic calculations [Matematicheskoe modelirovanie v ekspluatatsionno-ekonomicheskikh raschetakh]. Novosibirsk. Novosibirsk Inst. Engineers of Water Transp. Publ. 1990. 112 p.
- 3 V.A. Serova. New stage of development of the Arctic transport system [Novyy etap razvitiya transportnoy sistemy Arktiki]. Sever i rynek: formirovanie rynochnogo poriyadka. 2014. Vol. 5. No. 42. pp. 69-72.
- 4 The concept of the Russian Federation inland water transport development [Kontseptsiya razvitiya vnutrennego vodnogo transporta Rossiyskoy Federatsii]. Moscow. Po Volge Publ. 2003. 23 p.
- 5 K.L. Komarov, E.B. Kibalov. Transport development of Siberia: the strategy of the XXI century [Transportnoe osvoenie Sibiri: strategiya XXI veka]. Novosibirsk. Novosibirsk St. Transp. Univ. Publ. 2001. 30 p.
- 6 S.N. Maslennikov. Prospects for water transport in the development of the Siberian Arctic [Perspektivy vodnogo transporta v osvoenii Sibirskoy Arktiki]. Transportnoe delo Rossii. 2017. No. 6(133). pp. 122-124.
- 7 A.V. Zachesov. Navigation under restricted sailing conditions [Sudokhodstvo v ogranichennykh usloviyakh plavaniya]. Novosibirsk. Novosib. St. Acad. of Water Transp. 2011. 172 p.
- 8 D.Yu. Sakhnov. Problems of Siberian rivers incorporation into the logistic transport system of the Arctic Circle [Problemy vkluycheniya rek Sibiri v transportno-logisticheskuyu sistemu Zapolyar'ya]. Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka. 2018. No. 1. pp. 44-46.
- 9 N.A. Nekrasov, A.M. Varaksa, I.G.Fyutik. Economic problems of inland water transport and its development prospects [Ekonomicheskie problemy vnutrennego vodnogo transport i perspektivy ego razvitiya]. Idei i idealy. 2017. No. 3(33). pp. 145-153.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Арктика, Сибирь, водный транспорт, системный подход, организация работы флота
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ: Сахнов Дмитрий Юрьевич, старший преподаватель ФГБОУ ВО «СГУВТ»
ПОЧТОВЫЙ АДРЕС: 630099, г.Новосибирск, ул.Щетинкина, 33, ФГБОУ ВО «СГУВТ»

ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ОПЕРАЦИЙ НА ОБЪЕКТАХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения»

Д.Ю. Гришкова, И.О. Тесленко

WORKFLOW OPTIMIZATION IN RAIL TRANSPORT STRUCTURES

Siberian Transport University (STU) 191, Dusi Koval'chuk St., Novosibirsk, 630049, Russia
Diana Yu. Grishkova (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of STU)
Igor' O. Teslenko (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of STU)

ABSTRACT: Reducing the expenses is a high priority task for every enterprise. This can be achieved through the concept of lean production by organizing the workflow at the principles of optimal occupation and combining the performing operations by the employees.

Keywords: operating costs, working time, load factor, railway station

Сокращение собственных издержек является актуальной задачей для каждого предприятия. Решения этой проблемы может быть достигнуто на основе положений концепции бережливого производства за счет организации трудовой деятельности каждого работника при достижении их оптимальной занятости и совмещении выполняемых операций.

В настоящее время актуальным для деятельности любого предприятия является вопрос

снижения собственных издержек. Собственные издержки можно сократить посредством внедрения положений концепции бережливого производства. В частности – организация трудовой деятельности работников при их оптимальной занятости и совмещении операций, находящихся в пределах компетенции отдельно взятого сотрудника [1, 2].

На железнодорожном транспорте инструментарий бережливого производства вводится с 2010 года. Во многих структурных подразделениях создаются рабочие группы и решаются производственные задачи по сокращению издержек [3].

Рассмотрим оптимальное распределение операций между трудовыми ресурсами на примере железнодорожной станции «Б».

«Б» является привлекательным городом для федеральных торговых операторов, производителей товаров массового спроса по целой сумме параметров. Это второй по численности город Н области, с высоким показателем транзитности.

С точки зрения логистики, «Б» располагается вблизи автомобильной дороги федерального значения, по которой осуществляется перевозка грузов в страны средней Азии.

В настоящее время требуется не только перевезти груз и выдержать срок его доставки, но и осуществить транспортное обслуживание по различным классам качества, минимизируя потери при перевозке и затраты на них. Для этих целей необходимо применять удобные для грузоотправителей и грузополучателей технологии перевозочного процесса, оптимально согласовывать ритмы работы поставщиков, потребителей железнодорожного транспорта и время доставки грузов для конкретных грузоотправителей и грузополучателей, информировать их о продвижении груза, обеспечивать полноту и качество предоставляемых услуг и т.п. в соответствии с законодательством, для достижения максимальной эффективности работы транспорта [4].

На железнодорожной станции «Б» находится 19 путей необщего пользования, которые обслуживаются работниками станции. Оформление документов на перевозку или складское хранение, информирование клиентов о месте нахождения груза, а так же прием самого груза к перевозке выполняет агент системы фирменного транспортного обслуживания (СФТО). Коммерческим осмотром занимается приемосдатчик станции, а формированием и расформированием поездов составители и локомотивная бригада железнодорожной станции.

Рассмотрим возможность сокращения агента СФТО и передачу его функций другим станционным работникам.

С этой целью выполним анализ рабочего времени агента СФТО [5].

Агент СФТО работает по пятидневной рабочей неделе с восьми часов утра до пяти часов вечера.

Агент СФТО на станции «Б» загружен частично, и сумма рабочего времени составляет порядка 3,5 ч в сутки. Коэффициент загруженности агента определяется

$$K_{\text{загр}} = \frac{\sum t_{\text{общ}}}{(t_{\text{раб}} - 1)60} 100\%, \quad (1)$$

где $\sum t_{\text{общ}}$ – количество рабочего времени, мин;

$t_{\text{раб}} - 1$ – количество рабочих часов в день (без обеденного перерыва), ч;

$$K_{\text{агент}}^{\text{загр}} = \frac{210}{(9 - 1)60} 100 = 43,75\%.$$

Уровень загруженности агента составляет меньше половины рабочего времени. Отсюда, следует вывод о возможности передачи его функций другим работникам станции.

Рассмотрим возможность передачи функций агента СФТО приемосдатчику станции. С этой целью выполним анализ его рабочего времени [6-8].

Средняя продолжительность рабочего времени приемосдатчика станции равняется 8,3 ч. Исходя из этого, можно рассчитать уровень загруженности приемосдатчика станции

$$K_{\text{загр}}^{\text{п-сд}} = \frac{502}{(12 - 1)60} 100 = 76,1\%.$$

Уровень загруженности приемосдатчика позволяет взять на себя обязанности агента СФТО и оптимизировать, таким образом, работу станции.

Определим возможность перенесения служебных обязанностей агента СФТО на приемосдатчика станции посредством расчета коэффициента загрузки приемосдатчика, включающего время работы агента

$$K_{загр}^{п-сд} = \frac{502 + 210}{(12-1)60} 100 = 107,9\% > 100\%.$$

Расчеты показывают, что передать выполнение всех операций агента на приемосдатчика не представляется возможным, так как при таком распределении работ загрузка приемосдатчика составит более 100%, а это недопустимо.

Рассмотрим возможность переноса части должностных обязанностей приемосдатчика на составителя поездов. С этой целью проанализируем его загруженность.

Средняя продолжительность рабочего времени составителя станции равна 7,2 ч. Рассчитаем уровень загруженности составителя поездов

$$K_{загр}^{сост} = \frac{437}{(12-1)60} 100 = 66,2\%.$$

Таким образом, можно сделать вывод, что уровень загруженности составителя позволяет вменить ему дополнительные функции.

Выполним перераспределение функций агента СФТО на приемосдатчика станции, а некоторых функций приемосдатчика – на составителя поездов.

В среднем за смену приемосдатчик будет работать 6,8 часов, уровень его загруженности при этом составит

$$K_{загр}^{п-сд} = \frac{406}{(12-1)60} 100 = 61,5\%.$$

Средняя продолжительность рабочего времени составителя поездов станции равняется 9 ч. Его уровень загруженности при этом

$$K_{загр}^{сост} = \frac{539}{(12-1)60} 100 = 81,7\%.$$

Таким образом, можно сделать вывод, что в целях оптимизации работы железнодорожной станции «Б» и сокращения эксплуатационных расходов целесообразно обязанности агента СФТО распределить на приемосдатчика станции, а часть обязанностей приемосдатчика отдать составителю поездов. При этом уровень загруженности приемосдатчика несколько уменьшится (с 76,1% до 61,5%), а уровень загруженности составителя возрастет (с 66,2% до 81,7%).

При расчетах использовались реальные данные фотографии рабочего времени работников станции при максимальном объеме работ. Отсюда можно сделать вывод, что при увеличении объемов работ у приемосдатчика станции есть резерв рабочего времени, у составителя – практически нет. Это нужно учесть в дальнейшем и предпринять меры по сокращению выполнения операций составителем поездов.

В настоящее время тенденция обмена функциями в РЖД набирает обороты. Зачастую иметь большой штат работников на станции экономически не выгодно и станция прибегает к такому методу решения вопроса, разделяя обязанности одного работника на нескольких, тем самым оптимизируя работу станции [9, 10].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Распоряжение Правительства РФ от 17.06.2008 №877-р «О Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года» // СПС «Консультант-Плюс».
- 2 Распоряжение ОАО «РЖД» от 15.08.2012 N 1645р "Об утверждении «Методических рекомендаций об основных функциях инженера по организации и нормированию труда при реализации проекта в области внедрения технологий бережливого производства в структурных подразделениях функциональных филиалов производственного блока ОАО «РЖД»». -32 с.
- 3 ГОСТ Р 56020-2014. Национальный стандарт Российской Федерации. Бережливое производство. Основные положения и словарь. -М.: Стандартиформ, 2014. -37 с.
- 4 Бережливое производство в ОАО «РЖД»: Краткий справочник. -М.: 2012. -66 с.
- 5 Хоменко, Я.В. Формирование системы показателей эффективности как ключевое направление стратегического развития Холдинга / Я.В. Хоменко, С.В. Рачек // -Управление экономическими системами. -2012. - №12(48). -С. 115.

REFERENCES

- 1 The Russian Federation Government Decree of June 17, 2008 No. 877-r "On the strategy for the development of rail transport in the Russian Federation until 2030".
- 2 JSC Russian Railways order of August 15, 2012 №1645r "On Approval of the Instructional Guidelines on the main functions of the job management engineer for the project of implementation of lean manufacturing technologies in the structural divisions of the branches of JSC Russian Railways". 32 p.
- 3 GOST R 56020-2014. Russian National Standard. Lean manufacturing. Main terms and glossary [Natsional'nyy standart Rossiyskoy Federatsii. Berezhlivoe proizvodstvo. Osnovnyye polozheniya i slovar']. Moscow. Standartinform Publ. 2014. 37 p.
- 4 Lean manufacturing in JSC Russian Railways: Quick reference [Berezhlivoe proizvodstvo v ОАО «РЖД»: Kratkiy spravochnik]. Moscow. 2012. 66 p.
- 5 Ya.V. Khomenko, S.V. Rachech. Building up the system of performance indicators as the key direction of the strategic development of the group [Formirovanie sistemy pokazateley effektivnosti kak klyuchevoye napravlenie strategicheskogo razvitiya Kholdinga]. Management of economic systems [Upravlenie ekonomicheskimi sistemami]. 2012. No. 12(48). pp. 115.
- 6 R.I. Khansevyarov. Resource conservation as a factor in in-

6 Хансеев, Р.И. Ресурсосбережение как фактор повышения эффективности производства / Р.И. Хансеев // -Экономика и управление. -2011. -№6(79). -С. 50-53.

7 Шумаев, В.А. Теория и практика ресурсосбережения / В.А. Шумаев. -М.: РУСАЙНС, 2016. -236 с.

8 Чикишев, Д.В. Ресурсосбережение как экономическая категория / Д.В. Чикишев // -Транспортное дело России. -2011. -№3. -С. 118-120.

9 Гольштейн, Г.Я. Основы менеджмента / Г.Я. Гольштейн. -Таганрог: Изд-во Таганрогского радиотехнического ун-та, 2003. -230 с.

10 Галанович, В.А. Вдохновить людей и выстроить системную работу / В.А. Галанович // -Стандарты и качество. -2013. -№10. -С. 6-11.

creasing production efficiency [Resursosberezhenie kak faktor povysheniya effektivnosti proizvodstva]. *Economics and management [Ekonomika i upravlenie]*. 2011. No. 6(79). pp. 50-53.

7 V.A. Shumaev. The theory and practice of resource conservation [Teoriya i praktika resursosberezheniya]. Moscow. RUSAYNS Publ. 2016. 236 p.

8 D.V. Chikishev. Resource-saving as an economic notion [Resursosberezhenie kak ekonomicheskaya kategoriya]. *Transport business of Russia [Transportnoe delo Rossii]*. 2011. No. 3. pp. 118-120.

9 G.Ya. Gol'shteyn. Fundamentals of management [Osnovy menedzhmenta]. Taganrog: Taganrog St. Univ. of Radio Engineering Publ. 2003. 230 p.

10 V.A. Galanovich. Inspire people and build comprehensive work [Vdokhnovit' lyudey i vystroit' sistemnyuyu rabotu]. *Standards and quality [Standarty i kachestvo]*. 2013. No. 10. pp. 6-11.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: эксплуатационные затраты, рабочее время, коэффициент загрузки, железнодорожная станция

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ: Гришкова Диана Юрьевна, канд. техн. наук, доцент СГУПС
Тесленко Игорь Олегович, канд. техн. наук, доцент СГУПС

ПОЧТОВЫЙ АДРЕС: 630049, г.Новосибирск, ул.Д.Ковальчук, 191, СГУПС

ЭФФЕКТИВНОСТЬ АУТСОРСИНГА ЛОГИСТИЧЕСКИХ ИЗДЕРЖЕК

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»

С.Н. Масленников, Е.А. Масленникова

THE EFFICIENCY OF LOGISTICS OUTSOURCING

Siberian State University of Water Transport (SSUWT) 33, Schetinkina St., Novosibirsk, 630099, Russia

Sergey N. Maslennikov (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of SSUWT)

Elena A. Maslennikova (Assoc. Prof. of SSUWT)

ABSTRACT: The authors determined ways of calculating the efficiency of logistics outsourcing, revealed hidden benefits and main risks.

Keywords: outsourcing, logistics, costs

Определены способы расчета эффективности аутсорсинга, дополнительно приведены неявные преимущества и основные риски.

Одним из эффективных способов экономии ресурсов и оптимизации бизнес-процессов является аутсорсинг. Стратегия проникновения аутсорсинга в современный бизнес определяется логикой развития экономики – разделение на бизнес-процессы, концентрация на ключевых сферах деятельности и выделение непрофильных видов деятельности [3, 4]. Как правило, именно непрофильные виды деятельности в первую очередь рассматриваются для передачи под управление аутсорсинговым управлением компаниям. Собственно аутсорсинг это передача некоторых бизнес-функций или частей бизнес-процессов специализированной компании.

Принятие решения о передаче связанных процессов в аутсорсинг тождественны задаче «делать или покупать», широко известной как «Make-or-Buy», которая разрешается как минимум общих затрат.

При подготовке решения о передаче процессов в аутсорсинг как правило рассматриваются вспомогательные и обеспечивающие бизнес-процессы. К таким процессам относятся ИТ-услуги, управление, бухгалтерские услуги, содержание помещений, управление процессами, связанными с логистическими операциями: поставка продукции, складирование, предоставление услуг по сортировке, упаковке и консолидации товара, внутрипроизводственная транспортировка, выбор рационального варианта доставки потребителю, расчеты стоимости доставки груза осуществление расчетов с потребителями груза, контроль продвижения груза, выполнение консалтинговых операций, оформление транспортной и товаросопроводительной и др.

В экономическом смысле вышеназванные издержки относятся к условно постоянным затратам и не зависят от объема конечной продукции. При передаче бизнес-процессов в аутсорсинг условно постоянные издержки в итоге переводятся в переменные.

Затраты на закупку услуги (PC-procurement costs) можно рассчитать по формуле

$$PC = PQ,$$

где P – стоимость единицы ресурса аутсорсера;

Q – потребность в ресурсе (объем этой услуги в физических единицах).

То есть стоимость объема оказанных услуг определяется количеством ресурсов, которые приняты заказчиком, и услуги могут быть оплачены после ее оказания.

Несмотря на привлекательность и простоту, аутсорсинг не получает широкого распространения.

В борьбе менеджеров с устремлениями персонала [5] структурных подразделений по росту издержек, наиболее эффективным способом является бюджетирование по трем финансовым планам: финансовый результат, финансовые потоки и финансовое положение. В практике финансового планирования отработано управление через БДР (бюджет доходов и расходов), БДДС (бюджет движения денежных средств) и контроль активов по ББЛ (бюджет по балансовому листу) [1, 2]. Если введение бюджетирования не приводит к желаемому результату, то есть смысл обратиться к аутсорсингу.

Кроме простой положительной разницы между развивающейся затратами на выполнение процесса самостоятельно и ценой выплачиваемой аутсорсеру должны учитываться следующие факторы.

Положительные:

- увеличение выручки из-за концентрации усилий на ключевой (основной) деятельности;

- доходы от использования высвобождаемого имущества.

Отрицательные:

- затраты на поиск аутсорсера;

- затраты на управление аутсорсингом;

- затраты в переходный период (перевод персонала, единовременные затраты на оборудование и ремонт).

Необходимо учесть вероятность возникновения дополнительных рисков при следующих обстоятельствах:

- при невыполнении плановых объемов реализации продукции может возникнуть задолженность перед аутсорсером;

- недостаточно определенные условия договора;

- низкое качество информации об аутсорсере (финансовое положение, добросовестность);

- возможность утечки информации;

- потеря информации о реальном положении переданных активов;

- совершенствование квалификации чужих работников за свой счет;

- объективно не совпадающие интересы сторон договора аутсорсинга.

Для компенсации возможных отрицательных последствий взаимоотношений с аутсорсером возможно предпринять следующие предупреждающие меры:

- ключевые процессы остаются в компании;

- наблюдение и оценка рынка аналогичных услуг;

- постоянное усовершенствование контрактов.

Однако практика аутсорсинга позволяет достаточно уверенно говорить о достоинствах аутсорсинга:

- экономия издержек и придание им эластичности;

- снижение диктата своего персонала;

- ознакомление с лучшими стандартами узкоспециализированных организаций;

- повышение управляемости при сокращении структур;

- возможность концентрации на ключевых направлениях.

Очевидно, что основанием для возможных проблем будет не само решение, а неправильное заключение и исполнение договора аутсорсинга. Каждая компания принимает решение на границе между процессами, определяющими конечный результат, и процессами, потенциально возможными для передачи в аутсорсинг.

Кроме того, в условиях падающего рынка передача логистических услуг позволяет значительно снизить собственные риски на всех логистических операциях - хранение, транспортировка, дистрибуция, особенно, если при выполнении данных операций задействованы значительные собственные активы.

Таким образом, изложенные выше подходы позволяют корректно рассчитать эффек-

тивность решений при передаче транспортно-логистических операций в аутсорсинг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Терёшина, Н.П. Бюджетирование на железнодорожном транспорте / Н.П. Терёшина, Л.В. Шкурина и др., Под ред. Н.П. Терёшиной, Л.В. Шкурина. -М.: УМЦ ЖДТ, 2010. -292 с.
- 2 Крайнова, В.В. Совершенствование систем калькулирования себестоимости перевозок в управленческом учете судоходных компаний / В.В. Крайнова // -Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. -2015. -№2(30). -С. 171-178.
- 3 Масленникова, Е.А. Управленческий учет бизнес-процесса транспортных услуг промышленного предприятия / Е.А. Масленникова, С.Н. Масленников // -Науч. пробл. трансп. Сиб. и Дал. Вост. -2016. -№3-4. -С. 8-11.
- 4 Семенов, А. Передача логистики нефтегазовых компаний на аутсорсинг / А. Семенов. -Режим доступа: <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/ru/Documents/energy-resources/Russian/ru-Oil-Gas-logistics-outsourcing-2016-rus.pdf>. -01.06.2018 г.
- 5 Портнов, А. Экономим на автотранспорте / А. Портнов. -Режим доступа: <http://www.logistics.ru/transportation/news/ekonomim-na-avtotransporte>. -01.12.2018 г.

REFERENCES

- 1 N.P. Tereshina, L.V. Shkurina. Budgeting for railway transport [Byudzhetrovanie na zheleznodorozhnom transporte]. Moscow. UMTs ZhDT Publ. 2010. 292 p.
- 2 V.V. Kraynova. Improving of self-cost calculation systems for transportation in the shipping companies management accounting [Sovershenstvovanie sistem kal'kulirovaniya sebestoimosti perevozok v upravlencheskom uchete sudokhodnykh kompaniy]. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. 2015. No. 2(30). pp. 171-178.
- 3 E.A. Maslennikova, S.N. Maslennikov. Management accounting of transport services business-process of an industrial enterprise [Upravlencheskiy uchët biznes-protsessa transportnykh uslug promyshlennogo predpriyatiya]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*. 2016. No. 3-4. pp. 8-11.
- 4 A. Semenov. Transfer of oil and gas companies logistics to outsourcing [Peredacha logistiki neftegazovykh kompaniy na outsorsing]. URL: <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/ru/Documents/energy-resources/Russian/ru-Oil-Gas-logistics-outsourcing-2016-rus.pdf>. -01 Jun. 2018.
- 5 A. Portnov. Saving on auto transport [Ekonomim na avtotransporte]. URL: <http://www.logistics.ru/transportation/news/ekonomim-na-avtotransporte>. -01 Jun. 2018.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: аутсорсинг, логистика, издержки

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ: Масленников Сергей Николаевич, канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «СГУВТ»

Масленникова Елена Алексеевна, доцент ФГБОУ ВО «СГУВТ»

ПОЧТОВЫЙ АДРЕС: 630099, г.Новосибирск, ул.Щетинкина, 33, ФГБОУ ВО «СГУВТ»

РАВНОВЕСНАЯ ЦЕНА АВТОМОБИЛЯ В УСЛОВИЯХ КОНКУРЕНЦИИ ЗА ПОТРЕБИТЕЛЯ

ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей
сообщения»

К.Ю. Базылев, М.Е. Корягин, В.Н. Катаргин

EQUILIBRIUM VEHICLE PRICE IN COMPETITIVE ENVIRONMENT FOR THE COSTUMER LOYALTY

Siberian Federal University (SibFU) 79, Svobodny Ave., Krasnoyarsk, 660041, Russia

Siberian Transport University (STU) 191, Dusi Koval'chuk St., Novosibirsk, 630049, Russia

Konstantin Yu. Bazylev (Master's Degree of SibFU)

Mark E. Koryagin (Holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Prof. of STU)

Vladimir N. Katargin (Ph.D. of Engineering Sciences, Prof. of SibFU)

ABSTRACT: The article investigates the sales of budgetary cars in the city of Krasnoyarsk. As the mathematical model of costumer choice, the authors used the most popular discrete logit model, widely applied to various studies. The results concluded that the sales volume is connected not only with the price and the vehicle trim level, but also with the parameters of competing models. The solution to the problem of finding the optimal selling price of a car was found in the Nash equilibrium.

Keywords: car market, game theory, logit model

На примере продажи бюджетных автомобилей исследован выбор марки и модели автомобиля в городе Красноярске. В качестве математической модели выбора использована наиболее популярная дискретная логит-модель, широко используемая в различных исследованиях потребительского выбора. Показано, что объем продажи связан не только с ценой и комплектацией данного автомобиля, но и с параметрами конкурирующих моделей. Решением задачи поиска оптимальной цены продажи автомобиля является равновесие Нэша.

Рынок оказывает существенное влияние на развитие капиталистической экономики. Конкуренция является главным двигателем развития автомобилестроения. Для рынка можно определить, насколько в нем сильна конкуренция. В [1] отмечено, что уровень конкуренции на автомобильном рынке определяется: уровнем концентрации; наличием барьеров и ограничений конкуренции. В результате на российском рынке в настоящее время наблюдается высокий уровень конкуренции.

Автомобильный рынок состоит из производителей дистрибьюторов и дилеров [2], причем взаимодействие этих агентов в [2] описывается с помощью теории кооперативных игр. Вопрос взаимодействия дилеров и производителей также рассмотрен в [3], где одним из

важных вопросов является удержание клиента.

Автомобильный рынок сегментирован в зависимости от типа автомобилей [4]. При этом показано, что производитель для поддержания устойчивости бизнеса должен со своими моделями одновременно присутствовать в нескольких сегментах. Также в [4] отмечено, что неизбежным является глобализация автомобильного рынка.

При анализе автомобильного рынка в первую очередь необходимо изучить предпочтения клиентов. В [4] предпочтения клиентов значительно отличаются в зависимости от рассматриваемого сегмента.

При этом основным инструментом для оценки эластичности спроса являются дискретные логит-модели (в частности, вложенные логит-модели) [3-6]. Отличие данных работ заключается в том, что были исследованы рынки различных территорий, выбраны разные модели автомобилей и их характеристики. При этом в [5] большое внимание уделено марке автомобиля и демографическим особенностям клиентов. В частности в [6] отмечено, что уровень доходов является главным фактором, влияющим на эластичность спроса.

Взаимодействие дилера и клиента рассмотрено [5] с помощью теории переговоров Нэша [7], при этом модель показала высокую точность. В [8] дилер и клиент выстраивают долгосрочные отношения, связанные с приверженностью одной премиальной марке, и вопрос стимулирование продаж решается за счет развития «trade in».

В данной работе рассмотрим лишь бюджетный сегмент российского рынка. Различие комплектация одной и той же модели может переводить автомобиль в разные ценовые сегменты, поэтому целесообразно в дальнейшем исследовании не ограничиваться заданными ценовыми рамками. В настоящее время уже недостаточно просто выбрать марку автомобиля перед покупкой, необходимо определиться с еще одним, не менее важным аспектом покупки – комплектацией.

Для бюджетных автомобилей технические характеристики имеют большее значение, чем дизайн. В частности можно рассмотреть следующие характеристики и их единицы измерения: стоимость; мощность двигателя; тип трансмиссии; расход топлива; дорожный просвет; объем багажника; подушки безопасности; кондиционер; электростеклоподъемники; климат-контроль; подогрев сидений. В данной работе была выбрана 41 модель бюджетных автомобилей (таблица 1).

Таблица 1 – Модели автомобилей и их комплектации

№	Модель	Количество проданных автомобилей, шт.	Цена на 30.11.2017, тыс. руб.	Мощность, л.с.	Коробка передач (1-автоматическая, 0-механическая)	Расход топлива в смешанном цикле, л/100 км	Дорожный просвет, мм	Объем багажника, л	Airbag (0-нет, 1-водитель, 2-передние, 3-все+дополнительные)	Кондиционер (0-нет, 1-есть)	Электростеклоподъемники (0-нет, 1-передние, 2-все)	Климат-контроль (0-нет, 1-есть)	Подогрев сидений (0-нет, 1-есть)
1	Lada priora 21705	273	448,6	106	0	6,9	165	430	1	0	1	0	0
2	Lada granta 21901	679	389,9	87	0	6,6	160	480	1	0	0	0	0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
41	Solaris 1.6 MT SD HCR Comfort 123	51	779,9	123	0	6,5	160	480	2	1	2	0	1

Математическая модель выбора автомобиля. На выбор автомобиля влияет множество факторов, при этом на решение клиента влияют параметры всех других автомобилей.

Фактическая вероятность выбора марки и модели автомобиля, должна быть посчитана по данным реального спроса [5]. Пусть за рассматриваемый период было продано $N_{k,l}$ автомобилей соответствующей марки и модели тогда доля рынка данной модели

$$p_{k,l} = \frac{N_{k,l}}{\sum_{m=1}^K \sum_{s=1}^{L_m} N_{m,s}}.$$

Логит модель выбора автомобиля [1, 6, 7]

$$\hat{p}_{k,l} = \frac{\exp\left(C_k^0 - aP_{k,l} + \sum_{i=0}^n c_i x_i^{k,l}\right)}{\sum_{m=1}^K \sum_{s=1}^{L_m} \exp\left(C_m^0 - aP_{m,s} + \sum_{i=0}^n c_i x_i^{m,s}\right)}.$$

Задача поиска параметров модели определяется по методу максимального правдоподобия [6]. Однако для построения модели взаимодействия дилера и клиента вводится целевая функция клиента [9]. Таким образом, клиент становится участником игры [9]

$$\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^{L_k} (\hat{p}_{k,l} - p_{k,l})^2 \rightarrow \min;$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^{L_k} \left(\frac{\exp\left(C_k^0 - aP_{k,l} + \sum_{i=0}^n c_i x_i^{k,l}\right)}{\sum_{m=1}^K \sum_{s=1}^{L_m} \exp\left(C_m^0 - aP_{m,s} + \sum_{i=0}^n c_i x_i^{m,s}\right)} - \frac{N_{k,l}}{\sum_{m=1}^K \sum_{s=1}^{L_m} N_{m,s}} \right)^2 \rightarrow \min.$$

Вероятность продажи автомобилей с достаточно высокой точностью совпадает с реальными, однако, точность параметров модели невысока в связи с тем, что не проведено обследование демографических показателей клиентов, исследована небольшая часть рынка Красноярска, не всех марок и не учитывались продажи подержанных автомобилей.

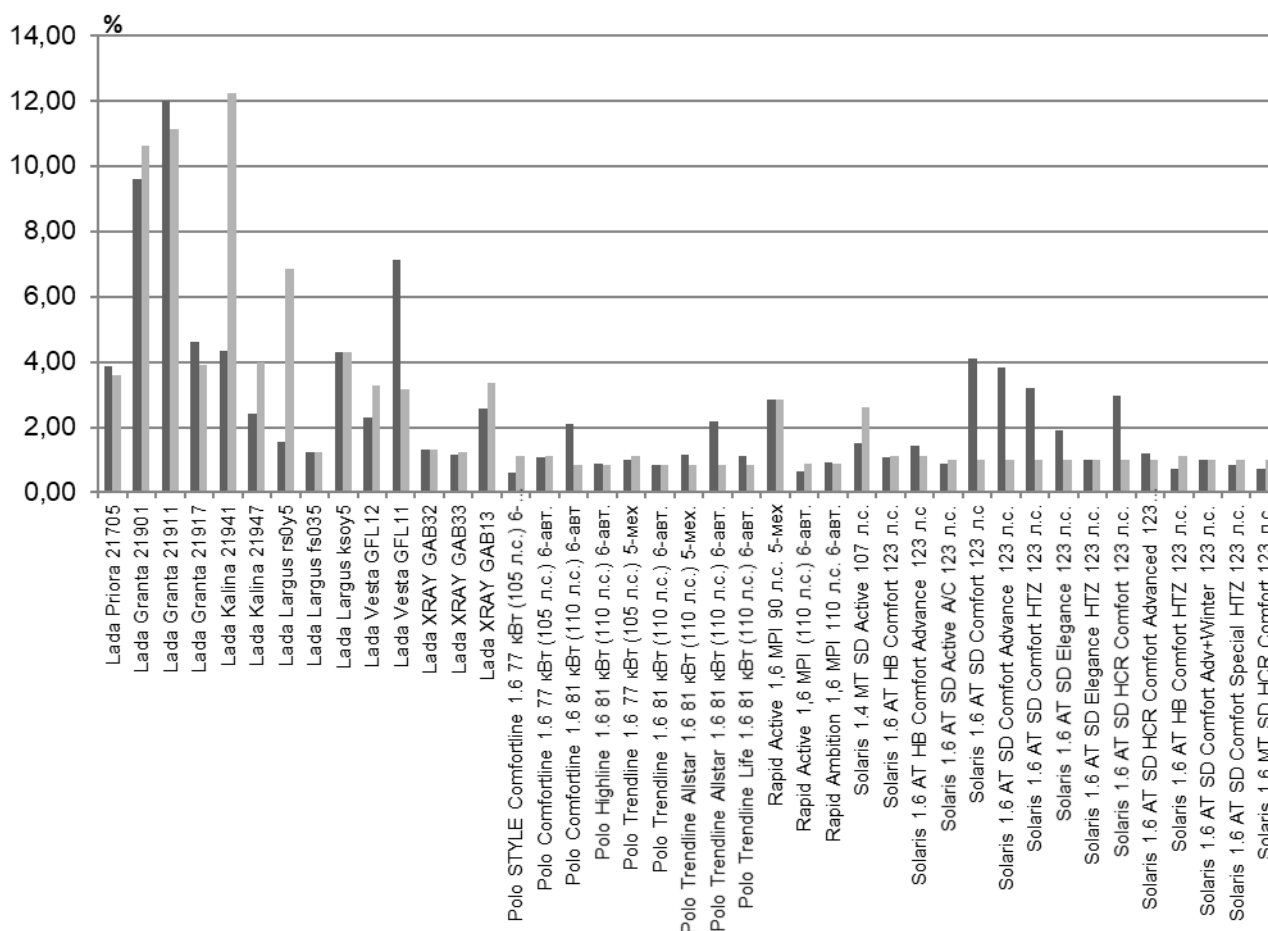


Рисунок 1 – Модельный и фактический объем продаж различных моделей, %: левый столбец-доля рынка; правый столбец-вероятность выбора автомобиля

Модель автомобильного рынка. Самой распространенной математической моделью конкурентного рынка является равновесие Нэша [10].

Для каждого производителя целью является поиск оптимальной цены продажи автомобиля. Снижение цены приводит к росту объема продаж, но снижению прибыли от продажи каждого автомобиля. Рост цены увеличивает прибыль с продажи каждого автомобиля, но снижает объем продаж.

Пусть $P_{k,l}^0$ себестоимость производства соответствующей модели.

Тогда прибыль от продажи автомобилей марки

$$\sum_{l=1}^{L_m} (P_{k,l} - P_{k,l}^0) N_{k,l} ; \sum_{l=1}^{L_m} N(P_{k,l} - P_{k,l}^0) \frac{\exp\left(C_k^0 - aP_{k,l} + \sum_{i=0}^n c_i x_i^{k,l}\right)}{\sum_{m=1}^{L_m} \sum_{s=1}^{L_m} \exp\left(C_m^0 - aP_{m,s} + \sum_{i=0}^n c_i x_i^{m,s}\right)} \rightarrow \max.$$

Так как нам доподлинно неизвестна себестоимость производства каждой модели, то мы можем решить обратную задачу. Пусть производители нашли оптимальные цены на рынке, то есть цены являются равновесными по Нэшу. Тогда предлагается решить обратную задачу. Какова себестоимость производства, если цена продажи находится в рыночном равновесии?

$$F_k = \sum_{l=1}^{L_m} N(P_{k,l} - P_{k,l}^0) \frac{\exp\left(C_k^0 - aP_{k,l} + \sum_{i=0}^n c_i x_i^{k,l}\right)}{\sum_{m=1}^{L_m} \sum_{s=1}^{L_m} \exp\left(C_m^0 - aP_{m,s} + \sum_{i=0}^n c_i x_i^{m,s}\right)} \rightarrow \max.$$

Задача сводится к решению системы уравнений

$$\frac{\partial F_k}{\partial P_{k,l}} = 0.$$

Взяв частные производные, получим

$$\frac{\partial F_k}{\partial P_{k,l}} = N \frac{\exp\left(C_k^0 - aP_{k,l} + \sum_{i=0}^n c_i x_i^{k,l}\right)}{\sum_{m=1}^{L_m} \sum_{s=1}^{L_m} \exp\left(C_m^0 - aP_{m,s} + \sum_{i=0}^n c_i x_i^{m,s}\right)} \left\{ 1 - a(P_{k,l} - P_{k,l}^0) \left[1 - \frac{\exp\left(C_k^0 - aP_{k,l} + \sum_{i=0}^n c_i x_i^{k,l}\right)}{\sum_{m=1}^{L_m} \sum_{s=1}^{L_m} \exp\left(C_m^0 - aP_{m,s} + \sum_{i=0}^n c_i x_i^{m,s}\right)} \right] \right\} -$$

$$- \sum_{\substack{s=1 \\ s \neq l}}^{L_m} N(P_{k,s} - P_{k,s}^0) \frac{\exp\left(C_k^0 - aP_{k,s} + \sum_{i=0}^n c_i x_i^{k,s}\right) \exp\left(C_k^0 - aP_{k,l} + \sum_{i=0}^n c_i x_i^{k,l}\right)}{\sum_{m=1}^{L_m} \sum_{t=1}^{L_m} \exp\left(C_m^0 - aP_{m,t} + \sum_{i=0}^n c_i x_i^{m,t}\right)} = 0.$$

Для упрощения задачи положим, что решается задача оптимизации цены для каждой модели отдельно, тогда система уравнений упрощается

$$\frac{\partial F_k}{\partial P_{k,l}} = N \frac{\exp\left(C_k^0 - aP_{k,l} + \sum_{i=0}^n c_i x_i^{k,l}\right)}{\sum_{m=1}^{L_m} \sum_{s=1}^{L_m} \exp\left(C_m^0 - aP_{m,s} + \sum_{i=0}^n c_i x_i^{m,s}\right)} \left\{ 1 - a(P_{k,l} - P_{k,l}^0) \left[1 - \frac{\exp\left(C_k^0 - aP_{k,l} + \sum_{i=0}^n c_i x_i^{k,l}\right)}{\sum_{m=1}^{L_m} \sum_{s=1}^{L_m} \exp\left(C_m^0 - aP_{m,s} + \sum_{i=0}^n c_i x_i^{m,s}\right)} \right] \right\} = 0.$$

Что эквивалентно

$$1 - a(P_{k,l} - P_{k,l}^0) \left[1 - \frac{\exp\left(C_k^0 - aP_{k,l} + \sum_{i=0}^n c_i x_i^{k,l}\right)}{\sum_{m=1}^{L_m} \sum_{s=1}^{L_m} \exp\left(C_m^0 - aP_{m,s} + \sum_{i=0}^n c_i x_i^{m,s}\right)} \right] = 0,$$

или

$$P_{k,l}^0 = P_{k,l} - \frac{\sum_{m=1}^{L_m} \sum_{s=1}^{L_m} \exp\left(C_m^0 - aP_{m,s} + \sum_{i=0}^n c_i x_i^{m,s}\right)}{a \sum_{m=1}^{L_m} \sum_{\substack{s=1 \\ s \neq l}}^{L_m} \exp\left(C_m^0 - aP_{m,s} + \sum_{i=0}^n c_i x_i^{m,s}\right)}.$$

Результаты расчета себестоимости и прибыли моделей автомобилей представлены на гистограмме (рисунок 2).

Таким образом, можно оценить себестоимость производства автомобилей конкурирующих марок и выстроить политику в области корректировки цен.

Заключение. Целью данной работы является построение теоретико-игровой модели рынка продаж новых бюджетных автомобилей. Конкуренция моделей и марок автомобилей основана на математической модели принятия решений клиентами. Модель принятия решений основана на дискретной логит-модели широко применяемой в зарубежной литературе.

Построенная математическая модель позволяет рассчитать оптимальную цену продажи

автомобилей в условиях конкуренции, что позволить максимизировать прибыль в цепочке дилер, поставщик, производитель.

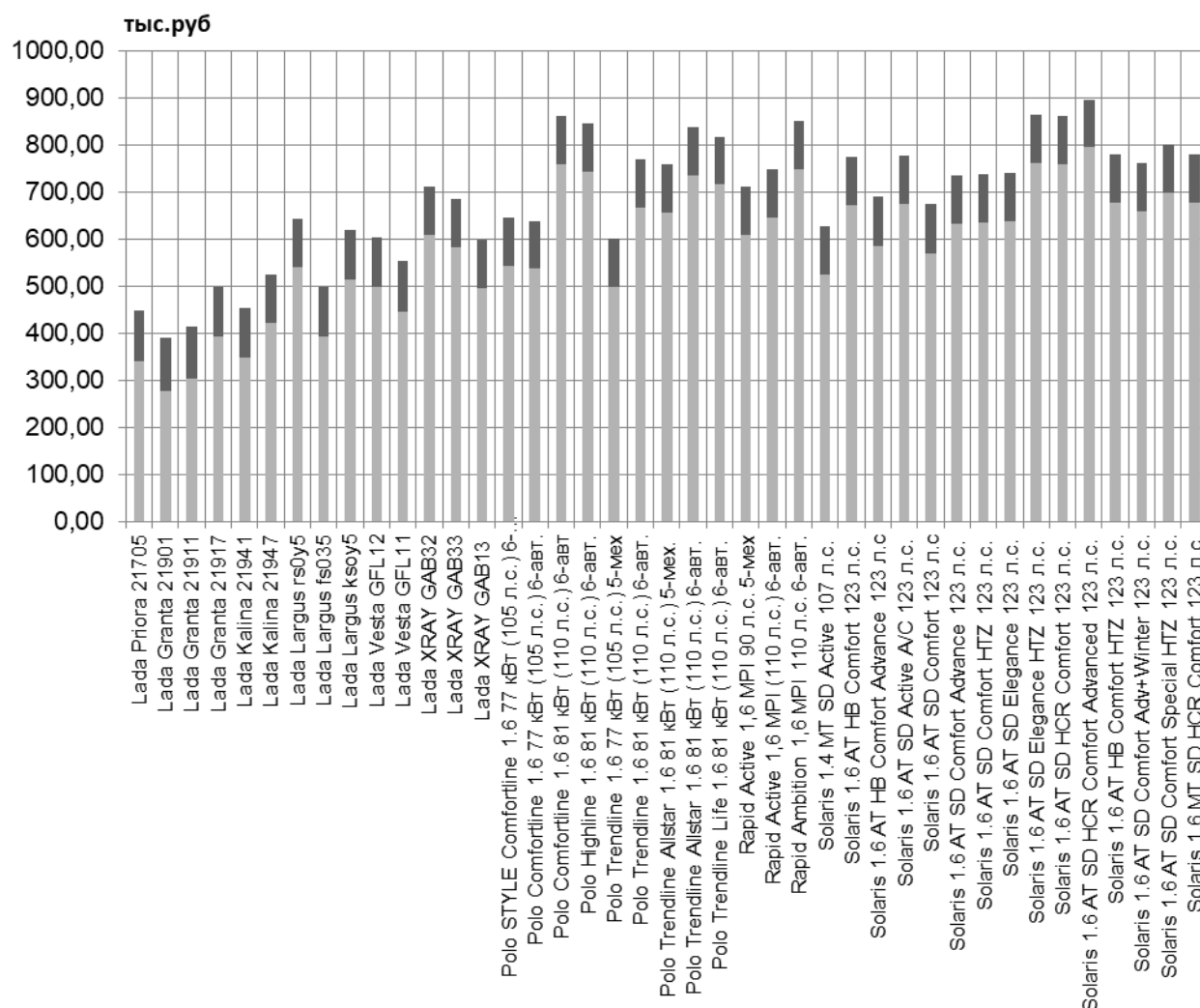


Рисунок 2 – Модель автомобильного рынка, тыс. руб.: нижний столбец-себестоимость автомобиля; верхний столбец-прибыль от продажи автомобиля

Дальнейшие исследования необходимо направить по следующим направлениям: применение вложенных логит-моделей для учета различных вариантов сегментации автомобилей и клиентов; учет демографических показателей клиентов; увеличение количества моделей и объемы выборки; учет взаимодействия производителя, поставщика и дилера и т.д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Подхалюзина, В.А. Научно-методические положения оценки конкуренции на автотранспортном рынке / В.А. Подхалюзина, М.А. Дрейцен // -Транспортное дело России. -2017. - №1. -С. 57-58.
- 2 Саная, А.Г. Моделирование адаптивной ценовой политики при реализации процессов ситуационного управления в дилерской сети предприятий автомобильной промышленности / А.Г. Саная // -Промышленные АСУ и контроллеры. -2013. -№11. -С. 7-15.
- 3 Verhoef, P.C. Understanding brand and dealer retention in the new car market: The moderating role of brand tier / P.C. Verhoef, F. Langerak, B. Donkers // -Journal of retailing. -2007. - Vol. 83. -No. 1. -P. 97-113.
- 4 Abraham, R. Theoretical Model of Competitive Equilibria in the New Car Market / R. Abraham, M.W. Zikiye, C.A. Harrington // -Theoretical Economics Letters. -2015. -Vol. 5. -No. 2. -C. 196.
- 5 Chen, Y. A simultaneous model of consumer brand choice and negotiated price / Y. Chen, S. Yang, Y. Zhao // - Management science. -2008. -Vol. 54. -No. 3. -P. 538-549.
- 6 Jaumandreu, J. The demand for cars: a discrete choice

REFERENCES

- 1 V.A. Podkhalyuzina, M.A. Dreytsen. Research and methodological framework for assessing competition in the automotive market [Nauchno-metodicheskie polozheniya otsenki konkurentssii na avtotransportnom rynke]. *Transport business of Russia [Transportnoe delo Rossii]*. 2017. No. 1. pp. 57-58.
- 2 A.G. Sanaya. Modeling of market adaptive pricing in the implementation of processes of situational management in the dealer network of enterprises of the automotive industry [Modelirovanie adaptivnoy tsenovoy politiki pri realizatsii protsessov situatsionnogo upravleniya v dilerskoy seti predpriyatiy avtomobil'noy promyshlennosti]. *Industrial automatic control systems and controllers [Promyshlennye ASU i kontrolyery]*. 2013. No.11. pp. 7-15.
- 3 P.C. Verhoef, F. Langerak, B. Donkers. Understanding brand and dealer retention in the new car market: The moderating role of brand tier. *Journal of retailing*. 2007. Vol. 83. No. 1. pp. 97-113.
- 4 R. Abraham, M.W. Zikiye, C.A. Harrington. Theoretical Model of Competitive Equilibria in the New Car Market. *Theoretical Economics Letters*. 2015. Vol. 5. No. 02. pp. 196.
- 5 Y. Chen, S. Yang, Y. Zhao. A simultaneous model of con-

model with income effects / J. Jaumandreu, M. Moral. -Mimeo, 2001. -26 p.

7 Nash, J. Two-person cooperative games / J. Nash // -Econometrica: Journal of the Econometric Society. -1953. -C. 128-140.

8 Koryagin, M.E. New premium cars sales promotion based on the system of pre-owned cars sales to loyal customers / M.E. Koryagin // -Journal of Applied Engineering Science. -2017. -Vol. 15. -No. 1. -P. 1-8.

9 Koryagin, M. Optimization of the road capacity and the public transportation frequency which are based on logit-model of travel mode choice / M. Koryagin, A. Dekina // International Conference on Information Technologies and Mathematical Modelling. -Springer: Cham, 2014. -P. 214-222.

10 Glicksberg, I.L. A further generalization of the Kakutani fixed theorem, with application to Nash equilibrium points / I.L. Glicksberg // -Proceedings of the American Mathematical Society. -1952. -Vol. 3. -No. 1. -P. 170-174.

sumer brand choice and negotiated price. *Management science*. 2008. Vol. 54. No. 3. pp. 538-549.

6 J. Jaumandreu, M. Moral. The demand for cars: a discrete choice model with income effects. -Mimeo, 2001. 26 p.

7 J. Nash. Two-person cooperative games. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*. 1953. pp. 128-140.

8 M.E. Koryagin. New premium cars sales promotion based on the system of pre-owned cars sales to loyal customers. *Journal of Applied Engineering Science*. 2017. Vol. 15. No. 1. pp. 1-8.

9 M. Koryagin, A. Dekina. Optimization of the road capacity and the public transportation frequency which are based on logit-model of travel mode choice. International Conference on Information Technologies and Mathematical Modelling. Springer, Cham. 2014. pp. 214-222.

10 I.L. Glicksberg. A further generalization of the Kakutani fixed theorem, with application to Nash equilibrium points. *Proceedings of the American Mathematical Society*. 1952. Vol. 3. No. 1. pp. 170-174.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: автомобильный рынок, теория игр, логит-модель

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ: Базылев Константин Юрьевич, магистрант СФУ

Корягин Марк Евгеньевич, докт. техн. наук, профессор СГУПС

Катаргин Владимир Николаевич, канд. техн. наук, профессор СФУ

ПОЧТОВЫЙ АДРЕС: 660075, г.Красноярск, пр.Свободный, 79, СФУ

630049, г.Новосибирск, ул.Д.Ковальчук, 191, СГУПС

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАРШРУТНОЙ СЕТИ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ГОРОДА С МАНХЭТТЕНСКОЙ МЕТРИКОЙ

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения»

ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный сельскохозяйственный институт»

М.Е. Корягин, А.С. Березина

SIMULATION OF THE ROUTE NETWORK OF THE RECTANGULAR CITY WITH TAXICAB GOMETRY

Siberian Transport University (STU) 191, Dusi Koval'chuk St., Novosibirsk, 630049, Russia

Kemerovo State Agricultural Institute (FSBEI HE Kemerovo SAI) 5, Markovtseva St., Kemerovo, 650056, Russia

Mark E. Koryagin (Holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences of STU)

Anna S. Berezina (Lecturer of FSBEI HE Kemerovo SAI)

ABSTRACT: This paper considers the issues related to the assessment of the complexity of the compilation of route networks and their characteristics, depending on the size of the city. The resulting model of the transport system does not consider the nuances of specific cities but shows common problems in the design and use of the route network.

Keywords: route network, urban transportation network, mathematical modeling

Рассмотрены вопросы, связанные с оценкой сложности составления маршрутных сетей и их характеристик в зависимости от размера города. Полученная модель транспортной системы не учитывает нюансы конкретных городов, но показывает общие проблемы в проектировании и использовании маршрутной сети.

Маршрутная сеть общественного транспорта является основой транспортной системы крупных городов. Потребности пассажиров с течением времени меняются, строятся/закрываются предприятия, жилье, культурно-бытовые объекты, меняется уровень автомобилизации и подвижность населения.

При этом маршрутная сеть также корректируется, то есть сеть следует за спросом. Так как большинство крупных городов увеличивается в размерах, то корректировка маршрутной сети заключается в открытии новых маршрутов и корректировки существующих.

Но наступает момент, когда администрация города понимает, что такая откорректированная сеть не может отвечать потребностям города [1]. В таких случаях происходит серьезное перестроение сети, как правило, связанное с сокращением количества маршрутов.

Решится на серьезное изменение маршрутной сети могут только сильные руководители [1]. Поэтому во многих городах имеется большой потенциал улучшения работы городского пассажирского транспорта с помощью перестройки маршрутной сети.

В данной работе рассматривается модель города. Поэтому рассмотрим, как описывается форма городов в разных источниках.

Самой простой моделью является город-линия [2-4]. Подобного рода подход позволяет

описать процесс перемещения населения между центром и окраинами города. Причем в [5] рассматривается вопрос формирования дополнительных центров при росте длины города, что связано с неэффективностью транспортной системы в крупных моноцентричных городах, поэтому большинство крупных городов являются мегаполисами (транспортные проблемы Москвы в том числе связаны с моноцентричностью).

В работе [6] сделана попытка численно описать планировку (сетчатый узор) каждого города в зависимости от формы, размеров кварталов и их однородности. В статье показано сходство и различие планировок американских и европейских городов. при этом даже районы Нью-Йорка непохожи друг на друга (только Стейтен-Айленд и Бронкс имеют сходную структуру).

Форма кварталов тесно связана со структурой улично-дорожной сети. Исследование [7] включает в себя семь различных сетевых структур: линейная, ветвистая (в форме дерева), прямоугольная сетка (манхэттенская), трехмерная сетка (с диагональными элементами), однокольцевая паутина, двухкольцевая паутина и радиальная (лучевая). Эти структуры были выбраны, поскольку они представляют как реальные, так и теоретические сети.

Численные характеристики маршрутной сети [8]: цикломатическое число, первое число бета, и степень связности.

Цикломатическое число подсчитывает число циклов, добавленное к основному дереву дорожной сети. Чем больше циклов, тем больше альтернатив при выборе маршрута передвижения. Число бета показывает отношение количества дуг к количеству узлов (в частности для ветвистой сети параметр меньше единицы). Степень связанности показывает отношения количества дуг к максимально возможному в данной сети (в планарном графе это количество значительно меньше). С точки зрения этих показателей наилучшей является двухкольцевая сеть. На втором месте с примерно одинаковыми показателями находятся кольцевая, трехмерная сеть и прямоугольная сеть.

Однако модель с кольцами является довольно сложной для моделирования. Поэтому для описания города используется прямоугольная сеть.

В крупных городах основная нагрузка при перемещении населения лежит на общественном транспорте. Маршруты общественного транспорта классифицируются следующим образом [9]: диаметральный; радиальный; полудиаметральный; вылетной; тангенсальный; кольцевой; периферийный.

Маршруты пассажирского транспорта также образуют свою сеть, структура которой связана со структурой улично-дорожной сети города.

Основными показателями, характеризующими маршрутную сеть, являются плотность сети путей сообщения, прямолинейность сообщения, степень сложности узла, степень разветвленности и др. [9]. Однако более важной характеристикой является время передвижения, которое связано со скоростью движения транспорта и временем ожидания. Для улучшения этих показателей необходимо концентрировать пассажиропотоки на некоторых направлениях и использовать скоростные трамваи и автобусы, метро и т.д. [1].

Задача построения эффективных маршрутов движения городского общественного транспорта (ГОТ) относится к классу задач комбинаторной оптимизации и является NP-трудной. Методов нахождения их точных решений и проверки приближенных на оптимальность за конечное время не существует. На сегодняшний день наибольший интерес представляют эвристические и метаэвристические методы [10].

Целью данной работы является построение модели маршрутной сети общественного транспорта на планарном графе. Модель маршрутной сети позволит определять наиболее эффективные варианты функционирования транспорта в зависимости от размеров города. Модель сможет показать общие тенденции в развитии транспорта, которые связаны с ростом размеров города по одной или двум осям координат.

Для упрощения задачи будем рассматривать маршруты связывающие угловые районы прямоугольного города. В этом случае будут присутствовать только диаметральные, тангенсальные и периферийные маршруты.

На примере города 3 на 3 [11] рассмотрим варианты маршрутов.

Таким образом, маршруты второго и третьего типов являются диаметральными, а маршруты первого типа периферийными.

Маршрутная сеть метро построена по другому принципу. Возможность бесплатной пересадки позволяет сократить количество маршрутов. В настоящее время на любых маршрутах возможно использование различных систем оплаты проезда, поэтому бесплатная пере-

садка может быть организована и на автобусных маршрутах [1].

Предложим следующую модель маршрутной сети, состоящую из вертикальных и горизонтальных линий. Данная сеть обеспечивает беспересадочную перевозку небольшой части населения, при этом для других пассажиров достаточно будет один раз сменить линию, чтобы достичь места назначения.

Таким образом, два маршрута являются диаметральными, а четыре тангенсальными. При этом если убрать любые две вертикальные или горизонтальные (не смешивая их), то все пассажиры получат возможность добраться до места назначения не более чем с двумя пересадками.

Общая модель маршрутной сети. Воспользовавшись комбинаторными формулами, получим основные характеристики маршрутной сети. Проведем оценку количества возможных маршрутов для каждого типа маршрутных сетей в зависимости от размеров города. Рассмотрим город размером $M \times N$. В первую очередь рассчитаем количество линий метро (рисунок 4)

Количество автобусных маршрутов

$$\frac{(M-1+N-1)!}{(M-1)!(N-1)!}.$$

Также рассмотрим, сколько прямых автобусных маршрутов может использовать пассажир при перемещении между районами (i, j) и (k, l) (при этом предположим что $i < k$ и $j < l$).

Маршруты состоят из трех частей:

- между районами $(1, 1)$ и (i, j) ;
- между районами (i, j) и (k, l) ;
- между районами (k, l) и (M, N) .

Получим количество маршрутов с помощью комбинаторики

$$\frac{(i-1+j-1)!(k-i+l-j)!(M-k+N-l)!}{(i-1)!(j-1)!(k-i)!(M-k)!(l-j)!(N-l)!}.$$

Общее количество пассажиропотоков в городе (учитывая то, что пассажиропотоки в пределах одного района не рассматриваются)

$$NM(NM-1).$$

Предположим, что все пассажиропотоки равны λ , тогда общий пассажиропоток в городе составит λNM . Для схемы метро не все пассажиры могут перемещаться без пересадок. Только те, кто перемещаются по одной линии, а их количество равно

$$N(N-1)M + M(M-1)N = NM(N+M-2).$$

То есть вероятность перемещаться без пересадок

$$\frac{N+M-2}{NM-1}$$

Количество перегонов в городе составит

$$2NM - N - M.$$

Среднее расстояние перемещения в таком городе составит (количество перегонов)

$$\frac{M}{3} + \frac{N}{3}.$$

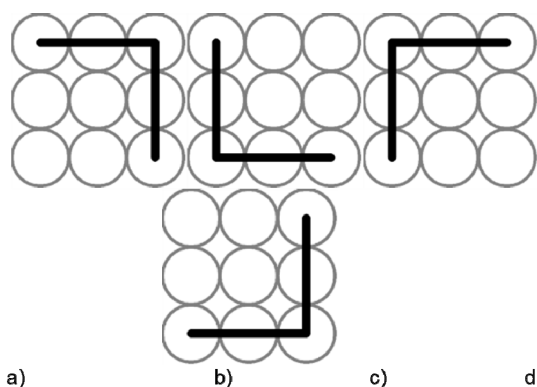


Рисунок 1 – Первый тип маршрутов

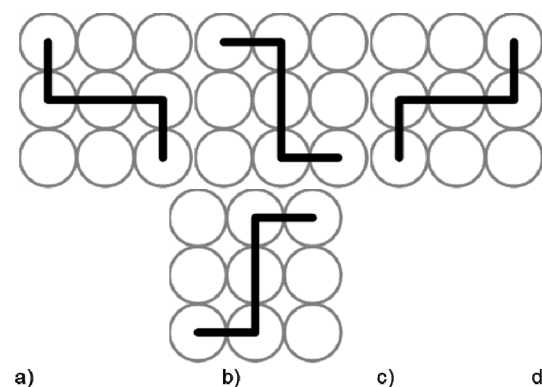


Рисунок 2 – Второй тип маршрутов

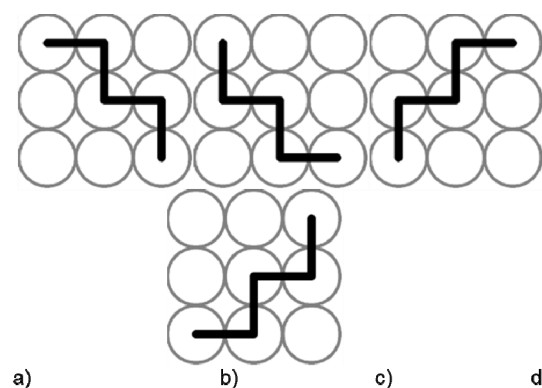


Рисунок 3 – Третий тип маршрутов

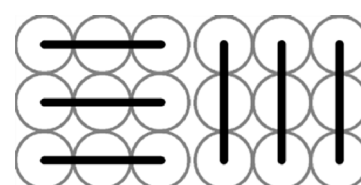


Рисунок 4 – Четвертый тип маршрутов $M+N$

Средний поток пассажиров через перегон составит

$$\frac{N+M}{3} \frac{\lambda NM}{2NM - N - M}.$$

Количество пассажиропотоков, которые обслуживает каждый маршрут $(M+N-1)(M+N-2)$.

Минимальное гипотетическое количество маршрутов без пересадки перевозящих все пассажиропотоки (данная формула является оценкой снизу, если у маршрутов не будет общих пассажиропотоков)

$$\frac{NM(NM-1)}{(M+N-1)(M+N-2)}.$$

В таблице представлены основные показатели для городов разных размеров.

Таблица – Характеристики маршрутных сетей

M	N	Количество маршрутов метро	Количество автобусных маршрутов	Количество пассажиропотоков	Оценка снизу количества беспересадочных маршрутов	Средний пассажиропоток вдоль перегона
2	2	4	4	12	2	$1,33\lambda$
3	3	6	12	72	3,6	$1,50\lambda$
4	4	8	40	240	5,7	$1,78\lambda$
5	5	10	140	600	8,3	$2,08\lambda$
6	6	12	504	1260	11,5	$2,40\lambda$
7	7	14	1848	2352	15,1	$2,72\lambda$
2	7	9	14	182	3,3	$2,21\lambda$
3	7	10	56	420	5,8	$2,19\lambda$
4	7	11	168	756	8,4	$2,28\lambda$
5	7	12	420	1190	10,8	$2,41\lambda$
6	7	13	924	1722	13	$2,56\lambda$
20	20	40	70690527600	159600	107,7	$7,02\lambda$

Вернемся к простейшей модели из 9 районов и сравним основные характеристики маршрутных сетей. Длина каждого из 6 маршрута метро составит 2 перегона. Длина каждого из 12 автобусных маршрута составит 4 перегона. Подобная сеть рассмотрена в [11].

Оценка снизу количества беспересадочных маршрутов

$$\frac{3 \cdot 3 \cdot (3 \cdot 3 - 1)}{(3 + 3 - 1)(3 + 3 - 2)} = 3,6.$$

Однако, не существует маршрутных сетей, содержащих только 4 или 5 маршрутов обеспечивающих беспересадочное перемещение пассажиров.

Из 12 маршрутов можно составить $2^{12} - 1$ маршрутных сетей (исключая пустое множество). Перебрав все варианты можно получить 20 вариантов маршрутных сетей содержащих по 6 маршрутов и обеспечивающих беспересадочное перемещение всех пассажиров.

При этом в этих 20 сетях чаще всего встречаются маршруты первого типа, а реже всего маршруты третьего типа.

Примеры сетей:

- рисунок 1a, 1b, 1c, 1d; рисунок 2a, 2d;
- рисунок 1a, 1c, 1d; рисунок 2b, 2d; рисунок 3b;
- рисунок 1b, 1c, 1d; рисунок 2b, 2c, 2d; рисунок 3d;
- рисунок 1a, 1c, 1d; рисунок 2c, 2d; рисунок 3b;
- рисунок 1c, 1d; рисунок 2c, 2d; рисунок 3a, 3b;

Вопрос генерации маршрутной сети большого города является открытым из-за большого количества маршрутов и, соответственно, большого количества маршрутных сетей незначительно отличающихся друг от друга, перебрать которые невозможно даже с помощью вычислительной техники. Поэтому вопрос генерации беспересадочной маршрутной сети является темой дальнейших исследований.

Заключение. В статье рассмотрен вопрос моделирования транспортной сети города. Необходимость данной модели продиктована сложностью разработки общих подходов к управлению городскими транспортными системами, так как города имеют значительные от-

личия, а сбор информации для крупных городов является затратным мероприятием.

Рассмотрена модель прямоугольного города с манхэттенской метрикой. С помощью комбинаторных формул получены основные характеристики маршрутных сетей метро и беспересадочных автобусных маршрутов.

Дальнейшие исследования связаны с применением данного подхода при моделировании развития городов. Расчет модельных примеров различных систем управления городским пассажирским транспортом позволит определить оптимальные механизмы управления городом на долгосрочную перспективу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Wright, L. Bus Rapid Transit Planning Guide/ L. Wright, W. Hook. -New York: Institute for Transportation and Development Policy, 2007. -302 p.
- 2 Azar, O.H. A Linear City Model with Asymmetric Consumer Distribution/ O.H. Azar // -PloS one. -2015. -Vol.10. -No.6. -P. 1-13.
- 3 Завалишин, И.С. Планировочная структура крупного города на основе транспортной схемы метрополитена: линейный город / И.С. Завалишин, Н.И. Завьялова // -Академический вестник УралНИИпроект РААСН. -2008. -№1. -С. 14-17.
- 4 Zhang, X. Integrated daily commuting patterns and optimal road tolls and parking fees in a linear city / X. Zhang, H.J. Huang, H.M. Zhang // -Transportation Research Part B: Methodological. -2008. -Vol. 42. -No. 1. -P. 38-56.
- 5 Anas, A. General equilibrium models of polycentric urban land use with endogenous congestion and job agglomeration / A. Anas, I. Kim // -Journal of Urban Economics. -1996. -Vol. 40. -No. 2. -P. 232-256.
- 6 Louf, R. A typology of street patterns / R. Louf, M. Barthelemy // -Journal of The Royal Society Interface. -2014. -Vol. 11. -No. 101. -P. 1-9.
- 7 Amini, B. Comparative traffic performance analysis of urban transportation network structures / B. Amini et al. // -arXiv preprint arXiv: 1507.03612. -2015. -27 c.
- 8 Garrison, W.L. The structure of transportation networks / W.L. Garrison, D.F. Marble // -Transportation Center at Northwestern University. -1961. -Vol. 62. -No. 11. -P.22-25.
- 9 Гудков, В.А. Пассажирыские автомобильные перевозки / В.А. Гудков, Л.Б. Миротин, А.В. Вельможин, С.А. Ширяев; Под ред. В.А. Гудкова. -М.: Горячая линия-Телеком, 2006. -448 с.
- 10 Мартынова, Ю.А. Формализация задачи организации маршрутных сетей городского пассажирского транспорта / Ю.А. Мартынова, Я.А. Мартынов // -Науковедение. -2014. -№6(25). -С. 121-133.
- 11 Корягин, М.Е. Равновесные модели системы городского пассажирского транспорта в условиях конфликта интересов / М.Е. Корягин. -Новосибирск: Наука, 2011. -140 с.

REFERENCES

- 1 Wright, L., Hook, W. Bus Rapid Transit Planning Guide. New York. Institute for Transportation and Development Policy. 2007. 302 p.
- 2 O.H. Azar. A Linear City Model with Asymmetric Consumer Distribution. *PloS one*. 2015. Vol. 10. No. 6. pp. 1-13.
- 3 I.S. Zavalishin, N.I. Zav'yalova. The grid street plan of a major city based on the subway transport scheme: rectilinear city [Planirovochnaya struktura krupnogo goroda na osnove transportnoy skhemy metropolitena: lineynyy gorod]. *Research institute reporter of URALNIIPROEKT [Akademicheskii vestnik UralNIIProekt RAASN]*. 2008. No.1. pp. 14-17.
- 4 X. Zhang, H.J. Huang, H.M. Zhang. Integrated daily commuting patterns and optimal road tolls and parking fees in a linear city. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2008. Vol. 42. No. 1. pp. 38-56.
- 5 A. Anas, I. Kim. General equilibrium models of polycentric urban land use with endogenous congestion and job agglomeration. *Journal of Urban Economics*. 1996. Vol. 40. No. 2. pp. 232-256.
- 6 R. Louf, M. Barthelemy. A typology of street patterns. *Journal of The Royal Society Interface*. 2014. Vol. 11. No. 101. pp. 1-9.
- 7 B. Amini et al. Comparative traffic performance analysis of urban transportation network structures. *ArXiv preprint arXiv: 1507.03612*. 2015. 27 p.
- 8 W.L. Garrison, D.F. Marble. The structure of transportation networks. *Transportation Center at Northwestern University*. 1961. Vol. 62. No. 11. pp. 22-25.
- 9 V.A. Gudkov, L.B. Mirotn, A.V. Vel'mozhin, S.A. Shiryayev; Pod red. V.A. Gudkova. Motor public transportation [Passazhirskie avtomobil'nye perevozki]. Moscow. Goryachaya liniya-Telekom Publ. 2006. 448 p.
- 10 Yu.A. Martynova, Ya.A. Martynov. Formalization of the issue of urban public transport route networks design [Formalizatsiya zadachi organizatsii marshrutnykh setey gorodskogo passazhirskogo transporta]. *Science of science [Naukovedenie]*. 2014. No. 6(25). pp. 121-133.
- 11 M.E. Koryagin. Equilibrium models of the urban public transport system in the context of a conflict of interest [Ravnovesnye modeli sistemy gorodskogo passazhirskogo transporta v usloviyakh konflikta interesov]. Novosibirsk: Nauka Publ. 2011. 140 p.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: маршрутная сеть, городская транспортная система, математическое моделирование
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ: Корягин Марк Евгеньевич, докт. техн. наук, профессор СГУПС
 Березина Анна Сергеевна, преподаватель ФГБОУ ВО Кемеровский ГСХИ
ПОЧТОВЫЙ АДРЕС: 630049, г.Новосибирск, ул.Д.Ковальчук, 191, СГУПС
 650056, г.Кемерово, ул.Марковцева, 5, ФГБОУ ВО Кемеровский ГСХИ

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ НА РЕЧНОМ ТРАНСПОРТЕ

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»

М.Г. Синицын, М.В. Седунова, Н.В. Ноздрачёва

INTELLIGENT RIVER TRANSPORT SYSTEMS

Siberian State University of Water Transport (SSUWT) 33, Schetinkina St., Novosibirsk, 630099, Russia

Mikhail G. Sinitsyn (Senior Lecturer of SSUWT)

Marina V. Sedunova (Graduate student of SSUWT)

Nadezhda V. Nozdracheva (Senior Lecturer of SSUWT)

ABSTRACT: This paper considers background for creation and development of intelligent river transport systems. Authors identify components of intelligent transport systems and reveal the issues to be solved.

Keywords: intelligent transport systems, water transport

Рассмотрены предпосылки возникновения и развития интеллектуальных транспортных систем на речном транспорте. Определены составляющие интеллектуальных транспортных систем и выявлены задачи, которые им предстоит решить.

В последнее десятилетие активно развиваются и внедряются интеллектуальные транспортные системы (ИТС). Их внедрение неизбежно и обусловлено мировыми тенденциями и открытиями в инновационной сфере.

Зарубежный опыт показывает, что внедрение ИТС благоприятно влияет на все сферы общественной деятельности, ускоряет и автоматизирует процессы [3].

В России на данный момент активно развиваются системы умный город, АСУД (автоматизированная система управления дорожным движением) и другие. Их задача - управление транспортными потоками в крупных населенных пунктах, где пропускная способность многих участков достигла своего максимума и без вмешательства этих систем разрешение проблемы невозможно.

Речной транспорт по сравнению с другими видами транспорта незначительно отстает в данном направлении, и это связано с нехваткой инвестиций, которые направлены на модернизацию материально-технической базой (МТБ), находящейся в плачевном состоянии.

Внедрение интеллектуальных транспортных систем на водном транспорте представляет собой комплекс мероприятий, который позволит создать информационную взаимосвязанную сеть из всех звеньев транспортного процесса. Перед речными портами, паромоходствами и другими участниками ставится задача по модернизации старого флота, строительного производства и постройка нового, соответствующего параметрам внедряемой системы.

Интеллектуализация водного транспорта позволит оптимизировать множество процессов за счет внедрения искусственного интеллекта. Также существенно сократятся расходы по горюче-смазочные материалы (ГСМ) и топливо за счет выбора оптимального режима движения и исключения хищения. Прокладывание маршрутов будет осуществляться на основе анализа погодных условий, и при необходимости маршрут будет изменен на более оптимальный и безопасный.

Перед интеллектуальными транспортными системами речного транспорта ставятся следующие цели:

- усовершенствование логистической инфраструктуры;
- повышение качества и эффективности работы флота;
- совершенствование работы диспетчерского аппарата;
- улучшение мониторинга транспортных маршрутов;
- повышения качества предоставляемых услуг [2].

Основными составляющими ИТС речного транспорта являются цифровые магистрали, интеллектуальные порты, флот и логистические центры. Составляющие ИТС водного транспорта приведены на рисунке 1.

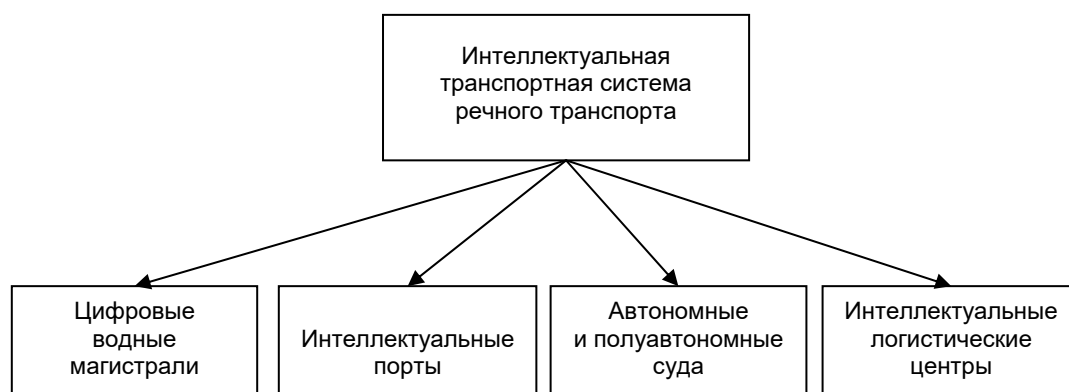


Рисунок 1 – Составляющие ИТС водного транспорта

Цифровые водные магистрали в дальнейшем заменят лоцманские карты и позволят следить за судоходной обстановкой в режиме реального времени. Все участники транспортного процесса по беспроводной связи смогут обмениваться данными и видеть суда, идущие навстречу и в попутном направлении. Данные новшества позволят оптимизировать и автоматизировать работу диспетчерского аппарата.

Интеллектуальные порты формируются в результате роботизации и автоматизации

портово-пристанского хозяйства. Они интегрированы с системами навигации, береговыми сетями, судовыми информационно-телекоммуникационными системами, сетями датчиков и т.п., образуют информационно-телекоммуникационную систему водного транспорта (ИТС ВТ), обеспечивающую функционирование всех его составных частей как единой системы.

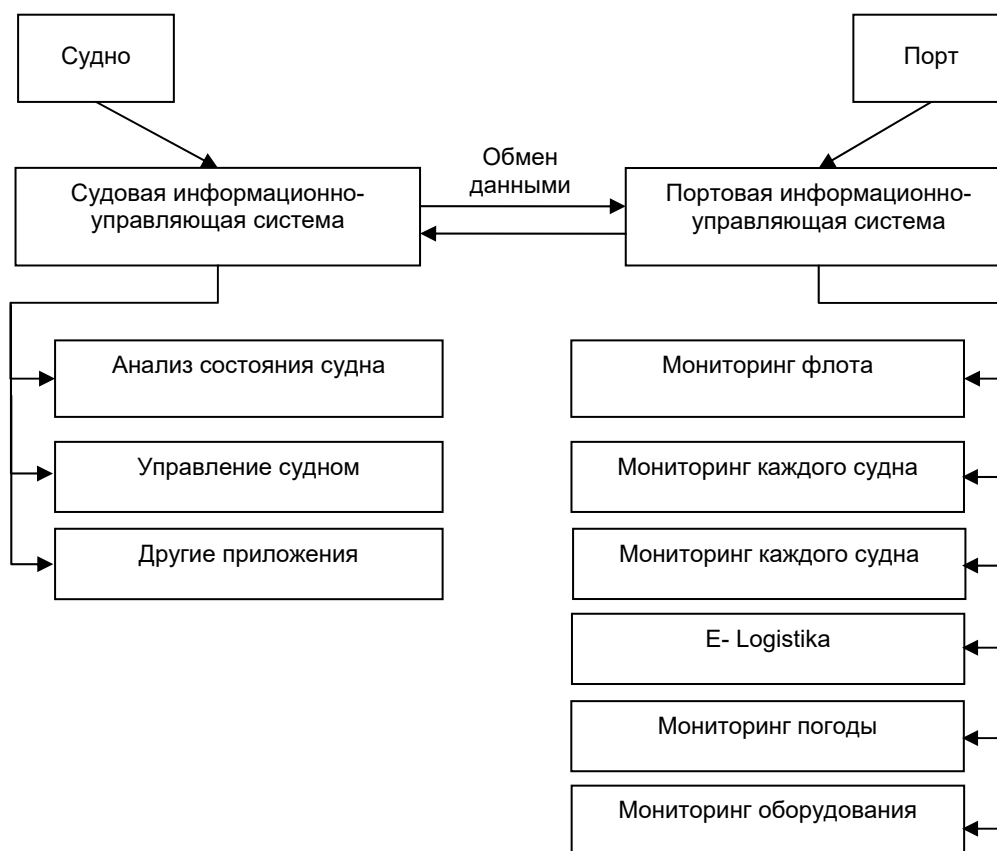


Рисунок 2 – Структура информационно-управляющей системы речного транспорта

Развитие ИТС речного транспорта в России происходит неравномерно, родоначальниками в этой сфере являются порты центральной части. Примером является ОАО «Московское речное пароходство», в котором внедрены и широко применяются интеллектуальные транспортные системы управления перевозками и складским хозяйством, благодаря этому пароходство имеет минимальный диспетчерский аппарат [4]. На территории Сибири и Дальнего Востока внедрение ИТС началось в последние пять лет, но, к сожалению, оно происходит не комплексно, устанавливаются отдельные элементы. Например, АО «Томская судоходная компания» и АО «Енисейское речное пароходство» активно внедряет отдельные модули по учету и расходу топлива, а также модули мониторинга местонахождения судов. Как показывает статистика, после внедрения данных систем расходы на перевозки сократились примерно на 30% [1].

Развитие технологий ведет к изменениям, которые уже происходят и будут происходить, проблематично то, что инфраструктура речного транспорта не готова к ним. Все это связано с устаревшей и неразвитой материально - технической базой, на балансе предприятий около 70% флота, которому более 30 лет, и всего лишь 10% вновь построенного флота. Но как показывает практика, внедрение ИТС на речном транспорте идет мелкими шагами и уже дает свои результаты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Сеницын, М.Г. Принцип оптимизации схем доставки грузов на притоки магистральных рек в восточных бассейнах / М.Г. Сеницын // -Речн. трансп. (XXI век). -2018. -№1(85). -С. 38-39.
- 2 Малыгин, И.Г. Информационно-управляющие системы водного транспорта в период четвертой индустриальной революции / И.Г. Малыгин, В.И. Комашинский, О.А. Королев // -Транспорт: наука, техника, управление. -2017. -№8. -С. 3-12.
- 3 Buchari, Erika et al. Enhancing Public Transport

REFERENCES

- 1 M.G. Sinitsyn. The principle of schemes optimization for the goods delivery to the tributaries of the main rivers in the eastern basins [Printsip optimizatsii skhem dostavki грузов na pritoki magistral'nykh rek v vostochnykh basseynakh]. *Rechnoy transport (XXI vek)*. 2018. No. 1(85). pp. 38-39.
- 2 I.G. Malygin, V.I. Komashinskiy, O.A. Korolev. Information management systems of water transport during the fourth industrial revolution [Informatsionno-upravlyayushchie sistemy vodnogo transporta v period chetvertoy industrial'noy revolyutsii]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie*. 2017. No. 8. pp. 3-12.

System in Developing Countries towards Multimodal Public Transport System / Erika Buchari et al // *Proceedings of the Conference on The Intelligent Public Transport System*, April 2-4, 2008. Netherland.

4 Синицын, М.Г. Особенности организации за-
воза грузов на боковые реки с учетом применения
элементов логистических технологий / М.Г. Синицын
// -Научн. пробл. трансп. Сиб. и Дальн. Вост. -2011. -
№2. -С. 24-28.

3 Erika Buchari et al. Enhancing Public Transport System in Devel-
oping Countries towards Multimodal Public Transport System. *Proceedings
of the Conference on The Intelligent Public Transport System*, April 2-4,
2008. Netherland.

4 M.G. Sinitsyn. Features of the goods delivery organization to the
side rivers, taking into account the application of elements of logistics tech-
nologies [Osobennosti organizatsii zavoza грузов на bokovye reki s uche-
tom primeneniya elementov logisticheskikh tekhnologiy]. *Nauchnye prob-
lemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*. 2011. No. 2. pp. 24-28.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: интеллектуальные транспортные системы, водный транспорт
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ: Синицын Михаил Геннадьевич, старший преподаватель ФГБОУ ВО «СГУВТ»
Седунова Марина Васильевна, аспирант ФГБОУ ВО «СГУВТ»
Ноздрачева Надежда Владимировна, старший преподаватель ФГБОУ ВО «СГУВТ»
ПОЧТОВЫЙ АДРЕС: 630099, г.Новосибирск, ул.Щетинкина, 33, ФГБОУ ВО «СГУВТ»

ИТОГИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РЕЧНЫХ ПЕРЕВОЗОК В ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного
транспорта»

А.В. Гюнтер, Е.С. Кадникова, В.С. Никифоров

OUTCOMES AND FUTURE PROSPECTS OF RIVER TRANSPORTATION IN WEST SIBERIA

Siberian State University of Water Transport (SSUWT) 33, Schetinkina St., Novosibirsk, 630099, Russia

Aleksey V. Gyunter (Graduate student of SSUWT)

Elena S. Kadnikova (Assoc. Prof. of SSUWT)

Vladimir S. Nikiforov (Ph.D. of Engineering Sciences, Prof. of SSUWT)

ABSTRACT: The article considers the results of freight traffic development of in the Ob-Irtysh (West Siberian) river basin and the possi-
bilities for its growth.

Keywords: freight traffic, river basin, structure of transportation, transit port

Рассмотрены итоги развития грузовых перевозок в Обь-Иртышском (Западно-Сибирском)
бассейне и возможности их роста.

Бассейн рек Оби и Иртыша с притоками (в границах России 3,7 млн. км²) почти в полто-
ра раза превышает территорию, занимаемую девятью регионами Западной Сибири РФ: Тю-
менской областью, Ямало-Ненецким и Ханты-Мансийским АО, Омской, Новосибирской, Ке-
меровской и Томской областями, Алтайским краем и Республикой Алтай.

Территория Западной Сибири занимает почти 15% территории России, доля населения
немного более 10%. При этом удельный вес региона в валовом региональном продукте
(ВРП) страны около 20%. ВРП на душу населения существенно превышает средний по РФ.

Очевидно, что наибольшая доля валового продукта региона (свыше 2,3) приходится на
Тюменскую область в ее прежних границах (с округами), а в ее структуре ВРП около 60% со-
ставляет добыча нефти и газа. В 1960-80 гг. здесь сформировался уникальный Западно-
Сибирский нефтегазовый комплекс (ЗСНГК), формирование которого во многом обязано
речному транспорту. В конце 1980 гг. флотом трех речных пароходств (Западно-Сибирского,
Иртышского, Обь-Иртышского) перевозилось свыше 65 млн. т грузов, в том числе свыше
53 млн. т сухогрузов. К тому времени основная доля перевозок стала приходиться на неруд-
ные строительные материалы (НСМ) собственной добычи (более 90%) [1, 2].

За два десятилетия реформ объем перевозок в Западно-Сибирском бассейне снизился
втрое (21 млн. т в 2008 г.), а в 2015 г. он составил лишь 12,2 млн. т. [3]. Динамика грузовых
перевозок в границах деятельности Администрации внутренних водных путей Обского бас-
сейна (ОБ) – река Обь с притоками до п.Соснино и Обь-Иртышского (ОИБ) – реки Иртыш и
Обь ниже п.Соснино с их притоками представлена на рисунке 1.

Несомненное влияние на перевозки грузов оказал кризис 2009 г., поэтому почти во всех
организациях внутреннего водного транспорта наблюдался спад объемов перевозок, в неко-
торых случаях достигавший даже 80% по сравнению с 2008 г. Основную долю грузовых пе-
ревозок по-прежнему составляют строительные грузы (рисунок 2).

На перевозках грузов водным транспортом используется около 100 судоходных компа-
ний, однако основной объем грузовых перевозок в бассейне выполняют 7 предприятий, об-
разованных в процессе приватизации на базе Иртышского, Обь-Иртышского и Западно-
Сибирского пароходств – около 10 млн. т (таблица 1) с грузооборотом более 5 млрд. ткм.

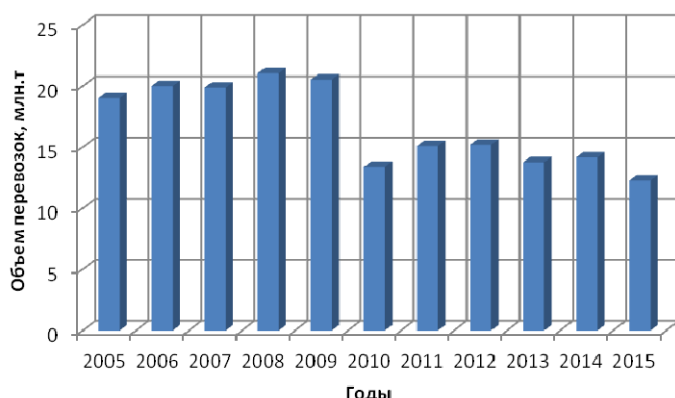


Рисунок 1 – Динамика речных грузовых перевозок в бассейне

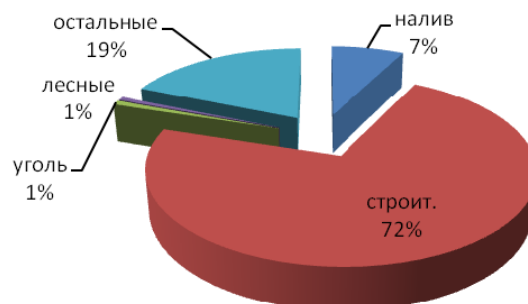


Рисунок 2 – Структура речных грузовых перевозок в регионе

Таблица 1 – Объемы перевозок флотом основных транспортных предприятий, млн. т

Наименование предприятия	1990 г.	2000 г.	2010 г.	2015 г.
Обь-Иртышское пароходство	14882,2	1010,0	593,5	2273,0
Иртышское пароходство	18396,8	520,0	488,0	669,0
Тобольский порт	–	800,0	1182,0	931,0
Омский порт	–	980,0	1000,0	730,0
Западно-Сибирское пароходство	31819,2	2258,0	1855,0	–
Новосибирский порт	–	1370,0	1112,5	1158,0
Томская судоходная компания	–	1760,0	3510,0	3335,0
Итого	65098,2	8670,0	9741,0	9826,0

Перевозки осуществляются между более чем 50 пунктами, а основной объем перегрузочных работ приходится на 12 портов бассейна (таблица 2), при этом свыше 90% приходится на строительные грузы.

Таблица 2 – Характеристика портов бассейна

Название порта	Форма собственности	Расположение	Грузопереработка, тыс. т	
			всего	из них строительные материалы
Обь-Иртышский бассейн, в том числе:			14730,0	13118,0
– Тюменский	ОАО	р.Тура	180,1	180,1
– Омский	ОАО	р.Иртыш	2841,7	2759,2
– Тобольский	ОАО	р.Иртыш	3205,3	3136,2
– Сургутский	ООО	р.Обь	382,7	84,7
– Нижневартовск	ООО	р.Обь	734,6	734,6
– Сергинский	ОАО	р.Обь	862,9	862,9
– Салехардский	ОАО	р.Обь.	579,2	342,2
– Уренгойский	ООО	р.Обь	368,3	191,6
– другие			5575,2	4826,5
Обской бассейн, в том числе:			11280,0	11100
– Новосибирский (СК «Сибирь»)*	ОАО (ООО)	р.Обь	2596,8	2596,8
– Томская судоходная компания	АО	р.Томь	8190,8	8070,2
– Бийский	ООО	р.Бия	435,5	433
– другие			56,9	0
Итого			26010,0	24218,0

*-по данным 2014 г.

Наибольший объем грузопереработки выполняют Омский, Тобольский, Сергинский, Новосибирский и Томский порты, при этом каждый из них имеет свою специфику. Основной объем грузовых работ Омского и Новосибирского портов приходится на добычу и местные перевозки НСМ: расстояние перевозки менее 100 км. Тобольский и Сергинский порты занимаются перевалкой щебня, поступающего по железной дороге со станций Свердловск (Екатеринбург) и Ивдель.

Предприятия Урала обладают практически безграничными возможностями по производству щебня, одно лишь Бердяушское месторождение обладает его запасами в 60 млн. м³, ежегодное производство щебня достигает 2,6 млн. т. ООО «Щебень Полуночного» (г.Ивдель) ведет выпуск строительного щебня из отвалов пустых пород Сухойдойского и Полуночного карьеров. Большое количество щебня (до 1,7 млн. т ежегодно) доставляется в Сергино для отправки водным транспортом. В Новосибирске расположен карьер «Борок», способный ежегодно отгружать потребителям до 1 млн. т щебня, однако перспектива его производства под вопросом, поскольку запасы составляют всего 8-10 млн. т, а добыча взрывным способом в черте города со временем может быть запрещена.

АО «Томская судоходная компания», образованная на базе Томского речного порта, само производит щебень из речного гравия на плавучем черпаковом снаряде и на дробильно-сортировочном заводе, находящемся в полукилометре от порта. Также порт принимает щебень горных пород, доставленный в вагонах с различных карьеров (Дорогино, Барзас, Сергеевский, Мозжухинский и др.), расположенных в окрестностях Томска. Кроме того, порт принимает с железной дороги и отправляет водным транспортом металлургический шлак, уголь, НСМ (песок и гравий). Корреспонденция перевозок за одну их последних навигаций приведена в таблице 3.

Таблица 3 – Отправление грузов из Томска, тыс. т

Пункты назначения	Род груза					Итого
	шлак	щебень	ЖБИ	уголь	НСМ	
Тюменская область	285,5	368,4	1,0	21,8	290,8	949,5
Томская область	28,6	281,5	35,2	32,9	324,7	702,9
Всего	314,1	649,9	36,2	56,7	615,5	1671,4

Из общего объема отправленных водным транспортом грузов 1 млн. т приходится на продукцию АО «Томская судоходная компания»: щебень собственного производства и НСМ собственной добычи. Шлак доставляется с Новокузнецкого металлургического комбината на расстояние 540 км.

В целом по бассейну в структуре строительных грузов НСМ собственной добычи и перевалочные (щебень, шлак) распределены примерно поровну: на каждую группу грузов приходится до 5 млн. т. При этом щебень, в отличие от НСМ, перевозится на значительные расстояния в районы Крайнего Севера.

Перспективы развития грузовых перевозок Западной Сибири связаны как с общей экономической ситуацией, так и с потребностями в перевозках сырьевых отраслей региона: лесоперерабатывающей, угольной, нефтегазодобывающей. Ориентиром может служить уровень 2008 г. (20 млн. т), при этом объем транзитных перевозок может составить до 8 млн. т с грузооборотом 5 млрд. ткм, в том числе, в пункты Ханты-Мансийского АО (Югра) – 5 млн. т; Ямало-Ненецкого – 2 млн. т, Томской области – 1 млн. т.

Из общего количества транзитных грузов на сухогрузы приходится свыше 90%, основную долю составляют строительные грузы: НСМ собственной добычи, а также щебень. При этом при формировании корреспонденция грузовых перевозок строительных грузов целесообразно сгруппировать пункты назначения (свыше 50) по шести зонам, в качестве перевалочных рассмотрены Омский, Новосибирский, Томский, Тобольский, Сургутский и Сергинский порты.

В работе [4] признается целесообразным переключить потоки перевалочных грузов с Омска и Новосибирска на Тобольск, Сергино, Сургут, Томск, – в этом случае порты станут ближе к потребителям, а транспортный флот будет работать в более благоприятных судоходных условиях.

Что касается флота, то наличие буксирных и несамоходных судов обеспечит реализацию перспективной схемы грузовых перевозок, если выбытие флота, в основном выработавшего свой ресурс, не будет идти угрожающими темпами, а использование флота останется на уровне лучших показателей в восточных бассейнах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

- 1 Транспортный комплекс Сибири и Дальнего Востока / Под ред. В.С. Никифорова. -Новосибирск: Новосиб. гос. акад. водн. трансп., 2010. -204 с.
- 2 Судоходство и водные пути Обь-Иртышского бассейна / Под ред В.С. Никифорова. -Новосибирск:

- 1 V.S. Nikiforov. Transport complex of Siberia and the Far East [Transportnyy kompleks Sibiri i Dal'nego Vostoka]. Novosibirsk. Novosibirsk St. Acad. of Water Transp. Publ. 2010. 204 p.
- 2 V.S. Nikiforova. Navigation and waterways of the Ob-Irtysh basin [Sudokhodstvo i vodnye puti Ob'-Irtyshskogo basseyna]. Novosibirsk. No-

Новосиб. гос. акад. водн. трансп., 2012. -247 с.

3 Котков, С.А. Речной флот восточных бассейнов в конце XX-начале XXI вв. / С.А. Котков, В.С. Никифоров // Опыт и пути решения научных проблем водного транспорта Сибири и Дальнего Востока: сб. научн. тр. -Новосибирск: Сиб. гос. унив. водн. трансп., 2016. -С. 56-67.

4 Масленников, С.Н. Опыт и тенденции организации грузовых перевозок в Обь-Иртышском бассейне / С.Н. Масленников, В.С. Никифоров, Ю.А. Субботин, Д.А. Елисеева, А.С. Кравчук, Н.В. Чиклаева // -Науч. пробл. трансп. Сиб. и Дальн. Вост. - 2013. -№1. -С. 6-11.

vosibirsk St. Acad. of Water Transp. Publ. 2012. 247 p.

3 S.A. Kotkov, V.S. Nikiforov. The river fleet of the eastern basins in the late twentieth and early twenty-first centuries [Rechnoy flot vostochnykh basseynov v kontse XX-nachale XXI vv.]. *Experience and solutions to the scientific problems of water transport in Siberia and the Far East [Opyt i puti resheniya nauchnykh problem vodnogo transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka]* digest of scientific works. Novosibirsk. Siberian St. Univ. of Water Transp. Publ. 2016. pp. 56-67.

4 S.N. Maslennikov, V.S. Nikiforov, Yu.A. Subbotin, D.A. Eliseeva, A.S. Kravchuk, N.V. Chikulaeva. Experience and trends in the organization of freight traffic in the Ob-Irtysh basin [Opyt i tendentsii organizatsii gruzovykh perevozok v Ob'-Irtyshskom basseyne]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*. 2013. No. 1. pp. 6-11.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

грузовые перевозки, речной бассейн, структура перевозок, перевалочные порты

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ: Гюнтер Алексей Викторович, аспирант ФГБОУ ВО «СГУВТ»

Кадникова Елена Сергеевна, ассистент ФГБОУ ВО «СГУВТ»

Никифоров Владимир Семенович, канд. техн. наук, профессор ФГБОУ ВО «СГУВТ»

ПОЧТОВЫЙ АДРЕС:

630099, г.Новосибирск, ул.Щетинкина, 33, ФГБОУ ВО «СГУВТ»

ВЫБОР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И ТЕКУЩЕГО РЕМОНТА АВТОБУСОВ г.КЫЗЫЛ

ФГБОУ ВО «Тувинский государственный университет»

Ч.Д. Шавыраа, О.О. Куулар

SELECTION OF ENGINEERING SOLUTIONS FOR CURRENT REPAIR AND MAINTAINANCE OF BUSES IN KYZYL

Tuvan State University (TuvSU) 36, Lenina St., Kyzyl, Tyva Republic, 667001, Russia

Chechek D. Shavyraa (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of TuvSU)

Oyacha O. Kuular (Senior Lecturer of TuvSU)

ABSTRACT: Statistical data on the bus fleet of Municipal Unitary Enterprise "Kyzylgortrans" is presented in this paper. To be sure, current repair and maintenance of vehicles is essential for smooth operation and keeping good technical condition of bus fleet. Timely diagnostics affects ecological performance, road safety and helps to prepare for the future repair. Authors considered the current method of calculating the annual manpower input on the maintenance and repair of bus fleet as well.

Keywords: *maintenance, repair, rolling stock, quality, labor coefficient*

Приводятся статистические данные по составу автомобильного парка МУП «Кызылгортранс». Техническое обслуживание и текущий ремонт автомобилей играет важную роль по поддержанию работоспособности и исправного состояния транспортных средств. Диагностирование технического состояния транспортных средств позволяет определить конкретные неисправности транспортных средств. Это влияет на экологическую безопасность, дорожного движения и для подготовки проведения ремонта. Особую актуальность данного вопроса можно увидеть при организации работы автобусов по обслуживанию населения пассажирскими перевозками. Рассмотрена действующая методика расчета годовой трудоемкости работ по техническому обслуживанию и ремонту автобусов.

Автобусный парк играет важную роль при организации пассажирских перевозок. Поэтому техническое обслуживание (ТО) и текущий ремонт (ТР) транспортных средств позволяет решать важные вопросы по поддержанию работоспособности и исправного состояния транспортных средств. Для наиболее комфортного и своевременного обслуживания пассажиров, соблюдения расписания движения необходимо иметь определенное количество транспортных средств, причем разной марки и вместимости. Поддержание исправного и работоспособного состояния парка автобусов играет важную роль, так как влияет на социальную и экономическую ситуацию в регионе.

Обслуживание транспортных средств непрерывно связано с таким понятием, как трудоемкость. Трудоемкость (T) - затраты рабочего времени на производство единицы продукции или единицы работ. Нормативная трудоемкость продукции измеряется в нормо-часах [1]. Под полной трудоемкостью единицы продукции понимается сумма всех затрат живого труда на изготовление единицы продукции, измеряемая в человеко-часах [2]

$$T = \frac{\text{Количество отработанного времени}}{\text{Объем произведенной продукции}}$$

На основе определенной производственной программы для существующего парка автобусов производится оценка требуемой производственной мощности ремонтных зон. Количество постов, необходимых для выполнения заданной трудоемкости работ определенного вида обслуживания или ремонта определяется по формуле [3]

$$П_{TP} = \frac{T^Г \eta_H}{D_{PF} C T_{CM} P_O \eta_O}, \quad (1)$$

где $T^Г$ – годовой объём работ, чел.-ч;
 η_H – коэффициент неравномерности поступлений на пост;
 D_{PF} – число рабочих дней в году;
 C – число смен;
 T_{CM} – продолжительность смены, ч;
 P_O – число рабочих, одновременно работающих на посту, чел.;
 η_O – коэффициент использования оборудования.

Годовой объём работ по ТО и ТР (T_{TO-TP}) подвижного состава рассчитывается по формуле [3]

$$T_{TO-TP} = \frac{N}{L_r t_{TO-TP} 1000}, \text{ чел.-ч.} \quad (2)$$

где N – число воздействий по ТО и ТР;
 L_r – годовой пробег транспортного средства;
 t_{TO-TP} – время проведения ТО и ремонта.

Для расчета принимаются следующие значения указанных величин. Коэффициенты неравномерности поступления автомобилей на пост и использования оборудования принимаются по справочной литературе: $\eta_H = 1,03$, $\eta_O = 0,94$. Для обеспечения непрерывности технологического процесса число рабочих дней в году принимается равным 365 (посты ТО и ТР работают каждый день, без выходных). Режим работы постов ТО и ТР принимается круглосуточным – 2 смены по 12 ч – для обеспечения возможности выполнения, ТО в межсменное время и большого объема ТР. Число одновременно работающих на посту человек принимается равным двум.

Обоснование мощности и типа станции технического обслуживания автомобилей (СТОА) производится с учетом числа и состава автомобилей по моделям, находящимся в зоне обслуживания проектируемой станции [4].

Результаты оценки необходимого количества постов ТО и ТР для выполнения рассчитанной производственной программы сведены в таблицу 1.

Следует отметить, все работы по ТО разделяются на две части – обязательную и выполняемую по потребности. Потребность в выполнении операций второй части определяется по результатам контрольно-диагностических работ.

Таблица 1 – Требуемые производственные мощности

Параметр	ТО-1	ТО-2	ТР
Коэффициент неравномерности поступления автомобилей на пост	1,03	1,03	1,03
Число рабочих дней в году	365	365	365
Число смен	2	2	2
Продолжительность смены, ч.	12	12	12
Число рабочих на посту	2	2	2
Коэффициент использования оборудования	0,94	0,94	0,94
Число постов	2	3	26

При наличии на предприятии контрольно-диагностического комплекса возможно выполнение следующих задач:

- выявление автомобилей, техническое состояние которых не отвечает требованиям безопасности движения;
- определение потребности в проведении отдельных операций ТО;
- поиск конкретных неисправностей перед проведением ТР;
- контроль качества выполненных работ по ТО и ТР;
- определение возможности исправной работы агрегатов и механизмов автомобиля в предстоящем межконтрольном пробеге;
- сбор, накопление и обработка информации о техническом состоянии парка автомобилей.

По назначению, периодичности, трудоемкости, перечню выполняемых работ и месту в

технологическом процессе ТО и ТР, диагностирование делится на Д-1 и Д-2 [7].

Д-1 предназначено для общего диагностирования механизмов, обеспечивающих безопасность движения автомобиля (тормоза, механизмы управления, углы установки передних колес, приборы освещения), экологическую безопасность (состав отработавших газов). Д-1 может быть ограничено только определением годности объекта к дальнейшей эксплуатации (экспресс-диагностирование). Оно может проводиться при каждом возвращении автомобиля в парк. Также Д-1 проводится перед ТО-1 [7-9].

Д-2 предназначается для углубленного диагностирования автомобиля с целью определения конкретных неисправностей в его узлах, агрегатах или системах. Д-2 проводится перед ТО-2 для подготовки проведения ремонта. Одновременно с Д-2 выполняются некоторые технологически оправданные регулировочные работы. Также Д-2 проводят по заявкам перед ТР в случаях необходимости выявления неисправностей и определения потребного объема ремонта [7-9].

Для обнаружения неисправностей и отказов в процессе выполнения ТО и ТР проводят оперативное диагностирование (Др), используя при этом переносные приборы. Также оперативное диагностирование может выполняться по потребности на специализированных постах, оборудованных стационарными стендами. В этом случае для его выполнения может использоваться оборудование Д-1 или Д-2.

Типовая схема организации производственного процесса автотранспортного предприятия (АТП) с использованием диагностического комплекса показана на рисунке 1.

Оценку программы работ по Д-1 и Д-2 производят исходя из программы работ по видам технического обслуживания. Количество диагностических воздействий Д-1 определяется по формуле [10]

$$N_{Д-1} = 1,1N_{ТО-1} + N_{ТО-2} \quad (3)$$

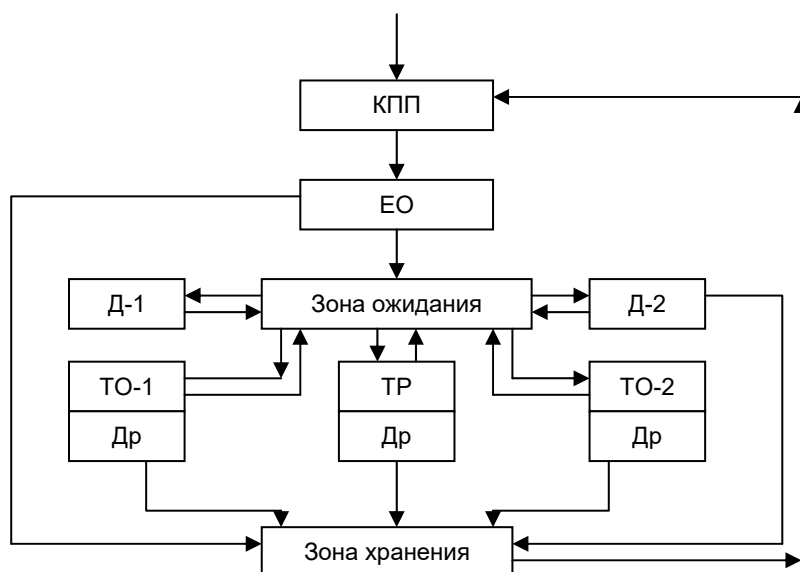


Рисунок 1 – Типовая схема организации технологического процесса АТП

Количество диагностических воздействий Д-2 определяется по формуле [2]

$$N_{Д-2} = 1,2N_{ТО-2} \quad (4)$$

Трудоемкость работ по Д-1 и Д-2 определяется также исходя из трудоемкости работ по видам обслуживания. Для Д-1 по данным справочной литературы она составляет 7% от трудоемкости ТО-1, для Д-2 – 6% от ТО-2.

Годовой объем диагностических работ по видам диагностирования определяется по формуле [2]

$$T_d^r = T_d N_d \quad (5)$$

Результаты расчета годовой программы диагностических работ для существующего парка представлены в таблице 2.

Для оценки требуемой мощности комплекса диагностических работ, определения постов диагностирования, используется формула 4. В формулу подставляются значения годовой трудоемкости диагностических работ из таблицы 2.

Таблица 2 – Производственная программа диагностических работ для существующего парка автобусов

Наименование	ЛиАЗ-677	ЛАЗ-695	ЛАЗ-699	ПАЗ-672 ПАЗ-3205 КАВЗ-3976	НЗАС-4208 НЕФАЗ-4208	ЛиАЗ-5256 ЛиАЗ-5256К МАРЗ-52661	Икарус МА3	Всего
Количество автомобилей, ед.	57	17	6	17	3	58	46	204
Годовой пробег, тыс. км.	5112	1 024,0	400,0	666,0	36,0	2882,1	3023,2	–
Расчетное количество диагностических воздействий:								
– Д-1	2190,8	438,5	171,7	332,6	9,6	688,6	358,3	4190,1
– Д-2	486,6	97,2	38,4	74,4	3,6	192	134,4	1026,6
Трудоемкость диагностических работ, чел.-ч								
– Д-1	0,5513	0,4851	0,5513	0,4043	0,3381	0,4263	0,1323	2,8887
– Д-2	0,9845	1,6254	1,9845	1,1340	1,0458	1,5498	0,8505	9,1745
Годовой объем работ по видам диагностирования, чел.-ч								
– Д-1	1207,67	212,72	94,65	134,45	3,25	293,50	47,33	1993,54
– Д-2	965,67	157,99	76,20	84,37	3,76	297,56	114,30	1690,86

Для расчета принимается, что участки диагностик работают 365 дней в году. В сутки на участке работает 1 смена. Продолжительность смены 12 ч. Количество рабочих, одновременно работающих на посту – 1 человек. Результаты расчета приведены в таблице 3

Таблица 3 – Требуемые производственные мощности участков диагностики

Параметр	Д-1	Д-2
Число рабочих дней в году	365	365
Число смен	1	1
Продолжительность смены, ч.	12	12
Число рабочих на посту	1	1
Коэффициент использования оборудования	0,94	0,94
Число постов	1	1

Таким образом, по результатам оценочного расчета для обеспечения выполнения производственной программы по ТО, ТР и диагностированию для существующего парка автобусов необходимо:

- 2 поста ТО-1;
- 2 поста ТО-2;
- 7 постов ТР;
- 1 пост Д-1;
- 1 пост Д-2.

Существующие производственные мощности предприятия позволяют обеспечить данный объем работ и могут предложить частным предпринимателям, которые занимаются перевозками пассажиров следующие услуги:

- МУП «Кызылгортранс» может предложить услуги по видам ТО и ТР всего парка автобусов, работающих на маршрутах Кызыл;
- диагностические участки Д-1 и Д-2 и для проведения оперативного диагностирования располагаются на головном предприятии в Кызыле, они также могут обслуживать всех частных предпринимателей, которые занимаются перевозками.

Срок службы автомобилей обычного исполнения, по сравнению с нормативным, при эксплуатации в районах с холодным климатом снижается в 1,5-2 раза, межремонтный цикл в 2-6 раз [11]. При этом в осеннее и весеннее время происходит колебания температур в дневное и ночное время [12].

Диагностика состояния транспортных средств, техническое обслуживание и ремонт являются профилактическими мерами, от которых зависит безопасность, автобусов. Поэтому

данный вопрос является актуальным и с учетом пробегов можно рассчитать трудоемкость и годовой объем работ по видам диагностирования и транспортным средствам. Также они важны для обеспечения производственной программы ТО, ТР и диагностики транспортных средств для существующего подвижного состава парка автобусов МУП «Кызылгортранс».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Азрилиан, А.Н. Большой экономический словарь. -Режим доступа: http://big_economic_dictionary.academic.ru/16550. - 23.11.2018 г.
- 2 Сергеев, И.В. Экономика предприятия. -Режим доступа: <http://www.bibliotekar.ru/economika-predpriyatiya-5/110.htm>. -24.11.2018 г.
- 3 Масуев, М.А. Проектирование предприятий автомобильного транспорта / М.А. Масуев. -М.: Академия, 2007. -224 с.
- 4 Напольский, Г.М. Технологическое проектирование автотранспортных предприятий и станций технического обслуживания / Г.М. Напольский. -М.: Транспорт, 1993. -271 с.
- 5 Ощепков, П.П. Эксплуатация и ремонт установок с ДВС / П.П. Ощепков, А.А. Савастенко. -М.: Изд-во Рос. ун-в. друж. народ., 2015. -18 с.
- 6 Хабибуллин, Р.Г. Методические основы рационального развития автомобильного сервиса / Р.Г. Хабибуллин, Д.М. Лысанов, И.В. Макарова // - Автомобильная промышленность. -2010. -№1. -С. 32-34.
- 7 Сеницын, А.К. Основы проектирования предприятий автомобильного транспорта / А.К. Сеницын, Р.Х. Абу-Ниджим, А.Н. Медведев. -М.: Рос. ун-в. друж. народ., 2013. -205 с.
- 8 Суханов, Б.Н. Техническое обслуживание и ремонт автомобилей / Б.Н. Суханов, И.О. Борзых, Ю.Ф. Бедарев. -М.: Транспорт, 1995. -159 с.
- 9 Терентьев, А.В. Определение производственной программы по техническому обслуживанию и текущему ремонту для подвижного состава иностранного производства / А.В. Терентьев// -Бюллетень транспортной информации. -№6(156). -Режим доступа: http://www.natrans.ru/upload/news/Terentjev_bti_june_2008.pdf. -14.05.2016 г.
- 10 Кузнецов, Е.С. Затраты на приобретение и эксплуатацию автомобилей личного пользования / Е.С. Кузнецов // -Автомобильная промышленность. -2008. -№6. -С. 40.
- 11 Зудов, Г.Ю. Прогнозирование безопасности дорожного движения в реальных условиях эксплуатации / Г.Ю. Зудов, А.М. Ишков, М.А. Кузьминов, П.П. Ощепков // Автомобиль и техносфера: тр. III Межд. научно-практической конф., 17-20 июня 2003 г. -Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-в., 2003. -С. 759-766.
- 12 Чооду, О.А. Особенности эксплуатации транспортно-технологических машин в условиях высоких амплитуд суточных температур / О.А. Чооду, С.С. Евтюков, С.Ч. Монгуш, Н.Т. Сандан // -Вестник гражданских инженеров. -2018. -№5(70). -С. 167-174.

REFERENCES

- 1 A.N. Azriliyan. Big Economic Dictionary [Bol'shoy ekonomicheskii slovar']. URL: http://big_economic_dictionary.academic.ru/16550. -23 Nov. 2018.
- 2 I.V. Sergeev. Enterprise economy [Ekonomika predpriyatiya]. URL: <http://www.bibliotekar.ru/economika-predpriyatiya-5/110.htm>. -24 Nov. 2018.
- 3 M.A. Masuev. Design of the motor transport enterprises [Proektirovanie predpriyatiy avtomobil'nogo transporta]. Moscow. Akademiya Publ. 2007. 224 p.
- 4 G.M. Napol'skiy. Technological design of the motor transport enterprises and service stations [Tekhnologicheskoe proektirovanie avtotransportnykh predpriyatiy i stantsiy tekhnicheskogo obsluzhivaniya]. Moscow. Transport Publ. 1993. 271 p.
- 5 P.P. Oshchepkov, A.A. Savastenko. Operation and repair of units with ICE [Ekspluatatsiya i remont ustanovok s DVS]. Moscow. Peoples' Friendship Univ. of Russia Publ. 2015. 18 p.
- 6 R.G. Khabibullin, D.M. Lysanov, I.V. Makarova. Methodical bases of automobile service rational development [Metodicheskie osnovy racional'nogo razvitiya avtomobil'nogo servisa]. *Automobile industry [Avtomobil'naya promyshlennost']*. 2010. No. 1. pp. 32-34.
- 7 A.K. Sinitsyn, R.Kh. Abu-Nidzhim, A.N. Medvedev. Fundamentals of automobile transport enterprises design [Osnovy proektirovaniya predpriyatiy avtomobil'nogo transporta]. Moscow. Peoples' Friendship Univ. of Russia Publ. 2013. 205 p.
- 8 B.N. Sukhanov, I.O. Borzykh, Yu.F. Bedarev. Car maintenance and repair [Tekhnicheskoe obsluzhivanie i remont avtomobiley]. Moscow. Transport Publ. 1995. 159 p.
- 9 A.V. Terent'ev. Determination of the production program for maintenance and repair for foreign-made rolling stock [Opredelenie proizvodstvennoy programmy po tekhnicheskomu obsluzhivaniyu i tekushchemu remontu dlya podvizhnogo sostava inostrannogo proizvodstva]. *Bulletin of transport information [Byulleten' transportnoy informatsii]*. No. 6(156). URL: http://www.natrans.ru/upload/news/Terentjev_bti_june_2008.pdf. -14 May 2016.
- 10 E.S. Kuznetsov. The cost of acquiring and operating personal use vehicles [Zatraty na priobretenie i ekspluatatsiyu avtomobiley lichnogo pol'zovaniya]. *Automobile industry [Avtomobil'naya promyshlennost']*. 2008. No. 6. pp. 40.
- 11 G.Yu. Zudov, A.M. Ishkov, M.A. Kuz'minov, P.P. Oshchepkov. Forecasting road safety in real-world conditions [Prognostirovanie bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya v real'nykh usloviyakh ekspluatatsii]. *Car and technosphere: III International scientific and practical conference [Avtomobil' i tekhnosfera]*. Kazan'. Kazan. St. Techn. Univ. Publ. 2003. pp. 759-766.
- 12 O.A. Choodu, S.C. Evtyukov, S.Ch. Mongush, N.T. Sandan. Operation features of transport and technological machines in conditions of high amplitudes of daily temperatures [Osobennosti ekspluatatsii transportno-tekhnologicheskikh mashin v usloviyakh vysokikh amplitud sutochnykh temperatur]. *Civil Engineering Bulletin [Vestnik grazhdanskikh inzhenerov]*. 2018. No. 5(70). pp. 167-174.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: обслуживание, ремонт, подвижной состав, качество, трудоёмкость
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ: Шавыраа Чечек Деспи-ооловна, канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «ТувГУ»
 Куулар Ояча Орлановна, преподаватель ФГБОУ ВО «ТувГУ»
ПОЧТОВЫЙ АДРЕС: 667001, г.Кызыл, ул.Ленина, 36, ФГБОУ ВО «ТувГУ»

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ВИСЯЧИХ МОСТОВ

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»

Ю.И. Бик, В.В. Дегтярева

SOME FEATURES OF SUSPENSION BRIDGES

Siberian State University of Water Transport (SSUWT) 33, Schetinkina St., Novosibirsk, 630099, Russia

Yuriy I. Bik (Holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, prof. of SSUWT)

Vera V. Degtyareva (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of SSUWT)

ABSTRACT: The article analyses the effects of various structural characteristics of the suspension bridges on their work.

Keywords: suspension bridge, cable tension, span

Проведен анализ степени влияния различных конструктивных характеристик висячих мостов на их работу.

В последнее время возникает необходимость в строительстве висячих мостов, возводимых над гидротехническими сооружениями (камерами шлюзов, каналами и т.д.), которые могут использоваться и как подвесные пешеходные канатные дороги, и как переносные грузовые подвесные канатные дороги.

Висячие мосты занимают видное место в истории мостостроения. Информация о них появилась на заре человеческого общества. Первые висячие мосты представляли собой канатные элементы, покрытые легким настилом. Висячий мост, близкий по конструкции к современным схемам, был построен, согласно литературным источникам, в 1741 году на реке Тисс в Англии и имел пролет 21 метр. До 1810 года основным несущим элементом висячих мостов являлась, как правило, цепь, составленная из соединенных между собой колец. Во второй четверти XIX века начали широко применять кабельные висячие мосты, в которых основной несущий элемент (цепь) был заменен тросом (проволочным кабелем), обладающим более высокой прочностью по сравнению с цепью. С начала прошлого века обозначился этап современного мостостроения с применением высокопрочных материалов, что позволило существенно увеличить пролеты мостов, так висячий мост в Нью-Йорке имеет пролет 1298 м.

К висячим конструкциям относят и подвесные системы для перемещения грузов (кабельные краны), на которых концы несущего каната закреплены на подвижных или стационарных башнях крана, а грузовая тележка перемещается по несущему канату тяговым канатом и несет на себе блоки подъемного полиспаста. Кран может быть снабжен крюком, грейфером или ковшом.

Первое математическое исследование, посвященное расчету висячих мостов, принадлежит французскому ученому Луи Мари Анри Навье. В дальнейшем методика расчета висячих конструкций претерпела существенные изменения, но в основе ее по-прежнему лежит задача механики о равновесии гибкой нерастяжимой нити [1].

В данной работе авторы, используя классические методы решения, провели анализ влияния условий работы висячей конструкции на прочность ее составных элементов [2].

Основной характеристикой, определяющей безопасность работы висячего моста, является натяжение в тросах. Для определения данной характеристики рассмотрим равновесие половины сооружения (рисунок 1).

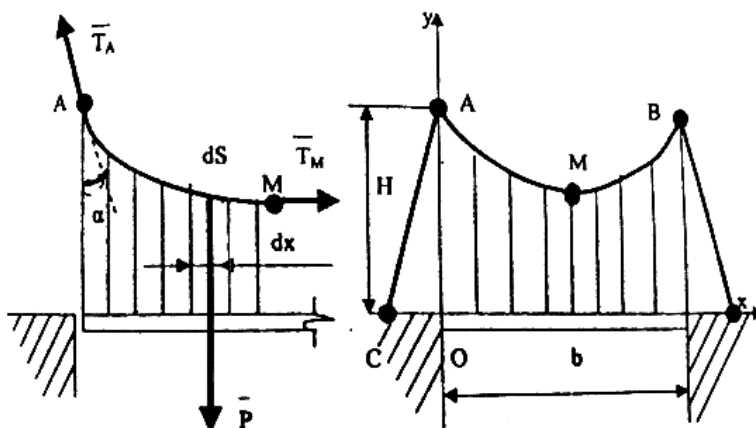


Рисунок 1 – Расчетная схема конструкции

Силы веса, приложенные к элементам троса АМ, имеют равнодействующую силу

$$P = \gamma \frac{AB}{2} = \gamma \frac{b}{2},$$

где γ — постоянный вес погонного метра моста;

b — расстояние между опорами.

Трос находится в равновесии под действием трех сил: натяжений троса в точках А и М (T_A , T_M) и веса троса P , то есть $\vec{T}_A + \vec{T}_M + \vec{P} = 0$ или в проекциях на оси координат

$$-T_A \sin \alpha + T_M = 0; T_A \cos \alpha - P = 0.$$

Таким образом, усилия в тросах имеют следующий вид

$$T_A = \frac{P}{\cos \alpha} = \frac{\gamma b}{2 \cos \alpha}, T_M = P \operatorname{tg} \alpha = \frac{\gamma b}{2} \operatorname{tg} \alpha. \quad (1)$$

Для определения стрелы провисания троса найдем уравнение, описывающее форму принимаемую тросом при равновесии. Рассматривая трос как гибкую однородную нить, не оказывающую сопротивления изгибу и работающую только на растяжение, можно записать условие ее равновесия в векторной форме

$$\vec{F} + \frac{d\vec{T}}{dS} = 0, \quad (2)$$

где F — сила тяжести, действующая на единицу длины нити;

T — натяжение нити;

S — расстояние от начальной точки А до точки М вдоль нити.

Проецируя приведенное векторное уравнение (2) на оси координат и учитывая, что задача плоская, а внешняя сила вертикальна (сила тяжести P), составим уравнения равновесия нити в проекциях

$$d\left(T \frac{dx}{dS}\right) = 0; d\left(T \frac{dy}{dS}\right) - P = 0. \quad (3)$$

В силу малости стрелы провисания троса в висячих мостах примем вес рассматриваемого элемента троса равным $P = \gamma dS = \gamma dx$.

Из первого уравнения следует, что

$$T \frac{dx}{dS} = T_0 = \text{Const} \text{ или } T = T_0 \frac{dS}{dx},$$

где T_0 — некоторая постоянная величина, равная проекции натяжения нити на ось x .

Учитывая предыдущие выкладки, представим второе выражение из системы (3) в виде

$$d\left(T_0 \frac{dS}{dx} \frac{dy}{dS}\right) = \gamma dx \text{ или } T_0 \frac{d^2 y}{dx^2} = \gamma.$$

В результате интегрирования последнего уравнения с учетом граничных условий:

$$\text{— при } x = \frac{b}{2} \quad \frac{dy}{dx} = 0;$$

$$\text{— при } x = 0 \quad y = H,$$

получим уравнение линии троса

$$y = \frac{x^2 \gamma}{2T_0} - \frac{b\gamma x}{2T_0} + H. \quad (4)$$

Найдем тангенс угла наклона к оси абсцисс касательной к линии троса в точке его крепления А, тогда

$$|\operatorname{tg} \alpha| = \frac{2T_0}{b\gamma}.$$

Подставляя последнее выражение в формулы для усилий в тросе (1), получим искомые зависимости

$$T_M = T_0; T_A = \frac{1}{2} \sqrt{b^2 \gamma^2 + 4T_0^2} \text{ или } T_A = \frac{1}{2} \sqrt{b^2 \gamma^2 + 4T_M^2}.$$

Из полученных зависимостей видно, что натяжение мостового троса в точке крепления А существенно больше, чем в нижней точке провисания М. Причем эта зависимость наблюдается при любых значениях стрелы провисания троса.

Анализ влияния конструктивных параметров на величину внутренних усилий в тросе иллюстрируют рисунки 2 и 3. Из рисунка 2 видно, что зависимость усилий в точках А и М носит практически линейный характер. При значительных нагрузках величина пролета моста не влияет на характер этой взаимосвязи.

Изменение угла провисания троса оказывает большее влияние на усилие в середине троса, то есть точке М (рисунок 3). Здесь при изменении угла на 10 градусов усилие в тросе возрастает примерно в два раза. Резкий рост напряжений в точке крепления А замечен только при больших пролетах моста (в районе 100 м). С другой стороны, при незначительных пролетах конструкции зависимость усилия T_A от угла провисания почти автомодельна. Результаты выполненных исследований могут быть полезны на этапе выбора конструкции мостового перехода.

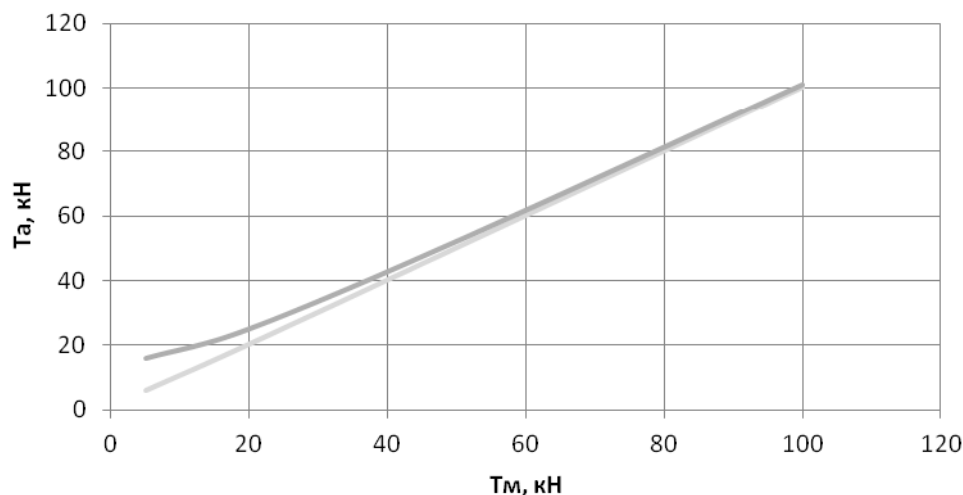


Рисунок 2 – Взаимосвязь усилий в точках А и М, при $b = 20$ и 100 м

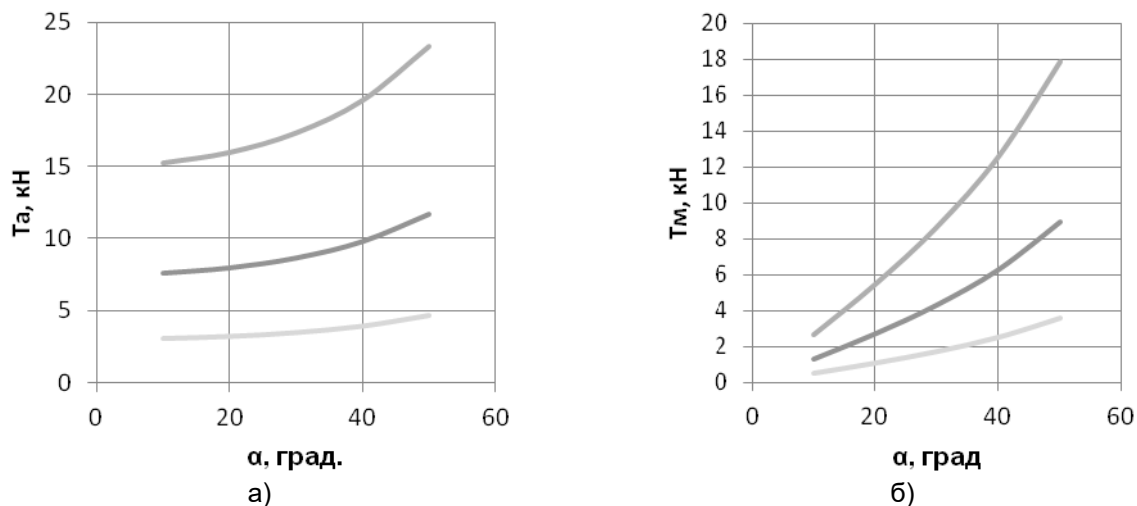


Рисунок 3 – Влияние угла провисания троса на усилия в точках А (а) и М (б), при $b = 20, 50, 100$ м

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Меркин, Д.Р. Введение в механику гибкой нити / Д.Р. Меркин. – М.: Наука, 1980. – 240 с.
- 2 Дегтярева, В.В. Статика тяжелой гибкой нити и расчет висячих конструкций / В.В. Дегтярева. – Новосибирск: Новосиб. гос. акад. водн. трансп., 2004. – 16 с.

REFERENCES

- 1 D.R. Merkin. Introduction to wire rope mechanics [Vvedenie v mekhaniku gibkoy niti]. Moscow. Nauka Publ. 1980. 240 p.
- 2 V.V. Degtyareva. Statics of heavy wire rope and calculation of suspended structures [Statika tyazheloy gibkoy niti i raschet visyachikh konstruktsiy]. Novosibirsk. Novosibirsk St. Acad. of Water Transp. Publ. 2004. 16 p.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: висячий мост, усилие в тросах, пролет моста
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ: Бик Юрий Игоревич, докт. техн. наук, профессор ФГБОУ ВО «СГУВТ»
Дегтярева Вера Владимировна, канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «СГУВТ»
ПОЧТОВЫЙ АДРЕС: 630099, г.Новосибирск, ул.Щетинкина, 33, ФГБОУ ВО «СГУВТ»

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ НАГРУЗКИ И ВОЗРАСТА БЕТОНА НА ЕГО ДЕФОРМАТИВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»

Н.Н. Фомичева

IMPACT OF AMBIENT TEMPERATURE AND CONCRETE AGE ON ITS STRESS-STRAIN BEHAVIOUR

Siberian State University of Water Transport (SSUWT) 33, Schetinkina St., Novosibirsk, 630099, Russia
Nyailya N. Fomicheva (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of SSUWT)

ABSTRACT: The authors consider the effect of temperature conditions change on the deformation characteristics of concrete.

Keywords: concrete, temperature conditions, stress-strain behavior

Рассмотрено влияние изменения температурного режима на деформативные характеристики бетона.

К основным свойствам массивного гидротехнического бетона, кроме прочности, тепловыделения, относятся и деформативные характеристики – модуль упруго-мгновенных деформаций и коэффициент линейного расширения бетона.

В бетоне раннего возраста происходят значительные изменения температурного режима, которые зависят от типа конструкции, а также обусловлены тепловыделением, наблюдаемым в процессе гидратации цементного камня, и колебаниями температур окружающей среды. Изменения температуры в бетоне не могут не оказывать влияние на его деформативные и прочностные характеристики.

Опыты показывают, что более высокая температура при укладке и схватывании повышает «раннюю» прочность бетона [1]. Основываясь на связи между модулем деформаций и прочностью, следует ожидать влияния изменения температур и на модуль упруго-мгновенных деформаций. Это подтверждают авторы П.И. Васильев и Ю.И. Кононов [2].

В данной работе приводятся результаты исследований модуля упруго-мгновенных деформаций и коэффициента линейного расширения бетона [3]. Исследования проводились на установке [4], позволяющей проанализировать влияние температуры и возраста бетона на развиваемые деформации.

Было проведено несколько серий экспериментов, в которых использовался бетон идентичного состава. Возраст загрузки в опытах был равен 1, 3, 4 и 8 суткам. Бетонные образцы подвергались различным температурным перепадам. В задачу исследований входило изучение влияния изменения температурного режима на формирование деформативных характеристик объекта.

На рисунке 1 показаны эпюры распределения температур по сечению образца (на примере одного образца).

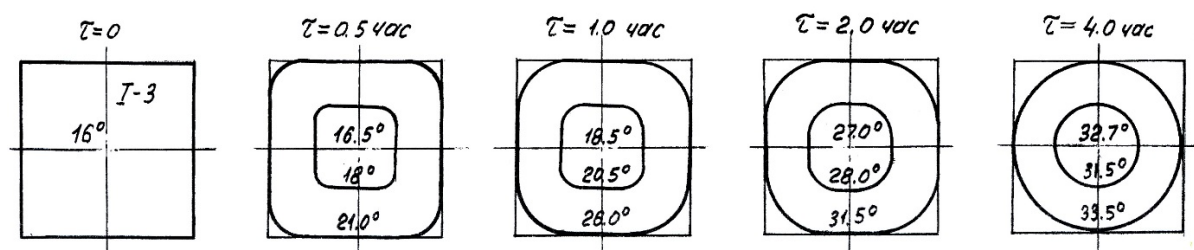


Рисунок 1 – Поле температур бетонного образца в различные моменты времени после бетонирования (возраст загрузки – 1 сутки; температурная нагрузка – 18 $^{\circ}\text{C}$)

Приведенные на рисунке 1 эпюры температур показывают, что, прогрев образца происходит равномерно со всех четырех граней и значит, коэффициенты теплопередачи на всех четырех граней можно считать равными между собой.

Изменения температуры образцов загруженных в возрасте 1 сутки, приведены на рисунках 2 и 3. Из графиков видно, что ход кривой температуры поверхности по виду приближается к экспоненте.

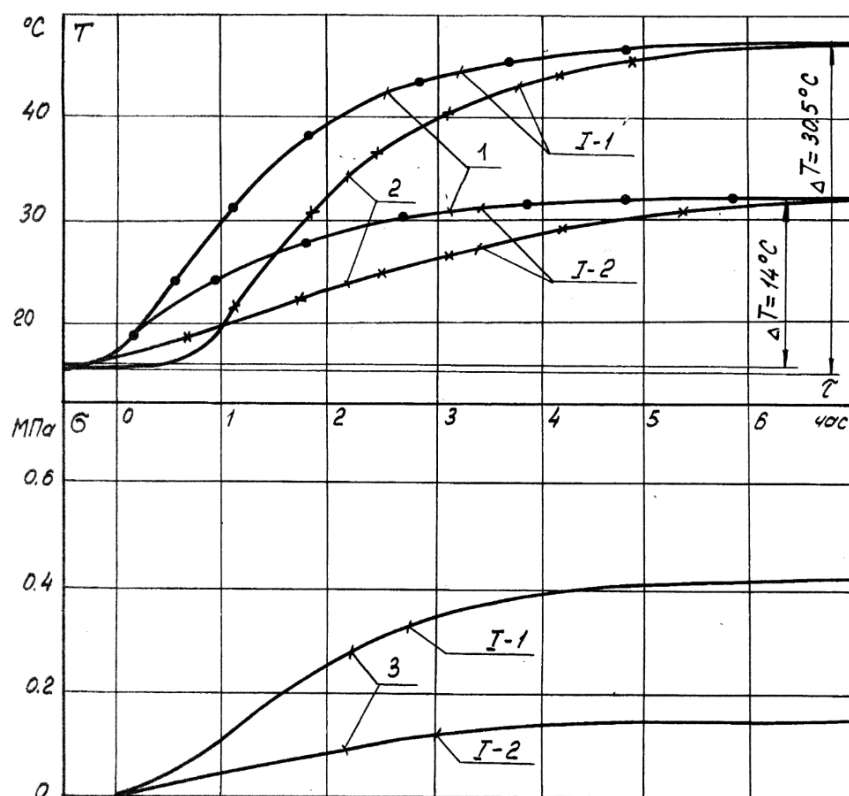


Рисунок 2 – Результаты экспериментальных исследований термонапряженного состояния опытных блоков I-1 и I-2, нагруженных температурной нагрузкой в возрасте 1 суток: 1, 2-значения температур поверхности и центра образца; 3-средние напряжения

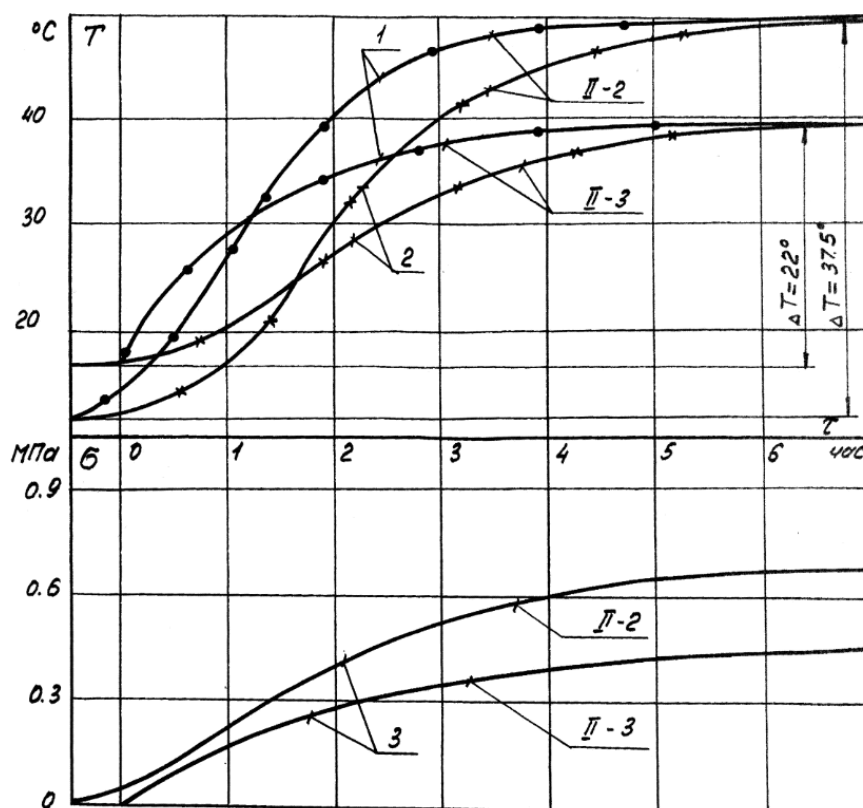


Рисунок 3 – Результаты экспериментальных исследований термонапряженного состояния опытных блоков II-2 и II-3, нагруженных температурной нагрузкой в возрасте 3 суток: 1, 2-температура на поверхности и в центре блока; 3-средние напряжения

Деформированное состояние исследуемого бетонного бруса определялось по измеренным относительным деформациям.

На рисунке 4 представлены графики деформаций бетонных образцов, нагруженных в возрасте $\tau = 1$ суток; 3 суток; 8 суток. Разная по величине нагрузка вызывает различные деформации бетона. Можно наблюдать связь между величинами температурных градиентов и развиваемых деформаций: чем больше температурные градиенты (ΔT , °C), тем больше деформации образца. Объяснить это можно зависимостью вязких свойств материала от температуры. Эта зависимость определяется скоростью диффузии молекул, которая обычно быстро увеличивается вместе с температурой. Поэтому вязкие деформации являются очень чувствительными к переменам температуры. При загрузении образцов в возрасте $\tau = 1$ суток с температурой 14-15 °C деформации достигают величины $2 \cdot 10^{-5}$ относительных единиц, а при нагреве на 30,5 °C деформации равны $6 \cdot 10^{-5}$. Также при загрузении образцов в возрасте 3 суток прослеживается влияние величины ΔT на деформации ε : при $\Delta T = 22$ °C деформации $\varepsilon = 6,5 \cdot 10^{-5}$, а при $\Delta T = 37,5$ °C – $\varepsilon = 10 \cdot 10^{-5}$.

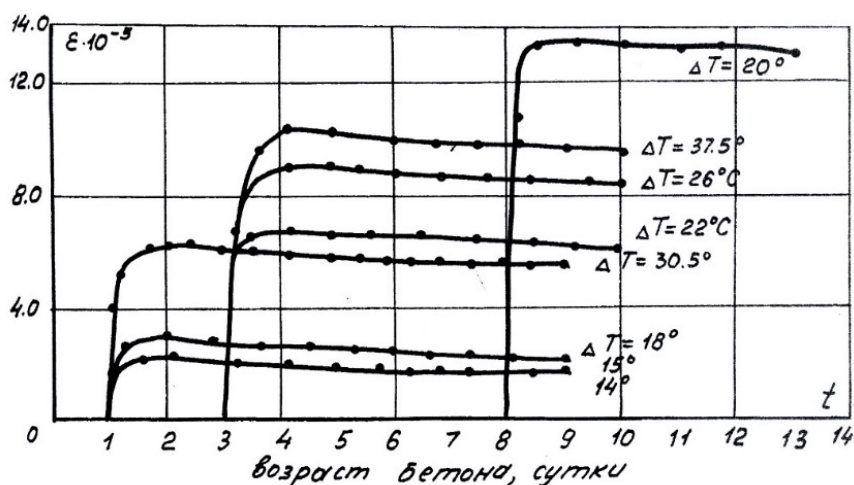


Рисунок 4 – Зависимость относительной деформации бетонных образцов от возраста при различной температурной нагрузке

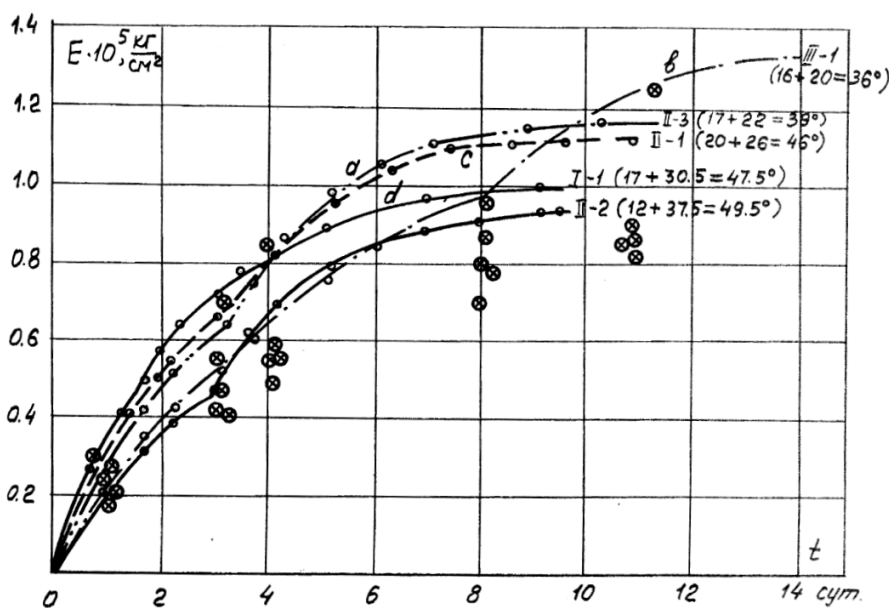


Рисунок 5 – Зависимость модуля упруго-мгновенных деформаций от температуры и возраста бетона

Возраст, в котором образцы подвергаются температурному нагреву, существенно влияет на деформации (рисунок 3). Чем больше возраст, тем выше и деформации. Пластические свойства в раннем возрасте проявляются наряду с нарастанием прочности бетона, поэтому

величины развиваемых деформаций практически не меняются; отклонения лишь в некоторых случаях составляют в относительных единицах $0,5 \cdot 10^{-5}$ (рисунок 4).

Модуль упруго-мгновенных деформаций бетона определялся экспериментально и по формуле Графа. Данные приведены на рисунке 5. Темп роста модуля упруго-мгновенных деформаций бетона раннего возраста зависит от температуры среды, в которой находились опытные образцы. Чем выше температура, тем больше значение модуля упруго-мгновенных деформаций $E(t)$, и тем быстрее заканчивается его рост.

Полученные данные позволяют сделать вывод, что модуль $E(t)$ и коэффициент линейного расширения α в раннем возрасте бетона изменяются интенсивно. Поэтому при решении практических инженерных задач рекомендуется принимать значение $E(t)$: для бетона двухсуточного возраста 0,21-0,38 МПа; четырехсуточного – 0,42-0,65 МПа; восьмисуточного – 0,62-0,9 МПа; двенадцатисуточного 0,73-0,96 МПа. Значения коэффициента линейного расширения рекомендуется принимать в следующих пределах: для бетона в возрасте 1 сутки – 0,79 1/град; для трехсуточного – 0,825 1/град; для восьмисуточного – 0,92 1/град.

При расчетном обосновании термонапряженного состояния бетонных блоков гидротехнический и других сооружений в строительный период необходимо учитывать реальные изменения деформативных свойств бетона в раннем возрасте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1 Фрид, С.А. Температурные воздействия на гидротехнические сооружения в условиях Севера / С.А. Фрид, Д.П. Левених. -Л.: Стройиздат, 1978. -200 с.

2 Васильев, П.И. Влияние температуры твердения на рост модуля мгновенных деформаций бетона / П.И. Васильев, Ю.И. Кононов. Изв. ВНИИГ. -Т.75. -М.-Л.: Энергия, 1964. -133 с.

3 Фомичева, Н.Н. Термонапряженное состояние блоков бетонирования гидротехнических сооружений в строительный период с учетом упруго-податливых связей: монография / Н.Н. Фомичева. -Новосибирск: Новосибир. гос. акад. водн. трансп., 2016. -176 с.

4 А.С. №832478. Установка для исследования деформативных характеристик бетона / В.И. Зубков, Н.Н. Фомичева, Б.С. Фомичев. -1981. -1 с.

1 S.A. Frid, D.P. Levenikh. Low temperature impact on hydraulic structures [Temperaturnye vozdeystviya na gidrotekhnicheskie sooruzheniya v usloviyakh Severa]. Leningrad. Stroyizdat Publ. 1978. 200 p.

2 P.I. Vasil'ev, Yu.I. Kononov. Effect of hardening temperature on the growth of the instantaneous concrete deformation modulus [Vliyanie temperatury tverdeniya na rost modulya mgnovennykh deformatsiy betona]. [Izv. VNIIG]. Vol. 75. Moscow. Leningrad. Energiya publ. 1964. 133 p.

3 N.N. Fomicheva. Thermal stressed state of mass concrete of hydraulic structures during the construction period with presence of elastic-yield structures [Termonapryazhennoe sostoyanie blokov betonirovaniya gidrotekhnicheskikh sooruzheniy v stroitel'nyy period s uchetom uprugopodatlivykh svyazey]. Novosibirsk: Novosibirsk St. Acad. Water Transp. Publ. 2016. 176 p.

4 V.I. Zubkov, N.N. Fomicheva, B.S. Fomichev. Concrete deformation characteristics tester [Ustanovka dlya issledovaniya deformativnykh kharakteristik betona]. 1981. 1 p.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

бетон, температурный режим, деформативные характеристики

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Фомичева Няня Николаевна, канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «СГУВТ»

ПОЧТОВЫЙ АДРЕС:

630099, г.Новосибирск, ул.Щетинкина, 33, ФГБОУ ВО «СГУВТ»

СНИЖЕНИЕ АВАРИЙНОСТИ ОТ СТОЛКНОВЕНИЙ С ЖИВОТНЫМИ НА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГАХ

ФГБОУ ВО «Тувинский государственный университет»

Ч.Д. Шавыраа, С.Ш. Саая

REDUCING THE RISK OF ANIMAL-VEHICLE COLLISIONS

Tuvan State University (TuvSU) 36, Lenina St., Kyzyl, Tyva Republic, 667001, Russia

Chechek D. Shavyraa (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of TuvSU)

Sai-Suu Sh. Saaya (Senior Lecturer of TuvSU)

ABSTRACT: The Republic of Tuva is an agricultural region and livestock sector contributes big value to its economy. Every year, more than 300 livestock die in collisions with vehicles. It is appreciable economic damage not only to the owners of cars, but also to livestock breeders. The authors developed recommendations to prevent collisions with animals by using engineering structures.

Keywords: motorway, animals, reducing road accidents

Республика Тыва является регионом, в котором животноводство является одним из ключевых факторов развития. Ежегодно под колесами автомобилей погибают более 300 голов скота, что наносит экономический ущерб не только хозяевам автомобилей, но и животноводам. Решение данной проблемы возможно с помощью дополнительных инженерных сооружений.

При разработке мероприятий по снижению аварийности следует учитывать такой фактор как столкновения с дикими и домашними животными на дорогах региона, при котором

водители, пассажиры, а также животные могут получить травмы, не совместимые с жизнью. Остро стоит эта проблема на перевалах Республики Тыва, по которой пролегает трасса Р-257 и на автодороге Кызыл-Тоора-Хем.

Наиболее опасными являются случаи столкновения с транспортными средствами крупных животных. Средние по размерам и массе животные (бобр, барсук, лисица, заяц) могут стать при столкновении с ними причиной дорожно-транспортного происшествия с тяжкими последствиями [1, 2].

Для снижения столкновений с животными необходимо оснащать автомобили радарными и видеокамерами. Это актуально для автомобилей старых модификаций, в которых данная система отсутствует. Использование программного обеспечения на автомобилях позволяет распознавать форму диких животных, скорость и характер их перемещения. Если животное выскочило на дорогу, умная система использует экстренное торможение для предотвращения возможного столкновения. По последним данным автопроизводителей, система определяет крупных диких и домашних животных. При распознавании средних и мелких животных у данной системы может возникнуть проблема, так как она адаптирована для распознавания пешеходов [3, 4].

Серьезное внимание уделяется вопросу безопасного пересечения животными автомобильных дорог на этапе их проектирования [5-7]. Основной принцип – максимальное сохранение природного ландшафта и исключение по возможности непосредственных воздействий дороги на среду обитания животных. В настоящее время появилось такое понятие, как экодуки, для перехода крупных и средних диких животных для передвижения в пределах их ареалов обитания.

Для сохранения редких видов животных необходимо учитывать ареол обитания, пути миграции. Поэтому при проектировании автомобильных дорог вблизи лесов необходимо максимально удалять объект от среды обитания животных. Если это невозможно, необходимо заострить внимание на передовой положительный опыт по обустройству автомобильных дорог.

В целях сохранения животного мира рекомендуется [5]:

- устанавливать предупреждающие дорожные знаки о возможности появления диких животных, использовать другие информационные меры для водителей;
- устанавливать зеркала для отпугивания диких животных в ночное время отраженным светом фар автомобилей;
- использовать вещества с резким запахом с целью отпугивания животных;
- производить расчистку леса с целью улучшения видимости;
- устанавливать защитные ограждения;
- устанавливать датчики обнаружения диких животных с выводом информации на информационные табло;
- строительство специальных переходов для диких животных: зеленых или ландшафтных мостов; пропускных сооружений (туннелей).

Наиболее эффективным методом снижения количества столкновений с животными является обустройство переходов для животных – зеленых и ландшафтных мостов и тоннелей (рисунок 1 и 2). Они рассматриваются как мера защиты животных, так и снижения аварийности. Необходимость обустройства таких сооружений на автомобильных дорогах Германии регламентируется документом [8].

В России подобные сооружения только начинают появляться. Так, в 2016 году на участке автомобильной трассы А189 Хабаровск-Владивосток на территории национального парка «Земля леопарда» был открыт Нарвинский тоннель (565 м). Тоннель, проложенный по территории национального парка, позволит избежать пересечения путей миграции дальневосточного леопарда и амурского тигра, с автомобильной дорогой [8].

Как видим из фотографий, зеленый мост должен учитывать особенности ареала обитания животных.

К сооружению с обеих сторон примыкают направляющие заграждения (заборы), перекрывающие проход для встречающихся видов животных.

Важным аспектом для принятия дикими животными перехода является акустический комфорт. Звук работающего двигателя, шин, механизмов автомобиля, клаксоны, неприятные запахи от топлива вызывают у животных непредотвратимые стрессовые реакции. На

сооружении рекомендуют применять шум поглощающие материалы, в том числе строительство защитных стенок.

После введения зеленого моста могут возникнуть проблемы визуального восприятия животными данного объекта. Для привлечения животных могут быть использованы различные растения на земляном субстрате. Она должна быть неровной, чтобы исключить проезд автомобилей. Для внутренних стен рекомендуется цветное оформление в переходящих снизу вверх от темных к светлым тонам [9].

Для полноценного функционирования переходов для животных важно не только правильное их проектирование и строительство, но соблюдение требований в процессе эксплуатации [9]:

- исключение случаев использования не по назначению;
- уборка мусора после половодий, обновление структур из сухостоя, камней;
- обкашивание площадей перед шумо- и светозащитными экранами раз в год, перед проходами для мелких животных на расстоянии 2 м – 2 раза в год;
- приведение в порядок живых изгородей;

– исключение веток диаметром более 3 см вблизи защитного ограждения при наличии карабкающихся видов животных;

- контроль функциональной способности проходов для мелких животных три раза в год, ежегодная проверка проницаемости нижних путепроводов;
- осуществление производственного экологического контроля ежегодно весной и осенью.

Приведенные выше требования нашли отражение в разработанном по заказу Государственной компании «Автодор» стандарте «Требования к проектированию, строительству, содержанию и ремонту «зелёных переходов» для диких животных».

Таким образом, проектирование, строительство зеленых мостов для животных с одной стороны является необходимым условием сохранения некоторых видов животных, с другой стороны это приводит к дополнительным затратам.

Водители, проезжая по таким дорогам, должны понимать, что в любой момент на дороге могут выскочить животные. При отсутствии зеленых мостов должны быть соблюдены рекомендуемые скорости, стать более внимательными при виде знаков, избегать поездок в темное время суток, когда активны животные, включать по возможности дальний свет фар, следить за техническим состоянием транспортного средства. Стараться, чтобы автомобиль был в исправном состоянии, с отрегулированным светом фар, содержать фары в чистоте, тормозная система и рулевое управление любого автомобиля должны находиться в безупречном состоянии.

На автодороге Кызыл-Тоора-Хем необходимо запланировать строительство зеленого моста для диких животных. В этом месте наиболее часты случаи пересечения автомобильной дороги с такими животными как лоси, косули, кабаны, лисы, зайцы. Именно на этом уча-

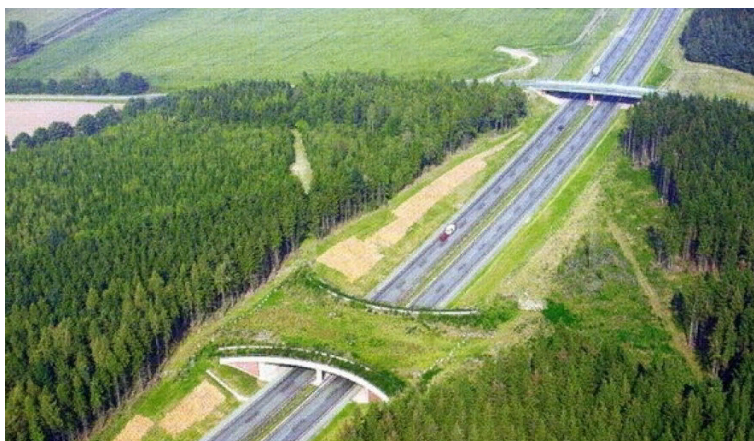


Рисунок 1 – Зеленый мост через автомагистраль в Германии



Рисунок 2 – Экодук в Калужской области

стке часто происходят случаи столкновения автомобилей с дикими животными.

В связи с ландшафтом данной местности невозможно удалить объект от миграционных путей животных. Открытие горнодобывающих предприятий, санаториев, лечебных горячих источников привлекает в данную местность много туристов, отдыхающих, увеличивается количество транспортных средств. Это привело к увеличению количества столкновений с крупными, средними и мелкими животными, которые обитают в данной местности. Количество пострадавших от ДТП, порча имущества, гибель животных заставляет призадуматься о внедрении в данную дорожную систему зеленого моста.

Также хочется для водителей, которые направляются в заказник, национальные парки, дать несколько советов.

Если животное выскочило на дорогу, старайтесь не пугать его, не нажимайте на клаксон сигнала, не моргайте фарами, максимально замедлите автомобиль вплоть до остановки. В темное время суток животных выдают глаза, которые отражают свет фар. Заметили белые или красные точки – немедленно сбавляйте скорость. Если дорожно-транспортное происшествие неизбежно, минимизируйте его последствия. Направьте автомобиль в сторону, откуда бежит животное: оно вряд ли успеет отскочить назад.

Также важно помнить, что животные – стадные существа. Если вы увидели на дороге какое-нибудь животное, вероятность столкновений с представителями данной фауны довольно высока.

Особую опасность представляют участки автомобильных дорог с густыми зарослями кустарников. Поэтому при приближении к таким участкам важно соблюдать скоростной режим, при возможности произвести замедление транспортного средства. Для сохранения своего имущества и здоровья водителям важно помнить эти нехитрые правила.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Huijser, Marcel P. The Comparison of Animal Detection Systems in a Test- Bed: A Quantitative Comparison of System Reliability and Experiences with Operation and Maintenance Final Report/ M.P. Huijser, T.D. Holland, M. Blank, M.C. Greenwood, P.T. McGowen, B. Hubbard, Sh. Wang // Final Report. Helena, Montana: Montana Department of Transportation, 2009.
- 2 Roadside Systems Detect Wildlife to Prevent Collisions. Government Technology. -Режим доступа: <http://www.govtech.com/public-safety/Roadside-Systems-Detect-Wildlife-to-Prevent-Collisions.html>. -28.10.2015 г.
- 3 Elvik, R. Handbook of Road Safety Measures / R. Elvik, T. Vaa // Elsevier Oxford. 2004.
- 4 What to do if you accidentally hit an animal when driving. -Режим доступа: <https://blog.insurethebox.com/car-accidents-with-animals/>. -28.10.2015 г.
- 5 Требования по предотвращению гибели объектов животного мира при осуществлении производственных процессов, а также при эксплуатации транспортных магистралей, трубопроводов, линий связи и электропередачи (в ред. Постановления Правительства РФ от 13.03.2008. №169) // СПС «Консультант-Плюс».
- 6 Технический регламент о безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта (утв. постановлением Правительства РФ от 15 июля 2010 г. №533) // СПС «Консультант-Плюс».
- 7 Трофименко, Ю.В. Защита животных от негативного воздействия автомобильных дорог / Ю.В. Трофименко // - Наука и техника в дорожной отрасли. -2011. -№1. -С.36-41.
- 8 Merkblatt zur Anlage von Querungshilfen fuer Tiere und zur Vernetzung von Lebensraeumen an Strassen. M AQ. R2. - Forschungsgesellschaft fuer Strassen- und Verkehrswesen (FGSV), FaM. 2008.
- 9 Трофименко, Ю.В. Переходы для животных как метод снижения аварийности на автомобильных дорогах / Ю.В. Трофименко // -Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). -2016. -№1(44). -С. 114-122.

REFERENCES

- 1 Marcel P. Huijser, Tiffany D. Holland, Matt Blank, Mark C. Greenwood, Pat T. McGowen, Barrett Hubbard, Shaowei Wang. The Comparison of Animal Detection Systems in a Test- Bed: A Quantitative Comparison of System Reliability and Experiences with Operation and Maintenance Final Report. *Final Report*. Helena, Montana: Montana Department of Transportation, 2009.
- 2 Roadside Systems Detect Wildlife to Prevent Collisions // Government Technology URL: <http://www.govtech.com/public-safety/Roadside-Systems-Detect-Wildlife-to-Prevent-Collisions.html>. -28 Oct. 2015.
- 3 R. Elvik, T. Vaa. Handbook of Road Safety Measures. Oxford, United Kingdom: Elsevier, 2004.
- 4 What to do if you accidentally hit an animal when driving. URL: <https://blog.insurethebox.com/car-accidents-with-animals/>. -28 Oct. 2015.
- 5 Requirements to prevent the loss of wildlife objects in the implementation of production processes, as well as in the operation of highways, pipelines, communication lines and electricity (in ed. Decisions of the Government of the Russian Federation from 13.03.2008. №169).
- 6 Technical regulations on the safety of high-speed rail (approved by Resolution of the Government of the Russian Federation dated July 15, 2010 №533).
- 7 Yu.V. Trofimenko. Protection of animals from the negative impact of roads [Zashchita zhivotnykh ot negativnogo vozdeystviya avtomobil'nykh dorog]. *Science and technology in the road industry [Nauka i tekhnika v dorozhnoy otrasli]*. 2011. No. 1. pp.36-41.
- 8 Merkblatt zur Anlage von Querungshilfen fuer Tiere und zur Vernetzung von Lebensraeumen an Strassen. M AQ. R2. - Forschungsgesellschaft fuer Strassen- und Verkehrswesen (FGSV), FaM. 2008.
- 9 Yu.V. Trofimenko. Passages for animals as a method of reducing accidents on roads [Perekhody dlya zhivotnykh kak metod snizheniya aviarnosti na avtomobil'nykh dorogakh]. *Bulletin of the State Automobile and Road Technical University (MADI) [Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI)]*. 2016. No. 1(44). pp. 114-122.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: автомобильная дорога, животные, снижение аварийности
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ: Шагыраа Чечек Деспи-ооловна, канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «ТувГУ»
 Саая Сай-Суу Шолбановна, преподаватель ФГБОУ ВО «ТувГУ»
ПОЧТОВЫЙ АДРЕС: 667001, г.Кызыл, ул.Ленина, 36, ФГБОУ ВО «ТувГУ»

ВАРИАНТ АЛГОРИТМА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГРАФИКА УРОВНЯ ВОДЫ НА МАЛЫХ РЕКАХ

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»

Е.М. Григорьев

MINOR RIVERS WATER LEVEL GRAPH FORECASTING ALGORITHM

Siberian State University of Water Transport (SSUWT) 33, Schetinkina St., Novosibirsk, 630099, Russia
 Evgeniy M. Grigor'ev (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of SSUWT)

ABSTRACT: An algorithm has been developed for predicting a water level graph for the Vasyugan River, based on data from daily 20-year observations. According to the results of these measurements, a cumulative histogram of the water level was built. A sufficient number of implementations obtained by means of statistical modeling (Monte-Carlo method). This helped authors to build a simulator that allows obtaining many level implementations, and the obtained data can be processed using the usual methods of mathematical statistics.

Keywords: *water level graph, forecast, minor rivers*

Разработан алгоритм прогноза графика уровня воды реки Васюган, основанный на данных ежедневных 20-ти летних наблюдений. По результатам этих измерений, построена накопительная гистограмма уровня воды. Достаточное число реализаций получено средствами статистического моделирования (Метод Монте-Карло). Построенный на этой основе имитатор, позволяет получить множество реализаций уровня, а полученные данные можно обрабатывать обычными методами математической статистики.

Большое значение для планирования и организации перевозок на малых водных путях имеет надёжная оценка судоходного состояния водного пути в различные периоды времени. Под этим понимается оценка возможности и продолжительности использования судов различных типов в зависимости от состояния глубин, которые на малых реках подвержены непрерывным изменениям. Динамика изменения глубин находится в зависимости от колебания уровня воды. Зависимость между уровнями воды и глубинами для участка реки можно установить и представить графически. Анализ кривых за отдельные годы показал, что для большинства малых рек изменения незначительны и ими можно пренебречь. То есть при решении вопросов планирования и организации работы флота можно использовать кривые связи за прошлые годы. Такой подход позволяет свести задачу оценки глубин в определённые периоды к аналогичной оценке уровней. Отсюда очевидна необходимость уметь предсказывать достаточно точно колебания уровня во времени, основываясь на наблюдениях прошлых лет.

Здесь сделана попытка разработать алгоритм получения прогноза графика уровня воды на весь период навигации. В качестве объекта выбрана река Васюган, где на водомерном посту Средний Васюган в течение 20-ти лет ежедневно велись наблюдения. Анализ этих данных показал, что физическое время навигации на данном участке располагается в интервале от 10 мая до 16 октября продолжительностью 160 дней. Подчеркнём, что под физическим временем навигации нами понимается период времени, в котором отсутствуют ледовые явления

Каждый день периода навигации представлен 20 значениями уровня, что соответствует 20 годам ежедневных наблюдений. Эти значения представляют собой короткий динамический ряд. Строим по этим данным накопительную гистограмму, считая, что в рассматриваемый день величина уровня будет распределена согласно этой гистограмме. Для небольших гидрологических систем, к которым относятся малые реки, согласно современным представлениям [1], вполне оправдано использовать допущение об временной устойчивости их гидрологических характеристик, так как общая конфигурация водосбора меняется очень медленно и в гидрологических исследованиях может рассматриваться как постоянная, хозяйственная деятельность человека, влияющая на гидрологическую обстановку, минимальна [2].

Дискретная случайная величина X -уровень воды в i -ый ($i = 1, 2, \dots, 160$) день физической навигации распределена согласно накопительной гистограмме, полученной по результатам замеров уровня в данный день, в каждом году за 20 лет наблюдений. Естественно, что двадцать реализаций случайного процесса почти ничего не дают. Достаточное число реали-

заций можно получить средствами статистического моделирования (Метод Монте-Карло). Построение на этой основе имитатора позволяет подучить как угодно много реализаций уровня [3]. Этот искусственно полученный статистический материал обрабатывается обычными методами математической статистики. Рассмотрим алгоритм прогнозирования графика уровня воды на период навигации.

Систематизация данных. Обозначим через $\{x_1^i, x_2^i, \dots, x_{20}^i\}$ -совокупность наблюдений 20 значений уровня воды в i -ый день периода навигации ($i = 1, 2, \dots, 160$), расположенные в порядке возрастания.

Отрезок $[x_1^i, x_{20}^i]$ разбиваем на n одинаковых частичных отрезков с шагом Δx .

Шаг Δx выбирался из условия $\Delta \leq 20$ см. Расширяем отрезок $[x_1, x_{20}]$ до $[x_{\min}^i, x_{\max}^i]$, где $x_{\min}^i = x_1 - \Delta x/2$, $x_{\max}^i = x_{20} + \Delta x/2$.

Такое разбиение обеспечивает нам попадание точек x_1^i и x_{20}^i внутрь соответствующих частичных отрезков.

Каждому j -му частичному отрезку $[x_{j-1}, x_j]$, ($j = 1, 2, \dots, n$) ставится в соответствие значение уровня ∇_j^i , совпадающее со серединой этого отрезка. В результате получаем эмпирический закон распределения уровня воды в i -ый день

$$\begin{pmatrix} \nabla_1^i & \nabla_2^i & \dots & \nabla_n^i \\ p_1 & p_2 & \dots & p_n \end{pmatrix},$$

где $p_1, p_2, \dots, p_n$ – эмпирические вероятности, определяемые по формуле

$$p_j = \frac{w_j}{20}, \quad j = 1, 2, \dots, n,$$

$w_1, w_2, \dots, w_n$ – частоты попадания наблюденной совокупности $\{x_1^i, x_2^i, \dots, x_n^i\}$ в наши частичные отрезки.

Построение имитатора. Величина уровня в i -ый день навигационного периода ($i = 1, 2, \dots, 160$) представляет из себя независимую дискретную случайную величину X^i . Следовательно, построить имитатор μ_x^i уровня воды в i -ый день – это, по существу, разыграть дискретную случайную X^i с распределением

$$\begin{pmatrix} \nabla_1^i & \nabla_2^i & \dots & \nabla_n^i \\ p_1 & p_2 & \dots & p_n \end{pmatrix}.$$

Вместо построения накопительной гистограммы удобнее провести эквивалентную процедуру. Интервал $0 < y < 1$ разобьём точками $y_1, y_2, \dots, y_n$ на n интервалов.

Координаты точек деления, очевидно, будут

$$y_1 = p_1, y_2 = p_1 + p_2; y_3 = p_1 + p_2 + p_3; \dots; y_n = p_1 + p_2 + \dots + p_n = 1.$$

Полученные интервалы пронумеруем числами 1, 2, ..., n :

– Интервал $(0, y_1)$ получает номер 1;

– Интервал (y_1, y_2) получает номер 2;

– Интервал (y_2, y_3) получает номер 3;

– ...

– Интервал (y_{n-1}, y_n) получает номер n .

Пусть γ -случайная величина, равномерно распределённая в интервале $(0, 1)$.

Каждый раз, когда нам надо разыграть значение X^i , мы будем выбирать значение γ и строить точку $y = \gamma$. Если эта точка попадает в интервал с номером j , то будем считать, что $X^i = \nabla_j^i$. Законность такой процедуры очевидна. Так как γ равномерно распределена в интервале $0,1$, то вероятность того, что γ окажется в некотором интервале, равна длине этого интервала:

$$P(0 < \gamma < p_1) = p_1; P(p_1 < \gamma < p_1 + p_2) = p_2.$$

Согласно нашей процедуре $X^i = \nabla_j^i$ тогда, когда $p_1 + p_2 + \dots + p_{j-1} < \gamma < p_1 + p_2 + \dots + p_j$, а дли-

на этого интервала равна p_j . В силу сказанного, имитатор μ_x^i уровня воды в i -ый день можно записать в виде

$$\mu_x^i = \begin{cases} \nabla_1^i & 0 < \gamma < p_1 \\ \nabla_2^i & p_1 < \gamma < p_1 + p_2 \\ \nabla_3^i & p_1 + p_2 < \gamma < p_1 + p_2 + p_3 \\ \dots & \dots \\ \nabla_n^i & p_1 + p_2 + \dots + p_{n-1} < \gamma < 1 \end{cases}$$

Имитатор μ_x^i позволяет получить как угодно много реализаций уровня воды в i -ый день навигационного периода ($i = 1, 2, \dots, 160$). Для этого надо лишь генерировать последовательность значений $\{\gamma\}$. Генерация последовательности $\{\gamma\}$ осуществляется обращением к датчику псевдослучайных чисел. Такого рода имитаторы строятся для каждого дня рассматриваемого периода навигации.

Статистическая обработка. Для каждого i -го дня навигационного периода получаем массив значений уровня воды. Статистическая обработка этого массива даёт нам для каждого дня значения средней выборочной уровня и значения доверительных границ, покрывающих генеральную среднюю с мерой надёжности 0,95. В дальнейшем этот материал используется для построения графика уровня на весь период навигации. Этот график будет содержать три кривые, соединяющие точки

$$(i, \bar{x}_i); (i, \bar{x}_i - 0,199S_i); (i, \bar{x}_i + 0,199S_i),$$

где $\bar{x}_i$ – выборочная средняя i -го дня;

$$S_i = \sqrt{S_i^2},$$

S_i^2 – несмещённая оценка выборочной дисперсии i -го дня.

Полученный график может быть использован для задачи планирования и организации перевозок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Маккавеев, Н.И. Русловые процессы / Н.И. Маккавеев, Р.С. Чалов. -М.: Изд-во Моск. гос. ун-в., 1986. -260 с.
- 2 Аполлов, Б.А. Курс гидрологических прогнозов / Б.А. Аполлов, Г.П. Калинин, В.Д. Комаров. -Л.: Гидрометеоиздат, 1974. -419 с.
- 3 Ермаков, С.М. Курс статистического моделирования / С.М. Ермаков, Г.А. Михайлов. -М.: Наука, 1976. -320 с.

REFERENCES

- 1 N.I. Makkaveev, R.S. Chalov. Channel processes [Ruslovyie protsessy]. Moscow. Moscow St. Univ. Publ. 1986. 260 p.
- 2 B.A. Apollov, G.P. Kalinin, V.D. Komarov. Hydrological Prognosis Course [Kurs gidrologicheskikh prognozov]. Leningrad. Gidrometeoizdat Publ. 1974. 419 p.
- 3 S.M. Ermakov, G.A. Mikhaylov. Statistical Modelling Course [Kurs statisticheskogo modelirovaniya]. Moscow. Nauka Publ. 1976. 320 p.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: график уровня воды, прогноз, малые реки

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ: Григорьев Евгений Михайлович, канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «СГУВТ»

ПОЧТОВЫЙ АДРЕС: 630099, г.Новосибирск, ул.Щетинкина, 33, ФГБОУ ВО «СГУВТ»

ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ГЕОТЕКСТИЛЯ

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения»

Д.В. Величко, Е.С. Антерейкин

ASSESSMENT OF OPERATIONAL PROPERTIES OF GEOTEXTILES

Siberian Transport University (STU) 191, Dusi Koval'chuk St., Novosibirsk, 630049, Russia

Dmitriy V. Velichko (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of STU)

Evgeniy S. Antereykin (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of STU)

ABSTRACT: This paper presents the results of laboratory studies of new and old-age samples of geotextiles, which are operated at West Siberian Railway. The authors tested the mechanical and filtration properties of materials. The experiments let authors determine the effect of various pressure levels on filtration intensity and factor. Considering the obtained results, recommendations were proposed to ensure the stability of mechanical and filtration properties of geotextiles to increase the efficiency of their reuse.

Keywords: rail track, geotextile, capital repairs, reuse, filtration

Представлены результаты лабораторных исследований новых и старовозрастных образцов геотекстиля, которые эксплуатируются на ЗСЖД. При лабораторных испытаниях оценивались механиче-

ские и фильтрационные свойства материалов. Определено влияние на интенсивность фильтрации и коэффициент фильтрации различных уровней давления. Предложены рекомендации по обеспечению устойчивости механических и фильтрационных свойств геотекстиля для повышения эффективности их повторного использования.

Геосинтетические материалы в последние десятилетия имеют чрезвычайно широкое применение в транспортном строительстве. Во многих случаях их использование может существенно повысить запас прочности, долговечность и надежность, улучшить работоспособность и уменьшить стоимость, по сравнению с традиционными проектными решениями. Начиная с конца 1990 гг. на Западно-Сибирской железной дороге (ЗСЖД) при выполнении капитальных ремонтов, реконструкций пути укладываются разделительные слои геотекстиля и пенополистирола, что приводит к существенному уменьшению количества неисправностей пути [1].

Геотекстильные материалы в конструкции верхнего строения пути применяются с целью предупреждения взаимного проникновения и перемешивания частиц балластной призмы и грунтов земляного полотна, фильтрации и отвода атмосферной воды от основной площадки земляного полотна, а также для обеспечения противозерозионной защиты грунтов земляного полотна. Однако в процессе эксплуатации геотекстиля, в зависимости от степени загрязненности щебеночного балласта [2], может происходить потеря его фильтрационных свойств, что приводит к переувлажнению и, как следствие, к появлению неисправностей пути, таких как выплески, просадки.

При оценке возможности повторного применения геотекстиля, то есть оставление его на второй межремонтный период для интенсивных эксплуатационных условий участка Омск-Новосибирск [3], необходимо прогнозировать механические и гидравлические свойства на конец второго срока эксплуатации.

Испытания новых геотекстилей. В течение нескольких лет в НИЛ «Методы оценки прочности элементов верхнего строения пути и железнодорожных сооружений» СГУПС проводились комплексные испытания нескольких партий геотекстилей. В ходе исследований механических характеристик данных материалов использовались универсальная испытательная машина марки ZDM 5/91 и разрывная машина Р-5. Результаты определения физико-механических показателей испытываемых образцов новых геотекстилей представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Механические характеристики новых геотекстилей

Наименование показателей		Норма	Средние значения		
			1	2	3
Поверхностная плотность, г/м ²		более 300	307	302	412
Разрывная нагрузка на полосу шириной 5 см, Н	по длине	более 500	853	870	1117
	по ширине		848	901	1408
Относительное удлинение при разрыве, процент	по длине	менее 90	66	66,5	63,6
	по ширине		62,5	79,5	56,1
Прочность при продавливании шариком, Н		более 1200	1655	1424	1800

Исходя из приведенных выше данных, полотно нетканое иглопробивное термоскрепленное по всем измеренным параметрам удовлетворяет нормативным требованиям.

С момента начала укладки геотекстиля на ЗСЖД и до 2016 г. технические условия 5772-017-25388761-2004 [4] и ГОСТ 25584-90 регламентировали два метода определения коэффициента фильтрации с применением приборов Дарси или Союздорнии.

В НИЛ «Путеиспытательная» СГУПС проводились испытания геотекстилей на приборе Союздорнии, по фильтрационным характеристикам. Прибор Союздорнии позволяет выполнять испытания геотекстиля под нагрузкой 2; 20 и 200 кПа. В качестве дополнительных приспособлений, обеспечивающих передачу нагрузки и равномерное её распределение по поверхности геотекстиля, служит плоский диск-штамп толщиной 5 мм с 29 отверстиями по всей его площади, промежуточный стакан и штанга с центрирующей крышкой. Из материала геотекстиля вырезают круглые образцы диаметром, равным внутреннему диаметру цилиндра прибора Союздорнии (50,4 мм). Количество образцов для одного испытания геотекстиля определяют в зависимости от толщины слоя. Число слоёв подбирают из условия суммарной

толщины набора образцов около 20 мм, при давлении 2 кПа. Набор образцов геотекстиля помещают в прибор Союздорнии. Сверху на образцы устанавливают штамп с отверстиями (29 отверстий диаметром 4 мм), на который опирается вертикальный шток для приложения внешней нагрузки. Нагрузка подбирается так, чтобы штамп оказывал на образцы заданное давление (2; 20; 200 кПа).

Требование предъявляемые к геотекстильным материалам по фильтрационным свойствам – коэффициент фильтрации при давлении 200 кПа – не менее 0,0001 м/с, то есть не менее 8,6 м/сутки. Результаты определения фильтрационных свойств 15 испытанных образцов новых геотекстилей, в том числе с расчетом коэффициента фильтрации, частичные результаты сведены в таблицу 2.

На рисунке представлена зависимость соответственно коэффициента фильтрации от нагрузки и время падения уровня водяного столба на приборе Союздорнии. Исходя из данных таблицы 2, новые геотекстили с запасом удовлетворяют нормативному требованию по фильтрационным свойствам.

Испытания старогодных геотекстилей. Испытанию подверглись геотекстильные материалы, изъятые при капитальном ремонте пути на участках эксплуатации бесстыковой конструкции длиной в перегон, со сверхнормативном пропущенном тоннажем [5] Западно-Сибирской железной дороги (таблица 3).

Результаты определения физико-механических показателей испытываемых образцов старогодных геотекстилей представлены в таблице 4.

Старогодные образцы геотекстиля №1 удовлетворяют требованиям к механическим характеристикам, а геотекстиля №2 не удовлетворяет требованиям. Исключение составляет поверхностная плотность. Причиной служит износ материала (надрывы, проколы) в процессе истирания зернами щебеночного балласта.

Таблица 2 – Коэффициент фильтрации нового геотекстиля, м/сутки

Номер образца	Коэффициент фильтрации, при давлении		
	200 кПа	20 кПа	2 кПа
1	15,2	69,4	93,2
2	20	37,8	66,1
3	10,5	28,7	61,2
4	12,3	31,2	66,9
5	51,2	164,4	249,9

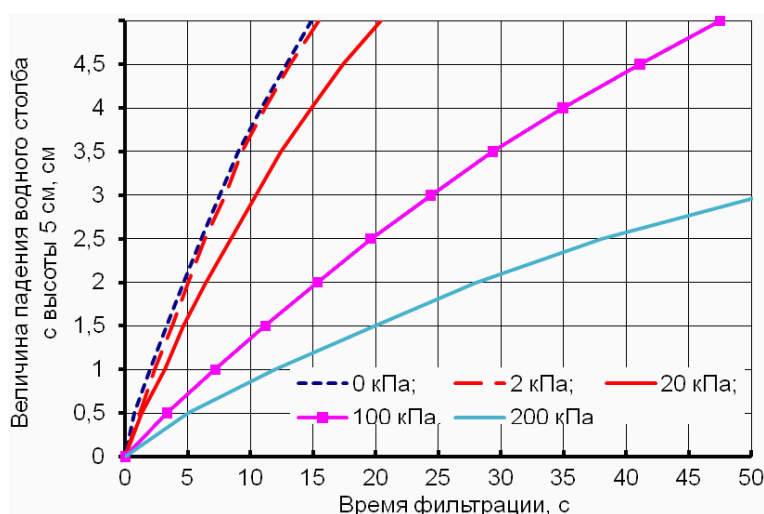


Рисунок – Интенсивность фильтрации новых образцов геотекстиля

Таблица 3 – Характеристика места изъятия геотекстилей (бесстыковый путь)

Номер образца	Перегон	Номер пути	Пропущенный тоннаж, млн. т (бр.)
1	Чулымская-Кокошино	1	1050
2	Дупленская-Тихомирово	1	1180
3	Обь-Клещиха	1	1520
4	Каратканск-Татарская	1	894

Таблица 4 – Характеристики старогодных геотекстилей

Наименование показателей		Норма	Средние значения	
			1	2
Поверхностная плотность, г/м ²		более 300	432	847
Разрывная нагрузка на полосу шириной 5 см в направлении минимального сопротивления, Н	по длине	более 500	672	183
	по ширине		786	280
Относительное удлинение при разрыве, %	по длине	менее 90	39	310
	по ширине		53	508
Прочность при продавливании шариком, Н		более 1200	1258	386

Результаты определения фильтрационных свойств старогодных геотекстилей, сведены в таблицу 5.

По требованию к коэффициенту фильтрации, старогодные образцы геотекстиля №2, 3 удовлетворяют нормативному требованию по фильтрационным свойствам, а образцы геотекстиля №4 выявлены недостаточные показатели коэффициента фильтрации, связанные с исчерпанием фильтрационной способности.

Выводы:

– Современные новые геотекстили удовлетворяют предъявляемым к ним нормативным требованиям по механическим и гидравлическим свойствам.

– Определено влияние на интенсивность фильтрации и коэффициент фильтрации различных уровней давления (2 кПа; 20 кПа; 200 кПа). Для нового геотекстиля коэффициент фильтрации снижается в среднем с 72 до 42 и 15 м/сутки соответственно, то есть в 1,7 и 4,8 раза.

– Старогодные геотекстили, прослужившие первый межремонтный период эксплуатации на Транссибирской магистрали, не в полной мере удовлетворяют нормативным требованиям по механическим и гидравлическим свойствам. Наибольшие изменения касаются ухудшением фильтрационных свойств, которые при повторной эксплуатации будут продолжать снижаться.

– По результатам комплексных испытаний нового и старогодного геотекстиля рекомендуется проведение входного контроля поступающего геотекстиля, не только для оценки свойств новых материалов, но и для дальнейшей оценки изменения свойств этой партии по итогам первого межремонтного срока эксплуатации (когда необходимо выполнять еще один лабораторный контроль). По итогам предложенных мероприятий становится возможным прогноз рациональности и возможности повторного использования геотекстиля.

– Для улучшения прочностных свойств старогодного геотекстиля рекомендуется укладывать на разделительный слой сверху слой песка, для предотвращения продавливания зернами щебня и снижения механического износа. С целью улучшения гидравлических свойств геотекстиля рекомендуется в рамках капитального ремонта пути слой песка устраивать не только сверху от геотекстиля, но и снизу.

Таблица 5 – Коэффициент фильтрации образцов геотекстилей

Номер образца	Коэффициент фильтрации, при давлении		
	200 кПа	20 кПа	2 кПа
1*	–	1,1	1,7
2	8,6	33,5	51,1
3	8,7	38,2	48,7
4	6,2	21,8	29,1

*-очень плотный материал, разово укладывался в конце 1990 гг., точные данные о производителе не сохранились, небольшая партия осталась на базе в путевой машинной станции (ПМС)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Щепотин, Г.К. Эффективность усиления подшпального основания пенополистиролом / Г.К. Щепотин, Д.В. Величко // -Путь и путевое хозяйство. -2005. -№9. -С. 12-13.
- Величко, Д.В. Анализ загрязненности щебеночного балласта / Д.В. Величко, Н.А. Толстикова // -Известия Транссиба. -2016. -№3. -С. 110-117.
- Величко, Д.В. Особенности эксплуатации бесстыкового пути при превышении нормативного тоннажа / Д.В. Величко // -Вестн. Сиб. гос. ун-в. путей сообщ. -2010. -Вып. 22. -С. 49-53.
- Технические условия 5772-017-25388761-2004. Материал геотекстильный нетканый для строительных работ. -Новая Майна, 2004. -12 с.
- Величко, Д.В. Анализ технического состояния бесстыкового пути на Западно-Сибирской железной дороге / Д.В. Величко, Д.Г. Шелемetyев, Е.С. Антерейкин, А.А. Николаенко // -Вестн. Сиб. гос. ун-в. путей сообщ. -2017. -№3. -С. 5-11.

REFERENCES

- G.K. Shchepotin, D.V. Velichko. The effectiveness of the railroad tie base reinforcement by polystyrene foam [Effektivnost' usileniya podshpal'nogo osnovaniya penopolistirolom]. *Railroads and rail transport operations [Put' i putevoe khozyaystvo]*. 2005. No. 9. pp. 12-13.
- D.V. Velichko, N.A. Tolstikova. Analysis of crushed stone ballast contamination [Analiz zagryaznennosti shchebenochnogo ballasta]. *Digest of the Trans-Siberian Railway [Izvestiya Transsiba]*. 2016. No. 3. pp. 110-117.
- D.V. Velichko. Operational features of the continuous railway in excesses of normative tonnage [Osobennosti ekspluatatsii besstykovogo puti pri prevyshenii normativnogo tonnazha]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya*. 2010. No. 22. pp. 49-53.
- Specifications 5772-017-25388761-2004 [Tekhnicheskie usloviya 5772-017-25388761-2004]. Geotextile nonwoven material for construction work [Material geotekstil'nyy netkanyy dlya stroitel'nykh rabot]. Novaya Mayna. 2004. 12 p.
- D.V. Velichko, D.G. Shelemet'ev, E.S. Antereykin, A.A. Nikolaenko. Analysis of continuous railway technical condition on the West-Siberia railways [Analiz tekhnicheskogo sostoyaniya besstykovogo puti na Zapadno-Sibirskoy zheleznoy doroge]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya*. 2017. No. 3. pp. 5-11.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

железнодорожный путь, геотекстиль, капитальный ремонт, второй срок службы, фильтрация

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Величко Дмитрий Валерьевич, канд. техн. наук, доцент СГУПС
Антерейкин Евгений Сергеевич, канд. техн. наук, доцент СГУПС
630049, г.Новосибирск, ул.Д.Ковальчук, 191, СГУПС

ПОЧТОВЫЙ АДРЕС:

630049, г.Новосибирск, ул.Д.Ковальчук, 191, СГУПС

ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ПОРТАЛЬНЫХ КРАНОВ ПО КРИТЕРИЯМ БЕЗОПАСНОСТИ РАСЧЕТНЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»

Л.В. Пахомова, В.А. Шарутина

ASSESSMENT OF THE RESIDUAL RESOURCE OF PORTAL CRANES BY THE SAFETY STANDARDS FOR ESTIMATED METAL STRUCTURES

Siberian State University of Water Transport (SSUWT) 33, Schetinkina St., Novosibirsk, 630099, Russia

Lyudmila V. Pakhomova (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of SSUWT)

Vera A. Sharutina (Assoc. Prof. of SSUWT)

ABSTRACT: Extension of the safe operation of cranes requires the documents containing reliable information about their actual technical condition. In real terms, residual resource is assigned by an experimental calculation method based on the assessment of the fatigue strength criterion. When assessing the resource of the calculated metal structures of cranes, the service life indicated in crane certificate is used. The residual resource can be assigned without additional calculations, based on the total crane uptime since its commissioning, if the actual operating modes do not exceed the rated ones.

Keywords: crane operation, residual resource, fatigue limit, life span

Продление срока безопасной эксплуатации кранов осуществляется по документам, отражающим достоверную информацию об их техническом состоянии. Экспериментально-расчётным методом на основании оценки критерия усталостной прочности производится назначение остаточного ресурса. При оценке ресурса расчётных металлоконструкций кранов используется срок службы, указанный в паспорте. Остаточный ресурс может быть назначен без дополнительных расчётов, исходя из общей продолжительности работы крана с момента ввода его в эксплуатацию, если фактическая группа режимов работы не превышает паспортную.

Требования к методам оценки остаточного ресурса крановых металлоконструкций основываются на положениях руководящих документов (РД) Государственного комитета по экологическому, технологическому и атомному надзору [1].

В соответствии с техническим состоянием и с учетом требований нормативных документов продление эксплуатации кранов осуществляется на срок до наступления прогнозируемого предельного состояния.

Перед проведением обследования для установления срока безопасной эксплуатации рассматриваются документы, отражающие достоверную информацию о техническом состоянии оборудования.

Критериями предельного состояния расчётных металлоконструкций кранов принимают:

- усталостные трещины;
- недопустимые по величине остаточные деформации;
- потеря устойчивости;
- недопустимые уменьшения сечений элементов;
- коррозия и изменение свойств материалов.

Назначение остаточного ресурса экспертным методом включает фактическую оценку группы режима работы крана. Условием использования этого метода является отсутствие усталостных повреждений расчётных элементов металлоконструкций.

Экспериментально-расчётный метод предусматривает уточнение фактического режима эксплуатации и механических свойств металлоконструкций. В качестве наиболее вероятного предельного состояния выбирается критерий усталостной прочности, что характерно для групп режимов работы А6 и выше. Экспериментально-расчётным методом могут быть определены показатели нагруженности расчётных элементов конструкции с начала эксплуатации до момента проведения определения остаточного ресурса.

При обследовании технического состояния особое внимание следует уделять усталостным трещинам. Основной метод обследования – визуальный, физические методы неразрушающего контроля применяются в зонных выявленных повреждениях.

При оценке ресурса расчётных элементов металлоконструкций кранов в качестве исходных данных следует использовать срок службы, указанный в паспорте. Расчётное число циклов работы крана принимается по паспортной группе режимов работы крана. Характери-

стиками трещиностойкости являются показатели числа циклов нагружения и расчётного количества циклов изменения нагружения.

Основным средством механизации работ со штучными и насыпными грузами в речных портах России остаются порталные краны «Альбатрос 10/20-32/16-10,5» немецкого производства. Большинство из них давно отработали нормативные сроки эксплуатации. В среднем краны находятся в работе 200 дней в году. Экспертным путём выявлено, что наиболее ответственными узлами металлоконструкции являются (рисунок). Типовым дефектом участка 1 (рисунок) является развитие усталостных трещин вплоть до разрушения стрелы. Поверхностная коррозия на участке 1 отсутствует; На участке 2 (рисунок) коррозионное повреждение достигает 10%.

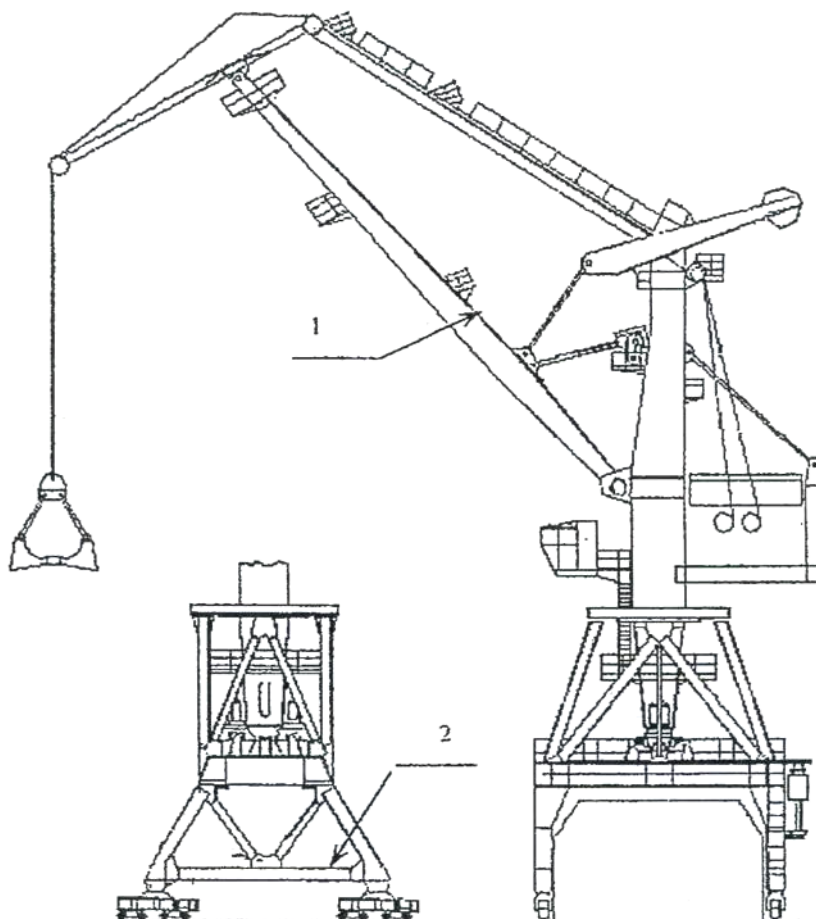


Рисунок – Портальный кран «Альбатрос»: 1-участок окончания продольных ребёр жесткости верхнего пояса стрелы; 2-горизонтальная затяжка ног портала

Элементы металлических конструкций, подвергавшиеся ремонту, рассчитываются с учётом механических характеристик вновь установленного металла и изменения коэффициентов концентрации напряжений.

Необходимо учитывать влияние на несущую способность элементов металлоконструкций возникновение коррозии. Поверхностная коррозия более 10% от общей площади сечения учитывается при расчёте остаточного ресурса:

- по критерию вязкого разрушения для элементов, работающих на растяжение;
- по критерию потери устойчивости для сжатых элементов.

Поверхностная коррозия свыше 30% первоначальной площади сечения для элементов металлоконструкций кранов не допускается, такие элементы подлежат замене или усилению. Трещины в расчётных элементах металлоконструкций не допускаются и элементы подлежат замене.

Остаточный срок службы может быть назначен без проведения дополнительных расчётов, исходя из общей продолжительности эксплуатации крана T с момента ввода его в эксплуатацию:

- $(45 - T)$, лет, для кранов групп использования А4 и А5 и периодичности повторного обследования 3 года;
- $(40 - T)$, лет, для групп использования А5-А7, работающих со штучными грузами, периодичность повторного обследования 2 года;
- для кранов групп использования А6-А8, работающих с насыпными грузами периодичность повторного обследования для кранов с наработкой до 30 лет – 2 года, после 30 лет – 1 год.

Если фактическая группа работы превышает паспортную, то оценка остаточного срока службы должна выполняться экспериментально-расчётным методом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1 РД 24-112-4Р. Руководящий документ по оценке остаточного ресурса порталных кранов. - М. -СПб, -66 с.

1 RD 24-112-4P. Guidance document on the assessment of the residual life of gantry cranes [Rukovodyashchiy dokument po otsenke ostatochnogo resursa portal'nykh kranov]. Moscow. 66 p.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: эксплуатация кранов, остаточный ресурс, усталостная прочность, срок службы
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ: Пахомова Людмила Владимировна, канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «СГУВТ»
 Шарутина Вера Александровна, доцент ФГБОУ ВО «СГУВТ»
ПОЧТОВЫЙ АДРЕС: 630099, г.Новосибирск, ул.Щетинкина, 33, ФГБОУ ВО «СГУВТ»

ПАВОДКОВЫЕ ПОДТОПЛЕНИЯ НА РЕКЕ КАТУНЬ

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»

А.А. Самшорина

MINOR FLOODING ON THE KATUN RIVER

Siberian State University of Water Transport (SSUWT) 33, Schetinkina St., Novosibirsk, 630099, Russia
Alina A. Samshorina (Graduate student of SSUWT)

ABSTRACT: High water and flash floods often become hazardous due to high speeds on river Katun, which respectively trigger the water stage to rise fast and suddenly. Many floods are accompanied by great damage and loss of life. The authors made a comprehensive study of the hydrological regime and channel reorganizations of the Katun River, which includes development and implementation of flood safety strategy.

Keywords: flash floods, high water, mountain rivers, bank erosion, riverbed evolution

Выполнено обоснование всестороннего исследования гидрологического режима и русловых преформирований реки Катунь. Разработана комплексная стратегия противопаводковой защиты. Паводки и половодья на реке часто принимают разрушительный характер из-за больших скоростей, быстрых и резких подъёмов уровней воды. Многие наводнения сопровождаются большими разрушениями и человеческими жертвами.

Катунь – судоходная река Республики Алтай и Алтайского края. Берёт начало на леднике Геблера Катунского хребта, на южном склоне г.Белухи. При слиянии с рекой Бия образует Обь. Почти весь бассейн Катунь расположен в горах Алтая.

Река относится к алтайскому типу, с высоким растянутым (2-3 месяца) весенне-летним половодьем и низкой осенне-зимней меженью. В годовом цикле почти всегда выражены две волны половодья: первая в конце апреля – начале мая, обусловленная таянием снега в предгорных и равнинных частях бассейна, а вторая, обязанная своим происхождением таянию ледников в горах, - в середине июня.

Разработка противопаводковых и берегозащитных мероприятий актуальна для Горного Алтая, где население сосредоточено в речных долинах.

Паводки и половодья на реке Катунь часто принимают разрушительный характер из-за больших скоростей, быстрых и резких подъёмов уровней воды. Выдающиеся наводнения, сопровождавшиеся большими разрушениями человеческими жертвами, отмечались на реках Алтая в 1920, 1928, 1937, 1954, 1958, 1969, 2010, 2014 гг.

В 2014 г. аномально высокий дождевой паводок стал катастрофическим событием по интенсивности воздействия, масштабам наводнения и величине ущерба. Уровни и расходы рек были близки, а зачастую превышали исторические максимумы. Паводковая обстановка была отнесена к чрезвычайным ситуациям федерального характера. Было разрушено (по-

вреждено) 250 мостов, 54 из которых регионального значения, затоплению и подтоплению подверглись десятки населенных пунктов. Последствия паводка стали одной из причин проведения серии экспедиционных исследований на Катунь в пределах наиболее пострадавшего от паводка Уймонской котловины в Усть-Коксинском районе (рисунок).

В нижнем течении рек, где 30-километровый участок непосредственно от слияния с Бией является судоходным, катастрофический паводок 2014 г. привел к активизации русловых переформирований, перераспределению стока между рукавами и протоками среди островов. Интенсивный размыв привел к избыточному поступлению наносов на фоне рассредоточения стока, обусловив обмеление ряда и без того сложных перекатов.



Рисунок – Река Катунь наводнение 2014 г.

На горных реках опасны не только половодья, но и русловые процессы. В межгорных котловинах и депрессиях, где русловые деформации развиваются свободно, размывы берегов достигают 50-90 м в год. В 2002-2012 гг. в с.Усть-Кокса размыв левобережной террасы уничтожил более 4 км² территории села, 50 домов и инженерно-хозяйственных объектов на трёх улицах были перенесены или разрушены.

Разрушительный характер половодий, паводков и русловых процессов вынуждает строить дорогостоящие защитные сооружения. Так для защиты с.Усть-Коксы от размыва вдоль левого берега Катунь была сооружена капитальная дамба длиной 1100 м и высотой 8 м со шпорами из глыб и бутового камня; её сметная стоимость составила 109 млн. руб.

Последние значительные работы на реке Катунь производились еще в 1980-е гг. В 1980 г. изыскательскими партиями была составлена схема судового хода от причалов Бийского гравийно-песчанного карьера до устья (29 км). Им предшествовали исследования Русловой экспедиции МГУ, позволившие обосновать комплекс дноуглубительных работ по созданию современной трасы судового хода на нижней Катунь. Основной гидрологический пост – Сростки, при проектном уровне +180 см, гарантированные глубины обеспечиваются с помощью землечерпания.

К 1980 гг. на участке было построено более 10 выправительных сооружений. Общая длина берегоукрепительных капитальных сооружений на Катунь составляет 10 км. Что позволило увеличить гарантированные глубины, увеличить глубины на перекатах по судовому ходу [2].

В конце 1980 гг. С.Н. Рулевой было проведено исследование по морфологии и динамике русла верхней и средней Оби и влияния на них гидротехнических сооружений. Так же проведены анализы по переформированию свободных излучин на реке Катунь, которые показали, что максимальные скорости размыва берегов могут достигать 50-70 м/год.

В начале 1990-х гг. в районе с. Верх-Катунского был проведен земснаряд, разработавший прорезь, по которой поток был отведен в среднюю часть реки от подмываемого правого берега, на котором расположен населенный пункт.

В начале 2000-х гг. М.И. Ворошиловой были проведены исследования по влиянию дноуглубительных и выправительных работ на планово-высотную устойчивость русел рек. В которых были подробно изучены деформации излучин рек и их плановая устойчивость, на примере Обского бассейна, в том числе на реке Катунь [1].

Результаты изысканий, руслового анализа, гидрологических и модельных расчетов легли в основу рекомендаций и предложений по гидротехническим, управленческим и организационным мероприятиям, направленным на обеспечение гидроэкологической безопасности приречных территорий.

Дальнейшим развитием этого направления исследований стала работа по оценке опасных проявлений гидрологических и русловых процессов на всем протяжении Катунь. Был проведен русловой анализ, определены морфодинамические типы русла. По длине реки преобладает горный тип русла с развитыми аллювиальными формами (75%), который чередуется с полугорным руслом (21%). Равнинный тип русла наблюдается лишь на устьевом

участке (4%).

Среди опасных проявлений русловых процессов на Катунь преобладают размывы берегов. По материалам сопоставленных планов А.С. Завадским, Е.А. Морозовой были даны оценки характерных скоростей размыва берегов на всем протяжении русла Катунь на участках расположения населенных пунктов. В настоящее время на Катунь угроза размыва берега существует для 25 из них.

Наибольшее количество населенных пунктов с активным размывом берегов приурочены к участкам с широкопойменным разветвленным руслом: Уймонской межгорной котловине и нижнему течению реки. Для населенных пунктов были рассчитаны также расходы и уровни воды обеспеченностью 50, 10, 5 и 1%, что позволило оценить вероятность и площадь возможного затопления селитебных территорий.

На основе проведенных расчетов А.С. Завадским, Е.А. Морозовой, которые были выполнены по плану НИР научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева, была дана предварительная оценка опасности русловых и гидрологических процессов для населенных пунктов, расположенных на берегах Катунь. Была предложена 4-х балльная система оценки степени опасности негативного воздействия вод, которая характеризует как опасность от размыва берегов, так и затопления, причем независимо друг от друга. В зависимости от степени опасности были предложены общие принципы проведения гидротехнических и организационных мероприятий, направленных на обеспечение безопасности территорий [3].

На реке Катунь есть большая необходимость во всестороннем исследовании гидрологического режима и русловых переформирований, разработки и внедрения комплексной стратегии противопаводковой защиты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Ворошилова, М.И. Влияние дноуглубительных и выправительных работ на планово-высотную устойчивость русел рек (на примере Обского бассейна): Дис. ... канд. техн. наук: 05.22.17 / Ворошилова Марина Игоревна. -Новосибирск, 2005. -140 с.

2 Волосухин, В.А., Эффективные пути решения проблемы лимитирующих глубин на судоходных реках Европейской территории России / В.А. Волосухин, С.Г. Новиков. -Ростов н/Д.: Донской гос. агр. ун-в., 2016. -С. 25-28.

3 Завадский, А.С., Верхняя Катунь: условия формирования русла, гидрологический режим, русловые процессы, их экстремальные и опасные проявления, берегозащитные и противопаводковые мероприятия / А.С. Завадский, В.В. Сурков, П.П. Головлев, И.В. Крыленко, В.Л. Бабулин, М.Д. Горячко, И.Н. Крыленко, С.Н. Рулёва, М.А. Самохин, Е.А. Морозова. -М.: Моск. гос. ун-в., 2018. -113 с.

REFERENCES

1 M.I. Voroshilova. Influence of dredging and straightening works on the planned-high-altitude stability of stream beds (on the example of the Ob basin) [Vliyaniye dnouglubitel'nykh i vypravitel'nykh rabot na planovovysotnuyu ustoychivost' rusel rek (na primere Obskogo basseyna)]. Novosibirsk. 2005. 140 p.

2 V.A. Volosukhin, S.G. Novikov. Effective ways to solve the problem of limiting depths on navigable rivers of the European territory of Russia [Effektivnye puti resheniya problemy limitiruyushchikh glubin na sudokhodnykh rekakh Evropeyskoy territorii Rossii]. Rostov na Donu: Don St. Agrarian Univ. Publ. 2016. pp. 25-28.

3 A.S. Zavadskiy, V.V. Surkov, P.P. Golovlev, I.V. Krylenko, V.L. Baburin, M.D. Goryachko, I.N. Krylenko, S.N. Ruleva, M.A. Samokhin, E.A. Morozova. Upper Katun: conditions of streambed formation, hydrological regime, streambed processes, their extreme and dangerous manifestations, bank protection and flood control measures [Verkhnyaya Katun': usloviya formirovaniya rusla, gidrologicheskiy rezhim, ruslovye protsessy, ikh ekstremal'nye i opasnye proyavleniya, beregozashchitnye i protipavodkovyye meropriyatiya]. Moscow. Moscow St. Univ. Publ. 2018. 113 p.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: паводки, половодья, горные реки, течение реки, размыв берегов, русловые процессы
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ: Самшорина Алина Андреевна, аспирант ФГБОУ ВО «СГУВТ»
ПОЧТОВЫЙ АДРЕС: 630099, г.Новосибирск, ул.Щетинкина, 33, ФГБОУ ВО «СГУВТ»

ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ НОВОСИБИРСКОГО АКВАПАРКА

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»

Е.М. Сорокин, М.И. Ворошилова

HYDRAULICS OF NOVOSIBIRSK WATER PARK

Siberian State University of Water Transport (SSUWT) 33, Schetinkina St., Novosibirsk, 630099, Russia

Evgeniy M. Sorokin (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of SSUWT)

Marina I. Voroshilova (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of SSUWT)

ABSTRACT: The article considers the problems arising in many big cities connected with the construction in floodplain sections of river channels. During the development of the inundated part of the floodplain, its rejection from the main part of the riverbed occurs and, as a result, the flow is constrained at high water levels. Using the example of the city of Novosibirsk, the authors show solution of one of such problems arising during the construction of Water Park on the floodplain sector of the Ob River.

Keywords: hydraulic structures, riverbed evolution, floodplain, roughness coefficient, side slope fixing

Рассмотрены проблемы, возникающие во многих крупных населенных пунктах. Эти проблемы связаны с застройкой пойменных участков речных русел. При освоении затапливаемой части поймы различного рода сооружениями происходит ее отторжение от основной части русла и как следствие наблюдается стеснение потока при высоких уровнях воды. На примере города Новосибирска показано решение одной из таких проблем, возникших при строительстве аквапарка на пойменном участке реки Обь.

Оздоровительный комплекс с аквапарком и гостиницей в г.Новосибирске расположен на затапливаемом участке поймы р. Обь.

Строительство вышеуказанного объекта предполагает создание искусственной насыпи на левобережном пойменном участке реки Обь в черте г.Новосибирска. Отметка верха насыпи принята равной 96,0 м в правобережной системе высот г.Новосибирска.

При освоении затапливаемой части поймы различного рода сооружениями происходит ее отторжение от основной части русла и как следствие наблюдается стеснение потока при высоких уровнях воды. Любое стеснение потока приводит к перераспределению скоростей течения русла, что сказывается на размыве как самого русла, так и противоположного берега реки.

При решении вопроса о возможности возведения пойменной насыпи был выполнен анализ возможного ее влияния на русловые процессы.

Следует отметить, что в настоящее время отсутствует единая утвержденная методика оценки русловых процессов на пойменных участках рек и требуется проведение расчетов на основании разработок крупнейших отечественных и зарубежных исследователей.

На рассматриваемом участке мы имеем дело с односторонней поймой и это обуславливает методику дальнейших расчетов.

В результате анализа гидрологических и топографических материалов, исследований, проводившихся МГУ совместно с «Обским ГБУ ВПиС», ныне Федеральное бюджетное учреждение «Администрация Обского бассейна внутренних водных путей» (ФБУ «Администрация Обского БВП»), а также данных исследований других авторов [1-5], была выполнена серия расчетов, направленных на решение поставленной в настоящей работе задачи.

Для определения степени стеснения поймы планируемой застройкой и определения коэффициентов шероховатости были построены поперечные профили в бытовом и проектном состоянии по шести створам в пределах участка.

В результате серии расчетов определены коэффициенты шероховатости, подсчитаны уклоны свободной поверхности и их относительное изменение в бытовом и проектном состоянии.

Результаты расчета при самом неблагоприятном случае:

– максимальный уровень 0,1% обеспеченности (соответствует наивысшему годовому уровню, зафиксированному в 1966 году) $H_{\max} = 692$ см;

– максимальный расход воды по гидропосту г. Новосибирск $Q_{\max} = 10000$ м³/с;

– коэффициент шероховатости в бытовом состоянии $n = 0,017$;

– коэффициент шероховатости в проектном состоянии $n_{\text{пр}} = 0,018$;

– уклон свободной поверхности в бытовом состоянии $\ell = 1,275 \cdot 10^{-5}$;

– уклон свободной поверхности в проектном состоянии $\ell_{\text{пр}} = 1,551 \cdot 10^{-5}$;

– отношение уклонов $\ell_{\text{пр}}/\ell = 1,216$.

Выполненные расчеты изменения уклонов свободной поверхности р. Обь в районе планируемой застройки позволяют сделать вывод о том, что скорости течения могут изменяться в пределах 4-5% от бытовых.

Следовательно, динамика руслового потока не претерпит существенных изменений и не повлияет на устойчивость береговой полосы как в районе застройки, так и на участках выше и ниже по течению.

Для оценки влияния застройки левобережной поймы на русловые процессы и изменение судоходных условий был выполнен расчет плана течений. В результате анализа полученных результатов был сделан вывод о том, что предполагаемое строительство не окажет влияния на ход руслового процесса и как следствие на сохранность судоходной трассы и устойчивость правого берега.

Несмотря на то, что в целом влияние строящегося объекта на динамику русловых про-

цессов незначительно, возможен местный размыв берегового откоса насыпи под основание сооружений. Для недопущения негативных последствий местного размыва рекомендовано устройство крепления откосов в виде монолитного железобетонного покрытия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Барышников, Н.Б. Морфология, гидрология и гидравлика пойм / Н.Б. Барышников. -Л.: Гидрометеиздат, 1984. -280 с.
- 2 Гришанин, К.В. Водные пути / К.В. Гришанин, В.В. Дегтярев, В.М. Селезнев. -М.: Транспорт, 1986. -400 с.
- 3 Руководство по проектированию, строительству и эксплуатации выправительных сооружений из грунта. - М.: Транспорт, 1971. -191 с.
- 4 Русловые процессы и водные пути рек Обского бассейна / Под редакцией Р.С. Чалова, Е.М. Плескевича, В.А. Баулы. -Новосибирск: РИПЭЛ плюс, 2001. -300 с.
- 5 Чоу, В.Т. Гидравлика открытых каналов (пер. с англ.) / В.Т. Чоу. -М.: Стройиздат, 1969. -464 с.

REFERENCES

- 1 N.B. Baryshnikov. Morphology, hydrology and hydraulics flood-plains [Morfologiya, gidrologiya i gidravlika poym]. Leningrad. Gidrometeoizdat Publ. 1984. -280 s.
- 2 K.V. Grishanin, V.V. Degtyarev, V.M. Seleznev. Waterways [Vodnye puti]. Moscow. Transport Publ. 1986. 400 p.
- 3 Guidelines for the design, construction and operation of straightening structures from the ground [Rukovodstvo po proektirovaniyu, stroitel'stvu i ekspluatatsii vypravitel'nykh sooruzheniy iz grunta]. Moscow. Transport Publ. 1971. 191 p.
- 4 R.S. Chalov, E.M. Pleskevich, V.A. Baula. Streambed processes and waterways of the Ob basin's rivers [Ruslovyie protsessy i vodnye puti rek Obskogo basseyna]. Novosibirsk. RIPEL plus Publ. 2001. 300 p.
- 5 W.T. Chou. Open channel hydraulics. New York. McGraw-Hill. 1959.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: гидротехнические сооружения, русловые процессы, пойма, коэффициент шероховатости, крепление откосов

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ: Сорокин Евгений Михайлович, канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «СГУВТ»
Ворошилова Марина Игоревна, канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «СГУВТ»

ПОЧТОВЫЙ АДРЕС: 630099, г.Новосибирск, ул.Щетинкина, 33, ФГБОУ ВО «СГУВТ»

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ И РУСЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЗОНЕ ВЫКЛИНИВАНИЯ ПОДПОРА НОВОСИБИРСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»

Е.М. Григорьев

HYDROLOGICAL MODE AND RIVERBED EVOLUTION IN TRANSIENT REGION OF THE NOVOSIBIRSK RESERVOIR
Siberian State University of Water Transport (SSUWT) 33, Schetinkina St., Novosibirsk, 630099, Russia
Evgeniy M. Grigor'ev (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of SSUWT)

ABSTRACT: An approximate analysis of the hydrological mode and riverbed evolution in transient region of the Novosibirsk reservoir is presented in this paper. The data obtained can be used in the design and operation of ship passages, moorings, underwater and surface crossings, water intakes, bridges and other hydraulic structures.

Keywords: reservoir, hydrological mode, riverbed evolution

Приведён приближённый анализ гидрологического режима и русловых процессов в зоне выклинивания подпора Новосибирского водохранилища. Полученные данные могут быть использованы при проектировании и эксплуатации судовых ходов, причалов, подводных и надводных переходов, водозаборов, водовыпусков, мостов и других гидротехнических сооружений.

Река Обь – крупная воднотранспортная магистраль. Она связывает Новосибирскую область и Алтайский край с Обским Севером, где на его огромных пространствах сосредоточены колоссальные запасы нефти, газа, угля, металлов и других полезных ископаемых и при этом отсутствует развитая сеть железных дорог. Это делает речной транспорт незаменимым для перевозок массовых грузов. Стабилизация судоходных трасс и поддержание судоходных глубин на этой воднотранспортной магистрали обеспечивается производством на реке дноуглубительных и выправительных работ.

Наибольшие трудности процесса стабилизации судоходных трасс возникают на верхнем участке Оби от слияния Бии и Катунь до Камня-на-Оби, то есть, включая зону выклинивания подпора Новосибирского водохранилища. Этот участок характерен развитой русловой многорукавностью, легкоподвижными грунтами русла и сложным гидрологическим режимом (несколько паводков и спадов уровней в течение навигации). Объём дноуглубительных работ для обеспечения судоходных глубин составляет в среднем до 40 тыс. м³ на 1 км судового хода. Протяжённость углубляемых перекатов более 70% от общей длины судового хода.

На этом трудном для обеспечения нормального судоходства верхнем течении Оби самым затруднительным по гидрологическому режиму и русловым процессам является зона

выклинивания подпора водохранилища. Как известно, зоны выклинивания подпора являются наиболее сложными и нуждающимися в серьезном изучении водными объектами. Происходящие в них деформации русла со временем создают сложные проблемы для судоходства и других водопользователей [1].

Новосибирское водохранилище образовано перекрытием русла Оби плотиной выше г.Новосибирска в ноябре 1956 г. Заполнение водохранилища до нормального подпорного уровня (НПУ) было закончено в июне 1959 г. Площадь зеркала водохранилища при НПУ равна 1070 км². Полная ёмкость составляет 8,8 км³, полезная – 4,4 км³. Максимальная сработка водохранилища не превышает в навигационный период 1 м, а зимой – 5 м. Водохранилище руслового типа. Его длина 185 км намного превышает ширину, равную в среднем 10 км, максимальную – 18 км.

Границы зоны выклинивания подпора весьма изменчивы в зависимости от наполнения водохранилища. Верхняя, где уклоны свободной поверхности уравниваются с уклонами реки в бытовых условиях, располагается всегда выше г.Камень-на-Оби. Нижняя граница зоны переменного подпора со значительными уклонами с зоной малых уклонов в озеровидной части водохранилища перемещается в зависимости от уровней воды и наблюдается примерно в створах гидрологических постов при малой сработке в Соколово и глубокой сработке в Ордынском. Местоположение нижней границы зависит главным образом от объёма притока воды и его распределения во времени. Сложная взаимосвязь режима наполнения водохранилища со сроками и интенсивностью прохождения весеннего половодья на основных притоках, связанное с таянием снегов в горах Алтая, обуславливает многовариантность положения и верхней, и нижней границ зоны выклинивания подпора в период прохождения руслоформирующих расходов в половодье и межень.

В связи с глубокой зимней ежегодной сработкой водохранилища, годовая амплитуда колебаний уровней воды превышает 6 м, что обуславливает большую длину и подвижность зоны выклинивания подпора. Ступенчатый режим сработки, определённый действующими правилами использования водных ресурсов водохранилища фиксирует несколько положений зоны, соответствующих стоянию уровней в диапазоне графика Новосибирэнерго.

Колебания отметок дна в течение навигации в зоне выклинивания подпора в результате аккумуляции наносов и размыва русла на отдельных перекатах превышают 2 м.

В наиболее характерной верхней части зоны выклинивания расположен гидрологический пост Камень-на-Оби, наблюдения на котором ведутся с 1894 г. Анализ гидрологического режима по данным этого поста показывает, что характер колебания уровней по сравнению с бытовым отличается большей сглаженностью за счёт волны половодья и влияния подпора от плотины ГЭС. Отметки максимальных уровней не превышают бытовые, но наблюдаются не при открытом русле, как до перекрытия реки, и чаще – при ледовых явлениях. После создания водохранилища повторяемость и обеспеченность уровней по наблюдениям на гидрологическом посту г.Камень-на-Оби также изменились. Повторяемость высоких уровней (более 300 см) увеличилась более чем в 2 раза. Минимальный уровень повысился почти на 1 м. Даты наступления максимальных уровней стали значительно более ранними. После создания водохранилища произошли существенные изменения ледового режима. Ледостав на водохранилище наступает на 5-10 дней раньше, чем в бытовых условиях. В зоне выклинивания подпора ежегодно в период вскрытия образуются заторы льда. Сроки очищения ото льда стали более поздними и в среднем приходятся на первую половину мая. Для изучения процессов аккумуляции и размыва наносов в зоне выклинивания подпора большое значение имеет режим течений. Отмечается общее снижение скоростей и смещение границы обычных речных скоростей вниз к озерной части водохранилища по мере сработки запасов воды.

Гидролого-морфологический анализ русловых процессов в зоне выклинивания подпора Новосибирского водохранилища весьма сложная задача из-за отсутствия специальных исследований и наблюдений за деформациями русла. Поэтому приходится использовать для этих целей ограниченное количество исходных данных, полученных в результате выполнения путевых работ за многолетний период: планы русловых съёмок и поплавочных наблюдений, материалы однодневных связей и нивелировок рабочих уровней воды, сведения о выполнявшихся дноуглубительных и выправительных работах. Кроме того, используются имеющиеся в небольшом количестве данные наблюдений Росгидромета. Отсутствие наблюдений за расходами воды, режимом наносов, изменением состояния поймы, а также

данных о геологическом строении русла и поймы, безусловно, сказывается на качестве анализа и прогнозов русловых процессов и не позволяют уверенно и эффективно использовать их при проектировании путевых работ и карьеров добычи нерудных строительных материалов, осложняют прогнозирование русловых деформаций.

Значительные колебания объема стока воды по годам и его внутригодовое распределение в сочетании с трудно прогнозируемой величиной навигационной сработки водохранилища. Всё же по данным выполненных однодневных связей и нивелировок рабочих уровней воды удалось уточнить положение верхней границы зоны выклинивания подпора.

Анализ кривых подпора и данных русловых изысканий показал постепенное затухающее выравнивание уклонов воды и скоростей течения по длине зоны выклинивания подпора. К сожалению, из-за отсутствия многолетних наблюдений за уклонами водной поверхности в периоды стояния уровней водохранилища в диапазоне отметок, близких к НПУ, не удалось проследить динамику изменения верхней границы зоны выклинивания подпора и установить взаимосвязь её с процессами заиливания русла.

Однако удалось сделать некоторые выводы по собранным материалам.

Протяжённость водохранилища делится на три характерных участка: верхний – выше г. Камня-на-Оби, отличающийся интенсивными русловыми деформациями, средний до п. Ордынск со спокойным развитием и преимущественно односторонней направленностью русловых процессов и нижний – до ГЭС. Переработка берегов в зоне выклинивания подпора выше г. Камень-на-Оби фактически отсутствует.

В течение последних лет резкое сокращение бюджетного финансирования на содержание водных путей в зоне выклинивания подпора Новосибирского водохранилища заставило полностью прекратить выправительные работы и углубление судовых ходов. Одновременно, вследствие сложного положения в энергетике, отмечается ежегодная ранняя сработка водохранилища. Сочетание этих двух факторов приводит к усилению неуправляемых деформаций русла. В данной ситуации возрастает необходимость надёжного прогнозирования русловых процессов для принятия своевременных мер по предотвращению возможных негативных последствий [2, 3].

Увеличение заносимости перекаатов в многоводные годы, объясняется смещением кривой подпора и связанной с ней зоной интенсивного отложения наносов вниз по течению по мере сработки водохранилища при одновременном размыве вышедших из подпора перекаатов. Возможность вторичного загрязнения воды в процессе дноуглубления и добычи нерудных строительных материалов в результате извлечения аллювия, в котором содержатся химические загрязнители, принесённые потоком со сточными водами г. Барнаула и водой, содержащих тяжёлые металлы, из Катунь.

Приведённый здесь приближённый анализ гидрологического режима и русловых процессов в зоне выклинивания подпора Новосибирского водохранилища подтверждает высказанный В.К. Калужным тезис о необходимости детального изучения зон выклинивания подпора водохранилищ и происходящих в них сложных русловых процессов для более полного и правильного их учёта при проектировании и эксплуатации судовых ходов, причалов, подводных и надводных переходов, водозаборов, водовыпусков, мостов и других гидротехнических сооружений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

- 1 Бейром, С.Г. Изменение природных условий Средней Оби после создания Новосибирской ГЭС / С.Г. Бейром, Н.В. Вострикова, В.М. Широков. -Новосибирск: Наука, 1973. -143 с.
- 2 Лапшенков, В.С. Прогнозирование русловых деформаций в бьефах речных гидроузлов / В.С. Лапшенков. -Л.: Гидрометеиздат, 1979. -240 с.
- 3 Знаменский, В.А. Гидрометеорологический режим озёр и водохранилищ СССР. Новосибирское водохранилище и озёра Средней Оби / В.А. Знаменский. -Л.: Гидрометеиздат, 1979. -156 с.

- 1 S.G. Beyrom, N.V. Vostrikova, V.M. Shirokov. Changes in the natural conditions of the Middle Ob after the creation of the Novosibirsk hydroelectric power station [Izmenenie prirodnnykh usloviy Sredney Obi posle sozdaniya Novosibirskoy GES]. Novosibirsk: Nauka Publ. 1973. 143 p.
- 2 V.S. Lapshenkov. Prognosing of channel deformations in the ponds of river hydro complexes [Prognozirovanie ruslovykh deformatsiy v b'efakh rechnykh gidrouzlov]. Leningrad. Gidrometeoizdat Publ. 1979. 240 p.
- 3 V.A. Znamenskiy. Hydrometeorological regime of lakes and reservoirs of the USSR. Novosibirsk reservoir and lakes of the Middle Ob [Gidrometeorologicheskij rezhim ozer i vodokhranilishch SSSR. Novosibirskoe vodokhranilishche i ozera Sredney Obi]. Leningrad. Gidrometeoizdat Publ. 1979. 156 p.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ: ПОЧТОВЫЙ АДРЕС:	водохранилище, гидрологический режим, русловые процессы Григорьев Евгений Михайлович, канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «СГУВТ» 630099, г.Новосибирск, ул.Щетинкина, 33, ФГБОУ ВО «СГУВТ»
--	---

ХАРАКТЕРИСТИКИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПУТЕВОГО УГЛА НЕПОДВИЖНОГО GPS-ПРИЁМНИКА J-NAV500 В АВТОНОМНОМ РЕЖИМЕ ЕГО РАБОТЫ

ФГБУН «Институт автоматизации и процессов управления»
Дальневосточного отделения РАН
ФГБОУ ВО «Морской государственный университет имени
адмирала Г.И. Невельского»

В.А. Кац, Ю.А. Комаровский

CHARACTERISTICS OF COURSE OVER GROUND DISTRIBUTION OF THE STATIONARY GPS-RECEIVER J-NAV500 IN STANDALONE OPERATING MODE

Institute of Automation and Control Processes Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (IACP FEB RAS) 5, Radio St., Vladivostok, 690041, Russia
Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoi (MSU named after adm. G.I. Nevelskoi) 50a, Verkhneportovaya St., Vladivostok, 690059, Russia

Vladimir A. Katz (Senior software engineer of IACP FEB RAS)

Yurii A. Komarovskiy (Ph.D. of Engineering Sciences, Expert on technical issues of MSU named after adm. G.I. Nevelskoi)

ABSTRACT: The article investigates the ability of the marine GPS receiver J-NAV500 to measure near zero over ground ship motion. The studies were carried out based on the results of statistical data containing 2932347 measurements of course over ground of the receiver operating in standalone mode. The results concluded that the J-NAV500 receiver is not suitable for determining the moment that a vessel reaches a complete stop.

Keywords: GPS receiver

Приводятся результаты анализа пригодности судового GPS-приёмника J-NAV500 к измерению близких к нулю абсолютных перемещений судна. Исследования проводились на основе обработки статистического материала, содержащего 2932347 измерений путевого угла приёмника, работавшего в автономном режиме. Показано, что для определения момента полной остановки судна данный приёмник J-NAV500 не приспособлен.

Первые судовые приёмники спутниковой радионавигационной системы (СРНС) Навстар GPS, пришедшей на смену системе Транзит, были предназначены для обеспечения так называемой технологии обсервационного счисления пути. Эта технология освобождала штурмана от нанесения на путевую карту линии пути судна, направление которого рассчитывалось с помощью графических построений с учётом воздействия ветра и течения, нанесения счислимого и обсервованного места судна, определения невязки и уточнения влияния внешних факторов. Так как приёмники СРНС Навстар GPS определяли и выводили на экран дисплея обсервованную широту и долготу через 1-2 с, то при ведении обсервационного счисления на карту с частотой, определяемой условиями плавания, наносились только обсервованные точки, которые соединялись прямыми линиями. В наши дни технология обсервационного счисления полностью автоматизирована в устройствах электронной картографии. Поначалу обсервованные координаты выводились с разрядностью 0,01 угловой минуты. Считалось, что для ручных построений на навигационных картах такой разрядности вполне достаточно. С внедрением автосчислителей и путепрокладчиков потребовалось увеличить разрядность обсервованных координат до трёх знаков после запятой. Современные судовые GPS-приёмники определяют обсервованные координаты и выводят их на внешние устройства в международном стандарте NMEA 0183 с разрядностью 0,0001 угловой минуты широты и долготы. Совершенствование бортовой аппаратуры навигационных спутников (в первую очередь атомных эталонов частоты) повлечёт изготовление судовых СРНС-приёмников, надёжно вычисляющих обсервованные координаты с ещё большей разрядностью. Это позволит, прежде всего, избавиться от влияния качки судна на точность спутниковых обсерваций. Таким образом, новые технологии вызывают необходимость увеличения точности определения обсервованных координат судовыми СРНС-приёмниками, а повышенная точность стимулирует разработку новых технологий в судовождении.

Помимо координат судовые спутниковые навигационные приёмники с помощью доплеровских измерений [1] определяют направление вектора – COG (Course Over Ground) и модуль абсолютной скорости – SOG (Speed Over Ground). Направление вектора абсолютного перемещения судна COG принято называть путевым углом (ПУ) или путём [2, 3]. До недавнего времени возможность определения абсолютной скорости воспринималась как вспомогательная опция, так как традиционная технология судовождения основывалась на измере-

нии относительной скорости. Развитие в последние годы систем позиционирования, которые обеспечивают вывод судна (платформы) в точку с заданными геодезическими координатами и удержание в ней, потребовало повышения точности определения COG и SOG. Повышать точность вынуждают разрабатываемые системы автоматической швартовки крупнотоннажных судов [4], а также технологии самоуправляемого судна [5, 6].

К сожалению, современные судовые GPS-приёмники измеряют и отображают SOG от 0,1 уз (0,05 м/с) и выше. Скорости близкие к 0 они не в состоянии измерять. В ходе обработки экспериментальных наблюдений во время швартовок грузопассажирских паромов была обнаружена обратная зависимость SOG от среднего квадратического отклонения COG. В момент полной остановки среднее квадратическое отклонение (СКО) достигало максимума, что могло служить критерием оценки нулевой абсолютной скорости [7, 8]. Такой критерий следует рассматривать реперным показателем, необходимым для определения малых скоростей судна. Данная статья описывает исследования, предпринятые с целью обнаружения отличий статистических характеристик распределения ПУ неподвижного GPS-приёмника, работающего в автономном и дифференциальном режимах.

В качестве исходного материалы были взяты результаты экспериментальных наблюдений за работой GPS-приёмника J-NAV500 компании JRC (Japan Radio Corporation). Этот приёмник установлен в лаборатории радионавигационных приборов и систем кафедры технических средств судовождения Морского государственного университета (МГУ) имени адмирала Г. И. Невельского во Владивостоке. Наблюдения проводились с ноября 2007 года по июнь 2008 года. Данные от приёмника автоматически записывались на жёсткий диск ноутбука. Запись прерывалась при проведении лабораторных работ, а также на субботу и воскресенье. В ходе эксперимента прибор попеременно переключался из автономного режима работы в режим приёма дифференциальных поправок, транслируемых дифференциальной станцией мыса Поворотного. В данной статье анализируются данные автономного режима работы приёмника J-NAV-500. В этом режиме было зарегистрировано 2932347 значений COG.

Примем с как случайное направление вектора абсолютной скорости, которое изменяется от 0° до 360° через 1° . Поскольку антенна приёмника неподвижна, то можно предположить равномерную плотность распределения COG. Плотность вероятности равномерного распределения $f(c)$ этой случайной величины запишется следующим образом [9]:

$$f(c) = \begin{cases} 0, & c < 0 \\ E, & 0 \leq c \leq 360 \\ 0, & c > 360 \end{cases},$$

где E — постоянная величина $E = 1/360$.

Получим формулу функции распределения $F(c)$ случайной величины c

$$F(c) = \begin{cases} 0, & c < 0 \\ c/360, & 0 \leq c \leq 360 \\ 1, & c > 360 \end{cases}.$$

Математическое ожидание M_c случайной величины c можно найти, зная выражение плотности распределения

$$M_c = \int_0^{360} cf(c)dc = \int_0^{360} \frac{c}{360}dc = \frac{c^2}{2 \cdot 360} \Big|_0^{360} = \frac{360}{2} = 180^\circ.$$

Получим выражения для дисперсии D_c и среднего квадратического отклонения (СКО) σ_c случайной величины c , для чего воспользуемся начальным моментом второго порядка $M_c^{(II)}$

$$M_c^{(II)} = \int_0^{360} c^2 f(c)dc = \int_0^{360} \frac{c^2}{360}dc = \frac{c^3}{3 \cdot 360} \Big|_0^{360} = \frac{360^2}{3};$$

$$D_c = M_c^{(II)} - (M_c)^2 = \frac{360^2}{3} - \frac{360^2}{4} = \frac{360^2}{12};$$

$$\sigma_c = \sqrt{D_c} = \frac{360}{2\sqrt{3}} = \frac{360}{3,4641} \approx 103,92305^\circ.$$

Обработка полученного статистического материала позволила получить точечные оцен-

ки математического ожидания и СКО. Они имели следующие значения: $M = 192,6045^\circ$ и $\sigma = 113,6371^\circ$ соответственно. Разницы с теоретическими значениями (180° и 103°) составляют не менее 10° , что для полученной выборки имеет существенное значение, чтобы не рассматривать распределение COG приёмника J-NAV500 подчинённому равномерному закону.

Другой важной характеристикой пригодности вариативности COG для оценки величин малых скоростей служит форма эмпирической плотности распределения. Получим относительные частоты для построения гистограммы эмпирической плотности распределения COG. Для этого весь диапазон существования COG (0° - 360°) был разбит на 72 одинаковых интервалов размером 5° каждый ($j = 72$, $i = 5^\circ$). Из собранного массива данных были



Рисунок – Гистограмма эмпирической плотности распределения COG GPS-приёмника J-NAV500 в автономном режиме работы

выбраны значения COG, принадлежащие каждому j -му сектору. При этом значения COG, равные правым границам секторов, переносились в следующий сектор. Обозначим через N объём выборки, а через n_j — количество значений COG, принадлежащих j -му сектору. Тогда относительные частоты $p_j = n_j/N$, при $N \rightarrow \infty$ будут точечными оценками вероятностей попадания COG в данный j -ый сектор. С помощью рассчитанных относительных частот p_j наблюдений за работой приёмника J-NAV500 в автономном режиме была построена гистограмма эмпирической плотности распределения COG, представленная на рисунке.

На основе анализа гистограммы рисунка можно сделать такие выводы. Во-первых, форма полученного эмпирического распределения нельзя признать близкой к распределению, подчиняющегося равномерному закону. При равномерном распределении относительные частоты всех интервалов (при $i = 5^\circ$) были бы близки к 0,01388. Во-вторых, прослеживается присутствие едва различимых четырёх максимумов и четырёх минимумов относительных частот. В-третьих, можно убедиться в крайне высоком рассеивании величин путевых углов, не позволяющим считать приёмник J-NAV500 приспособленным к использованию в рассматриваемой технологии оценки малых скоростей.

Пригодность того или иного типа GPS-приёмника к реализации обсуждаемой технологии следует оценивать также тем, как часто изменяется измеряемый им путевой угол при условии неизменности направления абсолютного перемещения приёмника. Вычисление СКО COG требует некоторого времени для накопления рабочей выборки. И если при мониторинге айсбергов вблизи морских платформ частота изменения COG не столь критична, то в системах автоматической швартовки она становится существенной. Следовательно, длительность времени, в течение которого отображаемый на дисплее и выводимый на внешние устройства COG остаётся неизменным, можно принять в качестве показателя эффективности данного типа GPS-приёмника в технологиях измерения малых скоростей. Чем эта длительность, близкая к 1 с, проявляется чаще, тем эффективность данного приёмника будет выше при недопустимости длительностей больше установленных для данной задачи. В представленной таблице можно видеть, как распределены длительности, характеризующие пригодность приёмника J-NAV500 при работе его в автономном режиме.

Таблица – Распределение времени, в течение которого значения COG приёмника J-NAV500 в автономном его режиме работы оставались неизменными

Диапазон	1 с-5 с	6 с-10 с	11 с-30 с	31 с-1 мин	1 мин-1 час	1 час-8 час
Доля, %	74,03	8,84	8,15	2,77	5,16	1,05

Как следует из таблицы, чаще всего регистрировались длительности от 1 с до 5 с. Но на это пришлось всего 1,09% (10,06 ч) от общей продолжительности экспериментальных на-

блюдений (917,9033 ч). На долю всех продолжительностей от 1 ч до 8 ч пришлось 68,22% (626,201 ч) от общей продолжительности экспериментальных наблюдений. Отсюда можно сделать заключение о бесполезности приёмника J-NAV500 для определения моментов полной остановки его носителя, так как в 68% времени наблюдений величина его COG не будет меняться. Вполне возможно, что характер вариабельности COG изменится, когда носитель J-NAV500 начнёт двигаться даже с незначительной скоростью. Для проверки этого предположения потребуются дополнительные экспериментальные наблюдения. Интерес представляют характеристики вариабельности COG этого приёмника, работавшего в лаборатории в режиме приёма дифференциальных поправок в это же самое время.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

- 1 Антонович, К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии / К.М. Антонович. -М.: ФГУП «Картгеоцентр», 2005. -Т.1. -334 с.
- 2 Справочник гидрографа по терминологии. -Л.: ГУНИО МО СССР, 1984. -286 с.
- 3 ГОСТ 23634-83. Морская навигация и морская гидрография. Термины и определения. -М.: Издательство стандартов, 1984. -12 с.
- 4 Комаровский, Ю.А. Повышение точности определения скорости в спутниковых системах швартовки судов / Ю.А. Комаровский // -Вестник инженерной школы Дальневост. федеральн. ун-та. -2017. -№2(31). -С. 30-43.
- 5 Autonomous vessels-regulatory and legal issues // -Digital Ship. -2017. -November. -P. 37-38.
- 6 The technology behind autonomous ships // -Digital Ship. December 2017-January 2018. -P. 28-30.
- 7 Комаровский, Ю.А. Определение момента остановки судна по вариации путевого угла приёмника GP-37 / Ю.А. Комаровский // -Науч. пробл. транс. Сиб. и Даль. Вост. -2010. -№1. -С. 118-124.
- 8 Комаровский, Ю.А. Использование системы Навстар GPS для мониторинга дрейфа айсбергов вблизи морских платформ / Ю.А. Комаровский // -Гидротехника. -2016. -№4. -С. 92-95.
- 9 Вентцель, Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. -М.: Изд-во физ.-мат. лит-ры, 1962. -564 с.

- 1 K.M. Antonovich. The use of satellite navigation systems in geodesy [Ispol'zovanie sputnikovyykh radionavigatsionnykh sistem v geodezii]. Moscow. Kartgeotsentr Publ. 2005. -Vol. 1. 334 p.
- 2 Hydrographer' glossary [Spravochnik gidrografa po terminologii]. Leningrad. Ministry of Defense of the USSR. Chief Directorate for Navigation and Oceanography. 1984. 286 p.
- 3 GOST 23634-83. Marine navigation and marine hydrography. Terms and definitions [Morskaya navigatsiya i morskaya gidrografiya. Terminy i opredeleniya]. Moscow. Izdatel'stvo standartov Publ. 1984. 12 p.
- 4 Yu.A. Komarovskiy. Improving the accuracy of speed determination in mooring systems [Povyshenie tochnosti opredeleniya skorosti v sputnikovyykh sistemakh shvartovki sudov]. // FEFU: School of engineering Bulletin [Vestnik inzhenernoy shkoly DFU]. 2017. No. 2(31). pp. 30-43.
- 5 Autonomous vessels-regulatory and legal issues // Digital Ship. November 2017. pp. 37-38.
- 6 The technology behind autonomous ships // Digital Ship, December 2017-January 2018. -pp. 28-30.
- 7 Yu.A. Komarovskiy. Determination of stop moment of the vessel by the variation of COG of GP-37 receiver [Opredelenie momenta ostanovki sudna po variatsii putevogo ugla priemnika GP-37]. Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka. 2010. No.1. pp. 118-124.
- 8 Yu.A. Komarovskiy. Using the Navstar GPS system for monitoring the iceberg drift near offshore platforms [Ispol'zovanie sistemy Navstar GPS dlya monitoringa dreyfa aysbergov vblizi morskikh platform]. Hydraulic engineering [Gidrotekhnika]. 2016. No.4. pp. 92-95.
- 9 E.S. Venttsel'. Probability theory [Teoriya veroyatnostey]. Moscow. St. Publ. house of physical and mathematical literature. 1962. 564 p.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: GPS-приёмник, среднее квадратическое отклонение, плотность распределения, mean-square deviation, density of distribution

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ: Кац Владимир Александрович, главный специалист-программист ИАПУ ДВО РАН
Комаровский Юрий Александрович, канд. техн. наук, консультант МГУ им. адм. Г.И. Невельского

ПОЧТОВЫЙ АДРЕС: 690041, г.Владивосток, ул.Радио, 5, ИАПУ ДВО РАН
690059, г.Владивосток, ул.Верхнепортовая, 50а, МГУ им. адм. Г.И. Невельского

ВАРИАБЕЛЬНОСТЬ КООРДИНАТ НЕПОДВИЖНОГО СУДОВОГО ГЛОНАСС/GPS ПРИЁМНИКА БРИЗ КМ-К

ФГБОУ ВО «Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского»

Ю.А. Комаровский

VARIABILITY OF THE COORDINATES OF STATIONARY MARINE GLONASS/GPS "БРИЗ КМ-К" RECEIVER

Maritime State University named after admiral G.I.Nevelskoi (MSU named after adm. G.I.Nevelskoi) 50a, Verkhneportovaya St., Vladivostok, 690059, Russia

Yurii A. Komarovskiy (Ph.D. of Engineering Sciences, Expert on technical issues of MSU named after adm. G.I.Nevelskoi)

ABSTRACT: In this article we present the results of the analysis of the variability of marine receiver coordinates "Бриз КМ-К" for a stationary vessel, which received the signals from the satellite radio navigation system GLONASS. During the processing of the obtained statistical data, the range of variation of the coordinates reached 50 m. This resulted in being unable to classify the "БРИЗ" receiver as a precision instrument. Coefficients of variation of latitudes and longitudes were 31.77% and 26.3%, respectively. It is proposed to perform a comparative analysis of the variability of the coordinates of the "БРИЗ" receiver and the receiver GP-37.

Keywords: marine receiver "БРИЗ", mean-square deviation, variation coefficient, difference in latitude, difference of longitude

Приведены результаты анализа изменчивости координат неподвижного отечественного судового приёмника Бриз КМ-К, принимавшего сигналы спутниковой радионавигационной системы Глонасс. В ходе обработки полученного статистического материала размах варьирования координат достигал 50 м. Это не позволило отнести приёмник Бриз к категории прецизионных приборов. Коэффициенты ва-

риации широт и долгот составили 31,77% и 26,3% соответственно. Предложено выполнить сравнительный анализ вариабельности координат приёмник Бриз и приёмника GP-37.

В 1982 году 12 октября в СССР после успешного запуска искусственного спутника Земли (ИСЗ) «Космос-1413» начались лётные испытания новой спутниковой радионавигационной системы (СРНС), которая впоследствии получила название Глонасс. В опытную эксплуатацию система Глонасс была принята в 1993 году. Постановлением Правительства РФ №237 от 7 марта 1995 года навигационные сигналы стандартного режима СРНС Глонасс предоставляются для гражданского, коммерческого и научного применения бесплатно [1]. С тех пор система претерпела много изменений, но постоянной оставалась только неопределённость относительно характеристик точности определения с её помощью координат потребителя. Некую ясность внесла опубликованная в 2011 году Федеральная целевая программа (ФЦП). В ней прописано: «Точность системы ГЛОНАСС обеспечена на конкурентоспособном уровне – со среднеквадратическим отклонением 5,6 м, что удовлетворяет требованиям большинства потребителей» [2]. При этом не уточнялось, при каких условиях получена упомянутая величина и подразумевает ли она широту, долготу или возвышение антенны приёмника. После 2015 года авторы публикаций и заявлений официальных лиц на эту тему объявляли точность СРНС Глонасс уже большую (3,5 м, 2,8 м, 2,7 м), но также без упоминания характеристик и без сообщений о способах получения этих величин. Поэтому обсуждение проблемы оценки точности координат СРНС Глонасс, равно как и любой другой навигационной системы, следует начать с дефиниций.

Для начала необходимо уговориться о том, что понятие «точность спутниковой системы» является некорректным, так как действующие в настоящее время СРНС предоставляют только радионавигационные сигналы и сопутствующую информацию, но не координаты. В качестве исключения здесь можно привести систему КОСПАС-САРСАТ, но она в целях навигации не используется. Координаты судна, элементы вектора его абсолютного перемещения, а также метки точного времени предоставляются судовым СРНС-приёмником. Поэтому точность получаемых координат и скорости судна зависят от качества приёмника и характеристик среды, в которой распространяются сигналы спутников, при обязательном названии СРНС. В упомянутой выше ФЦП введено словосочетание «на конкурентоспособном уровне» без уточнения этого самого уровня. Здесь под уровнем можно предполагать только СРНС Глонасс. Если же предполагать конкуренцию между приёмниками всех действующих в настоящее время СРНС, то приведённые выше числовые характеристики точности будут лишены смысла.

В 1995 году созвездие СРНС Глонасс насчитывало 24 ИСЗ. С тех пор число работающих спутников в СРНС Глонасс не увеличилось, а порой даже снижалось. Изменение числа действующих ИСЗ Глонасс в 2017 году можно видеть на рисунке 1.

Из рисунка 1 следует, что даже в 2017 году в системе Глонасс имели место ситуации с 23 и даже с 22 работающими спутниками. Когда созвездие глобальной СРНС содержит 24 и менее ИСЗ, то возникают случаи, когда в той или иной точки поверхности Земли спутников будет слишком мало для полноценной обсервации даже при высококачественном приёмнике. В 2017 году размеры созвездия активных спутников СРНС Навстар

GPS колебались от 31 до 29 космических аппаратов. На долю созвездия из 31 аппарата пришлось 83% времени года. Следовательно, координаты, получаемые по сигналам СРНС Навстар GPS, будут заведомо точнее, даже если приёмник СРНС Глонасс совершеннее [3].

Другая проблема оценки точности координат судового приёмника, работающего по сигналам СРНС Глонасс, заключается, во-первых, в отсутствии общепринятого перечня характеристик точности, во-вторых, в отсутствии утверждённых методик определения величин этих характеристик. Здесь сразу следует отметить важность назначения необходимых и достаточных длительностей экспериментальных наблюдений, необходимых для получения

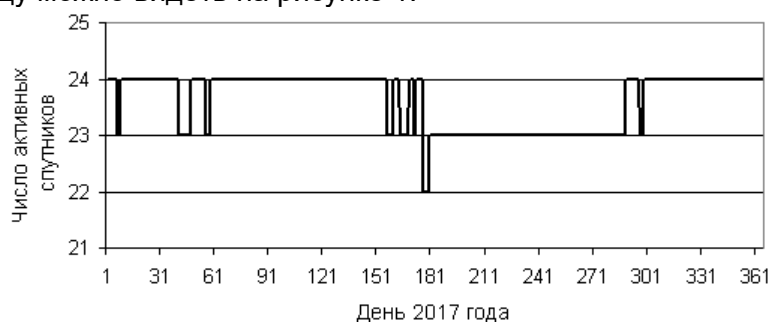


Рисунок 1 – Изменение числа активных спутников СРНС Глонасс в 2017 году

надёжных величин характеристик точности [4, 5].

Задача оценки точности координат приёмника СРНС Глонасс осложняется тем, что на судах их можно встретить крайне редко. В последние годы на суда чаще устанавливают приёмники, одновременно работающие по сигналам Глонасс и Навстар GPS, но в них не предусмотрен отдельный приём сигналов СРНС. Тем не менее, отечественная промышленность изготавливает судовые приёмники линейки Бриз, которые могут работать по сигналам выбранной СРНС. В ноябре 2017 года появилась возможность ознакомиться с работой Глонасс/GPS приёмника Бриз КМ-К 14Ц852 с заводским номером №62074033 отечественной компании АО «КБ Навис». Данным приёмником был оборудован дизель-электроход «Виктор Фалеев», который находился в плавучем доке в бухте Диомид.

Ввиду отсутствия сведений о характеристиках точности определения им плановых координат по сигналам СРНС Глонасс было принято решение о выполнении экспериментальных наблюдений. Цель данной статьи заключается в получении предварительных оценок точности данного прибора.

Поскольку к выходу приёмника подключить ноутбук было невозможно, то информация на дисплее, которая обновлялась каждую секунду, записывалась на цифровую видеокамеру. Наблюдения проводились 9 ноября 2017 года с 23:58:51 UTC по 4:06:12 UTC (+10 часов во Владивостоке). К сожалению, компьютерную программу автоматического распознавания видеоизображения найти и применить не удалось. Поэтому автору пришлось вручную по секундам заносить интересующие данные (время UTC и обсервованные координаты) на бумажные носители. Затем эти данные также вручную оцифровывались в виде таблицы Excel. В ходе наблюдений за работой приёмника Бриз КМ-К 14Ц852 было зафиксировано 8 случаев сбоев сопровождения сигналов СРНС Глонасс. Информация, зафиксированная во время сбоев, исключалась из массива экспериментальных данных. Общий массив экспериментальных данных содержал 14732 отсчётов времени с соответствующими им величинами обсервованных широт и долгот.

Для получения надёжных характеристик точности приёмника Бриз-КМ-К накопленных 9 ноября 2017 г. в течение 4 ч статистических данных явно недостаточно. Результаты предыдущих исследований автора [5] позволяют определить минимально необходимый срок в 7 суток непрерывных наблюдений. Поэтому обработка полученного статистического материала велась, прежде всего, с целью оценки вариативности обсервованных координат. Для этого исследовались разности широт $\Delta\varphi_i$ и разности долгот $\Delta\lambda_i$, выраженные в метрах.

Будем рассматривать $\Delta\varphi_i$ и $\Delta\lambda_i$ в качестве случайных величин, вычисляемых следующим образом:

$$\Delta\varphi_i = (\varphi_i - \varphi_{\min}) I_m; \quad \Delta\lambda_i = (\lambda_i - \lambda_{\min}) I_p,$$

где φ_i, λ_i – геодезическая широта и долгота соответственно, полученные в i -ый момент времени наблюдений;

$\varphi_{\min}, \lambda_{\min}$ – минимальные значения широты и долготы, зарегистрированные в наблюдениях;

$(\varphi_i - \varphi_{\min})$ – разность широт, выраженная в угловых минутах, $(\varphi_i - \varphi_{\min}) \geq 0$;

$(\lambda_i - \lambda_{\min})$ – разность долгот, выраженная в угловых минутах, $(\lambda_i - \lambda_{\min}) \geq 0$;

I_m, I_p – длины в метрах одной минуты меридиана и параллели соответственно

$$I_m = \frac{a(1-e^2)\operatorname{arc}1'}{\sqrt{(1-e^2\sin^2\varphi^\circ)^3}}; \quad I_p = \frac{a\cos\varphi^\circ}{\sqrt{1-e^2\sin^2\varphi^\circ}}\operatorname{arc}1';$$

a – размер в метрах большей полуоси референц-эллипсоида, лежащего в основе данной геодезической системы, в которой определяются координаты;

e – первый эксцентриситет референц-эллипсоида;

φ° – выраженная в градусной мере широта места проведения экспериментальных наблюдений.

На рисунках 2 и 3 можно видеть изменения $\Delta\varphi_i$ и $\Delta\lambda_i$ соответственно в ходе эксперимента.

На основе сравнительного анализа рисунков можно сделать следующие выводы. На начальном этапе наблюдений (до 3000-го измерения) наблюдаются высокочастотные колеба-

ния как у $\Delta\varphi_i$, так и у $\Delta\lambda_i$. Причём на этом этапе разности долгот имеют большие амплитуды колебаний. Скорее всего, причиной обнаруженной нестабильности было неблагоприятное расположение спутников Глонасс относительно судна. Если отбросить высокочастотную составляющую в дальнейших наблюдениях, то разность широт приблизительно до 8000-го измерения возрастает, а затем уменьшается. Разность долгот без высокочастотной шумовой составляющей после 3000-го измерения монотонно возрастает. Наблюдаются синхронные пиковые выбросы значений $\Delta\varphi_i$ и $\Delta\lambda_i$. Причинами их возникновения могут быть промышленные помехи или нестабильность работы самого приёмника Бриз КМ-К 14Ц852. Следовательно, процесс определения обсервованных координат данным приёмником характеризуется высокой изменчивостью, причины которой подлежат дальнейшему изучению.

После статистической обработки случайных величин $\Delta\varphi_i$ и $\Delta\lambda_i$ были получены характеристики их распределений и представлены в таблице.

Как указывалось выше, полученных 9 ноября 2017 года экспериментальных данных мало для надёжных статистических оценок распределения координат приёмника Бриз КМ-К 14Ц852. Поэтому к рассчитанным характеристикам таблицы следует относиться как к предварительным. Как показывают результаты исследований точности других СРНС-приёмников, при увеличении числа наблюдений величина СКО, как правило, уменьшается. Другой показатель точности – размах варьирования (разность по модулю между максимальным значением координаты и её минимальным значением) будет только расти. Поэтому размах варьирования координат порядка 50 м уже нельзя признать характеристикой современного высокоточного навигационного прибора.

В практике статистического анализа наблюдений широко применяется коэффициент вариации k_v в качестве оценки изменчивости изучаемого случайного процесса. Коэффициент вариации представляет собой выраженное в процентах отношение СКО к среднему значению случайной величины. Для разности широт

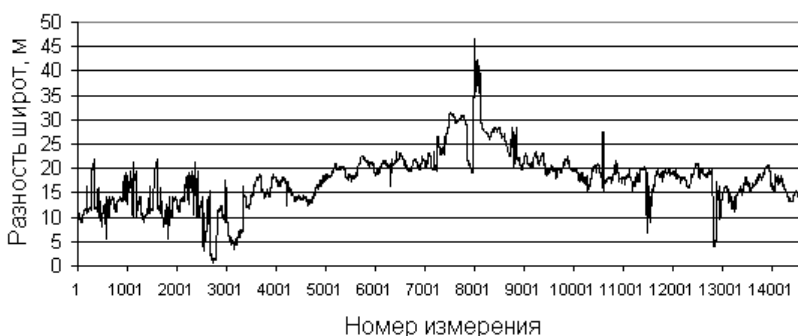


Рисунок 2 – График хода разности широт 9 ноября 2017 года

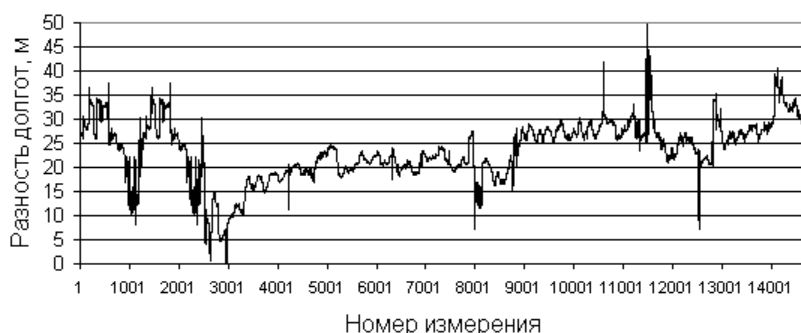


Рисунок 3 – График хода разности долгот 9 ноября 2017 года

Таблица – Характеристики распределения разностей широт и долгот приёмника Бриз-КМ-К 14Ц852 при его работе по сигналам СРНС Глонасс

Характеристика	Разность широт	Разность долгот
Средняя разность, м	17,69	23,42
Среднее квадратическое отклонение (СКО), м	5,62	6,16
Максимальная разность, м	46,47	49,65
Минимальная разность, м	0,55	0,13
Размах варьирования, м	45,92	49,52
Объём выборки	14732	14732

$$k_v = (\text{СКО} / \Delta\varphi_A) 100\%,$$

где $\Delta\varphi_A$ – средняя разность.

Коэффициент вариации является мерой относительного рассеивания случайной величины. С его помощью можно узнать, какую часть среднего значения модуля случайной величины составляет её среднее рассеивание. Чем больше величина k_v – тем выше относительная вариабельность (изменчивость) исследуемой случайной величины. Коэффициент

вариации эффективен при малых выборках.

Используя данные таблицы, были рассчитаны коэффициенты вариации разности широт и разности долгот. Для разности широт коэффициент вариации получился равным 31,77%, а для разности долгот его величина составила 26,3%. Считается, что если $k_v \leq 33\%$, то выборка считается однородной.

В ходе экспериментальных наблюдений на дизель-электроходе «Виктор Фалеев» параллельно приёмнику Бриз КМ-К 14Ц852, принимавшему сигналы СРНС Глонасс, работал GPS-приёмник GP-37. Поэтому дальнейшее исследование вариативности координат Бриза следует предпринять в сравнении с вариативностью координат GP-37.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Соловьёв, Ю.А. Системы спутниковой навигации / Ю.А. Соловьёв. -М.: ЭКО-ТРЕНДЗ, 2000. -267 с.
- 2 Федеральная целевая программа «Поддержка, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012-2020 годы» / Постановление Правительства РФ №189 от 3 марта 2012 г. // СПС «Консультант-Плюс»
- 3 Комаровский, Ю.А. Влияние размера созвездия радиовидимых спутников СРНС Навстар GPS на точность координат потребителя / Ю.А. Комаровский // Проблемы транспорта Дальнего Востока: пленарные доклады одиннадцатой международной науч.-практич. конф. 2-4 окт. 2015 г. (FEBRAT-15). -Владивосток: ДВО Российской Академии транспорта, 2015. -С. 59-63.
- 4 Кац, В.А. Сходимость оценок точности плановых координат приёмника GP-37 вблизи дифференциальной станции / В.А. Кац, Ю.А. Комаровский // -Науч. пробл. транс. Сиб. и Даль. Вост. -2014. -№4. -С. 115-119.
- 5 Комаровский, Ю.А. Необходимая продолжительность экспериментов для оценки точности координат DGPS-приёмника / Ю.А. Комаровский// Вестн. мор. гос. ун-в. Серия: Автоматическое управление, математическое моделирование и информационные технологии. -Вып. 68/2015. -Владивосток: Изд-во Мор. гос. ун-в., 2015. -С. 41-47.

REFERENCES

- 1 Yu.A. Solov'ev. Satellite navigation systems [Sistemy sputnikovoy navigatsii]. Moscow. EKO-TRENDZ Publ. 2000. 267 p.
- 2 Federal GLONASS Program for sustainment, development and use for the period 2012-2020. -RF Governmental Decree No.189 from March 3, 2012.
- 3 Yu.A. Komarovskiy. Effect of the size of the Navstar GPS radio-visible satellites constellation on the accuracy of the customer's coordinates [Vliyaniye razmera sozvezdiya radiovidimykh sputnikov SRNS Navstar GPS na tochnost' koordinat potrebitelya]. *Issues of Transport of the Far East [Problemy transporta Dal'nego Vostoka]*. Vladivostok: FEB of the Russian Acad. of Transp. Publ. 2015. pp. 59-63.
- 4 V.A. Kats, Yu.A. Komarovskiy. Repeatability of accuracy measurements of plain coordinates of the receiver GP-37 near the differential GPS station [Skhodimost' otsenok tochnosti planovykh koordinat priemnika GP-37 vblizi differentsial'noy stantsii]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*. 2014. No.4. pp. 115-119.
- 5 Yu.A. Komarovskiy. The required duration of the experiments to estimate the accuracy of the coordinates of the DGPS receiver [Neobkhodimaya prodolzhitel'nost' eksperimentov dlya otsenki tochnosti koordinat DGPS-priemnika]. *Maritime State University Reporter. Series: Automatic control, mathematical modeling and information technologies [Vestnik morskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Avtomaticheskoe upravlenie, matematicheskoe modelirovanie i informatsionnye tekhnologii]*. No. 68/2015. Vladivostok: Maritime St. Univ. Publ. 2015. pp. 41-47.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: судовой приёмник Бриз, среднее квадратическое отклонение, коэффициент вариации, разность широт, разность долгот

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ: Комаровский Юрий Александрович, канд. техн. наук, консультант МГУ им. адм. Г.И. Невельского

ПОЧТОВЫЙ АДРЕС: 690059, г.Владивосток, ул.Верхнепортовая, 50а, МГУ им. адм. Г.И. Невельского

УЧЁТ СТАТИСТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ ДЛИН И ПЕРИОДОВ ВЕТРОВЫХ ВОЛН ДЛЯ РЕЗОНАНСНЫХ ЗАДАЧ КАЧКИ СУДНА

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»

В.И. Сичкарев

CONSIDERATION OF STATISTICAL RELATIONSHIP OF WIND WAVE LENGTHS AND PERIODS FOR SOLVING THE ISSUES OF SHIP ROLL RESONANCE

Siberian State University of Water Transport (SSUWT) 33, Schetinkina St., Novosibirsk, 630099, Russia
Viktor I. Sichkarev (Holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Prof. of SSUWT)

ABSTRACT: For the calculations of the resonant ship roll, the authors proposed to use the real wave spectrum and the statistical relationship between the period and the wavelength, which differs from that usually taken from the hydrodynamic theory of waves. The paper shows that these refinements significantly shift the area of roll angles of resonant ship roll.

Keywords: resonant ship roll, real wave spectrum, statistical relationship of wave length and period

Для расчётов резонансной качки судна предложено использовать реальный спектр волнения и статистическую связь периода и длины волн, отличающуюся от обычно принимаемой из гидродинамической теории волн. Показано, что эти уточнения значительно сдвигают зону курсовых углов резонансной качки.

Возможность получения характеристик фактического волнения непосредственно с мостика движущегося судна [1-4] становится прорывным фактором в повышении точности решения задач резонансной качки судна и перевода их судоводительского решения на веро-

ятностный уровень для отдельных составляющих волнения.

До настоящего времени в транспортном судовождении определение параметров волнения производится либо глазомерно (высоты волн 3% обеспеченности и длины волн), либо измерением времени прохождения серии последовательных волн с расчётом среднего кажущегося периода. По полученным наблюденным параметрам вычисляются их средние значения, которые позволяют получить в судовых условиях параметры ветровых волн любой обеспеченности в предположении предельно развитого волнения на момент наблюдения. Однако наши исследования волновых полей в северной части Тихого океана [5] показывают, что предельно развитое волнение – лишь частный случай широкой палитры состояний волнового поля от зарождающегося – через развивающееся – через предельно развитое – через затухающее – до зыби. В каждом конкретном состоянии существуют свои энергетические спектры и, как следствие, свои функции плотности вероятности любого элемента волнения, не совпадающие с их распределением в предельно развитом волнении. Поэтому при использовании характеристик предельно развитого волнения вместо фактического снижается точность решения судоводительских задач по выбору оптимальных курсовых углов и скоростей безопасного движения судна на волнении для уменьшения качки.

Дополнительный вклад в снижение точности выбора оптимального режима движения вносит неучёт нерегулярности волнения в используемой аналитической связи длин и периодов волн.

На регулярном волнении обычно используется полученная из гидродинамической теории волн малой амплитуды связь длин и периодов волн

$$\lambda_p = \frac{g\tau^2}{2\pi}. \quad (1)$$

На нерегулярном волнении эта связь, как принято в судостроительной практике, уточняется введением коэффициента k

$$\lambda = k \frac{g\tau^2}{2\pi}, \quad (2)$$

где k – коэффициент при разной степени нерегулярности $k = 0,5-1,0$.

В работе [6] показано, что длины волн λ нерегулярного волнения меньше получаемых по гидродинамической теории длин λ_p

$$\lambda = k\lambda_p = (2/3)\lambda_p \quad (3)$$

В наших исследованиях [1, 7] показано, что по сравнению с результатами натурных измерений ортогонально-линейным волномером и обработкой снимков экрана радиолокационной станции (РЛС) расчёты нерегулярного волнения по (1) дают значительно большую длину волны. При этом расчёты по (3) дают удовлетворительное совпадение с натурными измерениями.

Таким образом, при плавании на нерегулярном волнении необходимо придерживаться связи длин волн с периодами в виде (3). В этом случае потребуются вносить коррективы в рекомендации и информационные материалы, предназначенные для судоводителей.

Наиболее известной формой решения задач резонансной качки на судах является диаграмма качки Ю.В. Ремеза. Кривые резонансной качки в ней построены с использованием соотношения (1). Определим, как меняется форма резонансных кривых при переходе от соотношения (1) к соотношению (3).

Резонанс возникает при совпадении вынужденных и собственных частот колебаний и при разности их фаз 90° . В спектральной теории нерегулярного волнения фаза элементарных составляющих волнения принимается случайной и, по-видимому, распределённой равномерно. Для качки судна на нерегулярном волнении это означает, что рано или поздно подойдёт такая волна, фаза которой окажется отличающейся от фазы качки судна на необходимую величину, что при совпадении частот вызовет резонансные колебания.

Таким образом, основным условием резонансной качки можно считать совпадение кажущегося периода волны τ_k и собственного периода качки судна T_c (под которым понимается либо период бортовой качки T_θ , либо период килевой качки T_ψ)

$$\tau_k = T_c. \quad (4)$$

Кажущийся период волны для движущегося судна

$$\tau_K = \frac{\lambda}{c + v_c \cos q}, \quad (5)$$

где c – фазовая скорость волны;

v_c – скорость судна;

q – курсовой угол волны ($q = 0$ при движении судна навстречу волнам).

Уравнение (5) можно преобразовать к виду

$$v_c \cos q = \frac{\lambda}{\tau_K} - c. \quad (6)$$

Представим фазовую скорость волны в виде

$$c = \lambda / \tau, \quad (7)$$

а связь λ и τ для нерегулярных волн примем в виде (3). Из (3)

$$\tau = \sqrt{\frac{3\pi\lambda}{g}}, \quad (8)$$

следовательно, по (7) для нерегулярного волнения

$$c = \sqrt{\frac{g\lambda}{3\pi}}. \quad (9)$$

В итоге уравнение резонанса (6) с учётом (4) и (9) для нерегулярных волн представляется в виде

$$v_c \cos q = \frac{\lambda}{T_c} - \sqrt{\frac{g\lambda}{3\pi}} = \frac{\lambda}{T_c} - 1,02\sqrt{\lambda}. \quad (10)$$

Если следовать связи длин и периодов волн согласно гидродинамической теории для волн малой амплитуды в виде (1), то уравнение резонанса, использованное, в том числе, и в диаграмме качки Ю.В. Ремеза, приобретает вид

$$v_c \cos q = \frac{\lambda}{T_c} - \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} = \frac{\lambda}{T_c} - 1,25\sqrt{\lambda}. \quad (11)$$

Графическое сопоставление резонансных кривых для регулярного и нерегулярного волнения представлено в таблице 1 и на рисунок 1.

Таблица 1 – Резонансные функции качки $f = v_c \cos q$, м/с, для нерегулярного и регулярного волнения, период $T_c = 5-20$ с

λ , м	$T_c = 5$ с		$T_c = 10$ с		$T_c = 15$ с		$T_c = 20$ с	
	$v_c \cos q$ нерегулярное волнение	$v_c \cos q$ регулярное волнение	$v_c \cos q$ нерегулярное волнение	$v_c \cos q$ регулярное волнение	$v_c \cos q$ нерегулярное волнение	$v_c \cos q$ регулярное волнение	$v_c \cos q$ нерегулярное волнение	$v_c \cos q$ регулярное волнение
20	-0,561	-1,590	-2,561	-3,590	-3,228	-4,256	-3,561	-4,590
40	1,548	0,094	-2,451	-3,905	-3,784	-5,239	-4,451	-5,905
60	4,099	2,317	-1,900	-3,682	-3,900	-5,682	-4,900	-6,682
80	6,876	4,819	-1,123	-3,180	-3,789	-5,847	-5,123	-7,180
100	9,800	7,500	-0,200	-2,500	-3,533	-5,833	-5,200	-7,500
120	12,82	10,30	0,826	-1,693	-3,173	-5,693	-5,173	-7,693
140	15,93	13,20	1,931	-0,790	-2,735	-5,456	-5,068	-7,790
160	19,09	16,18	3,097	0,188	-2,235	-5,144	-4,902	-7,811
180	22,31	19,22	4,315	1,229	-1,684	-4,770	-4,684	-7,770
200	25,57	22,32	5,575	2,322	-1,091	-4,344	-4,424	-7,677
220	28,87	25,45	6,870	3,459	-0,462	-3,873	-4,129	-7,540
240	32,19	28,63	8,198	4,635	0,198	-3,364	-3,801	-7,364
260	35,55	31,84	9,552	5,844	0,886	-2,822	-3,447	-7,155
280	38,93	35,08	10,93	7,083	1,598	-2,249	-3,067	-6,916
300	42,33	38,34	12,33	8,349	2,333	-1,650	-2,666	-6,650
320	45,75	41,63	13,75	9,639	3,087	-1,027	-2,246	-6,360
340	49,19	44,95	15,19	10,95	3,858	-0,382	-1,807	-6,048
360	52,64	48,28	16,64	12,28	4,646	0,282	-1,353	-5,717
380	56,11	51,63	18,11	13,63	5,449	0,966	-0,883	-5,366
400	59,60	55,00	19,60	15,00	6,266	1,666	-0,400	-5,000

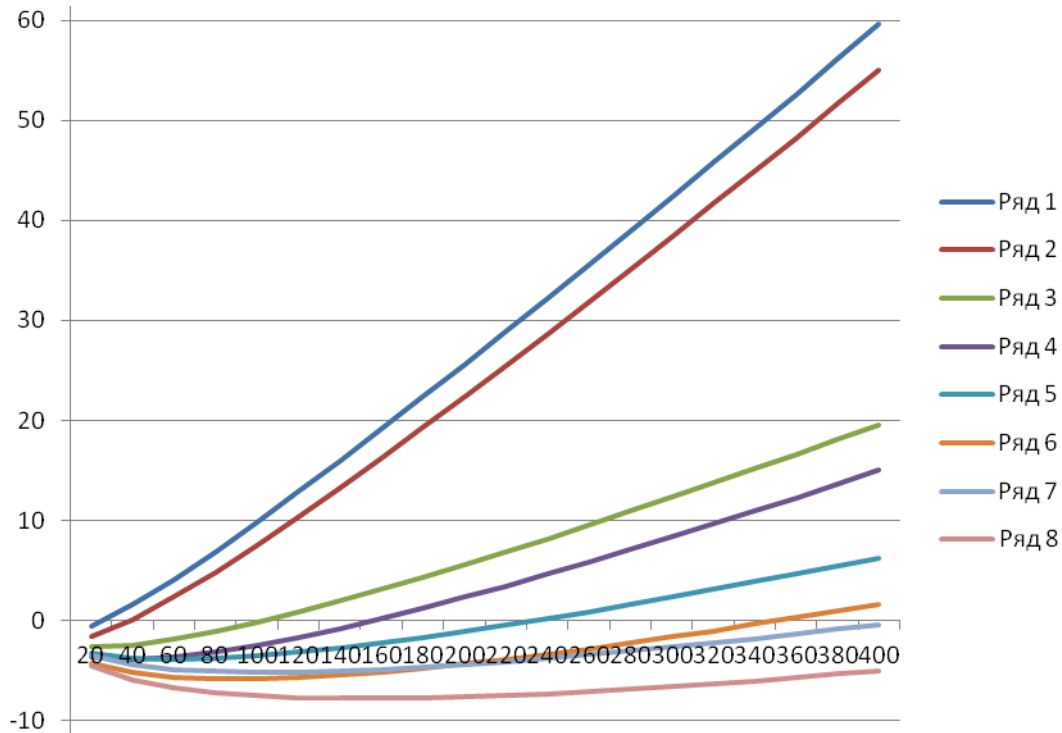


Рисунок 1 – Резонансные кривые нерегулярного (ряд 1- $T_c = 5$ с; ряд 3- $T_c = 10$ с; ряд 5- $T_c = 15$ с; ряд 7- $T_c = 20$ с) и регулярного (ряд 2- $T_c = 5$ с; ряд 4- $T_c = 10$ с; ряд 6- $T_c = 15$ с; ряд 8- $T_c = 20$ с) волнения

Оценим влияние фактического распределения длин волн в сравнении с предельно развитым для одного из конкретных волновых процессов (таблица 2). Фактическое распределение длин волн получено по результатам обработки снимков радиолокационного изображения волнового поля, сделанных Р.Д. Русмиленко в Норвежском море. Плотность распределения длин волн предельно развитого волнения может быть получена расчётом по распределению Вейбулла для такой же средней длины волны, как и в фактическом волнении. Обеспеченность длин волн по распределению Вейбулла

$$F\left(\frac{\lambda}{\lambda_{cp}}\right) = \exp\left[-A\left(\frac{\lambda}{\lambda_{cp}}\right)^k\right], \quad (12)$$

где F – обеспеченность волнения;
 λ_{cp} – средняя длина волны на снимках волнового поля, по таблице 2 $\lambda_{cp} = 130$ м;
 A – для длин волн, $A = 0,757$;
 k – коэффициент, для длин волн $k = 2,3$.

Таблица 2 – Плотность распределения длин волн λ по изображению волнового поля P_ϕ , % и предельно развитых волн $P_{пр}$, %, $\lambda_{cp} = 130$ м

λ , м	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	100-120	120-140	140-160	160-180	180-200	200-220
P_ϕ , %	0,17	4,35	8,95	11,59	11,17	15,60	12,62	10,83	8,53	3,67	3,41
$P_{пр}$, %	2,35	5,50	8,60	11,08	12,54	12,81	11,99	10,33	8,26	6,11	4,21
λ , м	220-240	240-260	260-280	280-300	300-320	320-340	340-360	360-380	380-400	≥400	
P_ϕ , %	1,62	1,62	1,28	0,60	1,36	0,68	0,68	0,16	0,09	1,02	
$P_{пр}$, %	2,69	1,60	0,89	0,46	0,21	0,10	0,04	0,01	0,01	0,00	

Сравним резонансные функции качки для фактического и предельно развитого волнения. Для примера примем: собственный период качки судна $T_c = 10$ с, скорость судна $v_c = 13,6$ узла (7,0 м/с). Рассмотрим задачу для диапазонов с длинами волн, вероятность P появления которых будем задавать в различных пределах от 12 до 8%.

При заданной скорости судна резонансные функции качки $f = v_c \cos q$ из таблицы 1, позволяют определить курсовые углы волнения q , на которых возможно появление резонанс-

ной качки с вероятностью P из таблицы 2, характерной для данного интервала длин волн

$$q = \arccos\left(\frac{f}{v_c}\right). \quad (13)$$

Результаты расчётов по (13) представлены в таблицах 3-5.

Таблица 3 – Курсовые углы резонансной качки на нерегулярном и регулярном волнении (для условий примера) с $P \geq 8\%$

λ , м	40-60	60-80	80-100	100-120	120-140	140-160	160-180
$q_{н/рег}$	105,8	99,2	91,6	83,2	74,0	63,7	51,9
$q_{рег}$	121,7	117,0	110,9	104,0	96,5	88,5	79,9

Таблица 4 – Курсовые углы резонансной качки на нерегулярном и регулярном волнении (для условий примера) с $P \geq 10\%$

λ , м	60-80	80-100	100-120	120-140	140-160
$q_{н/рег}$	99,2	91,6	83,2	74,0	63,7
$q_{рег}$	117,0	110,9	104,0	96,5	88,5

Таблица 5 – Курсовые углы резонансной качки на нерегулярном и регулярном волнении (для условий примера) с $P \geq 2\%$

λ , м	80-100	100-120	120-140
$q_{н/рег}$		83,2	74,0
$q_{рег}$	110,9	104,0	96,5

По условиям примера резонансные явления при плавании на нерегулярном волнении с вероятностью $P \geq 8\%$ возможны на курсовых углах волнения $q = 52-106^\circ$, а на регулярном волнении на курсовых углах $q = 80-122^\circ$.

Резонансные явления при плавании на нерегулярном волнении с вероятностью $P \geq 10\%$ возможны на курсовых углах волнения $q = 64-99^\circ$, а на регулярном волнении на курсовых углах $q = 89-117^\circ$.

Резонансные явления при плавании на нерегулярном волнении с вероятностью $P \geq 12\%$ возможны на курсовых углах волнения $q = 74-83^\circ$, а на регулярном волнении на курсовых углах $q = 96-111^\circ$.

Таким образом, учёт фактического волнения и его нерегулярности достаточно заметно изменяет диапазон судоводительских решений по предотвращению резонансной качки. С учётом вероятности появления тех или иных длин волн судоводительская задача приобретает возможность перехода из детерминистического класса в вероятностный.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Сичкарев, В.И. Статистические характеристики рельефных волн, измеренных ортогонально-линеечным волномером / В.И.Сичкарев // Судовождение-2000: сб. науч. тр. -Новосибирск: Новосиб. гос. акад. водн. трансп., 2000. -С. 26-33.

2 Брынский, Д.Е. Оценки длины волны в групповых наблюдениях ортогонально-линеечным волномером в сопоставлении с оценками другими способами / Д.Е. Брынский, С.В. Касилов, Д.В. Сердюков, В.И. Сичкарев // Судовождение-2000: сб. науч. тр. -Новосибирск: Новосиб. гос. акад. водн. трансп., 2000. -С. 34-43.

3 Сичкарев, В.И. Измерение высот и длин волн ортогонально-линеечным длинно-высоты-волномером / В.И. Сичкарев, В.К. Лубковский // -Науч. пробл. трансп. Сиб. и Дальн. Вост. -2007. -№1. -С. 48-54.

4 Сичкарев, В.И. Развитие методов получения параметров ветровых волн в судовых условиях / В.И. Сичкарев, К.И. Зинченко // Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании: тр. междунар. науч.-практич. конф. -Т.1 Транспорт. -Одесса: КУПРИЕНКО, 2012. -С. 64-72.

5 Сичкарев, В.И. Исследование волновых по-

REFERENCES

1 V.I. Sichkarev. Statistical characteristics of relief waves measured by an orthogonal ruler wavemeter [Statisticheskie kharakteristiki rel'efnykh voln, izmerennykh ortogonal'no-lineechnym volnomerom]. *Navigation-2000: digest of scientific papers [Sudovozhdenie-2000]*. Novosibirsk. Novosibirsk St. Acad. of Water Transp. 2000. pp. 26-33.

2 D.E. Brynskiy, S.V. Kasilov, D.V. Serdyukov, V.I. Sichkarev. Estimates of wavelength in group observations by an orthogonal ruler wavemeter in comparison with estimates by other methods [Otsenki dliny volny v gruppovykh nablyudeniyyakh ortogonal'no-lineechnym volnomerom v sopostavlenii s otsenkami drugimi sposobami]. *Navigation-2000: digest of scientific works [Sudovozhdenie-2000]*. Novosibirsk. Novosibirsk St. Acad. of Water Transp. 2000. pp. 34-43.

3 V.I. Sichkarev, V.K. Lubkovskiy. Measurement of heights and wavelengths by orthogonal ruler length-height wavemeter [Izmerenie vysot i dlin voln ortogonal'no-lineechnym dlino-vysoto-volnomerom]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*. 2007. No. 1. pp. 48-54.

4 V.I. Sichkarev, K.I. Zinchenko. The development of methods for obtaining parameters of wind waves in the ship's conditions [Razvitie metodov polucheniya parametrov vetrovykh voln v sudovykh usloviyakh]. *Modern problems and their solutions in science, transport, production and education: Proceedings of the International Scientific Practical Conference [Sovremennye problemy i puti ikh resheniya v nauke, transporte, proizvodstve i obrazovanii]*. Odessa. KUPRIENKO Publ. Vol. 1. 2012. pp. 64-72.

лей зон максимума волнения северной части Тихого океана / В.И. Сичкарев, А.П. Маркин. -Новосибирск: Новосиб. гос. акад. водн. трансп., 2009. -137 с.

6 Бычков, В.С. Морские нерегулярные волны / В.С. Бычков, С.С. Стрекалов. -М.: Наука, 1971. -132 с.

7 Сичкарев, В.И. Точность измерения длин волн волномером Сичкарева / В.И. Сичкарев // Судовождение-2000: сб. науч. тр. -Новосибирск: Новосиб. гос. акад. водн. трансп., 2000. -С. 13-25.

5 V.I. Sichkarev, A.P. Markin. Wave fields research of the zones of maximum waves of the Northern Pacific Ocean part [Issledovanie volnovykh poley zon maksimuma volneniya severnoy chasti Tikhogo okeana]. Novosibirsk. Novosibirsk St. Acad. of Water Transp. Publ. 2009. 137 p.

6 V.S. Bychkov, S.S. Strekalov. Marine irregular waves [Morskie neregulyarnye volny]. Moscow. Nauka Publ. 1971. 132 p.

7 V.I. Sichkarev. The measurement accuracy of the wave counter by Sichkarev [Tochnost' izmereniya dlin voln volnomerom Sichkareva]. Navigation-2000: digest of scientific works [Sudovozhdenie-2000]. Novosibirsk. Novosibirsk St. Acad. of Water Transp. Publ. 2000. pp. 13-25.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: резонансная качка, фактический спектр волнения, статистическая связь периода и длины волн

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ: Сичкарев Виктор Иванович, докт. техн. наук, профессор ФГБОУ ВО «СГУВТ»

ПОЧТОВЫЙ АДРЕС: 630099, г.Новосибирск, ул.Щетинкина, 33, ФГБОУ ВО «СГУВТ»

МОДЕЛИ ОПТИМАЛЬНОГО ТРАНСПОРТНОГО ПУТИ В АКВАТОРИИ КЕРЧЕНСКОГО ПРОЛИВА

Крымский филиал ФГУП «Росморпорт»
ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет»

С.Г. Черный, И.С. Горячев, В.Ю. Будник

OPTIMAL WATERWAY MODELS IN THE KERCH STRAIT

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kerch State Maritime Technological University" (FSFEI HE "KSMTU") 82, Ordzhonikidze St., Kerch, 298309, Russia

Crimean branch of Rosmorport (Crimean branch of Rosmorport) 28, Kirova Sr., Kerch, 298312, Russia

Sergey G. Chernyy (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of FSFEI HE "KSMTU")

Ivan S. Goryachev (Head of pilot service Crimean branch of Rosmorport)

Vladislav Yu. Budnik (Graduate student of FSFEI HE "KSMTU")

ABSTRACT: The economic development of the Southern Federal District of the Russian Federation had a positive effect on the development of shipping along the Kerch Strait, increasing the cargo transportation for the Russian ports of the Sea of Azov and as a consequence increasing the vessel traffic along the Kerch-YeniKale Canal, which is the only safe for all cargo ships way through the Kerch Strait. For complete assessment of the safety of navigation through the strait, it is necessary to consider the maneuverable characteristics of vessels in the narrow and shallow waters of the Kerch-YeniKale canal, dimensional characteristics of vessels, topographic and hydrometeorological characteristics of the Kerch Strait water area, as well as the impact of the construction of the Crimean bridge on the safety of navigation.

Keywords: Kerch Strait, Crimean bridge, safety of navigation, Kerch ferry line, Kerch-YeniKale Canal, maneuvering

Экономическое развитие Южного федерального округа РФ положительно повлияло на судоходство по Керченскому проливу, увеличились объемы грузов в российских портах Азовского моря и как следствие интенсивность судоходства по каналу Керчь-Ени-Кале, который является единственным безопасным путем для всех грузовых судов. Для полной оценки безопасности плавания в проливе, необходимо учитывать маневренные характеристики судов в условиях узкости и мелководья канала, размерения судов, топографические и гидрометеорологические характеристики акватории Керченского пролива.

В период кризиса и введения санкций, актуальным становится вопрос судоходства в зонах повышенного риска. Могут быть созданы потенциальные новые маршруты доставки, такие как Арктика и богатые ресурсами западное побережье Канады. Важно, чтобы упреждающее рассмотрение этих направлений коррелировала в аспекте безопасности судоходства. Данные ИМО показывают, что при существующих критериях, риск аварийности и столкновений достаточно высок. Основные местоположения точек «аварийности» - Юго-Восточная Азия, особенно Коралловый треугольник, восточное Средиземноморье и Черное море, Северное море и Британские острова [1-5].

В течение последних 10 лет произошел ряд морских аварий и катастроф с огромными разливами химических веществ. Подобные события впоследствии спровоцировали изменения в морских акваториях. Выделяются проблемы, вызывающие озабоченность, и факторы, способствующие судоходству. Отметим самые известные аварии:

– Порт Кавказ – на рейдовой стоянке во время шторма разломился пополам танкер «Волгонепфть-139», груженный более чем 4 тыс. т мазута. На борту танкера находились 13 членов экипажа;

– В 2011 году затонул сухогруз «Вольногорск», на борту которого находилось более 2,6 тыс. т серы. Экипаж из восьми человек покинул судно на спасательном плоту и сумел

высадиться на косе Тузла, акватории Азово-Черноморского бассейна;

– Затонул сухогруз «Нахичевань» с 2 тыс. т серы;

– 57 000-тонный балкер «Бекс Халил», пропавший из Сингапура, сталкивается с меньшим навалочным судном при прохождении Сингапурского пролива.

К основным гидрометеорологическим факторам, влияющим на маневренные характеристики судна, относятся ветровой дрейф, вызванное ветром волнение и течение масс воды. Эти факторы должны в первую очередь учитываться, для судов, работающих на малых скоростях, так как влияние ветрового дрейфа, ветрового волнения и течений на процесс маневрирования при минимальной скорости судна особенно велико.

В практическом судовождении, для определения угла ветряного дрейфа судна широкое применение нашла формула Н.Н. Матусевича, Г.В. Соболева и С.И. Демина [1-3]. Пользуясь методом Н.Н. Матусевича угол дрейфа вычисляется при помощи формулы

$$\beta^{(i)} = k_{\beta}^{(i)} \sin q_B^{(i)} \left[\frac{\dot{D}_B^{(i)}}{\dot{D}_1^{(i)}} \right]^2, \quad (1)$$

где $k_{\beta}^{(i)}$ – коэффициент дрейфа в градусах;

$q_B^{(i)}$ – курсовой угол ветра;

i – порядковый номер наблюдения, $i = 1, 2, \dots, n$.

Наиболее эффективно вычисление k_{β} способом наименьших квадратов при решении нормального уравнения

$$\sum_{i=1}^n \mu^{(i)} \beta^{(i)} = k_{\beta} \sum_{i=1}^n [\mu^{(i)}]^2, \quad (2)$$

где

$$\mu^{(i)} = \left[\dot{D}_B^{(i)} / \dot{D}_1^{(i)} \right]^2 \sin q_B^{(i)}.$$

На основании формулы (2) коэффициент дрейфа определим из формулы

$$k_{\beta} = \frac{\sum_{i=1}^n \mu^{(i)} \beta^{(i)}}{\sum_{i=1}^n [\mu^{(i)}]^2}. \quad (3)$$

Критерием применения способа Н.Н. Матусевича является значение среднеквадратичной относительной ошибки Δ коэффициента дрейфа угла β

$$\Delta = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [\beta^{(i)} - \beta^{(i)}]^2}}{k_{\beta} \sqrt{\sum_{i=1}^n [\mu^{(i)}]^2}} 100\%, \quad (4)$$

где $\beta^{(i)}$ – углы дрейфа при вычисленном $k_{\beta}^{(i)}$ и первоначальных значениях $\dot{D}_B$, $\dot{D}_1$ и q_B ;

n – количество наблюдений;

Δ_{β} – среднее квадратическое отклонение (СКО) определения углов дрейфа $\beta^{(i)}$ в процессе n наблюдений

$$\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [\beta^{(i)} - \beta^{(i)}]^2} = \Delta_{\beta};$$

Δk_{β} – СКО коэффициента дрейфа k_{β}

$$\frac{\Delta_{\beta}}{k_{\beta} \sqrt{\sum_{i=1}^n [\mu^{(i)}]^2}} = \Delta k_{\beta}.$$

Способ Н.Н. Матусевича находит применение для объектов со слаборазвитыми надстройками при отношении $\dot{D}_B^{(i)} / \dot{D}_1^{(i)} \ll (3,0-3,5)$.

В способе Г.В. Соболева угол дрейфа определяется зависимостью [5]

$$\beta^{(i)} = \arcsin \left(\sqrt{1 - \sum \{q_B^{(i)}\} \left[\dot{D}_B^{(i)} / \dot{D}_1^{(i)} \right]^2 - 1} \right), \quad (5)$$

где $\sum, \sum'$ – коэффициенты, соответствующие различной осадке объекта;

$f\{q_B^{(i)}\}$ – табулированный параметр зависимости силы давления наблюдаемого ветра от его курсового угла.

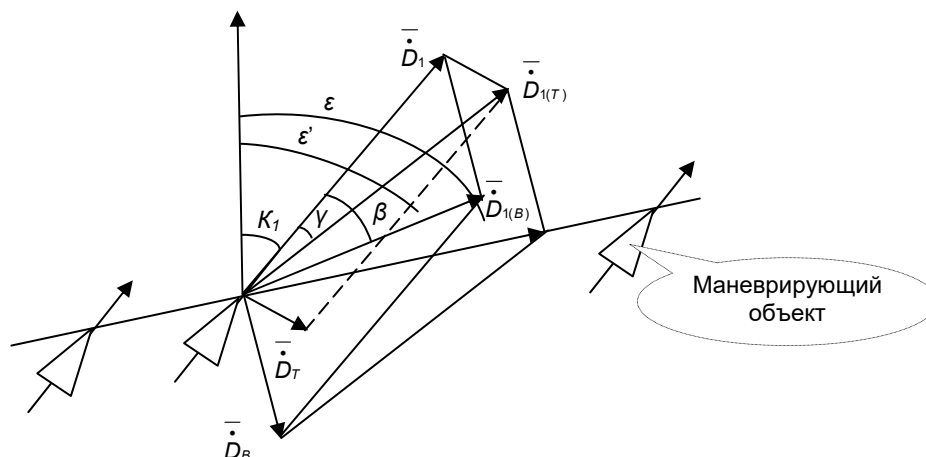


Рисунок 1 – Интерпретация учета возмущающих воздействий

Для статистической оценки параметров дрейфа однотипных объектов одного и того же класса осуществляют дрейф объекта с остановленными машинами.

Моделирование оптимального пути перехвата лоцманским катером (маневрирующий объект) сопровождаемого судна (цели).

Ежегодно через Керченский пролив проходит большое количество судов, при этом имеется устойчивая тенденция к увеличению этой численности. Это видно из статистики региональной службы управления движения судами (РСУДС) Керченского пролива (таблица) [4-8]. Учитывая правила обязательной лоцманской проводки судов по Керчь-Еникальскому каналу (КЕК), появляется необходимость создания качественной наработанной системы подсадки лоцмана на судно в движении, для обеспечения бесперебойного прохождения через Керченский пролив в период строительства Крымского моста и после запуска его в эксплуатацию. Учитывая факт постоянного увеличения интенсивности движения судов проходящих по КЕК, этот вопрос создания системы бесперебойной лоцманской проводки является краеугольным камнем для увеличения грузооборота Южного федерального округа.

Таблица – Количество судов в зоне РСУДС Керченского пролива

Год	Всего судов, находившихся в зоне действия РСУДС Керченского пролива, ед.	Из них заходящие/выходящие в российские морские порты (Кавказ и Тамань) в акватории Керченского пролива, ед.	В том числе следовавших через Керченский пролив, ед.
2007	25137	8787	6447
2008	28430	6789	6967
2009	32153	6677	10142
2010	35524	8348	15229
2011	43487	12262	11838
2012	44292	12310	10978
2013	59536	52019	11353
2014	86957	82812	10952
2015	100524	91640	9969
2016	136391	90091	11523

Статистика показывает, что в последние два года, стало уделяться большое влияние формированию караванов судов для прохода через Керченский мост.

Для этого рассчитываем оптимальный путь (маршруты) от текущего положения объекта маневра к каждому из узлов навигационного графа (начиная с наиболее перспективных) с помощью А*-алгоритма (рисунок 2).

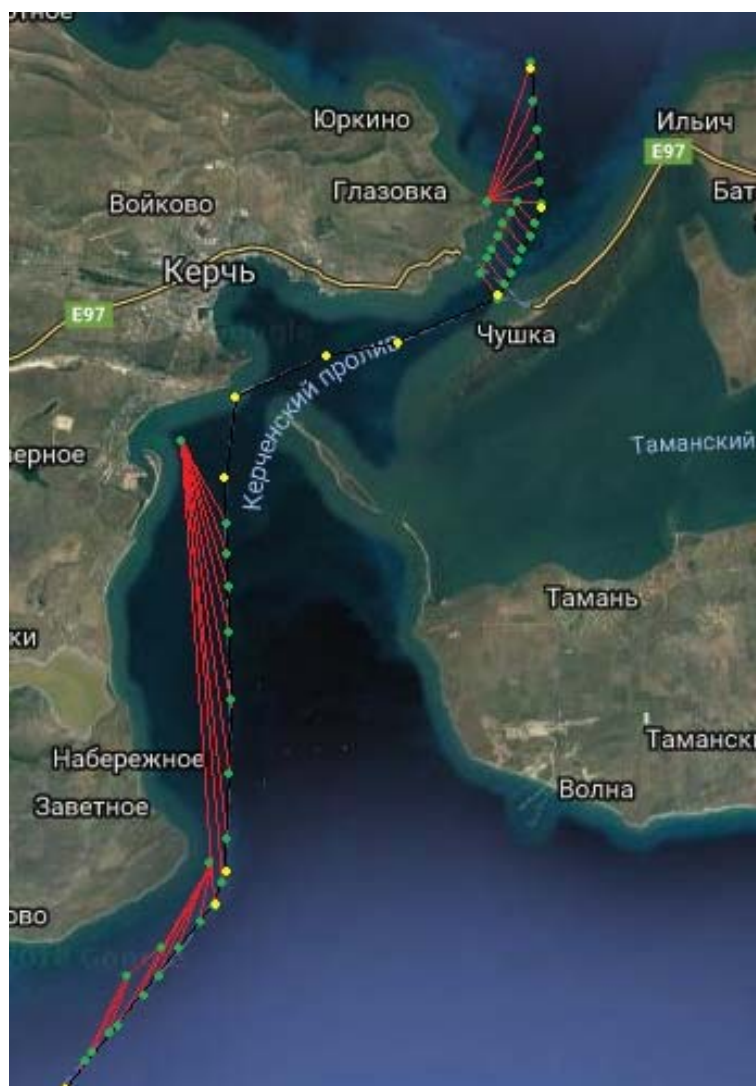


Рисунок 2 – Навигационный граф для объектов маневрирования

Вывод. Разработанная математическая модель для оптимально-безопасного прохождения судов через КЕК, решает вопрос выбора наиболее приемлемого маршрута лоцманскому катеру, для перехвата судна приближающегося к КЕК и дальнейшему его введению в проходящий караван, учитывая все возможные навигационные опасности акватории Керченского пролива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Материалы по морскому праву и международному торговому мероприятию. -М.: Транспорт, 1980. -140 с.
- 2 Михайлов, В.С. Улучшение судоходных условий и обеспечение безопасности движения флота на внутренних водных путях Сибири и Якутии / В.С. Михайлов. -Новосибирск: Новосиб. гос. акад. водн. трансп., 1998. -95 с.
- 3 Наставление по борьбе за живучесть судов Минречфлота РСФСР. -Н.Новгород: 2001. -72 с.
- 4 Росморпорт. -Режим доступа: http://www.rosmorport.ru/nvr_serv_nav.html#441. -06.01.2018 г.
- 5 Наставление по штурманской службе на судах МРФ. -М.: Транспорт, 1987. -143 с.
- 6 Пат. RUS 169161 14.06.2016. Устройство контроля остойчивости судна / С.С. Соколов, А.П. Ныркин, С.Г. Чёрный, А.А. Жиленков.
- 7 Чёрный, С.Г. Кластер проблематики в навигационных аспектах прохождения судов в акватории крымского моста / С.Г. Чёрный, В.Ю. Будник // Транспорт России: проблемы и перспективы-2017: материалы международной научно-практической конфе-

REFERENCES

- 1 Materials on the Law of the Sea and the World Trade Event [Materialy po morskomu pravu i mezhdunarodnomu trgovomu meropriyatiyu]. Moscow. Transport Publ. 1980. 140 p.
- 2 V.C. Mikhaylov. Improving shipping conditions and ensuring the safety of the fleet on the inland waterways of Siberia and Yakutia [Uluchshenie sudokhodnykh usloviy i obespechenie bezopasnosti dvizheniya flota na vnutrennikh vodnykh putyakh Sibiri i Yakutii]. Novosibirsk. Novosibirsk St. Acad. of Water Transp. Publ. 1998. 95 p.
- 3 Guidelines for ships damage control by the Ministry of the River Fleet, RSFSR [Nastavlenie po bor'be za zhivuchest' sudov Minrechflota RSFSR]. N.Novgorod. 2001. 72 p.
- 4 Rosmorport. URL: http://www.rosmorport.ru/nvr_serv_nav.html#441. -06 Jan. 2018.
- 5 Guidelines for the navigators' watchkeeping on the Ministry of the River Fleet vessels [Nastavlenie po shтурманской службе на судах МРФ]. Moscow. Transport Publ. 1987. 143 p.
- 6 S.S. Sokolov, A.P. Nyrkov, S.G. Chernyy, A.A. Zhilenkov. Patent RUS 169161 14.06.2016. Ship Stability Control [Ustroystvo kontrolya ostroychivosti sudna].
- 7 S.G. Chernyy, V.Yu. Budnik The cluster of problems in the navigation aspects of the vessels passage in the waters of the Crimean bridge [Klaster problematiki v navigatsionnykh aspektakh prokhozheniya sudov v akvatorii krymskogo mosta]. *Transport of Russia: problems and*

ренции. -М.: Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 2017. -С. 271-275.

8 Nyrkov, A.P. Hard- and software implementation of emergency prevention system for maritime transport / A.P. Nyrkov, A.A. Zhilenkov, S.S. Sokolov, S.G. Chernyi // -Automation and Remote Control. -2018. -Vol. 79. -No. 1. -P. 195-202.

prospects-2017: materials of the international scientific-practical conference [Transport Rossii: problemy i perspektivy-2017]. Moscow. Solomenko Inst. of Transp. Problems of the Russian Acad. of Science. 2017. pp. 271-275.

8 A.P. Nyrkov, A.A. Zhilenkov, S.S. Sokolov, S.G. Chernyi. Hard- and software implementation of emergency prevention system for maritime transport. *Automation and Remote Control*. 2018. Vol. 79. No. 1. pp. 195-202.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Керченский пролив, Крымский мост, безопасность плавания, керченская паромная переправа, канал Керчь-Ени-Кале, правила маневрирования
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ: Черный Сергей Григорьевич, канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «КГМТУ»
 Горячев Иван Сергеевич, начальник службы Крымский филиал ФГУП «Росморпорт»
 Будник Владислав Юрьевич, аспирант ФГБОУ ВО «КГМТУ»
ПОЧТОВЫЙ АДРЕС: 298309, г.Керчь, ул.Орджоникидзе, 82, ФГБОУ ВО «КГМТУ»
 298312, г.Керчь, ул.Кирова, 28, Крымский филиал ФГУП «Росморпорт»

НЕОБХОДИМЫЕ УСЛОВИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПЛАВАНИЯ МАЛОМЕРНЫХ ГЛИССИРУЮЩИХ СУДОВ НА ВНУТРЕННИХ ВОДНЫХ ПУТЯХ

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»

Ю.Н. Черепанов

REQUIRED SAFETY CONDITIONS FOR SMALL PLANING VESSELS ON THE INLAND WATERWAYS

Siberian State University of Water Transport (SSUWT) 33, Schetinkina St., Novosibirsk, 630099, Russia
 Yuriy N. Cherepanov (Ph.D. of Engineering Sciences, Prof. of SSUWT)

ABSTRACT: Planing involves different motions the vessel. The presence of high speeds imposes certain requirements on the navigators to provide the safety of navigation.

Keywords: small boats, planing, safety, navigation, engine, shallow water, navigator

Глиссирование подразумевает различные режимы движения судов. Наличие больших скоростей движения накладывает определённые требования на судоводителей для безопасности плавания.

С каждым годом увеличивается количество маломерных глиссирующих судов на внутренних водных путях РФ. Безопасность плавания маломерных глиссирующих судов является важным фактором безопасности судоходства на внутренних водных путях. Судоводители этих судов, как показывает статистика аварийности, зачастую не имеют понятия о безопасности на воде, не говоря о безопасности движения на внутренних водных путях. О культуре и вежливости при расхождении и маневрировании на воде. При этом постоянно нарушая правила плавания по внутренним водным путям Российской Федерации.

Для создания условий безопасного плавания маломерных глиссирующих судов судоводителям этих судов необходимо знать: теорию глиссирования, режимы глиссирования, остойчивость, плавучесть, непотопляемость, маневренные качества судна, борьбу за живучесть судна, правила техники безопасности, общую лоцию, нормативно-правовую документацию. И это ещё не весь перечень необходимых знаний, которыми должен обладать судоводитель маломерных судов.

Двигаясь по воде, судоводитель маломерного судна располагает низко относительно воды, в отличие от судоводителей транспортных судов, поэтому дальность видимости у него ограничена. При том, что скорость маломерных глиссирующих судов в среднем составляет 40-45 км/ч, а это 12 м/с. Поэтому судоводитель маломерного судна должен неукоснительно выполнять «Правила плавания по внутренним водным путям Российской Федерации», где указано, что судоводители должны постоянно вести надлежащее визуальное и слуховое наблюдение. Если при движении судна наблюдение ведется ненадлежащим образом, судоводитель отвлекается, то может произойти аварийная ситуация.

В настоящее время на моторные лодки и катера устанавливаются импортные двигатели большой мощности, на которых угол наклона колонки или сапога подвесного двигателя изменяются с помощью гидравлики и судоводитель должен знать как, когда и на какой угол необходимо произвести наклон. Угол наклона транцевой плиты глиссирующего маломерного судна составляет 15-18 градусов.

В начале движения глиссирующего маломерного судна колонка или сапог подвесного двигателя должны поджиматься к транцу, для облегчения выхода на глиссирование. После

выхода на глиссирование угол наклона колонки двигателя выравнивается перпендикулярно к воде, при остановке судна колонка двигателя должна быть немного приподнята, чтобы судно при остановке не зарывалось форштевнем в воду. Если судоводитель при движении судна на глиссировании оставит сапог подвесного двигателя или угловую колонку в первоначальном состоянии, то есть прижатыми к транцу судна, то судно будет рыскать с одного борта на другой, а если судно остроскулое, то оно может заваливаться на борт и даже опрокинуться. При остановке судна в таком положении колонки, форштевень зарывается в воду, судно резко останавливается, это может привести к травматизму людей.

Также импортный подвесной двигатель имеет три положения для эксплуатации на мелководье, позволяющие отклонить двигатель вверх, чтобы предотвратить удар о дно. Поэтому при движении на мелководье необходимо соблюдать следующее:

- снизить скорость вращения двигателя до скорости холостого хода. Переключить подвесной двигатель на нейтральную или переднюю передачу. Отклонить подвесной двигатель вверх в одно из положений для эксплуатации на мелководье. Заборник охлаждающей воды должен быть погружен в воду.

- при эксплуатации на мелководье подвесной двигатель должен работать на малой скорости, а заборник охлаждающей воды должен быть погружен в воду;

- чтобы опустить подвесной двигатель в рабочее положение, необходимо остановить двигатель, отклонить его вверх в одно из положений отпирания наклона и осторожно опустить.

Подвесной двигатель имеет три разных положения (рисунок 1), позволяющих изменять угол транца судна. Правильная регулировка позволяет стабильную эксплуатацию судна, обеспечивает достижение оптимального режима работы и сводит к минимуму усилие управления рулем.

Подвесной двигатель работает наиболее эффективно и с наименьшим усилием управления рулем, когда он отрегулирован так, что при работе он перпендикулярен к поверхности воды. Располагать пассажиров и груз в судне необходимо так, чтобы равномерно распределить вес.

Плавание на волнах и в спутной струе – естественная часть катания на судах, используемых для отдыха. Однако когда это делается на достаточно большой скорости, при которой корпус судна частично или полностью выходит из воды, возникают определенные опасности, особенно когда судно снова входит в воду (рисунок 2).

Главное, о чем нужно позаботиться – это чтобы посередине такого прыжка судно не изменило направление движения. В этом случае при приводнении судно может резко повернуться в совершенно новом направлении. При таком резком изменении направления движения находящиеся на судне люди могут быть выброшены из своих сидений или даже за борт.

Возможен и другой, реже случающийся опасный исход ситуаций, когда судно позволяют подпрыгивать на волне или в спутной струе. Если нос взлетевшего судна наклонится достаточно низко, то при контакте с водой он может пройти под воду, и на мгновение возникнет «эффект подводной лодки». Это может вызвать почти мгновенную остановку судна, и находящиеся на нём люди полетят вперед. Судно может также резко повернуться в сторону.

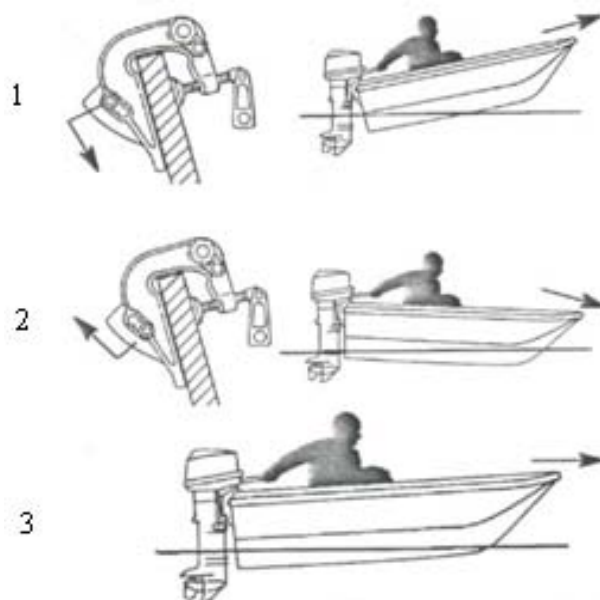


Рисунок 1 – Регулировка угла наклона подвесного двигателя: 1-слишком большой угол (корма опущена-нос поднят); 2-недостаточный угол (корма поднята-нос опущен); 3-угол отрегулирован правильно (нос слегка приподнят)



Рисунок 2 – Подпрыгивание катера

Во избежание серьезных травм или смертельного по возможности необходимо избегать подпрыгивания на волне или в спутной струе. Необходимо проинструктировать всех находящихся на судне людей о том, чтобы, если произойдет подпрыгивание в спутной струе или на волне, они опустились и держались за любой поручень.

При движении судна на мелководье или в местах, где вы подозреваете наличие подводных препятствий, о которые может удариться подвесной двигатель или дно судна, снизьте скорость и двигайтесь осторожно (рисунок 3). Самое важное, что можно сделать для того, чтобы уменьшить травму или повреждение при столкновении с плавающим или подводным предметом – это управлять скоростью движения судна. В этих условиях скорость движения судна не должна превышать минимальную скорость глиссирования (24-40 км/ч).

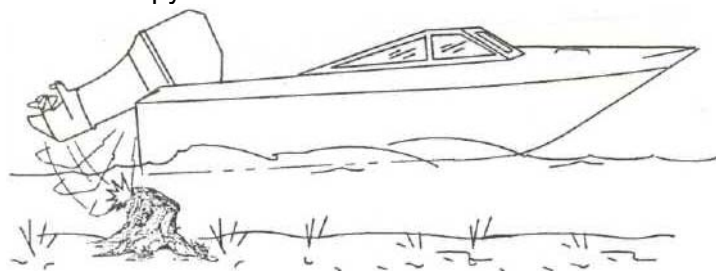


Рисунок 3 – Столкновение с подводной опасностью

Во избежание серьезной травмы или смертельного исхода в случае, когда подвесной двигатель целиком или частично войдет в судно после удара о плавающее или подводное препятствие, максимальная скорость не должна превышать минимальную скорость глиссирования.

При ударе о плавающий или подводный предмет может возникнуть бесчисленное количество различных ситуаций. В результате таких ситуаций может произойти следующее:

- часть подвесного двигателя или весь двигатель может отломаться и влететь в судно;
- судно может внезапно изменить направление движения. Резкое изменение направления движения может привести к тому, что находящиеся на судне люди будут выброшены из своих сидений или за борт;
- быстрое снижение скорости, может привести к тому, что находящиеся на судне люди будут брошены вперед или даже выброшены за борт;
- повреждение подвесного двигателя и/или судна при ударе.

Всякий, имеющий отношение к судам с динамическим поддержанием (глиссирующим, крылатым и тому подобное), сталкивался на практике со случаями, когда по тем или иным причинам его судно оказывалось в неоптимальных режимах движения. Проектные ошибки и неграмотная эксплуатация судна зачастую приводят к его неправильной ходовой посадке, а значит, и к неспособности преодолеть «горб сопротивления», неустойчивости движения, резкой качке на волне. Излишне говорить о том, что это ведет еще и к перерасходу топлива, нарушениям управляемости, некомфортности хода. Но есть несколько способов поправить дело, не прибегая к дорогостоящим изменениям конструкции корпуса и даже не экспериментируя с перераспределением грузов (центровкой судна). С помощью ряда технических средств можно корректировать посадку судна даже непосредственно на ходу.

Для малых судов характерны значительный разброс величин нагрузки, центровки, скоростей и возможность в любой момент подправить ходовую посадку для улучшения экономичности и комфорта судна не будет лишней. Совершенно необходимы дополнительные устройства управления гидродинамическими характеристиками в следующих ситуациях:

- проектной ошибки, приведшей к существенному «уходу» центровки в неоптимальную область, например, при замене двигателя на более тяжелый, или с другим расположением агрегатов. Сюда же относятся случаи строительной или эксплуатационной деформации днища, в результате которых давления на нем перераспределяются, вызывая склонность к подсакиванию судна на ходу (дельфинированию) либо к чрезмерному прижатию носа или крену на один из бортов;
- возможного нарушения оптимальной центровки при эксплуатации за счет принятия избытка груза либо пассажиров в отдельные отсеки и помещения судна с указанными выше последствиями;
- перегруза судна либо недостаточной мощности двигателя, неспособного разогнать судно до скорости начала глиссирования, при этом потребуются принятие оперативных мер для повышения действующей на днище подъемной силы;
- движения судна при различных волновых условиях, когда для ослабления силы ударов волн целесообразно уменьшать ходовой дифферент, а на тихой воде, напротив, увели-

чивать его для снижения сопротивления.

Глиссирующие суда относятся к группе судов с динамическим поддержанием. По мере увеличения скорости движения происходит рост гидродинамических давлений в общей системе сил, действующих на судно. Динамическая составляющая при этом возрастает пропорционально квадрату скорости, и в результате наряду с архимедовой силой поддержания появляется гидродинамическая сила поддержания. Для использования этих сил в целях снижения сопротивления движению у судов с динамическим поддержанием имеются элементы, называемые несущими поверхностями или несущим комплексом. У глиссирующих судов несущим комплексом является совокупность специально спроектированных элементов обшивки корпуса.

В настоящее время не только определены рациональные соотношения главных размеров и формы корпуса глиссирующих судов, но и разработаны технические средства управления гидродинамическими характеристиками несущего комплекса. По аналогии с авиационными средствами механизации крыла их еще называют средствами механизации несущей поверхности. К их числу относятся в первую очередь транцевые плиты и интерцепторы. Кроме того, активно управлять посадкой глиссера помогают устройства регулирования «откидки» подвесного мотора или угловой колонки, способные изменять направление вектора тяги в вертикальной плоскости.

Устройства регулирования «откидки» мотора. Начнем с использования «откидки» как наиболее доступного способа оперативного управления посадкой. При изменении «откидки» мотора или угловой колонки относительно транца судна изменяется направление вектора упора винта (рисунок 4).

Это приводит к изменению значения момента, стремящегося поднять нос судна, соответственно изменяются угол атаки днища и его смоченная длина. Физически действие «откидки» аналогично перемещению в некоторых пределах общего центра тяжести судна, поэтому с ее помощью можно скомпенсировать чрезмерную загруженность носа или кормы и довести скорость хода до наивысшего значения. Следует заметить, что не все суда одинаково охотно реагируют на нажатие кнопки механизированной «откидки». Очень вяло реагируют на «откидку» разборнонадувные, относительно гибкие суда – приложенного к транцу момента для них часто не хватает, чтобы оторвать от воды «залипший» нос.

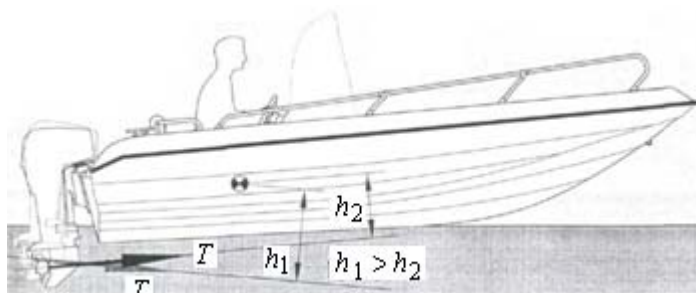


Рисунок 4 – Влияние «откидки» мотора на дифференцирующий момент и посадку судна

Влияние «откидки» может быть существенно повышено за счет применения специальных крыльев, устанавливаемых на антикавитационную плиту подвесного мотора. В этом случае момент создается не только упором винта, но также дополнительной подъемной или притапливающей силой, возникающей на крыле. С помощью крыльев удобно компенсировать чрезмерную кормовую центровку самых малых лодок с румпельным управлением мотором, на более же крупных судах их следует применять осмотрительно – крылья добавляют сопротивления движению, в результате чего скорость может понизиться на 3-5 км/ч [1].

Также необходимо хорошо знать маневренные элементы своего судна – выбрать их из технической документации или определить на практике. Необходимо проводить ходовые испытания судна и по результатам испытаний составлять таблицы 1 и 2.

Таблица 1 – Радиусы циркуляции, м

Скорость, уз.	3 узла	6 узлов	12 узлов
Угол переклад руля 15°	20	30	50
Угол переклад руля 30°	10	15	30

Таблица 2 – Длина пробега при остановке судна, м

Скорость, уз	По инерции	С использованием реверса	Экстренная
6	30	10	12
12	50	18	15
18	80	30	20

Важнейшими элементами маневрирования являются: радиус циркуляции, длина пробега при остановке судна.

Испытания выполняются на разных скоростях и различных углах перекладки руля.

Для двухвинтового судна полезно определить радиус циркуляции на малой скорости, когда винты работают враздрай.

Это всё необходимо знать судоводителям маломерных судов и использовать при движении по внутренним водным путям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Черепанов, Ю.Н. Глиссирующие маломерные суда. Теория, устройство, управление / Ю.Н. Черепанов. - Новосибирск: Изд-во Сиб. гос. унив. водн. трансп., 2016. -183 с.

REFERENCES

1 Yu.N. Cherepanov. Planing small boats. Theory, mechanism, operation [Glissiruyushchie malomernye suda. Teoriya, ustroystvo, upravlenie]. Novosibirsk. Siberian St. Univ. of Water Transp. Publ. 2016. 183 p.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *маломерные суда, глиссирование, безопасность, плавание, двигатель, мелководье, судоводитель*

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ: *Черепанов Юрий Николаевич, канд. техн. наук, профессор ФГБОУ ВО «СГУВТ»*

ПОЧТОВЫЙ АДРЕС: *630099, г.Новосибирск, ул.Щетинкина, 33, ФГБОУ ВО «СГУВТ»*

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДВУХКОНТУРНОЙ СИСТЕМЫ КОМБИНИРОВАННОЙ ОЧИСТКИ МОТОРНОГО МАСЛА В СУДОВЫХ ТРОНКОВЫХ ДИЗЕЛЯХ

ФГБОУ ВО «Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского»

Г.П. Кича, А.В. Надежкин, Л.А. Семенюк

EFFICIENCY OF THE DOUBLE PASS COMPLEX PURIFICATION SYSTEM OF MOTOR OIL IN MARINE TRUNK DIESELS

Maritime State University named after admiral G.I.Nevelskoi (MSU named after adm. G.I.Nevelskoi) 50a, Verkhneportovaya St., Vladivostok, 690059, Russia

Gennadii P. Kicha (Holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Prof. of MSU named after adm. G.I.Nevelskoi)

Andrei V. Nadezhkin (Holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Prof. of MSU named after adm. G.I.Nevelskoi)

Lyudmila A. Semenyuk (Graduate student of MSU named after adm. G.I.Nevelskoi)

ABSTRACT: The article describes a ground-breaking motor oil fine purification system that provides more complete realization of advantages of full-flow filtration and centrifugation in double-pass lubrication systems of trunk ICEs. Using the example of diesel engines 6CH20/26 and 6CH25/34, the efficiency of various purification units installed in the lubrication system is compared, according to their effect on oil aging and engine condition.

Keywords: resource conserving oil consuming, motor oil, oil life time, engine wear

Приводится описание перспективной системы тонкой очистки моторного масла, наиболее полно реализующей достоинства полнопоточного фильтрования и центрифугирования в двухконтурных системах смазки тронковых ДВС. На примере дизелей 6CH20/26 и 6CH25/34 сравнивается эффективность различных очистительных комплексов, установленных в смазочной системе, по их влиянию на старение масла и состояние двигателя.

В некоторых типах тронковых дизельных двигателях используется двухконтурная система смазки (СС). Один из контуров предназначен для откачки моторного масла (ММ) из картера дизеля в напорный бак. Из него масло попадает в основной контур, проходит через фильтр, охладитель и поступает во внутреннюю распределительную магистраль и далее к его потребителям [1]. Напорный бак располагается обычно выше масляного насоса, что исключает срыв подачи масла. В баке масло отстаивается. Из него удаляются воздух и газы.

Откачивающая магистраль функционирует при низком противодавлении, и кроме насоса, никаких агрегатов не включает. Производительность вспомогательного насоса, по сравнению с основным, обычно завышена, что необходимо для поддержания картера сухим и избежания утечек ММ из него. В условиях качки судна вспомогательный насос может «захватывать» воздух, так что в напорный бак довольно часто поступает масляно-воздушная смесь.

Целью проводимых исследований была проверка эффективности комбинированной системы очистки ММ в дизелях с двухконтурной СС. При этом предлагается установить в откачивающей магистрали центрифугу с реактивным гидроприводом и напорным сливом, с тем, чтобы снизить грязевые нагрузки и облегчить работу основного полнопоточного фильтра тонкой очистки масла (ФТОМП), который в большинстве случаев включается в основную магистраль.

Общеизвестно, что полнопоточный центробежный очиститель в 12-20 раз эффективнее ФТОМП по интенсивности очистки масла от нерастворимых, особенно зольных, продуктов [1]. Он может значительно снижать грязевую нагрузку на фильтр, особенно при последовательной схеме подключения к нему и работе в полнопоточном режиме очистки [2]. Центрифуга, с позиций эффективности очистки, менее чувствительна к газовым включениям в масле. Работа ФТОМП при фильтрации воздушно-масляной эмульсии нарушается, так как поры нетканого фильтровального материала (ФМ), блокируются отложениями. При этом сопротивление фильтрующих элементов (ФЭ) растет, и фильтр функционирует с открытым перепускным клапаном.

В предлагаемой комбинированной системе воплощены главные преимущества очистки ММ фильтрованием и центрифугированием, способствующие продолжительной изоляции пар трения двигателя от контактов с большими, следовательно, наиболее опасными, частицами механических примесей и поддерживающие на низком уровне загрязнение масла мелкодисперсными нерастворимыми продуктами, ускоряющими старение масла [2, 3]. Таким образом, рассмотренная система в одно время обеспечивает минимальный расход ФЭ,

большой срок использования ММ со стабилизацией его угара на низком (начальном) уровне и достаточно надёжную защиту двигателя от абразивного изнашивания. Как уже отмечалось [1, 2], это достигается посредством глубокой очистки его от тонкодисперсных зольных продуктов старения центрифугированием, и постоянным в широком диапазоне температурных режимов работы СС в скоростных дизелях, полнопоточным тонким фильтрованием масла, подаваемого к трибосопряжениям.

В форсированных дизелях с двухконтурной СС отличительной особенностью комбинированной системы тонкой очистки масла (КСТОМ) (рисунок 1) является монтаж в главном трубопроводе, по которому масло посредством нагнетательного насоса 5 подается из напорного бака 8 в распределительную магистраль 10, полнопоточного фильтра 2 со сменными ФЭ изготовленными из нетканых материалов. Особенность подключения фильтра тонкой очистки масла, заключается в монтаже его до масляного холодильника 1, обеспечении насоса 5 дроссельным распределителем 4 с обратной связью. Наличие изодрома позволяет поддерживать постоянное, не зависящее от перепада на фильтре, давление в распределительной магистрали двигателя.

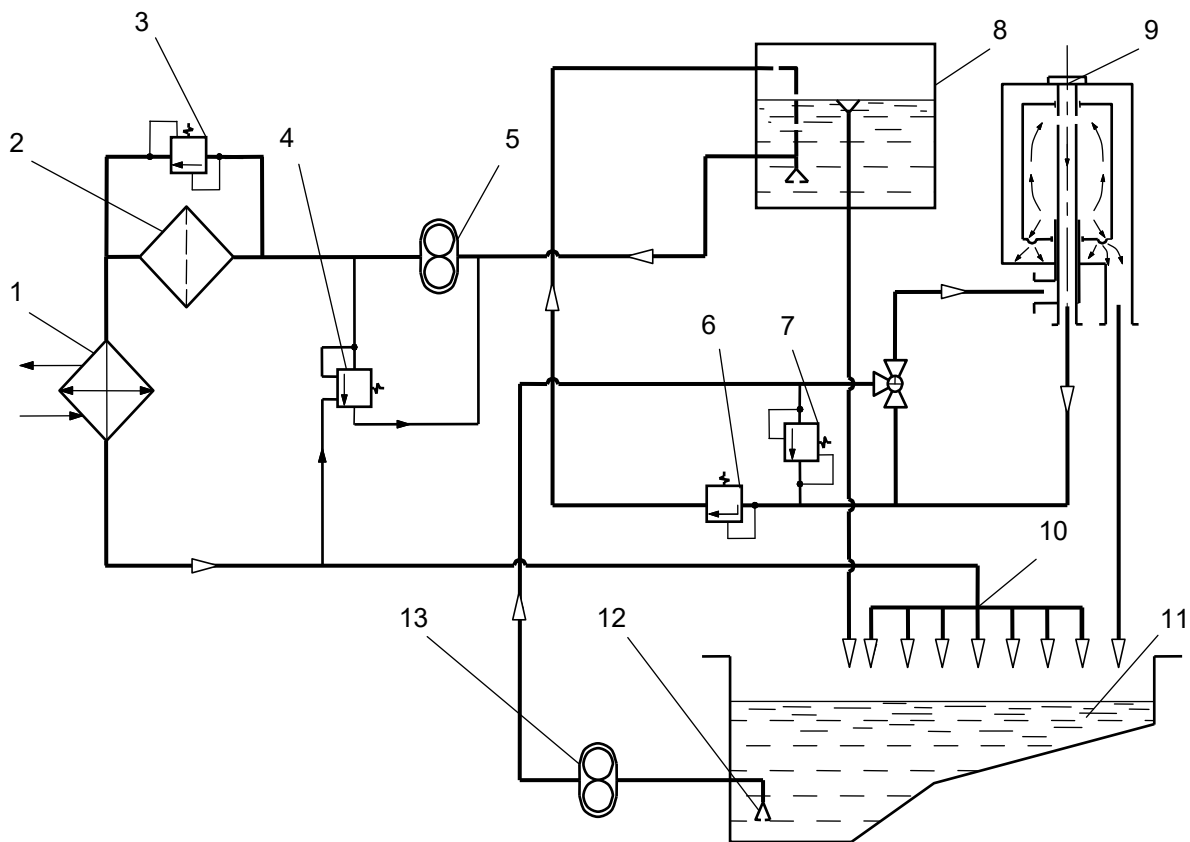


Рисунок 1 – Перспективная СТОМ судовых форсированных дизелей: 1-холодильник; 2-ФТОМП; 3-предохранительный клапан; 4-дроссельный распределитель; 5-нагнетательный насос; 6-напорный клапан; 7-переливной клапан; 8-бак; 9-центрифуга с напорным сливом; 10-распределительная магистраль; 11-картер; 12-заборник; 13-откачивающий насос

Работе фильтра при пуске и прогреве двигателя с закрытым предохранительным клапаном 3 помогает установка распределителя 4 (управляемого переливного клапана) на нагнетательном насосе, что позволяет подавать меньшее количество холодного масла. Постоянное давление в трубопроводе 10, не зависящее от частоты вращения при работе дизеля по винтовой характеристике, достигается за счёт установки насоса 5 с запасом по подаче масла.

В виду того, что при возможной качке судна не будет происходить оголения приёмного патрубка, забор масла из напорной цистерны 8 не приведет к срыву его подачи в двигатель и пульсациям давления. В отдельных случаях с целью подачи на фильтр ММ, прошедшего центрифугирование, желательно откачивающую магистраль замыкать на приемный патрубок нагнетательного насоса.

Центрифугу 9 с напорным сливом уместнее всего монтировать в откачивающей магистрали. Этот маслоочиститель (МО) менее чувствителен к попаданию воздуха в СС, создает подпор откачиваемому насосу 13, что приводит к более стабильной работе последнего. Для развития у центрифуги более высокой частоты вращения, откачивающая система снабжена напорным клапаном 6, который поддерживает на любых режимах работы дизеля давление масла перед масляной центрифугой с наружным гидрореактивным приводом и напорным сливом (МЦН-НС) не менее 0,7 МПа. При таком давлении перед соплами ротор центробежного очистителя (ЦО) развивает частоту вращения не менее 80 с^{-1} при очистке всего, за исключением расхода на привод, потока масла, подаваемого насосом 13. Для отключения ЦО с целью чистки его ротора на работающем двигателе в откачивающей магистрали установлен трехходовой кран.

Переливной клапан 7 позволяет установить оптимальную подачу масла в центрифугу, при которой скорость удаления из масла нерастворимых загрязнений будет максимальна. Специфика предлагаемого включения МО в СС интересна тем, что масло, поступающее к фильтру, проходит как бы предварительную очистку центрифугированием [4]. При этом из-за полидисперсного состава загрязнителя масла величина подачи масла в МЦН-НС влияет на массо-дисперсный состав нерастворимых загрязнений фугата. Блокировка пор ФМ частицами дисперсной фазы, накопление их в виде отложений на поверхности материала существенным образом зависит не только от количественной, но и качественной характеристики загрязнения. Предварительное центрифугирование ММ увеличивает срок службы ФЭ [5].

Таблица 1 – Моторная эффективность средств очистки ММ в дизелях 6ЧН20/26 и 6ЧН25/34

Показатель	Дизели			
	6ЧН20/26		6ЧН25/34	
	ФМП-3	ФМП-2+МЦН-6НС	ФМП-4	ФМП-4+МЦН-5НС
Максимальная концентрация нерастворимых продуктов (НРП), %:				
– общих	1,9±0,4	1,1±0,2	1,7±0,4	0,9±0,2
– зольных	0,37±0,04	0,21±0,02	0,44±0,05	0,18±0,03
Интенсивность очистки масла от НРП, г/ч:				
– общих	70±20	790±80	80±20	320±40
– зольных	65±14	870±110	110±30	580±50
Срок службы ФЭ, тыс. ч	0,7±0,2	1,3±0,4	0,8±0,2	1,4±0,3
Надежность защиты частиц $d > 30 \text{ мкм}$, %	42	96	72	100
Скорость изнашивания деталей ДВС:				
– комплект поршневых колец, г/1000 ч	8,7±1,1	5,3±0,6	4,2±0,5	1,8±0,2
– цилиндровая втулка, мкм/1000 ч	28,3±3,2	21,6±2,5	22,3±1,7	9,4±0,8
– вкладыши мотылевых подшипников, мг/1000 ч	185±31	132±16	–	–
– мотылевые шейки коленчатого вала (КВ), мкм/1000 ч	23,4±3,1	12,3±1,4	16,5±1,8	14,3±1,6
Нагаро- и лакообразование на поршнях, балл	14,3±1,8	8,2±1,4	5,1±0,8	2,7±0,3
Отложения в картере, балл	3,2±0,7	0	2,6±0,3	0

На примере судовых дизелей 6ЧН20/26 и 6ЧН25/34 рассмотрим эффективность предлагаемой и штатной системы очистки (ШСО) масла. В качестве штатного в СС исследуемых дизелей используется полнопоточный фильтр ФМП-3 с ФЭ из ФМ ДРКБ-4 с тонкостью отсева 45 мкм.

Опытная система очистки была укомплектована фильтром ФМП-3 с ФЭ этого же типа из материала БМ-120 с тонкостью отсева 35 мкм. На откачивающей магистрали дизелей 6ЧН20/26 и 6ЧН25/34 были установлен очистители МЦН-6НС и МЦН-5НС (центрифуги крепились на напорном баке) с пропускной способностью соответственно 100 и 80 дм³/мин. Моторный эксперимент велся на масле М10Г₂(цс). Прокачка масла через первый дизель составляла 92, а через второй – 75 дм³/мин. Рабочая температура масла равнялась 70 °С. Давление масла перед ЦО поддерживалось на уровне 0,7 МПа.

Сопоставление старения масла М10Г₂(цс) в дизелях 6ЧН20/26 и 6ЧН25/34 со штатной и новой системами очистки показывает многократные преимущества КСТОМ по интенсивно-

сти очистки (таблица 1, рисунок 2 и 3). Максимальная концентрация общих и зольных нерастворимых продуктов (НРП) (ГОСТ 20684-75), в дизеле 6ЧН20/26 при комбинированной очистке масла составляла 1,1 и 0,2%. При работе дизеля со штатными МО уровень накопления примесей этого же вида доходил в среднем соответственно до 1,9 и 0,37%, т. е. был в 1,7-1,8 раза выше. По надежности защиты подшипников от опасных частиц загрязнений, способных вызвать задиры, КСТОМ эффективнее полнопоточного фильтра тонкой очистки почти в 3 раза [4, 6].

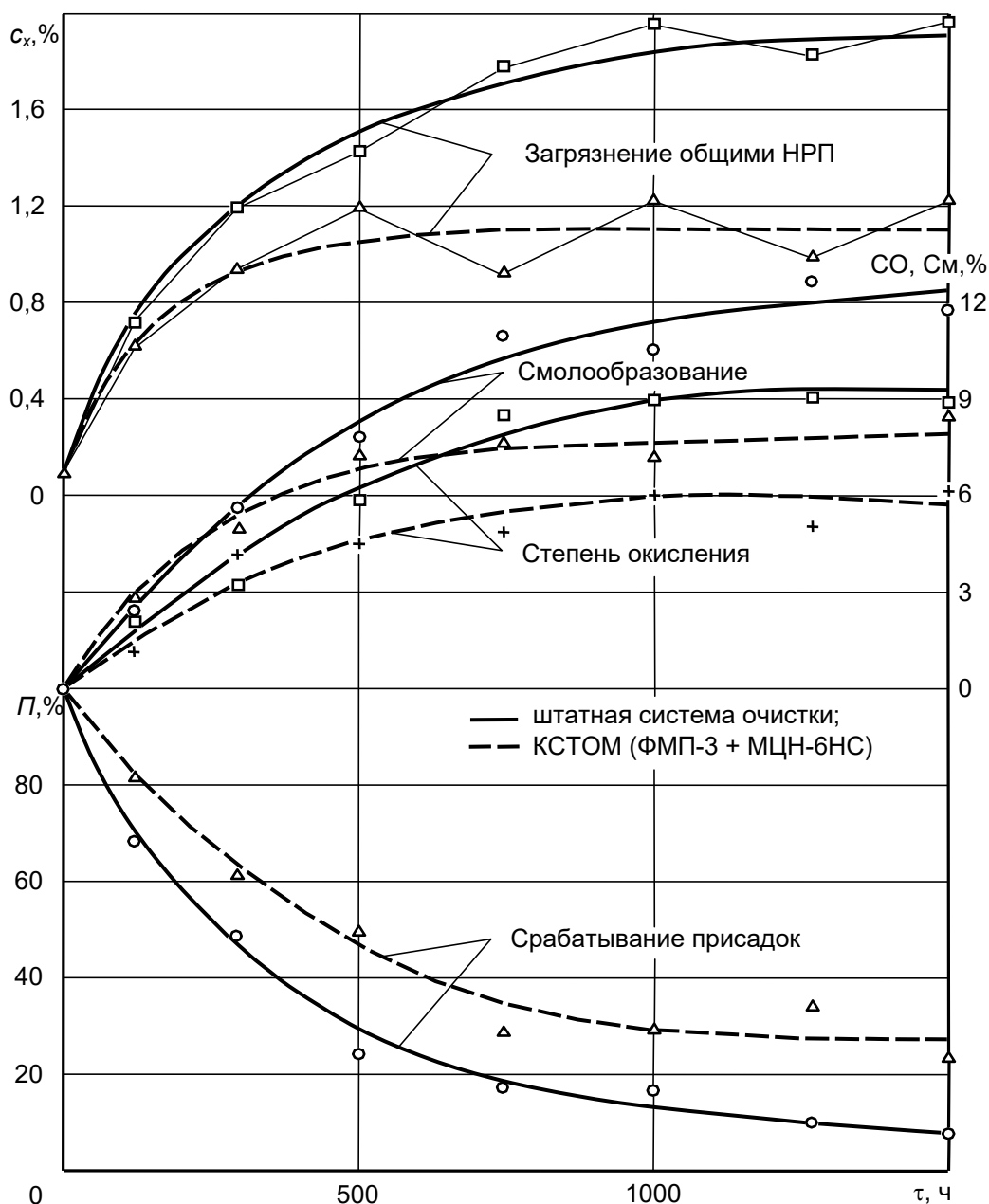


Рисунок 2 – Старение масла М10Г2(цс) в дизеле 6ЧН20/26 с разными средствами очистки

Сравнение показателей C_x и C_z в дизеле 6ЧН25/34 показало преимущество КСТОМ над ФТОМП по общим НРП в 1,8, зольным – 2,4 раза. Концентрация этих продуктов в конечных пробах соответствовала 0,9 и 0,18% (КСТОМ) и 1,7 и 0,44% (ФТОМП).

При очистке ММ по штатной схеме степень окисления СО и смолообразование См доходят (рисунок 2 и 3) до критического уровня, когда интенсифицируется нагаро- и лакообразование в дизеле [7]. Закоксовывание поршневых колец при этом не наблюдалось в силу высоких моюще-диспергирующих свойств масла М10Г2(цс). Щелочность ММ при использовании ШСО срабатывалась в 1,6 раза интенсивнее по сравнению с вариантом с его очисткой комбинированным маслоочистительным комплексом (КМОК).

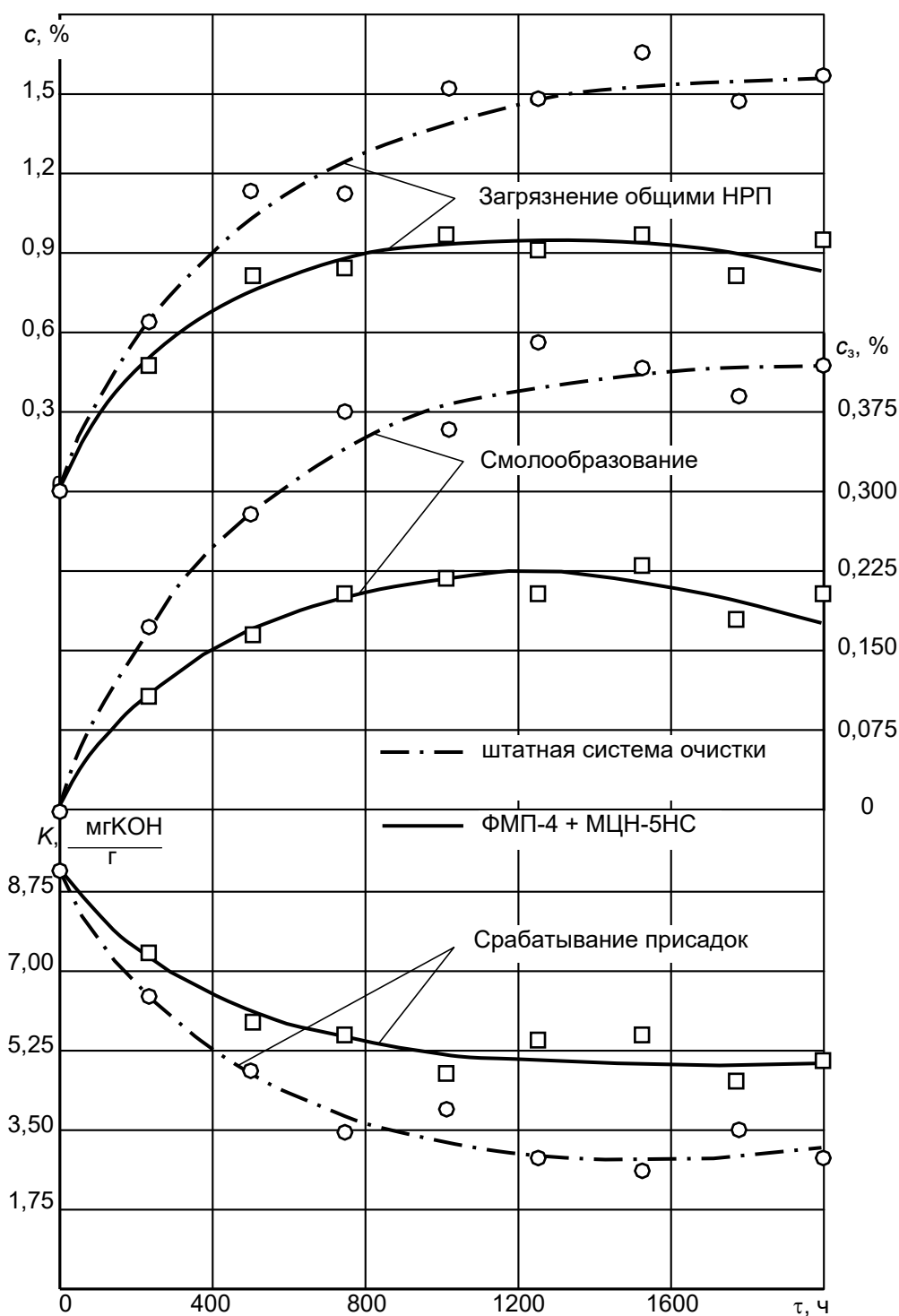


Рисунок 3 – Старение масла М10Г₂(ц) в дизеле 6ЧН25/34 с разными средствами очистки

Высокий уровень функциональных свойств КСТОМ виден из сопоставления моторных свойств масла М10Г₂(ц) при разных системах очистки [6]. Так, скорость изнашивания деталей цилиндро-поршневой группы (ЦПГ) при использовании комбинации ФМП-3 и МЦН-6НС была в 1,3-1,9 раза ниже, чем при очистке масла штатными агрегатами. Наибольший эффект от комбинированной очистки масла проявился по мотылевым шейкам коленчатого вала (КВ): достигнуто снижение изнашивания в 1,9 раза. Менее всего повышение эффективности очистки сказалось в снижении изнашивания цилиндрических втулок.

Сопоставление систем очистки по влиянию на нагаро- и лакообразование в дизеле показывает значительное влияние МО как на загрязнение юбки поршней смолами, так и на их общее состояние. При комбинированной очистке масла нагаро- и лакообразование в дизеле было ниже в 1,7 раза (таблица 1). Хороший результат при использовании КСТОМ получен и

в снижении загрязнения картера низкотемпературными отложениями.

Преимущество КСТОМ выявлено почти по всем показателям старения масла М10Г₂(цс) и состояния двигателя. Работа дизелей осуществлялась на моторном топливе ДТ (ГОСТ 1667-68). Сравнение этих двух систем показало, что интенсивность комбинированной очистки масла относительно варианта с ФТОМП возросла в 4-12 по общим и в 5-14 раз – зольным НРП [2, 5, 6]. Это сказалось на максимальных концентрациях нерастворимых продуктов в масле. При использовании КСТОМ уровень его загрязнения упал в 1,9-2,4 раза.

Срок службы ФЭ при дополнительном центрифугировании масла увеличился в среднем в 1,75 раза. Сравнительно надежная защита деталей кривошипно-шатунного механизма (КШМ) от крупных частиц, как при фильтровании, так и при комбинированной очистке масла, несмотря на более высокую загрязненность масла при его очистке ФМП-3, не привела к значительным отклонениям скорости изнашивания шеек КВ от среднего его уровня.

Высокий уровень зольных НРП в масле при его очистке только фильтрованием привел к интенсификации скорости изнашивания деталей ЦПГ в 2,4 раза по сравнению с вариантом, где использовался КМОК. Высокое загрязнение масла и более интенсивное его старение при применении штатного варианта очистки на нагарообразовании поршней и отложениях в картере сказалось значительно [7]. Эти показатели у ФМП-3 были в 1,5 раза хуже, чем у КМОК.

Комбинированная очистка масла фильтрованием и центрифугированием, как видно из результатов моторных испытаний, стабилизирует моюще-диспергирующие свойства масла на более высоком уровне, ускоряет перевод промежуточных продуктов окисления в карбены и карбоиды, которые легко удаляются центрифугированием. Очистка ММ фильтрованием и центрифугированием наиболее эффективна при применении зольных масел с высокими моюще-диспергирующими свойствами и топлив с содержанием серы более 1%.

Полнопоточное тонкое фильтрование масла надежно защищает пары трения ДВС от частиц загрязнения, вызывающих интенсивное изнашивание и задир. При этом полностью прекратилось проворачивание вкладышей подшипников [7]. Дополнительное центрифугирование обеспечивает глубокую очистку масла от продуктов, катализирующих его окисление, старение и срабатывание присадок, что способствует увеличению его срока службы.

Выводы:

– Применение в форсированных тронковых дизелях с двухконтурной СС полнопоточных масляных фильтров типа ФМП и центрифуг с напорным сливом МЦН-НС по сравнению с распространенными МО в 1,2-2,3 раза замедляет старение ММ, увеличивает в 2-6 раз срок его службы и стабилизирует угар на уровне 1,2-2,5 г/(кВт·ч) в течение длительного времени.

– Нарботка на отказ деталей КШМ и ЦПГ двигателей при эффективной очистке ММ увеличивается в 1,2-2,5 раза. Обусловлено это улучшением смазки указанных трибосопряжений, снижением в 1,3-1,9 раза изнашивания основных деталей и нагаро- и лакообразования в среднем на 45%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Кича, Г.П. Очистка масла в двигателях внутреннего сгорания / Г.П. Кича // -Химия и технология топлив и масел. -1985. -№2. -С. 28-30.
- 2 Кича Г.П. Эффективная очистки моторного масла -основа экономичной ресурсосберегающей эксплуатации судовых ДВС/ Г.П. Кича // -Двигателестроение. -1985. -№7. -С. 6-10.
- 3 Кича Г.П. Комбинированный маслоочистительный комплекс для судовых форсированных дизелей / Г.П. Кича // -Судостроение. -1985. -№4. -С. 25-28.
- 4 Кича, Г.П. Моделирование изнашивания судовых тронковых дизелей при использовании унифицированных моторных масел / Г.П. Кича, Б.Н. Перминов, А.В. Надежкин, С.А. Завадский // -Трение и износ. -2004. -Т.25. -№6. -С. 635-641.
- 5 Кича, Г.П. Ресурсосберегающее маслоиспользование в судовых дизелях / Г.П. Кича, Б.Н. Перминов, А.В. Надежкин. -Владивосток: Мор. гос. ун-т, -2011. -372 с.
- 6 Надёжкин А. В. Оптимизация режимов комбинированной очистки моторного масла в судовых дизелях методами вариационного исчисления / А.В.

REFERENCES

- 1 G.P. Kicha. Oil purification in the internal combustion engines [Ochistka masla v dvigatelyakh vnutrennego sgoraniya]. *Chemistry and technology of fuels and oils [Khimiya i tekhnologiya topliv i masel]*. 1985. No. 2. pp. 28-30.
- 2 G.P. Kicha. Effective oil purification is the basis of resource-conserving internal combustion engines operation [Effektivnaya ochistki motornogo masla -osnova ekonomichnoy resursosokhranyayushchey ekspluatatsii sudovykh DVS]. *Engine technology [Dvigatelistroenie]*. 1985. No. 7. pp. 6-10.
- 3 G.P. Kicha. Combined oil purification unit for marine boosted diesels [Kombinirovanny masloochistitel'nyy kompleks dlya sudovykh forsirovannykh dizeley]. *Shipbuilding [Sudostroenie]*. 1985. No. 4. pp. 25-28.
- 4 G.P. Kicha, B.N. Perminov, A.V. Nadezhkin, S.A. Zavadskiy. Modeling the wear of marine trunk diesels using universal motor oils [Modelirovanie iznashivaniya sudovykh tronkovykh dizeley pri ispol'zovanii unifikirovannykh motornykh masel]. *Friction and wear [Trenie i iznos]*. 2004. Vol. 25. No. 6. pp. 635-641.
- 5 G.P. Kicha, B.N. Perminov, A.V. Nadezhkin. Resource-conserving oil consuming in marine diesels [Resursosberegayushchey masloispol'zovanie v sudovykh dizelyakh]. Vladivostok. Marytime St. Univ. Publ. 2011. 372 p.
- 6 A.V. Nadezhkin, G.P. Kicha, L.A. Semenyuk. Optimization of combined oil purification modes in marine diesel engines by calculus of variation meth-ods [Optimizatsiya rezhimov kombinirovannoy ochistki motornogo masla v sudovykh dizelyakh metodami variatsionnogo ischisleniya]. *Marine intellec-*

Надежкин, Г.П. Кича, Л.А. Семенюк // -Морские интеллектуальные технологии. -2017.-№3. -С. 93-101.

7 Соболенко, А.Н. Анализ повреждений рамовых подшипников двигателей 8NVD48A-2U на промысловых судах / А.Н. Соболенко, В.В. Маницын // -Вестник ГУМРФ им. С.О. Макарова. -2016. -Вып. 6(40). -С. 150-155.

tual technologies [Morskie intelektual'nye tekhnologii]. 2017. No. 3. pp. 93-101.

7 A.N. Sobolenko, V.V. Manitsyn. Analysis of damage of main bearings of 8NVD48A-2U engines on fishing vessels [Analiz povrezhdeniy ramovykh podshipnikov dvigateley 8NVD48A-2U na promyslovyykh sudakh]. *Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping Reporter [Vestnik GUMRF im. S.O. Makarova].* 2016. Vol. 6(40). pp. 150-155.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ресурсосберегающее маслоиспользование, моторное масло, срок службы масла, износ двигателя

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ: Кича Геннадий Петрович, докт. техн. наук, профессор МГУ им. адм. Г.И. Невельского
Надежкин Андрей Вениаминович, докт. техн. наук, профессор МГУ им. адм. Г.И. Невельского
Семенюк Людмила Анатольевна, аспирант МГУ им. адм. Г.И. Невельского

ПОЧТОВЫЙ АДРЕС: 690059, г.Владивосток, ул.Верхнепортовая, 50а, МГУ им. адм. Г.И. Невельского

ВЛИЯНИЕ УГАРА МАСЛА, КАЧЕСТВА ПРИМЕНЯЕМЫХ ГОРЮЧЕ-СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ФОРСИРОВКИ ДИЗЕЛЯ НА ЕГО ИЗНАШИВАНИЕ

ФГБОУ ВО «Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского»

Г.П. Кича, М.И. Тарасов, Л.А. Семенюк

EFFECT OF OIL BURNING, QUALITY OF LUBRICATING MATERIALS AND DIESEL BOOSTING ON ITS WEAR

Maritime State University named after admiral G.I.Nevelskoi (MSU named after adm. G.I.Nevelskoi) 50a, Verkhneportovaya St., Vladivostok, 690059, Russia

Gennadii P. Kicha (Holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Prof. of MSU named after adm. G.I.Nevelskoi)

Maksim I. Tarasov (Graduate student of MSU named after adm. G.I.Nevelskoi)

Lyudmila A. Semenyuk (Graduate student of MSU named after adm. G.I.Nevelskoi)

ABSTRACT: The authors show the results of modeling of effect of oil burning on the condition of the marine boosted trunk diesel when using the lubricating materials of different operational properties. This resulted in establishing the most rational oil burning level, which provides the most favorable conditions for resource conserving operation of the engine.

Keywords: motor oil, engine wear, optimal oil burning, oil burning, marine boosted engine

Приведены результаты моделирования влияния угара масла при использовании горюче-смазочных материалов разных эксплуатационных свойств на состояние судового форсированного тронкового дизеля. Установлен наиболее рациональный угар масла, обеспечивающий самые благоприятные условия для ресурсосберегающей эксплуатации ДВС.

К приоритетным темам исследований по экономии моторного масла (ММ) в форсированных двигателях надлежит отнести уменьшение его расхода на угар и увеличение срока использования. Целесообразное расходование ММ первоначально предполагает обоснованный выбор его, учитывающий конструктивные особенности и условия эксплуатации дизеля. Производя выбор масла необходимо принимать во внимание, что значительное влияние на его расход при работе двигателя имеет углеводородная основа ММ и разновидности входящих в его состав присадок. Сорт масла, выбранный рационально, при оптимальном его угаре в существенной степени благоприятствует увеличению надежности, долговечности и экономичности двигателей [1].

Широкое применение в Дальневосточном бассейне нашли дизели VASA 20 (6ЧН 20/28). Мощность этого двигателя равна 1000 кВт при частоте вращения вала 1000 мин⁻¹. Среднее эффективное давление $p_{me} = 2,4$ МПа, средняя скорость поршня 7 м/с, максимальное давление рабочего цикла 15 МПа. Удельный эффективный расход топлива составляет 200 г/(кВт·ч). Работать двигатель может на топливе с вязкостью до 750 сСт при 50 °С. Как правило, его эксплуатация происходит на отечественных топочных мазутах 40В и 100 (ГОСТ 10585-99).

На номинальной мощности удельный расход масла довольно низок и на новой цилиндро-поршневой группе (ЦПГ) может составлять 0,7 г/(кВт·ч). В дизеле с изношенной ЦПГ при использовании штатных маслосъемных колец он доходит до 4 г/(кВт·ч). В основном дизель рассчитан на использование тяжелых низкосортных видов топлива, и поэтому напряженность его рабочего процесса довольно высока. Исходя из этого, важно определить угар масла, обеспечивающий минимальное изнашивание основных деталей трибосопряжений [2, 3].

Смазочная система дизеля обеспечена результативной системой очистки масла, со-

держатель полнопоточный фильтр с поверхностными фильтрующими элементами типа Н-15. Помимо этого ММ дополнительно байпасно центрифугируется [4, 5].

Дизель VASA20, участвующий в проведении эксперимента, эксплуатировался по нагрузочной характеристике. На каждом этапе испытаний нагрузка выдерживалась с точностью до $\pm 5\%$ от среднего ее значения. Продолжительность этапов испытания, последовательность и режим нагружения дизеля выбирались согласно рекомендациям [1, 6]. Угар масла корректировали изменением маслосъемного действия поршневых колец [3, 4].

Анализ износа деталей ЦПГ велся согласно требованиям ОСТ 24.060.09-89. Для его проведения применялись точные методы измерения: взвешивание на аналитических весах при определении износа поршневых колец и метод искусственных баз для оценки, искусственно формируемых на цилиндрических втулках лунок и измеряемых с помощью прибора УПОИ-6.

Для обработки данных, полученных при проведении судового эксперимента, применили некомпозиционный план второго порядка, представляющий определенные выборки строк из полного факторного эксперимента [6]. Уровни и интервалы варьирования факторов были выбраны, на основе априорной информации. Они представлены в таблице 1. Диапазон варьирования среднего эффективного давления p_{me} в интервале 0,5-2,0 МПа выбран с целью полного охвата современных форсированных дизелей средней и повышенной частоты вращения, используемых на судах Дальневосточного бассейна. Заданная на каждом этапе средняя нагрузка на двигатель соответствовала указанным значениям p_{me} .

Таблица 1 – Уровни и интервалы варьирования факторов

Фактор	Кодовое обозначение	Интервал варьирования	Уровень факторов		
			нижний -1	основной 0	верхний +1
Форсировка дизеля p_{me} (средняя нагрузка) на режиме испытаний, МПа	x_1	0,75	0,5	1,25	2
Качество масла M , ранг	x_2	1	-1	0	1
Качество топлива K_m , отн. ед.	x_3	0,8	0,2	1	1,8
Удельный угар масла g_y , г/(кВт·ч)	x_4	1,5	1	2,5	4

Уровни варьирования качества масла M изменениями в интервале от -1 до 1. Рангом -1 закодировано масло М10Г₂(цс), рангом 0 – М10Д₂(цл20), ранг 1 присвоен маслу М10Д₂(цл30) (ГОСТ 12337-84).

Диапазон варьирования качества применяемого топлива составлял 0,2-1,8. Качество применяемого топлива задавалось показателем K_m . Этот фактор, учитывающий качество применяемого топлива, рассчитывали по формуле [1]

$$K_m = A_z \frac{Z_m}{Z_{mб}} + A_s \frac{S_m}{S_{mб}} + A_\phi \frac{\Phi}{\Phi_б} + A_\Gamma \frac{\Gamma}{\Gamma_б},$$

где A_i – коэффициенты весомости;

$Z_m, Z_{mб}$ – зольность топлива, %;

$S_m, S_{mб}$ – содержание серы, %;

$\Phi, \Phi_б$ – фракционный состав топлива, отн. ед.;

$\Gamma, \Gamma_б$ – групповой состав топлива, отн. ед.

Фактор K_m представляет собой средневзвешенную величину вышеназванных показателей, взятых относительно базового топлива с коэффициентом весомости 0,25. Базовому топливу соответствует индекс Б. Базовое топливо имеет следующие показатели: $Z_{mб} = 0,1\%$, $S_{mб} = 2\%$, $\Phi_б = 0,4$, $\Gamma_б = 0,5$. Характеристики Φ и Γ определяли пропорционально долям топлива, выкипающих при температуре выше 350 °С, и суммарным относительным содержанием асфальто-смолистых веществ и ароматической группы углеводородов в топливе.

Расход масла на угар в эксперименте задавался удельным показателем g_y , г/(кВт·ч) на номинальной мощности дизеля каждого этапа. Он значительно влияет на интенсивность старения смазочного масла, циркулирующего в системе смазки. Так при увеличении угара

масла возрастает прорыв газов в картер, что приводит к более интенсивному старению ММ. Снижение угара замедляет маслообмен при его доливе, может вызывать масляное голодание трущихся поверхностей и, как следствие, интенсификацию изнашивания. Кроме того, низкий маслообмен способствует увеличению загрязнения масла нерастворимыми продуктами и срабатыванию присадок. При высоком угаре возрастает толщина масляной пленки на зеркале цилиндра и заброс его в камеру сгорания. При этом увеличивается доля масла, испаряемого с втулки цилиндра за счет прогрева масляной пленки вследствие действия на нее тепловой нагрузки.

В качестве функции отклика принята обобщенная скорость изнашивания деталей ЦПГ за этап испытаний 250 ч. Этот показатель представляет собой сумму скорости изнашивания поршневых колец и цилиндрических втулок, взятых с одинаковым значением коэффициента весомости. Изнашивание указанных деталей I представлено в безразмерном виде (%) относительно величин исследуемых показателей на базовом этапе работы: $p_{me} = 1,25$ МПа; $M = 0$; $K_m = 1$; $g_y = 2,5$ г/(кВт·ч).

Матрица планирования (таблица 2) предполагала проведение трех параллельных опытов в центре плана, по результатам которых рассчитывалась дисперсия воспроизводимости. Коэффициенты модели рассчитывались по формулам, приведенным в руководстве [6].

Для вычисления дисперсии воспроизводимости и адекватности вычисляли сумму квадратов отклонений расчетных значений $\hat{y}$ от экспериментальных y соответственно в опытах 9, 18, 27 в центре плана и во всех остальных точках.

Коэффициенты уравнения регрессии рассчитывали по формулам [6], которые для четырех факторов имеют вид

$$b_0 = \frac{1}{3} \sum_{u=1}^3 y_{0u}; \quad b_i = \frac{1}{12} \sum_{j=1}^{27} x_{ij} y_j; \quad b_{ii} = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^{27} x_{ij} x_{ij} y_j; \quad b_{ij} = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^{27} x_{ij}^2 y_j - \frac{1}{48} \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^{27} x_{ij}^2 y_j - \frac{1}{6} \sum_{u=1}^3 y_{0u}.$$

Дисперсию $S^2\{y\}$ воспроизводимости эксперимента определяли по результатам опытов в центре плана. Дисперсии, характеризующие ошибки в определении коэффициентов уравнения регрессии для y , вычисляли по формулам, приведенным в работе [6]

$$S^2\{y\} = \frac{S_E}{n_0 - 1} = \frac{56}{2} = 28.$$

Все коэффициенты уравнения регрессии, кроме b_{14} и b_{33} , для износной модели по абсолютной величине превышают соответствующие их доверительные интервалы и поэтому их в полной мере можно признать статистически значимыми.

Уравнение принимает вид

$$y = 109,41 + 37,91x_1 - 65x_2 + 23,83x_3 + 59,25x_4 - 23x_1x_2 - 14,5x_1x_3 - 17,75x_2x_3 + 27,25x_2x_4 + 32,75x_3x_4 + 40,43x_1^2 - 20,44x_2^2 + 101,68x_4^2. \quad (1)$$

По критерию Фишера проверили адекватность полученной модели. Сумму S_R квадратов отклонений расчетных значений $\hat{y}$ от экспериментальных y во всех точках плана вычислили для вычисления дисперсии $S^2\{y\}$ адекватности (таблица 2). По выражению (1) определили расчетное значение $\hat{y}$.

При числе коэффициентов k' аппроксимирующего полинома, равном 8, дисперсия адекватности соответствует [6]:

$$S_{ad}^2 = \frac{S_R - S_E}{N - k' - (n_0 - 1)} = \frac{1222 - 56}{27 - 13 - 2} = 97,1.$$

Представленная модель адекватна при 5%-ном уровне значимости, так как

$$F_p = \frac{S_{ad}^2}{S^2\{y\}} = \frac{97,17}{28} = 3,47 < F_m = 8,7.$$

Трансформация от кодированных значений показателей к натуральным происходила посредством варьирования интервалами и основными уровнями факторов в натуральном выражении по формулам:

$$p_{me} = 0,75x_1 + 1,25; \quad M = x_2; \quad K_m = 0,8x_3 + 1; \quad g_y = 1,5x_4 + 2,5.$$

Модель процесса изнашивания при предоставлении факторов в натуральном выраже-

нии имеет вид

$$I = 350,44 - 104,96p_{me} - 49,9M - 8,23K_T - 213,75g_y - 30,67p_{me}M - 24,17p_{me}K_T - 22,19MK_T + \\ + 18,17Mg_y + 27,29K_Tg_y + 71,88p_{me}^2 - 20,44M^2 + 45,19g_y^2. \quad (2)$$

Исследование зависимости (1) показало, что если учитывать суммарное действие линейного и квадратичного эффектов, существенное влияние на функцию отклика I оказывает фактор g_y и p_{me} .

Таблица 2 – Матрица некомпозиционного плана второго порядка

	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{23}	x_{24}	x_{34}	x_{11}	x_{22}	x_{33}	x_{44}	y	$\hat{y}$	$(y - \hat{y})^2$
1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	79	79	0
2	1	1	-1	0	0	-1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	252	255	9
3	1	-1	1	0	0	-1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	49	49	0
4	1	-1	-1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	130	133	9
5	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	334	327	49
6	1	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	-1	0	0	1	1	148	143	25
7	1	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	-1	0	0	1	1	219	214	25
8	1	0	0	-1	-1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	164	161	9
9	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	98	109	121
10	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	357	349	64
11	1	1	0	0	-1	0	0	-1	0	0	0	1	0	0	1	222	230	64
12	1	-1	0	0	1	0	0	-1	0	0	0	1	0	0	1	255	273	324
13	1	-1	0	0	-1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	163	154	81
14	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	33	30	9
15	1	0	1	-1	0	0	0	0	-1	0	0	0	1	1	0	25	18	49
16	1	0	-1	1	0	0	0	0	-1	0	0	0	1	1	0	198	196	4
17	1	0	-1	-1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	119	112	49
18	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	106	109	9
19	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	200	197	9
20	1	1	0	-1	0	0	-1	0	0	0	0	1	0	1	0	179	178	1
21	1	-1	0	1	0	0	-1	0	0	0	0	1	0	1	0	158	150	64
22	1	-1	0	-1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	79	74	25
23	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	209	212	9
24	1	0	1	0	-1	0	0	0	0	-1	0	0	1	0	1	33	39	36
25	1	0	-1	0	1	0	0	0	0	-1	0	0	1	0	1	288	288	0
26	1	0	-1	0	-1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	221	224	9
27	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	96	109	169

Изучение зависимости (2) на экстремум позволило выявить оптимальный угар $g_{yонм}$, при котором I достигает минимума. Взяв первую производную dI/dg_y и приравняв ее нулю, получаем выражение для самого оптимального из позиций снижения изнашивания двигателя угара масла [7]

$$g_{yонм} = 2,365 - 0,201M - 0,302K_T. \quad (3)$$

Подставкой $g_{yонм}$ в уравнение (2) получим зависимость для расчета I_{min}

$$I_{min} = 97,7 - 104,96p_{me} - 6,93M + 56,31K_T - 30,67p_{me}M - 24,17p_{me}K_T - \\ - 27,67MK_T + 71,88p_{me}^2 - 22,27M^2 - 4,12K_T^2. \quad (4)$$

Анализ формулы (4) показал, что менее всего скорость I_{min} изнашивания зависит от качества топлива. Действие форсировки дизеля (фактора p_{me}) на его изнашивание проявляется в большей мере, чем влияние топлива на этот процесс, но уступает влиянию масла.

На рисунке 1 показана зависимости скорости изнашивания дизеля VASA 20 от угара масла. При этом наблюдается хорошая сходимость результатов моделирования и судового однофакторного эксперимента.

В зависимости $I(g_y)$ наблюдается экстремум. Минимальное изнашивание дизеля наблюдается при $g_y = 1,6-2,2$ г/(кВт·ч). С повышением качества ММ $g_{yонм}$ смещается в мень-

шую сторону. Наличие минимума рассматриваемой функции отклика при варьировании g_y обусловлено противоположным действием на I маслообмена и скорости старения масла при увеличении его угара. С увеличением g_y обновление масла, находящегося в картере дизеля, за счет его доливок возрастает, но при этом одновременно повышается скорость старения ММ по основным направлениям.

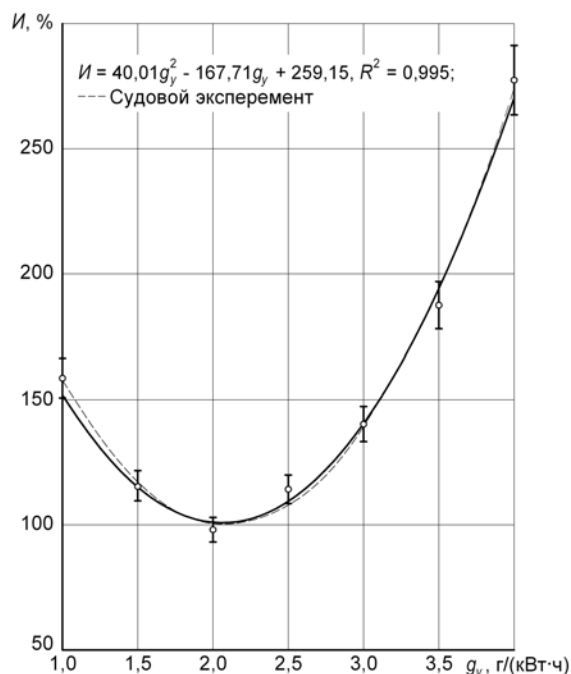


Рисунок 1 - Зависимость изнашивания дизеля от угара масла

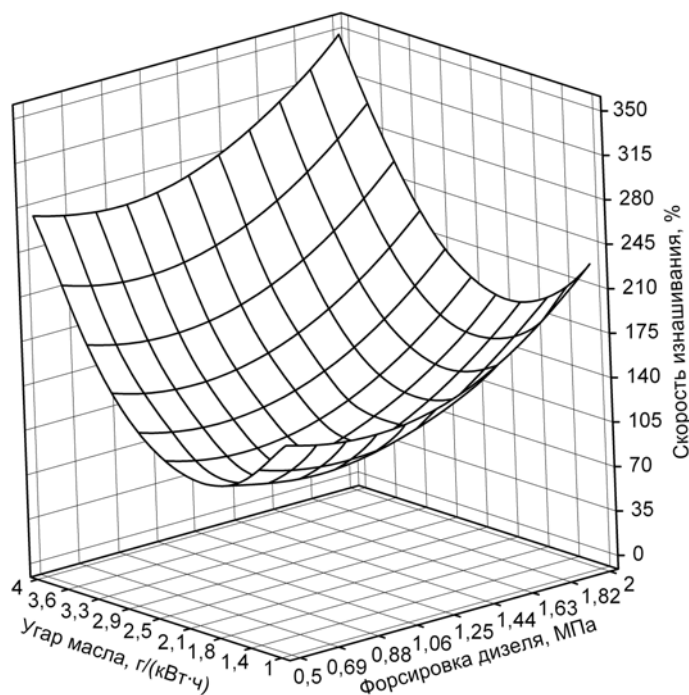


Рисунок 2 - Зависимость износа от угара масла и форсировки дизеля

На рисунке 2 приведена поверхность отклика, показывающая влияние на износ дизеля угара и форсировки дизеля при работе на масле М10Д₂(цл20). Поверхность $I_{\min}(g_y, p_{me})$ имеет двухмерную форму вогнутости. В плоскости $I_{\min} - g_y$, впадина выражена сильнее, чем в координатах $I_{\min}, p_{me}$. Минимальный износ при форсировке дизеля от 0,5 до 2 МПа возрастает с 90 до 180%. При этом угар смещается с 1,9 до 2,2 г/(кВт·ч).

Состояние работающего масла зависит от соотношения между маслообменом и скоростью его старения.

На участке $g_y = 1-2$ г/(кВт·ч) возрастающий маслообмен по мере увеличения долива свежего масла для компенсации угара улучшает состояние ММ интенсивнее, чем ухудшаются его свойства из-за повышения скорости старения. При $g_y > 2$ г/(кВт·ч) с увеличением угара масла скорость его старения растет интенсивнее маслообмена, что приводит к ухудшению состояния ММ в картере дизеля [7-9] и как, следствие росту $I_{\min}$.

На рисунке 3 приведена оптимизационная характеристика по угару масла, из которой видно как влияет триада $M - K_T - g_{yopt}$ на $I_{\min}$. При средних значениях всех рассматриваемых

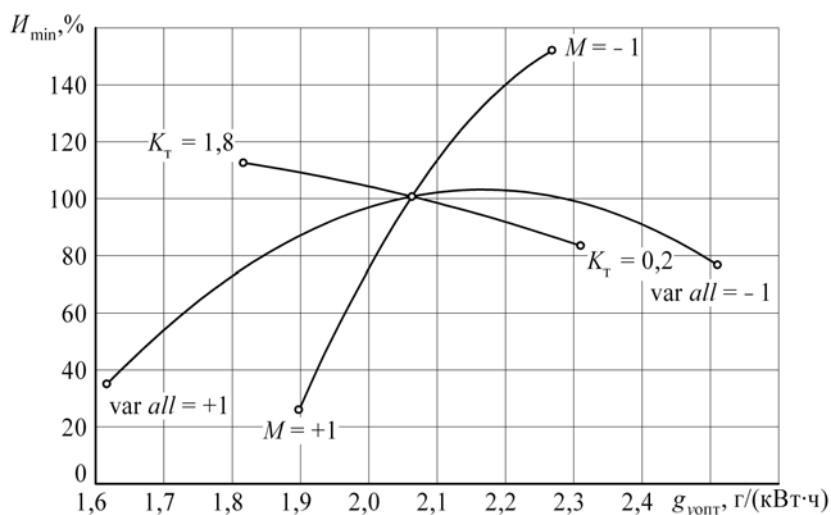


Рисунок 3 - Оптимизационные характеристики по угару масла в триаде $M - K_T - g_{yopt}$ по функции отклика $I_{\min}$

факторов оптимальный угар составляет 2,06 г/(кВт·ч).

Принятый для сочетания всех факторов x_i на среднем уровне, износ оценен 101%. Наибольшее воздействие на $I_{\min}$ оказывает фактор M . При этом колебании g_{yom} самое малое от 1,86 до 2,26 г/(кВт·ч). Фактор K_T оказывает наименьшее воздействие $I_{\min}$, диапазон колебаний $g_{\text{min yom}}$ от действия этого фактора составляет 1,92-2,31 г/(кВт·ч). Варьирование всеми факторами в кодированном виде от +1 до -1 приводит к смещению g_{yom} с 1,62 до 2,51 г/(кВт·ч), что соответствует износу $I_{\min}$ в пределах 36-77%. При этом максимальное значение $I_{\min}$, наблюдаемое при $x_i = 0,4$, равняется 103%. Оптимальный угар для этого состояния находится на уровне 2,15 г/(кВт·ч).

Судовой эксперимент подтвердил хорошую корреляцию между состоянием ММ и показателем $I_{\min}$. В диапазоне $g_y = 1,5-2$ г/(кВт·ч) при одинаковой наработке дизеля, щелочность масла имела наибольшее значение, а концентрация нерастворимых продуктов была минимальной. В этом значении угара масла его старение протекает с наименьшей интенсивностью, а состояние дизеля по износу и нагарообразованию наилучшее. Длительные судовые износные испытания дизеля VASA 20 подтвердили возможность сохранения им ресурсных показателей при работе на низкосортных топливах и унифицированных маслах с угаром 1,5-2 г/(кВт·ч).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Кича, Г.П. Ресурсосберегающее маслоиспользование в судовых дизелях: монография / Г.П. Кича, Б.Н. Перминов, А.В. Надежкин. - Владивосток: Мор. гос. ун-в., 2011. - 372 с.
- 2 Кича, Г.П. Триботехнические характеристики нерастворимых продуктов загрязнения моторных масел и их влияние на износ дизеля / Г.П. Кича, Г.М. Липин, С.П. Полоротов // -Трение и износ. -1986. -Т.7. -№6. -С. 1068-1078.
- 3 Кича, Г.П. Конструктивные и эксплуатационные методы снижения угара моторного масла в судовых дизелях / Г.П. Кича // -Науч. пробл. транс. Сиб. и Дальн. Вост. -2017. -№3-4. -С. 138-143.
- 4 Кича, Г.П. Эксплуатационная эффективность новых маслоочистительных комплексов в форсированных дизелях / Г.П. Кича // -Двигателестроение. -1987. -№6. -С. 25-29.
- 5 Кича, Г.П. Влияние очистки масел на их расход в дизельных двигателях / Г.П. Кича // -Химия и технология топлив и масел. -1986. -№8. -С. 22-24.
- 6 Спиридонов, А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А.А. Спиридонов. -М.: Машиностроение, 1981. -184 с.
- 7 Тарасов, М.И. Исследование влияния угара масла на его старение и состояние малоразмерного дизеля / М.И. Тарасов, Г.П. Кича // -Науч. пробл. трансп. Сиб. и Дальн. Вост. -2017. -№3-4. -С. 143-147.
- 8 Надежкин, А.В. Оптимизация режимов комбинированной очистки моторного масла в судовых дизелях методами вариационного исчисления / А.В. Надежкин, Г.П. Кича, Л.А. Семенюк // -Морские интеллектуальные технологии. -2017. -Т.2. -№3. -С. 93-101.
- 9 Кича, Г.П. Оценка влияния угара моторного масла в судовом форсированном тронковом дизеле на интенсивность старения смазочного материала и состояние двигателя / Г.П. Кича, Г.А. Гаук // -Вестник морского государственного университета. -2010. -№38. -С. 61-72.

REFERENCES

- 1 G.P. Kicha, B.N. Perminov, A.V. Nadezhkin. Resource-conserving oil consuming in marine diesels [Resursosberegayushchee masloispol'zovanie v sudovykh dizelyakh]. Vladivostok. Maritime St. Univ. Publ. 2011. 372 p.
- 2 G.P. Kicha, G.M. Lipin, S.P. Polorotov. Tribotechnical characteristics of in-soluble oil contaminants and their effect on engine wear [Tribotekhnicheskie kharakteristiki nerastvorimyykh produktov zagryazneniya motornykh masel i ikh vliyaniye na iznos dizelya]. Friction and wear [Trenie i iznos]. 1986. Vol. 7. No. 6. pp. 1068-1078.
- 3 G.P. Kicha. Design and operational methods for reducing motor oil burning in marine diesel engines [Konstruktivnye i ekspluatatsionnye metody snizheniya ugara motornogo masla v sudovykh dizelyakh]. Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka. 2017. No. 3-4. pp. 138-143.
- 4 G.P. Kicha. Operational efficiency of new oil purification systems in boosted diesel engines [Ekspluatatsionnaya effektivnost' novykh masloochistitel'nykh kompleksov v forsirovannykh dizelyakh]. Dvigatelistroyeniye. 1987. No. 6. pp. 25-29.
- 5 G.P. Kicha. Effect of oil purification on its consumption in diesel engines [Vliyaniye ochestki masel na ikh rashod v dizel'nykh dvigatelyakh]. Chemistry and Technology of Fuels and Oils [Khimiya i tekhnologiya topliv i masel]. 1986. No. 8. pp. 22-24.
- 6 A.A. Spiridonov. Planning an experiment in the study of technological processes [Planirovaniye eksperimenta pri issledovanii tekhnologicheskikh protsessov]. Moscow. Mashinostroyeniye Publ. 1981. 184 p.
- 7 M.I. Tarasov, G.P. Kicha. Investigation of burning oil effect to its aging and to the condition of a small-size diesel [Issledovanie vliyaniya ugara masla na ego starenie i sostoyaniye malorazmernogo dizelya]. Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka. 2017. No. 3-4. pp. 143-147.
- 8 A.V. Nadezhkin, G.P. Kicha, L.A. Semenyuk. Optimization of combined oil purification modes in marine diesel engines by calculus of variation methods [Optimizatsiya rezhimov kombinirovannoy ochestki motornogo masla v sudovykh dizelyakh metodami variatsionnogo ischisleniya]. Marine intellectual technologies [Morskie intellektual'nye tekhnologii]. 2017. Vol.2. No. 3. pp. 93-101.
- 9 G.P. Kicha, G.A. Gauk. Investigation of burning oil effect to its aging and to the condition of a small-size boosted marine diesel [Otsenka vliyaniya ugara motornogo masla v su-dovom forsirovannom tronkovom dizele na intensivnost' stareniya smazochnogo materiala i sostoyaniye dvigatelya]. Vestnik morskogo gosudarstvennogo universiteta. 2010. No. 38. pp. 61-72.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

моторное масло, изнашивание двигателя, оптимальный угар, угар масла, судовый форсированный двигатель

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Кича Геннадий Петрович, докт. техн. наук, профессор МГУ им. адм. Г.И. Невельского
Тарасов Максим Игоревич, аспирант МГУ им. адм. Г.И. Невельского
Семенюк Людмила Анатольевна, аспирант МГУ им. адм. Г.И. Невельского

ПОЧТОВЫЙ АДРЕС:

690059, г.Владивосток, ул.Верхнепортовая, 50а, МГУ им. адм. Г.И. Невельского

ЗАВИСИМОСТЬ СТЕПЕНИ ОЧИСТКИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ ОТ ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И КОРРОЗИОННЫХ СВОЙСТВ ПОРИСТЫХ ПРОНИЦАЕМЫХ КАТАЛИТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»

Н.Н. Горлова

DEPENDENCE OF THE MARINE DIESELS' EXHAUST GASES PURIFICATION EFFICIENCY FROM PHYSICAL CHARACTERISTICS AND CORROSION PROPERTIES OF POROUS PERMEABLE CATALYTIC MATERIALS

Polzunov Altay State Technical University (AltSTU) 46, Lenina Ave., Barnaul, 656038, Russia
Nina N. Gorlova (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of AltSTU)

ABSTRACT: The authors consider the issues of level of impact of the corrosive and of the porous permeable catalytic material physical properties on the efficiency of the exhaust gases purification from nitrogen oxides in marine diesel engines.

Keywords: exhaust gases, marine diesels, purification efficiency, corrosive resistance, porous permeable material, catalytic materials

Рассматриваются вопросы о степени влияния коррозионных и физических свойств пористого проницаемого каталитического материала на степень очистки отработавших газов судовых дизелей от оксидов азота.

В настоящее время резко обострилась проблема ухудшения качества атмосферного воздуха, что вызывает необходимость в принципиальном сокращении выбросов вредных веществ отработавших газов двигателей внутреннего сгорания. На ближайшую перспективу были определены требования к снижению норм выбросов от дизелей различного назначения (в среднем на 60-80%) по сравнению с действующим в настоящее время уровнем, а в более отдаленной перспективе экологические показатели должны быть сведены практически к «нулевым» выбросам [1].

Транспортная система в современных экономических условиях является одной из ведущих отраслей промышленности. На сегодняшний день суммарно установленная мощность находящегося в эксплуатации транспорта составляет около 1500 млн. кВт, из них около 600 млн. кВт составляют дизели и котлы, что почти в 6 раз превышает установленные мощности всех энергетических систем.

Водный транспорт, несмотря на сезонность его работы, обладает рядом преимуществ перед другими видами транспорта, а именно: более низкие первоначальные затраты на организацию судоходства по сравнению с соответствующими затратами на создание (например, железных дорог), а также себестоимость перевозок водным транспортом на 35% ниже железнодорожных перевозок и в 3-5 раз автомобильных. Однако, массовая эксплуатация флота сопровождается интенсивным его воздействием на окружающую среду в результате сгорания дизельного топлива судовыми двигателями.

К категории наиболее опасных веществ, содержащихся в отработавших газах судовых дизелей, относятся: оксиды азота (NO_x), образующиеся в цилиндрах дизеля при температуре выше 1500 °C, когда азот становится химически активным газом; оксид (CO) и двуокись углерода (CO_2), образующиеся в результате сгорания топлива; сернистый и серный ангидриды (SO_2 и SO_3), образующиеся в результате окисления присутствующей в топливе серы (элементарной, меркаптановой и др.); продукты неполного сгорания топлива (C_xH_y), агломерация мелких частиц не полностью сгоревшего топлива, частицы не полностью сгоревшего масла, сажи и др.

Токсичность образующихся отработавших газов при работе судовых дизелей определяется как сортом топлива, так и условиями его сгорания. Применение тяжелых топлив, с высоким содержанием серы, способствует уменьшению эксплуатационных затрат на топливо, но при этом увеличивается износ и число отказов судовых энергетических установок и повышается загрязнение окружающей среды сернистым и серным ангидридом [2]. В результате взаимодействия NO_x и SO_x с парами воды образуются слабые кислоты (азотная и серная), смесь которых вызывает коррозионные процессы оборудования судовых дизельных установок.

В сентябре 1997 г. Конференция участников международной конвенции по предупреждению загрязнения окружающей среды судами (МАРПОЛ 73/78) одобрила меры, которые

должны уменьшить загрязнение воздуха [3]. Правила определяют нормы содержания окиси азота в выхлопных газах судовых двигателей.

Одним из путей решений выявленной выше проблемы является использование современных способов очистки отработавших газов от вредных веществ, к которым можно отнести каталитические методы очистки отработавших газов судовых дизелей пористыми проницаемыми каталитическими материалами.

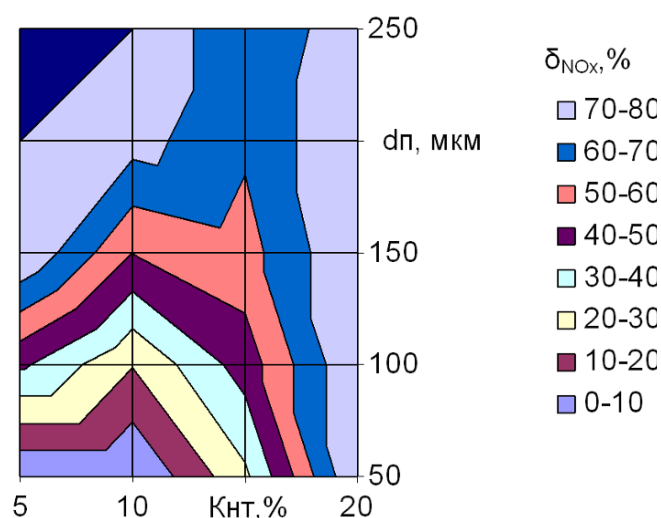
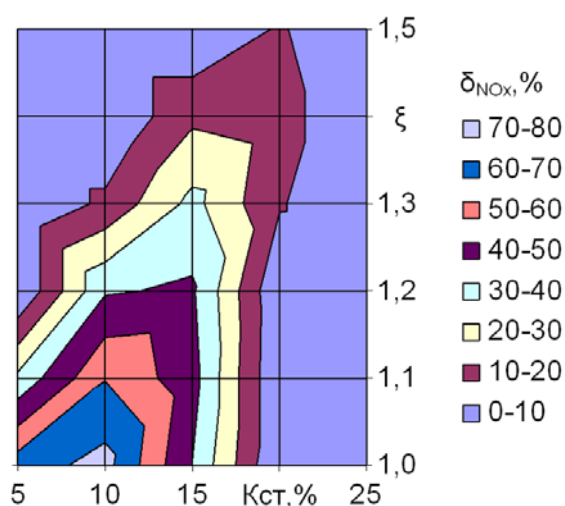
Для достижения требуемой степени очистки от вредных веществ отработавших газов судовых дизелей используемые каталитические материалы должны обладать соответствующими физическими и коррозионными свойствами и быть доступны по цене для сокращения общих затрат на систему очистки. С этой целью были проведены исследования по изучению возможности использования отходов металлообработки (окалины легированной стали) и технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), позволяющей получать пористые проницаемые СВС-каталитические материалы с необходимыми физическими характеристиками (диаметр пор, пористость, извилистость) и свойствами коррозионной стойкости (потеря массы в смеси кислот - $K_{СТ}$, низкотемпературной коррозии - $K_{НТ}$, газотермической коррозии - $K_{ГТ}$).

Состав шихты для получения пористого проницаемого СВС - каталитического материала содержал в определенном соотношении: базовый компонент - окалину легированной стали, а также компоненты, обеспечивающие эффективное протекание СВС (оксид хрома, никель, алюминий) и компоненты, обеспечивающие процесс катализа (иридий, родий, медь).

Принципиальным являлся вопрос определения оптимального состава шихты, обеспечивающего необходимую степень очистки от оксидов азота, физические характеристики и устойчивость пористого проницаемого СВС - каталитического материала к процессам коррозии.

Исследования по изучению степени очистки отработавших газов судовых дизелей от оксидов азота проводились на дизеле 6Ч 15/18 на номинальной мощности 189 кВт, при $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$.

По результатам предварительно проведенных исследований [4] в качестве изучаемого был выбран материал на основе окалины легированной стали с содержанием базового компонента в интервале 42,84-52,78% по масс., максимально позволяющий реализовывать основные физические и функциональные свойства пористого проницаемого каталитического материала [5].



Во многом функциональные свойства пористого проницаемого каталитического материала определяются физическими характеристиками и устойчивостью материала к процессу коррозии. В связи с этим в качестве исследуемых были выбраны следующие «пары»

свойств, максимально зависящие друг от друга: извилистость (ξ) и потеря массы в смеси кислот (K_{CT}); диаметра пор (d_n) и низкотемпературная коррозия (K_{HT}); пористость (Π) и газотермическая коррозия ($K_{ГТ}$) [6].

С целью изучено влияние на степень очистки отработавших газов от NO_x (δ_{NO_x}) выше приведенных физических характеристик и свойств коррозионной стойкости были приведены экспериментальные исследования, результаты которых представлены в виде зависимостей на рисунках 1-3.

В результате проведенных исследований было выявлено, что в рабочем интервале исследуемых концентраций окалина легированной стали (42,84...52,78% по массе) наблюдается увеличение извилистости от 1,02 до 1,35, уменьшение диаметра пор (с 177 до 112 мкм) и изменение пористости от 0,47 до 0,29. Изменение исследуемых физических характеристик отражается на показателях коррозионной стойкости следующим образом: потеря массы в смеси кислот исследуемого материала - увеличивается от 11,8 до 15,9%, потери массы в результате газотермической и низкотемпературной коррозии уменьшаются с 18,3 до 10,7 и с 13,1 до 11,3% соответственно. Комплекс исследуемых свойств пористого проницаемого СВС-каталитического материала значительным образом сказывается на степени чистки от оксидов азота.

По результатам проведенных исследований можно сделать следующий вывод: оптимальным по физическим характеристикам и свойствам является материал, с содержанием окалина легированной стали 47,82% по массе, который обеспечивает необходимую извилистость, диаметр пор и пористость, устойчивость материала к воздействию смеси кислот, низким температурам и газотермической коррозии, и при этом обеспечивает очистку отработавших газов судовых дизелей от оксидов азота на уровне 50%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Дугин, Г.С. Вопросы снижения токсичности отработавших газов автотранспорта / Г.С. Дугин // -Итоги науки и техники. -1990. -№15. -60 с.
- 2 Луканин, В.Н. Промышленно-транспортная экология / В.Н. Луканин, Ю.В. Трофименко; Под ред. В.Н. Луканина. -М.: Высшая школа, 2001. -273 с.
- 3 Международная Конвенция по предотвращению загрязнения с судов 1973 г., измененная протоколом 1978 г. к ней (МАРПОЛ 73/78)/книга III. -СПб.: ЗАО ЦИИМФ, 2000. -282 с.
- 4 Горлова, Н.Н. Применение сложных оксидов при очистке отработавших газов дизелей в каталитических нейтрализаторах / Н.Н. Горлова, А.Л. Новоселов, Г.В. Медведев, Д.С. Печенникова / Инженерные исследования и достижения - основа инновационного развития: материалы IV всероссийской научно-технической конференции 27-28 ноября 2014 г. - Рубцовск: Рубцовский индустриальный институт, 2014. -С. 412-415.
- 5 Пат. 2530187 Россия, МПК B22F 3/23. Шихта с родием и иридием для получения пористого проницаемого каталитического материала / Н.Н. Горлова, А.Л. Новоселов, Г.В. Медведев, Д.С. Печенникова, А.Л. Новоселов. ФГБОУ ВПО "Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова", АлтГТУ, ОИПС. №2013139974/02; Заявл. 27.08.2013; Опубл. 10.10.2014.
- 6 Горлова, Н.Н. Обеспечение коррозионной стойкости пористых проницаемых каталитических СВС-материалов оптимальным составом и его заданными функциональными

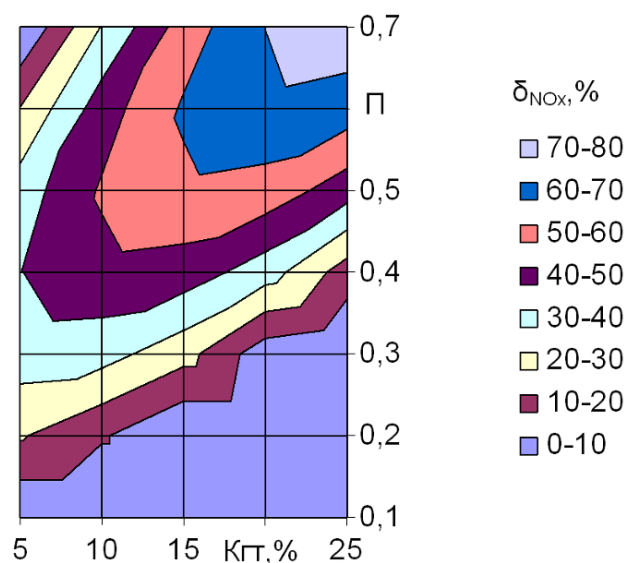


Рисунок 3 – Влияние на степень очистки (δ_{NO_x}) отработавших газов от NO_x пористости (Π) и газотермической коррозии ($K_{ГТ}$)

REFERENCES

- 1 G.S. Dugin. Issues of reducing the toxicity of motor vehicle exhaust gases [Voprosy snizheniya toksichnosti otrabotavshikh gazov avtotransporta]. *Achievements of science and technology [Itogi nauki i tekhniki]*. 1990. No. 15. 60 p.
- 2 V.N. Lukanin, Yu.V. Trofimenko. Industrial and transport ecology [Promyshlennno-transportnaya ekologiya]. Moscow. Vysshaya shkola Publ. 2001. 273 p.
- 3 International Convention for the Prevention of Pollution from Ships / MARPOL 73/78.
- 4 N.N. Gorlova, A.L. Novoselov, G.V. Medvedev, D.S. Pechennikova. The use of complex oxides in the purification of exhaust gases of diesel engines in catalytic converters [Primenenie slozhnykh oksidov pri oчитске otrabotavshikh gazov dizeley v kataliticheskikh neytralizatorakh]. *Engineering research and achievements as a foundation of innovation – driven development [Inzhenernyye issledovaniya i dostizheniya – osnova innovatsionnogo razvitiya]*. Rubtsovsk. Rubtsovsk Ind. Inst. Publ. 2014. pp. 412-415.
- 5 N.N. Gorlova, A.L. Novoselov, G.V. Medvedev, D.S. Pechennikova, A.L. Novoselov. Furnace mixture with rhodium and iridium to produce a porous permeable catalytic material [Shikhta s rodиеm i iridiem dlya polucheniya poristogo pronitsaemogo kataliticheskogo materiala].
- 6 N.N. Gorlova. Providing corrosion resistance of porous permeable catalytic SHS materials with an optimal composition and its specified functional properties [Obespechenie korrozionnoy stoykosti poristyykh pronitsaemykh kataliticheskikh SVS-materialov optimal'nym sostavom i ego zadannymi funktsion-

свойствами / Н.Н. Горлова // -Ползуновский альманах. -2017. - | al'nymi svoystvami]. *Polzunovskiy al'manakh*. 2017. No. 3/1. pp. №3/1. -С. 134-137. 134-137.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *отработавшие газы, судовые дизели, степень очистки, коррозионная стойкость, пористые проницаемые материалы, каталитические материалы*
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ: *Горлова Нина Николаевна, канд. техн. наук, доцент АлтГТУ*
ПОЧТОВЫЙ АДРЕС: *656038, г.Барнаул, пр.Ленина, 46, АлтГТУ*

ОЦЕНКА СТОЙКОСТИ ПЛАЗМЕННО НАПЫЛЁННЫХ ПОКРЫТИЙ К КОНТАКТНО-ИМПУЛЬСНОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»

А.О. Токарев, В.И. Кузьмин, Е.С. Федотова, Н.Е. Светлолов, В.А. Холопова, К.Ю. Яценко

ESTIMATION OF THE STABILITY OF PLASMA SURFACE COATINGS TO MECHANICAL IMPULSE EXPOSURE
 Siberian State University of Water Transport (SSUWT) 33, Schetinkina St., Novosibirsk, 630099, Russia
Aleksandr O. Tokarev (Holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Prof. of SSUWT)
Viktor I. Kuzmin (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of SSUWT)
Ekaterina S. Fedotova (Graduate student of SSUWT)
Nikita E. Svetlolibov (Student of SSUWT)
Viktoriya A. Kholopova (Student of SSUWT)
Konstantin Yu. Yatsenko (Student of SSUWT)

ABSTRACT: The article proposes a method of laboratory testing of wear-resistant coatings for contact fatigue. The laboratory stand for the test is an impact machine, which strikes the indenter placed in constant contact with the test specimen. The proposed technique of laboratory tests with impulse exposure of wear-resistant coating reproduces the working conditions of the blades of a high-speed propeller in shallow water.

Keywords: *laboratory testing, contact fatigue, mechanical impulse load, plasma spraying, wear-resistant coatings, powder alloys*

Предложен метод лабораторного испытания износостойких покрытий на контактную усталость.

Лабораторный стенд для испытания представляет собой копёр, который падающим грузом наносит удары по индентору, находящимся в постоянном контакте с испытуемым образцом. Предлагаемая методика лабораторных испытаний при контактно-импульсном нагружении износостойкого покрытия воспроизводит условия работы лопастей скоростного гребного винта на мелководье.

Совершенствование плазмотронов (генераторов термической плазмы) для плазменного напыления порошковых материалов позволяет формировать покрытия с высокими механическими свойствами [1]. В ИТПМ СО РАН совместно со СГУВТ разработан плазмотрон «ПНК-50», выполненный по линейной схеме с секционированной межэлектродной вставкой (МЭВ) и оснащённый узлом кольцевого ввода с газодинамической фокусировкой порошковых материалов. Межэлектродная вставка плазмотрона обеспечивает повышенное рабочее напряжение, хорошую осевую симметрию плазменной струи и минимальный уровень пульсаций её параметров. А наличие запатентованного узла кольцевого ввода [2] позволило в разы увеличить интенсивность межфазного обмена теплом и импульсом между напыляемым порошковым материалом и потоком термической плазмы. Всё это позволило не только напылять порошковыми сплавами покрытия с высокими механическими свойствами, но также в технологии нанесения покрытий отказаться от операции оплавления полученного слоя [3, 4].

Высокое качество покрытия позволяет рекомендовать его для упрочнения деталей, работающих в сложных эксплуатационных условиях. В частности, с целью повышения износостойкости гребных винтов быстроходных судов плазмотрон «ПНК-50» был использован для нанесения экспериментальных износостойких покрытий на лопасти гребного винта маломерного судна проекта «КС-101 Д» [5-7].

Опытный винт испытывался в течение навигации 2016 года в жёстких условиях мелководья рек Бия и Катунь, где он подвергался интенсивному коррозионному, кавитационному и гидроабразивному износу. В результате эксплуатационных испытаний гребной винт с износостойкими покрытиями после навигации внешне выглядит практически не изношенным (рисунк 1) и пригоден к эксплуатации в следующий навигационный период. Контрольный греб-

ной винт (без защитного покрытия) потребовал восстановительного ремонта во время навигации – приварка пластин к изношенным кромкам и наплавка изношенных поверхностей.

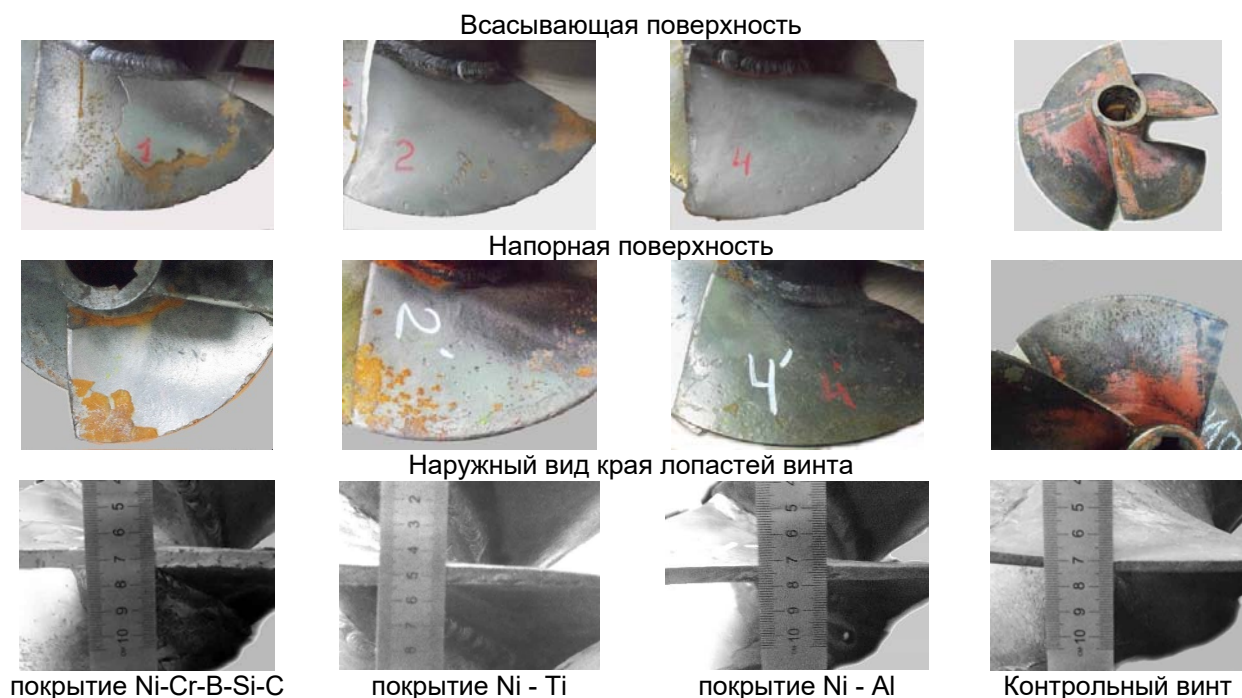


Рисунок 1 – Наружный вид гребных винтов быстроходных маломерных судов проекта «КС-101 Д» после навигации

На основании эксплуатационных испытаний сделан вывод о целесообразности использования плазменно-напылённых покрытий для защиты гребных винтов от коррозионного, гидроабразивного и кавитационного износов. Можно ожидать эффективности технологии плазменного напыления и при других видах изнашивания поверхности судовых деталей.

Испытания износостойкости упрочнённых изделий в условиях эксплуатации даёт наиболее достоверные результаты и основания для рекомендации технологии упрочнения в практику. Однако, такие испытания требуют сложных организационных мероприятий, значительных затрат на оборудование и большой труд квалифицированного технического персонала для выпуска экспериментального изделия. Поэтому целесообразно предварять изготовление экспериментальных деталей и их эксплуатационные испытания лабораторными исследованиями на стендах в условиях, возможно полно воспроизводящих рабочие режим и диапазон нагружения.

Гидроабразивное изнашивание вызывается воздействием твёрдых частиц, увлекаемых потоком жидкости. В результате возникает поверхностное усталостное изнашивание под действием больших удельных импульсных нагрузок, превышающих предел текучести металла, в результате чего образуются микропластические деформации сжатия поверхностных слоев. Микро- и макротрещины, образующиеся по мере работы, развиваются и приводят к усталостному отслаиванию частиц металла. На контактных поверхностях образуются одиночные и групповые осповидные углубления и впадины – питтинги. Глубина впадин зависит от свойств металла, удельных давлений и размера контактных поверхностей. После заметного проявления усталостного износа быстро наступает аварийное состояние.

Кроме гребных винтов контактной усталости подвержены многие детали механизмов, где поверхностные напряжения высоки благодаря сосредоточенным нагрузкам, циклически меняющимся в течение нормального режима эксплуатации [7, 8].

Большую роль в снижении долговечности деталей механизмов играют концентраторы напряжений. К поверхностным концентраторам напряжений, которые способствуют разрушению, относятся поверхностные поры, трещины, образовавшиеся при шлифовании, глубокие риски, царапины.

На контактную выносливость влияют механические свойства материалов деталей (твёрдость, предел прочности); величина, знак и распределение остаточных напряжений; мас-

штабный фактор и размеры контактной площадки, наличие или отсутствие смазки и т.д.

Схемы нагружения при испытаниях на контактную выносливость регламентирует рекомендации Р 50-54-30-87 «Расчёты и испытания на прочность. Методы испытаний на контактную усталость». В данной работе реализована схема испытаний на пульсирующий контакт.

Для сравнительных испытаний были выбраны порошковые сплавы, которые показали положительный эффект при упрочнении лопастей гребного винта теплохода «КС-101 Д» с водомётным двигателем, а именно: №1 – покрытие из самофлюсующегося сплава ПР-НХ16СР3 системы Ni-Cr-B-Si-C; №2 – интерметаллидное Ni-Ti покрытие; №3 ПН18Ю15 – интерметаллидное Ni-Al покрытие. Покрытия наносили на образцы в виде шайбы диаметром 30 мм и толщиной 8 мм. Материал шайбы - малоуглеродистая сталь 10 ГОСТ 1050. Нанесение покрытий произведено методом плазменного напыления порошковых сплавов толщиной 0,5-0,6 мм с помощью плазмотрона «ПНК-50».

Для воспроизведения жёстких условий эксплуатации гребных винтов, работающих при высоких оборотах в мелководных областях, был разработан стенд для повторно импульсного нагружения поверхности. Стенд представляет собой лабораторный копёр, производящий удары по индентору, находящемуся в постоянном контакте с испытуемым образцом. Масса свободно падающего груза была выбрана в ходе предварительных испытаний и составила $5 \pm 0,015$ кг. Высота сбрасывания груза – $55 \pm 0,25$ мм. При этом энергия импульса нагружения составила 3 Дж.

Лабораторный копёр (рисунок 2) имеет станину 1, отлитую совместно с двумя кронштейнами, через которые пропущен шток 2. На штоке свободно надет груз 3, поднимающийся посредством поворота улитки 4. На нижнем конце штока укреплен боек 5 со сменным индентором 6. Индентор бойка представляет собой шарик диаметром 10 мм, изготовленный из твёрдого сплава. При повороте улитки 4 груз поднимается на высоту 0,05 м, после чего срывается с улитки и свободно падает. Импульс усилия, создаваемый падающим грузом, передаётся через подъёмник с ручкой 8 на боёк. С помощью рукоятки подъёмника осуществляется подъем штока с грузом при установке и съеме узла крепления испытуемого образца 7 и при оценке полученных образцом повреждений.

Узел крепления образца показан на фото (рисунок 3). Испытуемый образец 5 при проведении испытаний устанавливается на опору 1, которая, в свою очередь, базируется на платформе копра цилиндрическим установочным хвостовиком. Положение образца в плане задаётся опорной призмой 2 с установочным винтом 3 и фиксируется зажимным винтом 4.

В качестве меры оценки повреждений поверхности, упрочнённой износостойким покрытием, выбран диаметр лунки, создаваемой индентором. Размер лунки измерялся с помощью лупы Бринелля. Моментом разрушения покрытия считали появление в нём трещин и отслоение.

При возникновении трещин и отслоении покрытия испытания прекращались.

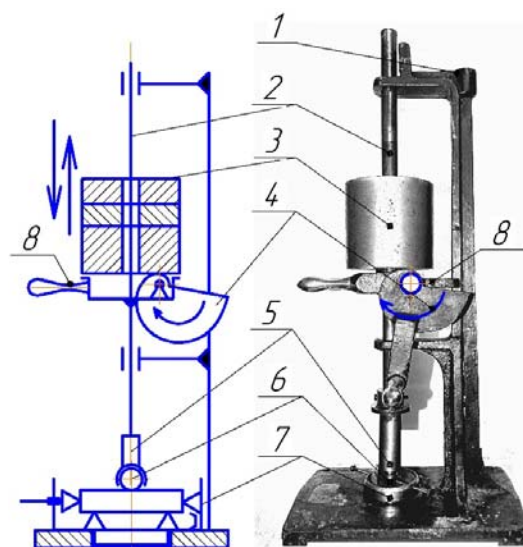


Рисунок 2 – Лабораторный копёр для испытаний образцов с износостойкими покрытиями на контактную усталость: 1-станина; 2-шток; 3-грузы; 4-улитка; 5-боёк; 6-сменный индентор; 7-узел крепления образца

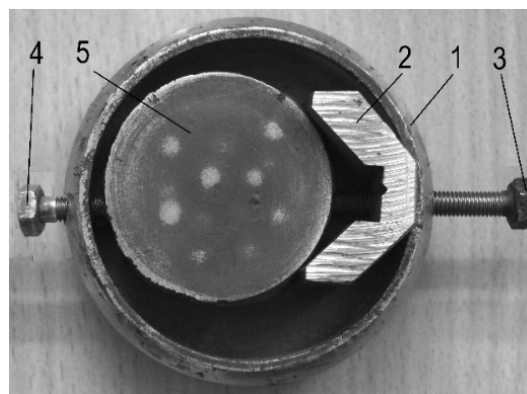


Рисунок 3 – Узел крепления образца: 1-опора; 2-призма; 3-регулируемый винт призмы; 4-зажимной винт; 5-образец

Вид повреждений, которые получили образцы после испытаний – идентичен повреждениям лопастей гребных винтов, полученных в течение навигации (рисунок 4). Отличие чистоты поверхности лопасти, в сравнении с поверхностью испытуемого образца, объясняется полирующим воздействием мелких частиц песка в потоке воды.

По результатам испытаний построены графики (рисунок 4) зависимости величины диаметра пятна контакта (мкм) от числа циклов нагружения N .

Из анализа экспериментальных данных следует, что покрытие, напылённое порошком сплава Ni3Al, обеспечивает наиболее надёжную защиту, чем другие исследованные материалы.

Примечательно, что после разрушения напылённого слоя Ni3Al на основном материале не остаётся заметных следов повреждения.

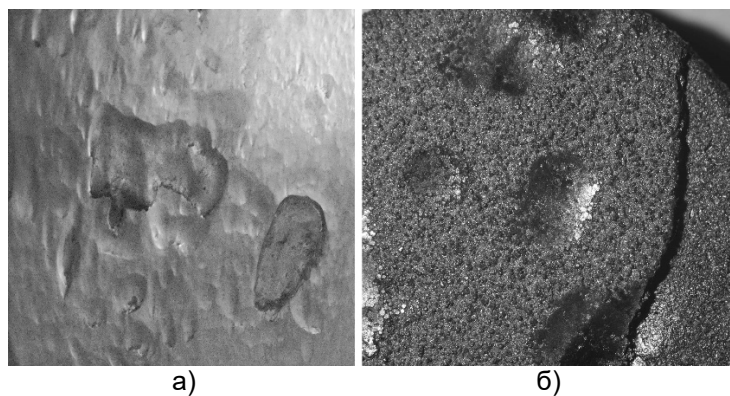
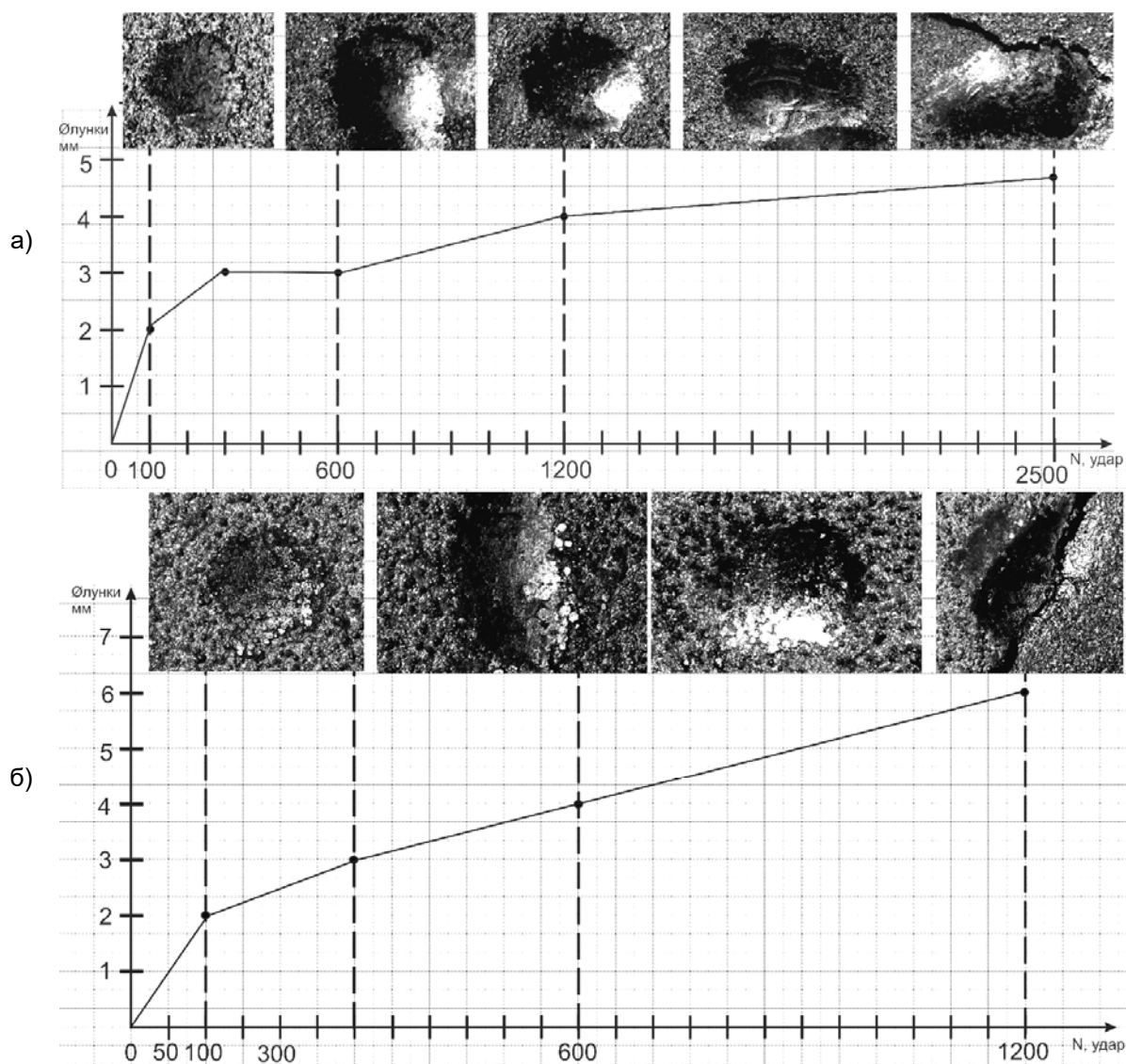


Рисунок 4 – Вид поверхности с износостойким покрытием ПР-НХ16СРЗ: а-лопасть после навигации; б-образец после многократного контактно-импульсного воздействия на лабораторном стенде



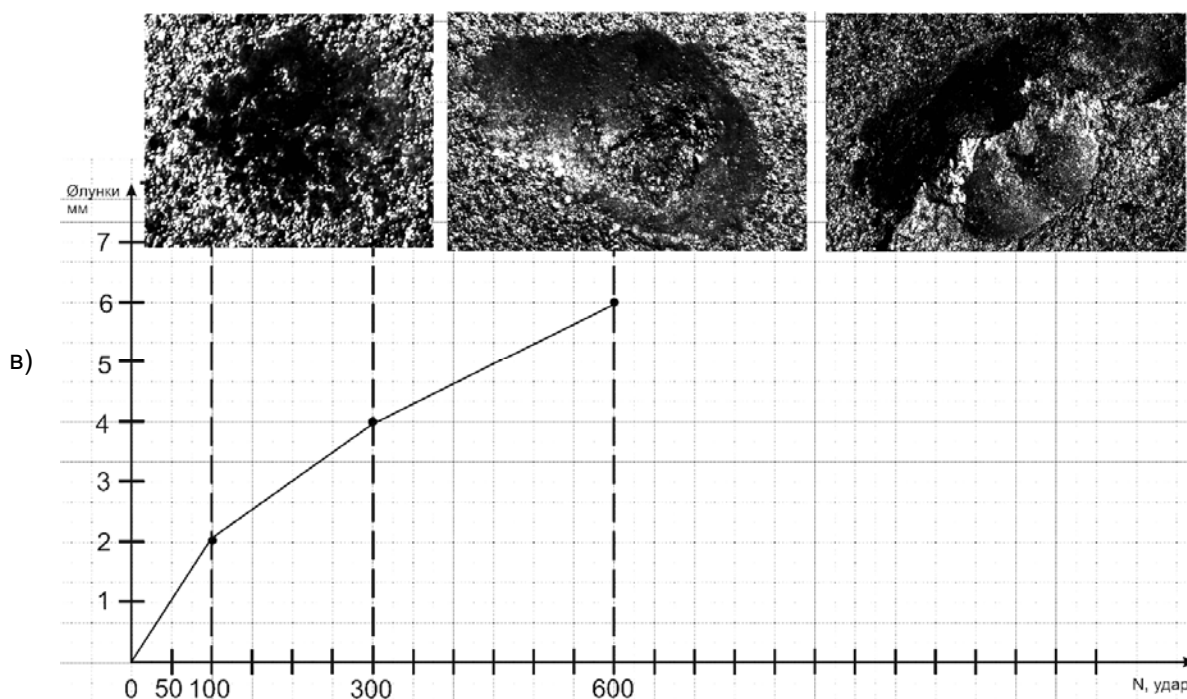


Рисунок 5 – Стойкость плазменно-напылённых покрытий к контактно-импульсному воздействию: а)– Ni_3Al ; б)– NiCrSiB ; в)– NiTi

Выводы:

– Разработанная методика стендовых испытаний при контактно-импульсном испытании износостойкого покрытия имитирует условия работы лопастей высокооборотного гребного винта на мелководе.

– Результаты испытаний износостойких покрытий на лабораторном копре совпадают с данными эксплуатационных испытаний лопастей гребного винта теплохода «КС-101 Д», проведённых в навигацию 2016 года на реках Бия и Катунь.

– Наиболее стойким к контактно-импульсному воздействию оказался также как и при эксплуатационных испытаниях, вариант защитного покрытия Ni-Al сплавом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Кузьмин, В.И. Плазменное напыление порошковых покрытий при газодинамической фокусировке дисперсной фазы / В.И. Кузьмин, Е.В. Каратаев, Д.В. Сергачев, Е.Е. Корниенко, Е.Ю. Лапушкина, А.О. Токарев // Актуальные проблемы в машиностроении = Actual problems in machine building: мат-лы 1 межд. науч.-практ. конф., Новосибирск, 26 марта 2014 г. -Новосибирск: Изд-во Новосиб. гос. техн. унив., 2014. -С. 482-488.

2 Патент РФ №2474983. Узел кольцевого ввода порошкового покрытия при плазменном напылении / В.И. Кузьмин, А.А. Михальченко, Е.В. Каратаев. Опубл. 10.02.2013. Бюл.4. -3 с.

3 Токарев, А.О. Повышение качества металлического порошкового покрытия при плазменном напылении с кольцевой инъекцией порошка / А.О. Токарев, В.И. Кузьмин, Я.К. Малыгина // -Актуальные проблемы в машиностроении. -2016. -№3. -С. 370-377.

4 Kuzmin, V. Equipment and technologies of air-plasma spraying of functional coatings / V. Kuzmin, I. Gulyaev, D. Sergachev, S. Vaschenko, E. Kornienko, A. Tokarev // MATEC Web of Conferences 129, 01052 (2017) ICMTMTE 2017

5 Кузьмин, В.И. Плазменное напыление покрытия на лопасти гребных винтов речных судов для защиты от кавитационного и гидроабразивного износа / В.И. Кузьмин, А.О. Токарев, С.В. Титов, Е.С. Федотова, С.В. Павлушкин // -Речной транспорт (XXI век). -2017. -№1(81). -С. 58-60.

6 Токарев, А.О. Защита от кавитационного и гидроабразивного изнашивания поверхности плазменно-напылёнными покрытиями / А.О. Токарев, В.И. Кузьмин, Е.С. Федотова, Я.К. Малыгина, А.И. Сохранич // -Науч.

REFERENCES

1 V.I. Kuz'min, E.V. Karataev, D.V. Sergachev, E.E. Kornienko, E.Yu. Lapushkina, A.O. Tokarev. Plasma spraying of powder coatings under gas-dynamic focus of a dispersed phase [Plazmennoe napylenie poroshkovykh pokrytiy pri gazodinamicheskoy fokusirovke dispersnoy fazy]. *Actual problems in machine building [Aktual'nye problemy v mashinostroenii]*. Novosibirsk. Novosib. St. Techn. Univ. Publ. 2014. pp. 482-488.

2 V.I. Kuz'min, A.A. Mikhal'chenko, E.V. Karataev. The circular feeder unit of a plasma electric arc torch [Uzel kol'tseвого ввода poroshkovogo materiala elektrodugovogo plazmotrona]. Patent of Russian Federation No.2474983. Vol. 4. 10 Feb. 2013. 3 p.

3 A.O. Tokarev, V.I. Kuz'min, Ya.K. Malygina. Improvement of the quality of the metal powder coating in plasma spraying with circular powder feeding [Povyshenie kachestva metallichesкого poroshkovogo pokrytiya pri plazmennom napylenii s kol'tsevoy inzhetsiesey poroshka]. *Actual problems in machine building [Aktual'nye problemy v mashinostroenii]*. 2016. No. 3. pp. 370-377.

4 V. Kuzmin, I. Gulyaev, D. Sergachev, S. Vaschenko, E. Kornienko, A. Tokarev Equipment and technologies of air-plasma spraying of functional coatings // MATEC Web of Conferences 129, 01052 (2017) ICMTMTE 2017.

5 V.I. Kuz'min, A.O. Tokarev, S.V. Titov, E.S. Fedotova, S.V. Pavlushkin. Providing coating via plasma spraying onto a blades of propellers of river vessels for protection against cavitation and hydro abrasive wear [Plazmennoe napylenie pokrytiya na lopasti grebnykh vintov rechnykh sudov dlya zashchity ot kavitatsionnogo i gidroabrazivnogo iznosa]. *River transport (XXI century) [Rechnoy transport (XXI vek)]*. 2017. No. 1(81). pp. 58-60.

6 A.O. Tokarev, V.I. Kuz'min, E.S. Fedotova, Ya.K. Malygina, A.I. Sokhranich. Protection of the surface against cavitation and hydro abrasive wear by the means of plasma-sprayed coatings [Zashchita ot kavi-

проб. транс. Сиб. и Дальн. Вост. -2017. -№1-2. -С. 118-125.

7 Токарев, А.О. Анализ причин и профилактика аварий деталей судовой техники / А.О. Токарев, С.Н. Иванчик, И.С. Иванчик. -Новосибирск: Изд-во Новосиб. гос. акад. водн. трансп., 2010. -250 с.

8 Мироненко, И.Г. Анализ причин повреждения судовых технических средств / И.Г. Мироненко, А.О. Токарев. -Новосибирск: Изд-во Сиб. гос. унив. водн. трансп., 2017. -224 с.

tatsionnogo i gidroabrazivnogo iznashivaniya poverkhnosti plazmennonapylennymi pokrytiyami]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*. 2017. No. 1-2. pp. 118-125.

7 A.O. Tokarev, S.N. Ivanchik, I.S. Ivanchik. Analysis of causes for ship facilities failure and accident prevention [Analiz prichin i profilaktika avariyn detaley sudovoy tekhniki]. Novosibirsk. Novosibirsk St. Acad. Water Transp. Publ. 2010. 250 p.

8 I.G. Mironenko, A.O. Tokarev. Analysis of causes for ship facilities failure [Analiz prichin povrezhdeniya sudovykh tekhnicheskikh sredstv]. Novosibirsk. Siberia St. Univ. Water Transp. Publ. 2017. 224 p.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: лабораторные испытания, контактная усталость, контактно-импульсные нагрузки, плазменное напыление, износостойкие покрытия, порошковые сплавы

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ: Токарев Александр Олегович, докт. техн. наук, профессор ФГБОУ ВО «СГУВТ»

Кузьмин Виктор Иванович, канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «СГУВТ»

Федотова Екатерина Сергеевна, аспирант ФГБОУ ВО «СГУВТ»

Светлолов Никита Евгеньевич, студент ФГБОУ ВО «СГУВТ»

Холопова Виктория Алексеевна, студент ФГБОУ ВО «СГУВТ»

Яценко Константин Юрьевич, студент ФГБОУ ВО «СГУВТ»

ПОЧТОВЫЙ АДРЕС: 630099, г.Новосибирск, ул.Щетинкина, 33, ФГБОУ ВО «СГУВТ»

ЗВУКОПОГЛОЩЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»

Новосибирский государственный педагогический университет

А.М. Барановский, С.В. Викулов, С.П. Глушков

SOUND ABSORPTION BY DIFFERENT MATERIALS

Siberian State University of Water Transport (SSUWT) 33, Schetinkina St., Novosibirsk, 630099, Russia

Novosibirsk State Pedagogical University (NSPU) 28, Vilyuyskaya St., Novosibirsk, 630126, Russia

Aleksandr M. Baranovsky (Holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Prof. of SSUWT)

Stanislav V. Vikulov (Holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Prof. of SSUWT)

Sergey P. Glushkov (Holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Prof. of NSPU)

ABSTRACT: The analysis of the measurement results showed that materials with complex porous structure have the greatest sound-absorbing ability, they can be recommended for noise reduction, both on ships and at production facilities. To obtain a material with a wide sound absorption spectrum, it is necessary to create a combined porous structure of the material.

Keywords: vibration, acoustic noise, building materials, noise absorbing properties

Анализ результатов измерений показал, что наибольшей звукопоглощающей способностью обладают материалы с развитой пористой структурой, их можно рекомендовать для снижения шума, как на судах, так и на производственных объектах. Для получения материала с широким спектром звукопоглощения требуется создание комбинированной пористой структуры материала.

В связи с ростом мощностей и быстроходности судовых машин и механизмов, интенсификацией производства проблема борьбы с производственным шумом, как на судах, так и различных предприятиях является одной из важнейших в настоящее время.

Высокий уровень шума не только вредно отражается на организме человека, но и косвенно влияет на увеличение аварийности машин и механизмов. В машинных отделениях уровень шума сейчас достигает 110-120 дБ, а в жилых и рабочих помещениях, расположенных вблизи работающих механизмов 80-95 дБ. Это прямое нарушение норм, превышающее порог физиологических ощущений громкости в 8-16 раз. Поэтому защита жилых и производственных помещений различного назначения от акустического шума и вибраций – одна из актуальных проблем современного производства. Одним из путей решения этой проблемы является обоснованный выбор комплекса традиционных и вновь создаваемых материалов с хорошими звукопоглощающими свойствами.

Целью настоящей работы является количественная оценка различных материалов по их звукопоглощающей способности.

Объекты и методы исследования. Экспериментальное определение показателя звуко-

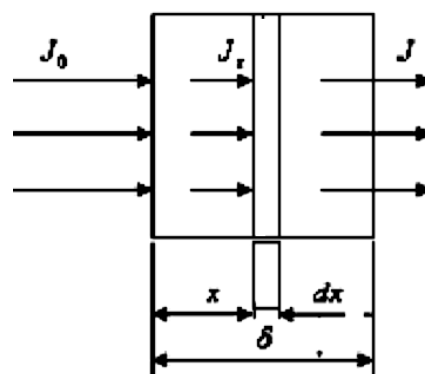


Рисунок 1 – Прохождение звука через пластину

поглощения различных материалов проводится акустическим методом. При прохождении звуковой волны сквозь плотную среду всегда имеет место частичное ее поглощение, обусловленное превращением механической энергии волны в теплоту и другие виды энергии.

Для количественной оценки процесса поглощения звуковой плоской продольной волны будем использовать понятие интенсивности звука, определяемой модулем вектора А.Н. Умова, среднее значение которого для данной точки пространства равно [1]

$$J = \frac{1}{2} \rho A^2 \omega^2 v, \quad (1)$$

где ρ — плотность вещества, кг/м³;

A — амплитуда волны, м;

ω — круговая частота, рад/с;

v — скорость волны, м/с.

Таким образом, интенсивность волны J (Вт/м²) пропорциональна плотности среды и скорости, квадратам круговой частоты и амплитуды волны.

Пусть плоская волна падает на пластинку толщиной δ поглощающего вещества перпендикулярно поверхности пластинки (рисунок 1). Мысленно выделим внутри пластины бесконечно тонкий слой dx , находящийся на расстоянии x от ее поверхности. Изменение интенсивности волны, происходящее в этом слое в связи с поглощением, пропорционально толщине dx слоя и интенсивности J_x падающей на слой волны

$$dJ_x = -\alpha J_x dx, \quad (2)$$

где α — коэффициент поглощения, характеризующий поглощательную способность вещества и независимый от толщины слоя. Знак минус указывает на ослабление звука в слое dx ($dJ_x < 0$).

Разделим переменные в уравнении (2) и проинтегрируем полученное выражение по всей толщине пластины

$$\int_{J_0}^J \frac{dJ_x}{J_x} = -\alpha \int_0^\delta dx.$$

Тогда

$$\ln\left(\frac{J}{J_0}\right) = -\alpha \delta.$$

После потенцирования получим

$$J = J_0 \exp(-\alpha \delta), \quad (3)$$

где J_0 — интенсивность волны, падающей на пластину;

J — интенсивность волны, прошедшей через пластину.

В оптике соотношение (3) называют законом Бугера-Ламберта. Из этого соотношения следует, что коэффициент поглощения

$$\alpha = \frac{\ln \frac{J_0}{J}}{\delta}. \quad (4)$$

Согласно выражению (1), интенсивность волны J пропорциональна квадрату амплитуды A^2 , тогда выражение (4) примет вид

$$\alpha = \frac{2 \ln \frac{A_0}{A}}{\delta}. \quad (5)$$

где A_0 — амплитуда волны, падающей на пластину;

A — амплитуда волны, прошедшей через пластину.

Коэффициент поглощения α измеряется в неп/см (см⁻¹); для пересчета в дБ/м значение α неп/см нужно умножить на 868,6 [2].

Для исследования было изготовлено шесть образцов одинакового диаметра (100 мм) и различной толщины из следующих материалов: №1-сосна; №2-осина; №3-береза; №4-пенобетон; №5-легкий бетон на торфяном наполнителе; №6-легкий бетон на керамзитовом гравии.

Измерения осуществлялись на экспериментальной установке, разработанной сотрудни-

ками кафедры «Теоретической и прикладной физики» ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный аграрный университет» [3]. Структурная схема установки показана на рисунке 2.

Бегущая волна, возбуждаемая переменным синусоидальным напряжением в 10 В от звукового генератора 1 на частоте 2000 Гц, излучается телефоном 2 в трубу 3 и отображается на экране в масштабе сетки осциллографа 4. Прошедшая образец 5 волна воспринимается микрофоном 6, сигнал которого отображается вторым лучом осциллографа 4.

Результаты исследований. Результаты измерений амплитуд и вычислений α приведены в таблице, а на рисунке 3 показана диаграмма, иллюстрирующая распределение величин α исследуемых материалов.

Анализ результатов таблицы показывает, что пористые искусственные строительные материалы (№4 – пенобетон; №5 – легкий бетон на торфяном наполнителе) более предпочтительны для звукоизоляции по сравнению с традиционными материалами из дерева.

Выводы:

– Разработана методика и экспериментальная установка для оценки звукопоглощающей способности различных конструкционных материалов.

– Анализ результатов измерений показал, что наибольшей звукопоглощающей способностью обладают материалы с развитой пористой структурой, их можно рекомендовать для снижения шума, как на судах, так и на производственных объектах, а также в жилищном строительстве.

– Для получения материала с широким спектром звукопоглощения требуется создание комбинированной пористой структуры материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Савельев, И.В. Курс общей физики: учеб. пособие / И.В. Савельев. -М.: Лань, 2007. -Т.1. -432 с.
- 2 Таблицы физических величин: справочник / Под ред. акад. И.К. Кикоина. -М.: Атомиздат. 1976. - 1008 с.
- 3 Викулов, С.В. Экспериментальные исследования по механике и молекулярной физике: метод. указания к лаб. раб. / С.В. Викулов, А.В. Корнилов. - Новосибирск: Новосиб. гос. агр. ун-в., 2000. -16 с.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

вибрация, акустический шум, строительные материалы, шумопоглощающие свойства

Барановский Александр Михайлович, докт. техн. наук, профессор ФГБОУ ВО «СГУВТ»
 Викулов Станислав Викторович, докт. техн. наук, профессор ФГБОУ ВО «СГУВТ»
 Глушков Сергей Павлович, докт. техн. наук, профессор НГПУ
 630099, г.Новосибирск, ул.Щетинкина, 33, ФГБОУ ВО «СГУВТ»
 630126, г.Новосибирск, ул.Виллюйская, 28, НГПУ

ПОЧТОВЫЙ АДРЕС:

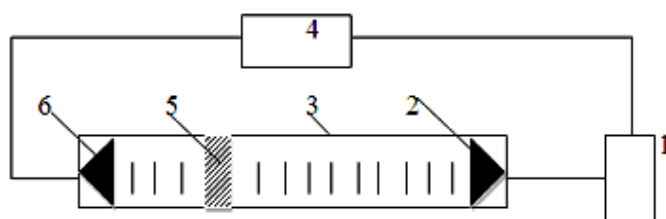


Рисунок 2 – Структурная схема установки: 1- звуковой генератор; 2-телефон; 3-прозрачная труба; 4-двухлучевой осциллограф; 5-образец; 6-микрофон

Таблица – Результаты сравнительного анализа α различных материалов

Показатель	Номер образца					
	1	2	3	4	5	6
δ , мм	38	30	32	30	22	28
A_0 , м	10	10	10	10	10	10
A , м	3,72	4,52	3,95	3,60	4,58	4,90
α , см^{-1}	0,52	0,53	0,58	0,68	0,71	0,51
α , дБ/м	453	460	504	587	618	446

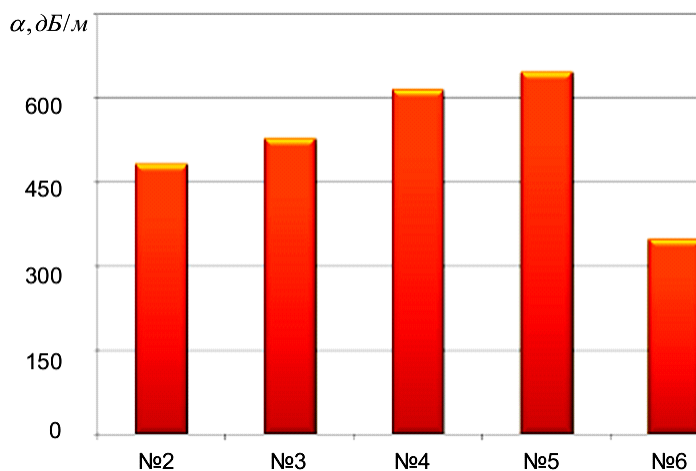


Рисунок 3 – Диаграмма α -образец

REFERENCES

- 1 I.V. Savel'ev. General Physics Course [Kurs obshchey fiziki]. Moscow. Lan' Publ. 2007. Vlo. 1. 432 p.
- 2 I.K. Kikoina. Tables of physical quantities: a reference book [Tablitsy fizicheskikh velichin: spravochnik]. Moscow. Atomizdat Publ. 1976. 1008 p.
- 3 S.V. Vikulov, A.V. Kornilov. Experimental studies in mechanics and molecular physics [Eksperimental'nye issledovaniya po mekhanike i molekulyarnoy fizike]. Novosibirsk. Novosibirsk St. Agrariar Univ. Publ. 2000. 16 p.

ВЛИЯНИЕ УТИЛИЗАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ КОГЕНЕРАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ С ПОРШНЕВЫМ ДВИГАТЕЛЕМ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ НА ЕЁ ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ

ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет»
(национальный исследовательский университет)
Филиал ФГКВОУ ВО «Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева» МО РФ в г.Омске
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»

В.С. Кукис, Е.А. Омельченко, О.В. Щербакова

EFFECT OF THE WASTE HEAT RECOVERY SYSTEM OF THE COGENERATION UNIT CONSISTING OF PISTON INTERNAL COMBUSTION ENGINE ON ITS ENVIRONMENTAL INDICATORS

South Ural State University (national research university) (FSAEIHE SUSU NRU) 76, Lenina Ave., Chelyabinsk, 454080, Russia

Military Educational Institution of Logistics named after General of the Army A.V.Khrulyov of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Omsk branch (Military Academy of Logistics, Omsk branch) 14th Military Town, Omsk, 644098, Russia

Siberian State University of Water Transport (SSUWT) 33, Schetinkina St., Novosibirsk, 630099, Russia

Vladimir S. Kukis (Holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Prof. of FSAEIHE SUSU NRU)

Evgenii A. Omel'chenko (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of Military Academy of Logistics, Omsk branch)

Olga V. Shcherbakova (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of SSUWT)

ABSTRACT: The article presents the results of an experiment on the effect of a cogeneration unit consisting of a diesel engine and a recycling two-stroke piston evaporator, on environmental indicators.

Keywords: diesel, cogeneration unit, waste heat recovery unit, exhaust gases, toxic substances

Приведены результаты эксперимента по влиянию когенерационной установки, включающей дизель и утилизационный двухтактный поршневой двигатель с внутренним объемным парообразованием, на экологические показатели.

В работе [1] приведены результаты экспериментального определения влияния утилизационной системы на изменение экологических показателей когенерационной установки, включающей дизель 8ЧН12/12 и двухтактный двигатель с внутренним объемным парообразованием.

В качестве таких показателей использовались не абсолютные величины вредных выбросов, а степени превращения вредных компонентов отработавших газов (ОГ) дизеля при их прохождении через утилизационный двигатель (УД)

$$\Delta \bar{C}_{\text{нл}} = \frac{C_i - C_i^{y0}}{C_i} = 1 - \frac{C_i^{y0}}{C_i} = 1 - \Delta C_{\text{нл}}, \quad (1)$$

где C_i, C_i^{y0} - концентрации i -го вредного компонента в ОГ до утилизационного двигателя и после него.

Из большого количества показателей, характеризующих эффект повышения экологической безопасности при работе когенерационной установки, состоящей из дизеля и утилизационного парового двигателя с внешним подводом теплоты и внутренним парообразованием и являющихся функциями отклика, при проведении экспериментов определялись: степень снижения дымности ОГ ($\Delta C_{\text{д}}$), степени снижения в них концентрации оксида углерода (ΔC_{CO}), углеводородов (ΔC_{CxHy}), оксидов азота (ΔC_{NOx}) и теплового «загрязнения» окружающей среды ($\Delta Q_{\text{ог}}$).

В ходе исследования устанавливалась зависимость указанных функций отклика от пяти факторов: температуры ОГ дизеля на входе в УД ($T_{\text{ог}}$), температуры стенок цилиндра УД ($T_{\text{ст}}$), давления впрыскивания воды в цилиндр УД ($p_{\text{вп}}$), продолжительности впрыскивания воды (φ) и момента начала впрыскивания воды в цилиндр УД (Θ).

В качестве математической модели использовались полиномиальные уравнения второго порядка [2]. Натуральные значения уровней факторов переводили в кодовые, по известным формулам [2]. Для определения коэффициентов уравнений был реализован экспериментальный план Хартли на гиперкубе [2].

В результате обработки данных эксперимента были найдены полиномиальные зависимости функций отклика от факторов, оказывающих влияние на характер процессов, происходящих в цилиндре УД

$$\Delta C_D = 0,42 - 0,13X_1 + 0,03X_2 + 0,15X_3 + 0,12X_4 - 0,01X_5 - 0,04X_1^2 + 0,0256X_1X_2 - 0,033X_1X_5 - 0,036X_2X_3 - 0,034X_2X_4 - 0,0345X_2X_5 - 0,026X_3X_4 + 0,028X_3X_5 - 0,027X_4X_5; \quad (2)$$

$$\Delta C_{CO} = 0,52 - 0,121X_1 + 0,013X_2 + 0,152X_3 + 0,2X_4 - 0,09X_5 - 0,01X_4^2; \quad (3)$$

$$\Delta C_{CH_4} = 0,45 + 0,051X_1 + 0,015X_2 + 0,1X_3 + 0,09X_4 - 0,091X_1X_2 + 0,008X_1X_3 - 0,014X_1X_4 + 0,011X_1X_5 + 0,012X_2X_3 + 0,009X_2X_4 - 0,008X_2X_5 + 0,014X_3X_4 - 0,008X_3X_5 + 0,009X_4X_5; \quad (4)$$

$$\Delta C_{NO_x} = 0,1835 - 0,1X_1 - 0,02X_2 + 0,12X_3 + 0,1X_4 + 0,01X_5 + 0,09X_4^2 + 0,0026X_1X_3 + 0,0047X_2X_3 - 0,034X_3X_5; \quad (5)$$

$$\Delta Q_{OG} = 0,71 - 0,09X_1 - 0,015X_2 + 0,0741X_3 + 0,1X_4 - 0,01X_5 - 0,0517X_1^2 - 0,0352X_1X_3 - 0,0419X_1X_4 + 0,0169X_1X_5 - 0,0106X_2X_3 - 0,0381X_3X_4 - 0,034X_3X_5. \quad (6)$$

Полученные уравнения позволяют оценить влияние каждого из рассмотренных факторов и их взаимодействия на выходные параметры.

В качественном плане это влияние определяется знаком перед соответствующим коэффициентом, а абсолютное значение коэффициента отражает силу влияния фактора. Вклад же того или иного фактора оценивался при переходе от нижнего к верхнему уровню (эффект фактора).

В таблице приведены эффекты влияния: температуры ОГ дизеля на входе в УД; температуры стенок внутрицилиндрового пространства УД; давления впрыскивания воды в цилиндр УД; продолжительности впрыскивания воды в цилиндр УД; момента начала впрыскивания воды в цилиндр УД на степени снижения дымности ОГ; концентрации в них оксида углерода, углеродов, оксидов азота и степени снижения теплового «загрязнения» окружающей среды.

Как видно из материалов таблицы, на снижение дымности ОГ наиболее существенно влияет давление впрыскивания воды в цилиндр УД.

Связано это с тем, что при неизменных прочих факторах повышение $p_{вп}$ приводит к увеличению количества поступающей воды, а именно она «связывает» и в последующем выносит из УД сажу. Это убедительно показал анализ конденсата.

Весьма сильно положительное влияние и продолжительности впрыскивания. Чем дольше продолжается подача воды в цилиндр УД, тем, при прочих одинаковых условиях, в нём будет больше воды с вытекающими отсюда очевидными последствиями.

Значительно эффект снижения дымности связан с температурой поступающих в УД ОГ дизеля. Но чем выше эта температура, тем менее ощутимо влияние утилизатора. Дело в том, что рост $T_{ог}$ в экспериментах осуществлялся на фоне сохранения неизменными величин остальных факторов, то есть количество поступавшей в цилиндр УД воды оставалось неизменным. Рост же температуры ОГ в дизеле происходил за счет увеличения количества сжигаемого в нем топлива при непрерывно уменьшающемся коэффициенте избытка воздуха и соответственном увеличении дымности ОГ. Таким образом, имел место рост дымности ОГ при неизменном нейтрализующем («очищающем») воздействии утилизатора.

Достаточно слабо влияет на снижение дымности ОГ температура стенок внутрицилиндрового пространства и совсем незначительно – момент начала впрыскивания воды, увеличение которых несколько уменьшает величину обсуждаемого показателя. Малый эффект

Таблица – Относительные эффекты влияния воздействующих факторов на степени снижения токсичности ОГ и теплового «загрязнения» атмосферы при выбросе ОГ из когенерационной установки

Выходные параметры	Эффект фактора, %				
	$T_{ог}$	$T_{ст}$	$p_{вп}$	φ	Θ
ΔC_D	-86,7	20,0	100,0	80,0	6,7
ΔC_{CO}	60,0	6,5	76,0	100,0	-4,5
ΔC_{NO_x}	-83,3	-16,7	100,0	83,3	8,3
$\Delta C_{\Sigma CO}$	-80,1	-15,1	100,0	84,0	—
$\Delta Q_{ог}$	-90,0	-15,7	74,1	100,0	10,0

воздействия двух последних факторов позволяет, на наш взгляд, не обсуждать природу их влияния на снижение дымности ОГ.

Наиболее существенное влияние на изменение содержания оксида углерода в ОГ при утилизации их теплоты оказывает продолжительность впрыскивания воды в цилиндр УД. Это понятно, так как чем дольше поступает вода (при прочих одинаковых условиях), тем её больше и тем продолжительней период взаимодействия окислителя (образовавшегося в результате парообразования) с СО.

Также весьма существенно положительное влияние роста давления впрыскивания и температуры ОГ. Первое обуславливает увеличение количества и более быстрое (в связи с мелким распыливанием воды) появление окислителя в цилиндре, а второе интенсифицирует протекание химических реакций «доокисления» СО до СО₂.

Слабо в обратном направлении проявляется воздействие момента начала подачи воды в цилиндр. Видимо, чем раньше попадает вода в цилиндр, тем при меньшей (в среднем) температуре протекают химические реакции, что несколько снижает эффект нейтрализации СО.

На степень снижения содержания в ОГ углеводородов при утилизации теплоты отработавших газов наибольшее влияние оказывает величина давления впрыскивания воды в цилиндр. Здесь в полной мере проявляется влияние её количества и мелкости распыливания. Несколько неожиданным оказалось слабое (положительное, что вполне понятно) действие продолжительности впрыскивания.

Достаточно существенна зависимость обсуждаемого показателя от температуры ОГ. Чем она выше, тем интенсивнее протекание химических реакций и, как следствие, заметнее эффект нейтрализации.

Природа процессов, обуславливающих влияние утилизации теплоты ОГ в УД на изменение содержания в них оксидов азота, лежит в химических реакциях образования кислот на базе этих оксидов. Анализ конденсата паров, выброшенных из УД, подтвердил это. В свете сказанного понятно, почему наиболее эффективным путем снижения содержания NO_x, как следует из полиномиального уравнения, оказалось повышение давления и увеличение продолжительности впрыскивания воды. Весьма заметно, но в обратном направлении, влияние температуры ОГ. Чем она выше, тем больше оксидов азота в ОГ, попадающих в УД. Нейтрализующие же возможности УД в случае сохранения постоянными остальных воздействующих факторов остаются неизменными. В результате с ростом $T_{ог}$ степень снижения содержания оксидов азота в результате утилизации теплоты ОГ уменьшается. Заметим, что рост температуры стенок внутрицилиндрового пространства также отрицательно влияет на эффективность нейтрализации обсуждаемого компонента, хотя влияние это не очень существенно.

Наиболее существенное влияние на снижение теплового «загрязнения» атмосферы оказывает увеличение продолжительности процесса впрыскивания, так как при этом обеспечивается попадание в цилиндр всё большего количества воды, на испарение которого затрачивается всё большее количество энергии отработавших газов, находящихся в цилиндре. Весьма заметно понижает рассматриваемый экологический показатель и повышение давления впрыскивания, потому что при прочих одинаковых условиях это также увеличивает количество попадающей в цилиндр воды. Незначительное положительное влияние на снижение теплового «загрязнения» оказывает, и увеличение момента начала подачи в цилиндр топлива.

Рост температуры ОГ, попадающих в УД, отрицательно влияет на изменение теплового «загрязнения» окружающей среды. Связано это с тем, что повышение $T_{ог}$ происходит на фоне постоянства остальных факторов (а значит при неизменности количества впрыскиваемой воды). Понятно, что негативным оказалось и повышение температуры стенок внутрицилиндрового пространства.

Доверительная вероятность при использовании полученной математической модели (которую составляет система полиномиальных уравнений (2)-(6)) для определения улучшения показателей экологической безопасности когенерационной установки, равна 0,95, так как гипотеза адекватности каждого уравнения принималась за факт только при условии выполнения неравенства $F_{расч} < F_{кр}$ именно для этого значения доверительной вероятности.

Подводя итог проведённому исследованию можно констатировать, что поршневые дви-

гатели с внутренним объёмным парообразованием могут эффективно использоваться для снижения вредных выбросов в атмосферу с ОГ когенерационных установок на базе поршневых двигателей внутреннего сгорания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Кукис, В.С. Утилизационный двигатель с внешним подводом теплоты / В.С. Кукис, А.Б. Смолин, Ю.Ф. Коваленко // -Повышение эффективности силовых установок колесных и гусеничных машин: науч. вестн. -2000. -Вып. 9. -С. 6-9.

2 Тихомиров, В.Б. Планирование и анализ эксперимента / В.Б. Тихомиров. -М.: Легкая индустрия, 1974. -264 с.

REFERENCES

1 V.S. Kukis, A.B. Smolin, Yu.F. Kovalenko. Waste heat recovery unit with external exhaust gases supply [Utilizatsionnyy dvigatel' s vneshnim podvodom teploty]. Increase of efficiency of power plants of wheeled and tracked vehicles [Nauchnyy vestnik Povyshenie effektivnosti silovykh ustanovok kolesnykh i gusenichnykh mashin]. Chelyabinsk. 2000. -Vol. 9. pp. 6-9.

2 V.B. Tikhomirov. Design and analysis of the experiment [Planirovanie i analiz eksperimenta]. Moscow. Legkaya industriya Publ. 1974. 264 p.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

дизель, когенерационная установка, утилизационный двигатель, отработавшие газы, вредные вещества

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Кукис Владимир Самойлович, докт. техн. наук, профессор ФГАОУ ВПО «ЮУрГУ (НИУ)»
Омельченко Евгений Алексеевич, канд. техн. наук, доцент Филиал ВА МТО в г.Омске
Щербакова Ольга Валерьевна, канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «СГУВТ»

ПОЧТОВЫЙ АДРЕС:

454080, г.Челябинск, пр.Ленина, 76, ФГАОУ ВПО «ЮУрГУ (НИУ)»
644098, г.Омск, 14-й Военный городок, Филиал ВА МТО в г.Омске
630099, г.Новосибирск, ул.Щетинкина, 33, ФГБОУ ВО «СГУВТ»

ОЦЕНКА ИНДИКАТОРНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ УТИЛИЗАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ КОГЕНЕРАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ НА БАЗЕ ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет»
(национальный исследовательский университет)

Филиал ФГКВООУ ВО «Военная академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева» МО РФ в г.Омске
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»

В.С. Кукис, Е.А. Омельченко, О.В. Щербакова

EVALUATION OF INDICATORS OF THE WASTE HEAT RECOVERY SYSTEM IN THE COGENERATION UNIT BASED ON INTERNAL COMBUSTION PISTON ENGINE

South Ural State University (national research university) (FSAEIHE SUSU NRU) 76, Lenina Ave., Chelyabinsk, 454080, Russia

Military Educational Institution of Logistics named after General of the Army A.V.Khrulyov of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Omsk branch (Military Academy of Logistics, Omsk branch) 14th Military Town, Omsk, 644098, Russia

Siberian State University of Water Transport (SSUWT) 33, Schetinkina St., Novosibirsk, 630099, Russia

Vladimir S. Kukis (Holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Prof. of FSAEIHE SUSU NRU)

Evgenii A. Omel'chenko (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of Military Academy of Logistics, Omsk branch)

Olga V. Shcherbakova (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of SSUWT)

ABSTRACT: The article presents the results of an experimental study of a cogeneration plant. The estimation of effect of performance characteristics on indicated power and indicated efficiency was carried out.

Keywords: cogeneration unit, diesel, waste heat recovery unit, indicated power, indicated performance

Приведены результаты экспериментального исследования когенерационной установки. Выполнена оценка влияния режимных и регулировочных характеристик на индикаторную мощность и индикаторный КПД.

Значительная часть выделяющейся при сгорании топлива в поршневых двигателях внутреннего сгорания (ДВС) теплоты «теряется» с уходящими из него отработавшими газами (ОГ) [1]. Это свидетельствует о необходимости искать пути использования указанных «потерь» путём их утилизации, т.е. путём создания когенерационных установок.

Одной из возможных систем утилизации энергии, выбрасываемой с ОГ поршневых ДВС, являются установки на базе утилизационного поршневого двигателя с внутренним объёмным парообразованием [2].

В настоящей работе приведены результаты экспериментальной оценки индикаторных показателей названной системы. Источником ОГ служил дизель 8ЧН12/12. Для утилизации их энергии использовался созданный на базе двухтактного пускового двигателя ПД 10У дви-

гатель с внутренним объёмным парообразованием. Принципиальная схема и техническая характеристика утилизационного двигателя (УД) приведена в работе [3].

На рисунках 1-5 показаны изменения индикаторных показателей УД в зависимости от температуры ОГ дизеля на входе в УД (t_{oe}), температуры стенок внутрицилиндрового пространства УД (t_{cm}), давления впрыскивания воды в цилиндр УД ($p_{впр}$), продолжительности впрыскивания воды в цилиндр и момента начала впрыскивания воды в цилиндр УД ($\varphi_{впр}$) в градусах поворота коленчатого вала (град ПКВ) относительно верхней мертвой точки (ВМТ) (θ).

Приведённые на рисунке 1а графики свидетельствуют о том, что повышение температуры ОГ во всем диапазоне изменения t_{oe} ведёт к повышению литровой индикаторной мощности УД ($N_{ил}$).

Наиболее сильное влияние отмечается на участке от 450 до 550 °С (здесь скорость увеличения мощности составляет в примерно 25 Вт/°С). При дальнейшем увеличении температуры ОГ степень её влияния на $N_{ил}$ уменьшается, и заметный рост мощности происходит до 650-700 °С.

В районе 850 °С литровая индикаторная мощность практически перестает расти (скорость её увеличения снижется практически до 0 Вт/°С). Установленный факт связан, очевидно, с тем, что при увеличении t_{oe} до 650-700 °С интенсивность испарения воды и перегрева образовавшегося пара непрерывно растёт, что обуславливает существенный рост давления рабочего тела сразу за ВМТ.

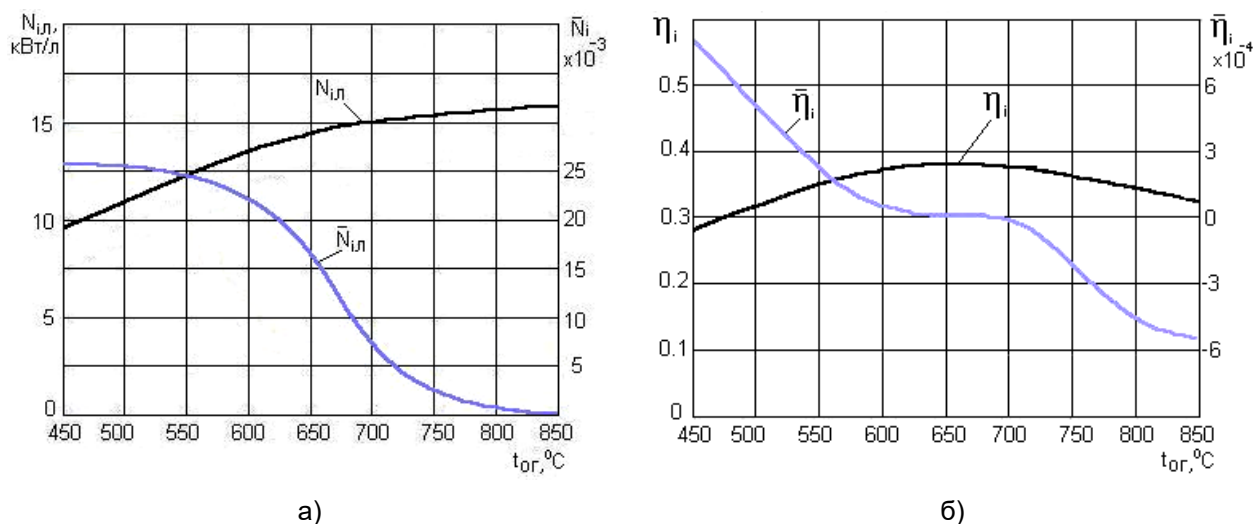


Рисунок 1 – Зависимость литровой индикаторной мощности (а) и индикаторного коэффициента полезного действия (КПД) (б) утилизационного двигателя от температуры ОГ дизеля ($t_{oe} = 300$ °С; $p_{впр} = 15$ МПа; $\varphi_{впр} = 35$ °ПКВ; $\theta = 30$ °ПКВ до ВМТ)

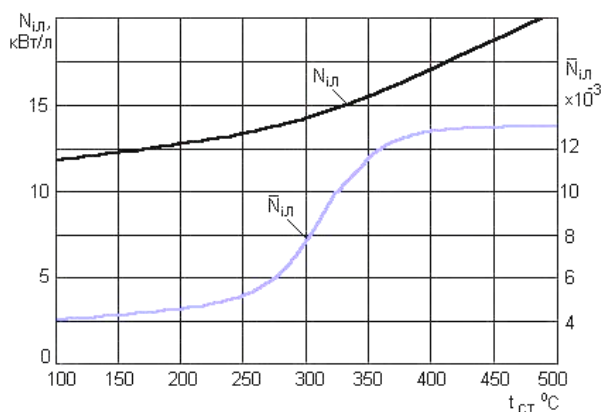
Растут газовые силы, действующие на поршень и, соответственно, тангенциальные силы на кривошипе, формирующие крутящий момент. Дальнейшее (свыше 650-700 °С) повышение температуры ОГ при данной цикловой подаче не приводит к дополнительной интенсивности испарения воды и перегрева образовавшегося пара, так как физико-термодинамические возможности этих процессов (во временном аспекте) оказываются исчерпанными.

Заметим, что литровая мощность имеет обобщающий характер и представляет интерес как инструмент принципиального возможного сравнения исследуемого УД с другими типами двигателей и системами утилизации.

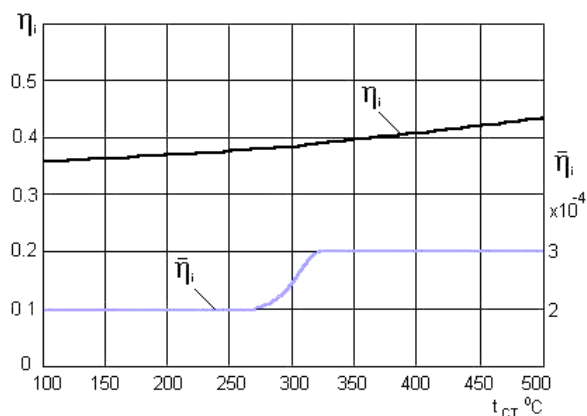
Индикаторный КПД достигает максимума примерно при $t_{oe} = 650$ °С (рисунок 1б). Затем на фоне роста температуры ОГ происходит снижение индикаторного КПД. Причина этого связана с тем, что именно после отмеченной выше температуры индикаторная мощность замедляет свой рост при дальнейшем увеличении t_{oe} . Количество же энергии, которое вносится в цилиндр с ОГ дизеля продолжает расти пропорционально температуре ОГ, в резуль-

тате чего КПД снижается.

Подогрев стенок цилиндра УД оказывает позитивное влияние на индикаторные показатели УД (рисунок 2).



а)



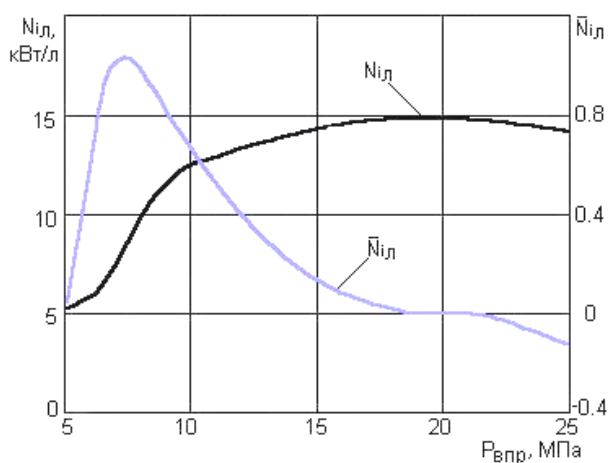
б)

Рисунок 2 – Зависимость (а) и индикаторного КПД (б) от температуры стенок внутрицилиндрового пространства ($t_{cm} = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$; $p_{впр} = 15\text{ МПа}$; $\varphi_{впр} = 35\text{ }^{\circ}\text{ПКВ}$; $\theta = 30\text{ }^{\circ}\text{ПКВ до ВМТ}$)

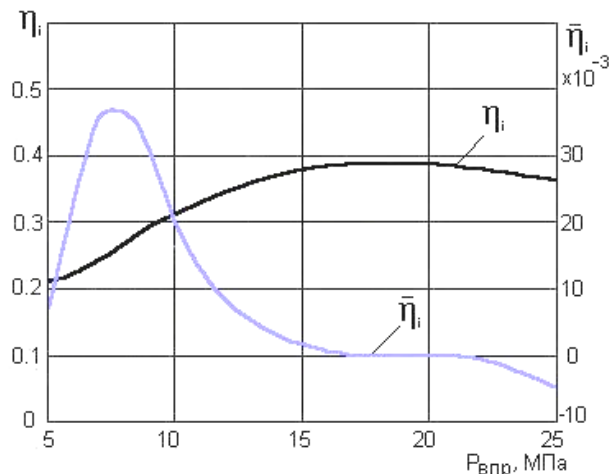
Однако ощутимый положительный эффект проявляется только после $t_{cm} > 150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Особенно ощутимо это влияние в диапазоне температур 250-350 $^{\circ}\text{C}$ – здесь скорость роста N_{in} резко увеличивается с 0,006 до 0,012 кВт/ $^{\circ}\text{C}$. Затем скорость увеличения литровой индикаторной мощности стабилизируется и продолжает монотонно расти.

Соответственно ведёт себя и индикаторный КПД.

Величина давления впрыскивания воды в цилиндр УД оказывает весьма существенное влияние на его индикаторные показатели (рисунок 3).



а)



б)

Рисунок 3 – Зависимость литровой индикаторной мощности (а) и индикаторного КПД (б) УД от давления впрыскивания воды в цилиндр ($t_{cm} = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$; $t_{cm} = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\varphi_{впр} = 35\text{ }^{\circ}\text{ПКВ}$; $\theta = 30\text{ }^{\circ}\text{ПКВ до ВМТ}$)

Они резко растут с увеличением $p_{впр}$ до 13-14 МПа. При давлении 17-18 МПа показатели достигают максимума, после чего начинается их некоторое снижение. Соответственно ведут себя и производные обсуждаемых показателей. Причина такого изменения в характере поведения индикаторных показателей, по-видимому, заключается в следующем.

Малое давление впрыскиваемой воды (и соответственно, цикловая подача) не обеспечивает существенного повышения давления рабочего тела в результате парообразования и перегрева пара. Когда давление впрыскивания достигает примерно 6-7 МПа, цикловой подачи воды становится достаточно для образования большого количества пара и, соответственно значительных давлений, которые достигаются сразу после ВМТ. Дальнейшее уве-

личение давления сопровождается непрерывным ростом индикаторных показателей, который, однако, сначала замедляется, а затем, после достижения максимума, приводит к некоторому снижению этих показателей. Очевидно энергии ОГ, находящихся в цилиндре, перестает хватать для одновременного интенсивного парообразования всей поступившей воды. Процесс образования пара «растягивается» на линию расширения. Давление в условиях всё увеличивающегося объёма даже при продолжающемся парообразовании уже не повышается, что и приводит к снижению индикаторных показателей.

Продолжительность впрыскивания воды в цилиндр УД самым существенным образом влияет на его индикаторные показатели (рисунок 4).

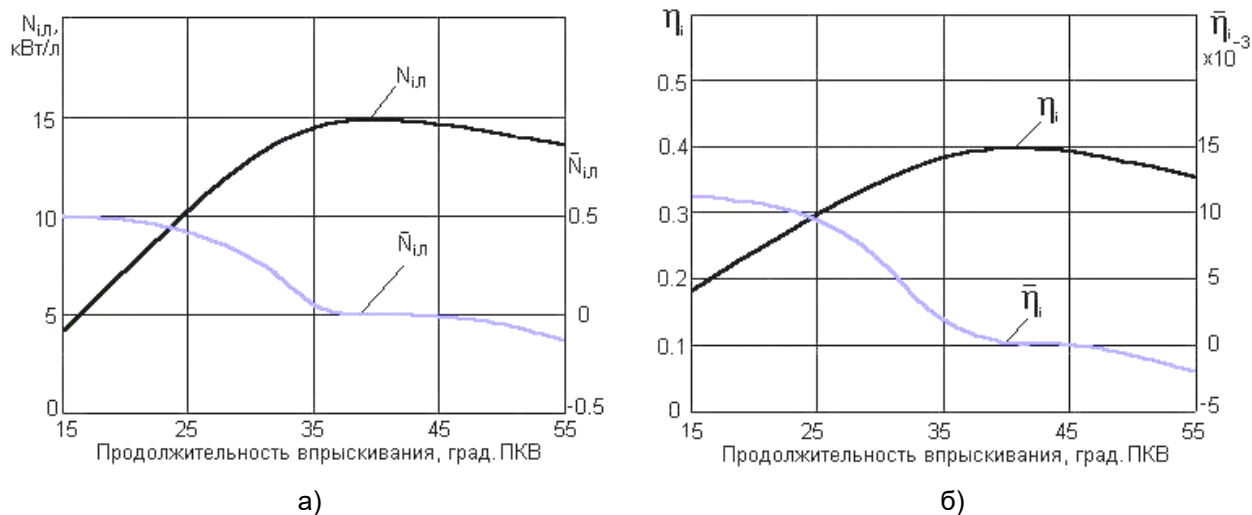


Рисунок 4 – Зависимость литровой индикаторной мощности (а) и индикаторного КПД (б) от продолжительности впрыскивания воды ($t_{cm} = 650$ °C; $t_{cm} = 300$ °C; $p_{впр} = 15$ МПа; $\theta = 30$ °ПКВ до ВМТ)

Графики свидетельствуют о том, что диапазон изменения индикаторных показателей в зависимости от продолжительности впрыскивания больше, чем в зависимости от любых других факторов.

Максимальная скорость нарастания индикаторных показателей наблюдается при изменении продолжительности впрыскивания в диапазоне от 15 до 25 °ПКВ. Для примерно литровой индикаторной мощности эта скорость составляет примерно 0,5 кВт/(л·°ПКВ), для индикаторного КПД – 0,01 на °ПКВ⁻¹. Далее эта величина резко снижается и при $\varphi = 40-44$ °ПКВ достигает минимума, а индикаторные показатели достигают наибольших значений.

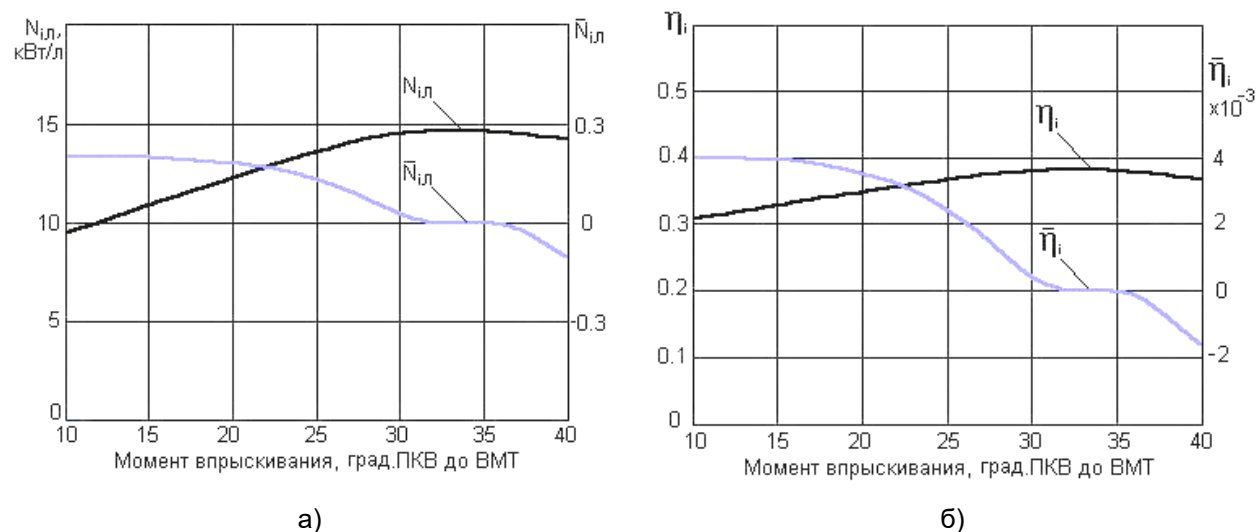


Рисунок 5 – Зависимость литровой индикаторной мощности (а) и индикаторного КПД (б) от момента впрыскивания воды в цилиндр ($t_{cm} = 650$ °C; $t_{cm} = 300$ °C; $p_{впр} = 15$ МПа; $\varphi_{впр} = 35$ °ПКВ)

Природа изменения индикаторных показателей в функции продолжительности впрыскивания идентична предыдущему случаю, в котором рассматривалось влияние давления впрыскивания, и поэтому не требует дополнительных комментариев.

Момент начала впрыскивания также оказывает заметное влияние на абсолютные значения индикаторных показателей (рисунок 5).

Увеличение θ примерно до 20 °ПКВ до ВМТ вызывает существенный стабильный рост индикаторных показателей. Затем этот рост замедляется и при 30-32 °ПКВ до ВМТ значения интересующих нас показателей достигают максимума.

Сказанное хорошо иллюстрируется поведением производных рассматриваемых показателей.

Незначительное дальнейшее снижение литровой индикаторной мощности и индикаторного КПД объясняется тем, что резкое нарастание давления в цилиндре начинает происходить ещё до прихода поршня в ВМТ. Оно противодействует сжатию и уменьшает работу, производимую при расширении.

Подводя итог проведённому исследованию можно констатировать, что поршневые двигатели с внутренним объёмным парообразованием могут эффективно использоваться для утилизации теплоты ОГ поршневых ДВС и заслуживают более широкого и всестороннего изучения с целью практического внедрения вначале на стационарных объектах, оборудованных ДВС (в частности, на ДВС – электростанциях) или судовых силовых установках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

- 1 Луканин, В.Н. Двигатели внутреннего сгорания. Теория рабочих процессов: учеб. для вузов / В.Н. Луканин и др. - М.: Высш. шк., 2005. -479 с.
- 2 Свидетельство на полезную модель RU 21068. Утилизационный двигатель с внешним подводом теплоты / В.С. Кукис, В.В. Руднев, М.Л. Хасанова и др. - Оpubл. 20.12.2001. Бюл. №35. -5 с.
- 3 Кукис, В.С. Утилизационный двигатель с внешним подводом теплоты / В.С. Кукис, А.Б. Смолин, Ю.Ф. Коваленко // Повышение эффективности силовых установок колесных и гусеничных машин: науч. вестн. - 2000. -Вып. 9. -С. 6-9.

- 1 V.N. Lukanin. Internal combustion engines. Theory of processes [Dvigateli vnutrennego sgoraniya. Teoriya rabochikh protsessov]. Moscow. Vysshaya shkola Publ. 2005. 479 p.
- 2 V.S. Kukis, V.V. Rudnev, M.L. Khasanova. Waste heat recovery unit with external exhaust gases supply [Utilizatsionnyy dvigatel' s vneshnim podvodom teploty]. Certificate of utility model RU 21068. 20 Dec. 2001. Vol. 35. 5 p.
- 3 V.S. Kukis, A.B. Smolin, Yu.F. Kovalenko. Waste heat recovery unit with external exhaust gases supply [Utilizatsionnyy dvigatel' s vneshnim podvodom teploty]. Increase of efficiency of power plants of wheeled and tracked vehicles [Povyshenie effektivnosti silovykh ustanovok kolesnykh i gusenichnykh mashin]. 2000. Vol. 9. pp. 6-9.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

когенерационная установка, дизель, утилизационный двигатель, индикаторная мощность, индикаторный КПД

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Кукис Владимир Самойлович, докт. техн. наук, профессор ФГАОУ ВПО «ЮУрГУ (НИУ)»
Омельченко Евгений Алексеевич, канд. техн. наук, доцент Филиал ВА МТО в г.Омске
Щербакова Ольга Валерьевна, канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «СГУВТ»

ПОЧТОВЫЙ АДРЕС:

454080, г.Челябинск, пр.Ленина, 76, ФГАОУ ВПО «ЮУрГУ (НИУ)»
644098, г.Омск, 14-й Военный городок, Филиал ВА МТО в г.Омске
630099, г.Новосибирск, ул.Щетинкина, 33, ФГБОУ ВО «СГУВТ»

АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА УПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПЕНСАТОРА СИЛ ИНЕРЦИИ

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»

Ю.И. Ришко, А.М. Барановский, В.В. Коновалов

TESTING OF THE METHOD OF CALCULATING THE ELASTIC PROPERTIES OF THE INERTIA DAMPER

Siberian State University of Water Transport (SSUWT) 33, Schetinkina St., Novosibirsk, 630099, Russia
Yuriy I. Rishko (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of SSUWT)

Aleksandr M. Baranovsky (Holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Prof. of, SSUWT)

Valeriy V. Konovalov (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of SSUWT)

ABSTRACT: The article presents description of inertial compensator, which allows reducing vibrations transmitted through the elastic elements of the vibration-isolated suspension, in a wide frequency range. Authors show a method of theoretical calculation of the mathematical model and experimental prove of given calculation of natural frequencies of inertia damper in the vibration-isolating suspension.

Keywords: inertia damper, vibration isolator, vibration-isolating suspension, stiffness at a point

Выполнено описание и обоснование модели компенсатора сил инерции, позволяющего снижать вибрации, передаваемые через упругие элементы виброизолирующей подвески, в широком диапазоне частот. Приводится метод теоретического расчета математической модели и экспериментального

подтверждения такого расчета собственных частот компенсатора сил инерции виброизолирующей подвески.

Роль сил инерции упругих элементов виброизолирующих подвесок энергетических установок при передаче вибрации рассматривалось в работах [1, 2]. Одним из направлений для решения проблемы было предложено компенсировать силы инерции упругих элементов при помощи специальных устройств – компенсаторов сил инерции (КСИ) [3]. При этом была выявлена проблема рас-согласования вынуждающих и компенсирующих сил из-за резонанса собственных колебаний упругого элемента. В работах [4, 5] предложена гипотеза, согласно которой необходимым условием является равенство собственных частот 1-го тона упругого элемента и рычагов КСИ. Практическое решение такой задачи должно опираться на надежную методику расчета собственных частот элементов КСИ, одну из которых постараемся получить ниже.

Рассмотрим модель рычага компенсатора сил инерции (рисунок 1).

При колебаниях такого элемента, в случае значительной величины массы на консоли, можно представить следующую расчетную схему (рисунок 2). Прогиб данной балки определится известным выражением (9), приведенным ниже. Для любой точки такой изогнутой балки достаточно задать одно из перемещений, остальные определяются через определенный коэффициент равный функции прогиба от абсциссы.

Предположим следующую аналогию. Рассмотрим движение произвольной точки балки (допустим точка N), которое произойдет при свободных колебаниях балки по данной форме. Поскольку частота собственных колебаний является общей для любой точки балки место выбора ее положения не должно влиять на результат. В этой точке существует некоторая приведенная масса m^{np} , которая зависит от геометрических размеров и материала компенсатора. Перемещение этой точки определится согласно принятой форме изгиба балки, прямо пропорционально приложенной силе. Следовательно, в этой точке будет существовать определенная жесткость C_N , зависящая от ее расположения по длине.

Учитывая выше сказанное, можно расчетную схему (рисунок 2) свести к элементарной схеме расчета колебаний точечной массы на невесомом упругом элементе (рисунок 3), то есть получить так называемую «динамическую модель», обладающую аналогичными динамическими свойствами.

Для данной схемы собственная частота рассчитывается по известной формуле

$$\lambda = \sqrt{\frac{C_N}{m^{np}}}, \quad (1)$$

где C_N – жесткость динамической модели, Н/м;

m^{np} – приведенная масса модели, кг.

Приведенная масса системы, исходя из расчетной схемы, будет равна

$$m^{np} = m + m_6^{np}, \quad (2)$$

где m_6^{np} – приведенная масса балки, кг;

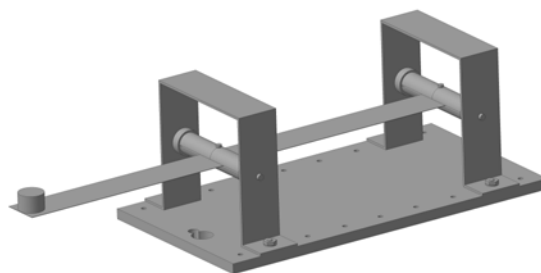


Рисунок 1 – Модель рычага компенсатора сил инерции

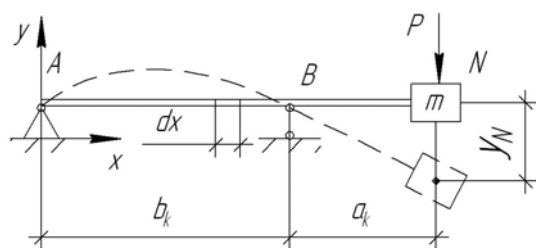


Рисунок 2 – Расчетная схема собственной частоты КСИ

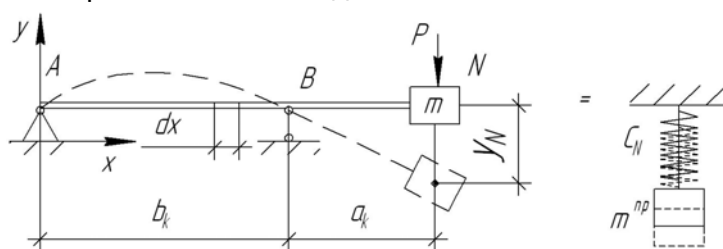


Рисунок 3 – Динамическая модель рычага компенсатора

m – сосредоточенная масса в точке приложения силы, кг.

Жесткость системы определяется как отношение приложенной силы к деформации (перемещению), вызванной этой силой. Перемещение точки N, согласно [6]

$$y_N = f(P). \quad (3)$$

Тогда

$$C_N = \frac{P}{y_N}. \quad (4)$$

Приведенную массу балки в точке N можно определить из равенства кинетической энергии прогиба балки при собственных колебаниях и кинетической энергии перемещения приведенной динамической модели

$$T_{m_6^{np}} = T_6; \quad (5)$$

$$\frac{m_6^{np} \cdot V_N^2}{2} = \sum m_x \frac{V_x^2(x)}{2} \Delta x \quad (6)$$

где V_N – скорость точки N, м/с;

$V_x(x)$ – скорость элементарного участка балки, м/с.

Проинтегрируем по всей длине балки x

$$m_6^{np} = \int_0^x m_x \cdot \frac{y(x)^2}{y_N^2} dx, \quad (7)$$

где $y(x)$ – изменение прогиба по длине балки, м;

m_x – масса, распределенная по длине балки, кг/м

$$m_x = \frac{S}{b_k + a_k} \rho, \quad (8)$$

S – площадь сечения балки, м²;

ρ – плотность материала балки, кг/м³.

Согласно расчетной схеме, перемещение в точке N будет равно прогибу [6]

$$y_N = -\frac{Pa_k}{3EJ}(a_k + b_k), \quad (9)$$

где a_k – длина консоли балки, м;

b_k – расстояние между опорами (точка A и точка B), м;

E – модуль упругости, зависящий от материала балки, МПа;

J – момент инерции, зависящий от сечения балки, м⁴.

Перемещение $y(x)$ разделим на два участка AB – $y_{AB}(x)$ и BN – $y_{BN}(x)$.

Согласно [6], перемещение на этих участках определяется как

$$y_{AB}(x) = \frac{Pa_k b_k^2}{6EJ} \left(\frac{x}{b_k} - \frac{x^3}{b_k^3} \right); \quad (10)$$

$$y_{BN}(x) = \frac{Pa_k b_k^2}{6EJ} \left(\frac{x}{b_k} - \frac{x^3}{b_k^3} + \frac{(a_k + b_k)(x - b_k)^3}{a_k b_k^3} \right). \quad (11)$$

Соответственно, приведенная масса балки будет складываться из двух интегралов

$$m_6^{np} = \int_0^{b_k} m_x \frac{y_{AB}(x)^2}{y_N^2} dx + \int_{b_k}^{b_k+a_k} m_x \frac{y_{BN}(x)^2}{y_N^2} dx. \quad (12)$$

После подстановки и преобразований получим

$$m_6^{np} = \frac{m_x}{4} \left(\int_0^{b_k} \left[-\frac{b_k^2}{(a_k + b_k)} \left(\frac{x}{b_k} - \frac{x^3}{b_k^3} \right) \right]^2 dx + \int_{b_k}^{b_k+a_k} \left[-\frac{b_k^2}{(a_k + b_k)} \left(\frac{x}{b_k} - \frac{x^3}{b_k^3} + \frac{(a_k + b_k)(x - b_k)^3}{a_k b_k^3} \right) \right]^2 dx \right). \quad (13)$$

С целью подтверждения адекватности предложенного метода расчета проведем сравнительный анализ данных, полученных теоретическим расчетом, и результатов экспериментальных измерений собственных колебаний для нескольких образцов, имитирующих рычаг КСИ (рисунок 4).

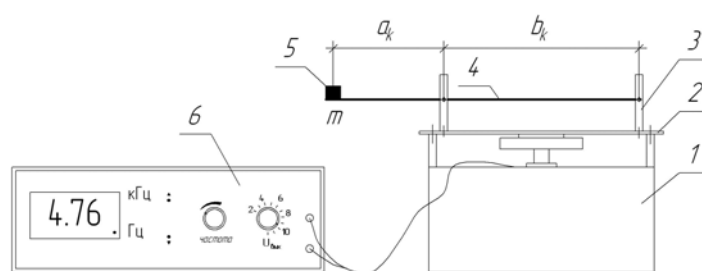


Рисунок 4 – Рычаги КСИ и корректирующие массы

Общий вид и принципиальная схема экспериментальной установки приведены на рисунке 5.



а)



б)

Рисунок 5 – Экспериментальная установка: а)-общий вид; б)-принципиальная схема; 1-вибростенд; 2-вибростол; 3-скоба крепления пластины; 4-исследуемая пластина; 5-сосредоточенная масса; 6-генератор сигналов

Расчет частот собственных колебаний (ЧСК) для представленных образцов проведен по формулам (1)-(13) в физико-математическом пакете MathCAD. Эксперимент проводился в лаборатории кафедры ТММ и ДМ ФГБОУ ВО «СГУВТ» на установке «Защита от вибрации БЖ4м», позволяющей обеспечить как воздействие вибрации на объект, так и измерения параметров вибрации. Собственные частоты определялись визуально по амплитуде колебаний модели. Исследуемые образцы пластин крепились на специально сконструированных опорах. Результаты теоретических расчетов и экспериментальных измерений частот собственных колебаний 1-го тона образцов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Данные теоретических расчетов и экспериментальных измерений исследуемых образцов

Параметры образцов и результаты расчетов	Номер исследуемого образца			
	1	2	3	4
Ширина пластины, мм	18	17,87	19	19
Высота пластины, мм	0,37	0,38	0,76	0,76
Расстояние между опорами, мм	140	140	140	140
Длина консоли, мм	115	140	145	215
Сосредоточенная масса, г	14,8	9,74	50	50
Приведенная масса балки, г	0,0914	0,148	0,341	0,485
Расчетная ЧСК 1-го тона, Гц	4,795	4,78	5,92	3,56
Экспериментальная ЧСК 1-го тона, Гц	4,780	4,65	5,90	3,62

Таким образом, проведя сравнительный анализ полученных данных теоретических расчетов и результатов эксперимента, можно сделать вывод, что предложенный метод позволяет получить достаточно хорошую сходимость. Основной проблемой применения предложенного метода является точное определение формы собственных колебаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1 Зуев, А.К. Высокоэффективная виброизо-

1 A.K. Zuev, O.N. Lebedev. Highly efficient vibration insulation of ship

ления судового энергетического оборудования / А.К. Зуев, О.Н. Лебедев. -Новосибирск.: Новосиб. гос. акад. водн. трансп., 1997. -119 с.

2 Зуев, А.К. Анализ действия сил инерции звеньев, расположенных между вибрирующим и защищаемым объектами / А.К. Зуев, О.Н. Лебедев, Ю.И. Ришко // Проблемы интеграции науки и образования: опыт и перспективы: мат.-лы научн. конф. 02-05 апр. 1997 г. -Новосибирск: Новосиб. гос. акад. водн. трансп., 1997. -С. 217-220.

3 Ришко, Ю.И. Двухосный компенсатор сил инерции / Ю.И. Ришко, А.А. Зуев // -Сибирский научный вестник. -1999. -Вып. III. -С. 35-40.

4 Ришко, Ю.И. Эффективность компенсатора сил инерции / Ю.И. Ришко // Кинематика и динамика механизмов: сб. науч. тр. -Новосибирск: Новосибир. гос. акад. водн. трансп., 2000. -С. 108-115.

5 Зуев, А.К. Снижение инерционной составляющей сил, вызывающих вибрацию - актуальность проблемы, пути решения / Ю.И. Ришко, Л.О. Соловьева // -Науч. пробл. трансп. Сиб. и Дальн. Вост. -2009. -№1. -С. 200-203.

6 Справочник по сопротивлению материалов / Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев. -Киев.: Наукова думка, 1988. -736 с.

power equipment [Vysokoeffektivnaya vibroizolyatsiya sudovogo energeticheskogo oborudovaniya]. Novosibirsk. Novosibirsk St. Acad. of Water Transp. Publ. 1997. 119 p.

2 A.K. Zuev, O.N. Lebedev, Yu.I. Rishko. Analysis of the inertial forces action of links located between vibrating and protected objects [Analiz deystviya sil inertsiy zven'ev, raspolozhennykh mezhdu vibriruyushchim i zashchishchaemym ob'ektami]. *Problems of the integration of science and education [Problemy integratsii nauki i obrazovaniya: opyt i perspektivy]*: experience and prospects: scientific conference materials dated 02-05 April, 1997. Novosibirsk. Novosibirsk St. Acad. of Water Transp. Publ. 1997. pp. 217-220.

3 Yu.I. Rishko, A.A. Zuev. Biaxial compensator of inertia forces [Dvukhosnyy kompensator sil inertsiy]. *Siberian Scientific Bulletin [Sibirskiy nauchnyy vestnik]*. 1999. No. III. pp. 35-40.

4 Yu.I. Rishko. Efficiency of the inertia compensator [Effektivnost' kompensatora sil inertsiy]. *Kinematics and dynamics of mechanisms [Kinematika i dinamika mekhanizmov]*: digest of scientific works. Novosibirsk. Novosibirsk St. Acad. of Water Transp. Publ. 2000. pp. 108-115.

5 Yu.I. Rishko, L.O. Solov'eva. Reducing the inertial component of the forces that cause vibration - the actuality of the problem, solutions [Snizhenie inertsiionnoy sostavlyayushchey sil, vyzyvayushchikh vibratsiyu -aktual'nost' problemy, puti resheniya]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*. 2009. No. 1. pp. 200-203.

6 G.S. Pisarenko, A.P. Yakovlev. Mechanics of Materials Handbook [Spravochnik po soprotivleniyu materialov]. Kiev. Naukova dumka Publ. 1988. 736 p.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: компенсатор сил инерции, виброизолятор, виброизолирующая подвеска, жесткость механизма в точке

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ: Ришко Юрий Иванович, канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «СГУВТ»
Барановский Александр Михайлович, докт. техн. наук, профессор ФГБОУ ВО «СГУВТ»
Коновалов Валерий Владимирович, канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «СГУВТ»

ПОЧТОВЫЙ АДРЕС: 630099, г.Новосибирск, ул.Щетинкина, 33, ФГБОУ ВО «СГУВТ»

СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ ВИБРАЦИИ СУДОВОГО ДВИГАТЕЛЯ

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный аграрный университет»
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»

С.Н. Бурков, А.М. Ефремов

METHODS OF REDUCING VIBRATION OF MARINE ENGINES

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Novosibirsk State Agrarian University" (FSBEI HE Novosibirsk SAU) 160, Dobrolubova St., Novosibirsk, 630039, Russia
Siberian State University of Water Transport (SSUWT) 33, Schetinkina St., Novosibirsk, 630099, Russia
Sergei N. Burkov (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of FSBEI HE Novosibirsk SAU)
Anatolii M. Efremov (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of SSUWT)

ABSTRACT: The article considers various ways of installing the marine engine on dampers as well as the causes of vibration on the ship.

Keywords: vibration, marine power plant, reducing, damper

Рассмотрены различные способы установки двигателя на амортизаторы и рассмотрены причины возникновения вибрации на судне.

Как известно, главная причина вибрации двигателя – неуравновешенность движущихся возвратно-поступательных масс двигателя – поршней, поршневых пальцев и отчасти шатуна, а также непостоянство крутящего момента за счет изменения сил давления газов на поршень.

Так как в четырехтактных двигателях рабочий ход происходит один раз в два оборота, то за счет неравномерности крутящего момента колебания одноцилиндрового четырехтактного двигателя будут в 2 раза реже, чем его частота вращения. За счет неуравновешенности отдельных деталей на двигатель будут действовать силы инерции, которые принято представлять в виде тригонометрической суммы периодических функций – гармоник, то есть в виде ряда Фурье.

Частота сил инерции первого порядка равна частоте вращения и в 2 раза ниже, чем частота сил второго порядка. Силы инерции второго порядка возникают из-за наличия шатуна

на, в результате чего поршень движется не строго по синусоидальному закону. Эти силы составляют около 25% от сил первого порядка. Для многоцилиндровых двигателей силы инерции могут частично уравниваться. Например, на четырехцилиндровом двигателе за счет неравномерности крутящего момента и сил инерции частота колебаний оказывается уже в 2 раза больше, чем частота вращения. Для шестицилиндровых двигателей учитывается только неравномерность крутящего момента, частота колебаний оказывается в 3 раза выше частоты вращения. Таким образом, если четырехцилиндровый четырехтактный двигатель работает с частотой оборотов 3000 об/мин (50 об/с), то основная вибрация от него будет проявляться на частоте 100 колебаний в секунду, то есть 100 Гц.

Эффективным средством для уменьшения амплитуды вибрации служат амортизаторы, которые, как правило, изготавливаются из резины. Принцип работы амортизатора можно пояснить на следующем эксперименте. Если двигатель поставить на пружину, то она сожмется. Если при этом приложить к двигателю дополнительную силу, направленную вверх или вниз, а затем ее резко убрать, то двигатель начнет колебаться вверх-вниз. Частота этих колебаний называется частотой собственных колебаний и играет очень важную роль при расчете системы амортизации. Если увеличить длину пружины – сделать ее более мягкой, то частота уменьшится; если увеличить толщину – повысить жесткость пружины, частота увеличится. Жесткость пружины характеризуется статическим прогибом, то есть изменением длины пружины под весом двигателя.

Теория колебаний дает простую связь частоты собственных колебаний со статическим прогибом. Если прогиб Δ выразить в сантиметрах, то частоту в герцах можно определить по формуле $f = 5/\sqrt{\Delta}$. Таким образом, если наш двигатель весом 250 кг сжал пружину на 25 см, то частота его колебаний составит 1 Гц. Будем медленно и плавно нагружать двигатель дополнительной силой $+N$ до тех пор, пока ее значение не достигнет 50 кгс, затем медленно уменьшать до 0, а далее растягивать пружину до момента, пока растягивающая сила $-N$ не составит 50 кгс и т.д. Пружина будет медленно сжиматься и растягиваться. Величину ее максимального сжатия и растяжения несложно определить из следующей пропорции: если за счет силы веса двигателя пружина сжалась на 25 см, то при дополнительных 50 кгс она сожмется еще на 5 см. Если прикладывать такую же знакопеременную силу, но в такт колебаниям двигателя, то есть с частотой его собственных колебаний (в нашем случае она равна 1 Гц), то за 10-15 колебаний мы можем «раскачать» двигатель так, что его перемещение при колебаниях вниз-вверх достигнет $\pm 50-70$ см, то есть будет больше в 10-14 раз, чем в предыдущем случае. Для того чтобы растянуть или сжать нашу пружину на 50-70 см, надо приложить силу 500-700 кгс – именно таково действие максимума силы плюс вес двигателя на основание, к которому мы ее закрепили. Случай, когда частота возмущающей силы совпадает с частотой собственных колебаний, называется резонансом: при этом нагрузка на основание от знакопеременной силы $\pm N = 50$ кгс достигает 500-700 кгс. С точки зрения амортизации, это самый неудачный режим. Теперь попробуем прикладывать такую же знакопеременную силу $\pm N = 50$ кгс, но с большой частотой, например 5 Гц. Это значит, что в течение 0,1 с нагрузка будет действовать в одну сторону; двигатель едва успеет переместиться на 2 мм, как сила поменяет знак. Однако, чтобы сжать пружину на 2 мм, необходимо приложить силу 2 кгс. Итак, мы видим, что только в последнем случае пружина играет роль амортизатора, то есть значительно уменьшает нагрузки, передаваемые на основание. Если частота возмущающей силы превышает частоту собственных колебаний в 2, 4, 10 раз, то нагрузки, передаваемые на основание, то есть на корпус катера, уменьшаются, соответственно, в 3, 15, 100 раз. Для реального двигателя жесткость амортизаторов выбирают таким образом, чтобы частота собственных колебаний была ниже частоты возмущающей силы. Обычно при этом рассматривают режим холостого хода. Для четырехцилиндрового четырехтактного двигателя при 600 об/мин (10 об/с) частота возмущающей силы составит 20 Гц. Обычно стараются так подобрать амортизаторы, чтобы частота собственных колебаний двигателя была ниже не менее чем в 2 раза, то есть 10 Гц. Статический прогиб при этом составляет 2,5 мм. За счет амортизаторов вибрация на холостых оборотах двигателя уменьшается в 3 раза, на рабочих (1500-3500 об/мин) – в 20-130 раз.

Для уменьшения вибрации от неравномерности крутящего момента необходимо, чтобы частота собственных угловых колебаний (рисунок 1) не превышала 10 Гц. Эта частота зависит от жесткости амортизаторов, так и от расстояния между ними. Поскольку жесткость

амортизаторов выбирается при расчете колебаний в вертикальной плоскости, то при расчете угловых колебаний определяется расстояние между амортизаторами.

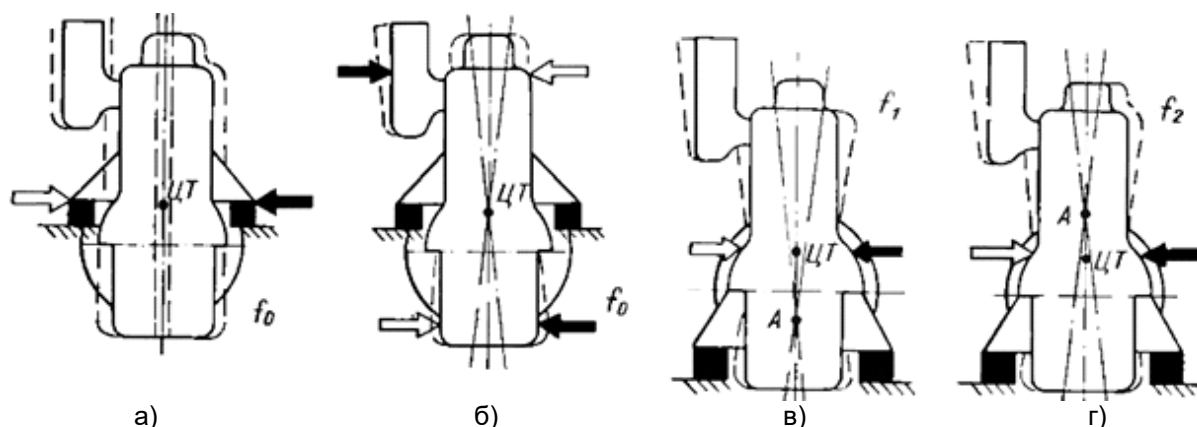


Рисунок 1 – Колебания двигателя на амортизаторах: а)-поперечные колебания при установке амортизаторов в районе центра тяжести; б)-угловые колебания при установке амортизаторов в районе центра тяжести; в) и г)- связанные угловые колебания при установке амортизаторов ниже центра тяжести

Чтобы получить необходимую частоту собственных угловых колебаний, расстояние между амортизаторами должно, как правило, составлять менее половины высоты двигателя. Однако обеспечить это на практике, даже установив амортизаторы вплотную к картеру, удастся не всегда, поэтому большинство двигателей устанавливаются на два передних и один задний амортизаторы. Очень важно, чтобы амортизаторы по высоте были установлены в районе центра тяжести двигателя (рисунок 1а и 1б). В этом случае двигатель можно раскачать с частотой собственных колебаний либо только в горизонтальной плоскости, либо только вокруг оси, параллельной оси коленчатого вала и проходящей через центр тяжести двигателя (ЦТ). При этом если мы увеличим расстояние между амортизаторами, увеличится собственная частота угловых колебаний, а частота колебаний в горизонтальной плоскости не изменится. На практике устанавливать амортизаторы на высоте ЦТ неудобно, поэтому нередко их ставят значительно ниже, но это приводит к значительному увеличению вибраций. В этом случае при воздействии на ЦТ знакопеременной силы, лежащей в горизонтальной плоскости (рисунок 1в и 1г), двигатель будет совершать только угловые колебания, причем резонанс наступит на двух частотах, которые связаны между собой (такие колебания называются связанными). При этом частота первого колебания немного ниже, а второго значительно выше, чем при расположении амортизаторов в районе ЦТ.

Какие бывают конструкции амортизаторов? В настоящее время наибольшее распространение получили резиновые амортизаторы. Одно из основных их преимуществ заключается в том, что при резонансе амплитуда колебаний резиновых амортизаторов увеличивается в 4-10 раз, в то время как стальных – в десятки раз. Известно, что при изменении формы резины ее объем практически остается прежним. Резиновый кубик при сжатии приобретает бочкообразную форму, что делает его достаточно податливым; прокладка же из листовой резины, не имея возможности изменить свою форму, оказывается очень жесткой [1].

Наиболее распространенный автомобильный амортизатор показан на рисунок 2а. Такой амортизатор применяется на всех марках отечественных легковых автомобилей (кроме «Жигулей»). Он изготовлен из резины, имеет трапецеидальную форму и привулканизирован к металлическим пластинам, имеющим элементы крепления. Особенность автомобильного амортизатора заключается в том, что при сжатии деформация оказывается в 6 раз меньше, чем при сдвиге.

Амортизатор от «Жигулей» (рисунок 2б) представляет собой полый резиновый цилиндр, внутри которого установлены пружина и стержень-ограничитель. За счет пружины различие деформаций от сжатия и сдвига несколько уменьшается, кроме того, улучшается амортизация на очень больших оборотах. Стержень ограничивает ход подвески, предохраняя ее от разрушения при значительных толчках движущегося автомобиля.

Ограничитель, особенно в сочетании с мягкими амортизаторами, целесообразно применять и на быстроходных глиссирующих катерах. Действительно, при плавании на волне-

нии перегрузки достигают $5g$ и более, а это значит, что деформации обычного амортизатора, не имеющего ограничителя, превысят в 5 и более раз величину его статического прогиба. Такие перемещения опасны для прочности амортизатора, осложняют конструкцию валопровода, выхлопной системы и т.д.

В этом случае рядом с амортизаторами без ограничителей целесообразно ставить (с зазором 2-3 мм) бруски резины, ограничивающие перемещение двигателя, подобные ограничителям хода подвески на автомобилях. Ограничителем может быть второй такой же амортизатор, который вступает в работу при значительных смещениях и разгружает штатные.

В конструкции амортизаторов, имеющих близкие значения жесткостей в разных направлениях, резина одновременно работает на сжатие и сдвиг (рисунок 3). Широко используемые амортизаторы типа АКСС имеют страховку, то есть при разрушении резины не происходит срыв двигателя с фундамента, что особенно опасно при плавании на волнении. Цифра в обозначении амортизаторов этого типа указывает допустимую нагрузку на один амортизатор.

Амортизаторы типа АКСС очень жесткие. При прочих равных условиях на амортизаторах АКСС-М частота колебаний в 3-3,5 раза, а на АКСС-И – в 2-2,5 раза выше, чем на автомобильных. Опыт эксплуатации показывает, что допустимую нагрузку на эти амортизаторы можно увеличить в 2-2,5 раза. Однако даже в этом случае частота колебаний будет, соответственно, в 2,5-3 и 1,6-2 раза выше.

Амортизаторы типа АКСС устанавливаются горизонтально на высоте центра тяжести. Они обеспечивают одинаковую частоту колебаний как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях. Если бы мы таким же образом расположили изображенные на рисунке 2 амортизаторы, то частота колебаний в вертикальной плоскости была в 1,6-2,5 раза выше, чем в горизонтальной. Чтобы эти частоты были одинаковыми, автомобильные амортизаторы необходимо расположить под углом $\alpha = 45^\circ$ (рисунок 4). В этом случае удастся не только уравнивать частоты в вертикальной и горизонтальной плоскостях, но и разместить амортизаторы значительно ниже ЦТ без возникновения связанности колебаний.

При смещении двигателя в поперечном направлении (рисунок 4) силы, возникающие при сжатии резины, больше, чем при сдвиге, поэтому реакция левого амортизатора направлена вправо и вверх, а правого – вправо и вниз. В результате этого суммарная реакция двух амортизаторов оказывается приложенной к двигателю не в плоскости установки амортизаторов, а выше, на расстоянии $h = (0,35-0,40)B$.

Именно по такой схеме выполнены подвески легковых двигателей. Это обеспечивает минимальный уровень вибраций в сочетании с более удобным расположением амортизаторов. Для установки по данной схеме более тяжелых четырехцилиндровых дизелей можно использовать два и даже три автомобильных амортизатора, расположенных рядом.

Конструкция амортизатора со страховкой, все детали которого, даже резиновые, изготавливаются на самом обычном токарном станке, показана на рисунке 5. Амортизаторы, установленные как показано на рисунке 4, можно успешно использовать на тяжелых четырехцилиндровых дизелях массой 350-500 кг.

Приведенные выше рассуждения справедливы, когда двигатель установлен на абсо-

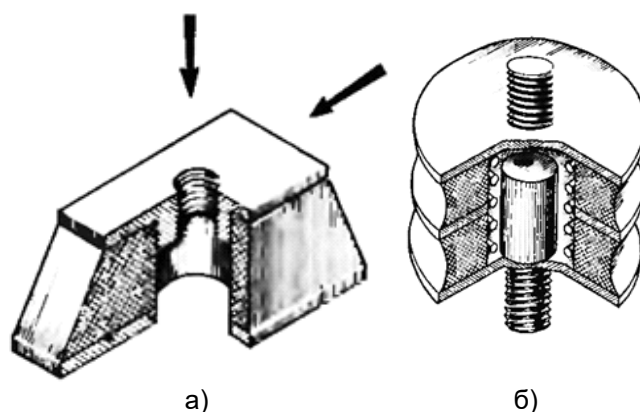


Рисунок 2 – Конструкция амортизаторов автомобилей: а)-«ГАЗ»; б)-«Жигули»

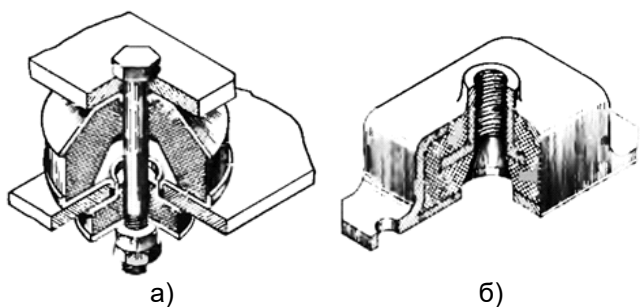


Рисунок 3 – Конструкции амортизаторов, имеющих одинаковую жесткость: а)-«ГАЗ-52»; б)-«АКСС»

лютно жестком фундаменте, масса которого в 3-4 раза больше массы двигателя. Если уменьшать жесткость подмоторной рамы, то за счет передаваемых амортизаторами усилий в силовых конструкциях будут возникать все большие деформации. Таким образом, при уменьшении жесткости подмоторной рамы масса фундамента как бы уменьшается, что приводит к увеличению частоты собственных колебаний и, следовательно, к увеличению вибрации. Улучшить виброизоляцию можно не только за счет жесткости подмоторного фундамента, но и при использовании материалов, обладающих большим внутренним трением, например дерева или стеклопластика.

Достаточно жесткая рама, имеющая двутавровую форму, показана на рисунке 6. Нижние полки рамы не перерезаны шпангоутами и соединены с днищем. Чтобы двигатель был расположен как можно ниже, шпангоуты под двигателем имеют небольшую высоту (следовательно, небольшую жесткость), поэтому рама с обеих сторон должна опираться на жесткие переборки или на транец. Переборка должна быть достаточно жесткой. Если толщина фанеры менее 10-12 мм, то от мест крепления подмоторной рамы переборка должна усиливаться ребрами жесткости, доходящими до борта или палубы.

Амортизаторы крепятся не непосредственно к раме, а к двум сварным жестким поперечинам. Однако даже в этом случае при установке тяжелого двигателя на легкий корпус (вес двигателя имеет тот же порядок, что и вес корпуса) частота собственных колебаний будет выше на 20-30%, а при установке двигателя в корме — на 50% и более. Установка же двигателя на подмоторную раму, сделанную в виде толстой доски, которая положена плашмя на шпангоуты, может повысить частоту собственных колебаний в 2 раза и более.

Следует также отметить, что одни и те же реакции у тяжелого корпуса вызывают слабую вибрацию, а у легкого — более сильную. Поэтому, чем меньше будет вес корпуса, тем более мягкие амортизаторы (позволяющие иметь более низкую частоту собственных колебаний) целесообразно применять [2].

На двухцилиндровых двигателях (тем более одноцилиндровых) необходимо применять очень мягкие амортизаторы. Например, для одноцилиндрового четырехтактного двигателя при частоте холостых оборотов 800 об/мин частота собственных колебаний двигателя на амортизаторах должна составлять 3 Гц, а величина статического прогиба — 2,6 см. Такие мягкие амортизаторы могут быть сделаны на базе резиновых элементов, работающих на изгиб, микропористой резины, стальных плоских или витых пружин в сочетании с резиновыми элементами. Естественно, что на таких амортизаторах необходимо применять ограничители. При установке двигателя на амортизаторах наиболее распространенная схема валопровода - установка отдельного реверс-редуктора, соединенного с двигателем карданным валом. Менее распространена схема, когда на амортизаторах установлен двигатель с навешенным реверс-редуктором. В этом случае гребной вал проходит через самоцентрирующий сальник и крепится к реверс-редуктору при помощи карданного вала или упругой муфты, передающей упор винта. Если двигатель установлен на жестких амортизаторах и имеет относительно длинный гребной

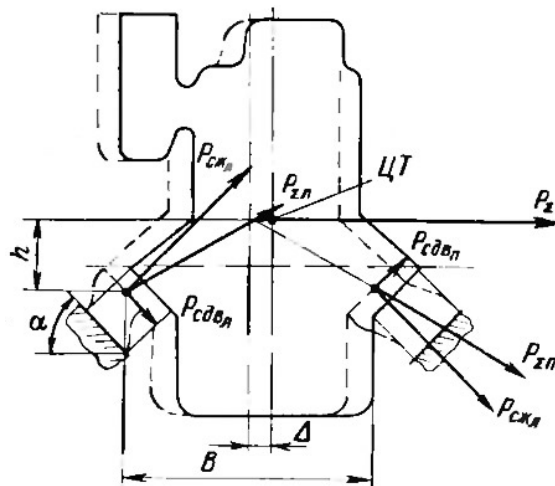


Рисунок 4 – Схема установки амортизаторов под углом

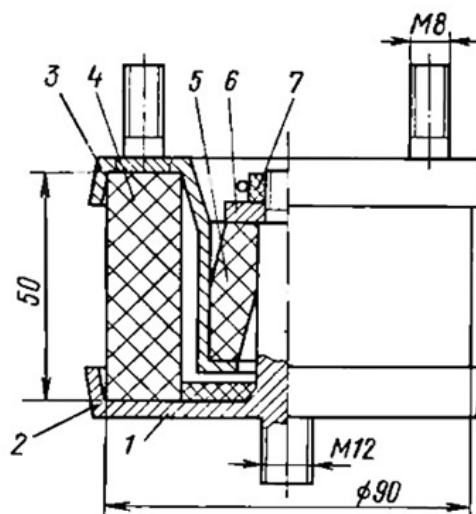


Рисунок 5 – Конструкция амортизатора со страховкой: 1-ограничитель; 2-крышка нижняя; 3-крышка верхняя; 4-амортизатор основной; 5-амортизатор вспомогательный; 6-шайба; 7-гайка

вал (длиной в 50 и более раз больше, чем диаметр), то допускается обычное фланцевое крепление.

В заключение приведем несколько типичных ошибок при установке двигателя на амортизаторах. Рассмотрим установку тракторного дизеля типа Д240 с угловым реверс-редуктором. Ширина лап реверс-редуктора 750 мм, на таком расстоянии нередко устанавливаются и амортизаторы. Установим двигатель массой 450 кг на четыре амортизатора АКСС-120М. В этом случае частота собственных вертикальных колебаний составит 27 Гц, а угловых – 45 Гц. Это значит, что резонанс возникает на 810 и 1350 об/мин. Если к тому же подмоторная рама недостаточно жесткая, то резонанс возникает на 1200 и 2000 об/мин, то есть на рабочих оборотах. Таким образом, уровень вибрации будет в 4-6 раз выше, чем для жестко установленного двигателя [3].

Установим двигатель на четыре наклонных амортизатора, изображенных на рисунке 5 (их жесткость на сжатие в 4,6, а на сдвиг в 2,5 раза меньше, чем АКСС-120М). Задние амортизаторы расположим под стартером, максимально приблизив к картеру, а передние укрепим к кронштейну передней опоры двигателя. При достаточно жесткой подмоторной раме можно получить собственную частоту колебаний 10-12 Гц, то есть в диапазоне 2000 об/мин уменьшить уровень вибрации в 35 раз, по сравнению с установкой двигателя без амортизаторов. Если в эти же места установить амортизаторы АКСС-120И (более мягкие, чем АКСС-120М), то возникнут связанные угловые колебания с частотой 18 и 35 Гц. Значительное повышение частоты колебаний связано с тем, что, в отличие от предыдущих, амортизаторы АКСС необходимо располагать на высоте ЦТ, а этому мешает стартер. Поэтому и появляется связанность колебаний. Резонанс в этом случае возникает на холостых оборотах и при 1000 об/мин. Поэтому на рабочих оборотах – 2000 об/мин – уровень вибрации будет только в 3 раза ниже, чем при жестком креплении двигателя. И последнее, учитывая, что уровень вибрации самого двигателя при установке на амортизаторы увеличивается, часть агрегатов, такие как водомасляный холодильник, фильтр, отстойник, расширительный бачок, целесообразней крепить к набору катера, а не навешивать на двигатель. Следует также обратить особое внимание на жесткое крепление насоса забортной воды и генератора.

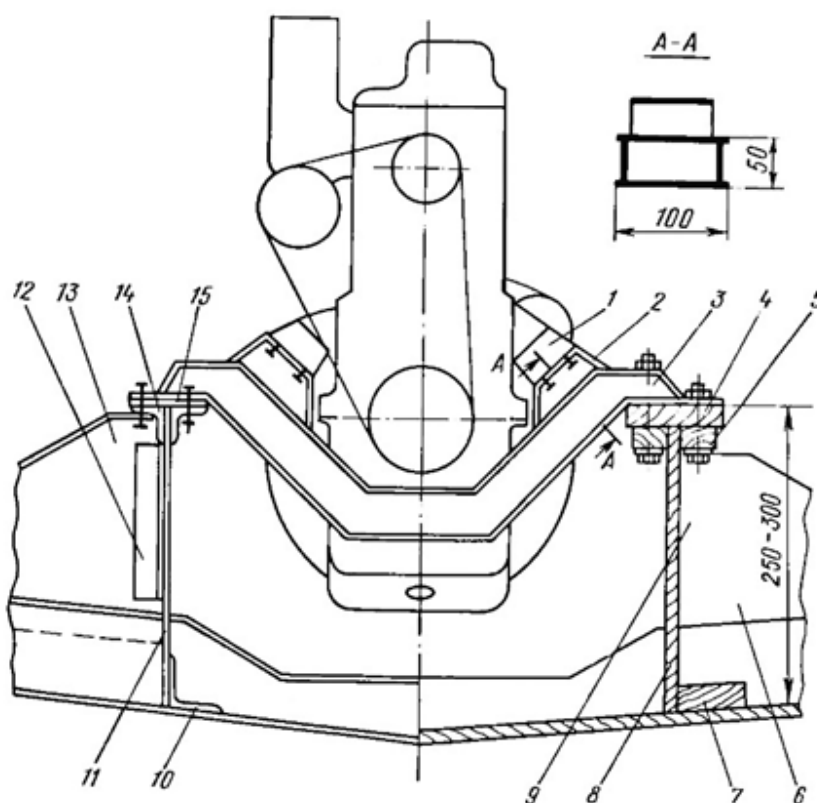


Рисунок 6 – Пример установки судового двигателя на амортизаторы: 1-амортизатор; 2-стойка амортизатора; 3-рама поперечная сварная; 4-полка подмоторной рамы; 5-брус; 6-кница; 7-стрингер днищевой; 8-ребро; 9-брус; 10-стрингер; 11-ребро; 12-уголок 30; 13-кница; 14-уголок 50; 15-полка

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Мухин, Ю.Н. Автомобильный двигатель на катере / Ю.Н. Мухин, Б.Е. Синильщиков. – М.: Судостроение, 1980. – 216 с.
- 2 Бурков, С.Н. Проблемы судовой виброзащиты / С.Н. Бурков // -Науч. проб. трансп. Сиб. и Дальн. Вост. - 2016. -№3-4. -С. 117-118.
- 3 Бурков, С.Н. Некоторые аспекты виброизоляции двигателей внутреннего сгорания / С.Н. Бурков, А.М. Еф-

REFERENCES

- 1 Yu.N. Mukhin, B.E. Sinil'shchikov. Automobile engine on the boat [Avtomobil'nyy dvigatel' na katere]. Moscow. Sudostroenie Publ., 1980. 216 p.
- 2 S.N. Burkov. Marine vibration protection issues [Problemy sudovoy vibrozashchity]. Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka. 2016. No. 3-4. pp. 117-118.
- 3 S.N. Burkov, A.M. Efremov. Some aspects of internal combustion engines vibration isolation [Nekotorye aspekty vibroizolyatsii

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: вибрация, судовой двигатель, снижение, амортизатор

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ: Бурков Сергей Николаевич, канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ
Ефремов Анатолий Матвеевич, канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «СГУВТ»

ПОЧТОВЫЙ АДРЕС: 630039, г.Новосибирск, ул.Добролюбова, 160, ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ
630099, г.Новосибирск, ул.Щетинкина, 33, ФГБОУ ВО «СГУВТ»

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ТРУБ В СИСТЕМЕ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»

ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»

А.Н. Хуснутдинов, И.В. Черепенькин, Э.М. Хуснутдинова

STUDY OF HEAT SUPPLY SYSTEM OPERATION WITH MULTILAYER PIPES

Kazan State Power Engineering University (KSPEU) 51, Krasnoselskaya St., Kazan, 420066, Russia

Kazan (Volga region) Federal University (KFU) 18, Kremlyovskaya St., Kazan, 420008, Russia

Azat N. Khusnutdinov (Senior Lecturer of KSPEU)

Ivan V. Cherepen'kin (Student of KSPEU)

El'vira M. Khusnutdinova (Assistant Professor of KFU)

ABSTRACT: The main source of heat losses in heat supply systems are heating mains. The article presents a new design of the heat supply system based on multilayer composite pipes.

Keywords: heat supply system, multilayer pipe, heat losses

Основным источником тепловых потерь в системах теплоснабжения являются теплотрассы. В статье представлена новая конструкция системы теплоснабжения. Проведены экспериментальные исследования многослойных труб.

Анализ литературных данных о работе систем теплового энергоснабжения в энергетике и промышленности показывает, что в некоторых российских публикациях авторы отмечают высокий уровень потерь, которые имеют место в пределах от 25% до 60% [1, 2]. Это существенным образом снижает эффективность производственного процесса по таким важным показателям как коэффициент полезного действия (КПД), себестоимость продукции. Рост цен на энергоносители усугубляет данную проблему и требует безотлагательного ее решения. В этой связи необходимо обратить самое серьезное внимание на устранение сложившейся неблагоприятной тенденции [2]. Её можно решить путем создания высокоэффективных тепловых транспортных систем, с высоким уровнем технологического КПД.

Для решения данной проблемы необходимо разработать такую конструкцию системы теплопередачи, которая позволяла бы снизить потери передачи до 12% при низком уровне капитальных вложений на производство и монтаж новых конструкций труб.

Существующая система теплоснабжения имеет множество вариантов исполнения. Наиболее характерная из них приведена на рисунке 1 [3]. В теплоприемник горячая вода 6 подается по трубе 5, а холодная вода 2 из теплоприемника возвращается к источнику при помощи трубы 1.

Таким образом, вода (теплоноситель) циркулирует между источником тепла и приемником. Тепловые потери 3 и 4 имеют место в трубах 1, 5.

Многослойная труба приведена на рисунке 2.

Система работает следующим образом. Горячая вода от источника к теплоприемнику подается по трубе 2 и возвращается обратно к приемнику по трубе 1. Потери 5 переносятся теплоносителем по трубе 1.

Для проведения экспериментальных исследований были разработаны методика и стенд. На рисунке 3 приведены блок-схема и конструкция стенда, которая состоит из следующих элементов: 1-труба холодная (обратная); 2-вода холодная (обратная); 3-монтажная плита; 4-сливная трубка (холодная); 5 и 8-патрубки (холодный и горячий); 6-труба горячая; 7-горячая вода; 9-отверстие для датчика температуры; 10-сливная трубка (горячая); 11, ..., 16-термоэлектрические преобразователи (термопары); 17-устройство для измерения температуры УКТ-138; 18-адаптер АС-2; 19-процессор; 20-монитор.

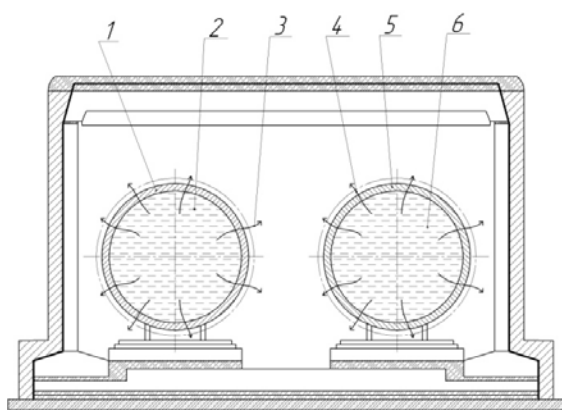


Рисунок 1 – Типовая система теплоснабжения: 1-труба холодная; 2-холодная вода; 3-тепловой поток потерь холодной трубы; 4-тепловой поток потерь горячей трубы; 5-труба горячая; 6-горячая вода

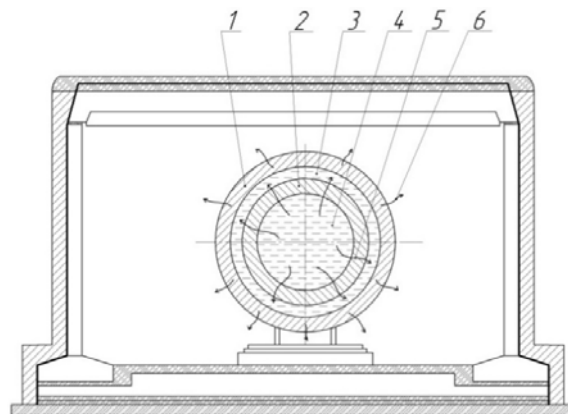


Рисунок 2 – Многослойная труба системы теплоснабжения: 1-труба холодная; 2-труба горячая; 3-холодная вода; 4-горячая вода; 5, 6-тепловые потоки потерь

Измерение температур в трубах производилось с использованием следующих приборов:

- персональный компьютер (ПК);
- устройство для измерения и контроля температуры УКТ38 с пределом основной приведенной погрешности 0,5% при использовании преобразователей типа ТХК(L);
- адаптер интерфейса AC2 со скоростью обмена данными 9600 бит/с;

– преобразователь термоэлектрический в мягкой изоляции ДТПЛ011-05/1,5 с пределом измерения – $(-50) \dots +300$ °С, имеющего класс допуска – 2, с допустимым отклонением $\pm 2,5$ °С.

Принцип работы измерительного комплекса. Сигнал от термопар поступает в устройство измерения температуры УКТ-138. Данное устройство имеет цифровое табло для вывода показания температур датчиков, а также разъем для передачи данных на ПК через адаптер интерфейса AC-2. В ПК данные исследования записываются, с интервалом 3 с, в программе адаптированной под УКТ-138.

Для определения количественных характеристик тепловых параметров обоих вариантов систем были проведены экспериментальные исследования при различных режимах возможных нагрузок системы теплоснабжения. Они были проведены в четыре этапа. На первом этапе термопреобразователи были установлены на серийном варианте (полипропиленовая труба, горячая), на втором труба в трубе (полипропиленовые), на третьем серийный вариант стальной трубы, на четвертом новая конструкция – труба в трубе (стальные). Результаты проведенных исследований позволили сравнить теплотехнические характеристики всех приведенных вариантов конструкций систем теплоснабжения.

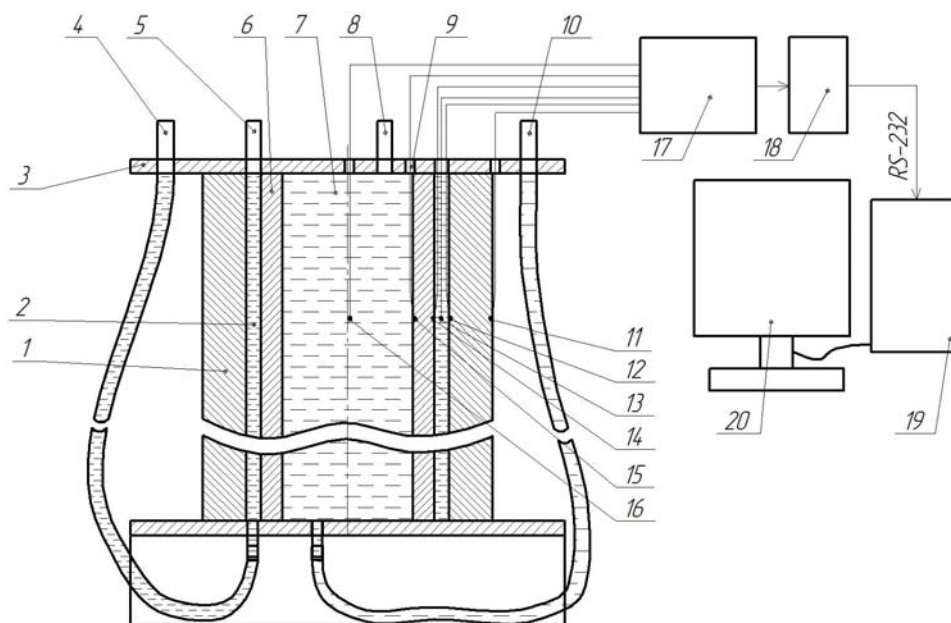


Рисунок 3 – Блок схема и эскиз конструкции стенда для экспериментального исследования новой конструкции системы теплоснабжения

На данном стенде были проведены экспериментальные исследования. В результате было установлено:

- высокий уровень адекватности полученных результатов;
- низкий уровень погрешности по сравнению с существующими методами;
- время исследования сокращается в несколько раз в результате использования компьютерных технологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Волосатова, Т.А. Некоторые вопросы энергоэффективности тепловых сетей в разрезе текущего состояния комплекса ЖКХ России / Т.А. Волосатова // - Инженерный вестник Дона. -2013. -№4. -Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2054>. - 01.06.2018 г.

2 Башмаков, И.А. Анализ основных тенденций развития систем теплоснабжения России / И.А. Башмаков // -Новости теплоснабжения. -2008. -№2 (90). -С. 3-8.

3 Соколов, Е.Я. Теплофикация и тепловые сети / Е.Я. Соколов. -М.: Издательский дом МЭИ, 2001. -472 с.

REFERENCES

1 T.A. Volosatova. Some issues of energy efficiency of heating systems in the context of the current state of the housing and public utilities complex in Russia [Nekotorye voprosy energoeffektivnosti teplovykh setey v razreze tekushchego sostoyaniya kompleksa ZhKKh Rossii]. *Engineering Bulletin of the Don [Inzhenernyy vestnik Dona]*. -2013. No. 4. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2054>. -01 Jun 2018.

2 I.A. Bashmakov. Analysis of the main trends in the development of heat supply systems in Russia [Analiz osnovnykh tendentsiy razvitiya sistem teplosnabzheniya Rossii]. *Heat Supply News [Novosti teplosnabzheniya]*. 2008. No. 2(90). pp. 3-8.

3 E.Ya. Sokolov. Central heating and heating systems [Teplofikatsiya i teplovye seti]. Moscow. Izdatel'skiy dom MEI Publ. 2001. 472 p.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: система теплоснабжения, многослойная труба, тепловые потери

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ: Хуснутдинов Азат Назипович, старший преподаватель КГЭУ

Черепенькин Иван Вячеславович, студент КГЭУ

Хуснутдинова Эльвира Мусавировна, ассистент КФУ

420066, г.Казань, ул.Красносельская, 51, КГЭУ

420008, г.Казань, ул.Кремлевская, 18, КФУ

ПОЧТОВЫЙ АДРЕС:

СОСТАВЛЕНИЕ УРАВНЕНИЙ ДВИЖЕНИЯ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ МЕТОДОМ КОНТУРНЫХ ТОКОВ

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»

В.В. Жуловян, И.А. Рыжов

DERIVATION OF THE EQUATIONS OF MOTION OF OSCILLATORY MECHANICAL SYSTEMS BY THE MESH CURRENT METHOD

Novosibirsk State Technical University (NSTU) 20, Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630092, Russia

Vladimir V. Zhulovyan (Holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Prof. of NSTU)

Il'ya A. Ryzhov (Master's Degree of NSTU)

ABSTRACT: This paper concerns mechanical-electrical analogies and shows the interrelations between circuit theory and mechanical system. The equations of motion of the oscillatory system are derived by the example of car suspension.

Keywords: mechanical system, mesh current method, Lagrange's Equations, Kirchhoff laws

Показана взаимосвязь между подобными законами теории электрических и механических цепей. Составлены уравнения движения колебательной системы на примере подвески ходовой части автомобиля.

В теории цепей составление уравнений системы производится на основе правил для контурных токов или узловых напряжений. Полученные на основе законов Кирхгофа, они существенно упрощают достижение поставленной задачи. Для механических систем подобных подходов не существует. Чтобы убедиться в этом, достаточно рассмотреть «Переходные процессы в линейных системах» Гарднера и Бэрнса [1]. Но, как известно, законы теории цепей и механических цепей и формально и по своей физической сущности подобны и, следовательно, для составления уравнений движения последних должны существовать и подобные методы.

Рассмотрим такую возможность на следующем примере [3]. На рисунке 1 приведена электрическая цепь, эле-

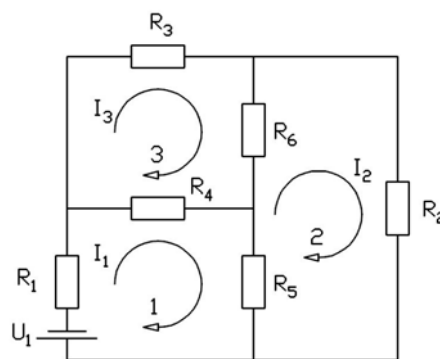


Рисунок 1 – Цепь с тремя контурами $n = 1, 2, 3$

менты которой для простоты обозначены сопротивлениями $R_n (n=1,2,...,6)$. Они образуют три контура.

Положительные направления обхода обозначены стрелками. Уравнения напряжений для каждого из них, составленные по известным правилам, записаны здесь в следующей форме, удобной для дальнейшего анализа [3]

$$\begin{aligned} u_1 &= i_1 R_{11} - i_2 R_{12} - i_3 R_{13}; \\ 0 &= -i_1 R_{21} + i_2 R_{22} - i_3 R_{23}; \\ 0 &= -i_1 R_{31} - i_2 R_{32} + i_3 R_{33}, \end{aligned} \quad (1)$$

где R_{nn} – собственные сопротивления контуров

$$\begin{aligned} R_{11} &= R_1 + R_4 + R_5; \\ R_{22} &= R_2 + R_5 + R_6; \\ R_{33} &= R_3 + R_4 + R_6. \end{aligned} \quad (2)$$

Причем часть из них $R_5 = R_{12} = R_{21}$; $R_4 = R_{13} = R_{31}$; $R_6 = R_{23} = R_{32}$ являются общими для смежных контуров, знак напряжения на которых «плюс», если выбранные направления контурных токов на них совпадают, в противном случае знак «минус».

Здесь полезно вспомнить порядок составления уравнений. Сделаем это на примере первого контура. Сначала полагая, что $i_2 = i_3 = 0$, записываем $i_1 R_{11}$, а затем, считая, что $i_1 = 0$, находим $i_2 R_{12}$ и $i_3 R_{13}$. То есть сначала обходится контур рассматриваемого тока, а затем учитываются добавки напряжений от токов соседних контуров (с учетом их направления) на смежных сопротивлениях, причем эти сопротивления являются общими элементами рассматриваемых контуров. Отмеченное обстоятельство указывает на то, что величина энергии в рассматриваемой системе не зависит от траектории перехода из начального в конечное положение [4] Учитывая важность этого положения для дальнейших рассуждений, найдем энергию, выделяемую в нашей системе

$$P = \int u_1 di_1 + \int u_2 di_2 + \int u_3 di_3,$$

где напряжения контуров определяются уравнениями (1). Первый интеграл возьмем, полагая $i_2 = i_3 = 0$, изменяя i_1 от нуля до конечного значения, второй – при i_1 , равного достигнутому, $i_3 = 0$, ток i_2 – от нуля до конечного. Третий интеграл берем при i_1 и i_2 , равных достигнутому, при этом ток i_3 изменяем от нуля до конечной величины. В результате получим

$$P = 0,5 \sum_{k=1}^k i_k^2 R_{kk} - i_1 i_2 R_{21} - i_1 i_3 R_{13} - i_2 i_3 R_{23}.$$

Частные производные от полученного выражения по току i_k дают напряжения контуров $u_k = \partial P / \partial i_k$ при условии, что выполняется равенство $R_{12} = R_{21}$, $R_{13} = R_{31}$ и так далее. И так как они выполняются, следовательно, выражение для P преобразуется к следующему виду

$$P = \int \left(\frac{\partial P}{\partial i_1} di_1 + \frac{\partial P}{\partial i_2} di_2 + \frac{\partial P}{\partial i_3} di_3 \right) = \int dP,$$

где подынтегральное выражение представляет полный дифференциал. И таким образом, если выполнено условие равенства взаимных сопротивлений, значение энергии рассматриваемой системы не зависит от траектории перехода из одного состояния в другое.

Подобный порядок составления уравнений может быть применен и для механических систем. Рассмотрим такую возможность на примере, приведенном на рисунке 2 [1].

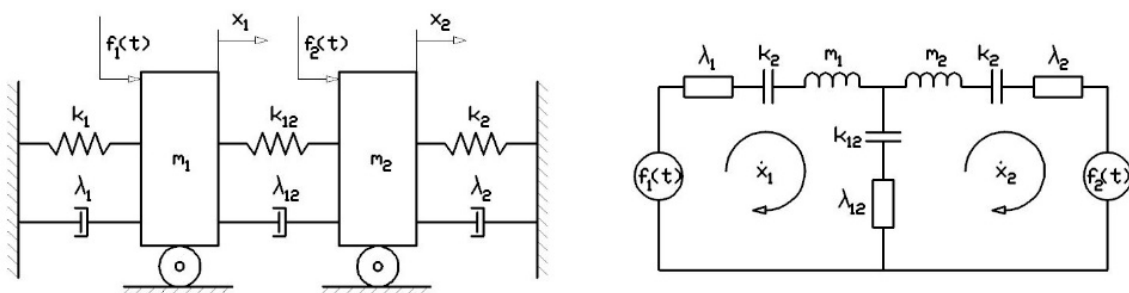


Рисунок 2 – Колебательная система и ее электрический аналог

Она имеет две степени свободы, положение сосредоточенных масс m_1 и m_2 , связанных пружинами и демпферами, определяются координатами x_1 и x_2 , отсчитываемых от положения равновесия. Найдем силы, действующие на массу m_1 . В соответствии с приведенным выше толкованием контурных уравнений, найдем силы, вызванные только изменением положения при «замороженном» положении второй массы ($\dot{x}_2 = 0$.)

$$-(k_1 x_1 + k_{12} x_1 + \lambda_1 \dot{x}_1 + \lambda_{12} \dot{x}_1) = f_{11}. \quad (3)$$

Здесь знак «-» указывает, что рассматриваемая сила, как сила инерции $m_1 \ddot{x}_1$ препятствует изменению положения тела.

На втором этапе найдем силы, действующие на массу m_1 , находящегося в точке равновесия, вызванные изменением положения m_2 . Они создаются элементами, связывающими обе массы.

Эта сила положительна, так как с ростом x_2 она стремится увлечь массу m_1 положительном направлении

$$k_{12} x_2 + \lambda_{12} \dot{x}_2 = f_{12}. \quad (4)$$

В соответствии со вторым законом Ньютона, получим следующее уравнение сил, действующих на массу m_1 с учетом внешней силы $f_1(t)$

$$f_1(t) = (m_1 \ddot{x}_1 + \lambda_1 \dot{x}_1 + \lambda_{12} \dot{x}_1 + k_1 x_1 + k_{12} x_1) - (\lambda_{12} \dot{x}_2 + k_{12} x_2). \quad (5)$$

Аналогичным образом найдем силы, действующие на массу m_2 . Полагая замороженным положение массы m_1 в точке равновесия, найдем силы, связанные с изменением x_2

$$-(m_2 \ddot{x}_2 + \lambda_2 \dot{x}_2 + \lambda_{12} \dot{x}_2 + k_2 x_2 + k_{12} x_2) = f_{22}. \quad (6)$$

Они препятствуют изменению положения равновесия. Далее найдем силы от изменения положения массы m_1 при фиксированном положении m_2 . Они создаются элементами, связывающими обе массы

$$k_{12} x_1 + \lambda_{12} \dot{x}_1 = f_{21}, \quad (7)$$

которые стремятся сдвинуть массу m_2 в положительном направлении. Таким образом, для сил, действующих на массу m_2 с учетом внешней силы $f_2(t)$, имеем

$$f_2(t) = (m_2 \ddot{x}_2 + \lambda_2 \dot{x}_2 + \lambda_{12} \dot{x}_2 + k_2 x_2 + k_{12} x_2) - (\lambda_{12} \dot{x}_1 + k_{12} x_1). \quad (8)$$

Как не трудно установить, контур сил образуется за счет тех сил, которые действуют на рассматриваемое тело (материальную точку) при замороженном положении других тел. В нашем случае это силы f_{11} и f_{22} . При этом силы между телами системы f_{12} и f_{21} , создаваемые элементами связи между ними, находятся при фиксированном положении рассматриваемого тела m_1 или m_2 в точке равновесия соответственно.

Обратим внимание на подобие составления уравнений (5) и (8) с уравнениями (1), которое можно наблюдать, если придать сопротивлениям R_{kn} конкретный смысл и учесть, что мы имеем две степени свободы.

Преобразуем уравнения (5) и (8), вводя следующие обозначения

$$\dot{x}_k = dx_k/dt = p x_k; \quad x_k = \int \dot{x}_k dt = \dot{x}_k / p.$$

И операторы

$$z_{11}, z_{22}, z_{12} = z_{21}; \quad z_{11} = m_1 p + (\lambda_1 + \lambda_{12}) + (k_1 + k_{12})/p; \\ z_{22} = m_2 p + (\lambda_2 + \lambda_{12}) + (k_2 + k_{12})/p; \quad z_{12} = z_{21} = \lambda_{12} + k_{12}/p.$$

В результате получим следующую систему уравнений

$$\begin{cases} z_{11} \dot{x}_1 - z_{12} \dot{x}_2 = f_{11} - f_{12} = f_1(t); \\ -z_{21} \dot{x}_1 + z_{22} \dot{x}_2 = -f_{21} + f_{22} = f_2(t). \end{cases} \quad (9)$$

Если принять скорость $\dot{x}_k$ за аналог тока i_k , исходя из подобия выражений для скорости и тока - $\dot{x}_k = dx_k/dt$, $i_k = dQ_k/dt$ (Q_k - электрический заряд), то легко перейти к электрическому аналогу, который приведен на рисунке 2б. При этом, как не трудно видеть, что контура для скоростей $\dot{x}_k$ образуются аналогично контурам для токов, причем общими сопротивлениями для контуров являются элементы, связывающие тела системы.

Сопоставляя полученные уравнения движения с приведенными в первоисточнике [1], легко установить их идентичность, приводя их к виду, принятому в теории цепей. Однако, на наш взгляд, более общим доказательством в допустимости предлагаемого подхода к составлению уравнений является их вывод на основе уравнений Лагранжа

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k} \right] - \frac{\partial L}{\partial q_k} + \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_k} = f_k(t), \quad (10)$$

составляющие которого найдутся на основе уравнений (5) и (8). Примем в качестве обобщенных переменных q_k координаты x_k . Нетрудно установить, что кинетическая энергия системы W равна

$$W = 0,5(m_1 \dot{x}_1^2 + m_2 \dot{x}_2^2). \quad (11)$$

Потенциальная энергия системы V определяется силами упругости F_{x1} и F_{x2} , и найдется как силовая функция

$$V = \int_0^{x_1} F_{x1} dx_1 + \int_{0, x_1}^{x_2, x_1} F_{x2} dx_2,$$

где первый интеграл берется при $x_2 = 0$, а второй при $x_1 = \text{Const}$, равного достигнутому. Силы упругости F_{x1} и F_{x2} легко установить из (5) и (8)

$$F_{x1} = k_1 x_1 + k_{12} x_1 - k_2 x_2; \quad F_{x2} = k_2 x_2 + k_{12} x_2 - k_1 x_1. \quad (12)$$

Проводя интегрирование, в соответствии с принятой выше траекторией перехода из начального в конечное положение, получим

$$V = 0,5(k_1 + k_{12})x_1^2 + 0,5(k_2 + k_{12})x_2^2 + k_{12}x_1x_2.$$

Как нетрудно установить, что производные $\partial V / \partial x_k = F_{xk}$ ($k = 1, 2$) определяют силы (12).

Аналогичным образом найдем функцию Φ , представляющей мощность от сил вязкого трения

$$\Phi = \int_{0,0}^{\dot{x}_1,0} F_{\lambda 1} d\dot{x}_1 + \int_{\dot{x}_1,0}^{\dot{x}_1,\dot{x}_2} F_{\lambda 2} d\dot{x}_2.$$

Так как согласно (5) и (8)

$$F_{\lambda 1} = (\lambda_1 + \lambda_{12})\dot{x}_1 + \lambda_{12}\dot{x}_2; \quad F_{\lambda 2} = (\lambda_2 + \lambda_{12})\dot{x}_2 + \lambda_{12}\dot{x}_1. \quad (13)$$

то после очевидных преобразований, получим

$$\Phi = 0,5(\lambda_1 + \lambda_{12})\dot{x}_1^2 + 0,5(\lambda_2 + \lambda_{12})\dot{x}_2^2 + \lambda_{12}\dot{x}_1\dot{x}_2. \quad (14)$$

Подставляя найденные энергетические функции в уравнение Лагранжа, в котором $L = W - V$, получим уравнения, тождественные уравнениям (5) и (8).

Приведенный пример показывает правомерность определения (направления) сил, действующих на каждое тело при «замороженном» положении других тел системы. Такая возможность предопределена независимостью силовой функции от траектории перехода системы из одного положения в другое при сохранении связей между ними. При этом обратим внимание, что контура скоростей определяются силами f_{kk} , которые находятся при замороженном положении других тел системы.

В качестве другого примера для проверки предлагаемого метода, рассмотрим поглотитель колебаний автомашины [1], кинематическая схема которого приведена на рисунке 3. В отличие от оригинала здесь координаты x_1 и x_2 , определяющие положение масс m_1 и m_2 , отсчитываются от общего начала координат и для симметрии введено демпфирование с коэффициентом трения λ_2 (к оригиналу вернемся ниже). В соответствии с предлагаемым подходом, находим:

– силы, действующие на массу m_1 при изменении x_1 , полагая «замороженным» положение массы m_2 (в точке x_2 , соответствующей положению равновесия)

$$-(m_1 \ddot{x}_1 + k_1 x_1 + \lambda_1 \dot{x}_1) = f_{11}; \quad (15)$$

– удерживая m_1 в исходном положении, находим силы, действующие на нее при перемещении m_2

$$k_1 x_2 + \lambda_1 \dot{x}_2 = f_{12}. \quad (16)$$

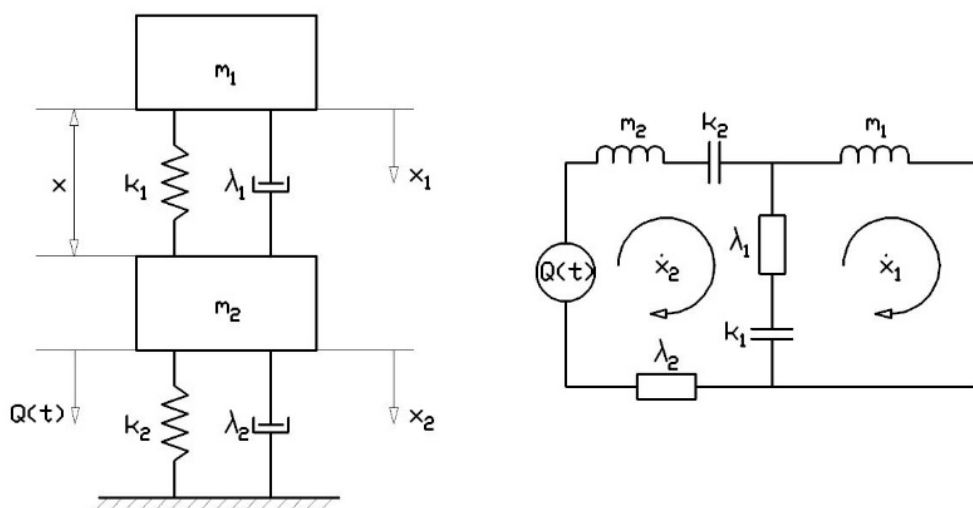


Рисунок 3 – Поглотитель колебаний

Очевидно, что сила f_{12} при увеличении x_2 , будет увлекать массу m_1 , то есть в отличие от силы f_{11} , она будет положительной. В соответствии со вторым законом Ньютона имеем

$$m_1 \ddot{x}_1 + k_1 x_1 + \lambda_1 \dot{x}_1 - (k_1 x_2 + \lambda_1 \dot{x}_2) = 0. \quad (17)$$

Аналогичным образом также в два этапа найдем силы, действующих на массу m_2 : сначала, полагая «замороженным» положение массы m_1 , найдем силу f_{22} от изменения x_2 , а затем силу f_{12} , действующих на рассматриваемое тело от перемещения массы m_1 . С учетом внешней силы $Q(t)$, получим следующее уравнение движения

$$(m_2 \ddot{x}_2 + k_2 x_2 + \lambda_2 \dot{x}_2 + k_1 x_2 + \lambda_1 \dot{x}_2) - (k_1 x_1 + \lambda_1 \dot{x}_1) = Q(t). \quad (18)$$

Преобразуем полученные уравнения движения. Так как в рассматриваемом примере [1] $\lambda_2 = 0$ и положение тела m_1 предлагается определять координатой x , измеряемой между центрами тяжести рассматриваемых тел, тогда, учитывая, что

$$x_1 = x + x_2; \quad \dot{x}_1 = \dot{x} + \dot{x}_2; \quad \ddot{x}_1 = \ddot{x} + \ddot{x}_2.$$

После несложных преобразований уравнения (17) и (18) приводятся к следующему виду

$$(m_1 + m_2) \ddot{x}_2 + k_2 x_2 + m_1 \ddot{x} = Q(t); \quad m_1 (\ddot{x} + \ddot{x}_2) + k_1 x + \lambda_1 \dot{x} = 0. \quad (19)$$

которые идентичны уравнениям движения, приведенными в [1]. Заметим, что хотя они получены на основе закона сохранения энергии (мощности), основой их являются уравнения сил, которые в нашем случае представляют уравнения (17) и (18). То есть, они получены с помощью дополнительной операции, связанной с преобразованием последних. Для чего каждое из уравнений необходимо умножить на скорость и сложить, затем представить силы через производные от энергетических функций. Переход к последним в ряде случаев позволяет упростить конечный вид уравнений. Таким образом, предлагается найти искомые уравнения другим путем, тогда как предлагаемый подход обеспечивает достижение конечного результата без промежуточной операции. Другое преимущество использования уравнений (17) и (18), что в такой записи они позволяют без труда найти электрический аналог системы (рисунок 3).

И, наконец, последний пример [2]. На ри-

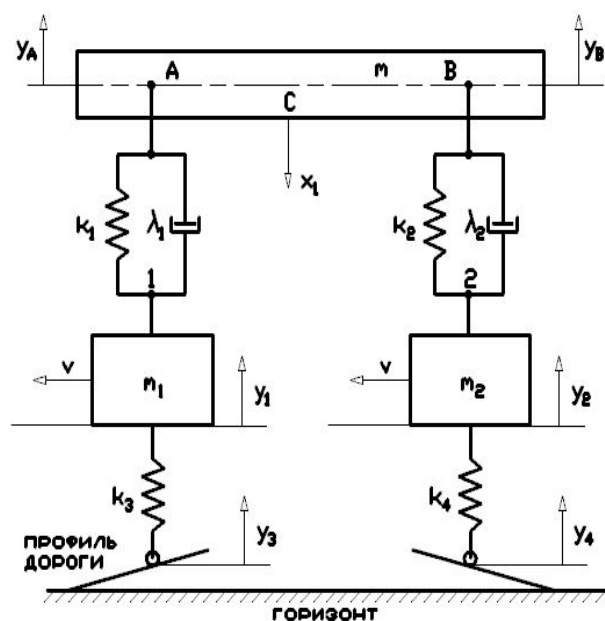


Рисунок 4 – Подвеска автомобиля

сунке 4 приведена упрощенная механическая система автомобиля. Необходимо составить уравнения сил, действующих на массы m_1 и m_2 и сил f_A и f_B , приложенных в точках А и В. Отсчет координат ведется от положения равновесия, которые занимает система при отсутствии внешних сил. К этому примеру приведено подробное описание по составлению уравнений, что позволит наблюдать и достоверность рассматриваемого подхода и его преимущества. Поиск уравнений начнем с уравнения сил, действующих на массу m_1 . В соответствии принятым алгоритмом его удобно представить в следующем виде

$$f_1 = f_{11}(y_1) + f_{1A}(y_A) + f_{13}(y_3), \quad (20)$$

где сила $f_{11}(y_1)$ определяется при «замороженных» y_A и y_2 , $f_{12}(y_A)$ соответственно при $-y_1$ и y_3 , $f_{13}(y_3)$ при $-y_1$ и y_A , причем начальные указанных координат соответствуют положению равновесия. Заметим, сила $f_{11}(y_1)$ препятствует изменению положения, тогда как увеличение y_A и y_3 создают силы, стремящихся сдвинуть массу m_1 в положительном направлении. В результате имеем

$$f_{11}(y_1) = -(m_1\ddot{y}_1 + \lambda_1\dot{y}_1 + k_1y_1 + k_3y_1); f_{1A}(y_A) = k_1y_A + \lambda_1\dot{y}_A; f_{13}(y_3) = k_3y_3, \quad (21)$$

где y_3 — координата точки касания колеса, измеряемая от горизонтальной линии.

Силы, действующие в точке А, найдем в соответствии с предложенным алгоритмом

$$f_{AA}(y_A) + f_{A1}(y_1) - f_A,$$

где

$$f_{A1}(y_1) = k_1y_1 + \lambda_1\dot{y}_1,$$

а сила f_A есть сила взаимодействия между передним колесом и шасси, предполагаем, что она направлена вниз, отсюда и знак «-», как и у силы $f_{AA}(y_A)$.

Таким образом получатся следующие уравнения для сил, приложенных к массе m_1 и точке А

$$-(m_1\ddot{y}_1 + \lambda_1\dot{y}_1 + k_1y_1 + k_3y_1) + k_1y_A + \lambda_1\dot{y}_A + k_3y_3 = 0; -(k_1y_A + \lambda_1\dot{y}_A) + k_1y_1 + \lambda_1\dot{y}_1 - f_A = 0. \quad (22)$$

Указанным способом найдутся уравнения для сил, приложенных массе m_2 и точке В. Они будут аналогичны приведенным уравнениям.

Сравнивая полученные результаты с приведенными результатами в [2], нетрудно установить их идентичность, если их привести к одному виду. Подчеркнем, что принятая нами форма записи общепринята в теории цепей, так как позволяет сразу наблюдать электрические контура, являющиеся аналогами механической системы.

Приведенные примеры показывают работоспособность предлагаемого метода составления уравнений движения, основанного на последовательном «замораживании» положения тел системы. Возникающий алгоритм составления уравнений идентичен известному методу контурных токов (от которого легко перейти к уравнениям от узловых напряжений). При этом заметим, что полученный результат был достигнут на основе только закона динамики Ньютона без каких-либо дополнительных условий, подобного первому закону Кирхгофа и, следовательно, точно также могут быть получены контурные уравнения на основе обобщенного закона Ома [5], если в качестве независимых переменных принять контурные токи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Тонг, К.Н. Теория механических колебаний / К.Н. Тонг. -Л.: Гостехиздат, 1963. -352 с.
- 2 Гарднер, М. Переходные процессы в линейных системах / М. Гарднер, Дж. Бэрнс. -Л.: Гостехиздат, 1961. - 492 с.
- 3 Сешу, С. Анализ линейных цепей / С. Сешу, Н. Балбанян. -М.: Гос. энергит. изд-во, 1963. -552 с.
- 4 Геронимус, Я.Л. Теоретическая механика / Я.Л. Геронимус. -М.: Наука, 1973. -512 с.
- 5 Тамм, И.Е.. Основы теории электричества / И.Е. Тамм. -М.: Наука, 1989. -504 с.

REFERENCES

- 1 K.N. Tong. Mechanical vibrations [Teoriya mekhanicheskikh kolebaniy]. Leningrad. Gostekhizdat Publ. 1963. 352 p.
- 2 Martin Gardner, J. Burns. Transient response of linear systems [Perekhodnye protsessy v lineynykh sistemakh]. Leningrad. Gostekhizdat Publ. 1961. 492 p.
- 3 S. Seshu, N. Balbanyan. The analysis of linear circuits [Analiz lineynykh tsepey]. Moscow. St. Energy Publ. 1963. 552 p.
- 4 Ya.L. Geronimus. Engineering mechanics [Teoreticheskaya mekhanika]. Moscow. Nauka Publ. 1973. 512 p.
- 5 I.E. Tamm. Fundamentals of electricity [Osnovy teorii elektrichestva]. Moscow. Nauka Publ. 1989. 504 p.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

механическая система, метод контурных токов, уравнения Лагранжа, законы Кирхгофа

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Жуловян Владимир Владимирович, докт. техн. наук, профессор НГТУ

Рыжов Илья Александрович, магистрант НГТУ

ПОЧТОВЫЙ АДРЕС:

630092, г.Новосибирск, пр.К.Маркса, 20, НГТУ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕГЕНЕРИРОВАННОГО МОТОРНОГО МАСЛА НА ЗАЩИТУ ДЕТАЛЕЙ УЗЛОВ ТРЕНИЯ СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ ОТ ИЗНАШИВАНИЯ

ФГБОУ ВО «Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского»

ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет»

В.В. Тарасов, А.И. Самсонов

MODELING OF EFFECT OF REGENERATED MOTOR OIL PARAMETERS ON WEAR PROTECTION OF THE PARTS OF FRICTION ASSEMBLIES IN MARINE DIESELS

Maritime State University named after admiral G.I.Nevelskoi (MSU named after adm. G.I.Nevelskoi) 50a, Verkhneportovaya St., Vladivostok, 690059, Russia

Far Eastern Federal University (FEFU) 8, Sukhanova St., Vladivostok, 690090, Russia

Valerii V. Tarasov (Prof. of MSU named after adm. G.I.Nevelskoi)

Anatoliy I. Samsonov (Holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Prof. of FEFU)

ABSTRACT: The authors present the main parameters of the regenerated engine oil. In relation to the study of wear proof effect the authors developed mathematical models of the influence of the parameters of alkalinity and ash content of motor oils on the diesel engine wear. Recommendations are given to ensure the required purification depth of used motor oils from mechanical impurities, depending on their quality.

Keywords: *experimental statistical model, used motor oil, regenerated motor oil, diesel friction assemblies wear*

Представлены основные параметры регенерированного моторного масла. Разработаны математические модели влияния параметров щелочности и зольности моторных масел на износ дизеля. Даны рекомендации по обеспечению требуемой глубины очистки отработанных моторных масел от механических примесей в зависимости от их качества (моторной группы).

В России ежегодно образуется свыше 4 млн. т отработанных смазочных материалов (ОСМ), а накопленные запасы по данным Государственного комитета Российской Федерации по охране окружающей среды (Госкомэкологии России) составляют свыше 400 млн. т. Данные различных источников о количестве сбора и накопленных запасов ОСМ довольно противоречивы. С 1993 по 1998 гг. в России сбор и утилизация ОСМ в промышленном масштабе не производились, и только с 1998 г. появились официальные сведения об использовании ОСМ в качестве котельного топлива для получения тепловой энергии [1].

Отработанные моторные масла (ММ) можно использовать в двигателях судовой энергетической установки (СЭУ) с понижением моторной группы масла, как это показано в исследованиях [4]. Кроме того, их эксплуатационные свойства можно восстанавливать легированием специальными присадками [5,6] до уровня свежих ММ [7]. Регенерация отработанных ММ в установке РУМС-1, по схеме автора, позволяет снизить концентрацию нерастворимых механических примесей (НРП) до 0,05%, полностью удалить из них воду и топливо [2, 3].

Глубокая НРП очистка регенерированных масел до полного удаления НРП не способствует улучшению противоизносных и моюще-диспергирующих восстановленных на их основе нефтепродуктов. Это обусловлено тем, что полное удаление мелкодисперсной фазы нерастворимых загрязнений из регенерированных масел микрофильтрацией или сепарировании в интенсивном центробежном поле способствует отфуговыванию находящихся в коллоидном состоянии большинства присадок типа МАСК, ППС и некоторых модификаторов трения, что приводит к ухудшению эксплуатационных свойств восстановленных ММ [9].

Целью данной статьи было создание математических моделей для обоснования требуемой глубины очистки масла от НРП. Имеются исследования [8, 9], которые показывают, что с позиций износных свойств отработанных ММ, полностью удалять из них механические примеси нет необходимости. Определяя глубину очистки масла, важно учитывать: абразивность НРП, их дисперсный состав, соотношение сгораемых и минеральных (несгораемых) компонентов нерастворимых примесей. Обоснованных рекомендаций по данному вопросу нет.

Для эксперимента были подобраны три группы отработанных масел, применяемых в судовых дизелях [3, 10]. Масла в исходном состоянии полностью соответствовали продуктам М14Г₂(цс), М14Д₂(цл20) и М14Д₂(цл30) (ГОСТ 12337-84).

При реализации эксперимента [3, 10], функция отклика (износ *I* в относительных еди-

ницах) получена в виде полинома второй степени

$$y = 101,5 - 24,15x_1 - 19,7x_2 + 11,12x_1x_2 + 15,28x_1^2 + 5,13x_2^2. \quad (1)$$

Приведенный анализ уравнения (1) показан на рисунке 1, в котором представлены зависимости J -скорости изнашивания роликов для регенерированных масел разного качества (по свойствам моторной группы) в зависимости от коэффициента их регенерации, который в какой-то мере связан с остаточной концентрацией НРП в ММ [3,7]. По рисунку можно заключить, что для регенерированных масел допустимо остаточное загрязнение масел нерастворимыми примесями, которое может составлять в зависимости от группы ММ 0,2–0,8%. Эти показатели центробежным сепарированием легко достигаются.

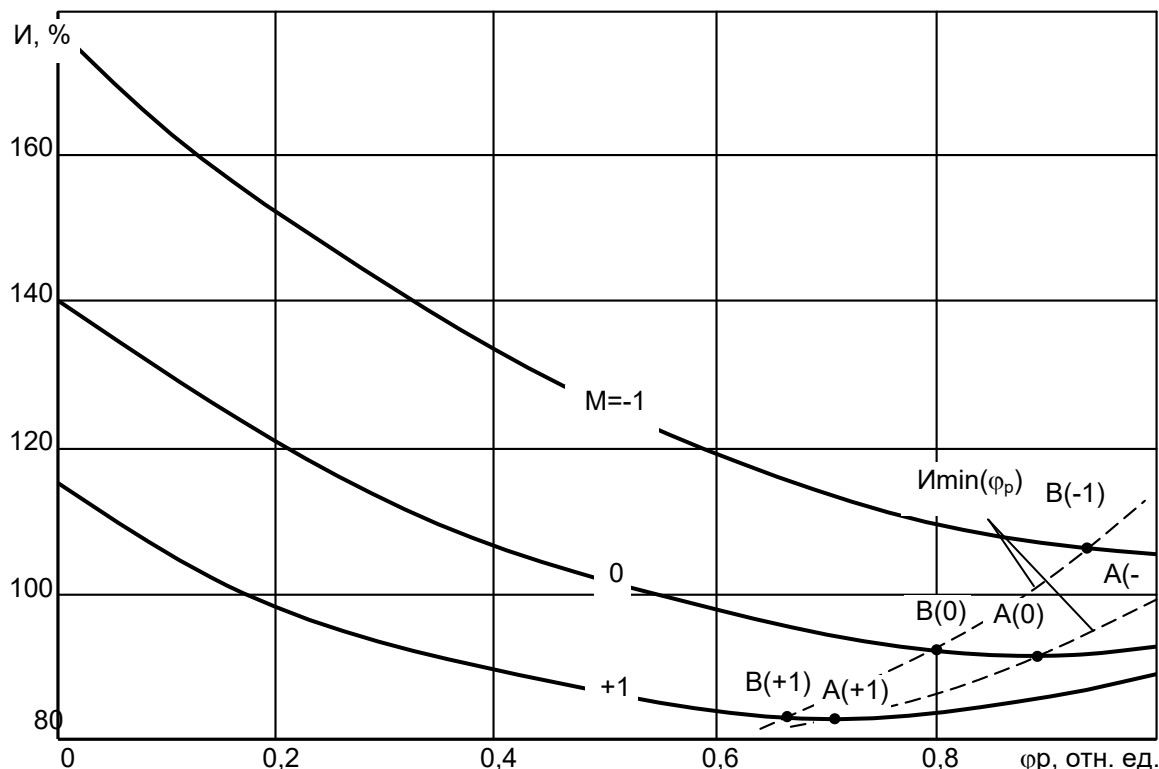


Рисунок 1 – Зависимость износа от коэффициента регенерации отработанного масла

Роль масел в снижении I при увеличении коэффициента регенерации φ_p ослабевает. Если при $\varphi_p = 0$ переход от масла $M = -1$ к $M = 0$ приводил к снижению I на 35%, то при $\varphi_p = 0,5$ ΔI составило всего 14% (рисунок 1). При этом для масел группы Д2 переход от $M = 0$ к $M = +1$ выразился в снижении ΔI соответственно при ($\varphi_p = 0$) на 26%, а при $\varphi_p = 0,5$ — на 21%. Приведенные данные указывают на то, что противоположные характеристики полностью регенерированных масел ($\varphi_p = 1$) сближаются и отличаются не значительно. При увеличении φ_p от 0 до 1 снижение I для масла $M = -1$ произошло в 1,66 раз, а нефтепродукта $M = 0$ и $M = +1$ соответственно в 1,52 и 1,29.

На рисунке 1 пунктирными линиями $I_{\min}(\varphi_p)$ на зависимостях $I(\varphi_p)$ для свойств масел разных эксплуатационных групп выделяются участки со значениями $\varphi_{p(opt)}$, на которых износ минимален. Правая точка A пересечения кривых $I(\varphi_p)$ соответствует их экстремуму. Левая B — допустимому значению остаточного загрязнения НРП отработанных ММ для групп Г2 и Д2 с разным уровнем щелочности. Снижение износных свойств отработанных масел в наибольшей мере проявляется до коэффициента регенерации, равного 0,6. Дальнейшее его повышение, особенно для масел со щелочностью более 20 мг КОН/г, эффекта не дает (рисунок 2). Так при этой щелочности повышение φ_p от 0 до 0,5 снижает I в 1,4 раза, а с 0,5 до 1 всего на 8,8%.

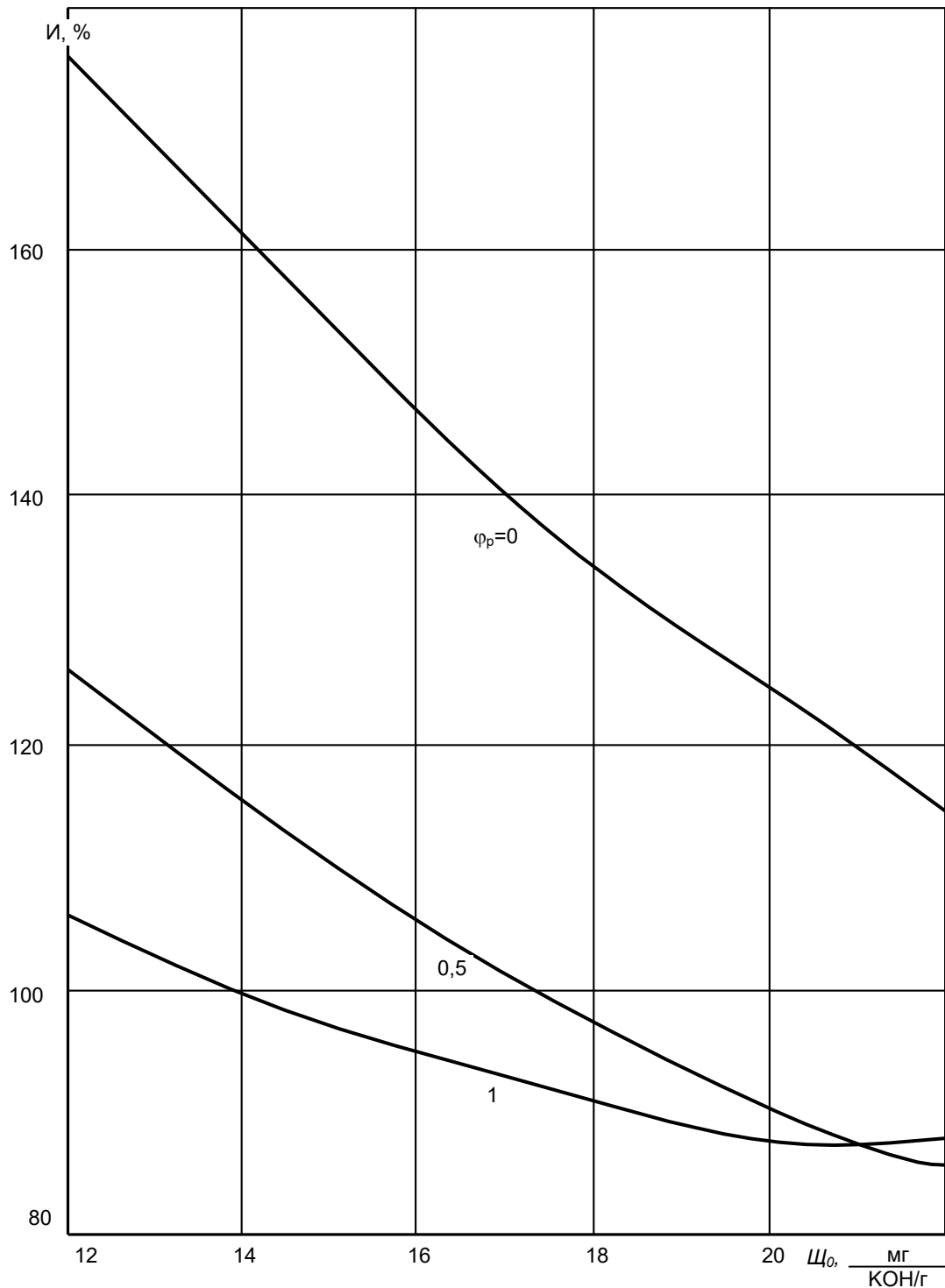


Рисунок 2 – Влияние качества и глубины регенерации масла на его износные свойства

Увеличение коэффициента регенерации φ_p более 0,5 для масел группы Д2 не приводит к значительному снижению I . Эффект может составить не более 10% (рисунок 2).

Пределы центрифугирования отработанных масел по их коэффициенту регенерации могут быть найдены путем исследования зависимости (1) на экстремум. Для этого необходимо взять первую производную по dy/dx_1 и приравнять ее нулю

$$\frac{dy}{dx_1} = 24,15 + 11,12x_2 + 2 \cdot 15,28x_1 = 0; \quad x_{1(\text{opt})} = \frac{25,15 - 11,12x_2}{30,56} = 0,79 - 0,36x_2. \quad (2)$$

Для отработанных масел с уровнем эксплуатационных свойств, закодированных как

$M = -1, 0$ и $+1$ допустимо регенерацию проводить до x_1 , соответственно равное 1,15, 0,79 и 0,43. При достижении этих значений коэффициента регенерации дальнейшее углубление очистки отработанных масел от НРП не приводит к снижению их износных свойств. Для масла М14Г₂(цс) в пределах рассматриваемого фактора пространства ($x_1 = 0-1$) экстремума не наблюдается, что указывает на необходимость очистки этого продукта до достижения предела центрифугирования $x_{ocm} = 0,2-0,3\%$ (см. данные эксперимента [3]).

Для масел группы Д₂ стабилизация J наблюдается при $x_1 > x_{1(opt)}$, то есть для $M = 0$ она происходит когда x_1 становится больше 0,79. При очистке масла $M = +1$ стабилизация J , как показал однофакторный эксперимент, происходит при $x_1 \geq 0,43$ [7].

Окончательные рекомендации по обеспечению требуемой глубины очистки отработанных масел в зависимости от их качества представлены в таблице 1. Рекомендации работают не только для масел выделенных групп, но и для всех свежих масел, у которых группа эксплуатационных свойств M может идентифицироваться через зольность фугата ($З_M$, %) и щелочность ($Щ_0$, мг-КОН/г) следующими соотношениями [7]

$$M = \frac{Щ_0 - 20}{10}; \quad M = \frac{З_M - 3,0}{1,5}.$$

Применительно к судовым унифицированным свежим ММ, эксплуатационные свойства которых идентифицируются показателем $Щ_0$ и $З_M$ или их совокупностью, уравнение (1) может быть трансформировано в зависимости следующего вида

$$И = 140,9 - 109,32\varphi_p - 30,9M + 22,24\varphi_p M + 61,12\varphi_p^2 + 5,13M^2; \quad (3)$$

$$И = 223,2 - 153,8\varphi_p - 5,142Щ_0 + 2,224\varphi_p Щ_0 + 61,12\varphi_p^2 + 0,0512Щ_0^2; \quad (4)$$

$$И = 283,2 - 153,8\varphi_p - 34,34З_M + 14,82\varphi_p + 61,12\varphi_p^2 + 2,27З_M^2. \quad (5)$$

В этом случае ограничения по требуемой глубине очистки отработанных масел рассматриваемых групп Г₂ и Д₂, задаваемой коэффициентом $\varphi_{p(opt)}$ регенерации могут быть рассчитаны по формулам

$$\varphi_{p(opt)} = 0,894 - 0,182M; \quad (6)$$

$$\varphi_{p(opt)} = 1,258 - 0,1836Щ_0; \quad (7)$$

$$\varphi_{p(opt)} = 1,258 - 0,1212З_M. \quad (8)$$

Значение этих коэффициентов регенерации для масел с низким уровнем моюще-диспергирующих свойств близко к единице, что указывает на необходимость полной их очистки от крупнодисперсных НРП вплоть до предела центрифугирования, когда в регенерированном масле остаются дисперсные фазы с размерами частиц менее 0,7 мкм. Остаточное загрязнение НРП отработанных регенерированных масел более высших эксплуатационных групп (например Д₂) может быть выше. Этот уровень концентрации мелкодисперсных НРП не окажет заметного влияния на износные свойства регенерированных и восстановленных масел (таблица 1).

Таблица 1 – Рекомендуемый уровень регенерации отработанных масел и допустимого остаточного их загрязнения НРП

Моторное масло	Характеристика свежего масла		Применяемое топливо	Форсировка дизеля по p_{me} , МПа	Коэффициент регенерации φ_p , отн. ед.	Остаточное загрязнение c_{ocm} , % масс.
	щелочность $Щ_0$, мг-КОН/г	зольность $З_M$, % масс.				
М10Г ₂ (цс) М14Г ₂ (цс) М16Г ₂ (цс)	8–12	1,2–1,6	Л-0,2-61 СМТ ТГВК	0,8–1,2	0,9	0,1–0,2
М10Д ₂ (цл20) М14Д ₂ (цл20)	18–23	2,8–3,2	СЛ, ДГ Ф6, Ф12 М-40В	1,2–1,8	0,8–0,9	0,3–0,5
М14Д ₂ (цл30) М16Д ₂ (цл30)	27–32	4,2–4,8	СВТ ДМ М-100	1,2–2	0,7–0,8	0,4–0,8

Эксплуатационные наблюдения за старением в форсированных тронковых дизелях регенерированных масел с восстановленными легированием многофункциональными присадками показало, что выполнение рекомендаций таблицы 1 по глубине очистки отработанных ММ способствует сохранению их моторных качеств на уровне использования свежих продуктов, соответствующей группы [4, 7].

Остаточная доля многофункциональных присадок в регенерированных маслах, если полностью не удалять НРП и соблюдать требования, приведенные в таблице 1, в зависимости от свойств группы ММ и условий его использования, может составлять 10-35%. Переходя в восстановленное масло, они полностью компенсируют расходы добавляемых свежих присадок при его легировании на диспергирование и стабилизацию остаточных НРП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1 Тарасов, В.В. Проблемы утилизации и регенерации отработанных смазочных материалов на судах: пути их решения восстановлением моторных свойств и повторным использованием в судовых дизелях / В.В. Тарасов // Современные направления теоретических и прикладных исследований 2010: сб. науч. тр. -Одесса: Транспорт, 2010. -Т.1. -С. 65-71.

2 Тарасов, В.В. Принципиальная схема установки по регенерации отработанного моторного масла в судовых условиях / В.В. Тарасов, П.В. Кулямов // -Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. -2015. -№2. -С. 175-179.

3 Тарасов, В.В. Обоснование глубины очистки отработанных моторных масел от механических примесей при их регенерации и повторном использовании в СЭУ / В.В. Тарасов // -Науч. проб. транс. Сиб. и Дальн. Вост. 2016. №3-4. -С. 99-108.

4 Тарасов, В.В. Оценка эффективности использования регенерированного моторного масла в судовых дизелях / В.В. Тарасов // -Науч. проб. транс. Сиб. и Дальн. Вост. -2010. -№2. -С. 146-152.

5 Кича, Г.П. Эффективность применения в судовых дизелях регенерированных восстановленных отработанных моторных масел / Г.П. Кича, В.В. Тарасов, Е.М. Деревцов // -Науч. проб. транс. Сиб. и Дальн. Вост. -2016. -№1-2. -С. 83-91.

6 Кича, Г.П. Регенерирование отработанных моторных масел и восстановление их эксплуатационных свойств на судах / Г.П. Кича, В.В. Тарасов, С.В. Глушков // Морские интеллектуальные технологии. -2016. -№3(33). -Т.1. -С. 126-132.

7 Кича, Г.П. Ресурсосберегающее маслоиспользование в судовых дизелях / Г.П. Кича, Б.Н. Перминов, А.В. Надежкин. -Владивосток: Мор. гос. ун-т, -2011. -372 с.

8 Надежкин, А.В. Имитационная модель трибодиагностики двигателей внутреннего сгорания / А.В. Надежкин, А.В. Безвербный, Г.П. Кича // -Трение и смазка в машинах и механизмах. -2009. -№3. -С. 6-14.

9 Кича, Г.П. Триботехнические характеристики нерастворимых продуктов загрязнения моторных масел и их влияние на износ дизеля / Г.П. Кича, Г.М. Липин, С.П. Полоротов // -Трение и износ. -1998. -Т. 7, №6. -С. 1068-1078.

10 Спиридонов, А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А.А. Спиридонов. -М.: Машиностроение, 1981. -184 с.

1 V.V. Tarasov. Problems of recycling used lubricants on ships. Solutions via restoration of lubricating properties and further reuse in marine diesel engines [Problemy utilizatsii i regeneratsii otrabotannykh smazochnykh materialov na sudakh: puti ikh resheniya vosstanovleniem motornykh svoystv i povtornym ispol'zovaniem v sudovykh dizelyakh]. *Proceedings of the conference "Current trends in theoretical and applied research 2010"* [Sovremennye napravleniya teoreticheskikh i prikladnykh issledovaniy 2010]. Odessa. Transport Publ. 2010. Vol.1. pp. 65-71.

2 V.V. Tarasov, P.V. Kulyamov. Schematic diagram of the plant for regeneration of used engine oil onboard [Printsipial'naya skhema ustanovki po regeneratsii otrabotannogo motornogo masla v sudovykh usloviyakh]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*. 2015. No.2. pp. 175-179.

3 V.V. Tarasov. Substantiation of the depth of cleaning of used motor oils from mechanical impurities during their regeneration and reuse in diesel engine [Obosnovanie glubiny oчитki otrabotannykh motornykh masel ot mekhanicheskikh primesey pri ikh regeneratsii i povtornom ispol'zovanii v SEU]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*. 2016. No. 3-4. pp. 99-108.

4 V.V. Tarasov. Estimation of efficiency of the use of regenerated motor oil in marine diesel engines [Otsenka effektivnosti ispol'zovaniya regenerirovannogo motornogo masla v sudovykh dizelyakh]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*. 2010. No.2. pp. 146-152.

5 G.P. Kicha, V.V. Tarasov, E.M. Derevtsov. Efficiency of use of regenerated motor oils in marine diesel engines [Effektivnost' primeneniya v sudovykh dizelyakh regenerirovannykh vosstanovlennykh otrabotannykh motornykh masel]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*. 2016. No. 1-2. pp. 83-91.

6 G.P. Kicha, V.V. Tarasov, S.V. Glushkov. Regeneration of used motor oils and restoration of their original properties [Regenerirovannye otrabotannykh motornykh masel i vosstanovlenie ikh ekspluatatsionnykh svoystv na sudakh]. *Marine intellectual technologies [Morskie intellektual'nye tekhnologii]*. 2016. No. 3(33), -Vol. 1. pp. 126-132.

7 G.P. Kicha, B.N. Perminov, A.V. Nadezhkin. Resource-conserving oil consuming in marine diesels [Resursosberegayushchee masloispol'zovanie v sudovykh dizelyakh]. Vladivostok. Marytime St. Univ. Publ. 2011. 372 p.

8 A.V. Nadezhkin, A.V. Bezverbnyy, G.P. Kicha. Imitation model of tribodiagnostics of internal combustion engines [Imitatsionnaya model' tribodiagnostiki dvigateley vnutrennego sgoraniya]. *Trenie i smazka v mashinakh i mekhanizmkh*. 2009. No. 3. pp. 6-14.

9 G.P. Kicha, G.M. Lipin, S.P. Polorotov. Tribotechnical characteristics of insoluble oil contaminants and their effect on engine wear [Tribotekhnicheskie kharakteristiki nerastvorimyykh produktov zagryazneniya motornykh masel i ikh vliyanie na iznos dizelya]. *Friction and wear [Trenie i iznos]*. 1998. Vol. 7. No. 6. pp. 1068-1078.

10 A.A. Spiridonov. Planning an experiment in the study of technological processes [Planirovanie eksperimenta pri issledovanii tekhnologicheskikh protsessov]. Moscow. Mashinostroenie Publ. 1981. 184 p.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

экспериментально-статистическая модель, отработанное моторное масло, регенерированное моторное масло, изнашивание узлов трения дизеля

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Тарасов Валерий Васильевич, профессор МГУ им. адм. Г.И. Невельского
Самсонов Анатолий Иванович, докт. техн. наук, профессор ФГАОУ ВО ДВФУ

ПОЧТОВЫЙ АДРЕС:

690059, г.Владивосток, ул.Верхнепортовая, 50а, МГУ им. адм. Г.И. Невельского
690950, г.Владивосток, ул.Суханова, 8, ФГАОУ ВО ДВФУ

КАЧЕСТВЕННО-КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ВТОРИЧНЫХ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ СУДОВЫХ СРЕДНЕОБОРОТНЫХ ДИЗЕЛЕЙ

ФГБОУ ВО «Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского»

М.С. Дрозд

QUALITATIVE AND QUANTITATIVE ANALYSIS OF WASTE ENERGY OF MARINE MEDIUM-SPEED DIESELS

Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoi (MSU named after adm. G.I. Nevelskoi) 50a, Verkhneportovaya St., Vladivostok, 690059, Russia

Mikhail S. Drozd (Assistant Professor of MSU named after adm. G.I. Nevelskoi)

ABSTRACT: Improvement of ship power plants through the use of deep waste energy utilization can be fruitful only when data are available on the distribution of heat losses among the components of heat and exergy balance.

Keywords: medium-speed engine, waste energy, heat losses, heat balance, exergy

Совершенствование судовых энергетических установок путем использования систем глубокой утилизации вторичных энергоресурсов может быть плодотворным только в том случае, когда известны данные о распределении потерь теплоты по составляющим теплового и эксергетического баланса.

Полным методом для нахождения составляющих теплового баланса судовых двигателей внутреннего сгорания (ДВС) является экспериментальное исследование посредством современных измерительных приборов (теплорасходомера, анемометра, пирометра и др.), способных при повышенной вибрации и температурах теплоносителей определять точные значения всех составляющих. Однако, проведение таких исследований часто невозможно, ввиду их сложности и дороговизны.

Противоположным решением при определении составляющих теплового баланса может выступать использование расчетных методик. Рассмотрим существующие методы теоретического определения составляющих теплового баланса.

Как известно, выделяющаяся теплота при сгорании топлива преобразовывается в эффективную работу только частично, остальное составляют тепловые потери.

Для определения особенностей распределения теплоты в различных типах судовых среднеоборотных двигателях, воспользуемся относительным тепловым балансом

$$1 = Q_e + Q_{ог} + Q_{онв} + Q_{охл} + Q_{см} + Q_{ост} \quad (1)$$

Каждое слагаемое данного уравнения представляет собой относительную долю затрат энергии топлива. Составляющая Q_e , будет равна эффективному коэффициенту полезного действия (КПД) двигателя η_e .

Теплота, эффективно преобразованная в механическую энергию, определяется по известной в термодинамике формуле

$$\eta_e = \frac{3600}{Q_p^H g_e} = \frac{3600 P_e}{Q_p^H B_e}, \quad (2)$$

где P_e – мощность дизеля, кВт;

Q_p^H – удельная низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг;

B_e – часовой расход топлива, кг/ч.

При определении количества теплоты, отведенного с отработавшими газами, достаточно использовать эмпирическую зависимость, предложенную в диссертационной работе А.И. Богданова [1]

$$Q_{ог} = c_p (T_{ог} - T_{окр}) \frac{g_e P_e (1 + 28,95 \alpha \varphi_a L_0)}{3600} \quad (3)$$

При расчетах высокофорсированных двигателей, где целесообразно применение систем утилизации теплоты, потери теплоты при охлаждении наддувочного воздуха (ОНВ) определяются по формуле

$$Q_{онв} = c_p (T_{ог} - T_{окр}) \frac{28,95 \alpha \varphi_a L_0 g_e P_e}{3600} \quad (4)$$

$$\alpha = 9,5 \sqrt{\frac{d p_{me} (1,0 + 0,1 s / d)}{(1,0 + 10 d)(1,0 + 1,25 p_{me})}}; \quad (5)$$

$$\varphi_a = 1,085 + 0,375 p_s, \quad (6)$$

где c_p – средняя теплоемкость отработавших газов, кДж/(кг·К);

$(T_{oe} - T_{окр})$ – разность температур отработавших газов и окружающей среды, К;

α – коэффициент избытка воздуха при сгорании;

φ_a – коэффициент продувки воздуха;

L_0 – теоретически необходимое количество воздуха для сгорания топлива, кмоль/кг;

p_{me} – среднее эффективное давление, МПа;

p_k – давление наддува, МПа.

Указанная формула устанавливает зависимость величины потерь теплоты, отводимой от ОНВ, с показателями режима нагрузки двигателя (g_e , N_e) и уровнем его форсировки (α).

Температуру отработавших газов, вернее всего, рассчитывать с помощью уравнения множественной линейной регрессии, предложенной в диссертационной работе А.А. Кардакова [2]

$$T_{oe} = 227,1 + 92,5 p_{me} + 26,3 c_m, \quad (7)$$

где c_m – средняя скорость поршня, м/с.

Из анализа уравнения видно, температура отработавших газов косвенно характеризует тепловое и теплонапряженное состояние дизелей, зависит от показателей форсировки двигателя и влияет на тепловые потери отработавших газов на номинальном и переменном режимах.

С помощью зависимости, полученной при обработке данных тепловых балансов судовых двигателей внутреннего сгорания, определяются потери в охлаждающую воду на номинальном режиме работы дизеля

$$Q_{охл} = 6,577 - 1,205 c_m + 78,15 g_e \pm 1,447. \quad (8)$$

Наибольшее влияние на тепловые потери в охлаждающую воду оказывают средняя скорость поршня и удельный расход топлива. При этом температура охлаждающей воды, не выходит за пределы 56-78 °С для $Q_{охл}$, что является незначительным.

Величина тепловых потерь смазочного масла, определяется нагревом масла во время смазки и охлаждения поршня, для расчета которых, удобны, показатели теплонапряженности поршня предложенные А.Н. Костиным [3]

$$Kr_k = 5,85 \left(\frac{d}{\eta_n p_k} \right)^{0,38} c_m^{0,5} \left(p_{me} g_e \frac{T_k}{293} \right)^{0,88}, \quad (9)$$

где η_n – коэффициент наполнения;

T_k – температура воздуха на входе в ОНВ, К.

Приведенный тепловой показатель указывает на режим нагрузки дизеля (g_e , c_m) и уровень его форсированности (p_{me} , p_k), который входит в регрессивная зависимость для получения величины тепловых потерь смазочного масла

$$q_{cm} = 1 + 1,75 \sqrt[3]{Kr_k}, \quad (10)$$

$$Q_{cm} = q_{cm} G_t, \quad (11)$$

где Q_{cm} – абсолютное значение тепловых потерь смазочного масла, кВт;

G_t – секундный расход топлива, кг/с.

Для определения остаточного члена теплового баланса $Q_{ост}$ достаточно разности всех перечисленных составляющих теплового баланса в соотношении к сожженному топливу

$$Q_{ост} = 100 - (Q_e + Q_{oe} + Q_{онв} + Q_{охл} + Q_{cm}), \quad (12)$$

где 100 – это количество сожженного топлива, %.

Однако ценность тепловой энергии определяется не только количеством, но и тем, в какой мере она может быть преобразована в работу. Поскольку из двигателя выходят энергии разного качества, то их сравнение и оптимизация возможны при сведении всех потоков к

одному масштабу, что выполнимо при составлении эксергетического баланса двигателя.

В отличие от энергетического баланса, эксергетический баланс базируется на первом и втором законах термодинамики, учитывая при этом потери от необратимости и неравномерности реальных процессов. Это отличие позволяет оценить качественный потенциал вторичных энергоресурсов двигателя, что дает возможность найти новые способы эффективной глубокой утилизации вторичных энергоресурсов.

Таблица 1 – Расчетные данные составляющих тепловых балансов высокофорсированных систем охлаждения двигателей (СОД)

Обозначение двигателей		Составляющие теплового баланса, %					
Фирма изготовитель	Фирменное название	Q_e	$Q_{ог}$	$Q_{онв}$	$Q_{охл}$	$Q_{см}$	$Q_{ост}$
Wärtsilä (Финляндия)	VASA 64	51,5-52	22,4-23,2	15,3-15,8	6,8-7,2	2,7-2,9	1,1-1,7
	VASA 46	47,4-51	25,3-26,1	14,1-15	5,4-7,1	2,6-2,8	1,5-1,6
	VASA 32	47-49,4	24,5-25,9	14,5-14,9	7,7-8,1	2,5-2,8	1,2-1,3
	VASA 22	49	24,7	15,1	6,9	2,5	1,8
	VASA SW38	47,5-50	26,9-28,2	13,6-14	5,4-5,9	2,5-2,8	1,6
	VASA SW28	48,3	24,3	15,7	7,3	3,1	1,3
	W26X	48	23,5	16,3	8,1	2,8	1,3
MAN-B&W Diesel AG (Германия)	L58/64	49,6	23,8	17,5	4	2,8	2,3
	L51/60	48,7	24,5	18,2	5,4	1,8	1,4
	L/V 48/60	49-50	22,1-22,8	15,6-15,9	7,3-9,8	2,6-2,8	2,2-2,4
	L/V (L) 40/54	47-50	22,9-23,6	11,8-12,4	10,9-13	2,3-2,7	1,5-1,6
	L/V 52/55	48-51	21,4-23,5	13,9-15,1	8,2-8,9	2,3-2,7	1,7-1,9
	L32/44	50	19,1	20,4	6,5	2,2	1,8
	L/V 32/40	48-49	24,5-26,4	11,6-14,7	8,7-8,9	2,6-2,8	1,2-1,3
	L/V 28/32	49,5-50	26,8-28,1	7,9-10	10,5-10,8	2,2-2,4	1,1-1,3
	V28/33	50	26,1	16,1	5,7	1,3	0,8
	L/V 40/45	50-52,7	21,9-23,7	12,2-13,1	9,1-10,8	2,4-2,5	1,8-2,4
	L/V 32/36	47-48	24,3-25	11,7-14,7	10,2-12	2,5-2,7	1,3-1,6
	L 27/38	47	25,8	14,5	9,1	2,7	0,9
	L/V 25/30	48	26,3	13,5	9,1	2,2	0,9
SEMT-Pielstick (Франция)	PC4	46-51	24,7-26,8	17,6-19,1	8,9-11,7	2,4-2,8	3-3,6
	PC3	44	25,3	15,5	10,5	2,3	2,4
	PC2	41-50	21,5-26,1	14,2-15,2	9,9-14,4	1,8-2,7	1,5-1,7
	PC40L	53	22,5	10,5	8,5	2,7	2,8
	PC30L	52	23,8	11,3	8,7	2,5	1,7
	PC20L	49	24,7	11,3	11	2,5	1,5
	PA6	44-48	26,1-27,7	12,7-13,1	9,5-12	2,4-2,5	0,9-1,2
	PA5	46	27,1	13	10,9	2,1	0,9
MaK-Caterpillar Motoren (Германия)	M32	48-51	18,2-18,5	20,5-20,9	9,3-10,2	2,6-2,8	1,1-1,2
	M35	47	24,5	14,4	10,4	2,4	1,3
	M43	46	20,7	19,3	9,4	2,8	1,8
	M61	50	22,5	11,6	10,2	2,4	3,3
	M453C	47	24,7	13,7	11,1	2,4	1,1
	M552	44-47	23,7-24,9	14,3-16	10,7-12,5	2,4-2,6	1,7-1,8
	M601C	44	25,7	12,1	12,3	2,6	3,3
	3600	48-50	21,1-26,9	15,7-19,3	9,1-9,3	2,8	0,9-1,1

Функционирование судовых энергетических установок (СЭУ) в той или иной степени обусловлено обменом энергией с окружающей средой. При передаче от одного тела к другому и к среде энергии в форме теплового потока вместе с ним сообщается и определенное количество эксергии. Если приемником теплоты служит окружающая среда с температурой $T_{окр}$, удельная эксергия теплового потока, имеющего температуру T , составляет

$$E = Q \left(1 - \frac{T_{окр}}{T} \right). \quad (13)$$

Величина $1 - T_{окр}/T$ называется эксергетической температурой. При $T < T_{окр}$ направления потоков противоположны: тепловой движется от окружающей среды (отрицателен), эксерге-

тический – всегда к среде (положителен).

Таблица 2 – Расчетные данные составляющих эксергетических балансов высокофорсированных СОД

Обозначение двигателей		Составляющие эксергетического баланса, %					
Фирма изготовитель	Фирменное название	$E_{пол}$	$E_{ог}$	$E_{онв}$	$E_{охл}$	$E_{см}$	$E_{вн}$
Wärtsilä (Финляндия)	VASA 64	51,5-52	5,91-6,12	2,98-3,08	0,86-0,91	0,2-0,22	37,67-38,55
	VASA 46	47,4-51	6,65-6,86	2,74-2,91	0,7-0,92	0,19-0,21	38,1-42,32
	VASA 32	47-49,4	6,54-6,92	2,84-2,92	1-1,05	0,19-0,22	39,49-42,43
	VASA 22	49	6,50	2,93	0,9	0,19	40,48
	VASA SW38	47,5-50	7,10-7,44	2,65-2,73	0,69-0,76	0,19-0,21	38,86-41,87
	VASA SW28	48,3	6,46	3,03	0,93	0,23	41,05
	W26X	48	6,16	3,23	1,04	0,22	41,35
MAN-B&W Diesel AG (Германия)	L58/64	49,6	6,38	3,40	0,51	0,21	39,9
	L51/60	48,7	6,49	3,59	0,69	0,14	40,39
	L/V 48/60	49-50	5,81-6	3,04-3,1	0,95-1,27	0,2-0,21	39,42-41
	L/V (L) 40/54	47-50	5,98-6,16	2,31-2,43	1,43-1,7	0,17-0,2	39,51-43,11
	L/V 52/55	48-51	5,65-6,2	2,71-2,94	1,06-1,15	0,18-0,21	38,5-42,4
	L32/44	50	5,12	3,96	0,83	0,17	39,92
	L/V 32/40	48-49	6,54-7,05	2,25-2,85	1,12-1,15	0,2-0,22	39,73-41,89
	L/V 28/32	49,5-50	7,13-7,47	1,52-1,92	1,37-1,4	0,16-0,18	39,03-40,32
	V28/33	50	6,84	3,12	0,74	0,09	39,21
	L/V 40/45	50-52,7	5,80-6,28	2,38-2,55	1,16-1,37	0,18-0,19	36,91-40,48
	L/V 32/36	47-48	6,44-6,63	2,30-2,9	1,31-1,54	0,2-0,21	40,72-42,75
	L 27/38	47	6,89	2,78	1,17	0,21	41,95
	L/V 25/30	48	7,02	2,59	1,18	0,16	41,05
SEMT-Pielstick (Франция)	PC4	46-51	6,59-7,16	3,48-3,78	1,17-1,53	0,19-0,22	36,31-42,57
	PC3	44	6,68	3,04	1,37	0,17	44,74
	PC2	41-50	5,76-6,99	2,77-2,96	1,27-1,84	0,14-0,21	38-49,06
	PC40L	53	5,94	2,04	1,1	0,21	37,71
	PC30L	52	6,35	2,18	1,1	0,19	38,18
	PC20L	49	6,52	2,20	1,41	0,19	40,68
	PA6	44-48	7,02-7,45	2,44-2,52	1,23-1,55	0,18-0,19	40,29-45,13
	PA5	46	7,18	2,52	1,4	0,16	42,74
MaK-Caterpillar Motoren (Германия)	M32	48-51	4,77-4,85	3,94-4,01	1,18-1,3	0,21-0,22	38,62-41,9
	M35	47	6,54	2,79	1,34	0,18	42,15
	M43	46	5,46	3,74	1,19	0,21	43,4
	M61	50	6,03	2,29	1,33	0,19	40,16
	M453C	47	6,52	2,63	1,43	0,18	42,24
	M552	44-47	6,30-6,62	2,82-3,15	1,36-1,59	0,19-0,2	41,44-45,33
	M601C	44	6,78	2,32	1,57	0,21	45,12
	3600	48-50	5,63-7,18	3,09-3,08	1,17-1,2	0,21	38,32-42,12

Теоретические основы эксергетического анализа изложены в работах [4], а их применение к дизельным двигателям и установкам в [5]. С учетом рекомендаций основных положений, формул и рекомендаций названных работ эксергетический баланс СОД можно записать в следующем виде

$$E_m = E_{пол} + E_{ог} + E_{онв} + E_{охл} + E_{см} + E_{вн}, \quad (14)$$

$$E_T = BQ_H^p; E_{пол} = Q_e; \quad (15)$$

$$E_{ог} = G_a c_{p,ог} (T_{ог} - T_{окр}) \left(1 - \frac{T_{окр}}{T_{ог,ср}} \right), \quad (16)$$

$$E_{онв} = Q_{онв} \left(1 - \frac{T_{окр}}{T_{онв,ср}} \right), \quad (17)$$

$$E_{охл} = Q_{пв} \left(1 - \frac{T_{окр}}{T_{пв,ср}} \right), \quad (18)$$

$$E_{см} = Q_{см} \left(1 - \frac{T_{окр}}{T_{см\,cp}} \right), \quad (19)$$

где E_t – эксергия топлива, Дж/с;

$E_{пол}$ – полезно использованная эксергия;

$E_{ое}$ – эксергия теплоты, отводимой с отработавшими газами, Дж/с;

$E_{онв}$ – эксергия теплоты, отводимой с охлаждением наддувочного воздуха, Дж/с;

$E_{охл}$ – эксергия теплоты, отводимой с пресной водой, Дж/с;

$E_{см}$ – эксергия теплоты, отводимой с маслом, Дж/с;

$E_{ост}$ – внутренние потери эксергии в двигателе, Дж/с.

Количественный и качественный анализ вторичных энергоресурсов современных СОД показывает снижение общего уровня потерь и перераспределение статей энергетического и эксергетического балансов. В основном это явилось следствием снижения температуры отработавших газов на 50-90 °С и повышение наддувочного воздуха на 35-55 °С по сравнению с более ранними моделями среднеоборотных двигателей (1970-80 гг. постройки).

Сопоставлением эксергетического баланса с тепловым балансом рассматриваемых СОД найдено, что в последнем удельный вес аналогичных статей расхода существенно отличается от полученных при эксергетическом расчете значений. Так, потери с отходящими газами в тепловом балансе составили 18,2-26,9%, а в эксергетическом 4,77-7,45%, это объясняется низким энергетическим потенциалом отходящих газов, что, естественно, сказалось на численном значении их эксергии.

В таких условиях известные (традиционные) принципы и системы утилизации теплоты СОД стали малоэффективными.

Тем не менее, анализ эксергетических потерь СОД показал, что энергия отработавших газов, несмотря на снижение температурного потенциала, осталась наиболее пригодной для получения дополнительных видов энергии (электрической и тепловой), которую можно использовать для судовых и технологических нужд.

Объективность получаемых при таком анализе данных обусловлена прежде всего тем, что они основаны на расчете минимально необходимых материальных и энергетических затрат на реализацию исследуемых систем утилизации вторичных энергоресурсов.

Поскольку, применение сернистых топлив значительно сократило возможности традиционных систем утилизации вторичных энергоресурсов, а на выходе из двигателя образовались потоки энергии разного качества, то их корректное сравнение и оптимизация возможны при совместном энергетическом и теплофикационном использовании в комплексных системах утилизации.

Дальнейшая научная задача заключается в определении и выборе наилучшего варианта энергосберегающей системы на основе их оценки эффективности по термодинамическим критериям (эффективный КПД, коэффициент использования теплоты, КПД гребной установки и эксергетический КПД), а также массовым и технико-экономическим показателям. Публикации по оптимизации параметров и схем утилизационных систем среднеоборотных судовых ДВС в комплексной постановке практически отсутствуют.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Богданов, А.И. Повышение мощностных, экономических и экологических показателей силовых установок, за счет утилизации теплоты отработавших газов: дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02 / Богданов Алексей Иванович. - Челябинск, 1999. -184 с.
- 2 Кардаков, А.А. Оценка технического состояния судовых дизелей и систем газовойпуска методом теплового диагностирования: дис. ...канд. техн. наук: 05.08.05 / Кардаков Алексей Аркадьевич. -СПб., 2011. -215 с.
- 3 Костин, А.Ф. Роль энерго- и эксергобалансов в термодинамическом исследовании / А.Ф. Костин, В.И. Шишкин // Сб. науч.-метод. статей по теплотехнике. -М.: Высш. шк., 1977. -Вып. 2. -С. 6-12.
- 4 Бродянский, В.М. Эксергетический метод термодинамического анализа / В.М. Бродянский. -

REFERENCES

- 1 A.I. Bogdanov. Increasing power, economic and environmental performance of power plants, due to the utilization of the exhaust gases heat [Povyshenie moshchnostnykh, ekonomicheskikh i ekologicheskikh pokazateley silovykh ustanovok, za schet utilizatsii teploty otrabotavshikh gazov]. Chelyabinsk. 1999. 184 p.
- 2 A.A. Kardakov. Assessment of the technical condition of marine Diesel engines and exhaust gases systems using thermal diagnostics [Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya sudovykh dizeley i sistem gazovypuska metodom teplovogo diagnostirovaniya]. S.Petersburg. 2011. 215 p.
- 3 A.F. Kostin, V.I. Shishkin. The role of energy and exergy balance in thermodynamic analysis [Rol' energo- i eksergobalansov v termodinamicheskom issledovanii]. Digest of scientific and methodological articles on heat engineering. Moscow. Vysshaya shkola Publ. 1977. -Vol. 2. pp. 6-12.
- 4 V.M. Brodianskiy. Exergy method of thermodynamic analysis [Eksерgeticheskiy metod termodinamicheskogo analiza]. Moscow. Energiya Publ. 1973. 388 p.

М.: Энергия, 1973. -388 с.

5 Захаров, Ю.В. Эксергетический анализ и баланс судовых энергетических установок с ДВС / Ю.В. Захаров, В.П. Шостак, Н.Д. Горovenko // - Труды НКИ. -1970. -Вып.37. -С. 3-12.

5 Yu.V. Zakharov, V.P. Shostak, N.D. Gorovenko. Exergy analysis and balance of ship power plants with internal combustion engines [Eksergeticheskiy analiz i balans sudovykh energeticheskikh ustanovok s DVS]. Proceedings of the Nikolaev Shipbuilding Institute [Trudy Nikolaevskogo korablestroitel'nogo instituta]. 1970. Vol. 37. pp. 3-12.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *среднеоборотный двигатель, вторичные энергоресурсы, тепловые потери, тепловой баланс, эксергия*

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ: *Дрозд Михаил Сергеевич, ассистент МГУ им. адм. Г.И. Невельского*

ПОЧТОВЫЙ АДРЕС: *690059, г.Владивосток, ул.Верхнепортовая, 50а, МГУ им. адм. Г.И. Невельского*

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИНДИКАТОРНОГО КАНАЛА НА РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ИНДИКАТОРНОЙ ДИАГРАММЫ ДИЗЕЛЯ Д49

ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет»

А.Ю. Коньков, А.И. Трунов

NUMERICAL INVESTIGATION OF THE INDICATOR CHANNEL EFFECT ON THE RESULTS OF PROCESSING OF THE INDICATOR DIAGRAM OF THE DIESEL Д49

Pacific National University (PNU) 136, Tihookeanskaya St., Khabarovsk, 680035, Russia

Aleksey Yu. Kon'kov (Holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Prof. of PNU)

Anton I. Trunov (Senior Lecturer of PNU)

ABSTRACT: The article shows the degree of impact of the standard indicator cock in Д49 diesel engine on the results of analysis of indicator diagram.

Keywords: *indicator channel, indicator diagram, diesel, mathematical model, heat generation*

Показаны характер и степень влияния штатного индикаторного крана дизеля Д49 на результаты анализа индикаторной диаграммы.

Индикаторная диаграмма (ИД) рабочего процесса наиболее полно отражает информацию о процессах, происходящих в цилиндре двигателя, поэтому ее используют в системах автоматизированного диагностирования и настройки [1-3]. Жесткие требования по ограничению выбросов вредных веществ, стимулируют инженеров использовать ИД в качестве сигнала обратной связи при создании современных систем управления поршневыми двигателями внутреннего сгорания (ДВС) [4, 5]. Также анализ ИД позволяет получить характеристики тепловыделения, которые используются для изучения и совершенствования рабочего процесса двигателя [6]. Широкое использование ИД в практике управления и диагностирования ДВС сдерживается, в основном, двумя факторами: малым сроком службы при высокой стоимости датчиков давления и сложностью получения достоверных ИД в условиях эксплуатации.

Использование дополнительных, соединительных и охлаждающих каналов при установке датчиков давления в цилиндры двигателя позволяет снизить температурные нагрузки и тем самым продлить срок службы датчиков [7]. При экспериментальном определении ИД среднеоборотных и малооборотных дизелей в эксплуатации используют штатные индикаторные краны [1-3]. Наличие дополнительных каналов, соединяющих датчик давления и цилиндр двигателя, не позволяет получить ИД без искажений [1, 2, 8]. Это обстоятельство делает ИД, полученную таким способом, непригодной для глубокого анализа [9].

Согласно ГОСТ 18509–88 [10] при измерении ИД отношение диаметра соединительного канала к его длине должно быть больше единицы, что оказывается трудновыполнимым для двигателей с верхним расположением клапанов даже в условиях лаборатории.

В литературе не встречается информации о влиянии искажений, вносимых индикаторным каналом, на параметры рабочего процесса, в том числе характеристики тепловыделения, определяемые по ИД. Так же не ясно, в какой мере индикаторный канал оказывает влияние на точность определения этих параметров.

Таким образом, целью данной работы стало численное исследование влияния индикаторного канала на ИД рабочего процесса и определяемые по ней характеристики.

Для исследования термогазодинамических процессов протекающих в индикаторном канале поршневого ДВС была реализована математическая модель, которая строится на основе фундаментальных законов сохранения и позволяет описать одномерное течение сжимаемой жидкости с учетом трения и теплообмена. Подробное изложение основных положений

ний модели можно найти в работе [11].

Для исследования был выбран двигатель ряда ЧН26/26 с цилиндровой мощностью 220 кВт, при частоте вращения 1100 мин^{-1} . Данный двигатель имеет индикаторный канал длиной 290 мм и диаметром 5,5 мм.

При изучении влияния нагрузочного режима на погрешности, вносимые индикаторным каналом, на рабочем поле характеристик был выбран ряд точек, в которых выполнялось моделирование рабочего процесса дизеля.

Моделирование рабочего процесса дизеля осуществлялось в программе «Дизель-РК» [12]. Из программы импортировались массивы данных о давлении и температуре газа в цилиндре двигателя. Используя эти данные и математическую модель термодинамических процессов в индикаторном канале, выполнялся расчёт термодинамических параметров газа возле мембраны датчика.

Исследовалось влияние искажений, вносимых штатным индикаторным каналом, на ИД и характеристики тепловыделения, так как эти зависимости подвергаются анализу при диагностировании и мониторинге технического состояния двигателя, изучении рабочего процесса, разработке алгоритмов управления. Характеристика скорости тепловыделения определялась на основе первого закона термодинамики.

Результаты исследования показывают (рисунок 2), что измерение внутрицилиндрового давления через индикаторный канал приводит к амплитудным искажениям и фазовым сдвигам ИД. Величина фазового сдвига ИД изменяется в течение цикла. При частоте вращения коленчатого вала 1100 мин^{-1} , сдвиг диаграммы на линии сжатия составляет 2°ПКВ , а на линии расширения 1°ПКВ (рисунок 2а и 2б). Выявленные закономерности приводят к уменьшению площади диаграммы и, как следствие, заниженной оценке интегральных показателей, определяемых по индикаторной диаграмме. Так, например, ошибка определения среднего индикаторного давления на режиме максимальной мощности составляет 11,5%. При этом очевидно, что корректировка положения верхней мертвой точки (ВМТ) на ИД ситуацию не исправит.

Амплитудные искажения ИД проявляются в завышенной оценке максимального давления сгорания и давления конца сжатия, ошибка определения этих параметров на всех исследуемых режимах не превышает 2%.

Искажения, вносимые индикаторным каналом более отчетливо видны на характеристиках тепловыделения. На кривой скорости тепловыделения возникают осцилляции, приводящие к завышенной оценке максимальной скорости тепловыделения, для режима максимальной мощности ошибка составляет 23% (рисунок 2а). Изменение нагрузки при постоянной частоте вращения вала приводит к изменениям на кривой скорости тепловыделения в кинетической фазе сгорания (рисунок 2а и 2б), а снижение частоты вращения коленчатого вала вызывает уменьшение фазового сдвига (рисунок 2б и 2в). Количество теплоты, подведенное в цикле при определении по ИД, измеренной через индикаторный канал, оказывается завышенным на 5-11%, в зависимости от нагрузочного режима.

Необходимо отметить что, частота вращения коленчатого вала оказывает более заметное влияние на погрешности, возникающие в индикаторном канале, чем нагрузка двигателя.

Таким образом, по результатам численного исследования можно сделать следующие выводы.

– Фазовое смещение ИД неравномерно, на участке нарастания давления смещение

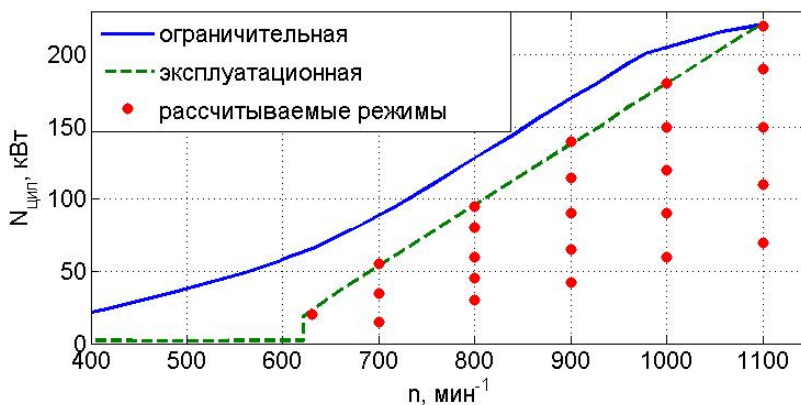


Рисунок 1 – Характеристики исследуемого двигателя и рассчитываемые режимы

больше чем на участке расширения.

– Для исследуемого двигателя искажения, вносимые индикаторным каналом, незначительно влияют на давление конца сжатия и максимальное давления сгорания.

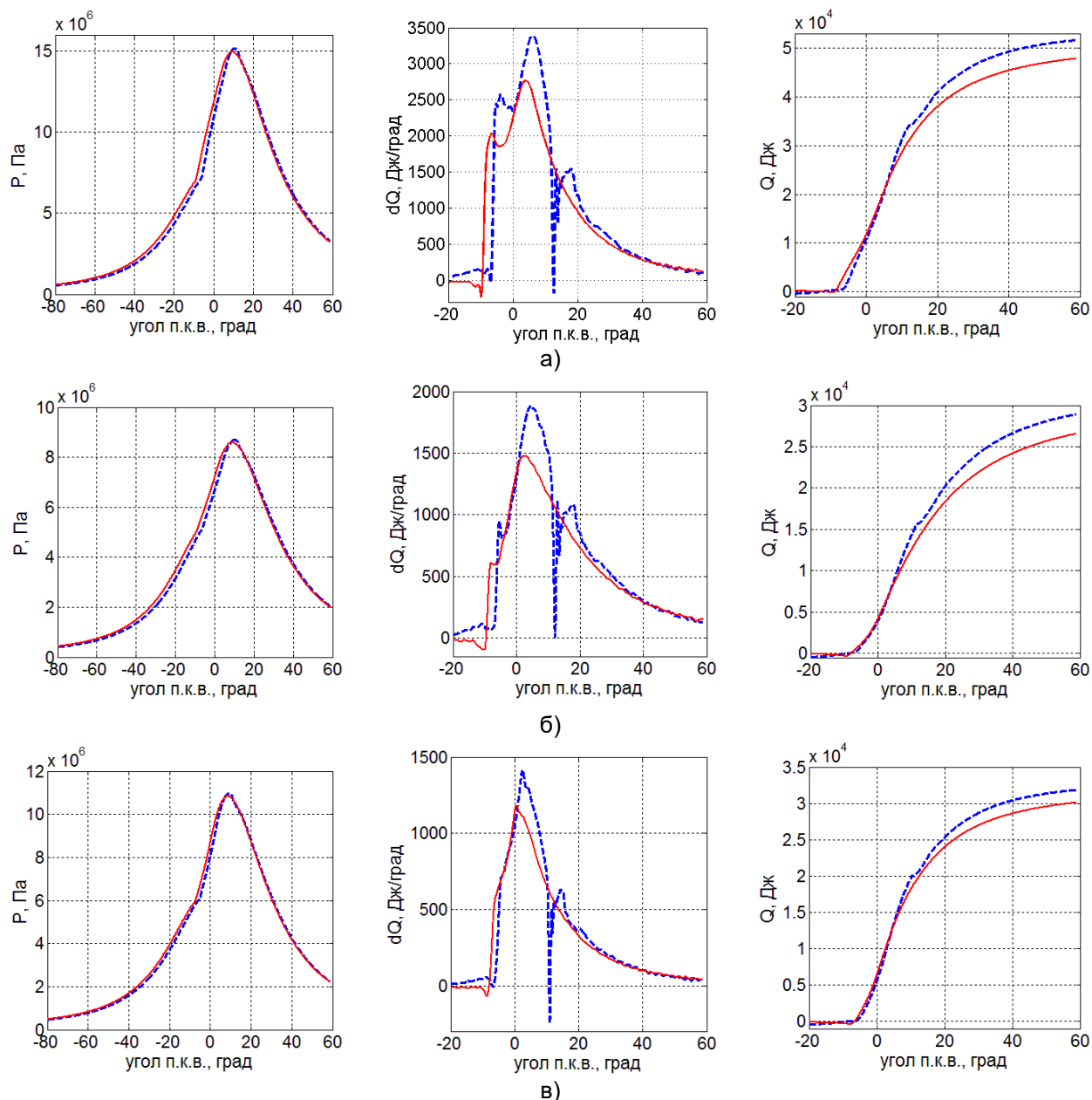


Рисунок 2 – Индикаторные диаграммы, скорости активного тепловыделения и теплота, подведенная в цикле, дизеля ряда ЧН 26/26 на различных режимах работы: — в канале; --- в цилиндре; а) - $n = 1100 \text{ мин}^{-1}$; $N_e = 220 \text{ кВт}$; б) - $n = 1100 \text{ мин}^{-1}$, $N_e = 110 \text{ кВт}$; в) - $n = 800 \text{ мин}^{-1}$, $N_e = 95 \text{ кВт}$

– Искажения, вносимые индикаторным каналом, значительно искажают характеристики активного тепловыделения, это приводит к завышенной оценке скорости тепловыделения и количества теплоты подведённой в цикле.

– Влияние частоты вращения коленчатого вала на погрешности измерения индикаторной диаграммы через индикаторный канал более выражено, чем влияние нагрузки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Коньков, А.Ю. Диагностирование дизеля на основе идентификации рабочих процессов / А.Ю. Коньков, В.А. Лашко. -Владивосток: Дальнаука, 2014. -356 с.
- 2 Самойленко, А.Ю. Повышение эффективности эксплуатации судовых дизелей на основе совершенствования методов и средств контроля их режимных параметров: ав-

REFERENCES

- 1 A.Yu. Kon'kov, V.A. Lashko. Diagnosing a Diesel engine based on workflow identification [Diagnostirovanie dizelya na osnove identifikatsii rabochnik protsessov]. Vladivostok. Dal'nauka Publ. 2014. 356 p.
- 2 A.Yu. Samoylenko. Increasing the efficiency of ship Diesel engines operations on the basis of improving the methods and means of monitoring their operational parameters [Povyshenie effektivnosti ek-

тореф. дис.... докт. техн. наук: 05.08.05; 05.09.03/ Самойленко Анатолий Юрьевич. -Новороссийск, 2004. -48 с.

3 Варбанец, Р.А. Определение основных параметров рабочего процесса и результаты диагностики главных дизелей теплохода «GREIFSWALD» / Р.А. Варбанец, П.Н. Бельский, В.А. Яровенко, А.И. Ваганов, Н.И. Александровская // -Вестн. Астрах. гос. техн. ун-в. Серия: мор. техн. и технол., -2015, -№2, -С. 31-41.

4 Husted, H. Cylinder Pressure-Based Control of Pre-Mixed Diesel Combustion / H. Husted, D. Kruger, G. Attic, G. Ripley and E. Kelly // -SAE Technical Paper. -2007. -№2007-010773. -8 p.

5 Shimasaki, Y. Study on engine management system using chamber pressure sensor integrated with spark plug / Y. Shimasaki, M. Kobayashi, H. Sakamoto, M. Ueno, M. Hasegawa, S. Yamaguchi, T. Suzuki // -SAE Paper. -2004. -No. 2004-01-0519. 22 p.

6 Brunt, F.J. The calculation of heat release energy from engine cylinder pressure data / F.J. Brunt, H. Rai, A.L. Emtage // -SAE Paper. -1998. -No.981052. -16 p.

7 Кирпичев, А. Датчики динамического давления: продукция компании «Глобалтест» / А. Кирпичев, А. Симчук, Ю. Тищенко // -Электроника: наука, технология, бизнес. -2008. -№1. -С. 88-91.

8 Pischinger, R. Engine Indication. User Handbook / R. Pischinger. -Graz: AVL, 2002. -151 p.

9 Трунов, А.И. Влияние индикаторного канала на результаты оценки тепловыделения среднеоборотного дизеля / А.И. Трунов, И.Д. Конькова, А.Ю. Коньков // -Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. -2015. -№2(4). -С. 30-35.

10 ГОСТ 18509-88. Дизели тракторные и комбайновые. Методы стендовых испытаний. -М.: Изд-во стандартов, 1988. -27 с.

11 Hountalas, D.T. Effect of pressure transducer position on measured cylinder pressure diagram of high speed diesel engines / D.T. Hountalas, A. Anestis // -Energy Convers. Mgmt. -1998. -Vol. 39. -No. 7. -P. 589-607.

12 Кулешов, А.С. Программа Дизель-РК: моделирование и оптимизация рабочих процессов ДВС / А.С. Кулешов, А.В. Козлов, Ю.М. Фадеев, Ф.Б. Барченко // Двигатель-2010: сб. мат. межд. конф. -2010. -С. 287-292.

spluatatsii sudovykh dizeley na osnove sover-shenstvovaniya metodov i sredstv kontrolya ikh rezhimnykh parametrov]. Novorosiysk. 2004. 48 p.

3 R.A. Varbanets, P.N. Belen'kiy, V.A. Yarovenko, A.I. Vaganov, N.I. Aleksandrovskaya. Determination of the workflow main parameters and the diagnostics results of the main Diesel engines of the "GREIFSWALD" [Opredelenie osnovnykh parametrov rabocheho protsesssa i rezul'taty diagnostiki glavnykh dizeley teplokhoda "GREIFSWALD"]. *Bulletin Of Astrakhan State Technical University. Series: marine technic and technology*. 2015, No. 2. pp. 31-41.

4 H. Husted, D. Kruger, G. Attic, G. Ripley and E. Kelly Cylinder Pressure-Based Control of Pre-Mixed Diesel Combustion. *SAE Technical Paper*. 2007. No. 2007-010773. 8 p.

5 Y. Shimasaki, M. Kobayashi, H. Sakamoto, M. Ueno, M. Hasegawa, S. Yamaguchi, T. Suzuki. Study on engine management system using chamber pressure sensor integrated with spark plug. *SAE Paper*. 2004. No. 2004-01-0519. 22 p.

6 F.J. Brunt, H. Rai, A.L. Emtage. The calculation of heat release energy from engine cylinder pressure data. *SAE Paper*. 1998. No. 981052. -16 p.

7 A. Kirpichev, A. Simchuk, Yu. Tishchenko. Dynamic pressure sensors: "Globaltest" products [Datchiki dinamicheskogo davleniya: produktsiya kompanii "Globaltest"]. *Electronics: science, technology, business [Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes]*. 2008. No. 1. pp. 88-91.

8 R. Pischinger. Engine Indication. User Handbook. Graz. AVL. 2002. 151 p.

9 A.I. Trunov, I.D. Kon'kova, A.Yu. Kon'kov. The influence of the indicator channel on the results of the heat dissipation estimation of medium-speed Diesel [Vliyaniye indikatornogo kanala na rezul'taty otsenki teplovyydeniya sredneoborotnogo dizelya]. *Transport of the Asia-Pacific region [Transport Aziatsko-Tikhookeanskogo regiona]*. 2015. No. 2(4). pp. 30-35.

10 GOST 18509-88. Tractor and combine Diesel engines. Methods of bench tests [Dizeli traktornye i kombayno-vye. Metody stendovyykh ispytaniy]. Moscow. Izdatelstvo standartov Publ. 1988. 27 p.

11 D.T. Hountalas, A. Anestis. Effect of pressure transducer position on measured cylinder pressure diagram of high speed diesel engines. *Energy Convers. Mgmt*. 1998. Vol. 39. No. 7. pp. 589-607.

12 A.S. Kuleshov, A.V. Kozlov, Yu.M. Fadeev, F.B. Barchenko. Program Diesel-RK: modeling and optimization of operational processes of ICE [Programma Dizel'-RK: modelirovaniye i optimizatsiya rabochikh protsessov DVS]. *Engine-2010: Digest of the International Conference Materials*. 2010. pp. 287-292.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: индикаторный канал, индикаторная диаграмма, дизель, математическая модель, тепловыделение

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ: Коньков Алексей Юрьевич, докт. техн. наук, профессор ТОГУ
Трунов Антон Игоревич, преподаватель ТОГУ

ПОЧТОВЫЙ АДРЕС: 680035, г.Хабаровск, ул.Тихоокеанская, 136, ТОГУ

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ПОРШНЕЙ.

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»

А.В. Мукасеев

ANALYSIS OF THERMAL CONDITION OF DIESEL ENGINE PISTON

Siberian State University of Water Transport (SSUWT) 33, Schetinkina St., Novosibirsk, 630099, Russia
Aleksandr V. Mukaseev (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of SSUWT)

ABSTRACT: The authors investigated thermal state of the reconstructed pistons of marine engines, carried out calculations for both standard and reconstructed pistons.

Keywords: thermal condition, piston, temperature, heat exchange, thermal stress, temperature profiling

Исследовано тепловое состояние восстановленных поршней судовых двигателей, расчеты проведены для штатного и восстановленного поршней.

Как показали результаты измерения коэффициентов теплопроводности деформированного и наплавленного материалов, они заметно отличаются от исходных значений. Следовательно, можно ожидать изменения теплового состояния поршня. При этом, как было показано ранее, необходимо чтобы максимальная температура доньшка поршня и температура в районе верхнего поршневого кольца заметно не увеличилась.

Для оценки изменения теплового состояния поршня были проведены расчеты для случаев штатного и восстановленного поршней. Расчеты были проведены с помощью программы «MathCAD» методом конечных разностей. Наряду с указанным методом существует метод конечных элементов. Преимуществом последнего является более высокая точность расчета и возможность применения созданной математической модели для определения как теплового, так и напряженного состояния деталей. Однако, метод конечных разностей (МКР) является более доступным, что и обусловило его применение в нашем случае.

Учитывая, что температура деталей цилиндропоршневой группы (ЦПГ) при работе двигателя меняется в поверхностном слое на незначительную величину (согласно литературным данным), а толщина этого слоя составляет доли миллиметра, то для упрощения рассматриваем стационарную задачу.

Определение граничных условий представляет собой достаточно сложную задачу. Граничные условия могут быть:

- первого рода, когда задано распределение температур по граничной поверхности исследуемого объекта;
- второго рода, когда известны плотности тепловых потоков через граничные поверхности;
- третьего рода, когда известны параметры теплообмена с окружающей средой.

Использование граничных условий первого рода требует большого количества экспериментальных данных по термометрированию. Чисто технически это обеспечить достаточно сложно, так как известные конструкции экспериментальных установок весьма сложны и ненадежны. Задание граничных условий второго рода также сопряжено с трудностями. Поэтому наиболее распространенным методом задания граничных условий является третий способ.

Для теплообмена со стороны камеры сгорания температуру можно определить расчетом, а для коэффициента теплоотдачи существует ряд формул: Ситкея, Хоэнберга, Вошни, Эйхельберга и др. В нашем случае была использована формула Хоэнберга, так как по данным [2] эта формула проста в применении, а по точности не уступает формуле Вошни

$$\alpha_w = 0,003313 \frac{\left(\frac{Sn}{30} + 1,4\right)^{0,8}}{\left(\frac{d^2 S}{\varepsilon_c - 1}\right)^{0,06}} \frac{p^{0,8}}{\varepsilon_c^{0,06} T^{0,4}}, \quad (1)$$

где α_w – коэффициент теплоотдачи в стенку цилиндра (по данным [1] коэффициент теплоотдачи в доньшко и крышку цилиндра принимается в три раза выше, что и было учтено в данной работе);

S – ход поршня, м;

n – частота вращения коленчатого вала, мин⁻¹;

d – диаметр цилиндра, м;

ε_c – номинальная степень сжатия;

p – давление, кПа;

T – температура, К.

Таким образом, в качестве расчетного коэффициента теплоотдачи использовалось среднее значение из полученных в расчетах при каждом угле поворота коленчатого вала с шагом 1 °ПКВ. Температуры и давления при разных углах ПКВ были получены по результатам теплового расчета рабочего процесса дизеля, проведенного с помощью программы «Diagramma», разработанной Калашниковым С.А. и Лебедевым О.Ю. В качестве температуры было использовано значение средней результирующей температуры, определенной по формуле

$$T_{э.рез} = \frac{(\alpha_w T)_{cp}}{(\alpha_w)_{cp}}, \quad (2)$$

В ряде работ указывается, что коэффициент теплоотдачи по поверхности доньшка поршня распределен неравномерно [3, 5].

Для остальных поверхностей поршня данных по оценке граничных условий найдено не было, однако, в литературе указываются возможные диапазоны изменения этих величин.

Для коэффициента теплоотдачи со стороны картерного пространства от 45 Вт/(м·К) [4] до 516 Вт/(м·К) [7], температура около 100 °С. Для периферийной зоны выше поршневых колец – от 35 Вт/(м·К) [7] до 950 Вт/(м·К) [8]. И для зоны ниже поршневых колец по тем же источникам от 40 Вт/(м·К) до 1750 Вт/(м·К) [3]. Коэффициенты теплоотдачи в районе поршневых колец принимается около 15000 Вт/(м·К). Из-за большого зазора между цилиндрической поверхностью канавки и кольцом теплообменом пренебрегают [5].

При расчете поршень условно разбивается на элементы, представляющие собой кольца. Если рассматривать сечение поршня, то эти элементы будут представлять собой прямоугольники. Кроме того, реальный профиль сечения поршня заменяется условным, составленным с помощью различных типовых элементов. Для каждого элемента составляется система уравнений, описывающих теплообмен с соседними элементами или окружающей средой. Затем температура в центре рассматриваемого элемента выражается через температуры окружающих его элементов. Основными уравнениями при расчете являются:

– Уравнение Ньютона-Рихмана

$$\Phi = \alpha S \Delta T, \quad (3)$$

где Φ – тепловой поток, Вт;

α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);

S – площадь теплообмена между элементами, м²;

ΔT – разность температур соседних элементов, °С.

– Уравнение Фурье, записанное для случаев теплопередачи через плоскую и цилиндрическую поверхность

$$\Phi = \lambda S \frac{1}{\ell} \Delta T, \quad (4)$$

где λ – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·К);

ℓ – расстояние между центрами элементов, м;

$$\Phi = \frac{\Delta T \pi b}{\frac{1}{2\lambda} \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)}, \quad (5)$$

где r_2, r_1 – радиусы центров масс сечений элементов, м;

b – длина теплопередающей поверхности, м.

При расчетах были сделаны следующие допущения:

– температура в центре сечения элемента равна температуре в сечении;

– теплообмен с окружающими элементами происходит только по ребрам;

– тепловое поле поршня симметрично относительно оси;

– изменение температуры по образующей поршня подчиняется линейному закону;

– коэффициент теплоотдачи по радиусу изменяется согласно [5, 6];

– расчет исходного и восстановленного поршней проведен при одинаковых граничных условиях.

Поскольку диапазоны изменения граничных условий существенны, то для получения достоверных результатов необходимо иметь данные по термометрированию поршней хотя бы в нескольких точках для их уточнения. В нашем случае были в наличии результаты, полученные на поршнях двигателя Ч15/18, снятые при испытаниях на заводе «Барнаултрансмаш» в условиях работы двигателя на номинальном режиме. Поэтому расчет был проведен для поршня данного двигателя при указанных условиях. Граничные условия, при которых проводились расчеты, после уточнения приведены в таблице 1.

Результаты расчета теплового поля поршня двигателя Ч15/18 приведены на рисунке 1. Температура доньшка поршня в центре согласно экспериментальным данным составляла 285 °С, по данным расчета – аналогично. На периферийной части значения температур также совпали – 256 °С.

По результатам расчета можно сделать вывод, что при деформации поршня и применении наплавки тепловое состояние поршня меняется незначительно. В центральной части температура выросла на 11 °С, на периферийной – на 27 °С. Видимо такой рост температуры связан с тем, что коэффициент теплопроводности материала наплавки ниже, чем для деформированного материала.

В нижней части юбки поршня температура снизилась на 5 °С и составила 108 °С.

Таблица – Граничные условия при расчете тепловых полей в поршне

Наименование величины, размерность	Значение
Коэффициент теплоотдачи в центре доньшка поршня, Вт/(м ² ·К)	450
Коэффициент теплоотдачи на периферии доньшка поршня, Вт/(м ² ·К)	1050
Результирующая температура газа, °С	652
Температура воздуха в картере, °С	60
Коэффициент теплоотдачи от внутренней поверхности поршня к газу в картере, Вт/(м ² ·К)	550
Коэффициент теплоотдачи в зазоре выше поршневых колец, Вт/(м ² ·К)	1500
Температура газа в зазоре между цилиндром и поршнем выше колец, °С	180
Коэффициент теплоотдачи в зазоре в районе колец, Вт/(м ² ·К)	1000
Температура газа в зазоре между цилиндром и поршнем в районе колец, °С	150
Коэффициенты теплоотдачи в зазоре между цилиндром и поршнем ниже колец, Вт/(м ² ·К)	400-1000
Температура газа в зазоре между поршнем и цилиндром, °С	100
Коэффициент теплоотдачи по верхней поверхности канавки под кольца, Вт/(м ² ·К)	900
Коэффициент теплоотдачи по нижней поверхности канавки под кольца, Вт/(м ² ·К)	20000
Коэффициент теплоотдачи по цилиндрической поверхности, Вт/(м ² ·К)	0
Температура газа в зазоре между кольцом и поршнем, °С	180

Важным параметром, как указывалось выше, является температура в районе верхнего поршневого кольца. Согласно расчетам, изменение ее незначительно: температура над кольцом увеличилась на 3 °С (с 218 до 221 °С).

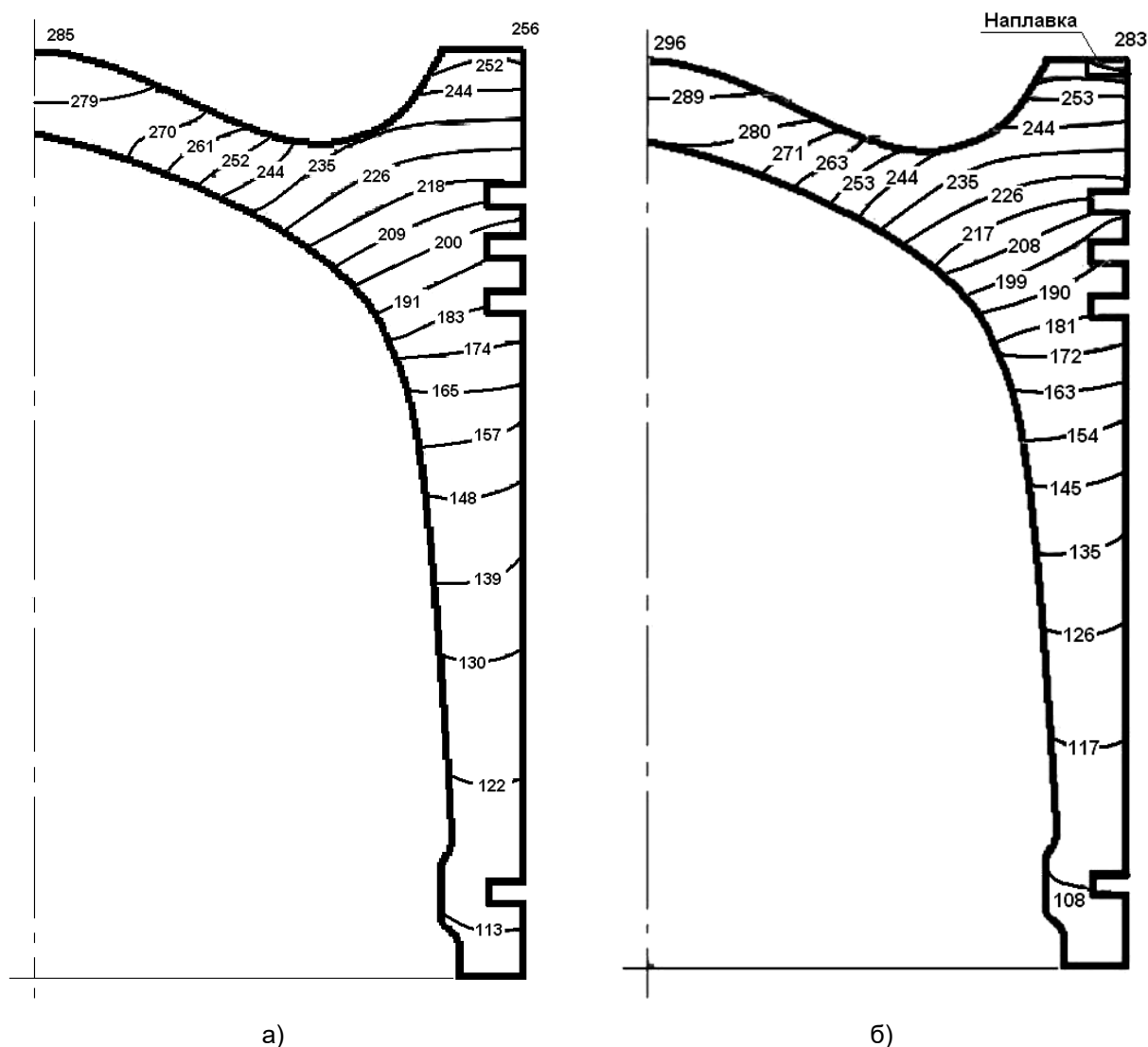


Рисунок 2 – Результаты расчета тепловых полей поршня двигателя Ч15/18: а)-штатный поршень; б)-восстановленный комбинированным методом

Таким образом, для рассматриваемого типа двигателей применение выбранной технологии восстановления поршней не приводит к значительному изменению их теплонапряженности. Можно ожидать, что это не вызовет снижения работоспособности двигателя.

Двигатель Ч15/18 имеет объемный способ смесеобразования. Ему соответствует форма камеры сгорания Гессельмана. Объемный способ смесеобразования обычно применяется на двигателях с диаметром поршня более 150 мм, то есть преимущественно для главных судовых двигателей. Для цилиндров с меньшим диаметром применяются другие способы смесеобразований. В судовых вспомогательных дизелях для обеспечения качественного смесеобразования часто применяются вихревые камеры. Форма донышка поршня в этом случае будет отличаться от приведенной на рисунке 2.

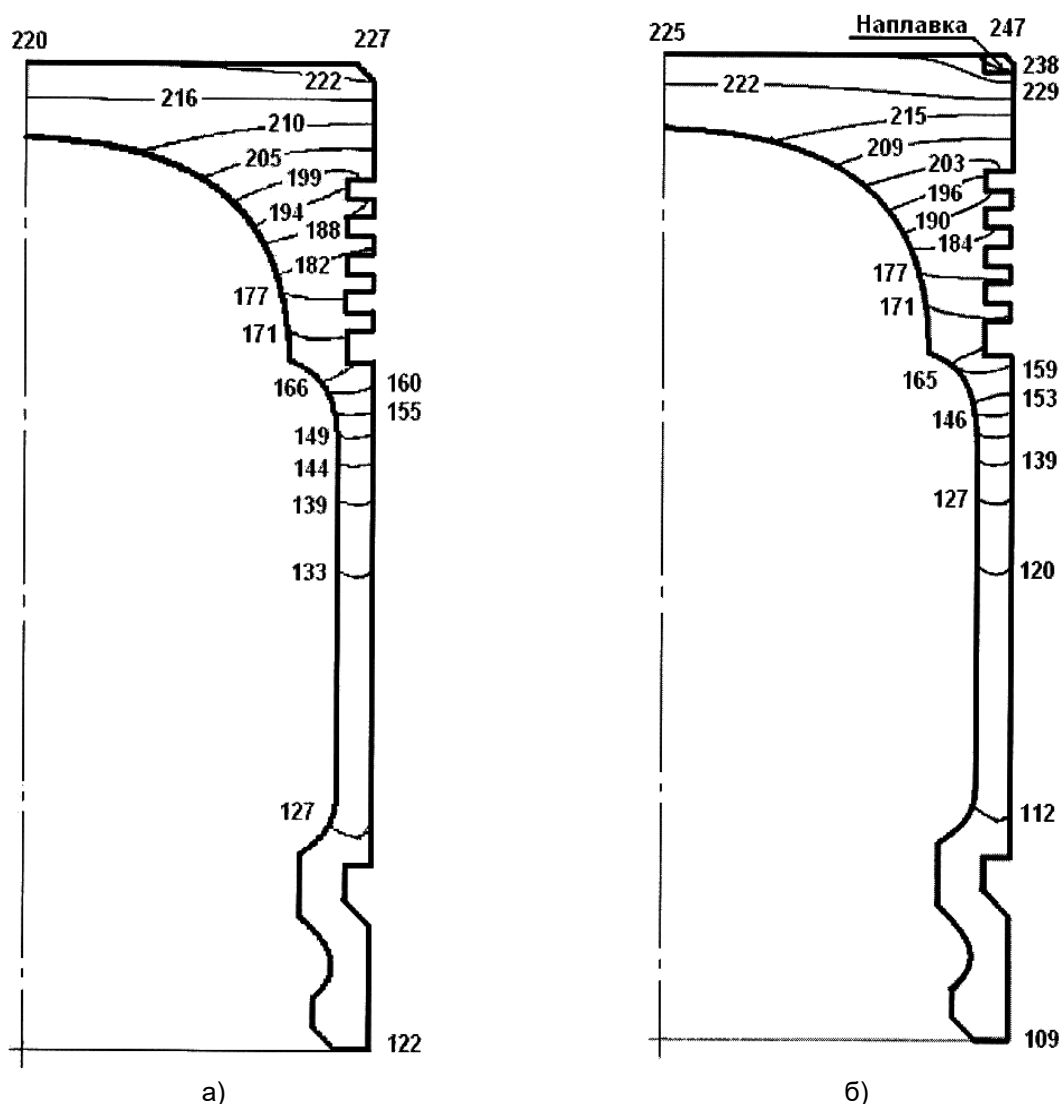


Рисунок 3 – Результаты расчета тепловых полей поршня двигателя Ч10,5/13: а) штатный поршень; б) восстановленный комбинированным методом

На рисунке 3 приведены результаты расчета тепловых полей, выполненные для поршня двигателя типа Ч10,5/13. Расчет был выполнен при тех же граничных условиях, что и для двигателя Ч15/18, так как отсутствуют экспериментальные данные по термометрированию поршней данного дизеля. Этот расчет, по указанным выше причинам, носит ориентировочный характер и позволяет лишь качественно оценить влияние деформации поршня и его наплавки на тепловое состояние.

По рисунку 3 видно, что наблюдается незначительный рост температур в центральной части донышка поршня. На периферийной части он более заметен и составляет 20 °С. В нижней части юбки поршня температура снизилась с 122 до 109 °С. Температура над первым поршневым кольцом увеличилась на 3 °С и составила 205 °С.

Как и в первом случае существенного изменения теплового состояния поршня не проис-

ходит. Таким образом, из материалов расчета следует, что применение восстановленных поршней не должно отрицательно сказаться на работоспособности двигателя. Это касается как двигателей с камерой сгорания типа Гессельмана, так и вихрекамерных двигателей, то есть справедливо для основных типов двигателей, применяемых на судах речного флота.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Бурин, М.М. К исследованию стационарного температурного состояния поршня двигателя методом электротепловой аналогии / М.М. Бурин, А.К. Костин // Труды ЛПИ. - №237. - 1964. - С. 95-98.
- 2 Горб, С.И. Исследование судового малооборотного дизеля при волнении: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.08.05 / Горб Сергей Иванович. - Одесса, 1980. - 20 с.
- 3 Вырубов, Д.Н. Двигатели внутреннего сгорания: Конструирование и расчет на прочность поршневых и комбинированных двигателей / Д.Н. Вырубов, С.И. Ефимов, Н.А. Иващенко и др.; Под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. - М.: Машиностроение, 1984. - 402 с.
- 4 Дьяченко, Н.Х. К определению граничных условий при моделировании температурных полей в поршнях ДВС / Н.Х. Дьяченко, А.К. Костин, М.М. Бурин // Энергомашиностроение. - 1967. - №4. - С. 45-49.
- 5 Костин, А.К. Определение теплонапряженности двигателей внутреннего сгорания / А.К. Костин, К.Б. Ермекаев // Изв. вузов. Машиностроение. - 1968. - №9. - С. 55-59.
- 6 Розенблит, Г.Б. Теплопередача в дизелях / Г.Б. Розенблит. - М.: Машиностроение, 1977. - 221 с.
- 7 Сибиркин, В.Н. Исследование процесса теплоотдачи от газов к стенкам цилиндра в четырехтактном дизеле с газотурбинным наддувом: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.08.05 / Сибиркин Владимир Николаевич. - Л. 1968. - 19 с.

REFERENCES

- 1 M.M. Burin, A.K. Kostin. To the study of the stationary temperature state of the engine piston by the method of electrothermal analogy [K issledovaniyu statsionarnogo temperaturnogo sostoyaniya porshnya dvigatelya metodom elektroteplovoy analogii]. *Proceedings of the Leningrad Polytechnic Institute [Trudy LPI]*. 1964. No. 237. pp. 95-98.
- 2 S.I. Gorb. Research of the vessel low-speed Diesel engine in terms of waves [Issledovanie sudovogo malooborotnogo dizelya pri volnenii]. Odessa. 1980. 20 p.
- 3 D.N. Vyrubov, S.I. Efimov, N.A. Ivashchenko i dr.; Pod red. A.S. Orlina, M.G. Kruglova. Internal combustion engines: Construction and structural robustness analysis of piston and combined engines [Dvigateli vnutrennego sgoraniya: Konstruirovaniye i raschet na prochnost' porshnevnykh i kombinirovannykh dvigateley]. Moscow. Mashinostroenie Publ. 1984. - 402 p.
- 4 N.Kh. D'yachenko, A.K. Kostin, M.M. Burin. To the determination of the boundary conditions for modeling the temperature fields in the pistons of the internal combustion engine [K opredeleniyu granichnykh usloviy pri modelirovaniy temperaturnykh poley v porshnyakh DVS]. *Power engineering [Energomashinostroyeniye]*. 1967. No. 4. pp. 45-49.
- 5 A.K. Kostin, K.B. Ermekebaev. Determination of internal combustion engines thermal stresses [Opredeleniye teplonapryazhennosti dvigateley vnutrennego sgoraniya]. *Digest of Universities. Mechanical Engineering*. 1968. No. 9. pp. 55-59.
- 6 G.B. Rozenblit. Heat transfer in Diesel engines [Teploperedacha v dizelyakh]. Moscow. Mashinostroenie Publ. 1977. 221 p.
- 7 V.N. Sibirkin. The study of the heat transfer process from gases to the walls of the cylinder in a four-stroke Diesel engine with gas turbine supercharging [Issledovanie protsessa teplootdachi ot gazov k stenkam tsilindra v chetyrekhtaktnom dizele s gazoturbinnym nadduvom]. Leningrad. 1968. 19 p.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

тепловое состояние, поршень, температура, теплообмен, теплонапряженность, термометрирование

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Мукасей Александр Владимирович, канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «СГУВТ»

ПОЧТОВЫЙ АДРЕС:

630099, г.Новосибирск, ул.Щетинкина, 33, ФГБОУ ВО «СГУВТ»

ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ОТОПЛЕНИЯ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА ЭЛЕКТРОПОЕЗДОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА СЕРИИ ЭД4М

ФГБОУ ВО «Омский государственный университет путей сообщения»

С.Г. Истомин, С.Г. Штраухман

ASSESSMENT OF ENERGY EFFICIENCY OF EQUIPMENT FOR HEATING AND AIR CONDITIONING OF DC SUBURBAN ELECTRIC TRAINS OF ED4M SERIES

Omsk State Transport University (OSTU) 35, Prospekt Marksa, Omsk, 644046, Russia

Stanislav G. Istomin (Assoc. Prof. of OSTU)

Stanislav G. Shtraukhman (Student of OSTU)

ABSTRACT: This paper presents an assessment of potential for reducing the power losses on heating and air conditioning of electric suburban trains of ED4M series. For this purpose, regression models have been made which consider the ambient temperature. The authors performed an assessment of the models' adequacy.

Keywords: electric rolling stock, correlation analysis, factors, heating and air conditioning power consumption

Выполнена оценка потенциала сокращения потерь электроэнергии на отопление и кондиционирование воздуха электропоездов постоянного тока серии ЭД4М. Сформированы регрессионные модели, учитывающие температуру окружающего воздуха. Выполнена оценка адекватности применения данных моделей.

Железнодорожный транспорт является ключевой отраслью Российской Федерации, на долю которой приходится около 4,4% от всей вырабатываемой в России электроэнергии,

85% которой расходуется на тягу поездов, поэтому приоритетной задачей энергетической стратегии холдинга ОАО «РЖД» на период до 2020 г. и на перспективу до 2030 г. является значительное повышение показателей энергетической эффективности тяги поездов [1].

Необходимо отметить, что основной объем перевозок в электротяге на железных дорогах России приходится на грузовое движение и достигает 95% от общей работы. При этом расход электроэнергии на выполнение такого объема работы составляет 89% от общего уровня энергозатрат. Однако данный факт отнюдь не означает, что вопрос энергосбережения в пригородном движении неактуален. Если учитывать тот факт, что деятельность дочерних компаний ОАО «РЖД», занимающихся перевозкой пассажиров в пригородном движении, либо убыточна или находится на грани безубыточности, а оплата энергетических ресурсов является первостепенной статьей расходов пригородных компаний, то вопрос рационального использования энергетических ресурсов является в пригородном движении весьма актуальным [2].

В настоящее время решить данный вопрос возможно, в частности, за счет разработки и внедрения автоматизированной системы контроля и управления за расходом электроэнергии на отопление и кондиционирование моторвагонного подвижного состава (МВПС) постоянного тока железных дорог.

В статье авторами рассматривается один из вариантов организации контроля за расходом электроэнергии на отопление и кондиционирование МВПС на примере пригородных электропоездов постоянного тока серии ЭД4М моторвагонного депо ТЧ-31 Омск Западно-Сибирской железной дороги.

В настоящее время осуществление оценки потерь электроэнергии на отопление и кондиционирование МВПС представляет собой весьма трудоемкую задачу, так как в отчетных данных моторвагонных депо, расположенных в системе Централизованной обработки маршрутов машинистов (ЦОММ) и информационном хранилище ОАО «РЖД» в разделе «Локомотивные парки», не содержится информация о расходе электроэнергии на отопление и кондиционирование МВПС.

Одним из наиболее простых методов оценки расхода электроэнергии на отопление и кондиционирование МВПС является анализ параметров и режимов печей, калориферов и кондиционеров, заявленных в руководствах по эксплуатации МВПС.

Как показали подобные исследования, выполненные авторами, доля потерь электроэнергии на отопление и кондиционирование пригородных электропоездов постоянного тока ЭД4М составляет от 5,1% до 11% от расхода на тягу.

Однако подобный метод оценки не позволяет достоверно определить значение и характер потребления электроэнергии оборудования для отопления и кондиционирования МВПС, так как в этом случае не учитываются реальные режимы его работы в зависимости от типа профиля пути (равнинный или холмистый).

Более трудоемким, но при этом более объективным методом оценки расхода электроэнергии на отопление и кондиционирование МВПС является опытный метод, заключающийся в проведении экспериментальных исследований непосредственно на МВПС в ходе его эксплуатации.

Отчет по расходу электроэнергии в поездке

Поезд №:	Дата:				Пробег, км:	69,509	
Машинист:	< 307 >				Норма на секцию:		
Бортовой № секции:	Общий расх. эл. энергии	Из общего расхода эл. энергии, кВт·ч			Энергия рекуперации	Уд. расход на 10000 т·км, кВт·ч	Откл. от ср. потр.
		На тягу:	Отопление:	Всп. нужды:			Откл. от нормы
0071-02	311,25	303,25	0,00	8,00	0,00	471,351	+20,9%
0071-04	292,25	285,50	0,00	6,75	0,00	442,578	+13,5%
0071-06	92,25	85,00	0,00	7,25	0,00	139,702	-64,2%
0071-08	294,75	289,25	0,00	5,50	0,00	446,364	+14,5%
0071-10	297,50	291,75	0,00	5,75	0,00	450,529	+15,5%
Итого:	1288,00	1254,75	0,00	33,25	0,00	390,105	

Суммарный расход энергии, кВт·ч: 1288,00

Рекуперация, кВт·ч: 0,00

Оператор:

= Администратор =

Рисунок 1 – Информация о результатах поездки с РПДА-Э пригородного электропоезда постоянного тока серии ЭД4М

Для исследования потерь электроэнергии на отопление и кондиционирование электропоездов постоянного тока серии ЭД4М авторы использовали информацию, содержащуюся на картриджах систем регистрации параметров движения и автоведения (РПДА-Э) (рисунок 1) производства компании АВП «Технология».

В результате расшифровки картриджей РПДА-Э электропоездов постоянного тока серии ЭД4М и обработки информации с них было установлено, что доля расхода электроэнергии на отопление и кондиционирование от общего расхода электроэнергии на участке Иртышское – Омск в нечетном направлении составляет в среднем 11,3%, а в четном – 10,5% (таблица 1). Результаты для остальных участков моторвагонного депо Омск также представлены в таблице 1.

Наблюдаемый разброс расхода электроэнергии на отопление и кондиционирование в исследуемых поездках свидетельствует об имеющемся потенциале снижения данного вида расхода, реализовать который возможно путем организации контроля за потреблением электроэнергии на отопление и кондиционирование электропоездов серии ЭД4М на основе учета факторов, влияющих на их энергоэффективную работу.

Таблица 1 – Результаты оценки доли расхода электроэнергии на отопление и кондиционирование электропоездов ЭД4М

Плечо обслуживания локомотивных бригад	Направление	Доля расхода на отопление и кондиционирование, %
Иртышское-Омск	нечетное	11,3
Омск-Иртышское	четное	10,5
Исилькуль-Омск	нечетное	9,78
Омск-Исилькуль	четное	7,53
Называевская-Омск	нечетное	8,99
Омск-Называевская	четное	3,93
Татарская-Омск	нечетное	14,4
Омск-Татарская	четное	14,5

Для выявления влияющих факторов на расход электроэнергии на отопление и кондиционирование электропоездов постоянного тока серии ЭД4М и формирования статистических моделей для оценки их энергетической эффективности использовался корреляционно-регрессионный метод математической статистики. Основные расчеты производились в программе Microsoft Excel с использованием пакета «Анализ данных» на основе информации РПДА-Э из выборки поездок с электропоездами ЭД4М в четном и нечетном направлении за календарный год.

Исследование проводилось в несколько этапов. На первом этапе для исследования были выбраны факторы: время нагона (t_n), участковая скорость движения электровоза (V_y), техническая скорость движения электровоза (V_m), температура атмосферного воздуха (t) и масса состава (m_c).

На втором этапе исследования для набора факторов, указанных выше, сформирован вариант статистической модели, с целью дальнейшей оценки ее адекватности и статистической значимости коэффициентов выбранной модели

$$W_{c.n.} = B_0 + B_1 t_n + B_2 V_y + B_3 V_m + B_4 t + B_5 m_c.$$

На третьем этапе определены коэффициенты B сформированной статистической модели, стандартная ошибка, t -статистика, p -значение, нижняя и верхняя граница доверительного интервала (таблица 2) и выполнена проверка адекватности данных моделей путем оценки уровня значимости α (Microsoft Excel этот показатель именуется как p). Вероятность ошибки (p -значение) – отклонении нулевой гипотезы, то есть гипотеза о том, что все коэффициенты регрессии равны нулю. Если p -значение меньше 0,05 то гипотеза о незначимости регрессии отвергается и считается, что регрессия значима. В нашем случае для выбранной статистической модели p -значение не превышает уровня значимости 0,05.

На четвертом этапе выполнена оценка статистической значимости коэффициентов регрессии для выбранной статистической модели. Итоговые результаты оценки на примере участка Татарская-Омск приведены в таблице 2.

Рассмотрим механизм оценки статистической значимости коэффициентов регрессии на

примере таблицы 2. В зависимую переменную расход электроэнергии на отопление и кондиционирование электропоезда ЭД4М больший вклад вносит в четном и нечетном направлении – температура ($p=0$), а меньший вклад в четном и в нечетном направлении – время нагона и техническая скорость ($p=0,58$ и $p=0,72$). Отрицательный знак коэффициента при переменной температура означает, что с увеличением температуры уровень расхода падает. Коэффициент уравнения регрессии B_4 для четного и нечетного направления статистически значим при уровне значимости $p=0,05$; коэффициенты уравнения регрессии B_1 , B_3 , и B_5 статистически незначимы, так как $p > 0,05$) [3].

Таблица 2 – Результаты оценки статистической значимости коэффициентов регрессии для выбранной статистической модели (участок Татарская-Омск)

Факторы	Направление	Коэффициент B	Стандартная ошибка	t-статистика	p-значение	Нижняя ГДИ	Верхняя ГДИ
Свободный член регрессии	четное	225	91,3	2,47	0,014	45,7	406
	нечетное	193	94,8	2,04	0,042	6,68	380
Время нагона, мин.	четное	9,79	17,5	0,56	0,581	-24,6	44,2
	нечетное	-7,41	28,4	-0,26	0,794	-63,3	48,5
Участковая скорость, км/ч	четное	2,56	3,19	0,80	0,422	-3,72	8,86
	нечетное	4,13	4,97	0,83	0,407	-5,66	13,9
Техническая скорость, км/ч	четное	-0,90	2,55	-0,35	0,720	-5,92	4,12
	нечетное	-2,88	4,24	-0,68	0,497	-11,2	5,46
Температура, °C	четное	-15,9	0,71	-22,60	0	-17,3	-14,6
	нечетное	-17,3	0,68	-25,40	0	-18,7	-16,0
Масса состава, т	четное	-0,051	0,09	-0,55	0,580	-0,231	0,129
	нечетное	0,180	0,10	1,75	0,081	-0,022	0,383

ГДИ-граница доверительного интервала

В результате проведения вышеописанного анализа было установлено, что статистически значимым фактором, оказывающими влияния на расход электроэнергии на отопление и кондиционирование электропоездов серии ЭД4М, является в четном и нечетном направлении – температура окружающего воздуха.

На пятом этапе на основе полученных результатов сформированы статистические модели, учитывающие статистически значимые факторы, для оценки энергетической эффективности оборудования для отопления и кондиционирования электропоездов постоянного тока серии ЭД4М и проведена оценка их качества (таблица 3).

Таблица 3 – Коэффициенты детерминации R^2 для различных статистических моделей

Плечо обслуживания	Направление	Вид статистической модели	Объем выборки	Коэффициент детерминации R^2
Иртышское-Омск	четное	$W_{с.н.} = 123 - 7,76t$	102	0,612
Омск-Иртышское	нечетное	$W_{с.н.} = 125 - 8,13t$	494	0,556
Исилькуль-Омск	четное	$W_{с.н.} = 103 - 5,12t$	196	0,296
Омск-Исилькуль	нечетное	$W_{с.н.} = 86,5 - 5,31t$	195	0,315
Называевская-Омск	четное	$W_{с.н.} = 103 - 6,09t$	329	0,574
Омск-Называевская	нечетное	$W_{с.н.} = 109 - 7,16t$	186	0,654
Татарская-Омск	четное	$W_{с.н.} = 309 - 17,5t$	255	0,737
Омск-Татарская	Нечетное	$W_{с.н.} = 288 - 16,5t$	231	0,715

Для оценки качества прогнозирования используется коэффициент детерминации R^2

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{a}_i - \bar{a})^2}{\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2},$$

где $\sum_{i=1}^n (\hat{a}_i - \bar{a})^2$ – сумма квадратов остатков регрессии;

$$\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2 - \text{общая сумма квадратов.}$$

Данный коэффициент дает численную оценку того, насколько изменчивость прогнозируемой величины объясняется включенными в модель факторами.

Следует отметить, что с целью анализа различных уравнений регрессии определение регрессионных коэффициентов данных уравнений выполнялось по всем значениям выборки из генеральной совокупности.

По результатам исследования (таблица 3), можно сделать следующие выводы значения R^2 практически во всех случаях (кроме участка Омск-Исилькуль) превышают значения 0,5, что свидетельствует о сильной связи между $W_{c.h.}$ и выбранными факторами.

Важно также отметить, что параметр температура окружающего воздуха является известным перед поездкой, что позволяет в дальнейшем осуществлять оперативное прогнозирование расхода на отопление и кондиционирование электропоездов серии ЭД4М.

Одним из условий корректного применения регрессионного анализа является согласие закона распределения остатков уравнения регрессии с нормальным законом. Авторами доказано, что выборочная плотность распределения остатков уравнений регрессии успешно аппроксимируется нормальным законом распределения, что является признаком адекватности построенной модели прогноза.

В конечном итоге использование статистических моделей, построенных на основе данных в четном и нечетном направлении, позволит выполнять оценку энергетической эффективности оборудования для отопления и кондиционирования пригородных электропоездов постоянного тока серии ЭД4М и выявлять предотказные состояния данного оборудования, а также неудовлетворительное теплотехническое состояние вагонов. В дальнейшем применение данных моделей позволит легитимно и своевременно отправлять электропоезд на неплановый вид ремонта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1 Гапанович, В.А. Энергетическая стратегия и электрификация российских железных дорог / В.А. Гапанович, С.Н. Епифанцев, В.А. Овсейчук. -М.: Эко-Пресс, 2012. -196 с.

2 Истомин, С.Г. Анализ эффективности эксплуатации электропоездов постоянного тока моторвагонного депо ТЧ-31 Омск / С.Г. Истомин, А.А. Штраухман // 115 лет железнодорожному образованию в Забайкалье: Образование. Наука. Производство: Материалы Всероссийской научно-практической конференции. -Чита: Заб. инст. жел. трансп. ИрГУПС, 2017. -С. 56-62.

3 Халафян, А. А. STATISTICA 6. Статистический анализ данных / А.А. Халафян. -М.: ООО «Бином-Пресс», 2007. -512 с.

1 V.A. Gapanovich, S.N. Epifantsev, V.A. Ovseychuk. Energy strategy and electrification of Russian railways [Energeticheskaya strategiya i elektrifikatsiya rossiyskikh zheleznykh dorog]. Moscow. Eko-Press Publ. 2012. 196 p.

2 S.G. Istomin, A.A. Shtraukhman. Analysis of the direct current electric trains operation efficiency in the "ТЧ-31" Omsk motor depot [Analiz effektivnosti ekspluatatsii elektropoezdov postoyannogo toka motorva-gonnogo depo TCh-31 Omsk]. 115 years of railway education in Transbaikalia: Education. Science. Production.: Materials of the All-Russian scientific-practical conference [115 let zheleznodorozhnomu obra-zovaniyu v Zabaykal'e: Obrazovanie. Nauka. Proizvodstvo]. 2017. pp. 56-62.

3 A.A. Khalafyan. Statistical data analysis [STATISTICA 6. Statisticheskiy analiz dannykh]. Moscow. Binom-Press Publ. 2007. 512 p.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: электроподвижной состав, корреляционный анализ, факторы, расход на отопление и кондиционирование воздуха

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ: Истомин Станислав Геннадьевич, доцент ФГБОУ ВО «ОмГУПС»
Штраухман Станислав Геннадьевич, студент ФГБОУ ВО «ОмГУПС»

ПОЧТОВЫЙ АДРЕС: 644046, г.Омск, пр.К.Маркса, 35, ФГБОУ ВО «ОмГУПС»

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ АЛЮМИНИЕВЫХ ПОРШНЕЙ НА ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ИХ МАТЕРИАЛЕ

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»

А.В. Мукасеев

EFFECT OF THERMAL TREATMENT OF ALUMINUM PISTONS ON THEIR RESIDUAL STRESS

Siberian State University of Water Transport (SSUWT) 33, Schetinkina St., Novosibirsk, 630099, Russia
Aleksandr V. Mukaseev (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of SSUWT)

ABSTRACT: The article considers thermal treatment, age hardening (artificial aging) of aluminum pistons of internal combustion engines. The experiments helped to reveal the effect of the temperature on the properties of aluminum alloys.

Keywords: piston, alloys, temperature, thermal treatment, cooling

Рассмотрена термическая обработка, закалка и искусственное старение алюминиевых поршней двигателей внутреннего сгорания. Определено влияние температуры закалочной среды на свойства алюминиевых сплавов.

Как известно, при пластической деформации алюминиевого сплава происходит изменение некоторых его механических свойств. В частности, это влияние проявляется в увеличении остаточных напряжений. Последнее, совместно с напряжениями, которые возникают в поршне при работе дизеля (сила давления газов, сила инерции, термические напряжения) могут привести к разрушению этой детали. Поэтому одним из важных методов повышения работоспособности восстановленных поршней является уменьшение остаточных напряжений. Кроме этого материал поршней после их восстановления необходимо укрепить. Обычно это достигается посредством соответствующей термической обработки. Наиболее распространенным методом последней является закалка и искусственное старение. Рассмотрим эти способы более подробно [4].

Эффективное снижение возникших остаточных напряжений при закалке можно осуществить за счет снижения температурного градиента по сечению поршня. Для этого необходимо создать такие условия при закалке, которые снизили бы скорость охлаждения. Это можно получить путем увеличения температуры закалочной среды.

Влияние температуры закалочной среды на свойства алюминиевых сплавов изучалось неоднократно рядом исследователей.

В рамках данной статьи выполнены исследования влияния различных режимов термической обработки на величину остаточных напряжений в опытных образцах, взятых от поршней, изготовленных из термопрочного сплава системы Al-Cu-Mg-Fe-Ni марки АК 4-1, который до настоящего времени находит широкое применение при изготовлении поршней двигателей внутреннего сгорания (ДВС). Химический состав опытных образцов приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав образцов

Марка сплава	Содержание элементов, %					Содержание примесей, %		
	Cu	Mg	Ni	Fe	Ti	Mn	Si	Zn
АК-4-1	2,21	1,63	1,25	1,15	0,05	0,05	0,22	0,10

Термическая обработка проводилась в следующей последовательности: нагрев под закалку в электрической печи при температуре 535 ± 5 °С (температура закалки сплава АК 4-1), выдержка в течение 2 ч, закалка и искусственное старение. Режимы термической обработки приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Режимы термической обработки

Режим охлаждения при закалке			Режим старения	
Среда охлаждения	Температура среды, °С	Длительность выдержки, ч	Температура нагрева, °С	Длительность выдержки, ч
Вода	20	до полного охлаждения	180, 190, 200	8, 12, 16
Вода	60	до полного охлаждения	180, 190, 200	8, 12, 16
Вода	80	до полного охлаждения	180, 190, 200	8, 12, 16
Вода	100	до полного охлаждения	180, 190, 200	8, 12, 16

Снижение скорости охлаждения достигалась повышением температуры воды в закалочном баке от 20 до 100 °С.

В процессе охлаждения измеряли температуру поверхности элементов поршня с помощью термопар. Эти данные для четырех режимов охлаждения приведены на рисунке 1. Из приведенных графиков следует, что кривые охлаждения образцов, закаленных в воде при температурах 20 и 60 °С, почти совпадают между собой. С повышением температуры в закалочном баке до 80 и 100 °С охлаждение поверхности образца резко замедляется.

В таблице 3 приведены средние скорости охлаждения опытных образцов для двух периодов охлаждения. Первым периодом условно принято охлаждение в интервале температур от 535 до 350 °С; вторым периодом – интервал температур от 350 до 250 °С.

Из материалов таблицы следует, что с повышением температуры воды в закалочном баке до 60 °С скорость охлаждения изменяется мало. Дальнейший рост температуры охлаждающей жидкости вызывает заметное уменьшение скорости охлаждения закаливаемой де-

тали.

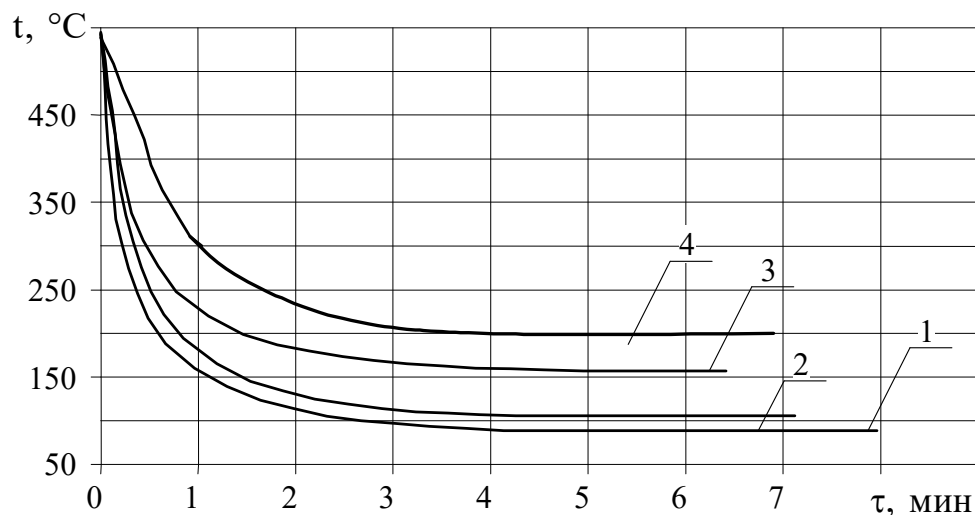


Рисунок 1 – Кривые охлаждения образцов сплава АК 4-1 в воде при температуре: 1-20 °С; 2-60 °С; 3-80 °С; 4-100 °С

Таблица 3 – Средние скорости охлаждения опытных образцов при закалке в воду (до полного охлаждения)

Температура воды, °С	Период охлаждения	Скорость охлаждения при закалке, °С/с
20	1	12,7
	2	7,5
60	1	12,6
	2	7,4
80	1	7,4
	2	5,0
100	1	6,2
	2	2,3

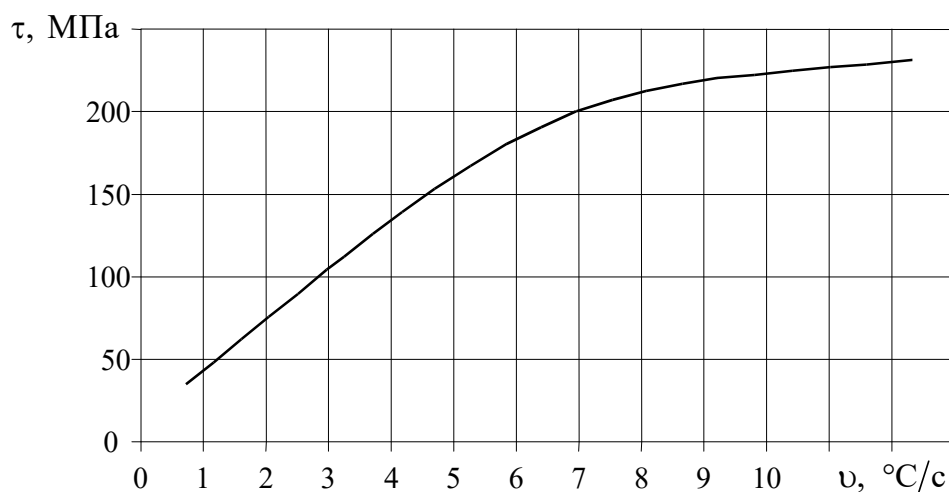


Рисунок 2 – Влияние скорости охлаждения на остаточные тангенциальные напряжения

Приведенный на рисунке 2 график максимальных растягивающих и сжимающих тангенциальных напряжений в зависимости от скорости охлаждения показывают, что величина остаточных напряжений убывает с понижением скорости охлаждения при закалке. Так закалка в кипящей воде, значительно снижая скорость охлаждения образцов, уменьшает напряжения в два с половиной раза с 223 до 90 МПа (рисунок 3 и 4).

Величина остаточных напряжений определялась методом твердости. Впервые влияние остаточных напряжений на твердость установлена Л.А. Гликманом.

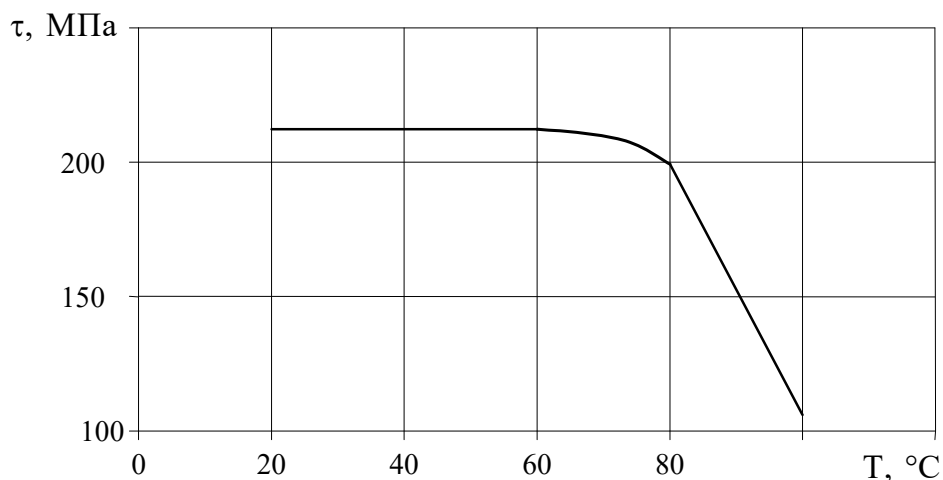
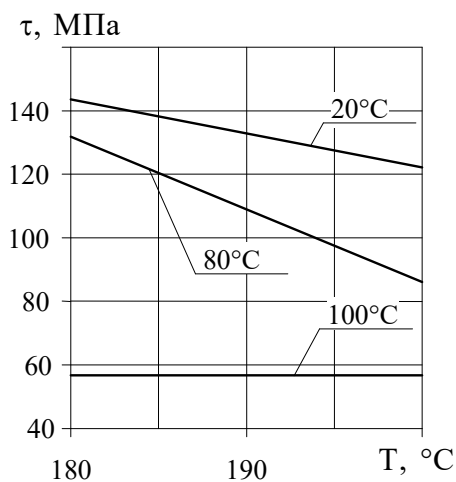
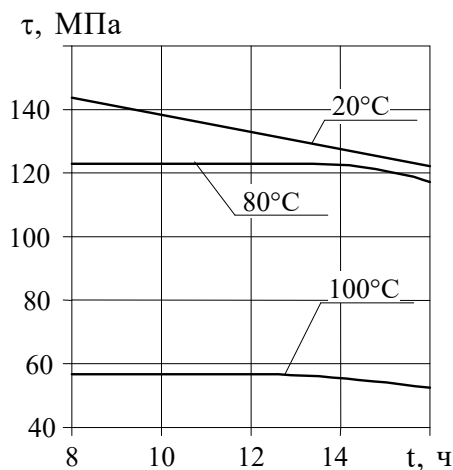


Рисунок 3 – Влияние температуры воды в закалочном баке на остаточные тангенциальные напряжения

Результаты исследования показали, что повышение температуры искусственного старения от 180 до 200 °С несколько уменьшает величину остаточных напряжений.



а)



б)

Рисунок 4 – Влияние режимов старения на остаточные тангенциальные напряжения

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Богвар, А.А. Основы термической обработки / А.А. Богвар. -М.: Metallurgizdat, 1940. -298 с.
- 2 Гликман, Л.А. Определение остаточных напряжений методом измерения твердости / Л.А. Гликман // -Заводская лаборатория. -1936. -№1. -Т.5. -С. 63-69.
- 3 Добаткен, В.И. Ступенчатая закалка алюминиевых сплавов / В.И. Добаткен // -Легкие сплавы: сб. тр. АН СССР. -1958. -Вып. 1. -С. 27-32.
- 4 Макагон, М.Б. Влияние скорости деформации на механические свойства сплавов: автореферат дис... канд. хим. наук / -Томск, 1954. -16 с.
- 5 Сидорин, И.И. Исследование кинетики старения литейного алюминиевого сплава марки АЛ-4 / И.И. Сидорин, О.И. Сидунова // -Металловедение и термическая обработка металлов: сб. трудов. -М.: Mashgiz. 1955. -С. 65-68.
- 6 Сидорин, И.И. Изотермическая обработка линейного алюминиевого сплава марки АЛ-4 / И.И. Сидорин, Н.И. Соловьева // -Металловедение и термическая обработка металлов. -М.: Mashgiz. 1955. -С. 68-71.

REFERENCES

- 1 A.A. Bogvar. Basics of heat treatment [Osnovy termicheskoy obrabotki]. Moscow. Metallurgizdat Publ. 1940. 298 p.
- 2 L.A. Glikman. Determination of residual stresses by measuring the hardness [Opredelenie ostatochnykh napryazheniy metodom izmereniya tverdosti]. Factory Laboratory [Zavodskaya laboratoriya]. 1936. No. 1. Vol. 5. pp. 63-69.
- 3 V.I. Dobatken. Step hardening of aluminum alloys [Stupenchataya zakalka alyuminievykh spлавov]. Light alloys: Proceedings of the USSR Academy of Sciences. 1958. Vol. 1. pp. 27-32.
- 4 M.B. Makagon. The effect of deformation rate on the mechanical properties of alloys [Vliyanie skorosti deformatsii na mekhanicheskie svoystva spлавov]. Tomsk. 1954. 16 p.
- 5 I.I. Sidorin, O.I. Sidunova. The research of the kinetics of aging cast aluminum alloy brand AL-4 [Issledovanie kinetiki stareniya liteynogo alyuminieвого сплава marki AL-4]. Metals research and heat treatment of metals: digest of works [Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov]. Moscow. Mashgiz Publ. 1955. pp. 65-68.
- 6 I.I. Sidorin, N.I. Solov'eva. Isothermal treatment of linear aluminum alloy brand AL-4 [Izotermicheskaya obrabotka lineynogo alyuminieвого сплава marki AL-4]. Metals research and heat treatment of metals [Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov]. Moscow. Mashgiz Publ. 1955. pp. 68-71.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: поршень, сплавы, закалка, температура, термическая обработка, охлаждение

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ: Мукасей Александр Владимирович, канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «СГУВТ»
ПОЧТОВЫЙ АДРЕС: 630099, г.Новосибирск, ул.Щетинкина, 33, ФГБОУ ВО «СГУВТ»

СИНХРОНИЗАЦИЯ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ И ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»

В.И. Осипов, А.А. Подъячев, И.Е. Лобес

SYNCHRONIZATION OF CYCLES OF INTERNAL COMBUSTION ENGINE AND DIGITAL DATA PROCESSING
Siberian State University of Water Transport (SSUWT) 33, Schetinkina St., Novosibirsk, 630099, Russia
Viktor I. Osipov (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of SSUWT)
Artem A. Pod'yachev (Master's Degree of SSUWT)
Ioann E. Lobes (Master's Degree of SSUWT)

ABSTRACT: Ways of obtaining signals of starting the software for drawing an indicator diagram of a diesel engine are considered in this paper.

Keywords: *indicator diagram, diesel, gauge*

Рассматриваются способы получения сигналов запуска программы построения индикаторной диаграммы дизеля.

Вопросы эффективной эксплуатации двигателей внутреннего сгорания (ДВС) на флоте крайне важны, поэтому понятен интерес к приборному оснащению, призванному повысить эффективность их работы.

В настоящее время основной целью является создание приборов, отличающихся простотой, низкой стоимостью и высокой надежностью, пригодных для широкого и быстрого внедрения на речных судах.

В 2016 году на кафедре информационных систем СГУВТ был создан комплект мобильных средств, реализующих основную цель – обеспечить качественную диагностику судовых двигателей, а также производить их регулировку в условиях реальной эксплуатации на основании данных, полученных из анализа индикаторных диаграмм всех цилиндров ДВС.

Вид этой диаграммы резко меняется при разбалансировках топливной аппаратуры, которые легко локализуются при сравнении данной диаграммы со стандартной, снятой с нового отрегулированного двигателя [1].

Получение такой диаграммы с использованием средств вычислительной техники связано с рядом трудностей, в частности с получением сигнала, соответствующего нижней мертвой точки (НМТ) поршня каждого цилиндра. Обычно в таких случаях пытаются приспособить датчики угла поворота вала, требующие немало усилий для их закрепления на корпусе ДВС и перенастройки при переходе с одного цилиндра на другой.

При разработке упомянутого мобильного комплекта применялись средства во многом устранявшие указанные проблемы. Работы велись в двух направлениях:

- использование для синхронизации процесса построения индикаторной диаграммы штатного индукционного тахометра, точнее его тахогенератора;
- для дизелей, не имеющих штатного тахогенератора (такие иногда встречаются) разработать синхронизирующий датчик с простым закреплением.

По первому варианту в системе используется трехфазное напряжение, с частотой равной или точно кратной частоте вращения вала двигателя. Однако фаза колебаний (нас интересует момент перехода колебания через ноль) при этом в общем случае не соответствует НМТ разных цилиндров. Для устранения этого принципиального препятствия в первом варианте применялся индукционный фазовращатель. На рисунке 1 приведена схема такого фазовращателя.

Полученные напряжения подаются на 3 обмотки и создают вращающееся магнитное поле, которое вызывает срабатывание датчика индикаторной диаграммы.

Однако испытания показали существенный недостаток – значительное изменение фазы происходило только в трех точках характеристики, что являлось следствием распределения магнитных полей. Другими словами, сдвиг фазы выходного сигнала происходил в месте между полюсами ротора. Этот эффект иллюстрирует и характеристика – сдвиг фазы в зависи-

мости от угла поворота ручки регулирования. В последствии была разработана конструкция потенциометрического фазовращателя с двумя контактными щетками, что одновременно позволило повысить выходное напряжение (рисунок 2).

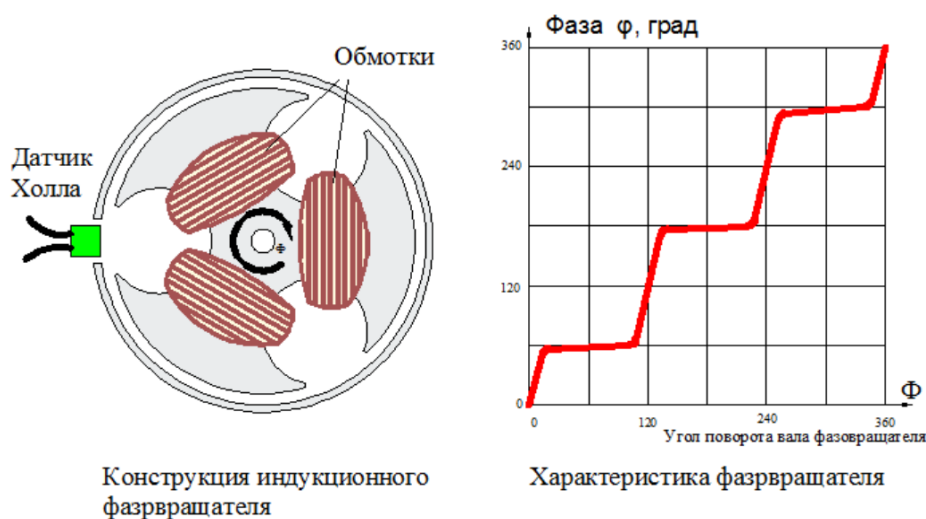


Рисунок 1 – Конструкция и характеристика индукционного фазовращателя

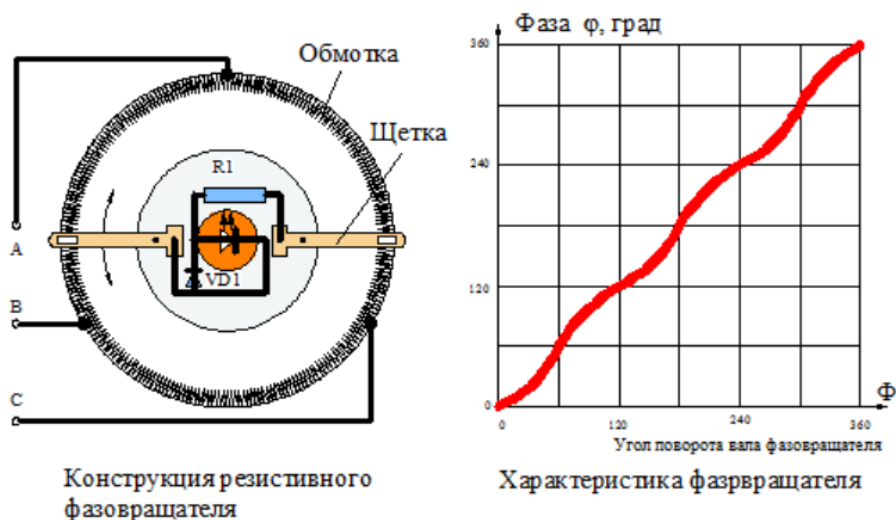


Рисунок 2 – Конструкция и характеристика потенциометрического фазовращателя

Для снятия выходного сигнала в центре щеточного блока установлен инфракрасный светодиод, а снаружи сигнал принимался инфракрасным фотодиодом, чем обеспечивалась полная гальваническая развязка микропроцессорной системы от цепей дизеля. Вместе с тем возникла необходимость в самостоятельном изготовлении такого нестандартного потенциометрического датчика.

Как видно из рисунка 2 этот фазовращатель имеет вполне приемлемую близкую к линейной характеристику преобразования.

Рассмотрим второй вариант, упомянутый выше.

Как уже говорилось, некоторые судовые дизели имеют чисто механический тахометр, то есть не имеют тахогенератора. В этом случае негде снимать сигнал запуска измерений, соответствующий нижней мертвой точке. Выход из этого положения был найден на пути разработки специального датчика, вырабатывающего сигнал запуска в момент начала впрыска топлива в цилиндр форсункой. При этом должно выполняться условие мобильности системы, то есть требования упрощения каких-либо манипуляций без остановки работающего двигателя. Данное требование определило конструкцию датчика (рисунок 3).

Датчик выполнен в виде зажима, легко закрепляемого на трубках, соединяющих насос высокого давления с форсунками всех цилиндров.

Во время впрыска насос создает импульс высокого давления (порядка 150 атмосфер) внутри подводящих трубок. При этом диаметр трубок увеличивается, естественно на очень малую величину. Задача датчика – уловить эту деформацию и преобразовать ее в электрический сигнал. Основная проблема здесь – крайне малая деформация трубки, что определяло высокие требования к чувствительности датчика. Принципиально можно было использовать различные типы измерительных преобразователей. Для выбора подходящего типа были опробованы различные варианты, из которых наиболее приемлемым оказался пьезокерамический датчик, который реагирует на силу, вызывающую деформацию вызывая появление поверхностного заряда.

Расчеты, проведенные согласно материалам книги [2] позволяют создать приемлемую конструкцию. Эксперименты показали, что можно получить сигнал достаточного уровня для непосредственной работы логических схем и без использования обычно применяемых в таком случае электрометрических усилителей путем подбора емкости конденсатора нагрузки пьезокерамики. На рисунке 4 показана схема согласования датчика с цифровыми устройствами измерительного блока.

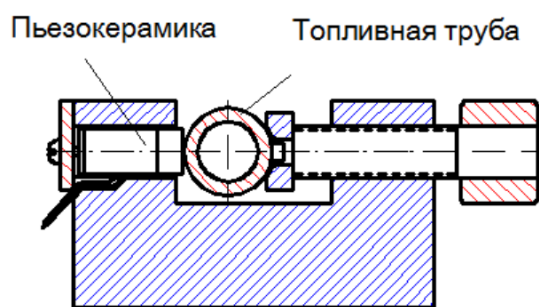


Рисунок 3 – Конструкция датчика

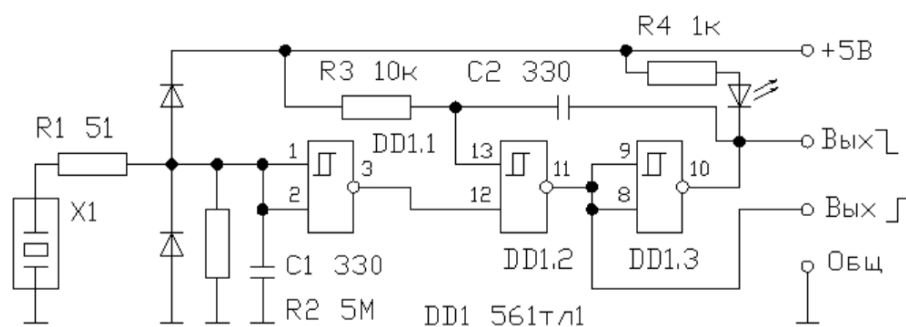


Рисунок 4 – Схема согласования датчика с цифровыми устройствами

Сигнал с нагрузочного конденсатора поступает на вход триггера Шмитта, где формируется прямоугольный импульс. Поскольку сигнал с пьезокерамики не идеальный, а может содержать побочные недопустимые выбросы, окончательное формирование сигнала

осуществляется одновибратором, вырабатываемый импульс которого перекрывает по длительности импульс на его входе.

Датчик снабжен индикаторным светодиодом, равномерное мерцание которого свидетельствует о нормальной работе. Зачастую приходится очищать место установки датчика от грязи и грубого красочного покрытия.

Следует, однако, заметить, что запускающий цикл измерения импульс в этом случае соответствует не нижней мертвой точке, а моменту впрыска топлива. Вследствие этого полученная индикаторная диаграмма будет начинаться с этого момента, то есть начальный участок диаграммы будет потерян. Эта особенность, однако, не существенна, поскольку начальный участок не представляет диагностической ценности. Главная информация содержится в отображаемой части, по ней определяются максимальное давление в цилиндре и самое главное – тепловая мощность цилиндра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Гогин, А.Ф. Судовые дизели / А.Ф. Гогин, Е.Ф. Кивалкин, А.А. Богданов. -М.: Транспорт, 1988. -440 с.
- 2 Евтихийев Н.Н. Измерение электрических и неэлектрических величин / Н.Н. Евтихийев, Я.А. Купершмит, В.Ф. Папуловский, В.Н. Скугоров. -М.: Энергоатомиздат, 1990. -255 с.

REFERENCES

- 1 A.F. Gogin, E.F. Kivalkin, A.A. Bogdanov. Ship Diesel Engines [Sudovye dizeli]. Moscow. Transport Publ. 1988. 440 p.
- 2 N.N. Evtikhiyev, Ya.A. Kupershmrit, V.F. Papulovskiy, V.N. Skugorov. Measurement of electrical and non-electrical quantities [Izmerenie elektricheskikh i neelektricheskikh velichin]. Moscow. Energoatomizdat Publ. 1990. 255 p.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: индикаторная диаграмма, дизель, датчик

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ: Осипов Виктор Иванович, канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «СГУВТ»

Подъячев Артем Алексеевич, магистрант ФГБОУ ВО «СГУВТ»

Лобес Иоанн Евгеньевич, магистрант ФГБОУ ВО «СГУВТ»

ПОЧТОВЫЙ АДРЕС: 630099, г.Новосибирск, ул.Щетинкина, 33, ФГБОУ ВО «СГУВТ»

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ МЕХАНИЗМА НА ЖЕСТКОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»

А.К. Зувев, Ю.И. Ришко, В.В. Коновалов

HOW GEOMETRY OF THE MECHANISM EFFECTS ON ITS STIFFNESS PROPERTIES

Siberian State University of Water Transport (SSUWT) 33, Schetinkina St., Novosibirsk, 630099, Russia

Anatoliy K. Zuev (Holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Prof. of SSUWT)

Yuriy I. Rishko (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of SSUWT)

Valeriy V. Kononov (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of SSUWT)

ABSTRACT: This paper shows a method of calculating the stiffness of a mechanism with elastic links at any point. This information is necessary for the analysis of the dynamics of the mechanism, and for the definition of dangerous driving forces that can cause resonance as well.

Keywords: resonance, stiffness, elasticity of mechanisms links, ductility, fluctuations

Представлена методика расчета жесткости механизма, обладающего упругими звеньями, в любой его точке. Данная информация необходима для анализа динамики механизма, определения опасных с точки зрения резонанса вынуждающих сил и мест их приложения.

В расчетах прочности и виброустойчивости современных машин значительную составляющую занимает определение частот собственных колебаний различных узлов и деталей, подвергающихся воздействию периодических сил. Методики расчета частот собственных колебаний отдельных звеньев типичной формы давно известны [1], достоверность этих методов весьма высока. Однако такие расчеты не всегда позволяют судить о виброустойчивости механизма в целом, поскольку их сложность многократно возрастает при попытке рассчитать комплекс взаимосвязанных звеньев. Ниже изложим методику, которая возможно несколько упростит и повысит точность подобных расчетов. Целью расчета ставится определить жесткость механизма в любой его точке, по известной жесткости упругих связей и известным структурно-геометрическим параметрам, причем не в одном (мгновенном) положении, а как функцию обобщенной координаты. Для этого необходимо определить силу, приложенную в исследуемой точке, под действием которой механизм совершит движение, преодолевая силы упругости всех связей; после чего продифференцировать ее по перемещению соответствующей точки в направлении этой силы.

Метод основан на известном принципе возможных перемещений [2], который может быть использован для произвольного механизма, обладающего i -ым количеством упругих звеньев. Достаточно в искомой точке j механизма приложить некоторую силу $\bar{F}_j$, тогда в упругих связях возникнут силы упругости $\bar{F}_i$ и движение механизма, согласно этому принципу, можно будет описать уравнением

$$\sum_{i=1}^n \bar{F}_i \delta \bar{s}_i + \bar{F}_j \delta \bar{s}_j = 0, \quad (1)$$

где $\delta \bar{s}_i$ – бесконечно малое перемещение точки i , под действием силы $\bar{F}_i$;

$\delta \bar{s}_j$ – бесконечно малое перемещение точки j , под действием силы $\bar{F}_j$.

Векторное выражение (1) превратим в скалярное, учитывая направления векторов соответствующими углами

$$\sum_{i=1}^n F_i \delta s_i \cos \left(\hat{\bar{F}_i \delta \bar{s}_i} \right) + F_j \delta s_j \cos \left(\hat{\bar{F}_j \delta \bar{s}_j} \right) = 0, \quad (2)$$

или, обозначив соответствующие углы между силами и направлениями α_i и α_j

$$\sum_{i=1}^n F_i \delta s_i \cos \alpha_i + F_j \delta s_j \cos \alpha_j = 0. \quad (3)$$

Поделим все его члены на бесконечно малое изменение обобщенной координаты $\delta \phi$, получим

$$\sum_{i=1}^n F_i \frac{\delta s_i}{\delta \phi} \cos \alpha_i + F_j \frac{\delta s_j}{\delta \phi} \cos \alpha_j = 0. \quad (4).$$

В соответствии с определениями теории машин и механизмов [3] обозначим:

$$\frac{\delta s_i}{\delta \varphi} = s'_i(\varphi) - \text{аналог скорости точки } i;$$

$$\frac{\delta s_j}{\delta \varphi} = s'_j(\varphi) - \text{аналог скорости точки } j.$$

Теперь выражение (4) можно представить в виде

$$\sum_{i=1}^n F_i s'_i \cos \alpha_i + F_j s'_j \cos \alpha_j = 0, \quad (5)$$

откуда

$$F_j = - \frac{\sum_{i=1}^n F_i s'_i \cos \alpha_i}{s'_j \cos \alpha_j}. \quad (6)$$

Для определения упругих сил F_i достаточно жесткости упругих связей C_i умножить на соответствующие перемещения s_i , тогда получим

$$F_j = - \frac{\sum_{i=1}^n C_i s_i s'_i \cos \alpha_i}{s'_j \cos \alpha_j}. \quad (7)$$

Теперь, чтобы определить жесткость точки j механизма, необходимо продифференцировать полученную силу по соответствующему перемещению, как сложную функцию

$$C_j(\varphi) = \frac{\delta F_j(\varphi)}{\delta s_j(\varphi)} = \frac{\delta F_j(\varphi)}{\delta \varphi} \frac{\delta \varphi}{\delta s_j(\varphi)}, \quad (8)$$

или, с учетом выражений для аналогов скорости

$$C_j(\varphi) = \frac{\delta F_j(\varphi)}{\delta \varphi} \frac{1}{s'_j(\varphi)}. \quad (9)$$

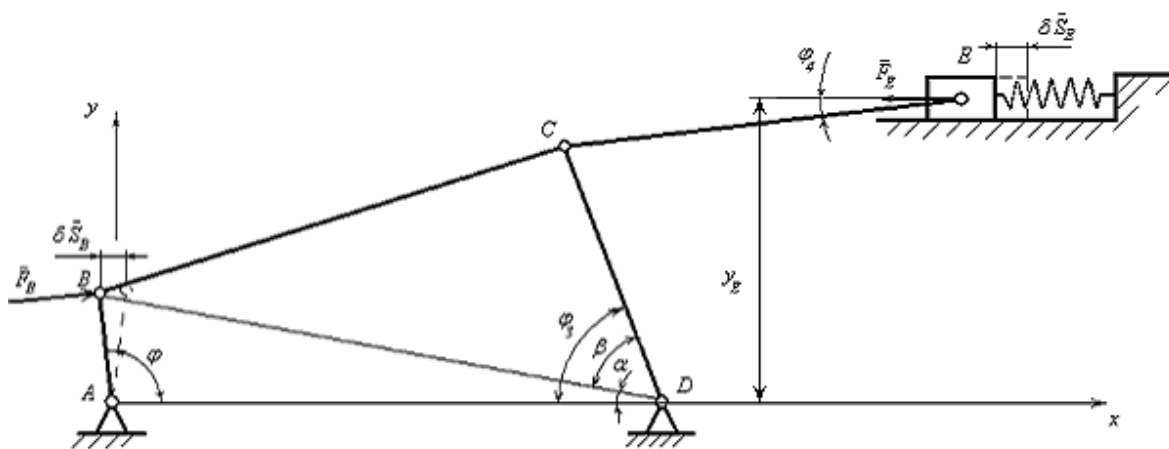


Рисунок 1 – Механизм с упругой связью

Для примера рассмотрим произвольный рычажный механизм, включающий в себя одну упругую связь (рисунок 1). При этом все остальные звенья механизма принимаем абсолютно жесткими.

Для определения скоростей механизма или их аналогов существует несколько различных графических или аналитических методов. Используя метод «преобразования координат» [4] определим выражения для аналогов скоростей точек В и Е по рисунку 1.

Проекции перемещения точки В найдем как

$$s_{Bx}(\varphi) = AB \cos \varphi; \quad (10)$$

$$s_{By}(\varphi) = AB \sin \varphi. \quad (11)$$

Отрезок BD по теореме косинусов

$$BD(\varphi) = \sqrt{AB^2 + AD^2 - 2AB \cdot AD \cos \varphi}. \quad (12)$$

Угол между BD и AD

$$\alpha(\varphi) = \arccos \frac{AD^2 + BD^2(\varphi) - AB^2}{2AD \cdot BD(\varphi)}. \quad (13)$$

Аналогично угол между BD и CD

$$\beta(\varphi) = \arccos \frac{BD^2(\varphi) + CD^2 - BC^2}{2BD(\varphi) \cdot CD}. \quad (14)$$

Угол поворота звена CD определим как сумму

$$\varphi_3(\varphi) = \alpha(\varphi) + \beta(\varphi). \quad (15)$$

Теперь, проекции перемещения точки C могут быть определены

$$s_{Cx}(\varphi) = AD - CD \cdot \cos \varphi_3(\varphi); \quad (16)$$

$$s_{Cy}(\varphi) = CD \cdot \sin \varphi_3(\varphi). \quad (17)$$

Угол поворота звена CE определим как

$$\varphi_4(\varphi) = \arcsin \frac{y_E - s_{Cy}(\varphi)}{CE}. \quad (18)$$

Перемещение точки E определим через координату

$$s_E(\varphi) = s_{Ex}(\varphi) = s_{Cx}(\varphi) + CE \cdot \cos \varphi_4(\varphi). \quad (19)$$

Проекция скоростей на оси координат

$$s'_{Bx}(\varphi) = \frac{ds_{Bx}(\varphi)}{d\varphi}; \quad s'_{By}(\varphi) = \frac{ds_{By}(\varphi)}{d\varphi}; \quad s'_E(\varphi) = \frac{ds_{Ex}(\varphi)}{d\varphi}. \quad (20)$$

Окончательно аналог скорости точки B

$$s'_B(\varphi) = \sqrt{s'^2_{Bx}(\varphi) + s'^2_{By}(\varphi)}. \quad (21)$$

Упругую силу в точке B найдем из выражения (7) при этом учтем, что направление перемещения точки E и силы упругости либо совпадают, либо противоположны, что учитывается знаком аналога скорости точки E

$$F_B(\varphi) = C_E s_E(\varphi) \frac{s'_E(\varphi)}{s'_B(\varphi)}. \quad (22)$$

Жесткость механизма в точке B, из выражения (9)

$$C_B(\varphi) = \frac{dF_B(\varphi)}{d\varphi} \frac{1}{s'_B(\varphi)}. \quad (23)$$

Определение жесткости механизма в точке можно проводить в любом из математических пакетов на ЭВМ, используя приведенный алгоритм. На рисунках 2 и 3 отражены результаты решения данной задачи в программе MathCAD.

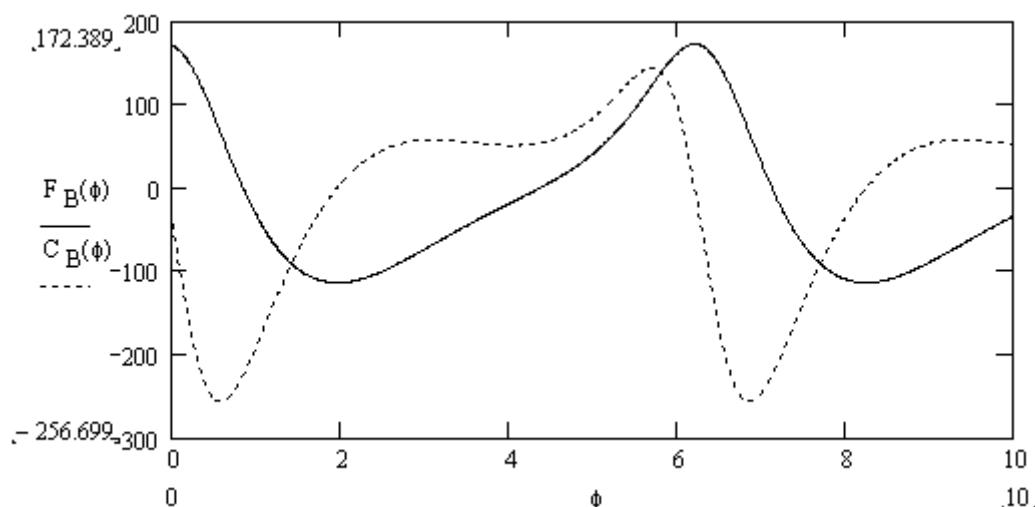


Рисунок 2 – Зависимость упругой силы и жесткости механизма в точке B от угла поворота кривошипа

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Ананьев, И.В. Справочник по расчету собственных колебаний упругих систем / И.В. Ананьев. - М.-Л.: Гостехиздат, 1946. -223 с.
- 2 Тарг, С.М. Краткий курс теоретической механики / С.М. Тарг. -М.: Наука, 1970. -480 с.
- 3 Левитский, О.Н. Краткий курс ТММ / О.Н. Левитский, Н.И. Левитская. -М.: Высш. шк., 1985. -279 с.
- 4 Барановский, А.М. Кинематическое исследование плоских рычажных механизмов / А.М. Барановский, Ю.И. Ришко. -Новосибирск: Новосиб. гос. акад. водн. трансп., 2002. -36 с.

REFERENCES

- 1 I.V. Anan'ev. Handbook for the calculation of natural oscillations of elastic systems [Spravochnik po raschetu sobstvennykh kolebaniy uprugikh system]. Moscow. Leningrad. Gostekhizdat Publ. 1946. 223 p.
- 2 S.M. Targ. Short course of the Theoretical Mechanics [Kratkiy kurs teoreticheskoy mekhaniki]. Moscow. Nauka Publ. 1970. 480 p.
- 3 O.N. Levitskiy, N.I. Levitskaya. Short course of the Theory of Mechanisms and Machines [Kratkiy kurs TMM]. Moscow. Vysshaya shkola Publ. 1985. 279 p.
- 4 A.M. Baranovskiy, Yu.I. Rishko. Kinematic study of flat lever mechanisms [Kinematicheskoye issledovanie ploskikh rychaznykh mekhanizmov]. Novosibirsk. Novosibirsk St. Acad. of Water Transp. Publ. 2002. 36 p.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: резонанс механизмов, жесткость, упругость звеньев механизма, податливость, колебания механизмов

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ: Зуев Анатолий Кузьмич, докт. техн. наук, профессор ФГБОУ ВО «СГУВТ»

Ришко Юрий Иванович, канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «СГУВТ»

Коновалов Валерий Владимирович, канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «СГУВТ»

ПОЧТОВЫЙ АДРЕС: 630099, г.Новосибирск, ул.Щетинкина, 33, ФГБОУ ВО «СГУВТ»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГЛУБИНЫ ОЧИСТКИ ОТРАБОТАННЫХ МОТОРНЫХ МАСЕЛ ОТ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ В ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ОЧИСТИТЕЛЯХ ПРИ ИХ РЕГЕНЕРАЦИИ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-СТАТИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

ФГБОУ ВО «Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского»

В.В. Тарасов

DETERMINATION OF DEPTH PARAMETERS OF CLEANING MOTOR OILS FROM MECHANICAL IMPURITIES IN CENTRIFUGAL CLEANERS IN THEIR REGENERATION BASED ON THE EXPERIMENTAL STATISTICAL MODEL

Maritime State University named after admiral G.I.Nevelskoi (MSU named after adm. G.I.Nevelskoi) 50a, Verkhneportovaya St., Vladivostok, 690059, Russia

Valerii V. Tarasov (Prof. of MSU named after adm. G.I.Nevelskoi)

ABSTRACT: By using mathematical methods of optimal experiment planning, the authors obtained a mathematical model of multidimensional process of removing insoluble mechanical impurities in regeneration of used motor oil for marine diesels. The model considers the impact of many factors and incomplete information about the mechanism of this process.

Keywords: planning of experiment, experimental statistical model, regeneration factor, used motor oil, mechanical impurities

С использованием математических методов оптимального планирования эксперимента получена математическая модель многомерного процесса удаления нерастворимых механических примесей при регенерации отработанных моторных масел судовых дизелей. Модель учитывает многофакторность и неполные сведения о механизме данного процесса.

Регенерация отработанных моторных масел (ОММ) судовых дизелей является важной государственной задачей энергоресурсосбережения горючесмазочных материалов в процессе их эксплуатации [1]. В судовых условиях необходимо применение малогабаритных модульных регенерационных комплексов «Румс», которые могут решить поставленную задачу по повторному использованию ресурса ОММ и снижения антропогенной нагрузки на окружающую среду [1, 2]. На кафедре СДВС МГУ им. адмирала Г.И. Невельского создана установка по регенерации ОММ «Румс-1», которая является частью авторской схемы регенерационного комплекса «Румс» с использованием штатного оборудования систем СЭУ [2, 3].

В качестве критерия оптимизации процесса глубины очистки ОММ от нерастворимых механических примесей (НРП), выбрана оценка износа I основных деталей судового дизеля [3, 4]. Зависимость износа от влияющих на него факторов можно выразить функциональной связью

$$I = f(\varphi_p, M), \quad (1)$$

где φ_p – коэффициент регенерации, относительная величина %;

M – ранг масла (группа моторных свойств).

Для проведения эксперимента были подобраны три группы отработанных масел, кото-

рые функционировали в судовых дизелях с повышенной частотой вращения ($n = 16,7 \text{ с}^{-1}$) и форсировкой по среднему эффективному давлению $p_{me} = 0,8-2,0 \text{ МПа}$. Масла в исходном состоянии полностью соответствовали продуктам М14Г₂(цс), М14Д₂(цл20) и М14Д₂(цл30) (ГОСТ 12337-84) [4].

В эксперименте в качестве управляемых факторов были выбраны вышеперечисленные отработанные нефтепродукты, закодированные рангом $M = -1$ – масло М14Г₂(цс), $M = 0$ – масло М14Д₂(цл20) и $M = +1$ – масло М14Д₂(цл30). Уровень загрязнения отработанных масел НРП оценивали по коэффициенту регенерации φ_p , который равнялся 0, 0,5 и 1, что соответствовало пробам масла с загрязнением нерастворимыми примесями $c_{(-1)} = 4 \pm 0,4\%$ ($x_1 = -1$), $c_{(0)} = 2 \pm 0,2\%$ ($x_1 = 0$), $c_{(+1)} = 0,2 \pm 0,05\%$ ($x_1 = +1$) [4].

Коэффициент регенерации рассчитывался через соотношение содержания НРП s_x в очищенном, то есть прошедшем длительное сепарирование, масла и исходной концентрации $c_{(-1)}$ в нефтепродукте, выбранном для сепарирования $\varphi_p = (c_{(-1)} - c_{(i)}) / c_{(-1)}$. Как кодировались факторы видно из таблицы 1.

Таблица 1 – Уровни и интервалы варьирования факторов

Факторы	Кодовые обозначения	Интервал варьирования	Уровни факторов		
			нижний -1	основной 0	верхний +1
Коэффициент регенерации ММ по нерастворимым примесям φ_p , отн. ед.	x_1	0,5	0	0,5	1
Качество отработанного масла M , ранг	x_2	1	-1	0	+1

Функция отклика y представляет в относительных единицах (%) износ, подвижного и неподвижного роликов за цикл (5 ч) испытаний, определяемый относительно результата, полученного в центре факторного пространства ($x_1 = x_2 = 0$). Суммарный износ фиксировался по двум деталям при трехкратных повторных испытаниях в центре плана с выбранным сочетанием факторов. Весомость износа каждого из роликов при формировании суммарного показателя I принята одинаковой [3, 4].

Для проведения экспериментов выбран ортогональный центральный композиционный план второго порядка. Достоинство его состоит в малом объеме вычислений, так как все коэффициенты регрессии определяются независимо друг от друга. Ортогонализация экспериментальных данных достигнута выбором «звездного» плана с преобразованием квадратичных членов уравнения для достижения ортогонализации всех столбцов матрицы по рекомендациям [5, 6].

Число опытов в центре плана равняется трем. Они в разработанном плане (таблица 2) для достижения ортогональности при величине «звездного» плана $\alpha = 1$ представлены одной строкой. Для ортогонализации всех столбцов матрицы осуществлена замена x_1^2 и x_2^2 новой переменной x'_2 и x'_1 , выражение для которой соответствуют согласно [6]

$$x'_1 = x_1^2 - \frac{2}{3}; \quad x'_2 = x_2^2 - \frac{2}{3}.$$

Реализация экспериментов по приведенной матрице планирования (таблица 2) позволило представить функцию отклика (износ I , выраженный в относительных единицах) в виде полинома второй степени

$$y = 101,5 - 24,15x_1 - 19,7x_2 + 11,12x_1x_2 + 15,28x_1^2 + 5,13x_2^2. \quad (2)$$

Функцию отклика y (износ I) за цикл испытаний (5 ч) фиксировали по подвижному и неподвижному роликам в безразмерном виде через значение этого показателя при факторах в центре плана. При $x_1 = x_2 = 0$ износ подвижного ролика был равен $\Delta \bar{G}_{сч(0)} = 36 \text{ мг}$, неподвижного – $\Delta \bar{V}_{сч(0)} = 142 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3$.

Суммарный износ в любом из опытов рассчитывали по формуле

$$N_j = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta G_{CЧ(j)}}{\Delta \bar{G}_{CЧ(0)}} + \frac{\Delta V_{Cr(j)}}{\Delta \bar{V}_{Cr(0)}} \right) 100\% .$$

Таблица 2 – Матрица ортогонального центрального композиционного плана второго порядка для факторов φ_p и M

Содержание плана	№ опы- та	x_0	x_1	x_2	x_1x_2	$x_1^2(x'_1)$	$x_2^2(x'_2)$	y_j	$\hat{y}_j$	$(y_j - \hat{y}_j)^2$
План типа 22	1	+	+	+	+	+ (+1/3)	+ (+1/3)	87,3	88,2	0,81
	2	+	—	+	—	+ (+1/3)	+ (+1/3)	115,0	114,4	0,36
	3	+	+	—	—	+ (+1/3)	+ (+1/3)	106,1	107,2	1,21
	4	+	—	—	+	+ (+1/3)	+ (+1/3)	178,4	178,2	0,04
«Звездные» точ- ки с плечом $\alpha = 1$	5	+	+	0	0	α^2 (+1/3)	0 (-2/3)	94,2	92,1	4,41
	6	+	—	0	0	α^2 (+1/3)	0 (2/3)	140,0	140,7	0,49
	7	+	0	+	0	0 (-2/3)	α^2 (+1/3)	86,7	86,2	0,25
	8	+	0	—	0	0 (-2/3)	α^2 (+1/3)	128,5	127,6	0,81
Нулевая точка	9	+	0	0	0	0 (-2/3)	0 (-2/3)	104,2	100	17,64
								98,5		2,25
								97,8		7,29
Коэффициенты	y	$b'_0b_0^*$	b_1	b_2	b_{12}	b_{11}	b_{22}	$S_E = \sum_{u=1}^3 (y_u - \bar{y}_u)^2 = 27,18 ;$		
	y	115,1 101,5	— 24,1	-19,7	11,12	15,28	5,13	$S_R = \sum_{j=1}^8 (y_j - \hat{y}_j)^2 = 8,38$		

*-значение b'_0 при представлении вместо x_1^2 и x_2^2 преобразованной переменной $x'_1 = x_1^2 - 2/3$, $x'_2 = x_2^2 - 2/3$. Переход к обычной форме записи осуществляется расчетом $b_0 = b'_0 - 2/3(b_{11} + b_{22}) = 115,1 - 2/3(15,28 + 5,13) = 101,5$

Скорость изнашивания определялась посредством выражения

$$\bar{J}_{CЧ(0)} = \frac{\Delta \bar{G}_{CЧ(0)}}{\tau} = \frac{36}{5} = 7,2 \text{ мг/ч};$$

$$\bar{J}_{Cr(0)} = \frac{\Delta \bar{V}_{Cr(0)}}{\tau} = \frac{142}{5} = 28,4 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^2/\text{ч};$$

$$J_j = \frac{1}{2} \left(\frac{J_{CЧ(j)}}{\bar{J}_{CЧ(0)}} + \frac{J_{Cr(j)}}{\bar{J}_{Cr(0)}} \right) 100\% .$$

Благодаря ортогональности матрицы планирования коэффициенты регрессии определялись независимо друг от друга [6, 7]

$$b_i = \frac{\sum_{j=1}^n x_{ij} y_i}{\sum_{j=1}^N x_{ij}^2} ,$$

где i – номер столбца матрицы;
 j – номер опыта;
 x_{ij} – элементы соответствующего столбца матрицы;
 y_i – значение параметра в j -ом опыте.

Коэффициенты модели соответствовали

$$b_0 = 101,5; b_1 = -24,15; b_2 = -19,7; b_{12} = 11,12; b_{11} = 15,28; b_{22} = 5,13.$$

Дисперсия адекватности была определена по формуле [6]

$$s_{ad} = \frac{S_R}{N - (k + 1)} = \frac{8,38}{8 - (2 - 1)} ,$$

где N – число опытов;
 k – число факторов.

Дисперсии коэффициентов регрессии определяли по формуле

$$s^2 \{b_i\} = \frac{s_{ад}^2}{\sum_{j=1}^n x_{ij}^2}.$$

Дисперсии коэффициентов не равны, так как сумма квадратов элементов столбцов матрицы $\sum_{j=1}^n x_{ij}$ не равны друг другу.

Поэтому

$$s^2 \{b_1\} = s^2 \{b_2\} = s^2 \{b_{11}\} = s^2 \{b_{22}\} = \frac{1,68}{6} = 0,28; \quad s^2 \{b_{12}\} = \frac{1,68}{4} = 0,42.$$

Средняя квадратичная ошибка в определении коэффициентов уравнения (2) регрессии оказалась следующей: $s\{b_i\} = s\{b_{ii}\} = 0,53$, $s\{b_{ij}\} = 0,65$. Доверительный интервал коэффициентов уравнения регрессии определяли с учетом критерия Стьюдента t_s , который при 5%-ном уровне значимости и числе степеней свободы $f = 5$ равен 2,57 [6]. Следовательно, $\Delta b_i = \Delta b_{ii} = 2,57 \cdot 0,53 = 1,36$; $\Delta b_{ij} = 2,57 \cdot 0,65 = 1,67$.

Коэффициенты уравнения регрессии по абсолютной величине оказались больше доверительного интервала, потому их можно признать статически значительными.

По результатам опытов в центре плана была вычислена дисперсия s_y^2 воспроизводимости эксперимента

$$s_y^2 = \frac{S_E}{n_0 - 1} = \frac{15,38}{3 - 1} = 7,69,$$

где n_0 — число опытов в нулевой точке, $n_0 = 3$.

Проверку адекватности полученной модели проводили по F -критерию Фишера [6]. Расчетный критерий соответствует

$$F_p = s_{ад}^2 / s_y^2 = 1,68 / 7,69 = 0,22.$$

При 5%-ом уровне значимости и числа степеней свободы $f_1 = 2$ и $f_2 = 5$ он оказался ниже табличного ($F_T = 19,3$), то полученная модель адекватно описывает влияние факторов на износ деталей исследуемого трибосопряжения.

Анализ коэффициентов уравнения (2) показывает, что наибольшее влияние на изнашивание трибосопряжений оказывает первый фактор x_1 ($b_1 = -24,15$). Таким образом, по мере углубления очистки ММ от НРП при его регенерации, абразивность отработанного масла снижается, что проявляется в уменьшении показателя суммарного износа I и скорости изнашивания J обоих роликов по мере увеличения φ_p . Такое явление объясняется уменьшением концентрации абразивно опасных нерастворимых продуктов в регенерированном масле.

По мере роста показателя x_1 эффект от углубления очистки отработанного масла снижается, так как интенсивность падения скорости изнашивания J замедляется. На этот факт указывает довольно высокое значение коэффициента $b_{11} = 15,28$.

Эффект взаимодействия факторов x_1 и x_2 выражен существенно ($b_{12} = 11,12$), что проявляется в ослаблении роли качества (моторной группы) отработанного масла (при переходе от $M = -1$ к $M = +1$) в снижении скорости изнашивания J по мере роста коэффициента регенерации.

Влияние запаса качества масла, фиксируемого группой моторных свойств (фактор x_2), проявляется аналогично действию показателя φ_p (фактор x_1), но проявляется менее ярко ($b_2 = -19,7$), так как его численное значение b_2 меньше b_1 . При переходе от отработанного масла группы Г2 к группе Д2 скорость износа трибосопряжений лабораторной установки падает. Снижение J по мере увеличения x_1 замедлялось при переходе с масла М14Д₂(цл20) на М14Д₂(цл30) по сравнению с заменой М14Г₂(цс) на М14Д₂(цл20). На этот факт указывает величина и положительное значение коэффициента b_{12} .

Квадратичный эффект от действия фактора x_2 проявляется в наименьшей мере ($b_{22} = 5,15$), но он значим.

Следовательно, уравнение регрессии в кодированных переменных адекватно [6]. Для получения математической модели с использованием раскодированных значений управляющих факторов необходимо преобразовать модель.

Таким образом, экспериментально-статистическая модель в поименованных переменных на базе ортогонального центрального композиционного плана второго порядка примет вид

$$I = 101,5 - 24,15\varphi_p - 19,7M + 11,12\varphi_p M + 15,58\varphi_p^2 + 5,13M^2.$$

Полученной зависимостью рекомендуется пользоваться для расчета процесса глубины очистки от НРП отработанных моторных масел разных моторных групп при их регенерации с доверительной вероятностью 0,95, с целью энергосбережения ресурса дорогостоящих при- садок к моторным маслам судовых дизелей [3-5].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1 Тарасов, В.В. Принципиальная схема установки по регенерации отработанного моторного масла в судовых условиях / В.В. Тарасов, П.В. Кулямов // -Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. -2015. -№2. -С. 175-179.

2 Тарасов, В.В. Проблемы утилизации и регенерации отработанных смазочных материалов на судах: пути их решения восстановлением моторных свойств и повторным использованием в судовых дизелях / В.В. Тарасов // Современные направления теоретических и прикладных исследований 2010: сб. науч. тр. -Одесса: Транспорт, 2010. -Т.1. -С. 65-71.

3 Тарасов, В.В. Оценка эффективности использования регенерированного моторного масла в судовых дизелях / В.В. Тарасов // -Науч. проб. транс. Сиб. и Дальн. Вост. -2010. -№2. -С. 146-152.

4 Кича, Г.П. Эффективность применения в судовых дизелях регенерированных восстановленных отработанных моторных масел / Г.П. Кича, В.В. Тарасов, Е.М. Деревцов // -Науч. проб. транс. Сиб. и Дальн. Вост. -2016. -№1-2. -С. 83-91.

5 Кича Г.П. Регенерирование отработанных моторных масел и восстановление их эксплуатационных свойств на судах / Г.П. Кича, В.В. Тарасов, С.В. Глушков // Морские интеллектуальные технологии. -2016. -№3(33). -Т.1. -С. 126-132.

6 Кича, Г.П. Ресурсосберегающее маслоиспользование в судовых дизелях / Г.П. Кича, Б.Н. Перминов, А.В. Надежкин. -Владивосток: Мор. гос. ун-т, -2011. -372 с.

7 Надежкин, А.В. Имитационная модель трибодиагностики двигателей внутреннего сгорания / А.В. Надежкин, А.В. Безвербный, Г.П. Кича // -Трение и смазка в машинах и механизмах. -2009. -№3. -С. 6-14.

8 Кича, Г.П. Триботехнические характеристики нерастворимых продуктов загрязнения моторных масел и их влияние на износ дизеля / Г.П. Кича, Г.М. Липин, С.П. Полоротов // -Трение и износ. -1998. -Т. 7, №6. -С. 1068-1078.

9 Тарасов, В.В. Обоснование глубины очистки отработанных моторных масел от механических примесей при их регенерации и повторном использовании в СЭУ / В.В. Тарасов // -Науч. проб. транс. Сиб. и Дальн. Вост. 2016. №3-4. -С. 99-108.

10 Спиридонов, А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А.А. Спиридонов. -М.: Машиностроение, 1981. -184 с.

1 V.V. Tarasov, P.V. Kulyamov. Schematic diagram of the plant for regeneration of used engine oil onboard [Printsipial'naya skhema ustanovki po regeneratsii otrabotannogo motornogo masla v sudovykh usloviyakh]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*. 2015. No.2. pp. 175-179.

2 V.V. Tarasov. Problems of recycling used lubricants on ships. Solutions via restoration of lubricating properties and further reuse in marine diesel engines [Problemy utilizatsii i regeneratsii otrabotannykh smazochnykh materialov na sudakh: puti ikh resheniya vosstanovleniem motornykh svoystv i povtornym ispol'zovaniem v sudovykh dizelyakh]. *Proceedings of the conference "Current trends in theoretical and applied research 2010"* [Sovremennye napravleniya teoreticheskikh i prikladnykh issledovaniy]. Odessa. Transport Publ. 2010. Vol.1. pp. 65-71.

3 V.V. Tarasov. Estimation of efficiency of the use of regenerated motor oil in marine diesel engines [Otsenka effektivnosti ispol'zovaniya regenerirovannogo motornogo masla v sudovykh dizelyakh]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*. 2010. No.2. pp. 146-152.

4 G.P. Kicha, V.V. Tarasov, E.M. Derevtsov. Efficiency of use of regenerated motor oils in marine diesel engines [Effektivnost' primeneniya v sudovykh dizelyakh regenerirovannykh vosstanovlennyykh otrabotannykh motornykh masel]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*. 2016. No. 1-2. pp. 83-91.

5 G.P. Kicha, V.V. Tarasov, S.V. Glushkov. Regeneration of used motor oils and restoration of their original properties [Regenerirovannye otrabotannykh motornykh masel i vosstanovlenie ikh ekspluatatsionnykh svoystv na sudakh]. *Marine intellectual technologies [Morskie intellektual'nye tekhnologii]*. 2016. No. 3(33), -Vol. 1. pp. 126-132.

6 G.P. Kicha, B.N. Perminov, A.V. Nadezhkin. Resource-conserving oil consuming in marine diesels [Resursosberegayushchee masloispol'zovanie v sudovykh dizelyakh]. Vladivostok. Marytime St. Univ. Publ. 2011. 372 p.

7 A.V. Nadezhkin, A.V. Bezverbnyy, G.P. Kicha. Imitation model of tribodiagnostics of internal combustion engines [Imitatsionnaya model' tribodiagnosticski dvigateley vnutrennego sgoraniya]. *Trenie i mazka v mashinakh i mekhanizmkh*. 2009. No. 3. pp. 6-14.

8 G.P. Kicha, G.M. Lipin, S.P. Polorotov. Tribotechnical characteristics of insoluble oil contaminants and their effect on engine wear [Tribotekhnicheskie kharakteristiki nerastvorimyykh produktov zagryazneniya motornykh masel i ikh vliyanie na iznos dizelya]. *Friction and wear [Trenie i iznos]*. 1998. Vol. 7. No. 6. pp. 1068-1078.

9 V.V. Tarasov. Substantiation of the depth of cleaning of used motor oils from mechanical impurities during their regeneration and reuse in diesel engine [Obosnovanie glubiny ochistki otrabotannykh motornykh masel ot mekhanicheskikh primesey pri ikh regeneratsii i povtornom ispol'zovanii v SEU]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*. 2016. No. 3-4. pp. 99-108.

10 A.A. Spiridonov. Planning an experiment in the study of technological processes [Planirovanie eksperimenta pri issledovanii tekhnologicheskikh protsessov]. Moscow. Mashinostroenie Publ. 1981. 184 p.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

планирование эксперимента, экспериментально-статистическая модель, коэффициент регенерации, отработанное моторное масло, механические примеси

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Тарасов Валерий Васильевич, профессор МГУ им. адм. Г.И. Невельского

ПОЧТОВЫЙ АДРЕС:

690059, г.Владивосток, ул.Верхнепортовая, 50а, МГУ им. адм. Г.И. Невельского

ОЦЕНКА ПРОТИВОИЗНОСНЫХ СВОЙСТВ РЕГЕНЕРИРОВАННЫХ ОТРАБОТАННЫХ МОТОРНЫХ МАСЕЛ РАЗЛИЧНОГО КАЧЕСТВА И УРОВНЯ ОСТАТОЧНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ И РАЗМЕРА МЕХАНИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ

ФГБОУ ВО «Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского»

ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет»

В.В. Тарасов, А.И. Самсонов

EVALUATION OF WEAR PROOF PROPERTIES OF REGENERATED USED MOTOR OILS OF DIFFERENT QUALITY AND LEVEL OF RESIDUAL CONCENTRATION AND SIZE OF MECHANICAL IMPURITIES

Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoi (MSU named after adm. G.I. Nevelskoi) 50a, Verkhneportovaya St., Vladivostok, 690059, Russia

Far Eastern Federal University (FEFU) 8, Sukhanova St., Vladivostok, 690090, Russia

Valerii V. Tarasov (Prof. of MSU named after adm. G.I. Nevelskoi)

Anatoliy I. Samsonov (Holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Prof. of FEFU)

ABSTRACT: The article gives recommendations to ensure the required depth of used motor oils purification from mechanical impurities, depending on their quality. To assess the anti-wear properties of oils (contaminated to a level of 3-5%), engine oil that was taken had been earlier rejected for various reasons: water and fuel, presence of mechanical impurities, additives.

Keywords: *resource conserving oil consuming, used motor oil, regenerated motor oil, anti-wear oil properties*

Представлены рекомендации по обеспечению требуемой глубины очистки отработанных моторных масел от механических примесей в зависимости от их качества (моторной группы). Для оценки противоизносных свойств масел (загрязненных до уровня 3-5%), выбрано моторное масло отбракованное по разным причинам: попадание воды и топлива, наличия механических примесей, содержание присадок.

Регенерация и восстановление эксплуатационных свойств отработанных моторных масел (ОММ) является одним из аспектов ресурсосберегающей эксплуатации судовых дизелей со снижением экологической нагрузки на окружающую среду [2].

Для оперативного решения этой задачи у потребителя нефтепродуктов на судне предлагается использовать компактную мобильную установку, комплектуемую по модульному принципу в зависимости от требуемой пропускной способности. Характеристики разработанного в Морском государственном университете им. адм. Г.И. Невельского для этих целей регенерационного модуля РУМС-1 приведены в работах [1, 2].

ОММ можно использовать в элементах судовой энергетической установки (СЭУ) с понижением моторной группы масла, как это показано в исследованиях [3]. Кроме того, их эксплуатационные свойства можно восстанавливать легированием специальными присадками [4,5] до уровня свежих ММ [6]. Восстановлению подлежат отработанные масла, прошедшие регенерацию, в результате которой из них полностью удаляются нерастворимые продукты (НРП) внешнего и внутреннего загрязнения, вода и низкотемпературные кипящие фракции, углеводороды, обусловленные поступлением в них топлива. В ОММ содержание НРП может достигать до 6%, их нормированная вязкость может изменяться как в сторону повышения, так и понижения на 20-40%, температура вспышки обычно снижается на 30-50 °С [6].

Регенерация отработанных ММ в установке РУМС-1 позволяет снизить концентрацию НРП до 0,05%, полностью удалить из них воду и топливо. Очистка масла от нерастворимых примесей и воды может осуществляться фильтрованием, циклонированием и сепарированием. Этот процесс может занимать длительное время. Наиболее эффективно его осуществлять сепарированием при нагреве масла до 70-80 °С и выборе оптимальной пропускной способности центробежного сепаратора (ЦС). При этом он обычно функционирует по замкнутому циклу, многократно очищая отработанное загрязненное масло, находящееся в специальной цистерне. Выбор режимов сепарирования зависит от диспергирующей способности отработанных масел, уровня их загрязнения НРП и водой, состава нерастворимых продуктов дисперсности примесей и глобул воды. Оптимальные режимы сепарирования, в том числе с переменной пропускной способностью ЦС, по мере снижения концентрации в масле НРП и роста дисперсности приведены в работе [6].

Целью данной статьи является оценка противоизносных свойств регенерированных ОММ с учетом обоснованной требуемой глубины их очистки от НРП. Имеются исследования

[7,8], которые показывают, что с позиций износных свойств отработанных ММ, полностью удалять из них механические примеси нет необходимости. Оценивая износные свойства регенерированных моторных масел (РММ), в аспекте безопасной эксплуатации судовых дизелей, важно учитывать: абразивность НРП, их дисперсный состав, соотношение сгораемых и минеральных (несгораемых) компонентов нерастворимых примесей. Обоснованных рекомендаций по данному вопросу нет.

Остаточные нерастворимые загрязнения в регенерированном продукте, бесспорно, будут оказывать влияние на эксплуатационные свойства и ресурс восстановленного масла. Решение поставленной в работе [9] задачи по определению безопасной остаточной концентрации мелкодисперсных НРП в ОММ после его в регенерирования, которая не оказывает значительного влияния на снижение противоизносных свойства восстановленного масла, априори позволяет констатировать, что для ММ групп Г₂, Д₂ концентрация НРП до 0,6% (в зависимости от уровня диспергирующих свойств масла) не сказывается существенно на срабатывании присадок в восстановленных нефтепродуктах [6]. Расчетами показано, что на их поддержании во взвешенном состоянии при общем загрязнении работающего масла 1,5-3% будет расходоваться менее 10% присадок. Это связано с тем, что в восстановленное регенерированное моторное масло эти загрязнения вносятся совместно с присадками в остаточной активной форме, которые частично компенсируют их расход на поддержание в высокодисперсном состоянии нерастворимой фазы с повышенной концентрацией НРП.

Для целей оценки противоизносных свойств отработанных ММ, загрязненных НРП до уровня 3-5%, были выбраны масла групп Г₂, Д₂, которые были отбракованы по разным причинам, в том числе по содержанию присадок, уровню загрязнения НРП, попадания воды и топлива. Отработанные масла имели разный уровень остаточной щелочности, содержание многофункциональных присадок. Уровень диспергирующе-стабилизирующих свойств у них также значительно отличался. Дисперсный состав НРП имел существенную разницу, как по общему составу грубодисперсных механических примесей, так и по содержанию тонкодисперсной нерастворимой фазы и ее среднему размеру нерастворимых в масле частиц.

Были подобраны три группы отработанных масел, которые функционировали в судовых дизелях. Масла в исходном состоянии полностью соответствовали продуктам М14Г₂(цс), М14Д₂(цл20) и М14Д₂(цл30) (ГОСТ 12337-84). При их отработке в форсированных дизелях в течение 1,5-2 тыс. ч, с использованием соответствующего топлива, параметры представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Состояние отработанных ММ

Марка масла	Вязкость при 100 °С, сСт	Щелочность, мг·КОН/г	Зольность фугата, %	Концентрация НРП, %
М14Г ₂ (цс)	12,3-15,1	3,5-4,3	0,41-0,6	2,2-3,4
М14Д ₂ (цл20)	12,8-14,7	4,9-7,1	0,8-1,3	2,8-3,6
М14Д ₂ (цл30)	13,2-16,7	9,2-12,8	1,2-1,6	3,2-5,4

Представленные отработанные масла подвергали сепарированию с подогревом до 78±3 °С при факторе разделения ЦС-1,5 3800, его пропускной способности 0,1-0,6 м²/ч до полного удаления нерастворимых продуктов. Конечная концентрация НРП составляла в зависимости от диспергирующих свойств масла 0,1-0,3% и была обусловлена пределом центрифугирования, что позволило достичь уровня регенерации 0,98-1, в дальнейшем эксперименте он был принят за 1. После удаления механических примесей до требуемого уровня, произведена обработка в пленочно-вакуумном регенераторе для полного удаления воды и топлива.

Была поставлена задача оценить противоизносные свойства отработанных ММ разного уровня моторных свойств, загрязненных НРП, содержащих продукты неполного сгорания топлива, износа двигателя, срабатывания присадок, старения (окисления) масел. При этом в масле содержались отдельные крупные частицы механических примесей от внешнего и внутреннего загрязнения масла (кварцем, продуктами коррозии, спекшимися конгломератами сажи от неполного сгорания топлива, карбонизации углеводородов масла). Содержание НРП (механических примесей) в отработанных маслах определяли центрифугированием их бензиновых растворов в соответствии с ГОСТ 20684-75.

Противоизносные свойства отработанного масла с разным уровнем остаточного загряз-

нения НРП, то есть прошедших частичную или полную очистку с уровнем коэффициента регенерации от 0 до 1, определяли на машине трения СМЦ-2. Режим нагружения машины был выбран для имитации условий работы поршневых колец ДВС при подходе поршня к верхней мертвой точке (ВМТ), когда трибосопряжение «поршневое кольцо-втулка» работает в очень жестких условиях [6, 8]. Лабораторные сравнительные испытания проводили на СМЦ-2 с подвижным роликом диаметром 50 мм и шириной 12 мм из серого чугуна (микротвердость $H_{\mu} = 2-2,5$ МПа, шероховатость $R_a = 0,15$ мкм). Неподвижный ролик таких же размеров из этого же материала имел хромовое пористое покрытие толщиной 500 мкм с параметрами $H_{\mu} = 8$ ГПа, $R_a = 0,62$ мкм. Внешняя нагрузка на ролики составляла 30 МПа. Большинство судовых дизелей средней и повышенной частоты вращения имеют вышеназванные детали (поршневые кольца и цилиндры втулки) с перечисленными характеристиками.

Температура в зоне трения измерялась с помощью термопары, установленной в неподвижных образцах на глубине 1,5-2 мм от поверхности. В экспериментах температура образцов в зоне трения составляла 230-250 °С, что соответствует условиям работы поршневых колец в верхней части цилиндра дизеля со средним эффективным давлением $p_{me} = 1,6-2,0$ МПа.

Смазывание пары трения осуществляли капельным способом с интенсивностью 6-10 капель/мин. Время испытания на каждом цикле с разной смазкой составляло 5 ч. После каждого цикла испытаний машину трения останавливали и, не снимая хромированного образца, оценивали износ при помощи микроскопа Бринелля, по значению ширины пятна контакта. Далее расчетом определяли глубину лунки и объем изношенного материала.

Износ подвижного образца определяли взвешиванием на электронных весах ВЛА-200 с точностью до 0,3 мг. Перед взвешиванием образцы тщательно промывали и сушили в вакуумном шкафу при температуре 120 °С и вакууме 0,1 МПа в течение 2 ч. Каждый вариант смазки испытывали один раз. В центре плана результаты испытаний осредняли по 3-м опытам, то есть проводили трижды.

Ранее выбранные управляемые факторы: x_1 по свойствам моторной группы, закодированные рангом $M = -1$ – масло М14Г₂(цс), $M = 0$ – масло М14Д₂(цл20) и $M = +1$ – масло М14Д₂(цл30) и x_2 по уровню загрязнения отработанных масел НРП, оценка по коэффициенту регенерации φ_p , который равнялся 0, 0,5 и 1, что соответствовало пробам масла [10].

Суммарный износ фиксировался по двум деталям при трехкратных повторных испытаниях с выбранным сочетанием факторов. Износ I за цикл испытаний (5 ч) фиксировали по подвижному и неподвижному роликам в безразмерном виде через значение этого показателя при факторах в центре плана. При $x_1 = x_2 = 0$ износ подвижного ролика был равен $\Delta \bar{G}_{сч(0)} = 36$ мг, неподвижного – $\Delta \bar{V}_{ср(0)} = 142 \cdot 10^{-3}$ мм³.

Суммарный износ в любом из опытов рассчитывали по формуле

$$N_j = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta G_{сч(j)}}{\Delta \bar{G}_{сч(0)}} + \frac{\Delta V_{ср(j)}}{\Delta \bar{V}_{ср(0)}} \right) 100 \text{ \%}.$$

Весомость износа каждого из роликов при формировании суммарного показателя I принята одинаковой.

Скорость изнашивания определялась посредством выражения

$$\bar{J}_{сч(0)} = \frac{\Delta \bar{G}_{сч(0)}}{\tau} = \frac{36}{5} = 7,2 \text{ мг/ч};$$

$$J_j = \frac{1}{2} \left(\frac{J_{сч(j)}}{\bar{J}_{сч(0)}} + \frac{J_{ср(j)}}{\bar{J}_{ср(0)}} \right) 100\% = 28,4 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^2/\text{ч}.$$

Экспериментальные данные, полученные в результате планирования и проведения эксперимента, позволили представить функцию отклика (износ I , выраженный в относительных единицах) в виде адекватного уравнение регрессии (полином второй степени) [10]

$$y = 101,5 - 24,15x_1 - 19,7x_2 + 11,12x_1x_2 + 15,28x_1^2 + 5,13x_2^2.$$

Уравнение неудобно для интерпретации полученных результатов. Поэтому, используя ресурсы программного комплекса Mathcad 15, для наглядной оценки процесса изнашивания

деталей дизеля получили графическое изображение гиперплоскости в 3-х мерном пространстве для кодированных значений управляемых факторов, (рисунок 1 и 2).

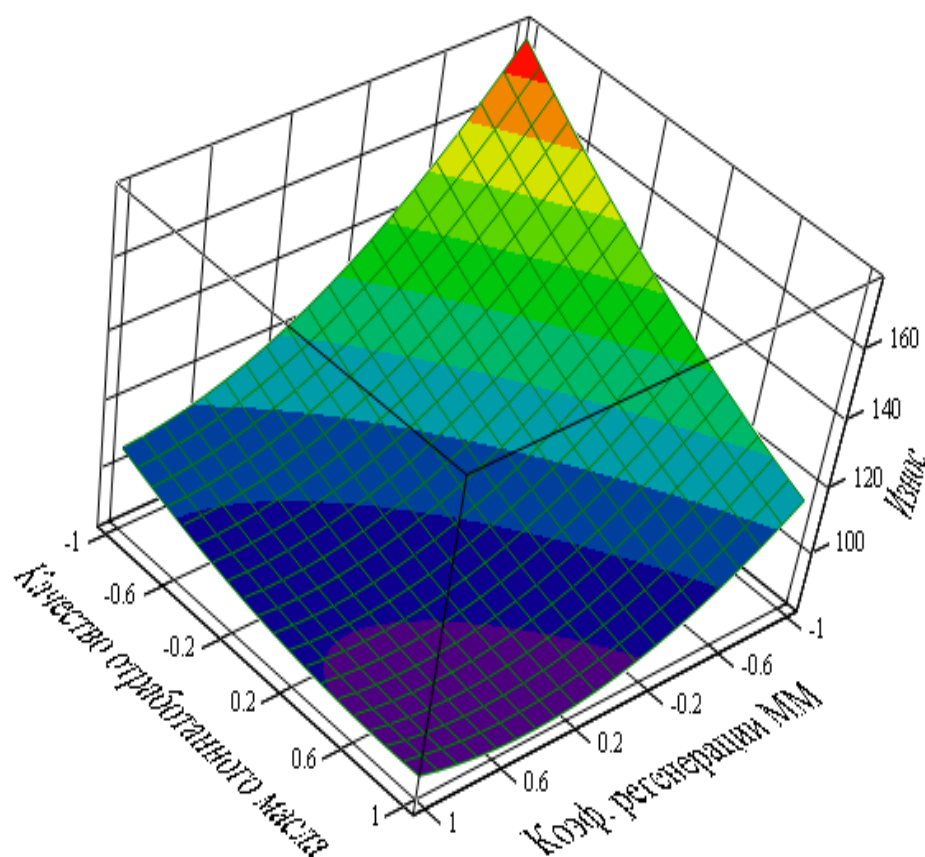


Рисунок 1 – Гиперплоскость в 3-х мерном пространстве в кодированных значениях факторов, оценивающая зависимость противоизносных свойств РММ через изнашивание судового дизеля, с учетом качества свойств моторной группы масел и коэффициента их регенерации

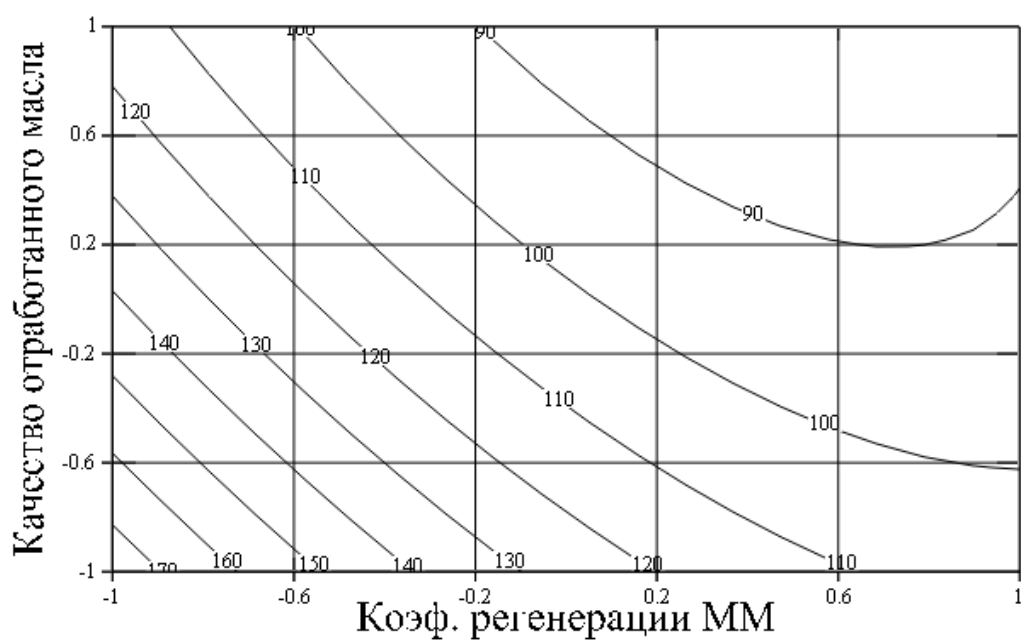


Рисунок 2 – Двухмерное сечение, характеризующее изнашивание деталей дизеля от коэффициента регенерации и качества свойств моторной группы масел

Графическая иллюстрация поверхности отклика, полученная при оценке износных

свойств РММ, по полученной нелинейной многофакторной экспериментальной регрессионной модели изменения величины изнашивания от ранга масел (свойства моторной группы) и коэффициента регенерации (глубины очистки от НРП).

Полученной зависимостью рекомендуется пользоваться для расчета параметров глубины очистки от НРП отработанных моторных масел разных моторных групп при их регенерации с доверительной вероятностью 0,95, с целью формирования методики регенерации ОММ в судовых условиях по авторской схеме с использованием штатного сепарационного оборудования [3, 4, 9].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Тарасов, В.В. Принципиальная схема установки по регенерации отработанного моторного масла в судовых условиях / В.В. Тарасов, П.В. Кулямов // -Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. -2015. -№2. -С. 175-179.
- 2 Тарасов, В.В. Проблемы утилизации и регенерации отработанных смазочных материалов на судах: пути их решения восстановлением моторных свойств и повторным использованием в судовых дизелях / В.В. Тарасов // Современные направления теоретических и прикладных исследований 2010: сб. науч. тр. -Одесса: Транспорт, 2010. -Т.1. -С. 65-71.
- 3 Тарасов, В.В. Оценка эффективности использования регенерированного моторного масла в судовых дизелях / В.В. Тарасов // -Науч. проб. транс. Сиб. и Дальн. Вост. -2010. -№2. -С. 146-152.
- 4 Кича, Г.П. Эффективность применения в судовых дизелях регенерированных восстановленных отработанных моторных масел / Г.П. Кича, В.В. Тарасов, Е.М. Деревцов // -Науч. проб. транс. Сиб. и Дальн. Вост. -2016. -№1-2. -С. 83-91.
- 5 Кича, Г.П. Регенерирование отработанных моторных масел и восстановление их эксплуатационных свойств на судах / Г.П. Кича, В.В. Тарасов, С.В. Глушков // Морские интеллектуальные технологии. -2016. -№3(33). -Т.1. -С. 126-132.
- 6 Кича, Г.П. Ресурсосберегающее маслоиспользование в судовых дизелях / Г.П. Кича, Б.Н. Перминов, А.В. Надежкин. -Владивосток: Мор. гос. ун-т, -2011. -372 с.
- 7 Надежкин, А.В. Имитационная модель трибодиагностики двигателей внутреннего сгорания / А.В. Надежкин, А.В. Безвербный, Г.П. Кича // -Трение и смазка в машинах и механизмах. -2009. -№3. -С. 6-14.
- 8 Кича, Г.П. Триботехнические характеристики нерастворимых продуктов загрязнения моторных масел и их влияние на износ дизеля / Г.П. Кича, Г.М. Липин, С.П. Полоротов // -Трение и износ. -1998. -Т. 7, №6. -С. 1068-1078.
- 9 Тарасов, В.В. Обоснование глубины очистки отработанных моторных масел от механических примесей при их регенерации и повторном использовании в СЭУ / В.В. Тарасов // -Науч. проб. транс. Сиб. и Дальн. Вост. 2016. №3-4. -С. 99-108.
- 10 Спиридонов, А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А.А. Спиридонов. -М.: Машиностроение, 1981. -184 с.

REFERENCES

- 1 V.V. Tarasov, P.V. Kulyamov. Schematic diagram of the plant for regeneration of used engine oil onboard [Printsipial'naya skhema ustanovki po regeneratsii otrabotannogo motornogo masla v sudovykh usloviyakh]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*. 2015. No.2. pp. 175-179.
- 2 V.V. Tarasov. Problems of recycling used lubricants on ships. Solutions via restoration of lubricating properties and further reuse in marine diesel engines [Problemy utilizatsii i regeneratsii otrabotannykh smazochnykh materialov na sudakh: puti ikh resheniya vosstanovleniem motornykh svoystv i povtornym ispol'zovaniem v sudovykh dizelyakh]. *Proceedings of the conference "Current trends in theoretical and applied research 2010"* [Sovremennyye napravleniya teoreticheskikh i prikladnykh issledovaniy]. Odessa. Transport Publ. 2010. Vol.1. pp. 65-71.
- 3 V.V. Tarasov. Estimation of efficiency of the use of regenerated motor oil in marine diesel engines [Otsenka effektivnosti ispol'zovaniya regenerirovannogo motornogo masla v sudovykh dizelyakh]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*. 2010. No.2. pp. 146-152.
- 4 G.P. Kicha, V.V. Tarasov, E.M. Derevtsov. Efficiency of use of regenerated motor oils in marine diesel engines [Effektivnost' primeneniya v sudovykh dizelyakh regenerirovannykh vosstanovlennyykh otrabotannykh motornykh masel]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*. 2016. No. 1-2. pp. 83-91.
- 5 G.P. Kicha, V.V. Tarasov, S.V. Glushkov. Regeneration of used motor oils and restoration of their original properties [Regenerirovannye otrabotannyye motornykh masel i vosstanovlenie ikh ekspluatatsionnykh svoystv na sudakh]. *Marine intellectual technologies [Morskie intellektual'nye tekhnologii]*. 2016. No. 3(33), -Vol. 1. pp. 126-132.
- 6 G.P. Kicha, B.N. Perminov, A.V. Nadezhkin. Resource-conserving oil consuming in marine diesels [Resursosberegayushchee masloispol'zovanie v sudovykh dizelyakh]. *Vladivostok. Marytime St. Univ. Publ.* 2011. 372 p.
- 7 A.V. Nadezhkin, A.V. Bezverbnyy, G.P. Kicha. Imitation model of tribodiagnosis of internal combustion engines [Imitatsionnaya model' tribodiagnostiki dvigateley vnutrennego sgoraniya]. *Trenie i smazka v mashinakh i mekhanizmkh*. 2009. No. 3. pp. 6-14.
- 8 G.P. Kicha, G.M. Lipin, S.P. Polorotov. Tribotechnical characteristics of insoluble oil contaminants and their effect on engine wear [Tribotekhnicheskie kharakteristiki nerastvorimyykh produktov zagryazneniya motornykh masel i ikh vliyanie na iznos dizelya]. *Friction and wear [Trenie i iznos]*. 1998. Vol. 7. No. 6. pp. 1068-1078.
- 9 V.V. Tarasov. Substantiation of the depth of cleaning of used motor oils from mechanical impurities during their regeneration and reuse in diesel engine [Obosnovanie glubiny ochistki otrabotannykh motornykh masel ot mekhanicheskikh primesey pri ikh regeneratsii i povtornom ispol'zovanii v SEU]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*. 2016. No. 3-4. pp. 99-108.
- 10 A.A. Spiridonov. Planning an experiment in the study of technological processes [Planirovanie eksperimenta pri issledovanii tekhnologicheskikh protsessov]. Moscow. Mashinostroenie Publ. 1981. 184 p.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

ресурсосберегающее маслоиспользование, отработанное моторное масло, восстановленное моторное масло, противоизносные свойства моторных масел

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Тарасов Валерий Васильевич, профессор МГУ им. адм. Г.И. Невельского
Самсонов Анатолий Иванович, докт. техн. наук, профессор ФГАОУ ВО ДВФУ
690059, г.Владивосток, ул.Верхнепортовая, 50а, МГУ им. адм. Г.И. Невельского
690950, г.Владивосток, ул.Суханова, 8, ФГАОУ ВО ДВФУ

ПОЧТОВЫЙ АДРЕС:

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОСВЕННОГО ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА ОБМОТОК АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ГЛУБОКОВОДНОЙ УСТАНОВКИ

ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет»

А.А. Масленников

MATHEMATICAL MODEL OF INDIRECT MEASUREMENT OF THE ASYNCHRONOUS ENGINE WINDING HEATING TEMPERATURE

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kerch State Maritime Technological University" (FSFEI HE "KSMTU") 82, Ordzhonikidze St., Kerch, 298309, Russia
Andrey A. Maslennikov (Senior Lecturer of FSFEI HE "KSMTU")

ABSTRACT: The authors present a model for heating a deepwater asynchronous engine, which allows indirect measurement of the temperature of heating of the motor windings during operation without using a sensitive element and an additional measuring cable.

Keywords: *diagnostics, deepwater installation, decision support system*

Представлена модель нагрева асинхронного двигателя глубоководной установки, позволяющая выполнить косвенное измерение температуры нагрева обмоток двигателя в процессе эксплуатации без использования чувствительного элемента и дополнительного измерительного кабеля.

При добыче полезных ископаемых на дне морей и океанов возникает проблема измерения температуры обмоток асинхронных электродвигателей, установленных на добычных машинах. В случае перегрева приводного двигателя восстановление работоспособности машины связана с заменой его на глубине сотни метров. Большинство методов теплового контроля основаны на использовании термопар, датчиков активного сопротивления, конденсаторов с емкостью, зависящей от температуры, использованием в качестве первичного элемента одной из обмоток двигателя [1]. Для передачи данных предложено использовать проводные и радиоканалы связи. Известны косвенные методы измерения температуры электрических устройств, основанные на использовании математических моделей процесса нагрева обмоток электрических аппаратов [2]. Однако, реализация вычислительных алгоритмов, предложенных ранее, верных по сути, не могла обеспечить достаточно высокой точности и быстродействия из-за несовершенной аппаратной базы, которая не позволяла обработку больших массивов информации за короткий промежуток времени. Это приводило к необходимости упрощения вычислений с потерей точности [3-5].

Таким образом, остались нерешенными, в частности, две важные практические задачи: повышение точности вычислений; исключение кабельных и радиоканалов для передачи данных, необходимых для оценки температуры обмоток двигателей глубоководных механизмов.

Целью работы является разработка алгоритмов косвенной оценки температуры обмоток приводов глубоководных механизмов для предупреждения выхода их из строя из-за перегрева электроприводов.

Постановка задачи. В случае использования электродвигателей, в конструкции которых не предусмотрена установка датчика для измерения температуры, указанную проблему придется решать расчетным путем. Для косвенного определения температуры обмотки асинхронного двигателя необходимо, прежде всего, построить модель процесса теплопередачи в форме, удобной для реализации ее с помощью средств микропроцессорной техники. Кроме того, такая модель должна допускать простую интерпретацию и практически приемлемую процедуру определения ее параметров.

Обмотка электродвигателя представляет собой неоднородную систему теплопередачи от проводников через несколько слоев изоляции к границе разделения механизма и водной среды. Высокая теплопроводность обмотки позволяет допустить отсутствие значительных градиентов температуры в отдельных ее точках. Таким образом, несмотря на неоднородность процесса теплопередачи, можно считать: средняя температура обмотки мало отличается от температуры в отдельных ее точках; параметры процесса теплопередачи можно считать усредненными по всему объему.

Результаты исследований. С учетом указанных замечаний схему теплопередачи в рас-

смаатриваемой системе можно свести к одномерной модели передачи тепла через многослойную стенку. Значения температуры будем рассматривать в дискретных точках, равномерно распределенных по толщине многослойной стенки. Принцип оценки температуры обмоток двигателя основан на учете энергии, которая поступает в двигатель от источника питания и температурных условий эксплуатации глубоководного механизма. Задача несколько облегчается тем, что температура на глубине мало изменяется в течение года, а величина энергии, поступающей в двигатель, может быть измерена на поверхности. Рассмотрим сначала упрощенную модель процесса теплопередачи для двух точек: обмотка двигателя – граница водной поверхности. Граничные условия в крайней левой точке представляются уравнением

$$\frac{dT}{dt} = B_1 V - B_2 (T_1 - T_2), \quad (1)$$

где T_1, T_2 – соответственно, температура обмотки и на границе водной поверхности;

t – время;

V – управляющая функция (электрическая мощность, подаваемая в обмотку двигателя)

$$V = UI \cos \varphi,$$

U – напряжение питания двигателя;

I – ток двигателя;

$$B_1 = \frac{1}{C_0 m_0} (1 - \eta),$$

C_0 – удельная теплоемкость обмотки;

η – коэффициент полезного действия двигателя;

m_0 – масса обмотки;

$$B_2 = (C_0 m_0)^{-1} \chi S l^{-1},$$

χ – коэффициент теплопроводности промежутка обмотка-масса двигателя;

S – площадь участка теплопередачи;

l – толщина стенки корпуса двигателя.

Процесс теплопроводности описывается уравнением

$$\frac{dT}{dt} = a \frac{d^2 T}{dx^2}, \quad (2)$$

где a – коэффициент температуропроводности

$$a = \frac{k}{c \rho},$$

k – коэффициент теплопроводности;

c – удельная теплоемкость среды;

ρ – плотность среды.

Выразим приведенную ранее модель процесса теплопередачи, представленную уравнениями (1) и (2) в дискретной форме. Примем в обозначениях первый индекс как номер точки в пространстве, второй индекс – номер момента времени. Будем считать тепловой процесс в обмотке двигателя медленным относительно шага интегрирования ΔT . Тогда, применив к (1) метод Эйлера, получим

$$T_{1,k+1} = T_{1,k} + [B_1 V_k - B_2 (T_{1,k} - T_{2,k})] \Delta t.$$

Уравнение (2) в конечных разностях

$$T_{n,k+1} = R_n T_{n,k} + q_n (T_{n,k} + T_{n,k}).$$

В более компактной форме

$$T_{j,k+1} = R_j T_{j,k} + q_j (T_{j,k} + T_{j,k}); \quad j = 2, n, \quad (3)$$

где $T_{j,k+1}$ – правое граничное условие;

$T_{1,k}$ – левое граничное условие для каждого интервала n вдоль координаты x ;

$$R_j = 1 - 2\Delta t a_j h^{-2}; \quad q_j = \Delta t a_j h^{-2},$$

и k -го момента времени.

Величины R_j и q_j получены путем применения стандартной процедуры Эйлера перехода от дифференциальных уравнений к разностным. В уравнения (1)-(3) входит большое количество коэффициентов, аналитическое определение которых практически нецелесообразно. Дело в том, что на практике форма каждого слоя отличается от принятого здесь, контакт между слоями не является идеальным. Поэтому ценность уравнений (1)-(3) в их качественном содержании. Конкретные значения коэффициентов могут быть достоверно определены экспериментальным путем.

Экспериментальное определение коэффициентов системы уравнений (3) может быть произведено при опытно-промышленных испытаниях и, по сути, является процессом тарирования вычислительного алгоритма. Главной задачей исследования является определение общего вида уравнения модели независимо от количества точек в разбиении оси X и количества слоев. Ради уменьшения размерности задачи в данной статье примем количество точек разбиения оси X равным четырем.

Применяя к системе уравнений (3) (для $n+1=4$) Z -преобразование и разрешая ее относительно T_1 (температура обмотки), T_4 (правое граничное значение – температура воды), а также V (подаваемая в двигатель мощность), получим

$$P(Z^4, Z^3, Z^2, Z^1, Z^0)T_1 = P(Z^1, Z^0)T_4 + P(Z^3, Z^2, Z^1, Z^0)V, \quad (4)$$

где, например, $P(Z^4, Z^3, Z^2, Z^1, Z^0)$ -полином относительно параметра Z -преобразования, в который входят члены, содержащие соответственно Z^3, Z^2, Z^1, Z^0 – операторы сдвига в пространстве.

Разностное уравнение модели (4) после умножения его на Z^3 в развернутой форме может быть представлено в виде

$$T_1[n+1] = a_1T_1[n] + a_2T_1[n-1] + a_3T_1[n-2] + a_4T_1[n-3] + b_1T_4[n-2] + b_2T_4[n-1] + C_1V[n] + C_2V[n-1] + C_3V[n-2] + C_4V[n-3]. \quad (5)$$

где a_j, b_j, C_j – обобщенные постоянные, выраженные через физические константы, отражающие теплотехнические свойства элементов среды «обмотка-вода», а также электрические постоянные.

В последнем уравнении T -граничное значение температуры постоянно. Следовательно

$$b_1T_4[n-2] + b_2T_4[n-1] = Q = \text{Const}. \quad (6)$$

Так как b_1 и b_2 неизвестны, то Q -подлежит определению.

Задаем какое-либо значение величины V в течение времени, достаточного для нагрева обмотки двигателя до определенной допустимой температуры. Величину температуры можно измерять одним из способов, описанных в [1]. После отключения двигателя ($V=0$) уравнение (5) будет иметь вид

$$a_1T_1[n] + a_2T_1[n-1] + a_3T_1[n-2] + a_4T_1[n-3] + Q = T_1[n-1].$$

Измеряем температуру обмотки T_1 в различные моменты времени, отличающиеся значением шага ΔT . Этот шаг должен быть равен шагу времени дискретизации, принятому при вычислении температуры обмотки в соответствии с (5).

Результаты измерений могут быть представлены в виде системы линейных алгебраических уравнений

$$\begin{aligned} a_1T_1[4] + a_2T_1[3] + a_3T_1[2] + a_4T_1[1] + Q &= T_1[5]; \\ a_1T_1[8] + a_2T_1[7] + a_3T_1[6] + a_4T_1[5] + Q &= T_1[9]. \end{aligned} \quad (7)$$

Из этой системы определяем коэффициенты $a_1 - a_4$ и Q .

После того, как указанные коэффициенты определены, члены уравнения (5), содержащие T_1 на любом шаге эксперимента по времени могут быть вычислены по соответствующим измеренным значениям величин T_1 . Все величины, которые могут быть известными на следующем шаге, обозначим

$$F[n] = a_1T_1[n] + a_2T_1[n-1] + a_3T_1[n-2] + a_4T_1[n-3] - Q. \quad (8)$$

Тогда уравнение (5) может быть представлено в виде

$$C_1V[n] + C_2V[n-1] + C_3V[n-2] + C_4V[n-3] = F[n].$$

Коэффициенты $C_1 - C_4$ могут быть вычислены, если для каждого интервала времени задать различные значения напряжения двигателя (различные V). Пусть на первых трех интервалах $V[j]=0$. На остальных интервалах $V[j]$ может быть различным. Пусть на 4-7 интервалах $V=1$. Тогда матрица системы (9) будет иметь вид

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Такая матрица всегда не вырождена и позволяет найти решение «сверху вниз» то есть сначала определяется $C_1 = F[1]$, затем $C_2 = F[2] - C_1$. Вычисления упрощаются, если все значения V кроме $V[4]$ равны нулю. Тогда $C_4 = F[4]$, затем все значения V , кроме $V[4]$ и $V[3]$ равны нулю. Откуда легко вычислить C_3 и т.д.

В результате исследований установлено:

- при разработке алгоритма не учитывались потери тепла в силовом кабеле, однако тарировка коэффициентов модели теплоотдачи может в значительной степени учесть указанный недостаток;
- предложенный в работе подход позволяет обойтись без кабельного или радиоканала для оценки температуры привода глубоководной установки и повысить надежность ее работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Богаенко И.Н. Контроль температуры электрических машин / И.Н. Богаенко. - Киев: Техника, 1975. - 175 с.
- 2 Никулин, М.А. Повышение эксплуатационной надежности электрических машин и аппаратов путем применения вычислительных устройств для активного контроля тепловых процессов / М.А. Никулин, И.А. Щеглов // -Изв. Ленинградского электротехнического инст. им. Ульянова (Ленина). -1966. -Вып. 56. -С. 51-55.
- 3 Патент на полезную модель RUS 169161 14.06.2016. Устройство контроля остойчивости судна / С.С. Соколов, А.П. Нырк, С.Г. Чёрный, А.А. Жиленков.
- 4 Чёрный, С.Г. Кластер проблематики в навигационных аспектах прохождения судов в акватории крымского моста / С.Г. Чёрный, В.Ю. Будник // Транспорт России: проблемы и перспективы-2017: материалы международной научно-практической конференции. -М.: Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 2017. -С. 271-275.
- 5 Nyrkov, A.P. Hard- and software implementation of emergency prevention system for maritime transport / A.P. Nyrkov, A.A. Zhilenkov, S.S. Sokolov, S.G. Chernyi // - Automation and Remote Control. -2018. -Vol. 79. -No. 1. - P. 195-202.

REFERENCES

- 1 I.N. Bogaenko. Temperature control of electrical machines [Kontrol' temperatury elektricheskikh mashin]. Kiev. Tekhnika Publ. 1975. 175 p.
- 2 M.A. Nikulin, I.A. Shcheglov. Improving the operational reliability of electrical machines and apparatus through the use of computing devices for active control of thermal processes [Povyshenie ekspluatatsionnoy nadezhnosti elektricheskikh mashin i apparatov putem primeneniya vychislitel'nykh ustroystv dlya aktivnogo kontrolya teplovykh protsessov]. *Bulletin of the Leningrad Electrotechnical Institute [Izvestiya Leningradskogo elektrotekhnicheskogo instituta im. Ul'yanova (Lenina)]*. 1966. Vol. 56. pp. 51-55.
- 3 S.S. Sokolov, A.P. Nyrkov, S.G. Chernyy, A.A. Zhilenkov. Ship Stability Control device [Ustroystvo kontrolya ostroychivosti sudna]. Patent for a utility model RUS 169161 14.06.2016.
- 4 S.G. Chernyy, V.Yu. Budnik The cluster of problems in the navigation aspects of the vessels passage in the waters of the Crimean bridge [Klaster problematiki v navigatsionnykh aspektakh prokhozheniya sudov v akvatorii krymskogo mosta]. *Transport of Russia: problems and prospects-2017: materials of the international scientific-practical conference [Transport Rossii: problemy i perspektivy-2017]*. Moscow. Solomenko Inst. of Transp. Problems of the Russian Acad. of Science. 2017. pp. 271-275.
- 5 A.P. Nyrkov, A.A. Zhilenkov, S.S. Sokolov, S.G. Chernyi. Hard- and software implementation of emergency prevention system for maritime transport. *Automation and Remote Control*. 2018. Vol. 79. No. 1. pp. 195-202.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:
ПОЧТОВЫЙ АДРЕС:

диагностика, глубоководная установка, система поддержки принятия решений
Масленников Андрей Анатольевич, старший преподаватель ФГБОУ ВО «КГМУ»
298309, г.Керчь, ул.Орджоникидзе, 82, ФГБОУ ВО «КГМУ»

АЛГОРИТМ ДВУХКАНАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ДЕБАЛАНСНОГО ВИБРОМОДУЛЯ С ОБЕСПЕЧЕНИЕМ СВОБОДНОГО ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»

Г.М. Симаков, В.В. Топовский

ALGORITHM OF TWO-CHANNEL CONTROL OF ELECTROMECHANICAL UNBALANCED MASS VIBRATION GENERATOR WITH FREE ROTATION

Novosibirsk State Technical University (NSTU) 20, Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630092, Russia

Gennadii M. Simakov (Holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Prof. of NSTU)

Valerii V. Topovskii (Assistant Professor of NSTU)

ABSTRACT: The article investigates an algorithm of two-channel control of the electromechanical vibration generator that provides free rotational motion of vibrator eccentric mass. An asynchronous motor with a squirrel-cage rotor is considered as an engine of the generator. Together with the use of vector control principles, the proposed control algorithm enables the operation of an asynchronous motor without preliminary magnetization, and provides free rotational motion of vibration generators in a quasi-steady state. A synthesis of regulators of this control system was performed. Simulation modeling of the developed system was carried out in the software package MATLAB/Simulink, which let the authors calculate its dynamic characteristics. The results of the simulation showed that the use of the proposed control structure enables a method to significantly reduce thermal losses for magnetization of the asynchronous electric drive of the unbalanced mass generator when compared to traditional solutions.

Keywords: free rotational movement, unbalance mass generators, two-channel control, asynchronous motor

Исследован алгоритм двухканального управления электромеханического вибромодуля с обеспечением свободного вращательного движения дебалансов. В качестве приводного двигателя дебалансного вибромодуля был рассмотрен асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. Совместно с использованием принципов векторного управления, предлагаемый алгоритм управления позволяет запускать асинхронный двигатель без предварительного намагничивания, а также обеспечивать свободное вращательное движение дебалансов в квазиустановившемся режиме. Был выполнен синтез регуляторов данной системы управления. Имитационное моделирование разработанной системы было проведено в программном пакете MATLAB/Simulink, в результате чего были рассчитаны ее динамические характеристики. Результаты моделирования показали, что использование предлагаемой структуры управления позволяет существенно снизить тепловые потери на намагничивание асинхронного электропривода дебалансного вибромодуля по сравнению с классическими системами.

Управление электроприводами дебалансных вибромодулей имеет ряд особенностей. В частности, характер момента сопротивления, в таких электроприводах, влечёт за собой увеличение колебаний тока в установившемся режиме. Снизить амплитуду колебаний тока позволяет алгоритм управления, обеспечивающий свободное вращательное движение. Принцип работы алгоритма состоит в том, что момент приводного двигателя в квазиустановившемся режиме компенсирует только момент от сил трения, а вращающиеся массы вибромодуля (дебалансы) совершают свободное вращательное движение. «Платой» за снижение амплитуды колебаний тока является увеличение амплитуды колебаний скорости дебалансов. Пример использования такого алгоритма показан в [1].

В качестве приводного двигателя электромеханического дебалансного вибромодуля чаще всего выступает двигатель постоянного тока с независимым возбуждением (ДПТНВ), что оправдано простотой управления. Но дешевизна и надежность асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (АДКЗР), подчеркивают важность вопроса об его использовании в дебалансных вибромодулях. Кроме того, проблема сложности управления АДКЗР может быть решена применением принципов векторного управления.

При сравнении этих двух вариантов приводных двигателей можно прийти к интересному заключению. Для работы вибромодуля на установившейся скорости не требуется номинального потокосцепления. Однако при классической структуре управления электродвигатель намагничивается до постоянного уровня, и намагничивающий ток не снижается после переходного процесса. В случае ДПТНВ это не существенно, поскольку ток возбуждения пренебрежимо мал по сравнению с током якоря. При использовании АДКЗР намагничивающая составляющая тока статора I_d составляет порядка 30% от полного тока статора I , и этот факт полезно учитывать при построении алгоритма управления. Алгоритм двухканального управления с использованием звена деления позволяет осуществлять пуск асинхронного двига-

теля без его предварительного намагничивания. К сожалению, несмотря на то, что такая структура управления приводит к некоторому уменьшению тока I_q [2,3], существенно возрастает моментобразующая составляющая тока статора I_q и полный ток статора I .

Таким образом, алгоритм, реализующий свободное вращательное движение, приводит к снижению эффективного значения активной составляющей тока статора, тогда как алгоритм двухканального управления снижает реактивную составляющую тока статора. Предполагается, что объединение двух описанных выше алгоритмов позволит получить способ управления, обладающий лишь их достоинствами.

Алгоритм, реализующий свободное вращательное движение дебалансов вибромодуля приближенно может быть записан следующим образом [1]

$$U_{\omega}^{ref} \approx k_{\omega} \omega = k_{\omega} \sqrt{\frac{2}{J_{\Sigma}} mgr (\cos - 1) + \omega_0^2}, \quad (1)$$

где U_{ω}^{ref} – напряжение задания скорости;

k_{ω} – коэффициент обратной связи по скорости;

ω – скорость вращения дебаланса;

J_{Σ} – суммарный момент инерции электропривода, приведённый к валу двигателя;

m – масса дебаланса;

g – ускорение свободного падения;

r – эксцентриситет дебаланса;

φ – угловое положение дебаланса;

ω_0 – скорость дебаланса в нижней точке траектории.

Алгоритм двухканального управления со звеном деления в структуре управления выглядит так

$$U_{\psi}^{ref} = K_M \frac{(U_{\omega}^{ref} - k_{\omega} \omega) W_{SC}(p)}{k_I I_q},$$

где U_{ψ}^{ref} – напряжение задания потокосцепления ротора и тока I_q ;

K_M – дополнительный усилитель;

$W_{SC}(p)$ – передаточная функция регулятора скорости;

k_I – коэффициент обратной связи по току статора.

Объединив два алгоритма и математическую модель асинхронного электропривода, получим структуру управления электромеханического дебалансного вибромодуля, представленную на рисунке 1.

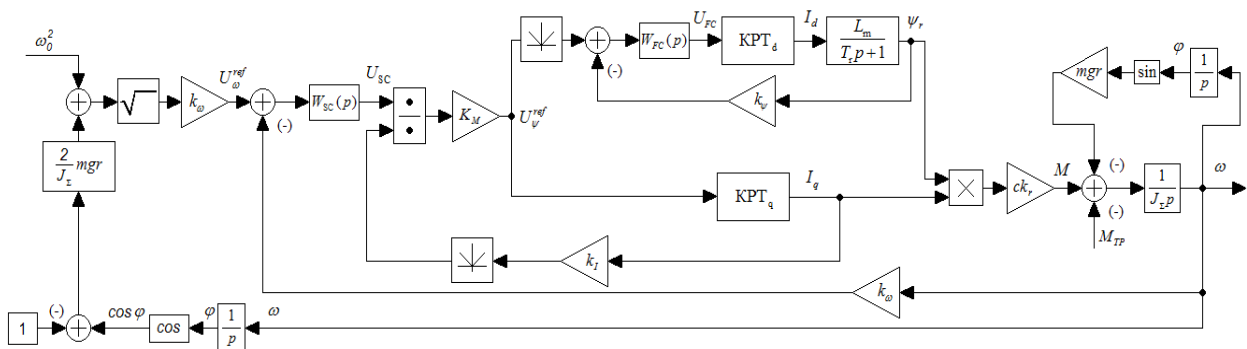


Рисунок 1 – Структурная схема системы управления электромеханического дебалансного вибромодуля

На рисунке 1 были приняты следующие обозначения: U_{SC} – выходной сигнал регулятора скорости; U_{FC} – выходной сигнал регулятора потокосцепления; $W_{FC}(p)$ – передаточная функция регулятора потокосцепления ротора; KPT_d – контур регулирования тока I_d ; KPT_q – контур регулирования тока I_q ; ψ_r – потокосцепление ротора; k_{ψ} – коэффициент обратной связи по пото-

косцеплению ротора; $c = 1,5p_p$; p_p - число пар полюсов; k_r - коэффициент связи ротора; M - электромагнитный момент двигателя.

Контур регулирования скорости и вложенные контуры регулирования потокосцепления ротора, а также токов I_d , I_q , синтезируются одним из классических методов, например, на основании условия разделения частот.

Дополнительный усилитель K_M необходим для обеспечения однозначного соответствия выходного сигнала регулятора скорости электромагнитному моменту M , этот коэффициент вычисляется по формуле

$$K_M = \frac{M_{\max}}{U_{SC}^{\max} c k_r} k_\psi k_I,$$

где $M_{\max}$ - максимально допустимое значение электромагнитного момента;

$U_{SC}^{\max}$ - максимально допустимое значение выходного сигнала регулятора скорости.

Исходными данными для синтеза системы управления электроприводом дебалансного вибромодуля являются амплитуда возбуждающей силы A и частота возбуждающей силы Ω : $A = 400$ кН; $\Omega = 14\pi$ рад/с. Ниже представлены параметры системы управления, которые учитывались при её синтезе и моделировании.

Параметры дебалансов:

– радиус вращения дебаланса $r = 0,2$ м;

– масса дебаланса $m = 500$ кг.

Параметры выбранного асинхронного двигателя 4A280S10Y3:

– номинальная мощность $P_r = 37$ кВт;

– номинальное фазное напряжение статора $U_{1r} = 220$ В;

– номинальная скорость вращения $n_r = 590$ об/мин.

Момент инерции электропривода, приведённый к валу электродвигателя $J_\Sigma = 23,6$ кг·м².

Имитационное моделирование синтезированной системы управления электроприводом дебалансного вибромодуля было проведено в среде MATLAB R2014b.

В целях сравнительной оценки результатов синтеза системы комбинированного управления (СКУ), предлагаемого в настоящей работе, была также синтезирована система подчинённого регулирования (СПР), обладающая аналогичными параметрами силовой части. Контур регулирования намагничивающего тока в обоих случаях настраивался на полосу пропускания 700 Гц. Контур регулирования моментобразующего тока в СКУ был настроен на частоту 70 Гц, в СПР – на частоту 700 Гц. В обеих системах контур регулирования потокосцепления ротора был настроен на частоту 70 Гц, а регулятор скорости выбирался пропорциональным. При синтезе обеих систем частотный преобразователь представлялся безынерционным звеном.

Напряжение задания скорости U_ω^{ref} для СКУ соответствовало закону (1), при этом $\omega_0 \approx \Omega$, в случае системы подчинённого регулирования напряжение задания скорости выбиралось так: $U_\omega^{\text{ref}} = \Omega k_\omega$.

Результатами имитационного моделирования являются переходные процессы частоты вращения дебалансов, тока I_d и тока I_q , а также возбуждающей силы. Графики переходных процессов для системы комбинированного управления и классической СПР, обладающей аналогичными параметрами, представлены ниже на рисунках 2-4.

Было проведено сравнение системы комбинированного управления (СКУ) и системы подчинённого регулирования (СПР). На основании анализа переходных процессов скорости (рисунок 2), можно утверждать, что величина пульсаций скорости пренебрежимо мала в обоих случаях.

Такое достоинство системы с регулятором момента в виде звена деления как пуск электрической машины без предварительного намагничивания, остается в силе и для предлагаемой структуры управления. Кроме того, среднеквадратичное значение тока I_d системы СКУ на 75-80% меньше в сравнении с системой СПР. Однако среднеквадратичное значение тока I_q практически идентично у обеих систем, разница не превышает 5%.

Однако такое комбинированное управление обладает недостатком, присущим алгорит-

му управления с обеспечением свободного вращательного движения, а именно увеличение пульсаций скорости. При помощи имитационного моделирования было установлено, что амплитуда пульсаций скорости при задании на частоту менее 2 Гц недопустимо велика (около 2 Гц).

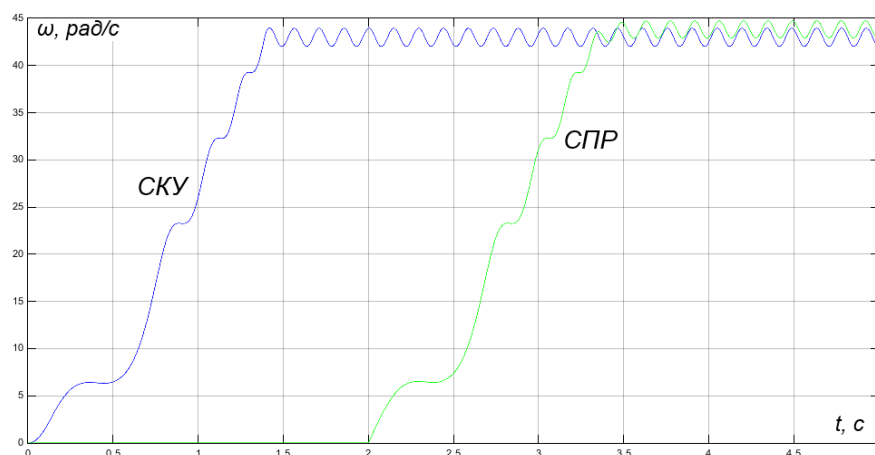


Рисунок 2 – Переходные процессы частоты вращения дебалансов $\omega(t)$

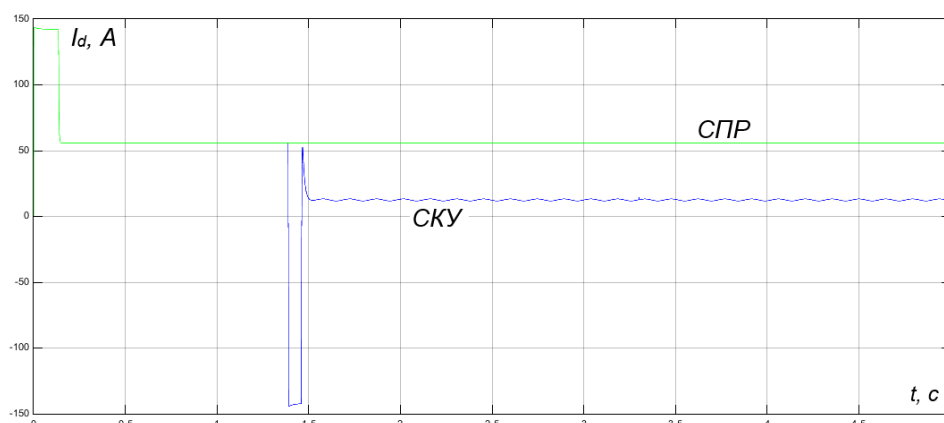


Рисунок 3 – Переходные процессы продольной составляющей тока статора

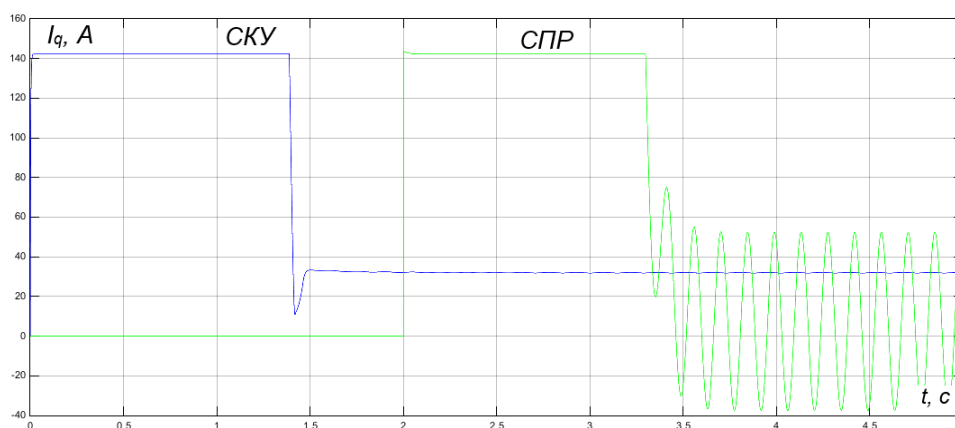


Рисунок 4 – Переходные процессы поперечной составляющей тока статора

Тем не менее, полученные результаты говорят об энергоэффективности предложенной структуры управления, так, по сравнению с системой подчиненного регулирования, практически полностью устраняются пульсации поперечной составляющей тока статора и существенно снижается эффективное значение продольной составляющей. Также, предлагаемая структура управления характеризуется меньшими тепловыми потерями по сравнению с сис-

темой двухканального управления, которая предполагает постоянное задание скорости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1 Путинцев, Н.Н. Рациональный по энергопотреблению способ управления электроприводом электромеханического дебалансного вибромодуля / Н.Н. Путинцев, Г.М. Симаков, В.А. Абельдеев, Л.В. Садовская // Автоматизированный электропривод: межвузовский сб. науч. тр. -Новосибирск: Изд-во Новосиб. электротехн. инст., 1988. -С. 25-33.

2 Симаков, Г.М. Управление асинхронной машиной тягового электропривода в условиях минимизации реактивной мощности / Г.М. Симаков, Ю.П. Филюшов // -Вестник транспорта Поволжья. - 2015. -№2(50). -С. 39-46.

3 Симаков, Г.М. Сравнительная оценка работы асинхронной машины в условиях минимизации реактивной мощности / Г.М. Симаков, Ю.П. Филюшов // -Электротехника. -2017. -№2. -С. 8-15.

1 N.N. Putintsev, G.M. Simakov, V.A. Abel'deev, L.V. Sadovskaya. Energy efficient algorithm of control of the motor of electromechanical unbalanced mass vibration generator [Ratsional'nyy po energopotrebleniyu sposob upravleniya elektroprivodom elektromekhanicheskogo debalansnogo vibromodulya]. *Automatic electrical drive: Inter university collection of studies [Avtomatizirovanny elektroprivod]*. Novosibirsk. Novosib. Elektrotekhn. Inst. 1988. pp. 25-33.

2 G.M. Simakov, Yu.P. Filyushov. Control of an asynchronous machine of traction electric drive in conditions of minimization of reactive power [Upravlenie asinkhronnoy mashinoy tyagovogo elektroprivoda v usloviyakh minimizatsii reaktivnoy moshchnosti]. *Bulletin of transport of the Volga region [Vestnik transporta Povolzh'ya]*. 2015. No. 2(50). pp. 39-46.

3 G.M. Simakov, Yu.P. Filyushov. Comparative evaluation of the operation of an asynchronous machine in conditions of minimization of reactive power [Sravnitel'naya otsenka raboty asinkhronnoy mashiny v usloviyakh minimizatsii reaktivnoy moshchnosti]. *Russian Electrical Engineering [Elektrotehnika]*. 2017. No. 2. pp. 8-15.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: свободное вращательное движение, дебалансы, двухканальное управление, асинхронный двигатель

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ: Симаков Геннадий Михайлович, докт. техн. наук, профессор НГТУ
Топовский Валерий Валерьевич, ассистент НГТУ

ПОЧТОВЫЙ АДРЕС: 630092, г.Новосибирск, пр.К.Маркса, 20, НГТУ

ГЕЛИОЭНЕРГЕТИКА НА ВОДНОМ ТРАНСПОРТЕ

ФГБОУ ВО «Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского»

В.Ф. Веревкин, М.В. Неделькин

SOLAR ENERGY ENGINEERING FOR WATER TRANSPORT

Maritime State University named after admiral G.I.Nevelskoi (MSU named after adm. G.I.Nevelskoi) 50a, Verkhneportovaya St., Vladivostok, 690059, Russia

Vladimir F. Verevkin (Holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Prof. of MSU named after adm. G.I.Nevelskoi)

Mikhail V. Nedel'kin (Graduate student of MSU named after adm. G.I.Nevelskoi)

ABSTRACT: The article considers some examples of the use of solar energy on different vehicles, most notably on water transport.

Keywords: solar energy, water transport, examples of use

Приведены некоторые примеры использования солнечной энергии на разных транспортных средствах, в особенности на водном транспорте.

Ограниченность запасов органического топлива, а также негативные экологические последствия от его неэффективного использования во всех областях человеческой жизнедеятельности, в том числе и на транспорте, способствуют поискам альтернативных «чистых» источников энергии. К таким источникам «чистой» энергии можно отнести различные накопители энергии, ветроэнергетику, энергию приливов и гелиоэнергетику.

В настоящее время гелиоэнергетика используется на многих видах транспорта. Встречаются описания солнечных электромобилей и даже электросамолетов (самолет «Solar Impuls 2» в 2015 году за 16 месяцев совершил полет вокруг земного шара [1]). В Австралии устраиваются гонки солнечных электромобилей. Крупнейший в мире катамаран на солнечных элементах «TURANOR Planet Star» совершил 2012 году кругосветное плавание, пройдя около 60000 км за 584 дня [2]. На этом судне общая мощность 925 солнечных панелей составила около 93,5 кВт, а четыре гребных электродвигателя на двух валах позволяют катамарану развить скорость до 14 узлов.

Использование солнечных элементов на морских и речных судах возможно в нескольких случаях: на всех судах в качестве источника энергии для заряда аккумуляторных батарей, предусмотренных в качестве штатных источников электроэнергии в аварийных и иных ситуациях, а также на аккумуляторных судах-электроходах для заряда батарей систем управления, а при большой мощности солнечных батарей и для заряда силовых аккумуляторов.

Емкость на судах-теплоходах единичных аккумуляторных батарей может составлять до

200-300 А·ч при напряжении от 6 до 24 В, а количество аккумуляторных батарей на одном судне может достигать до пяти-шести и более.

Так, например, на танкере «Герой Волков» установлено семь групп аккумуляторов по четыре батареи 5НК125 с напряжением 24 В. На танкере «SCF Irtysh» установлены две щелочные батареи по 200 А·ч, две щелочные батареи по 300 А·ч. и две кислотные батареи по 200 А·ч. с напряжением 24 В.

Все аккумуляторные батареи могут заряжаться как в режиме нормального заряда в течение 5-7 часов, так и в режиме длительного (постоянного) подзаряда. Зарядный ток, например, аккумуляторной батареи типа НК-125 составляет при трехчасовом заряде 65 А, при 7,5-часовом заряде 25 А, а в режиме постоянного подзаряда – не ниже 0,25 А (по данным ВНИИСтандартэлектро).

Согласно рекламному проспекту фирмы «Солартек» стандартный солнечный элемент размера 125×125 мм при напряжении 0,5 В может допускать ток нагрузки до трех ампер. Чтобы для заряда батареи аккумуляторов типа НК-125 с напряжением 12 В использовать солнечные батареи, необходимо включить последовательно около 40 стандартных солнечных элементов. Такая солнечная батарея при благоприятных погодных условиях за световой 8-часовой день может полностью компенсировать саморазряд аккумуляторов и даже восстановить до 10% номинальной емкости аккумулятора.

Так как обычно на морском судне общее число аккумуляторов достигает 5-7 единиц, то для одновременной подзарядки всех аккумуляторов необходимая суммарная поверхность панелей из солнечных элементов может быть равна двум-трем квадратным метрам. Такая панель из солнечных элементов вполне может быть размещена, например, на палубе выше ходового мостика.

На японском автомобилевозе (PCC – Pour Car Carrier) «Emerald Acc Solar Hybrid» суммарная мощность солнечных элементов, размещенных на верхней палубе, составляет около 160 кВт. Электроэнергия, вырабатываемая в светлое время и запасаемая батареями литий-ионных аккумуляторов, расходуется на питание общесудовых потребителей электроэнергии [3].

В настоящее время заряд аккумуляторных батарей практически на всех судах осуществляется с помощью зарядных устройств с питанием их от судовой электросети, электроэнергия для которой вырабатывается судовыми дизель-генераторами. По приблизительным подсчетам только на компенсацию саморазряда судовых аккумуляторов на всех судах дальневосточного бассейна затрачивается около 1000 кВт·ч ежемесячно. На все это затрачивается дефицитное дизельное топливо, которое может быть сэкономлено при использовании солнечных элементов. Пример использования солнечных элементов на японском автомобилевозе должен подвигнуть разработчиков судовых электроэнергетических систем к более широкому использованию солнечной энергетики на судах.

Использование солнечной энергии только как основного источника энергии для движения любого судна пока проблематично, но внимательный анализ реальных условий плавания судна позволяет уже в настоящее время найти возможности для использования на судах солнечных элементов для практических целей. Во Владивостоке, например, омываемом морем с трех сторон, многие горожане пользуются услугами судов портового пассажирского флота. Пока не были построены мосты через бухту Золотой Рог и на остров Русский услугами портового флота (паромами и катерами) ежегодно пользовались более восьми миллионов человек. Только на переправах через бухту Золотой Рог в сутки совершалось более 86 рейсов.

Построенные мосты способствовали ликвидации перевозок пассажиров паромами в черте города, однако, в таком морском городе как Владивосток полностью избавляться от внутрипортового пассажирского транспорта нецелесообразно. Переправа паромами с одного берега бухты Золотой Рог на другой занимала раньше всего несколько минут, а перемещение автомобильным транспортом по высоководным мостам занимает значительно больше времени и требует много органического топлива. Полностью избавляться во Владивостоке от внутригородского водного транспорта не следует. Например, в таких городах-портах как Стамбул и Джорджтаун, несмотря на наличие мостов, регулярные рейсы совершают многочисленные автомобильно-пассажирские паромы.

На кафедре электрооборудования судов Морского государственного университета име-

ни адмирала Г.И. Невельского проводились исследования по изучению возможностей вместо дизельных энергоустановок на судах портового флота во Владивостоке использовать аккумуляторные энергоустановки. В ряде выполненных научно-исследовательских работ и публикаций была показана экономическая целесообразность и техническая реализуемость таких электроходов [4].

Широкому внедрению аккумуляторных судов препятствует ограниченная энергоемкость современных доступных электрохимических аккумуляторов, которые должны заряжаться во время ночного отстоя судна от береговой электросети. Береговая электроэнергия дешевле, а производство ее экологически чище, чем электроэнергия, вырабатываемая судовыми дизель-генераторами, хотя на теплоэлектростанции также расходуется органическое топливо.

Солнечная радиация во Владивостоке особенно в осенне-зимний период довольно высока, поэтому целесообразно для заряда аккумуляторных батарей портовых судов-электроходов использовать энергию солнца. Возможны два варианта использования солнечных элементов на судах-электроходах.

В первом случае солнечные элементы размещаются на палубах самого судна. Площадь, отводимая для размещения солнечных элементов на палубах, может достигать в среднем до ста квадратных метров, и полный зарядный ток при благоприятном освещении может достигать до 300 А.

Суммарная емкость силовых аккумуляторов пассажирского парома-электрохода может быть равна двум-трем тысячам ампер-часов. Бортовая солнечная батарея за световой день может восполнить в лучшем случае до половины израсходованной емкости судовых аккумуляторов, и этим можно снизить наполовину потребление береговой электроэнергии для заряда аккумуляторов.

Во втором случае комплект солнечных элементов может располагаться на берегу и заряжать батареи электрохимических аккумуляторов, от которых может получать питание электросеть аккумуляторных судов во время их стоянки у причалов. За это время от береговых станций солнечных элементов, размещенных, например, на крышах домов возле причалов, можно компенсировать практически всю израсходованную за день емкость судовых аккумуляторных батарей.

Создание экологически чистого судна-электрохода внутривортового и прибрежного плавания с комбинированной (гибридной) электроэнергетической установкой, имеющей в своем составе электрохимические аккумуляторы и солнечные элементы, в настоящее время является выполнимой задачей. Вышеприведенные примеры электросамолета, яхты-катамарана и судна-автомобилевоза подтверждают реализуемость этой задачи. Важно переходить у нас от теоретических рассуждений и расчетов к реализации проекта.

Одним из шагов в направлении применения солнечной энергетики на флоте является проведение в нашей стране с 2014 года студенческих инженерных соревнований различных плавательных средств с использованием солнечных элементов. Такие соревнования под названием «Солнечные регаты» уже проводились в Москве (2014), Санкт-Петербурге (2015), Нижнем Новгороде (2016), Владивостоке (2016), Калининграде (2017), Великом Новгороде (2018).

Солнечная регата в 2018 году проводилась с 25 по 27 мая. «Гвоздем» этой регаты стало плавание из Санкт-Петербурга в Астрахань (Экспедиция «Эковолна») первого российского катамарана на солнечных элементах, который вышел из Санкт-Петербурга 19 мая 2018 года. Плавание катамарана длилось около трех месяцев [5].

Во Владивостоке Солнечная Регата проводилась в 2016 году под девизом «Сделай шаг в будущее!». В этой регате участвовали представители (команды) из Москвы, Санкт-Петербурга, Нижнего Новгорода, Рязани, Хабаровска и Владивостока.

Соревнования проводились среди разных классов лодок с солнечными батареями. Класс А «Innovation» рассчитан на применение солнечных панелей любой мощности и любых типов. Емкость аккумуляторов не должна превышать одного кВт·ч. Скорость не менее 3 узлов и габариты не более 6 м в длину. Класс В «Open» рассчитан на применение солнечных панелей любой мощности и любых типов. Емкость аккумуляторов не более 10 кВт·ч и габариты в длину не более 8 м. Класс С «Pioneer» также рассчитан на применение солнечных панелей любой мощности и емкость аккумуляторов должна быть не более 0,5 кВт·ч при длине лодки не более 3 м.

На начало старта аккумуляторные батареи всех лодок должны были быть полностью разряженными, и заряжались они от солнечных элементов только во время гонок. Победителями стали «солнечные» лодки КБ «Аврора» из Рязани и Московского политехнического университета. Представители команд из речных городов были озадачены приличным морским волнением (их лодки были предназначены для испытаний в основном на гладкой воде), поэтому все соревнования проводились в ковше спортивной гавани морского университета, где волнение было незначительным.

Солнечная энергетика все шире используется в нашей жизни. Вышеприведенные примеры (далеко не полные) использования солнечных элементов на различных судах и других транспортных средствах подтверждают это. Проведение в нашей стране ежегодных солнечных регат в различных регионах способствует привлечению нашей молодежи к такому перспективному направлению использования нетрадиционной энергетики как гелиоэнергетика.



Рисунок 1 – На водной станции Морского государственного университета им. адм. Г.И. Невельского команда хабаровчан готовит свою солнечную лодку-катамаран к соревнованиям

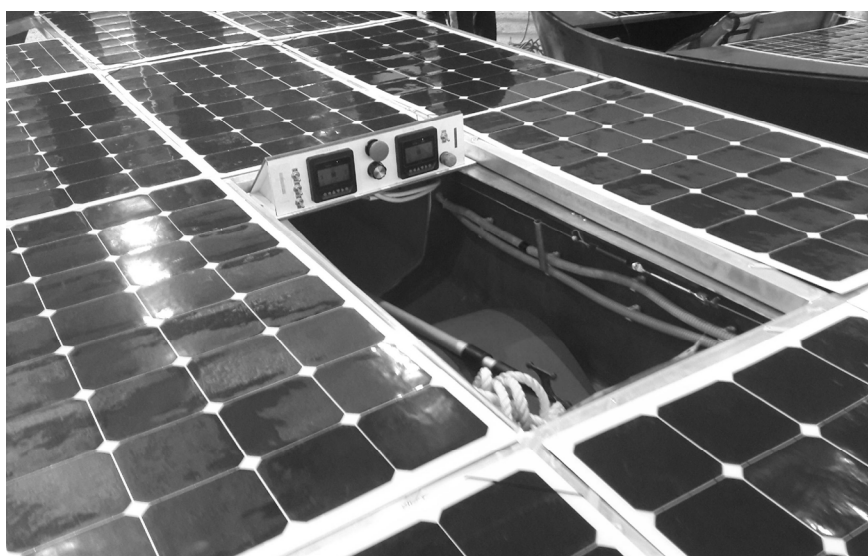


Рисунок 2 – Солнечные панели лодки москвичей. В центральной части видно место для рулевого. Управлять лодкой должен только один человек

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Solar Impulse 2 -самолет на солнечных батареях. - Режим доступа: <http://pro-samolet.ru/blog-pro-samolet/1017-solar-impuls2-plane>. -19.06.2018 г.
- 2 Катамаран на солнечных батареях «Turanor PlanetSolar» завершил кругосветное путешествие. -Режим доступа: http://korabley.net/news/katamaran_na_solnechnykh_batareyakh_turanor_planetsolar_zavershil_krugosvetnoe_puteshestvie/2012-05-10-1187. -19.06.2018 г.
- 3 O.S.K. Mitsui. Lines Launches Solar Hybrid Car Carrier. -Режим доступа: <http://gcaptain.com/mitsui-o-s-k-lines-launches-solar/> -19.06.2018 г.
- 4 Вережкин, В.Ф. Аккумуляторные электроходы / В.Ф. Вережкин, С.И. Устюгов // -Судостроение. -1996. -№2-3. -С. 14-16.
- 5 Солнечная регата-2018. -Режим доступа: <https://ecovolna.ru/ru/solnechnaya-regata-2/>. -19.06.2018 г.

REFERENCES

- 1 Solar Impuls 2 -A solar-powered plane [Solar Impulse 2 -samolet na solnechnykh batareyakh]. URL: <http://pro-samolet.ru/blog-pro-samolet/1017-solar-impuls2-plane>. -19 Jun. 2018.
- 2 Turanor PlanetSolar Solar Boat Completes its Trip Around the World [Katamaran na solnechnykh batareyakh «Turanor PlanetSolar» zavershil krugosvetnoe puteshestvie]. URL: http://korabley.net/news/katamaran_na_solnechnykh_batareyakh_turanor_planetsolar_zavershil_krugosvetnoe_puteshestvie/2012-05-10-1187. -19 Jun. 2018.
- 3 O.S.K. Mitsui. Lines Launches Solar Hybrid Car Carrier. URL: <http://gcaptain.com/mitsui-o-s-k-lines-launches-solar/> -19 Jun. 2018.
- 4 V.F. Verevkin, S.I. Ustyugov. Battery-powered ships [Akkumulyatornye elektrokhodyy]. Shipbuilding [Sudostroenie]. 1996. No. 2-3. pp. 14-16.
- 5 Solar boat regatta 2018 [Solnechnaya regata-2018]. URL: <https://ecovolna.ru/ru/solnechnaya-regata-2/>. -19 Jun. 2018.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

солнечная энергия, водный транспорт, примеры использования

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Вережкин Владимир Федорович, докт. техн. наук, профессор МГУ им. адм. Г.И. Невельского
Неделькин Михаил Владимирович, аспирант МГУ им. адм. Г.И. Невельского

ПОЧТОВЫЙ АДРЕС:

690059, г.Владивосток, ул.Верхнепортовая, 50а, МГУ им. адм. Г.И. Невельского

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КОЛЛЕКТОРНО-ЩЕТОЧНОГО УЗЛА ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

ФГБОУ ВО «Омский государственный университет путей сообщения»

П.К. Шкодун, А.В. Долгова

IMPROVEMENT OF DIAGNOSIS TECHNOLOGY OF THE COLLECTOR AND BRUSH ASSEMBLY IN ROLLING STOCK TRACTION MOTORS

Omsk State Transport University (OSTU) 35, Prospekt Marksa, Omsk, 644046, Russia

Pavel K. Shkodun (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of OSTU)

Anna V. Dolgova (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of OSTU)

ABSTRACT: This paper proposes a new test parameter, and evaluates its efficiency in determining the diagnosis of the collector and brush assembly of the traction motor. It also establishes the critical values of the test parameter corresponding to the normal and failure state of traction motor.

Keywords: traction motor, diagnosis, graphical model, warming-up, test parameter

Предложен новый диагностический параметр, оценена его эффективность при диагностировании коллекторно-щеточного узла тягового электродвигателя и установлены критические значения диагностического параметра, соответствующие исправному и неисправному состоянию тягового двигателя.

Основой безотказной работы тягового подвижного состава является надежность функционирования тяговых электрических двигателей (ТЭД), которая в большей части обеспечивается системой технического обслуживания и ремонта. Несмотря на применение в ремонтном производстве современных технических и технологических решений, количество отказов подвижного состава по причине выхода ТЭД из строя остается достаточно высоким. Статистические данные по отказам локомотивного парка сети железных дорог России свидетельствуют о том, что ТЭД серий ТЛ-2К1, ЭДП-810, СТК-810, ЭК-810Ч выходят из строя по причине неисправности коллекторно-щеточного узла (КЩУ) до 12% всех случаев [1]. Следовательно, актуальной задачей при ремонте тягового подвижного состава является повышение достоверности диагностирования и оценки технического состояния КЩУ ТЭД [2].

При выборе метода диагностирования особое внимание следует уделять следующим его возможностям: оперативное получение информации и применение выбранного метода для неразрушающего и безразборного контроля ТЭД. Одним из таких методов является тепловизионный. Целью настоящей статьи является выявление, обоснование и установление диапазона изменения диагностического параметра для тепловизионного контроля технического состояния КЩУ ТЭД.

Ранее в научных работах предложены следующие диагностические параметры, позволяющие оценить техническое состояние КЩУ ТЭД: температура в зоне контакта «коллектор-щетка», температурный градиент по направлению «щеткодержатель – щетка – коллектор» в течение интервала времени активного изменения температуры в работающем коллекторно-щеточном узле, отношение превышений температуры в исправном и диагностируемом контактах θ . Необходимо отметить, что перечисленные параметры характеризуют только мгновенное состояние теплового режима КЩУ ТЭД, но не отражают его техническое состояние за весь интервал активного изменения температуры.

Поскольку процесс нагрева узлов КЩУ электродвигателя при установившемся режиме работы полностью завершается за интервал $(3-5)T_n$ (T_n – постоянная времени нагревания) [3], то целесообразно оценивать тепловую энергию Q , выделенную в коллекторно-щеточном контакте за этот интервал. В качестве диагностического параметра предлагается использовать отношение энергий, выделенных в диагностируемом и исправном контактах «коллектор-щетка» за интервал нагрева

$$\zeta_{\partial/u} = \frac{\int_0^{5T_n} \Delta\tau(t)_{\partial} dt}{\int_0^{5T_n} \Delta\tau(t)_{u} dt}, \quad (1)$$

Где $\int_0^{5T_n} \Delta \tau(t)_\delta dt$ – энергия, выделенная в диагностируемом контакте «коллектор-щетка», за интервал $5T_n$;

$\int_0^{5T_n} \Delta \tau(t)_u dt$ – энергия, выделенная в исправном контакте «коллектор-щетка», за интервал $5T_n$.

Доказательство эффективности предлагаемого диагностического параметра основано на применении графоаналитического метода. В качестве исходного графа для решения поставленной задачи принята граф-модель диагностирования КЩУ ТЭД в процессе приемосдаточных испытаний. Расшифровка параметров граф-модели приведена в [4]. Исходная граф-модель дополнена диагностическими параметрами $\zeta_{д/и}$ и θ [3], контроль которых позволит более полно отразить процессы, протекающие в КЩУ ТЭД (рисунок 1).

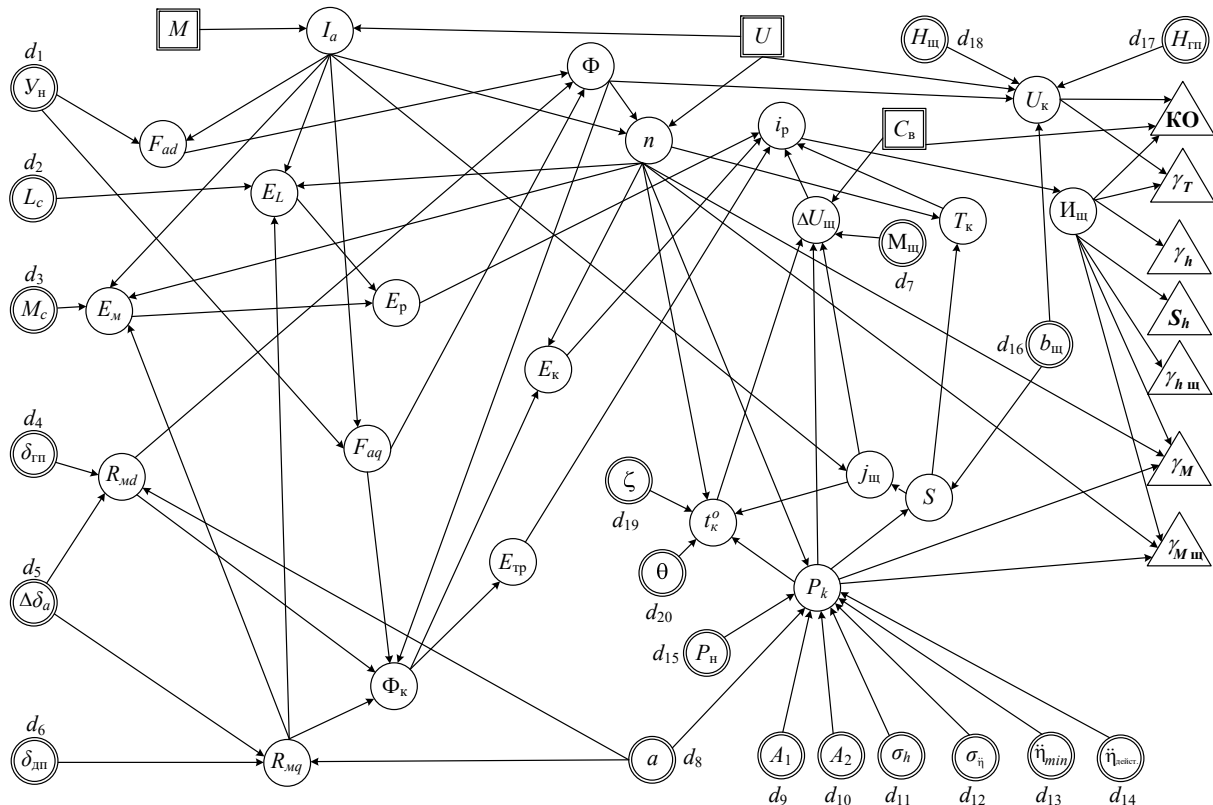


Рисунок 1 – Уточненная граф-модель диагностирования КЩУ ТЭД

Для определения численного значения показателя эффективности каждой вершины графа по алгоритму, описанному в [5], построена рабочая граф-модель и выполнена ее декомпозиция, при которой выделены следующие подмножества структурных параметров, определяющих: средний уровень искрения ($\tau_1 \subset Y_n, \delta_{ап}, \delta_{оп}, M_{ш}, P_n, b_{ш}, H_{ш}, H_{ш}, \theta, \zeta$); неравномерность искрения во времени ($\tau_2 \subset a$); неравномерность искрения по коллектору ($\tau_3 \subset L_c, M_c, \Delta \delta_a, A_1, A_2, \sigma_h, \sigma_{ш}, \eta_{min}, \eta_{шестер}$). Симптомы, определенные для ряда функциональных параметров каждого выделенного при декомпозиции подграфа представлены в таблице 1. Для уточненных подграфов рассчитаны таблицы расстояний ρ и таблицы близости $\bar{\rho}$ [5].

Для выявления эффективного подмножества диагностических параметров, построены двудольные графы (рисунок 2). Эффективные подмножества диагностических параметров определялись с использованием метода покрытия таблицы расстояний, базирующемся на оценке элементов модели: определении весов вершин и ребер, упорядочении вершин в соответствии со значениями показателя эффективности, а также нахождении маршрутов отображения дефектов в графе.

Проведенные исследования показали, что в состав эффективного подмножества диаг-

ностических параметров $\{H_{эл}, H_{щ}, b_{щ}, P_H, A_1, A_2, \ddot{\eta}_{\min}, \ddot{\eta}_{\text{действ}}, \sigma_h, \sigma_{\dot{\eta}}, \Delta\delta_a, \delta_{эл}, \gamma_H, a, M_{щ}, I_{ср}, \sigma_K, t_K^o, \theta, \zeta\}$ включены предлагаемые параметры $\zeta_{д/и}$ и θ , что подтверждает их эффективность при решении задач диагностирования КЩУ ТЭД.

Таблица 1 – Симптомы вершин граф-модели

Базовый параметр	Обозначение симптома	Наименование симптома	Подмножество
Φ	Φ_i	текущее значение магнитного потока	τ_1, τ_2, τ_3
	$\Delta\Phi$	изменение магнитного потока при смене направления вращения якоря	τ_1, τ_2, τ_3
n	n_i	текущее значение частоты вращения	τ_1, τ_2, τ_3
	Δn	изменение частоты вращения при смене направления вращения якоря	τ_1, τ_2, τ_3
$I_{щ}$	$I_{ср}$	средний уровень искрения	τ_1
	$I_{\max}$	максимальное значение искрения отдельных секций обмотки якоря	τ_2, τ_3
	σ_K	СКО интенсивности искрения по коллектору	τ_3
	σ_e	СКО интенсивности искрения во времени	τ_2
P_K	$P_{K,ср}$	среднее контактное давление	τ_1
	ΔP_K	колебания нажатия в контакте	τ_2, τ_3

Для подтверждения практической значимости предлагаемого параметра $\zeta_{д/и}$ проведена серия экспериментальных исследований процесса нагревания КЩУ ТЭД (рисунок 3а).

Проведены термографические исследования КЩУ ТЭД ТЛ-2К1, ЭДП-810-У1 с применением тепловизоров «ИРТИС 2200С», «Flir» и «Testo 875-2». Схемы размещения точек контроля температуры КЩУ для ТЭД ЭДП-810-У1 приведены на рисунке 3б. По полученным в ходе эксперимента данным построены графические зависимости превышения температуры щеток исследуемых машин, которые аппроксимированы экспоненциальными функциями, описывающими процесс нагревания тела однородной структуры [3]. Исходя из полученных зависимостей, определены по-

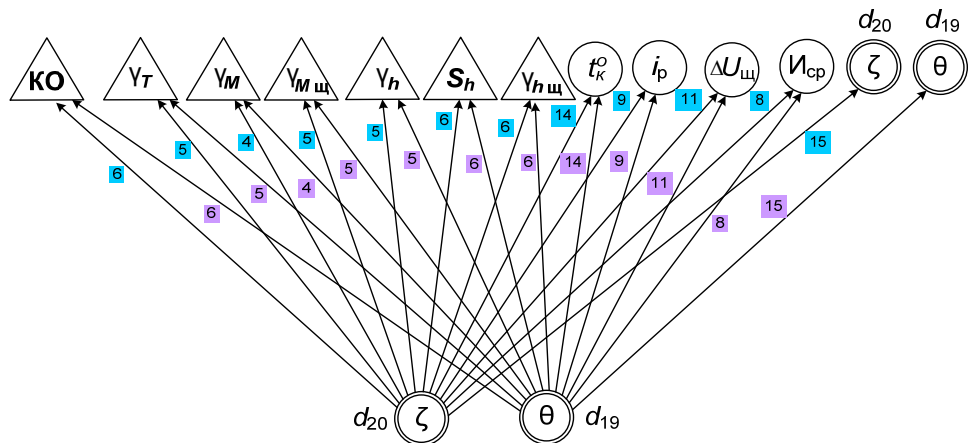


Рисунок 2 – Фрагмент двудольного графа τ_1

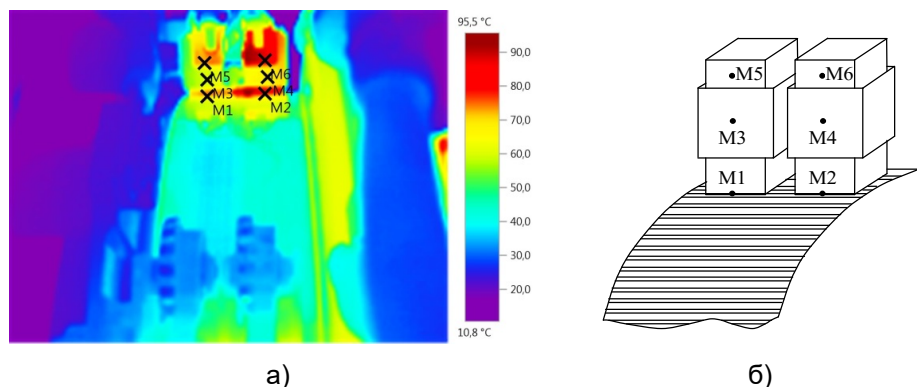


Рисунок 3 – Результаты исследований: а)-термограмма КЩУ ТЭД ЭДП-810-У1; б)-схема регистрации температуры деталей КЩУ ЭДП-810-У1

которые аппроксимированы экспоненциальными функциями, описывающими процесс нагревания тела однородной структуры [3]. Исходя из полученных зависимостей, определены по-

стоянные времени нагревания T_n исследуемых машин и рассчитан предлагаемый параметр: $\zeta_{ЭДП-810-У1} = 0,847$; $\zeta_{ТЛ-2К1} = 0,922$.

На основе статистического анализа результатов проведенных исследований определены интервалы варьирования диагностического параметра $\zeta_{д/и}$ (таблица 2).

Таблица 2 – Интервалы варьирования диагностического параметра $\zeta_{д/и}$

Интервал $\zeta_{д/и}$	Диагноз	Возможные причины и рекомендации
[0,7; 1,3]	Исправен	–
$[0,3;0,7) \cup (1,3;1,7]$	Недостаточный нагрев или перегрев диагностируемого контакта	В контакте установлена непритертая щетка, выполнена некачественная формовка коллектора и т.д. Для диагностируемого контакта рекомендуется провести повторный ремонт или выполнить настройку коммутации электродвигателя
$[0,1;0,3) \cup (1,7;1,9]$	Аварийный режим работы	Повторный ремонт

Для подтверждения информативности предлагаемого параметра $\zeta_{д/и}$ в лабораторных условиях дополнительно проведен эксперимент. Первоначально зарегистрированы термограммы и рассчитан предлагаемый диагностический параметр $\zeta_{д/и}$ для исправного ТЭД ЭД-107: $\zeta_{д1/и} = 1,034$; $\zeta_{д2/и} = 1,04$. Затем в один из контактов ТЭД ЭД-107 установлена непритертая щетка, а в другом значительно уменьшено контактное нажатие. В ходе эксперимента зарегистрированы термограммы и рассчитан диагностический параметр $\zeta_{д/и}$: для контакта с непритертой щеткой $\zeta_{д1/и} = 0,462$; а для контакта с уменьшенным нажатием $\zeta_{д2/и} = 0,269$.

Анализ результатов эксперимента показал, что значения $\zeta_{д/и}$ в контакте с непритертой щеткой, по сравнению с исправным контактом уменьшилось в 2-2,5 раза. Значение $\zeta_{д/и}$ в контакте с уменьшенным нажатием изменилось примерно в 3,5-4 раза. Изменение значения $\zeta_{д/и}$ при проведении эксперимента свидетельствует о его диагностической ценности и чувствительности к наличию неисправностей.

При проведении приемо-сдаточных испытаний ТЭД проведены термографические исследования двигателей типа ТЛ-2К1 и ЭДП-810-У1, прошедших ремонт в объеме ТР-3, по результатам которых определены значения $\zeta_{д/и}$: для ТЭД ТЛ-2К1 $\zeta_{М1/М2} = 0,922$; для ТЭД ЭДП-810-У1 $\zeta_{М1/М2} = 0,974$, что свидетельствует о качестве выполненного ремонта КЩУ.

По результатам проведенных исследований предложен и научно обоснован диагностический параметр $\zeta_{д/и}$, позволяющий оценивать техническое состояние контакта «коллектор-щетка». С применением графоаналитического метода показано, что параметры $\zeta_{д/и}$, и θ [5] входят в эффективное подмножество диагностических параметров, следовательно, значимы при решении задачи диагностирования КЩУ ТЭД. Представлены аналитические формулы для определения предлагаемого параметра и определены допустимые интервалы варьирования для диагностирования технического состояния КЩУ ТЭД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Щербатов, В.В. Моделирование теплового состояния тягового электродвигателя для прогнозирования ресурса / В.В. Щербатов, О.Л. Рапопорт, А.Б. Цукублин // -Известия Томского политехнического университета. -2005. -№7. -С. 156-159.
- 2 Стратегия научно-технологического развития холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2025 года. -Режим доступа: http://www.rzd-expo.ru/innovation/BelKniga_2015.pdf. -09.06.2018 г.
- 3 Харламов, В.В. Термографические исследования коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей постоянного тока / В.В. Харламов, П.К. Шкодун, А.С. Хлопцов, А.В. Долгова // -Известия Транссиба. -2014. -№3(19). -С. 44-50.
- 4 Харламов, В.В. Формирование граф-модели диагностирования коллекторно-щеточного узла тягового электродвигателя с учетом тепловых факторов /

REFERENCES

- 1 V.V. Shcherbatov, O.L. Rapoport, A.B. Tsukublin. Modeling the thermal state of the traction motor for resource forecasting [Modelirovanie teplovogo sostoyaniya tyagovogo elektrodvigatelya dlya prognozirovaniya resursa]. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. 2005. No. 7. pp. 156-159.
- 2 The strategy of development in science and technology of JSC "Russian Railways" for the period until 2020 and for the future until 2025 [Strategiya nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya kholdinga «Rossiyskie zheleznnye dorogi» na period do 2020 goda i na perspektivu do 2025 goda]. URL: http://www.rzd-expo.ru/innovation/BelKniga_2015.pdf. -09 Jun. 2018.
- 3 V.V. Kharlamov, P.K. Shkodun, A.S. Khloptsov, A.V. Dolgova. Thermographic inspection of the collector and brush assembly of DC traction motors [Termograficheskie issledovaniya kolektorno-shchetochnoy uzla tyagovykh elektrodvigatelyey postoyannogo toka]. // Journal of Transsib Railway Studies. 2014. No. 3(19). pp. 44-50.
- 4 V.V. Kharlamov, P.K. Shkodun, A.S. Khloptsov, A.V. Dolgova. Buildup of a graphical model for diagnosis of the collector and brush assembly in traction motors considering thermal factors [Formirovanie graf-modeli

В.В. Харламов, П.К. Шкодун, А.С. Хлопцов, А.В. Долгова // -Известия Томского политехнического университета. -2016. -Т.327. -№1. -С. 84-90.

5 Осис, Я.Я. Диагностирование на граф-моделях: На примерах авиационной и автомобильной техники / Я.Я. Осис, Я.А. Гельфандбейн, З.П. Маркович, Н.В. Новожиллов. -М.: Транспорт, 1991. -244 с.

diagnostirovaniya kollektorno-shchetchnogo uzla tyagovogo elektrodvigatelya s uchetom teplovykh faktorov]. // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. 2016. Vol.327. No. 1. pp. 84-90.

5 Ya.Ya. Osis, Ya.A. Gel'fandbeyn, Z.P. Markovich, N.V. Novozhilov. Diagnosis through graphical models-evidence from the automotive and aviation engineering [Diagnostirovanie na graf-modelyakh: Na primerakh aviat-sionnoy i avtomobil'noy tekhniki]. Moscow. Transport Publ. 1991. 244 p.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: тяговый электродвигатель, диагностирование, граф-модель, нагревание, диагностический параметр

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ: Шкодун Павел Константинович, канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «ОмГУПС»
Долгова Анна Владимировна, канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «ОмГУПС»

ПОЧТОВЫЙ АДРЕС: 644046, г.Омск, пр.К.Маркса, 35, ФГБОУ ВО «ОмГУПС»

МОДЕЛЬ РАСЧЕТА УЩЕРБА ОТ ПЕРЕРЫВА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»

Ю.А. Секретарев, Д.А. Меняйкин

MODEL OF DAMAGE CALCULATION FROM POWER SUPPLY INTERRUPTIONS IN DISTRIBUTION NETWORKS
Novosibirsk State Technical University (NSTU) 20, Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630092, Russia
Yurii A. Sekretarev (Holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Prof. of NSTU)
Denis A. Menyaykin (Graduate student of NSTU)

ABSTRACT: The authors develop the model of damage calculation in electricity distribution companies caused by the power supply equipment failure.

Keywords: model, damage, power supply, insurance

Разработана модель расчета ущерба в электросетевых предприятиях при повреждении оборудования электроснабжения.

Надежное электроснабжение потребителей является очень важным свойством электрической энергии и показателем работы электросетевого предприятия. Поэтому расчету надежности уделяется серьезное внимание на всех этапах электроснабжения, начиная с проекта и заканчивая эксплуатацией.

Понятие надежности электроснабжения очень тесно взаимосвязано с ущербами. Чем ниже надежность схемы, тем выше ущерб. Отказы оборудования, способы подключения и резервирование относятся как к надежности, так и к ущербу. Поэтому расчет ущерба базируется на схемной надежности электроснабжения.

Расчет ущерба от перерыва электроснабжения необходим для планирования аварийных и плановых ремонтов. Оценки рентабельности той или иной схемы электроснабжения при выборе наиболее оптимального варианта.

Рассчитав ущерб, у предприятия появится возможность составить программу страхования имущества. Воспользовавшись услугами страхования, энергетика приобретает гарантии, что позволяет минимизировать ущерб предприятию в самой сложной ситуации, и после устранения последствий сможет продолжить свою деятельность.

Существует два вида страхования: обязательное и добровольное. На объекты электросетевого хозяйства обязательное страхование не распространяется, поэтому в каждом случае разрабатывается индивидуальная программа добровольного страхования.

Именно поэтому необходимо рассчитать ущерб от нарушения электроснабжения, выявить наиболее слабые места и по этим данным подбирать наиболее рентабельную программу страхования.

Поскольку этому виду страхования законом не уделено должного внимания, то страховые фирмы достаточно свободны в этом сегменте. Поэтому не существует общего и четкого метода расчета страхового тарифа. Предлагаются различные программы страхования, распространяющиеся на разные события. Такие как перерыв в электроснабжении, поломка оборудования и так далее.

Для оценки рентабельности добровольного страхования объектов распределительных сетей, необходимо рассчитать страховой тариф и сумму страховых выплат по различным

событиям и сопоставить с затратами сетевого предприятия на возмещение различных ущербов [1-3].

На сегодняшний день разработаны модели расчета ущербов для генерирующих станций и для потребителей электрической энергии. Как для бытового сектора, так и для промышленного. А электросетевые предприятия остались без должного внимания, несмотря на то, что являются неотъемлемым звеном электроснабжения потребителей.

Степень распределения электрической энергии несравнима с генерацией, соответственно и расчет ущербов не может быть произведен по описанным методикам для генерирующих предприятий.

Экономический ущерб предприятию от повреждения оборудования состоит из многих составляющих и зависит от целого ряда факторов. Поэтому необходимо исследовать каждый из них отдельно.

Но для начала необходимо разобраться, что подразумевается под понятием ущербов в электроэнергетике.

Ущерб от отказа или нарушения электроснабжения - это комплексный показатель надежности электроснабжения, иначе говоря, экономическая категория. Это характеристика свойства передаваемой с определенной надежностью электрической энергии. Применяют при оценке категории электроснабжения потребителя, для расчета стратегии управления, планирования бюджета на аварийные расходы и обслуживание.

Полный ущерб зависит и состоит из многих составляющих. Каждую из них необходимо рассмотреть отдельно.

Прямой ущерб. Под прямым ущербом понимаются выраженные в стоимостной форме затраты, убытки и потери, обусловленные конкретным аварийным случаем, связанные с уменьшением имущества или ухудшением качества данного имущества.

Исходя из определения, в этой составляющей ущерба учитываются только расходы на восстановление работоспособности элемента или его замену.

По определению параметр потока отказов – это число отказов элемента в единицу времени. Обладая статистическим значением параметра потока отказов конкретного элемента и временем восстановления этого элемента, можно рассчитать прямой ущерб от выхода из строя элемента электроснабжения

$$Y_{np} = wI, \quad (1)$$

где I – издержки.

Поскольку все элементы в силу своей конструкции обладают разными параметрами потока отказов и стоимостью восстановления, то необходимо учитывать каждый тип элементов. Тогда прямой ущерб всей схемы рассчитывается по следующей формуле

$$Y_{np} = \sum_{i=1}^n w_i I_i. \quad (2)$$

Ущерб от недоотпуска электрической энергии потребителю. В условиях современной рыночной экономики любое предприятие получает прибыль по результатам какой-либо деятельности. Генерирующие станции получают прибыль за выработку электрической энергии. Электросетевые предприятия за пропущенную энергию через распределительные сети от шин генерации до конечного потребителя.

Соответственно при выходе из строя какого-либо участка схемы электроснабжения потребителя, на время восстановления питания абонента сетевая организация не выполняет свою функцию, тогда за ту часть энергии, которую не передала, денежные средства не получает.

В первую очередь, тут необходимо разделить такие понятия, как время восстановления элемента и время отключения. Так как при выходе из строя генератора или сопутствующего элемента возникает дефицит мощности, и недоотпуск электроэнергии длится до полного восстановления элемента или до ввода резерва, что обусловлено дополнительными существенными финансовыми затратами. Конфигурация распределительных сетей изначально проектируется таким образом, чтобы обеспечить закольцованность схемы электроснабжения потребителя. Даже потребитель 3 категории электроснабжения до отпайки тупиковой ветви или одного силового трансформатора запитан по сложной само резервирующей схеме. То есть при выходе из строя любого из элементов цепи, есть возможность запитать потребителя с помощью другого участка распределительной сети. Технически это реализуется

с помощью работы автоматики или ручным переключением оперативно-выездной бригады (ОВБ).

Из вышесказанного следует, что при нарушении электроснабжения вследствие аварии внутри распределительной сети, электроснабжение потребителя восстанавливается гораздо быстрее, чем восстановление поврежденного элемента. Поэтому необходимо использовать термин продолжительность отключения потребителя. Далее будет обозначаться как T_o .

Продолжительность отключения потребителя T_o - это время с начала происхождения аварии на каком либо участке электроснабжения до подачи напряжения потребителю независимо от схемы электроснабжения.

В данном случае продолжительность отключения практически не зависит от вида повреждения, так как неважно вышел из строя коммутационный аппарат, кабельная или воздушная линия, поскольку время переключения потребителя на другой источник зависит от наличия и правильности срабатывания автоматики или от оперативности ОВБ. Поэтому для каждого элемента можно допустить среднее время отключения по всей сети

$$Y_n = T_o \cdot \sum_{i=1}^n w_i \cdot P \quad (3)$$

где $\sum$ – тариф на передачу электроэнергии;

P – мощность отключенного потребителя.

Мощность – это характеристика потребителя, соответственно не зависит от типа аварии, поэтому допускается использовать среднюю мощность потребителей участка схемы электроснабжения.

Дополнительный ущерб. При аварийной ситуации возникает еще одна составляющая ущерба. Она обусловлена тем, что на время ликвидации аварии изменяется схема электроснабжения, соответственно уменьшается надежность участка электроснабжения и повышается износ оборудования, что приводит к дополнительным затратам.

После того, как изменилась схема, соответственно меняется параметр потока отказов этого участка, поэтому необходимо рассчитать новое значение w_2 . Тогда дополнительный ущерб справедливо будет рассчитать по следующей формуле

$$Y_{доп} = T_B \Delta \mathcal{E} (w_2 - w_1) A, \quad (4)$$

где $\Delta \mathcal{E}$ – дополнительная энергия, полученная вследствие повышения нагрузки на резервную линию;

A – стоимость амортизации оборудования на кВт·ч

Тогда суммарный ущерб можно рассчитать как сумму всех составляющих

$$Y = Y_{пр} + Y_n + Y_{доп}. \quad (5)$$

Разработанная модель расчета ущербов от перерыва электроснабжения потребителей позволяет рассчитать ущерб с высокой точностью, учитывая все составляющие. Это позволит планировать аварийные и плановые работы. А также подобрать и применить наиболее оптимальную программу страхования для конкретной схемы электроснабжения, в которой будет отражено застрахованное оборудование, виды страховых случаев и выплаты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1 Секретарев, Ю.А. Надежность электроснабжения / Ю.А. Секретарев. -Новосибирск: Изд-во Новосиб. гос. техн. ун-ва, 2010. -101 с.

2 Шарыгин, М.В. Разработка универсальной модели последствий отказов электроснабжения / М.В. Шарыгин // -Электричество. -2015. -№3. -С. 4-11.

3 Меняйкин, Д.А. Применение нечеткой логики в теории надежности систем электроснабжения / Д.А. Меняйкин, Ю.А. Секретарев // Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. тр. -Новосибирск: Изд-во Новосиб. гос. техн. ун-ва, 2016. -С. 24-26.

1 Yu.A. Sekretarev. Electric power supply reliability [Nadezhnost' elektrosnabzheniya]. Novosibirsk: Novosib. St. Tech. Univ. Publ. 2010. 101 p.

2 M.V. Sharygin. Development of a universal model of the consequences of power failures [Razrabotka universal'noy modeli posledstviy otkazov elektrosnabzheniya]. *Elektrichestvo*. 2015. No.3. pp. 4-11.

3 D.A. Menyaykin, Yu.A. Sekretarev. The use of fuzzy logic in the theory of reliability of power supply systems [Primenenie nechetkoy logiki v teorii nadezhnosti sistem elektrosnabzheniya]. *Science. Technologies. Innovations [Nauka. Tekhnologii. Innovatsii]*. Novosibirsk. Novosib. St. Tech. Univ. Publ. 2016. pp. 24-26.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

модель, ущерб, электроснабжение, страхование

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Секретарев Юрий Анатольевич, докт. техн. наук, профессор НГТУ

Меняйкин Денис Анатольевич, аспирант НГТУ

ПОЧТОВЫЙ АДРЕС:

630092, г.Новосибирск, пр.К.Маркса, 20, НГТУ

МЕТОДИКА ВЫБОРА ГЛАВНЫХ РАЗМЕРОВ АКТИВНЫХ ЧАСТЕЙ СИНХРОННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕНИЯ ГАБАРИТОВ

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»

Д.Л. Калужский, Ю.Б. Ефимова, Ф.Э. Лаппи, А.С. Харитонов

METHOD OF SELECTING THE MAIN DIMENSIONS OF ACTIVE PARTS OF SYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE UNDER CONDITIONS OF SIZE RESTRICTIONS

Novosibirsk State Technical University (NSTU) 20, Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630092, Russia

Dmitrii L. Kaluzhskii (Holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Prof. of NSTU)

Juliya B. Efimova (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of NSTU)

Feliks Ed. Lappi (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of NSTU)

Andrei S. Kharitonov (Assistant Professor of NSTU)

ABSTRACT: This paper presents theoretical studies aimed at developing a technique for selecting the main dimensions of a synchronous electric motor. Simulation of the drive's magnetic field in the FEMM software has confirmed the analytical calculations. The method is recommended for use in the preliminary design stage.

Keywords: *synchronous electric motor, permanent magnets, size restrictions, objective function, excitation*

Приведены теоретические исследования, направленные на разработку методики выбора главных геометрических размеров синхронного электродвигателя. Моделирование магнитного поля электродвигателя в программе FEMM подтвердила аналитические выкладки. Методика рекомендована к применению на этапе предварительного проектирования.

Известно, что технико-экономические показатели электродвигателя зависят от правильного выбора главных геометрических размеров и электромагнитных нагрузок: магнитной индукции в воздушном зазоре, плотности тока и числа пар полюсов. При определении вышеуказанных параметров перед проектировщиком стоят задачи, определяемые различными критериями оптимальности, среди которых следует выделить комбинированные, в частности, обеспечение максимального электромагнитного момента при ограниченных габаритах электрической машины [1, 5]. Указанная проблема наиболее актуальна при проектировании электродвигателей, в которых ограниченные габариты и масса играют важнейшее значение, и жестко регламентируются уже на этапе технического задания.

Существующие пакеты прикладных программ конечно-элементного моделирования электромагнитных полей позволяют рассчитать распределения магнитного поля в электрической машине практически любой конструкции [1, 5], однако для оптимизационного расчета важно иметь аналитические зависимости для исследования влияния отдельных геометрических размеров электродвигателя на его выходные параметры. Представленная авторами методика разработана для проектирования трехфазного ($m = 3$) синхронного электродвигателя с естественным охлаждением, магнитоэлектрическим бесконтактным возбуждением и беспазовой обмоткой якоря, выполненной в виде активного распределенного слоя между ярмом статора и диаметром расточки, в условиях ограниченных исходными данными габаритов. При создании методики использовались аналитические соотношения из теории электрических и магнитных цепей, теории электромеханического преобразования энергии и электродинамики.

Одной из основных оптимизационных задач при разработке настоящего электродвигателя является обеспечение требуемого электромагнитного момента на валу двигателя, что при ограничении полной активной мощности и габаритов электродвигателя требует обеспечения максимально возможного потока возбуждения Φ_f . Поэтому целесообразно принять число пар полюсов электродвигателя $p = 2$, и в качестве источника поля возбуждения использовать постоянные магниты, закрепленные на роторе, что одновременно обеспечивает выполнение требования бесконтактного способа возбуждения. В работе выбраны магниты, изготавливаемые из сплавов на основе редкоземельных металлов химического состава $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, которые обладают наиболее высокими магнитными параметрами [2].

Поток возбуждения Φ_f будет индуцировать в обмотке статора (якоря) электродвижущая сила (ЭДС) вращения

$$E = 4,44W_1k_{o\phi_1}f\Phi_f, \quad (1)$$

где f – частота ЭДС, Гц

$$f = \frac{np}{60};$$

n – частота вращения двигателя, об/мин;

$k_{об_1}$ – обмоточный коэффициент по первой гармонике

$$k_{об_1} = \frac{\sin \frac{\pi}{2m}}{q \sin \frac{\pi}{2mq}};$$

q – количество проводников в фазной зоне.

На длине окружности внутреннего диаметра (расточки) статора D_a с беспазовой обмоткой сможет разместиться $w_{\max} = \frac{\pi D_a}{d_{из}}$ проводника, а число эффективных витков (проводников) в фазе составит

$$W_1 = \frac{w_{\max}}{m} = \frac{\pi D_a}{m d_{из}} = \frac{\pi}{m 1,1 d_{пр}} D_a, \quad (2)$$

где для предварительных аналитических оптимизационных расчетов примем соотношение между диаметром изолированного $d_{из}$ и голого $d_{пр}$ проводника $d_{из} = 1,1 d_{пр}$.

Если принять допущение, что лобовые части обмотки имеют форму дуги с хордой, равной полюсному делению τ , то сопротивление фазы равно (рисунок 1)

$$r_{\phi} = \rho \frac{W_1 2(L_a + l_{\text{лоб}})}{S_{пр}}, \quad (3)$$

где ρ – удельное сопротивление провода;

L_a – длина пазовой части обмотки;

$l_{\text{лоб}}$ – длина лобовой части обмотки по [3]

$$l_{\text{лоб}} = \sqrt{\tau^2 + \frac{16h^2}{3}};$$

h – минимально допустимый по технологическим соображениям изготовления обмотки односторонний вылет лобовой части;

Электрические потери в обмотке с учетом (2),

(3):

$$P_{эл} = m l_1^2 r_{\phi} = \frac{\rho D_a \left(L - 2h_{\text{лоб}} + \sqrt{\left(\frac{\pi D_a}{2p} \right)^2 + \frac{16h^2}{3}} \right)}{1,1(\pi j)^{-3/2}}. \quad (4)$$

Принимая во внимание, что основными активными потерями в данном типе электродвигателя являются электрические потери в обмотке (4), и пренебрегая потерями в стали на предварительном этапе проектирования, получаем выражение для определения КПД (5) и электромагнитного момента (6)

$$\eta = 1 - \frac{P_{эл}}{P_1} = 1 - \frac{\rho D_a \left(L - 2h_{\text{лоб}} + \sqrt{\left(\frac{\pi D_a}{2p} \right)^2 + \frac{16h^2}{3}} \right)}{1,1(\pi j)^{-3/2} P_1}; \quad (5)$$

$$M = \frac{P_1 - P_{эл}}{\frac{2\pi}{60} n_{\max}} = \frac{P_1}{\frac{2\pi}{60} n_{\max}} - \frac{\rho D_a \left(L - 2h_{\text{лоб}} + \sqrt{\left(\frac{\pi D_a}{2p} \right)^2 + \frac{16h^2}{3}} \right)}{\frac{2\pi}{60} n_{\max} 1,1(\pi j)^{-3/2}}, \quad (6)$$

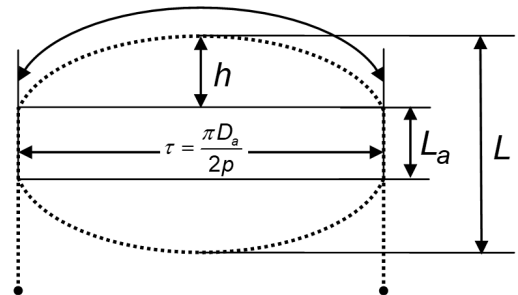


Рисунок 1 – Эскиз к расчету сопротивления фазы

где P_1 – полная активная мощность.

Исходные данные для проектирования синхронного электродвигателя приведены в таблице 1.

Для изготовления шихтованного пакета статора (якоря) электродвигателя с частотой тока от 30 до 133 Гц была выбрана холоднокатаная сталь марки 2413 толщиной $\Delta = 0,35$ мм с коэффициентом заполнения стали $k_s = 0,95$ и плотностью 7600 кг/м^3 [1,4]. При наружном диаметре статора $D \leq 60$ мм высота ярма якоря должна составлять $h_{j1} \geq 5$ мм, соответственно, внутренний минимально возможный диаметр магнитопровода статора $D_{j1} \leq D - 2h_{j1} = 50$ мм.

Для минимизации тепловых потерь и обеспечения естественного охлаждения в условиях закрытого исполнения двигателя плотность тока в обмотке статора принималась в диапазоне $5 \leq j_{\max} \leq 12 \text{ А/мм}^2$. Выбрана двухслойная петлевая обмотка с диаметральной шаг и числом витков в катушке $w_k = 1$ [1, 6]. На каждом полюсном делении размещены три фазные зоны, каждая из которых образована $q = 5$ проводниками. Выбран медный круглый провод с эмалевой изоляцией марки ПЭТ-155, удельное сопротивление которого при рабочей температуре $t = 80^\circ\text{C}$ составляет $\rho = 0,02 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$ [1]. По технологическим соображениям изготовления обмотки $h_{\text{лоб}} = 5$ мм, при этом $I_{\text{лоб}} = 37,497$ мм [3].

С учетом вышесказанного и для обеспечения требуемых параметров (таблица 1) по соотношениям (5), (6) были рассчитаны граничные условия оптимизационного поиска: $39 \leq D_a \leq 48,5$, мм и $5 \leq j_{\max} \leq 6$, А/мм².

В заданном интервале изменения геометрических параметров с помощью программы FEMM, базирующейся на конечно – разностном методе, была произведена серия расчётов для определения магнитного потока возбуждения Φ_f на полюсном делении электродвигателя, по результатам которых выбраны оптимальные размеры синхронного электродвигателя, обеспечивающие требуемые исходными данными параметры в условиях ограничения габаритов. Далее был произведен точный поверочный расчет параметров синхронного электродвигателя, включая расчет активных потерь с учетом потерь в стали. Параметры рассчитанного электродвигателя сведены в таблицу 2.

Достоверность разработанного алгоритма выбора главных геометрических размеров активных частей синхронного электродвигателя в условиях ограниченного объема проверялась путем сопоставления данных серии численных экспериментов, проведенных в среде FEMM, с данными, полученными аналитическими соотношениями, и показала хорошее сов-

Таблица 1 – Исходные данные для проектирования

Максимальная /минимальная частота вращения n , об/мин	4000/1000
Момент при максимальной частоте M , Н·м	0,02
Ток номинальный от аккумулятора I_1 , не более, А	0,6
Число фаз m	3
Число пар полюсов p	2
Наружный диаметр электродвигателя, не более, мм	60
Наружная длина электродвигателя, не более, мм	20
Воздушный зазор δ , не более, мм	0,7
Полная активная мощность P_1 , не более, Вт	10
КПД при рабочей температуре 80°C η , о.е.	0.8

Таблица 2 – Оптимальные параметры разработанного электродвигателя

Длина пазовой части/ одностороннего вылета лобовой части/ общая длина обмотки, мм	5/5/15
Наружный диаметр ротора, мм	44
Наружный диаметр статора D , мм	58
Внутренний диаметр (расточки) статора D_a , мм	45,4
Максимальная толщина магнитов на роторе, мм	2,5
Среднеквадратичная индукция в воздушном зазоре T_n	0,495
Максимальная индукция в воздушном зазоре T_n	0,68
Магнитный поток на полюсном делении Φ_f , мкВб	80
ЭДС вращения при максимальной частоте E , В	4,52
Полезная мощность при максимальной частоте вращения, Вт	7,995
Момент при максимальной частоте M , Н·м	0,02
Плотность тока в обмотке статора по S1 j , А/мм ²	5,95
Число витков в фазной зоне/фазе/слое	25/100/300
Толщина обмоточного слоя, мм	1,5

падение. Данная методика рекомендуется к применению на этапе предварительного определения параметров электродвигателя при задании граничных условий оптимизационного поиска для последующего конечно-элементного моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Гольдберг, О.Д. Проектирование электрических машин / О.Д. Гольдберг, Я.С. Гулин, И.С. Свириденко. -М.: Высшая школа, 2006. -431 с.
- 2 Научно-производственная компания «Магниты и системы». -Режим доступа: <http://magnet-prof.ru>. -28.04.2018 г.
- 3 Бронштейн И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. -М.: Наука, 1986. -544 с.
- 4 ГОСТ 21427.2-83. Сталь электротехническая холоднокатаная изотропная тонколистовая. Технические условия. -М.: Изд-во стандартов, 1990. -13с.
- 5 Калужский, Д.Л. Электрические машины с дискретно - распределенными обмотками / Д.Л. Калужский // -Электротехника. -1997. -№9. -С. 15-21.

REFERENCES

- 1 O.D. Gol'dberg, Ya.S. Gurin, I.S. Sviridenko. Design of electrical machines [Proektirovanie elektricheskikh mashin]. Moscow. Vysshaya shkola Publ. 2006. 431 p.
- 2 Magnets and systems' research and manufacturing company [Nauchno-proizvodstvennaya kompaniya Magnity i sistemy]. URL: <http://magnet-prof.ru>. -28 Apr. 2018.
- 3 I.N. Bronshteyn, K.A. Semendyaev. Mathematics Reference Book for engineers and students [Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya vtuzov]. Moscow. Nauka Publ. 1986. 544 p.
- 4 GOST 21427.2-83. Isotropic electrotechnical cold rolled thin sheet steel. Technical conditions [Stal' elektrotehnicheskaya kholodnokatanaya izotropnaya tonkolistovaya. Tekhnicheskie usloviya]. Moscow. Standartov Publ. 1990. 13 p.
- 5 D.L. Kaluzhskiy. Electric mechanism with discrete distributed windings [Elektricheskie mashiny s diskretno - raspredelemnymi obmotkami]. *Electrical engineering [Elektrotehnika]*. 1997. No. 9. pp. 15-21.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: синхронный электродвигатель, магнитоэлектрическое возбуждение, постоянные магниты, ограниченный объем, целевая функция

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ: Калужский Дмитрий Леонидович, докт. техн. наук, профессор НГТУ
Ефимова Юлия Борисовна, канд. техн. наук, доцент НГТУ
Лаппи Феликс Эдуардович, канд. техн. наук, доцент НГТУ
Харитонов Андрей Сергеевич, ассистент НГТУ

ПОЧТОВЫЙ АДРЕС: 630092, г.Новосибирск, пр.К.Маркса, 20, НГТУ

УПРАВЛЕНИЕ СИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ НА БАЗЕ БЕСПАЗОВОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»

Д.Л. Калужский, Ю.Б. Ефимова, А.С. Харитонов, А.Д. Куликов

SMOOTH-CORE ARMATURE ELECTRIC MACHINE BASED SYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE CONTROL
Novosibirsk State Technical University (NSTU) 20, Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630092, Russia
Dmitrii L. Kaluzhskii (Holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Prof. of NSTU)
Juliya B. Efimova (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of NSTU)
Andrei S. Kharitonov (Assistant Professor of NSTU)
Anton D. Kulikov (Master's Degree of NSTU)

ABSTRACT: This paper presents a development of synchronous electric drive designed at a base of a two-circuit hierarchical control system. The operation of the electric drive is simulated with PSIM software. The results of the study let the authors design and assemble a low noise electric drive of a centrifugal accelerator.

Keywords: synchronous electric drive, hierarchical control system, modulus optimum, noise, vibration

Представлена разработка синхронного электропривода, реализованного на основе двухконтурной системы подчиненного регулирования. Смоделирована работа электропривода в программе PSIM. По результатам исследований спроектирован и изготовлен электропривод центробежного ускорителя с низким уровнем шума.

В ходе выполнения научно-исследовательской работы (НИР) по разработке электро-механического центробежного ускорителя для устройства стимуляции сердечной деятельности разработан синхронный электропривод с пониженным уровнем шума на базе беспазовой электрической машины.

Одним из главных требований, предъявляемых к устройству, является обеспечение низкого уровня электромагнитных шумов и вибраций. Анализ представленных в литературе вариантов исполнения электрических машин [1], а также проведенные в ходе выполнения НИР расчеты с применением конечно элементного моделирования показали, что применение беспазового синхронного электродвигателя с возбуждением от постоянных магнитов является наиболее оптимальным решением с целью обеспечения минимального уровня шума и ограничением габаритов центробежного ускорителя.

Основной функцией устройства стимуляции сердечной деятельности является стабили-

зация заданной частоты вращения центробежного ускорителя, а также автоматическое регулирование частоты вращения насоса по определенному алгоритму.

Для этого разработан электропривод, математическая модель которого реализована в системе d - q координат, синхронно вращающейся с ротором и включающей в себя реальные параметры двигателя. В основу модели положена известная система уравнений [2]

$$\begin{aligned}\frac{di_d}{dt} &= \frac{1}{L_d}(u_d - r_s i_d + \omega L_q i_q); \\ \frac{di_q}{dt} &= \frac{1}{L_q}(u_q - r_s i_q - \omega L_d i_d - \omega \Psi_f); \\ \frac{d\Omega}{dt} &= \frac{1}{J}(M - M_c - \beta \Omega); \\ M &= \frac{3}{2} Zp [\Psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i],\end{aligned}$$

где i_d, i_q, u_d, u_q – токи и напряжения статора по осям d и q ;

M, M_c – электромагнитный и нагрузочные моменты;

ω – угловая частота;

J – момент инерции ротора;

β – коэффициент вязкого трения (коэффициент демпфирования);

Ψ_f – потокосцепление, создаваемое постоянными магнитами;

L_d, L_q – индуктивности обмотки статора по осям d - q ;

r_s – активное сопротивление обмотки статора;

Ω – угловая частота вращения ротора;

p – число пар полюсов обмотки статора;

Структурная схема разработанного электропривода приведена на рисунке 1.

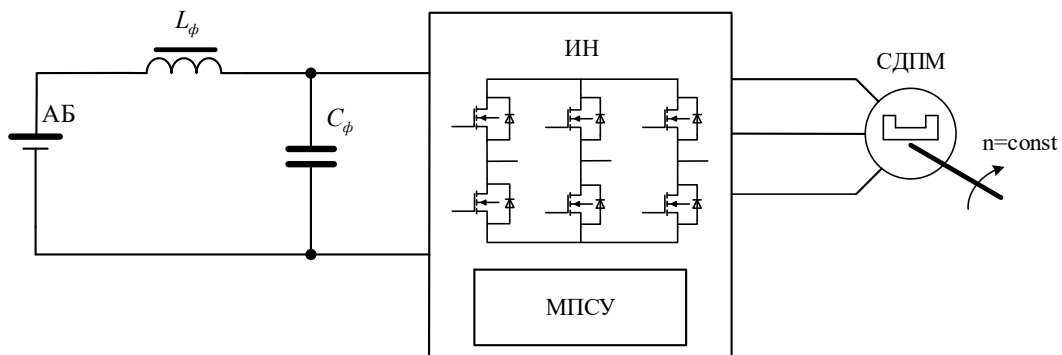


Рисунок 1 – Структурная схема электропривода: АБ-аккумуляторная батарея; элементы L_ϕ и C_ϕ – звено постоянного тока, представляющее собой LC-фильтр; ИН-инвертор напряжения, реализованный на полевых транзисторах с изолированным затвором (ПТИЗ); МПСУ-микропроцессорная система управления; СДПМ-исполнительный двигатель с возбуждением от постоянных магнитов

Имитационное моделирование работы электрического привода для центробежного ускорителя проводилось с использованием программного пакета PSIM. Чтобы обеспечивать требуемый диапазон частот вращения и возможность плавного регулирования скорости центробежного насоса (невыполнение этого требования может негативно сказаться на ритме работы сердца пациента), была выбрана система подчиненного регулирования с последовательной коррекцией. Подобные системы обладают следующими достоинствами [3, 4]:

- возможность достижения оптимальных показателей качества переходных процессов;
- отлаженная методика настройки регуляторов;
- возможность ограничения регулируемых величин.

Система автоматического регулирования (САР) скорости вращения реализована с помощью МПСУ. САР является двухконтурной системой подчиненного регулирования. Внеш-

ний контур является основным; в нем осуществляется регулирование скорости за счет изменения электромагнитного момента двигателя. Закон регулирования пропорционально – интегральный (ПИ), что исключает статическую ошибку. Выходным сигналом внешнего контура является сигнал задания для внутреннего контура регулирования.

Внутренний контур САР является подчиненным, в нем осуществляется регулирования тока по закону ПИ типа, вследствие чего происходит изменение электромагнитного момента двигателя. При этом ток статора всегда ориентирован по вектору потокоцепления ротора. Регулирование электромагнитного момента осуществляется за счет изменения составляющей тока статора по оси q , составляющая по оси d поддерживается равной нулю.

Для исключения резких изменений частоты вращения центробежного ускорителя во внешний контур помещен задатчик интенсивности (ЗИ). Это нелинейное устройство, которое ограничивает темп (интенсивность) изменения во времени сигнала задания. Применение и настройка ЗИ позволяет выбрать необходимый темп изменения скорости центробежного ускорителя.

Для исключения появления на выходе САР высокочастотной помехи, что также может привести резкому изменению скорости вращения центробежного ускорителя, в выходную цепь САР помещен фильтр нижних частот (ФНЧ) с некомпенсируемой постоянной времени.

Структурная схема САР скорости вращения приведена на рисунке 2.

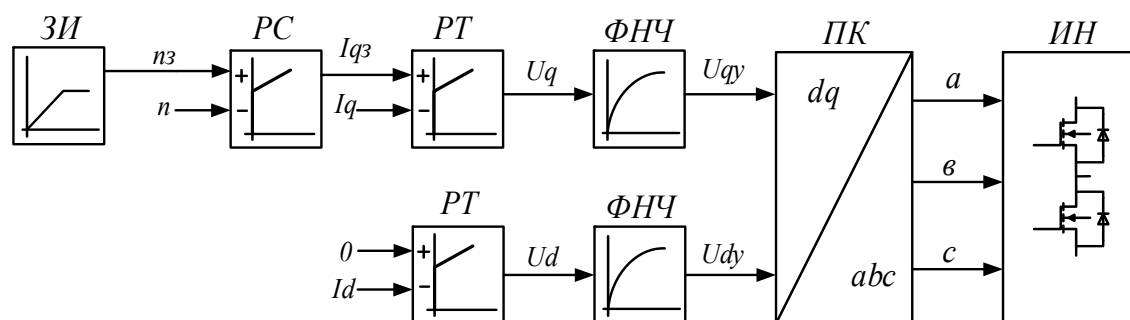


Рисунок 2 – Структурная схема САР скорости вращения центробежного ускорителя: ЗИ-задатчик интенсивности, ограничивает скорость нарастания задающей величины; PC и PT-регуляторы скорости и тока, реализуют ПИ закон управления; ФНЧ-фильтр нижних частот, определяет полосу пропускания САР; ПК-преобразователь координат; ИН-инвертор напряжения

Контурные регуляторы САР настроены на модульный оптимум [4], что дает в итоге систему регулирования главной координаты (в нашем случае скорости вращения) в виде оптимально настроенного фильтра нижних частот. САР пропускает сигналы управления и отфильтровывает высокочастотные сигналы помех, лежащие вне полосы ее пропускания. На рисунке 3 приведены результаты моделирования.

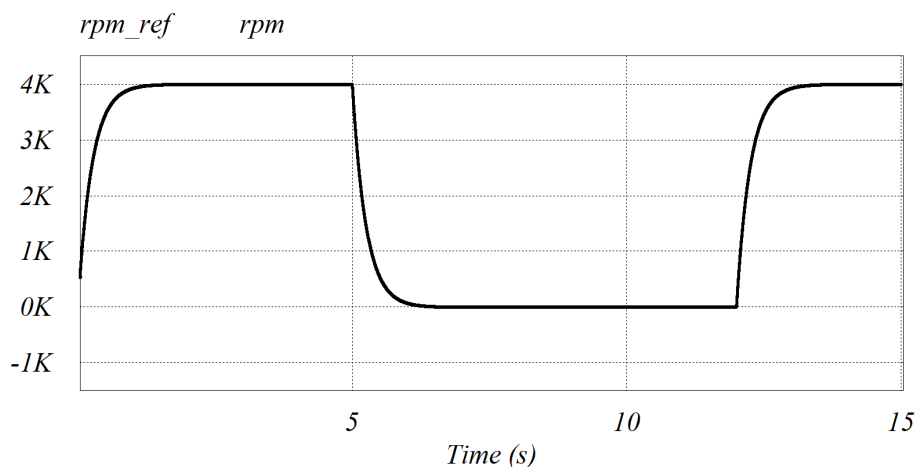


Рисунок 3 – Переходный процесс изменения скорости вращения центробежного ускорителя при двукратном скачкообразном изменении сигнала задания. Уставка скорости меняется с номинального значения 4000 об/мин до нуля, затем вновь возрастает до номинального значения.

По результатам исследований спроектирован и изготовлен электропривод с низким уровнем шума, технические параметры которого представлены в таблице. Построение САР скорости центробежного ускорителя на основе двухконтурной системы подчиненного регулирования позволило получить плавный (астатический) переходный процесс по скорости с отсутствием перерегулирования с возможностью изменения скорости центробежного ускорителя в ходе настройки и эксплуатации устройства.

Вышеприведенные исследования, разработка, изготовление и испытания электропривода проводилась в рамках договора с Сибирским отделением Академии наук (г.Новосибирск).

Таблица – Технические параметры синхронного электропривода

Полезная мощность при максимальной частоте вращения, Вт	8
Максимальный момент по S ₁ , Нм	0,2
Масса электродвигателя, кг	0,074
Напряжение в звене постоянного тока, В	12
КПД при рабочей температуре 80 °С, о.е., не менее	0,8
Уровень шума, дБ, не более	32
Статическая ошибка вычисления скорости, не более, %	1

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Гольдберг, О.Д. Проектирование электрических машин / О.Д. Гольдберг, Я.С. Гурин, И.С. Свириденко. - М.: Высшая школа, 2006. -431 с.
- 2 Шрейнер, Р.Т. Системы подчиненного регулирования электроприводов. Ч.1. Электроприводы постоянного тока с подчиненным регулированием координат / Р.Т. Шрейнер. -Екатеринбург: Изд-во Урал. гос. проф.-пед. унив., 1997. -279 с.
- 3 Виноградов, А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / А.Б. Виноградов. - Иваново: Изд-во Иванов. гос. энерг. унив. им. В.И. Ленина, 2008. -298 с.
- 4 Слежановский, О.В. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями / О.В. Слежановский, Л.Х. Дацковский, И.С. Кузнецов и др. -М.: Энергоатомиздат, 1983. -256 с.

REFERENCES

- 1 O.D. Gol'dberg, Ya.S. Gurin, I.S. Sviridenko. Design of electric machines [Proektirovanie elektricheskikh mashin]. Moscow. Vysshaya shkola Publ. 2006. 431 p.
- 2 R.T. Shreyner. Electric drives hierarchical control system. Part 1. DC current electric drives with hierarchical coordinate control [Sistemy podchinennogo regulirovaniya elektroprivodov. Ch.1. Elektroprivody postoyannogo toka s podchinennym regulirovaniem koordinat]. Ekaterinburg. Russian St. Vocational Pedagogical Univ. Publ. 1997. 279 p.
- 3 A.B. Vinogradov. Vector control of AC drives [Vektornoe upravlenie elektroprivodami peremennogo toka]. Ivanovo. Ivanovskiy St. Energ. Univ. named V.I. Lenin Publ. 2008. 298 p.
- 4 O.V. Slezhanovskiy, L.Kh. Datskovskiy, I.S. Kuznetsov. Systems of hierarchical control of AC electric drives with gate converters [Sistemy podchinennogo regulirovaniya elektroprivodov peremennogo toka s ventil'nyimi preobrazovatelyami]. Moscow. Energoatomizdat Publ. 1983. 256 p.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: синхронный электропривод, система подчиненного регулирования, модульный оптимум, шум, вибрация

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ: Калужский Дмитрий Леонидович, докт. техн. наук, профессор НГТУ
Ефимова Юлия Борисовна, канд. техн. наук, доцент НГТУ
Харитонов Андрей Сергеевич, ассистент НГТУ
Куликов Антон Дмитриевич, магистрант НГТУ

ПОЧТОВЫЙ АДРЕС: 630092, г.Новосибирск, пр.К.Маркса, 20, НГТУ

ОСОБЕННОСТИ УСТОЙЧИВОЙ РАБОТЫ ГЕНЕРАТОРОВ ЧЕРЕЗ ПОЛУВОЛНОВУЮ ЛИНИЮ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

ФГБУН Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова Сибирского отделения РАН

А.М. Хоютанов, П.Ф. Васильев, Г.И. Давыдов, В.П. Кобылин

ASPECTS OF GENERATORS STABLE OPERATION THROUGH THE HALF-WAVE POWER SUPPLY

Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North of the Siberian Branch of the RAS (IPTPN SB RAS) 1, Oktyabrskaya St., Yakutsk, 677891, Russia

Aleksandr M. Khoiutanov (lead engineer of IPTPN SB RAS)

Pavel F. Vasilyev (Ph.D. of Engineering Sciences, head of department IPTPN SB RAS)

Gennadii I. Davydov (Research Assistant of IPTPN SB RAS)

Vitalii P. Kobylin (Holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, leading researcher of IPTPN SB RAS)

ABSTRACT: The authors carried out the analysis of the effect of voltage variation along the half-wave power line and power plant maximum generators capacity on the static stability of power transmission.

Keywords: half-wave line, static stability, power angle characteristics

Проведен анализ влияния изменения напряжения вдоль полуволновой линии и предельной мощности генераторов электрической станции на статическую устойчивость электропередачи.

Для передачи электрической энергии на дальние и сверхдальние расстояния перспективными являются полуволновые и настроенные на полуволну электропередачи [1, 2].

В полуволновой электропередаче в установившемся режиме реактивные сопротивления концевых устройств, включая внутренние сопротивления приемной и передающей энергосистем, намного меньше активного сопротивления, замещающего полуволновую линию [3] вследствие чего изменение напряжения по концам электропередачи влияет на устойчивость линии.

Для анализа данного влияния, рассмотрим линию электропередачи в общем случае и два предельных варианта при $U_1 = U_2$ и $U_1 \neq U_2$, расчетная схема которой изображена на рисунке 1.

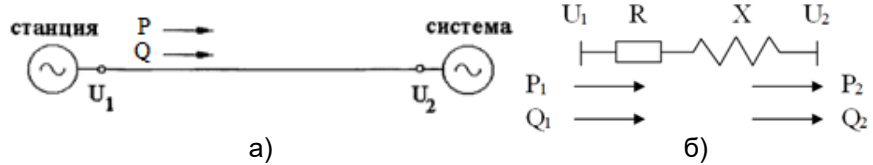


Рисунок 1 – Расчетная схема электропередачи (а) и ее схема замещения (б)

При этом, в общем случае, выводятся следующие соотношения между активной и реактивной мощностями на приемной и передающих концах электропередачи [3]

$$\begin{cases} P_1 = \frac{U_1^2}{z} \sin \alpha + \frac{U_1 U_2}{z} \sin(\delta - \alpha) \\ P_2 = -\frac{U_2^2}{z} \sin \alpha + \frac{U_1 U_2}{z} \sin(\delta + \alpha) \end{cases}; \quad (1)$$

$$\begin{cases} Q_1 = \frac{U_1^2}{z} \cos \alpha + \frac{U_1 U_2}{z} \cos(\delta - \alpha) \\ Q_2 = -\frac{U_2^2}{z} \cos \alpha + \frac{U_1 U_2}{z} \cos(\delta + \alpha) \end{cases},$$

где

$$z = \sqrt{r^2 + x^2}; \quad \alpha = 90^\circ - \arctg \frac{x}{r}; \quad \delta = U_1 < U_2.$$

Для полуволновых электропередач при $U_1 = U_2$ и $x = 0$ получаем [3]

$$\begin{cases} P_1 = -P_2 = \frac{U^2}{r} (1 - \cos \delta) \\ Q_1 = Q_2 = -\frac{U^2}{r} \sin \delta \end{cases}. \quad (2)$$

Из графика зависимостей характеристики мощностей при $U_1 = U_2$ (рисунок 2) видно, что положительному повышению угла δ в диапазоне $0 < \delta < 180^\circ$ соответствует положительное повышение мощности ΔP_1 . Следовательно, в этом диапазоне синхронизирующая мощность положительна и режим устойчив.

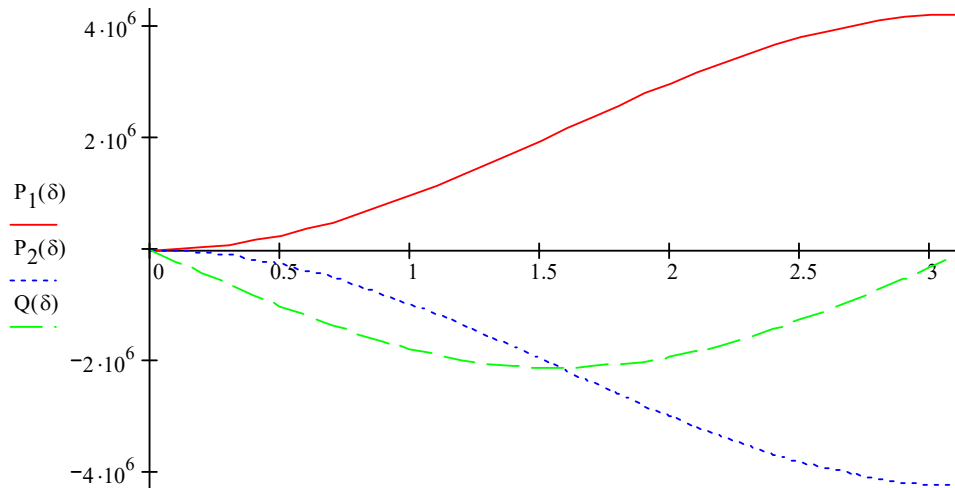


Рисунок 2 – Характеристики мощности электропередачи при $U_1 = U_2$

При $U_1 \neq U_2$ принимаем, что производится учет потерь активной мощности, и (1) преобразуется в следующие соотношения [3]

$$\begin{cases} P_1 = \frac{U_1^2}{r} - \frac{U_1 U_2}{r} \cos \delta \\ P_2 = -\frac{U_2^2}{r} + \frac{U_1 U_2}{r} \cos \delta \\ Q_1 = Q_2 = -\frac{U_1 U_2}{r} \sin \delta \end{cases} \quad (3)$$

Графики зависимостей показаны на рисунке 3.

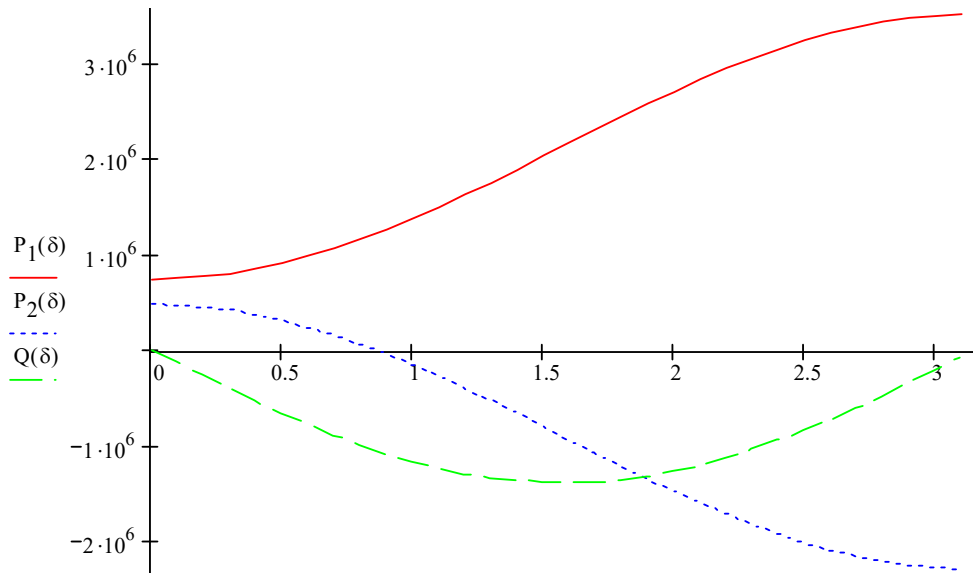


Рисунок 3 – Характеристики мощности электропередачи при $U_1 \neq U_2$

При значении угла $\delta = 0$ мощность передается из передающей системы в приемную, чему свидетельствуют значения активных мощностей P_1 и P_2 , которые принимают положительные значения. Любому повышению угла δ соответствуют одинаковые по модулю, но противоположные по направлению, положительные повышение активных мощностей P_1 и P_2 . Реактивная мощность сбалансирована. Следовательно, синхронизирующая мощность положительна и режим устойчив.

Из-за волновой природы электропередачи следует рассмотреть изменение предела мощности станции по статической устойчивости, работающей через однородную линию на шины бесконечной мощности, в зависимости от длины линии.

Угловая характеристика мощности схемы (рисунок 4) при условии напряжения на шинах линии $U_1 = U_2 = U$ имеет вид

$$P = P_{\text{пр}} \sin \delta = \frac{P_{\text{нст}} \sin \delta}{\sin \lambda}, \quad (4)$$

где $P_{\text{нст}}$ – натуральная мощность линии

$$P_{\text{нст}} = U^2 / Z_B;$$

$P_{\text{пр}}$ – предельная передаваемая мощность.

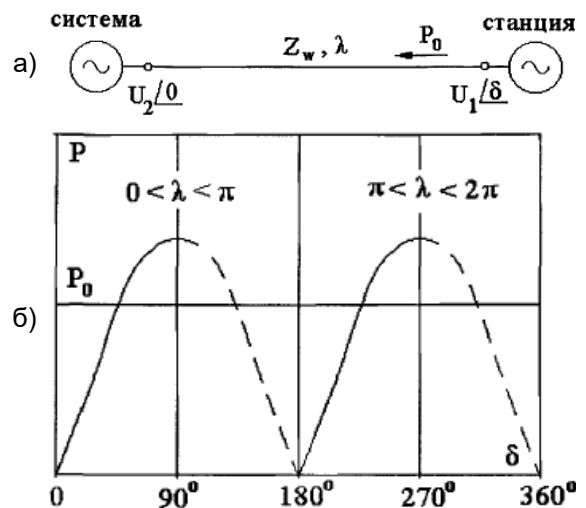


Рисунок 4 – Расчетная схема угловой характеристики мощности (а) и ее угловая характеристика (б) [4, 5]

Зависимость предельной передаваемой мощности от длины линии показана на рисунке 5. В диапазоне от 0 до $\pi/2$, наблюдается уменьшение $P_{\text{пр}}$ и достижение значения, равной натуральной мощности линии при четвертьволновой длине. В диапазоне от $\pi/2$ до π , исходя из зависимости, работа электропередачи находится в неустойчивой части графика. Действительно, при передаче натуральной мощности связь между δ и λ находится в прямо пропорциональной зависимости

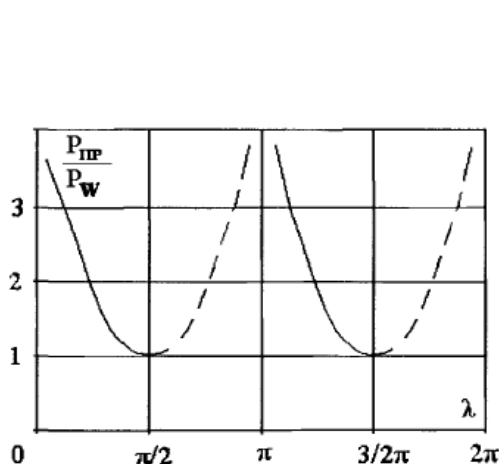


Рисунок 5 – Зависимость $P_{\text{пр}}$ от λ [4, 5]

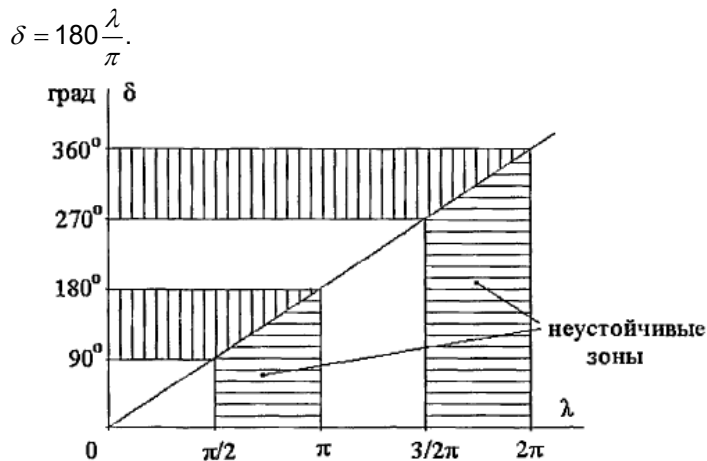


Рисунок 6 – Зоны устойчивой и неустойчивой работы [4, 5]

В диапазонах от $\pi/2 < \lambda < \pi$, а также от $3/\pi < \lambda < 2\pi$ для которых справедливы значения угла $90^\circ < \delta < 180^\circ$, $270^\circ < \delta < 360^\circ$ соответственно, исходя из зависимости характерно неустойчивое состояние (рисунок 6).

В результате работа полуволновой электропередачи с точки зрения статической устойчивости препятствий не встречает. При этом, если физическая длина линии находится в неустойчивом диапазоне от 1500-3000 км, необходима компенсация электрической длины для перехода в устойчивый диапазон $0-\pi/2$, либо настройка длины линии в полуволновой зоне $\pi-3\pi/2$ [4, 5].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Хютанов, А.М. Повышение надежности и эффективности сверхдальних межсистемных связей / А.М. Хютанов, П.Ф. Васильев, В.П. Кобылин // -Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. -2017. -Т.17. -№3. -С. 67-75.
- 2 Кобылин, А.В. Промежуточный отбор мощности из полуволновой электропередачи / А.В. Кобылин, Г.И. Самородов, С.М. Зильберман, В.П. Кобылин и др. // -Электричество. -2015. -№6. -С. 4-11.
- 3 Лукашов, Э.С. Статическая устойчивость двух электроэнергетических систем, соединенных линией электропередачи, настроенной на полуволну / Э.С. Лукашов // Вопросы дальних электропередач. -Новосибирск: Изд-во Сиб. отд. АН СССР, 1960. -С. 41-47.
- 4 Зильберман, С.М. Методические и практические вопросы полуволновой технологии передачи электроэнергии: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.14.02 / Самуил Моисеевич Зильберман. -Красноярск, 2009. -39 с.
- 5 Самородов, Г.И. Сверхдальние электропередачи / Г.И. Самородов. -Новосибирск: Изд-во Новосиб. гос. техн. ун-в., 1994. -112 с.

REFERENCES

- 1 A.M. Khoyutanov, P.F. Vasil'ev, V.P. Kobylin. Improving the reliability and efficiency of ultra long-range interconnections [Povyshenie nadezhnosti i effektivnosti sverkhdal'nikh mezhsistemnykh svyazey]. South Ural State University Bulletin. Series: Power engineering [Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika]. 2017. Vol. 17. No. 3. pp. 67-75.
- 2 A.V. Kobylin, G.I. Samorodov, S.M. Zil'berman, V.P. Kobylin. Intermediate power take-off from half-wave power transmission [Promezhutochnyy otbor moshchnosti iz poluvolnovoy elektropereдачи]. Electrical Technology Russia [Elektrichestvo]. 2015. No. 6. pp. 4-11.
- 3 E.S. Lukashov. Static stability of two electric power systems connected by a half-wave power transmission line [Staticheskaya ustoychivost' dvukh elektroenergeticheskikh sistem, soedinnennykh liniy elektropereдачи, nastroyennoy na poluvolnu]. Voprosy dal'nikh elektropereдачи. Novosibirsk. Sib. Dep. USSR Acad. of Sciences. 1960. pp. 41-47.
- 4 S.M. Zil'berman. Methodological and practical issues of half-wave power transmission technology [Metodicheskie i prakticheskie voprosy poluvolnovoy tekhnologii peredachi elektroenergii]. Krasnoyarsk, 2009. 39 p.
- 5 G.I. Samorodov. Ultra long-range power transmissions [Sverkhdal'nie elektropereдачи]. Novosibirsk. Novosibirsk St. Techn. Univ. Publ. 1994. 112 p.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: полуволновая линия, статическая устойчивость, угловая характеристика

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ: Хютанов Александр Михайлович, ведущий инженер ИФТПС СО РАН
Васильев Павел Филиппович, канд. техн. наук, заведующий отделом ИФТПС СО РАН
Давыдов Геннадий Иванович, младший научный сотрудник ИФТПС СО РАН
Кобылин Виталий Петрович, докт. техн. наук, ведущий научный сотрудник ИФТПС СО РАН

ПОЧТОВЫЙ АДРЕС: 677891, г.Якутск, ул.Октябрьская, 1, ИФТПС СО РАН

ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ ИЗОЛИРОВАННОГО ПРОВОДНИКА

ФГБОУ ВО «Омский государственный университет путей сообщения»

О.В. Литвинова

ELECTROMAGNETIC FIELD PARAMETERS FOR THE INSULATED CONDUCTOR

Omsk State Transport University (OSTU) 35, Prospekt Marksa, Omsk, 644046, Russia
Olga V. Litvinova (Engineer of OSTU)

ABSTRACT: This paper determines the parameters of electromagnetic field of an insulated conductor. When solving the problem, a cylindrical coordinate system was used. As a result, simplified solutions for a homogeneous medium are obtained using expansions of the Bessel functions.

Keywords: insulated conductor, Bessel functions, magnetic field strength, vector potential function

Определены параметры электромагнитного поля изолированного проводника. При решении задачи использовалась цилиндрическая система координат. В итоге получены упрощенные решения для однородной среды, используя разложения функций Бесселя.

Рассмотрим изолированный цилиндрический проводник, расположенный в однородной среде. Электрические величины в нем распределяются в соответствии с его размерами, параметрами, изолирующего материала, конструкцией, параметрами земли. Электрический ток протекает по цилиндрическому изолированному проводнику, за счет электромагнитных связей с другими сооружениями или подключенному к нему внешнему источнику. Внешний источник подразумевает источник электромагнитной энергии, подключенный к проводнику. Из примеров можно привести кабели связи с распределенными по длине параметрами, при которых возврат тока осуществляется через землю. С помощью системы дифференциальных уравнений можно найти распределение тока и потенциала цилиндрического проводника, при наличии электрических параметров [1].

Удельное электрическое сопротивление земли зависит от химического состава грунта, размеров и плотности прилегания друг к другу его частиц, влажности, температуры, концентрации в нем растворимых химических веществ и др. [2].

Решение задачи по определению параметров электромагнитного поля для n-слойной земли приводит к громоздким не решаемым аналитически выражениям и, как правило, многослойную структуру приводят к эквивалентной двухслойной. Однако такое приведение не совсем практично, так как при выполнении строительно-монтажных работ структура и состав земли в некоторых случаях изменяют.

Так при строительстве заземляющих устройств верхний слой грунта снимается, монтируется заземлитель и соответственно засыпается новым грунтом. В связи с этим проводимость земли в данном месте уже будет отличаться от проводимости коренных пород грунта. Чтобы определить техническое состояние подземного сооружения необходимо получить решения, ближней к источнику зоне, в которой электромагнитное поле источника является первичным. С электрическими величинами источника связаны параметры первичного поля, которые определяются как параметрами самого источника, так и неоднородностями, которые располагаются по длине проводника.

Решение задач по определению параметров электромагнитного поля будет проводиться для однородного строения земли и бесконечно длинной линии.

Рассмотрим вектор-потенциальную функцию гармонического тока, протекающего по изолированному цилиндрическому проводнику, расположенному в безграничном пространстве (рисунок 1).

Величина векторного и скалярного потенциала определяет необходимые компоненты электромагнитного поля (1)

$$\Delta A - m^2 A = 0. \quad (1)$$

Поскольку поле линейного источника в безграничном пространстве обладает цилиндри-

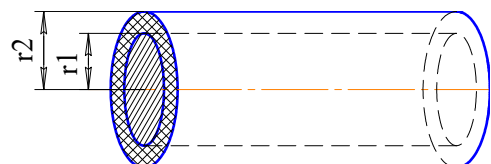


Рисунок 1 – Подземный изолированный проводник и его сечение

ческой симметрией, то вектор-потенциальная функция имеет единственную составляющую, направленную вдоль линейного проводника [3].

Уравнение (1) в цилиндрической системе координат примет вид

$$\frac{\partial^2 A_x}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial A_x}{\partial r} - m^2 A_x = 0, \quad (2)$$

$$r = \sqrt{y^2 + z^2}; \quad m^2 = \kappa^2 - \gamma^2;$$

где κ — волновое число среды, м^{-1}

$$\kappa = \sqrt{\gamma \omega \mu \sigma - \omega^2 \varepsilon \mu};$$

ω — круговая частота;

μ — магнитная проницаемость среды, Гн/м ;

σ — удельная проводимость среды, См/м ;

ε — диэлектрическая проницаемость, Ф/м ;

γ — коэффициент распространения тока в проводнике, м^{-1} .

Через модифицированные функции Бесселя I_0 и K_0 записывается решение уравнения (2) [4]. Считается, что величина тока по длине проводника изменяется по закону $I_x = I_H \exp(-\gamma x)$

$$A_x = AK_0(mr) + Bl_0(mr), \quad (3)$$

где A, B — постоянные, определяемые из граничных условий.

Для вектор-потенциальной функции в проводнике в выражении (3) следует принять $A=0$, поскольку при $r \rightarrow \infty$ $K_0(mr) \rightarrow \infty$. Для определения коэффициента B_1 в проводнике $A_x^{(1)} = B_1 l_0(m_1 r)$ перейдем от вектор-потенциальной функции к напряженности магнитного поля $H_\varphi^{(1)}$. Из закона полного тока $I = H 2\pi r$ определим значение B_1 для поверхности проводника

$$H_\varphi^{(1)} = \frac{1}{\mu} \text{rot} A_x^{(1)} = \frac{B_1}{\mu} \text{rot} [l_0(m_1 r)] = \frac{B_1}{\mu} m_1 l_1(m_1 r_1) = \frac{I_x}{2\pi r_1}, \quad (4)$$

$$m_1 = \sqrt{\kappa_1^2 - \gamma^2};$$

$$B_1 = \frac{I_x \mu}{2\pi r_1 m_1 l_1(m_1 r_1)}. \quad (5)$$

где r_1 — радиус провода.

Напряженность магнитного поля в проводнике

$$H_\varphi^{(1)} = \frac{I_x l_1(m_1 r)}{2\pi r_1 l_1(m_1 r_1)}. \quad (6)$$

Из уравнения Максвелла определим E_r и E_x

$$\frac{\partial H_\varphi}{\partial x} = -(\sigma + j\omega\varepsilon)E_r = -\tilde{\sigma}E_r; \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial r}(rH_\varphi) = r\tilde{\sigma}E_x. \quad (8)$$

Откуда

$$E_r^{(1)} = \frac{I_x \gamma}{2\pi r_1 \tilde{\sigma}_1} \frac{l_0(m_1 r)}{l_1(m_1 r_1)}; \quad (9)$$

$$E_x^{(1)} = \frac{I_x m_1}{2\pi r_1 \tilde{\sigma}_1} \frac{l_0(m_1 r)}{l_1(m_1 r_1)}. \quad (10)$$

Запишем решение уравнения (3) для диэлектрика, окружающего линейный проводник

$$A_x^{(u3)} = A_{u3} K_0(m_{u3} r) + B_{u3} I_0(m_{u3} r). \quad (11)$$

Компоненты электромагнитного поля определяются по известному значению вектор-потенциальной функции

$$H_\varphi^{(u3)} = \frac{m_{u3}}{\mu} [A_{u3} K_1(m_{u3} r) + B_{u3} I_1(m_{u3} r)]; \quad (12)$$

$$E_r^{(u3)} = \frac{m_{u3}\gamma}{\mu\tilde{\sigma}_{u3}} [A_{u3}K_1(m_{u3}r) + B_{u3}I_1(m_{u3}r)]; \quad (13)$$

$$E_x^{(u3)} = \frac{m_{u3}^2}{\mu\tilde{\sigma}_{u3}} [B_{u3}I_0(m_{u3}r) + A_{u3}K_0(m_{u3}r)]. \quad (14)$$

При определении постоянных A_{u3} и B_{u3} воспользуемся граничными условиями на границе «металл-диэлектрик» и «диэлектрик-среда». Для границы раздела «металл-диэлектрик» при $r = r_1$ имеем

$$H_\varphi^{(u3)} = \frac{I_x}{2\pi r_1} = \frac{1}{\mu} [A_{u3}m_{u3}K_1(m_{u3}r_1) + B_{u3}m_{u3}I_1(m_{u3}r_1)], \quad (15)$$

и для второй границы при $r = r_2$

$$H_\varphi^{(u3)} = \frac{I_x}{2\pi r_2} = \frac{1}{\mu} [A_{u3}m_{u3}K_1(m_{u3}r_2) + B_{u3}m_{u3}I_1(m_{u3}r_2)]. \quad (16)$$

Из полученных соотношений граничных условий (15), (16) определяются постоянные

$$A_{u3} = \frac{\mu I_x}{2\pi m_{u3}r_1r_2} \left[\frac{r_1I_1(m_{u3}r_1) - r_2I_1(m_{u3}r_2)}{I_1(m_{u3}r_1)K_1(m_{u3}r_2) - I_1(m_{u3}r_2)K_1(m_{u3}r_1)} \right]; \quad (17)$$

$$B_{u3} = \frac{\mu I_x}{2\pi m_{u3}r_1r_2} \left[\frac{r_2K_1(m_{u3}r_2) - r_1K_1(m_{u3}r_1)}{I_1(m_{u3}r_1)K_1(m_{u3}r_2) - I_1(m_{u3}r_2)K_1(m_{u3}r_1)} \right]. \quad (18)$$

Для внешней среды постоянные A_2 и B_2 определяются из следующих условий

$$\begin{cases} H_\varphi \rightarrow 0 \text{ при } r \rightarrow \infty \\ H_\varphi = \frac{I_x}{2\pi r_2} \text{ при } r = r_2 \end{cases}. \quad (19)$$

В этом случае следует принять $B_2 = 0$, поскольку при $r \rightarrow \infty$ $I_0(m_2r) \rightarrow \infty$. Используя соотношения (19) для внешней среды, вектор-потенциальную функцию и компоненты электромагнитного поля можно записать в виде

$$\begin{cases} A_x^{(2)} = \frac{I_x\mu K_0(m_2r)}{2\pi m_2r_2K_1(m_2r_2)} \\ H_\varphi^{(2)} = \frac{I_xK_1(m_2r)}{2\pi r_2K_1(m_2r_2)} \\ E_r^{(2)} = \frac{I_x\gamma K_1(m_2r)}{2\pi r_2\tilde{\sigma}_2K_1(m_2r_2)} \\ E_x^{(2)} = \frac{I_xmK_0(m_2r)}{2\pi r_2\tilde{\sigma}_2K_1(m_2r_2)} \end{cases}. \quad (20)$$

Исходя из вышеизложенного, получены решения для составляющих электромагнитного поля в проводнике, в изолирующем покрытии и во внешней среде.

Полученные выражения (12), (13), и (14) совместно с постоянными A_{u3} и B_{u3} (17) и (18) громоздки и неудобны в практическом использовании. Учитывая, что для полимерного изолирующего покрытия кабелей в широком спектре частот выполняется условие $m_u r \ll 1$, то в тональном диапазоне частот $m_1 r \ll 1$, в ближней зоне $m_2 r \ll 1$. Для упрощения полученных решений воспользуемся разложением функций Бесселя в ряды и ограничим их первыми членами [5, 6]

$$I_0(m_{u3}r) \approx 1; \quad I_1(m_{u3}r) \approx \frac{m_{u3}r}{2}; \quad (21)$$

$$K_0(m_{u3}r) \approx \ln \frac{1.12}{m_{u3}r}; \quad K_1(m_{u3}r) \approx \frac{1}{m_{u3}r}. \quad (22)$$

Подставляя приближенные значения функции Бесселя в выражения (20) для вычисления компонентов поля, получим
– для проводника

$$H_{\varphi}^{(1)} = \frac{I_x}{2\pi r}, E_r^{(1)} = \frac{I_x \gamma}{\tilde{\sigma}_1 2\pi r}, E_x^{(1)} = \frac{I_x m_1}{2\pi r \tilde{\sigma}_1}; \quad (23)$$

– для изолирующего покрытия

$$H_{\varphi}^{(u3)} = \frac{I_x}{2\pi r}, E_r^{(u3)} = \frac{I_x \gamma}{\tilde{\sigma}_{u3} 2\pi r}, E_x^{(u3)} = -\frac{I_x m_{u3}^2}{2\pi r \tilde{\sigma}_{u3}} \ln \frac{1,12}{m_{u3} r}; \quad (24)$$

– для среды

$$H_{\varphi}^{(2)} = \frac{I_x}{2\pi r}, E_r^{(2)} = \frac{I_x \gamma}{\tilde{\sigma}_2 2\pi r}, E_x^{(2)} = \frac{I_x m_2^2}{2\pi \tilde{\sigma}_2} \ln \frac{1,12}{m_2 r}. \quad (25)$$

Полученные параметры электромагнитного поля в цилиндрической системе координат можно использовать для решения различных задач, в проводнике, изолирующем покрытии и внешней к проводнику среде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Зажирко, В.Н. Электрические цепи с распределенными параметрами / В.Н. Зажирко. -Омск: Омская гос. акад. путей сообщ., 1995. -102 с.
- 2 Электроразведка: Справочник геофизика / Под ред. А.Г. Тархова. -М.: Недра, 1980. -518 с.
- 3 Бурсиан, В.Р. Теория электромагнитных полей, применяемых в электроразведке / В.Р. Бурсиан. -Л.: Недра, 1972. -367 с.
- 4 Гринберг, Г.А. Основы точной теории волнового поля линий электропередачи / Г.А. Гринберг, Б.Э. Бонштедт // -Журнал технической физики. -1954. -Т.24. -Вып. 1. -С. 67-95.
- 5 Справочник по специальным функциям с формулами, графиками, математическими таблицами / Под ред. Н. Абрамовича, И. Нетигяна. -М.: Наука, 1979. -830 с.
- 6 Котельников, А.В. Блуждающие токи и эксплуатационный контроль коррозионного состояния подземных сооружений системы электроснабжения железнодорожного транспорта / А.В. Котельников, В.А. Кандаев -М.: УМЦ ЖДТ, 2013. -552 с.

REFERENCES

- 1 V.N. Zazhirkov. Electric circuits with distributed parameters [Elektricheskie tsepi s raspredelennymi parametrami]. Omsk. Omsk St. Acad. Railways of Communication Publ. 1995. 102 p.
- 2 A.G. Tarkhov. Electrical sounding: geophysics reference book [Elektrozvedka: Spravochnik geofizika]. Moscow. Nedra Publ. 1980. 518 p.
- 3 V.R. Bursian. Theory of electromagnetic fields used in electrical sounding [Teoriya elektromagnitnykh poley, primenyaemykh v elektrozvedke]. Leningrad. Nedra Publ. 1972. 367 p.
- 4 G.A. Grinberg, B.E. Bonshtedt. Fundamentals of the exact theory of power transmission lines EMF [Osnovy tochnoy teorii volnovogo polya liniy elektropredachi]. Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics [Zhurnal tekhnicheskoy fiziki]. 1954. Vol. 24. No. 1. pp. 67-95.
- 5 N. Abramovich, I. Netigyan. Reference book on special functions with formulas, graphs, mathematical tables [Spravochnik po spetsial'nym funktsiyam s formulami, grafikami, matematicheskimi tablitsami]. Moscow. Nauka Publ. 1979. 830 p.
- 6 A.V. Kotelnikov, V.A. Kandaev. Stray currents and operational control of the corrosive state of underground structures of the rail traction power system [Bluzhdayushchie toki i ekspluatatsionnyy kontrol' korrozionnogo sostoyaniya podzemnykh sooruzheniy sistemy elektrosnabzheniya zheleznodorozhnogo transporta]. Moscow. UMTs ZhDT Publ. 2013. 552 p.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: изолированный проводник, функции Бесселя, напряженность магнитного поля, вектор-потенциальная функция

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ: Литвинова Ольга Владимировна, инженер ФГБОУ ВО «ОмГУПС»

ПОЧТОВЫЙ АДРЕС: 644046, г.Омск, пр.К.Маркса, 35, ФГБОУ ВО «ОмГУПС»

ОБЗОРНО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ГОРОДСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»

Л.Н. Киснеева, А.Э. Аухадеев, А.Г. Хайруллин, Р.А. Рашитова

REVIEW OF CALCULATION METHODS OF BALANCED MODES OF OPERATION OF ELECTRIC CITY TRANSPORT TRACTION POWER EQUIPMENT

Kazan State Power Engineering University (KSPEU) 51, Krasnoselskaya St., Kazan, 420066, Russia

Lyaylya N. Kisneeva (Senior Lecturer of KSPEU)

Aver E. Aukhadееv (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of KSPEU)

Al'bert G. Khayrullin (Senior Lecturer of KSPEU)

Ruzanna A. Rashitova (Master's Degree of KSPEU)

ABSTRACT: The article presents the analysis of methods of calculating balanced modes of operation of traction power units of city electric transport. The obtained results let authors set the main directions of their development. The scientific significance of the research lies in classification of existing methods and seeking the ways of creation new calculation methods.

Keywords: methods for calculating balanced modes, traction power equipment, city electric transport, scientific review

Представлены результаты анализа современных методов расчета рациональных режимов работы тягового электрооборудования городского электрического транспорта и определены основные направления их развития. Научно-теоретическая значимость исследования заключается в классификации современных и определения путей формирования перспективных методов расчета.

Во многих западных и европейских странах после многолетнего упадка в отрасли общественного транспорта и переориентации населения на тотальную автомобилизацию происходит бурное развитие городского электрического транспорта (ГЭТ). Аналогичная ситуация складывается и в России и после длительного и разрушительного для отрасли забвения намечаются первые шаги по восстановлению экологически чистого общественного транспорта и повышения его эффективности, в том числе и путем внедрения энергосберегающих технологий в системе электрической тяги. Исследование соответствующих нормативно-правовых актов, регламентов и законов, а также отечественного и зарубежного опыта работ в данном направлении, выявило, что все мероприятия по энергосбережению и повышению энергоэффективности можно условно разделить на три направления: технические, технологические и организационные [1, 2]. Практика показывает, что существующее состояние отрасли ГЭТ требует колоссальных материальных затрат для реализации технического направления путем обновления или глубокой модернизации всего парка подвижного состава, что определяет целесообразность развития технологического и организационного направлений. При этом наиболее перспективной технологией энергосбережения является внедрение рациональных режимов работы тягового электрооборудования (ТЭО) электроподвижного состава (ЭПС), на которое приходится более 60% всего количества электрической энергии, расходуемой на тягу, что актуализирует проблему выбора методов их расчета, обеспечивающих необходимую адекватность реальным условиям эксплуатации ГЭТ [1-3].

Аналитический обзор научной литературы показал, что расчеты режимов работы ТЭО используются в очень широком круге задач транспортной отрасли, таких как: расчеты для поездной работы; расчеты при проектировании новых и реконструкции существующих путей сообщения; расчеты для сравнения путей увеличения провозной способности маршрутной системы или ее экономичности; тормозные расчеты; экспертные расчеты; расчет систем электроснабжения по графику движения; разработка режимных карт и поиск рационального режима ведения ЭПС; расчеты при проектировании системы автоведения ЭПС и тренажеров для обучения водителей и машинистов; расчеты, связанные с нормированием расхода энергоресурсов и др. [2-6] Очевидно, что такой широкий круг задач с необходимой точностью возможно решить применяя лишь адекватные математические модели и методы расчета, полностью отражающие физические процессы реально происходящих явлений. Проведенный обзор методов расчета рациональных режимов работы ТЭО ГЭТ позволил условно выделить три основные группы: расчетно-аналитические, вероятностно-статистические, расчетно-экспериментальные, которые легли в основу предлагаемой классификации (рисунк).

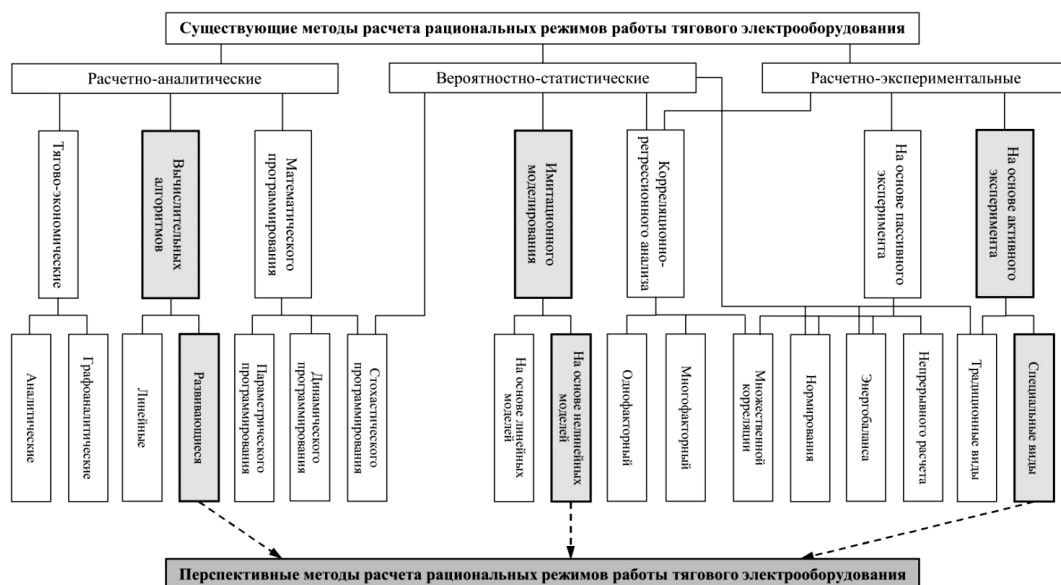


Рисунок – Классификация существующих и формирование перспективных методов расчета рациональных режимов работы ТЭО ГЭТ

Многие ведущие отраслевые специалисты отмечают, что существующие методы расче-

та рациональных режимов работы ТЭО требуют совершенствования, в связи с тем, что их использование приводит к недопустимому расхождению между расчетными и эксплуатационными значениями параметрами режимов работы ТЭО [2, 6-8]. Проведенное обзорно-аналитическое исследование позволило выявить основные методологические проблемы теории и методов расчета рациональных режимов работы ТЭО ГЭТ. Так, например, выявлено, что многие существующие методы расчета используют модели движения ЭПС, основывающиеся на постулатах ньютоновской механики и рассматривающих ЭПС как замкнутую линейную, детерминированную, механическую систему, в то время как современное научное синергетическое мировоззрение привнесло понятия открытости, нелинейности сложных систем, что определяет необходимость учета стохастической природы многих факторов [2, 4, 6]. Критический анализ научной литературы позволил определить следующие направления развития теории и методов расчета рациональных режимов работы ТЭО ГЭТ:

- совершенствование и развитие методологических основ теории электрической тяги и тяговых расчетов;
- использование при многовариантных тяговых расчетах имитационного моделирования с применением вычислительных алгоритмов;
- корректировка моделей ТЭО результатами натурных испытаний на основе активного эксперимента.

С учетом вышесказанного, на представленной классификации определены группы методов (блоки, выделенные серым цветом), на основе объединения которых целесообразно разрабатывать перспективные методы расчета рациональных режимов работы ТЭО.

Таким образом, проведенное обзорно-аналитическое исследование показало актуальность комплексной проблемы развития теории и методов расчета рациональных режимов работы тягового электрооборудования. Решение этой проблемы на современном теоретическом, экспериментальном и информационном уровне возможно в рамках концепций системного подхода и синергетической парадигмы на основе развития методов имитационного моделирования с применением вычислительных алгоритмов и специальных видов активного эксперимента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Клевцов, С.Н. Энергосберегающие технологии городского электрического транспорта / С.Н. Клевцов, Р.Г. Идиятуллин, А.Э. Аухадеев. -Волгоград: Панорама, 2007. -288 с.
- 2 Бакиров, А.Р. Разработка теории и методов расчета оптимальных технологических режимов силового привода подвижного состава по критерию минимума электропотребления. Дис... докт. техн. наук: 05.09.03 / Бакиров Альберт Робертович. -Казань, 2007. -399 с.
- 3 Осипов, С.И. Рациональные режимы вождения поездов и испытания локомотивов / С.И. Осипов, Е.В. Горчаков, И.П. Исаев, Л.Г. Козлов. -М.: Транспорт, 1984. -280 с.
- 4 Ефремов, И.С. Теория и расчет электрооборудования подвижного состава городского электрического транспорта / И.С. Ефремов, Г.В. Косарев. -М.: Высшая школа, 1976. -480 с.
- 5 Розенфельд, В.Е. Теория электрической тяги / В.Е. Розенфельд, И.П. Исаев, Н.Н. Сидоров. -М.: Транспорт, 1983. -328 с.
- 6 Деев, В.В. Тяга поездов / В.В. Деев, Г.А. Ильин, Г.С. Афонин. -М.: Транспорт, 1987. -264 с.
- 7 Исаев, И.П. Правила тяговых расчетов нуждаются в пересмотре / И.П. Исаев, А.Т. Головатый // -Локомотив. -1992. -№8. -С. 6-8.
- 8 Эйдуks, Я. Методики тяговых расчетов требуют уточнения / Я. Эйдуks // -Железнодорожник Латвии. -1993. -№50. -С. 8-9.

REFERENCES

- 1 S.N. Klevtsov, R.G. Idiyatullin, A.E. Aukhadееv. Energy saving technologies of urban electric transport [Energoberegayushchie tekhnologii gorodskogo elektricheskogo transporta]. Volgograd. Panorama Publ. 2007. 288 p.
- 2 A.R. Bakirov. Development of the theory and methods for calculating the optimal technological conditions of the rolling stock power drive according to the criterion of minimum power consumption [Razrabotka teorii i metodov rascheta optimal'nykh tekhnologicheskikh rezhimov silovogo privoda podvizhnogo sostava po kriteriyu minimuma elektropotrebleniya]. Kazan'. 2007. 399 p.
- 3 S.I. Osipov, E.V. Gorchakov, I.P. Isaev, L.G. Kozlov. Rational modes of driving trains and testing locomotives [Ratsional'nye rezhimy vozhdeniya poezdov i ispytaniya lokomotivov]. Moscow. Transport Publ. 1984. 280 p.
- 4 I.S. Efremov, G.V. Kosarev. Theory and calculation of electrical equipment of rolling stock of urban electric transport [Teoriya i raschet elektrooborudovaniya podvizhnogo sostava gorodskogo elektricheskogo transporta]. Moscow. Vysshaya shkola Publ. 1976. 480 p.
- 5 V.E. Rozenfel'd, I.P. Isaev, N.N. Sidorov. Electric traction theory [Teoriya elektricheskoy tyagi]. Moscow. Transport Publ. 1983. 328 p.
- 6 V.V. Deev, G.A. Il'in, G.S. Afonin. Traction of trains [Tyaga poezdov]. Moscow. Transport Publ. 1987. 264 p.
- 7 I.P. Isaev, A.T. Golovaty. Traction calculations rules are needed to be revised [Pravila tyagovykh raschetov nuzhdayutsya v peresmotre]. Lokomotiv. 1992. No. 8. pp. 6-8.
- 8 Ya. Eyduks. Methods of traction calculations require clarification [Metodiki tyagovykh raschetov trebuyut utochneniya]. Zheleznodorozhnik Latvii. 1993. No. 50. pp. 8-9.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

методы расчета рациональных режимов, тяговое электрооборудование, городской электрический транспорт, обзорно-аналитическое исследование

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Киснеева Ляйля Нургалеевна, старший преподаватель КГЭУ
Аухадеев Авер Эрикович, канд. техн. наук, доцент КГЭУ
Хайруллин Альберт Гадильевич, старший преподаватель КГЭУ
Рашитова Рузанна Айдаровна, магистрант КГЭУ
420066, г.Казань, ул.Красносельская, 51, КГЭУ

ПОЧТОВЫЙ АДРЕС:

420066, г.Казань, ул.Красносельская, 51, КГЭУ

СОГЛАСОВАНИЕ ЭКСПЕРТНЫХ ОЦЕНОК В ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ СРЕДНЕАРИФМЕТИЧЕСКИХ И МЕДИАННЫХ ОЦЕНОК ПО КЕМЕНИ

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»

В.З. Манусов, Д.С. Ахьёев, У. Бумцэнд

ALIGNMENT OF SCIENTIFIC ASSESSMENT IN TECHNICAL DIAGNOSTICS OF ELECTRICAL EQUIPMENT USING ARITHMETIC MEAN AND KEMENY-YOUNG METHOD

Novosibirsk State Technical University (NSTU) 20, Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630092, Russia

Vadim Z. Manusov (Holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Prof. of NSTU)

Dzhavod S. Ahyoev (Graduate student of NSTU)

Uyangasaikhan Bumtsend (Graduate student of NSTU)

ABSTRACT: The article presents comparative analysis of the arithmetic mean and median relation methods for the alignment of scientific assessment.

Keywords: electrical equipment, technical diagnostics, scientific assessments, degree of consistency

Приведен сравнительный анализ среднеарифметических и медианных оценок согласованности мнений экспертов по медиане Кемени.

Специфика задачи определяется, главным образом, видом полученных оценок, причинно-следственных связей между контролируемыми параметрами оборудования и ее дефектами [1, 2]. В работе особое внимание уделено степени согласованности экспертных оценок, которые определяют качество экспертного заключения о техническом состоянии исследуемого электрооборудования [3].

Оценка согласованности экспертных мнений на основе среднего квадратического отклонения. Если число экспертов в группе равно $i = 1, 2, \dots, n$, а число оцениваемых факторов – $j = 1, 2, \dots, m$, то можно рассчитать оценку их согласованности по следующему алгоритму.

Расчет математического ожидания оценки j -го фактора

$$M(x_j) = \frac{\sum_{i=1}^n x_{ij}}{n},$$

где x_{ij} – оценка i -го эксперта по j -ому фактору;

n – количество экспертов.

Дисперсия оценки j -го фактора

$$D(x_j) = \frac{\sum_{i=1}^n [x_{ij} - M(x_j)]^2}{n-1}.$$

Среднеквадратическое отклонение оценки j -го фактора

$$\sigma(x_j) = \sqrt{D(x_j)}.$$

Коэффициент согласованности

$$\mu_j = 1 - \frac{\sigma(x_j)}{M(x_j)}.$$

Если среднее квадратическое отклонение $\sigma(x_j)$ равно или превышает значение математического ожидания (среднего арифметического), то $\mu_j \leq 0$. Так как отрицательное значение коэффициента согласованности не имеет никакого здравого смысла, то при анализе считается, что он равен 0, то есть отсутствует согласованность экспертов в группе по данному фактору. Значение $\mu_j = 0,7-0,9$, говорит о высокой согласованности экспертов и отсутствии сговора между ними [4-5].

В качестве исходной информации приняты экспертные оценки, выраженные в виде нечётких причинно-следственных отношений (таблица 1), выражающие субъективную вероятность возникновения дефекта в электрооборудовании при отклонении от нормы контроли-

руемых параметров.

Ниже приведены признаки и параметры дефектов, где X_i – это признаки, Y_i – контролируемые параметры:

- Y_1 – выгорание витковой изоляции и витков обмотки трансформатора;
- Y_2 – деформации в обмотках;
- Y_3 – увлажнение и загрязнение изоляции обмоток;
- Y_4 – износ изоляции обмоток;
- X_1 – длительное неотключение сквозного тока КЗ на обмотках низшего напряжения трансформатора;
- X_2 – недостаточная электродинамическая стойкость обмоток к токам КЗ;
- X_3 – нарушение герметичности трансформатора;
- X_4 – снижение механической прочности изоляции.

Всего выбрано семь экспертов, а значит, и совокупностей мнений взято семь. Для упрощения анализа будем изолированно рассматривать возможности возникновения различных дефектов

В таблицах 2 и 3 приведены экспертные оценки семи экспертов для четырех причин и их согласованность по первому параметру.

Результаты расчетов приведены в таблице 3.

Аналогичным образом определена согласованность экспертных мнений и для всех четырех причин.

Анализируя значения коэффициентов согласованности, приведенных в таблице 3, можно сделать вывод, что коэффициенты согласованности по причинам 2 и 3 не соответствуют рекомендуемому уровню согласованности. Это означает, что необходимо провести процедуру сближения оценок – метод Дельфи [4].

Далее выполнены процедуры сближения экспертных оценок; для некоторых параметров после двух, а для некоторых – после 3 процедур, получены новые коэффициенты согласованности мнений экспертов, которые приведены ниже в таблицах 4 и 5 по первому параметру.

Результаты расчетов приведены в таблице 5.

Аналогичным образом определены оценки экспертов для второго, третьего и четвертого параметров.

Анализируя результаты обработки новых экспертных оценок, можно заключить, что они

Таблица 1 – Принадлежности причин и повреждений обмотки трансформатора

		Причины			
		X_1	X_2	X_3	X_4
Повреждения	Y_1	0,9	0,6	0,6	0,9
	Y_2	0,5	0,8	0,6	0,6
	Y_3	0,5	0,3	0,4	0,6
	Y_4	0,4	0,8	0,4	0,7

Таблица 2 – Оценки экспертов по первому параметру

	X_1	X_2	X_3	X_4
Эксперт 1	1	0,9	0,8	0,5
Эксперт 2	0,7	0,5	0,4	0,7
Эксперт 3	0,5	0,5	0,3	0,6
Эксперт 4	1	0,4	0,4	0,6
Эксперт 5	0,6	0,5	0,4	0,6
Эксперт 6	0,5	0,3	0,3	0,6
Эксперт 7	0,7	0,4	0,3	1

Таблица 3 – Согласованность мнений экспертов по первому параметру

Причины	$M(x_j)$	$D(x_j)$	$\sigma(x_j)$	μ_j
1	0,71	0,045	0,21	0,70
2	0,50	0,037	0,19	0,62
3	0,41	0,031	0,18	0,57
4	0,66	0,026	0,16	0,75

Таблица 4 – Оценки экспертов по первому параметру

	X_1	X_2	X_3	X_4
Эксперт 1	0,8	0,5	0,6	0,9
Эксперт 2	0,8	0,7	0,5	0,8
Эксперт 3	0,9	0,5	0,6	1
Эксперт 4	1	0,6	0,7	0,7
Эксперт 5	1	0,6	0,5	0,7
Эксперт 6	0,8	0,7	0,6	0,9
Эксперт 7	0,9	0,6	0,6	1

Таблица 5 – Согласованность мнений экспертов по первому параметру

Причины	$M(x_j)$	$D(x_j)$	$\sigma(x_j)$	μ_j
1	0,88	0,008	0,09	0,89
2	0,6	0,006	0,08	0,86
3	0,58	0,004	0,06	0,88
4	0,85	0,016	0,12	0,85

в хорошей степени согласованы, так как находятся в интервале 0,7-0,9 [4, 5].

Согласование экспертных оценок по медиане Кемени. Применение медианы Кемени базируется на вводе метрики в пространство мнений экспертов и аксиоматическом введении расстояния между элементами множества мнений экспертов, причём важно, каким именно множеством представлены мнения, так как от этого зависит трудоёмкость задачи.

Каждая матрица парных сравнений представляется элементом множества P -множества экспертных мнений [6]. Либо, если вводить метрику и поместить элементы множества P в пространство, то элементы будут представляться точками этого пространства, что схематично (на примере 5 экспертов) можно видеть на рисунке 1.

ругими словами, каждая матрица парных сравнений – есть точка в пространстве экспертных мнений [6]. Далее аксиоматически вводится расстояние между двумя точками этого пространства, как сумма модулей разности всех элементов матриц, стоящих на эквивалентных позициях (1)

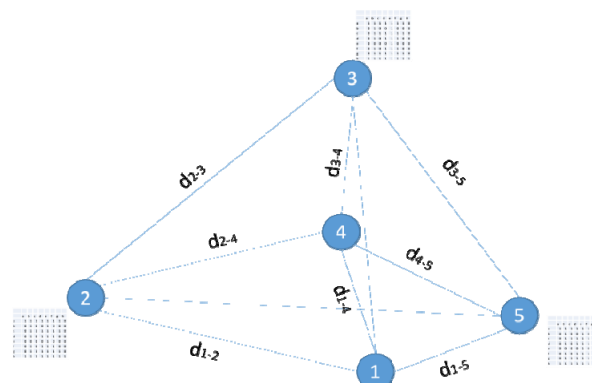


Рисунок 1 – Пространство экспертных мнений

$$d(P_i, P_j) = \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n |p_{i,kl} - p_{j,kl}|, \quad (1)$$

где $p_{k,l}$ – элемент матрицы парных сравнений;

d – расстояние Кемени.

Тогда можно определить медиану Кемени как некоторый элемент множества P , наименее удалённый от всех остальных элементов, что математически можно трактовать как минимальную сумму расстояний от фиксированного элемента множества P до всех остальных элементов данного множества

$$M^*(P_1, \dots, P_m) = \underset{P}{\operatorname{argmin}} \sum_{i=1}^m d(P, P_i). \quad (2)$$

Представив полученные расстояния в виде таблицы, по выражению (2) отыщем медиану Кемени.

Результаты расчетов медианы Кемени для каждого контролируемого параметра приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Медиана Кемени между мнением отдельного эксперта по отношению к другим

Эксперта	1	2	3	4	5	6	7
Сумма расстояний по первому параметру	2,3	2,7	2,5	3,1	2,9	2,3	2,2
Сумма расстояний по второму параметру	1,8	3,4	2	3,6	2,3	1,8	2,3
Сумма расстояний по третьему параметру	2,7	2,2	2,3	2,1	2,9	2,0	1,8
Сумма расстояний по четвертому параметру	2,2	2,2	2,4	1,7	1,9	1,8	2,2

По первому признаку медианой оказалось мнение эксперта под №7. Добавим совокупность оценок данного эксперта в таблицу 7.

По второму признаку медианой оказались мнения экспертов под №1 и №6.

По третьему признаку медианой оказалось мнение эксперта под №7.

По четвертому признаку медианой оказалось мнение эксперта под №4.

Таблица 7 – Средние и медианные экспертные оценки по первого параметру

Y_1	X_1	X_2	X_3	X_4
Среднее арифметическое, $M(x_j)$	0,89	0,6	0,59	0,86
Медиана	0,9	0,6	0,6	0,8
Медиана Кемени: мнение эксперта №7	0,9	0,6	0,6	1

Анализируя полученные результаты (таблицы 6 и 7), вполне ожидаемо, что оценки эксперта, мнение которого является медианой Кемени, иногда значительно отличается от средних арифметических и медианных оценок. Это позволяет сделать вывод о том, что высокая степень согласованности является необходимым условием для целесообразности применения медианы Кемени и других непараметрических алгебраических методов [7].

Оценка согласованности экспертных мнений осуществляется по следующей формуле

$$(ИН) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\sum_{k=1}^m |C_{ik} - C_{kk}|}{m}; (ОС) = 1 - (ИН),$$

где (ИН) – индекс несогласованности;

(ОС) – отношение согласованности;

n – количество экспертов;

m – количество признаков;

i – текущий номер эксперта;

k – текущий номер признака.

Согласованными считаются оценки в диапазоне $0,9 \leq (ОС) < 1$. Не согласованными считаются оценки в пределах $0,5 \leq (ОС) < 0,9$.

При этом по Кемени определяется согласованность всей экспертизе.

Согласованность экспертных мнений является ключевым фактором для адекватности трактовки результата экспертизы. Доказано, что высокая степень согласованности мнений в группе экспертов позволяет вполне обосновано полагаться на оценки экспертов в технической диагностике электросетевого оборудования. При этом медиана Кемени позволяет определить мнение эксперта, интегрировано отражающее мнение всей экспертной группы. В этом случае мнения экспертов «диссидентов» будут отброшены, как ошибочные или некомпетентные. В работе предложено выполнять согласование оценок группы экспертов на основе медианы Кемени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1 Ахьеев, Дж. С. Диагностирование трансформаторного электрооборудования на основе экспертных моделей с нечеткой логикой / Д.С. Ахьеев, В.З. Манусов // -Электро: Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. -2015. -№5. -С. 45-48.

2 Ahyoev, J.S. Diagnosing Of The Current Technical Condition Of Electric Equipment On The Basis Of Expert Models With Fuzzy Logic/ S.A. Dmitriev, V.Z. Manusov, J.S. Ahyoev // 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON) : proceedings, Riga & Cesis, Latvia, 13-14 October, 2016. -Riga & Cesis, Latvia, 2016. -P. 243-246.

3 Манусов, В.З. Согласование экспертных оценок при диагностике текущего технического состояния высоковольтного электрооборудования / В.З. Манусов, Д.О. Крюков, Д.С. Ахьеев // -Докл. АН высшей школы РФ. -2017. -№1(34). -С. 72-84.

4 Секретарев, Ю.А. Получение и использование эвристической информации при принятии решений / Ю.А. Секретарев. -Новосибирск : Изд-во Новосиб. гос. техн. унив., 2002. -36 с.

5 Бешелев, С.Д. Математико-статистические методы экспертных оценок / С.Д. Бешелев, Ф.Г. Гурвич. -Москва: Статистика, 1980. -263 с.

6 Кемени, Дж. Кибернетическое моделирование: некоторые приложения / Дж. Кемени, Дж. Снелл. -Москва: Советское радио, 1972. -192 с.

7 Манусов, В.З. Согласование экспертных оценок в задаче текущей технической диагностики трансформаторного оборудования / В.З. Манусов, Д.О. Крюков, Дж.С. Ахьеев // Современная техника и технологии: проблемы, состояние и перспективы: материалы VI всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием 24-25 ноября 2016 г., посвящ. 70-летию Рубц. индустр. ин-та. -Рубцовск, 2016. -С. 267-275.

1 D.S. Akh'eev, V.Z. Manusov. Diagnosing transformer electrical equipment based on expert models with fuzzy logic [Diagnostirovanie transformatornogo elektrooborudovaniya na osnove ekspertnykh modeley s nechetkoy logikoy]. *Elektro: Elektrotehnika, elektro-energetika, elek-trotekhnicheskaya promyshlennost'*. 2015. No. 5. pp. 45-48.

2 S.A. Dmitriev, V.Z. Manusov, J.S. Ahyoev. Diagnosing Of The Current Technical Condition Of Electric Equipment On The Basis Of Expert Models With Fuzzy Logic. *57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON): proceedings*, Riga & Cesis, Latvia, 13-14 October, 2016. pp. 243-246.

3 V.Z. Manusov, D.O. Kryukov, D.S. Akh'eev. Coordination of expert estimates in the diagnosis of the current technical condition of high-voltage electrical equipment [Soglasovanie ekspertnykh otsenok pri diagnostike tekushchego tekhnicheskogo sostoyaniya vysokovol'tnogo elektrooborudovaniya]. *Doklad AN vysshey shkoly RF*. 2017. No. 1(34). pp. 72-84.

4 Yu.A. Sekretarev. Obtaining and using heuristic information in making decisions [Poluchenie i ispol'zovanie evristicheskoy informatsii pri prinyatii resheniy]. Novosibirsk. Novosibirsk St. Techn. Univ. Publ. 2002. 36 p.

5 S.D. Beshelev, F.G. Gurvich. Mathematical and statistical methods of expert assessments [Matematiko-statisticheskie metody ekspertnykh otsenok]. Moskva. Statistika Publ. 1980. 263 p.

6 J. Kemeni, J. Snell. Cybernetic modeling: some applications [Kiberneticheskoe modelirovanie: nekotorye prilozheniya]. Moscow. Sovetskoe radio Publ. 1972. 192 p.

7 V.Z. Manusov, D.O. Kryukov, Dzh.S. Akh'eev. Coordination of expert assessments in the task of current technical diagnostics of transformer equipment [Soglasovanie ekspertnykh otsenok v zadache tekushchey tekhnicheskoy diagnostiki transformatornogo oborudovaniya]. *Modern technic and technology: problems, status, and prospects [Sovremennaya tekhnika i tekhnologii: problemy, sostoyanie i perspektivy]*. Rubtsovsk. Rubtsovsk Ind. Inst. Publ. 2016. pp. 267-275.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: электрооборудование, техническая диагностика, экспертные оценки, степень согласованности, медиана Кемени

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ: Манусов Вадим Зиновьевич, докт. техн. наук, профессор НГТУ
Ахьеев Джавод Саламшоевич, аспирант НГТУ
Бумцэнд Уянгасаихан, аспирант НГТУ

ПОЧТОВЫЙ АДРЕС: 630092, г.Новосибирск, пр.К.Маркса, 20, НГТУ

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ ПОСЛЕ ПРИСОЕДИНЕНИЯ ТЯГОВЫХ НАГРУЗОК

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»

В.З. Манусов, У. Бумцэнд

STUDY OF ELECTRICAL SUPPLY GRID VOLTAGE UNBALANCE WITH CONNECTED TRACTION LOADS

Novosibirsk State Technical University (NSTU) 20, Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630092, Russia

Vadim Z. Manusov (Holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Prof. of NSTU)

Uyangasaikhan Bumtsend (Graduate student of NSTU)

ABSTRACT: It is recognized currently that unbalanced modes of operation of HV power grids occur quite often and have a negative impact on electrical consumers and technical and economic indicators of power systems. This negative effect is that current unbalance decreases the capacity of the three-phase network grids, decreases performance of synchronous generators and transformers as well. On top of that it increases the loss of active power plus reduces efficiency of control devices. Voltage unbalance also causes false operation of some types of relay protection.

Keywords: *traction loads, unbalanced modes, unbalance factor, stray load active power losses*

В настоящее время признано, что несимметричные режимы работы электрических сетей высокого напряжения возникают достаточно часто и оказывают негативное влияние на электропотребителей и технико-экономические показатели электроэнергетических систем. Это негативное влияние состоит в том, что при несимметрии токов уменьшается пропускная способность питающих трехфазных сетей, снижаются технико-экономические показатели синхронных генераторов и трансформаторов, увеличиваются потери активной мощности и электроэнергии, снижается эффективность использования регулирующих устройств, также приводит к ложной работе некоторых видов релейной защиты.

Основными причинами возникновения несимметричных режимов работы электросетей высоких напряжений являются: наличие крупных несимметричных нагрузок, различие параметров фаз у отдельных элементов сети (к несимметричным линиям следует отнести абсолютное большинство реальных линий электропередачи) и неполнофазная работа отдельных устройств. В общем случае все эти причины могут существовать одновременно. Поэтому рабочие режимы электросети всегда несимметричны.

Тяговые нагрузки по существу являются двухфазными, так как контактные провода расходятся в двух противоположных направлениях и могут быть присоединены только в двух фазах; третья получается соединенной с рельсами, то есть заземленной (со стороны пониженного до 27 кВ напряжения). Неэкономичность несимметричных режимов может быть обусловлена дополнительными потерями энергии, за счет экономии которых могут быть оправданы соответствующие симметрирующие устройства или увеличение их мощности.

Перечисленные факторы показывают, что несимметричные режимы должны рассчитываться и анализироваться. Требуется проверка технической допустимости того или иного режима и его экономической целесообразности. В случае технической неприемлемости какого-либо режима должно приниматься решение, связанное с исключением его, или с применением соответствующих мероприятий, в частности симметрирующих устройств.

На основании научной литературы можно полагать, что для синхронных генераторов допустимый коэффициент несимметрии по обратной последовательности составляет 1%, для асинхронных двигателей 2%. Однако зарубежные исследования показывают, что для асинхронной машины коэффициент несимметрии уже при величине 1,2% начинает оказывать весьма вредное влияние на режимы работы асинхронного двигателя. В связи с этим международная электротехническая комиссия (МЭК) определяет допустимое значение коэффициента несимметрии в сетях высокого напряжения 1,4%, а в сетях сверхвысокого напряжения 1,2%.

Расчет несимметричного режима можно выполнять как в фазных координатах, так и в координатах симметричных составляющих. Применение метода фазных координат целесообразно в первую очередь при необходимости учета пофазных различий в параметрах линий и параметрах нагрузки (например, при отказе от транспозиции [1]). Традиционно применяемые методы анализа режимов работы электрических систем, базирующиеся на однолинейном представлении трехфазных цепей, не применимы в данном случае.

По приведенным причинам проблемы полного моделирования таких сетей, разработки

методов эквивалентирования и методики расчета в целом в фазных координатах при анализе таких сетей являются актуальными [2].

Математические модели несимметричных режимов электрических сетей с распределенными параметрами

Для анализа установившихся режимов сетей, питающих тяговую нагрузку, необходимы математические модели соответствующих элементов сети относительно фазных переменных. Проведенный обзор опубликованных материалов по рассматриваемой тематике показал, что наиболее приемлемой математической моделью является математическая модель в виде телеграфных уравнений линий электропередачи.

Уравнения трехфазной симметричной линии имеют вид

$$\left. \begin{aligned} -\frac{\partial u}{\partial x} &= L \frac{\partial i}{\partial t} + Ri \\ -\frac{\partial i}{\partial x} &= C \frac{\partial u}{\partial t} + Gu \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где L, C, R, G – квадратные матрицы третьего порядка:

L – матрица, элементами которой являются собственные и взаимные индуктивности проводов линии;

C – матрица, элементами которой являются собственные и взаимные емкостные коэффициенты;

R, G – матрицы сопротивлений и проводимостей;

u, i – матрицы-столбцы напряжений и токов.

Применяя уравнения (1) для установившегося режима и вводя комплексные напряжения, токи, сопротивления и проводимости, уравнения линии можно представить в виде

$$\left. \begin{aligned} -\frac{dU}{dx} &= (R_0 + j\omega L_0)I = Z_0 I \\ -\frac{dI}{dx} &= (G_0 + j\omega C_0)U = Y_0 U \end{aligned} \right\}; \quad (2)$$

$$Z_0 = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix}; \quad Y_0 = \begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} & Y_{ac} \\ Y_{ba} & Y_{bb} & Y_{bc} \\ Y_{ca} & Y_{cb} & Y_{cc} \end{bmatrix},$$

где Z_0, Y_0 – это комплексное сопротивление и комплексная проводимость линии единичной длины.

Путем несложных преобразований можно получить

$$\left. \begin{aligned} -\frac{d^2 U}{dx^2} &= Z_0 Y_0 U \\ -\frac{d^2 I}{dx^2} &= Y_0 Z_0 I \end{aligned} \right\}. \quad (3)$$

Для несимметричной линии, состоящей из m проводов, данные уравнения получаем после решения уравнений (3), в виде матриц-столбцов следующим образом

$$\left. \begin{aligned} U &= e^{-\gamma_u x} A + e^{\gamma_u x} B \\ I &= e^{-\gamma_i x} C + e^{\gamma_i x} D \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

где $e^{\gamma x}$ – матричная экспонента;

A, B, C, D – постоянные векторы-столбцы размерностью $m \times 1$, вычисляемые из граничных условий.

Из (3) следует, что

$$\left. \begin{aligned} \gamma_u &= \sqrt{Z_0 Y_0} \\ \gamma_i &= \sqrt{Y_0 Z_0} \end{aligned} \right\}. \quad (5)$$

В случае симметричной трехфазной линии $\gamma_u = \gamma_i = \gamma$ в силу симметричности матриц Z_0 и Y_0 . γ_u и γ_i – комплексные квадратные матрицы размерностью $m \times m$, представляющие собой соответствующие функции от матриц собственных и взаимных погонных сопротивлений и проводимостей проводов. Используя (2), можно получить связь матриц A, B, C, D с

ELECTRIC POWER INDUSTRY

Таблица 2 – Суммарные дополнительные потери в сети при несимметричном режиме

Параметры сети	При неравенстве нагрузок в двух плечах тяговой ПС									
	Трехфазный трансформатор					Трансформатор Скотта				
	0%	10%	20%	30%	%	0%	10%	20%	30%	%
ΔP_d , МВт	1,068	1,132	1,240	1,398	6,77	0	0,186	0,290	0,466	2,25
$\Sigma \Delta P_{сети}$, МВт	21,728	21,792	21,900	22,058		20,660	20,806	20,953	21,126	

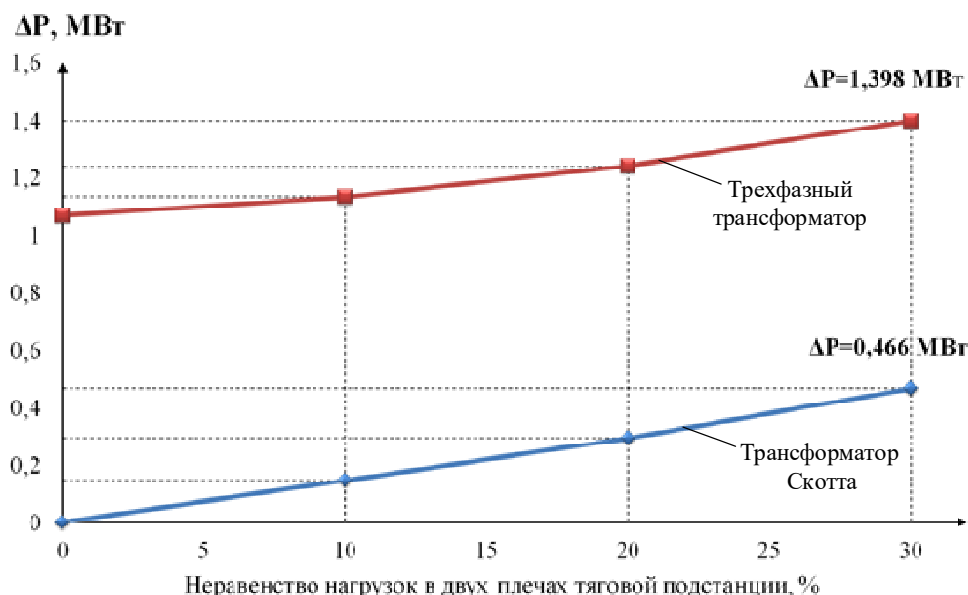


Рисунок 2 – Увеличение потерь активной мощности от несимметрии при использовании трехфазного трансформатора и трансформатора Скотта

Заключение:

– Проведен анализ причин возникновения несимметричных режимов в электрических сетях ЭЭС и их влияния на другие элементы ЭЭС с учетом присоединения электропотребителей с числом фаз не кратным трем.

– Предложен метод расчета несимметричных режимов сложносамкнутой сети с возможностью одновременного моделирования несимметричной нагрузки. Показано, что метод вполне подходит для последовательно присоединенных тяговых нагрузок.

– Выполненное моделирование трансформатора Скотта и трехфазного трансформатора при неравенствах нагрузок двух плеч показало, что трансформатор Скотта обладает значительно лучшей симметрирующей способностью. Показано, что при трехфазном трансформаторе в точке присоединения четырех тяговых подстанций, рост дополнительных потерь от несимметрии в трехфазной сети возрастают на 1,398 МВт, то есть на 6,77%. При тех же условиях расчета режима, но при питании тяговых нагрузок через трансформатор Скотта, дополнительные потери возрастают на 0,466 МВт, до 2,25%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Мельников, А.Н. Проектирование электрической части воздушных линий электропередачи 330-500 кВ / А.Н. Мельников, С.С. Рокотян, А.Н. Шеренцис. Под общей ред. С.С. Рокотяна. -М.: Энергия, 1974. -472 с.
- 2 Закарякин, В.П. Моделирование режимов систем электроснабжения железных дорог / В.П. Закарякин, А.В. Крюков. -Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та путей сообщения, 2014. -164 с.
- 3 Бумцэнд, У. Оптимальные режимы Монгольской энергосистемы при электрификации железнодорожного коридора Азия-Европа / В.З. Манусов, У.Бумцэнд // - Научн. пробл. трансп. Сиб. и Дальн. Вост. -2018. -№1. -С. 170-174.
- 4 Bumtsend, U. Optimization compensating devices in the power supply systems using population algorithms / V.Z. Manusov, U. Bumtsend, E.S. Tretyakova // Proceedings of IFOST-2016 11th International Forum on Strategic Technol-

REFERENCES

- 1 A.N. Mel'nikov, S.S. Rokotyan, A.N. Sherentsis. Design of electrical part of 330-500 kV overhead power lines [Proektirovanie elektricheskoy chasti vozdushnykh liniy elektroperedachi 330-500 kV]. Moscow. Energiya Publ. 1974. 472 p.
- 2 V.P. Zakaryukin, A.V. Kryukov. Modeling of modes of railways power supply systems [Modelirovanie rezhimov sistem elektrosnabzheniya zheleznynykh dorog]. Irkutsk. Irkutsk St. Trans. Univ. Publ. 2014. 164 p.
- 3 V.Z. Manusov, U. Bumtsend. Optimal Modes of the Mongolian Energy System during the Electrification of the Asia-Europe Railway Corridor [Optimal'nye rezhimy Mongol'skoy energosistemy pri elektrifikatsii zheleznodorozhnogo koridora Aziiya-Evropa]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*. 2018. No. 1. pp. 170-174.
- 4 V.Z. Manusov, U. Bumtsend, E.S. Tretyakova. Optimization compensating devices in the power supply systems using population algorithms. *Proceedings of IFOST-2016 11th International Forum on Strategic Technology*. 2016. pp. 276-279.

ogy. 2016. pp. 276-279.

5 Бумцэнд, У. Эффективность электрификации акционерного общества «Улан-Баторская железная дорога» / У. Бумцэнд, В.З. Манусов // -Наука. технологии. инновации: сб. научн. тр. -Новосибирск: Изд-во Новосиб. гос. техн. унив., 2016. -С. 3-5.

6 Глазунов, А.А. Электрические сети и системы / А.А. Глазунов, А.А. Глазунов. -Москва: Госэнергоиздат, 1960. -368 с.

5 U. Bumtsend, V.Z. Manusov. Efficiency of electrification of the joint-stock company "Ulan-Bator railway" [Effektivnost' elektrifikatsii aktsionernogo obshchestva Ulan-Batorskaya zheleznaya doroga]. *Science, technology, innovations: digest of the scientific papers [Nauka. tekhnologii. innovatsii]*. Novosibirsk. Novosibirsk St. Techn. Univ. Publ. 2016. pp. 3-5.

6 A.A. Glazunov, A.A. Glazunov. Electrical networks and systems [Elektricheskie seti i sistemy]. Moscow. Gosenergoizdat Publ. 1960. 368 p.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *тяговые нагрузки, несимметричные режимы, коэффициент несимметрии, дополнительные потери активной мощности*

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ: *Манусов Вадим Зиновьевич, докт. техн. наук, профессор НГТУ*

Бумцэнд Уянгасаухан, аспирант НГТУ

ПОЧТОВЫЙ АДРЕС: *630092, г.Новосибирск, пр.К.Маркса, 20, НГТУ*

ДИАГНОСТИКА ТЕКУЩЕГО ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА С ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМИ СВЕРХПРОВОДЯЩИМИ ОБМОТКАМИ (ВТСП) МЕТОДОМ АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»

В.З. Манусов, Д.В. Орлов, Н.З. Месхишвили

DIAGNOSTICS OF HTS TRANSFORMER USING ANALYTIC HIERARCHY PROCESS METHOD

Novosibirsk State Technical University (NSTU) 20, Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630092, Russia

Vadim Z. Manusov (Holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Prof. of NSTU)

Dmitriy V. Orlov (Graduate student of NSTU)

Nika Z. Meskhishvili (Master's Degree of NSTU)

ABSTRACT: The article presents a new method of scientific assessment of transformers arranged in substations of the electric grid using the analytic hierarchy process method and fuzzy logic. The authors proved that using pairwise comparisons of scientific assessment, one can obtain a plausible prediction of the electrical equipment malfunctions and failures. The proposed method is essential and most appropriate for non-oil-filled equipment, since it does not use labor-intensive chromatographic analysis of dissolved gases in oil (DGA). The paper focuses on the diagnosis of current technical state of transformers with high-temperature superconducting winding (HTS), which use liquid nitrogen as the insulating medium. The reliability of presented method is proved by calculations, which demonstrated valid operation of the model related to HTS and oil transformers.

Keywords: *technical diagnostics, current technical state of equipment, HTS transformers, analytic hierarchy process method*

Представлен новый метод экспертной диагностики текущего технического состояния трансформаторного электрооборудования подстанций электросетевого комплекса энергетических систем с помощью метода анализа иерархий и нечеткой логики. Доказано, что на основе некоторых симптомов путем попарных сравнений оценок экспертов можно получить правдоподобное предсказание о причинах неисправностей и отказов электрооборудования. Предлагаемый метод необходим и наиболее целесообразен для немаслонаполненного оборудования, так как не использует трудоемкий хроматографический анализ (ХАРГ) растворенных газов в масле. В работе сделан упор на диагностику текущего технического состояния (ТТС) трансформаторов с высокотемпературной сверхпроводящей обмоткой (ВТСП-трансформаторы), в которых в качестве изоляционной среды используется жидкий азот. Достоверность результатов представленной методики подтверждается расчетами, на основе которых продемонстрировано адекватное поведение модели применительно к ВТСП и масляным трансформаторам.

Передача электроэнергии от источника до центра потребления состоит из несколько этапов: трансформация величины напряжения электроэнергии, генерируемой источником электроэнергии, до уровня, удовлетворяющего критериям экономической целесообразности, передача электрической энергии к центрам потребления, преобразование напряжения до уровня рабочего напряжения электроприемников. Распределение электрической энергии по электрическим станциям энергосистемы и к центрам электропотребления осуществляется, как правило, с помощью воздушных (ВЛ) и кабельно-воздушных (КВЛ) линий электропередачи.

Диагностика неисправностей трансформаторного оборудования является многоступенчатой задачей с разветвленной структурой. Наряду с этим необходимо диагностировать, также, коммутационную аппаратуру, связанную с этим оборудованием: выключатели, разъединители, короткозамыкатели и другие.

Термин «трансформаторное оборудование» подразумевает как маслonaполненные, так и криогенные трансформаторы, где в качестве диэлектрической среды выбран жидкий азот, а также сухие трансформаторы.

Метод Анализа Иерархий (МАИ) – математический инструмент системного анализа при принятии решений, предложен Томасом Л.Саати [1]. МАИ не предписывает лицу, принимающему решение (ЛПР), какого-либо конкретного «правильного» решения, а позволяет ему в интерактивном режиме найти такой вариант (альтернативу), который наилучшим образом согласуется с его пониманием сути проблемы и требованиями к ее решению.

Таким образом, лицо, не имеющее достаточный опыт в диагностике электрооборудования, используя метод анализа иерархий, может поставить достаточно правдоподобный диагноз той или иной причины неисправности. Исследования, представленные в настоящей работе, открывают новое направление применения метода анализа иерархий Томаса Саати

Постановка задачи. Принятие решения – вид деятельности, включающий в себя процесс сбора, анализа информации об объекте и выбор наиболее оптимального варианта из имеющихся возможных. Принятие решений на основе экспертных оценок может быть произведено после осмотра электрооборудования и выявления признаков неисправности [2].

Введем термин «оценка текущего технического состояния», включающий в себя сбор данных с трансформаторного оборудования, находящегося в работе, и анализ их для получения определенного вывода о техническом состоянии оборудования. Такая диагностика осуществляется после осмотра электрооборудования и выявления признаков неисправности [3, 4].

Сравнение признаков по фундаментальной шкале Саати проводится в соответствии с девятью степенями предпочтения, где 1-примерное равенство (эквивалентность), 9-абсолютное превосходство. При сравнении элемента с самим собой имеем равную значимость (эквивалентность), в этом случае, на пересечении строки А со столбцом А в позиции (А, А) ставим 1. В связи с этим, главная диагональ матрицы должна состоять из единиц. Под главной диагональю помещаются величины обратные соответствующим элементам попарных сравнений, которые расположены выше главной диагонали. Вносим соответствующие обратные величины: 1, 1/3, ..., или 1/9.

Затем по методу анализа иерархий Томаса Саати для каждой матрицы попарных сравнений рассчитывается вектор-столбец приоритетов (ВСП), индекс согласованности (ИС) и отношение согласованности (ОС), которые являются основными показателями полученных результатов расчетов. Значение ОС, меньшее или равное 0,100, принято считать приемлемым [1].

Математическая модель для трансформаторов с высокотемпературной сверхпроводящей обмоткой

Примем следующую модель технической диагностики трансформаторов с высокотемпературными сверхпроводящими обмотками с использованием матрицы нечетких отношений, которая в свою очередь требует некоторых экспертных оценок. Эти лингвистические оценки представляются как некоторые точки функции принадлежности, отражающей субъективное восприятия повреждения экспертом на основе его опыта и знаний [5].

В качестве параметров, которые можно выделить для обобщенного анализа состояния ВТСП-трансформаторов, выделены наиболее распространенные и поэтапно построена иерархия от нижнего уровня к верхнему.

Пятый (нижний) уровень иерархии представляет собой ключевые признаки (симптомы) повреждений ВТСП-трансформаторов: *P1*-потеря свойства сверхпроводимости в диэлектрической среде жидкого азота; *P2*-изменение технических характеристик электрооборудования; *P3*-снижение надежности.

Четвертый уровень иерархии состоит из основных повреждений трансформаторов: *G1*-выгорание витковой изоляции обмоток трансформатора; *G2*-закипание азота; *G3*-износ изоляции обмоток; *G4*-пробой изоляции в обмотках.

Третий уровень иерархии включает в себя причины повреждений: *Y1*-низкий уровень азота; *Y2*-длительное неотключение сквозного тока КЗ; *Y3*-перенапряжение; *Y4*-нарушение работы охлаждающей установки; *Y5*-недостаточная электродинамическая стойкость обмоток трансформатора.

Второй уровень иерархии представляет собой основные причины, влияющие на ско-

рейший переход трансформатора в неработоспособное состояние: X1-несрабатывание релейной защиты; X2-нарушение герметичности корпуса; X3-отсутствие или несрабатывание нелинейного ограничителя перенапряжения (ОПН); X4-нарушение регламента эксплуатации.

Главная цель, которая является первым уровнем иерархии, представляет собой определение кратчайшего времени, в течение которого трансформатор может перейти в неработоспособное состояние.

Предложенная модель иерархии этапов технической диагностики текущего технического состояния ВТСП-трансформатора представлена следующим образом (рисунок).

Используя метод анализа иерархий [1] составлены таблицы попарных сравнений элементов каждого уровня иерархии, относительно более высокого уровня. Для каждой таблицы рассчитаны вектор-столбцы приоритетов (ВСП) и собственных значений матриц λ . Также, для всех матриц рассчитаны главные собственные значения $\lambda_{\max}$, индексы согласованности (ИС) и отношения согласованности (ОС).

Расчеты выполнены поэтапно для каждого уровня иерархии в обратном порядке, начиная от нижнего уровня к верхнему. Пример расчета для нижнего уровня иерархии в матричной форме представлены ниже (таблица 1-9).

Нижний (пятый) уровень иерархии

Видно, что наиболее вероятным признаком является изменение технических характеристик электрооборудования с приоритетностью 0,560. На втором месте – снижение надежности с приоритетом 0,364. На третьем – потеря свойства сверхпроводимости в диэлектрической среде жидкого азота с приоритетом 0,075. Отношение согласованности $ОС = 0,021$, что меньше установленного 0,1 и удовлетворяет условию согласованности метода анализа иерархий Саати. Индекс согласованности $ИС = 0,012$. Главное собственное значение $\lambda_{\max} = 3,025$. Далее эти же признаки сравниваются относительно следующего элемента более высокого уровня иерархии.

Видно, что потеря свойства сверхпроводимости в диэлектрической среде жидкого азота имеет приоритетность 0,696. На втором месте – изменение технических характеристик электрооборудования с приоритетом 0,225. На третьем – снижение надежности с приоритетом 0,079. $ОС = 0,083$, $ИС = 0,048$, $\lambda_{\max} = 3,097$.

Здесь наиболее вероятным признаком является изменение технических характеристик электрооборудования с приоритетностью 0,605. На втором месте – снижение надежности с приоритетом 0,291. На третьем – потеря свойства сверхпроводимости в диэлектрической среде жидкого азота с приоритетом 0,103.

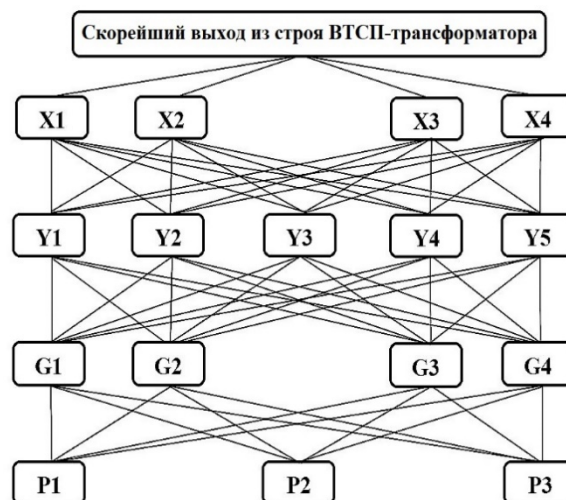


Рисунок 1 – Иерархическая модель причин и признаков неисправностей ВТСП-трансформаторов

Таблица 1 – Попарные сравнения признаков при выгорании витковой изоляции

	P1	P2	P3	ВСП
P1	1	1/7	1/5	0,075
P2	7	1	2	0,560
P3	5	1/2	1	0,364

Таблица 2 – Попарные сравнения признаков при закипании азота

	P1	P2	P3	ВСП
P1	1	5	7	0,696
P2	1/5	1	3	0,225
P3	1/7	1/3	1	0,079

Таблица 3 – Попарные сравнения признаков при износе изоляции обмоток

	P1	P2	P3	ВСП
P1	1	1/5	1/3	0,103
P2	5	1	3	0,605
P3	3	1/3	1	0,291

Таблица 4 – Попарные сравнения признаков при пробое изоляции в обмотках

	P1	P2	P3	ВСП
P1	1	3	5	0,641
P2	1/3	1	2	0,238
P3	1/5	1/2	1	0,121

$OC = 0,048$, $ИС = 0,028$, $\lambda_{\max} = 3,055$.

Потеря свойства сверхпроводимости в диэлектрической среде жидкого азота имеет приоритет 0,641. На втором месте – изменение технических характеристик электрооборудования с приоритетом 0,238. На третьем – снижение надежности с приоритетом 0,121. $OC = 0,004$, $ИС = 0,002$, $\lambda_{\max} = 3,005$.

Подобным образом производится расчет попарных сравнений элементов каждого уровня иерархии относительно более высокого. Конечным этапом таких расчетов будет нахождение оценок попарных сравнений элементов второго уровня иерархии относительно первого.

Для достижения поставленной цели необходимо дать итоговую интегральную оценку взаимосвязи причин первичного уровня с заключительными приоритетными оценками о возможности перехода трансформатора в неработоспособное состояние. Это обусловлено тем, что трансформатор, как и другое оборудование, оставаясь в работоспособном состоянии.

Для решения поставленной задачи по методу анализа иерархий в настоящей работе предлагается перемножение вектор-столбцов приоритетов для всех уровней иерархий. Ниже представлены вектор-столбцы приоритетов для каждого из уровней иерархии.

Путем перемножения матриц вектор-столбцов приоритетов от низшего уровня к верхнему, найдем результирующий вектор-столбец влияния каждого из признаков на скорейший выход из строя ВТСП-трансформатора. Получим заключительный интегральный вектор-столбец влияния каждого из признаков на конечную цель.

Таким образом, признаком неисправности (дефекта), который с наибольшей вероятностью в кратчайшее время приведет ВТСП-трансформатор в неработоспособное состояние, является изменение технических характеристик электрооборудования с приоритетностью 0,421. Второе место занимает потеря свойства сверхпроводимости в диэлектрической среде жидкого азота с приоритетом 0,349. На третьем – снижение надежности, имеющее приоритет 0,229.

Заключение. Предложенный новый метод диагностики текущего технического состояния ВТСП-трансформаторов оборудования не использует метод хроматографического анализа масла, и поэтому также применим для любого электрооборудования. Данный метод свидетельствует о возможности итогового принятия решений на новом уровне иерархии для трех возможных исходов:

- исправное работоспособное состояние;
- неисправное работоспособное состояние (возможна дальнейшая эксплуатация оборудования с учащенным контролем параметров);
- вывод оборудования в ремонт или его замена.

Проведенные исследования для криогенных трансформаторов показывают, что предложенный метод эффективен особенно в случаях, когда хроматография анализов растворенных газов может быть нецелесообразна. При некоторых признаках неисправностей, а также нечеткой лингвистической оценки этих признаков экспертами можно сделать доста-

Таблица 5 – ВСП пятого уровня иерархии

	G1	G2	G3	G4
P1	0,075	0,696	0,103	0,641
P2	0,560	0,225	0,605	0,238
P3	0,364	0,079	0,291	0,121

Таблица 6 – ВСП четвертого уровня иерархии

	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5
G1	0,555	0,481	0,131	0,256	0,281
G1	0,220	0,241	0,046	0,611	0,058
G1	0,163	0,190	0,491	0,069	0,058
G1	0,063	0,089	0,332	0,064	0,603

Таблица 7 – ВСП третьего уровня иерархии

	X1	X2	X3	X4
Y1	0,039	0,544	0,038	0,171
Y1	0,348	0,101	0,115	0,035
Y1	0,192	0,124	0,387	0,296
Y1	0,116	0,181	0,190	0,431
Y1	0,305	0,050	0,269	0,066

Таблица 8 – ВСП второго уровня иерархии

	A
X1	0,060
X1	0,464
X1	0,172
X1	0,303

Таблица 9 – Интегральный вектор-столбец влияния каждого из признаков на конечную цель

P1	0,349
P2	0,421
P3	0,229

точно правдоподобные выводы о причинах тех или иных неисправностей и возможности дальнейшей эксплуатации трансформаторного электрооборудования.

Для маслонаполненного электрооборудования основным инструментом диагностического контроля является хроматографический анализ растворенных газов. Однако, этот метод не может оценить электродинамическую стойкость обмоток, снижение механической прочности обмоток и др., что может быть осуществлено с помощью предложенного метода. МАИ дополняет существующую диагностику по ХАРГ для маслонаполненного оборудования, а для криогенной диэлектрической среды представляет собой новый возможный метод.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России, номер проекта 8.6809.2017/8.9

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Saaty, Thomas L. The Analytic Hierarchy Process, Planning, Priority setting, Resource allocation / Thomas L. Saaty. University of Pittsburgh. 1988.
- 2 Manusov, V.Z. Diagnostics of Technical State of Modern Transformer Equipment Using the Analytic Hierarchy Process / V.Z. Manusov, D.V. Orlov, V.V. Frolova // IEEE 18th International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2nd Industrial and Commercial Power Systems Europe. -Palermo, Italy.
- 3 Manusov, V.Z. Fault Symptom Diagnostics for Coupling Capacitors using the Analytic Hierarchy Process / V.Z. Manusov, D.V. Orlov, D.S. Ahoyev // 19th International Conference of Young Specialists on Micro-Nanotechnologies and Electron Devices. - June 29 - July 3, 2018. -482-487 pp.
- 4 Manusov, V.Z. Diagnostics of Current Technical State of Transformer Equipment Using the Analytic Hierarchy Process / V.Z. Manusov, D.V. Orlov // International Conference on Industrial Engineering.
- 5 Манусов, В.З. Анализ технического состояния электрооборудования систем электроснабжения на основе нечетких признаков / В.З. Манусов, Дж.С. Ахьеев, Д.В. Орлов // - Электроэнергетика, электромеханика и электротехнологии. - 2017. -№3(89), -С. 109-123.

REFERENCES

- 1 Thomas L. Saaty, The Analytic Hierarchy Process, Planning, Priority setting, Resource allocation. 1988. University of Pittsburgh.
- 2 V.Z. Manusov, D.V. Orlov, V.V. Frolova, Diagnostics of Technical State of Modern Transformer Equipment Using the Analytic Hierarchy Process. *IEEE 18th International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2nd Industrial and Commercial Power Systems Europe*. Palermo, Italy.
- 3 V.Z. Manusov, D.V. Orlov, D.S. Ahoyev, Fault Symptom Diagnostics for Coupling Capacitors using the Analytic Hierarchy Process. *19th International Conference of Young Specialists on Micro-Nanotechnologies and Electron Devices*. June 29 - July 3, 2018. 482-487 pp.
- 4 V.Z. Manusov, D.V. Orlov, Diagnostics of Current Technical State of Transformer Equipment Using the Analytic Hierarchy Process. *International Conference on Industrial Engineering*.
- 5 V.Z. Manusov, D.S. Akh'eev, D.V. Orlov. Analysis of the electrical equipment technical condition of power supply systems based on fuzzy signs [Analiz tekhnicheskogo sostoyaniya elektrooborudovaniya sistem elektrosnabzheniya na osnove nechetkikh priznakov]. *Electric power engineering, Electromechanics and Electrical technologies [Elektroenergetika, elektromekhanika i elektrotehnologii]*. 2017. No. 3(89). pp. 109-123.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *техническая диагностика, текущее состояние оборудования, трансформаторы с высокотемпературной сверхпроводящей обмоткой, метод анализа иерархий*

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ: Манусов Вадим Зиновьевич, докт. техн. наук, профессор НГТУ
Орлов Дмитрий Викторович, аспирант НГТУ
Мехишвили Ника Зазаевич, магистрант НГТУ

ПОЧТОВЫЙ АДРЕС: 630092, г.Новосибирск, пр.К.Маркса, 20, НГТУ

АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»

З.С. Темлякова, М.Е. Вильбергер, П.В. Морозов, А.А. Темляков

ANALYSIS OF DESIGN AND ENGINEERING SOLUTIONS FOR INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF ASYNCHRONOUS MOTORS
Novosibirsk State Technical University (NSTU) 20, Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630092, Russia
Zoya S. Temlyakova (Holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Prof. of NSTU)
Mikhail E. Vilberger (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of NSTU)
Pavel V. Morozov (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of NSTU)
Anton A. Temlyakov (Student of NSTU)

ABSTRACT: The article considers engineering solutions to improve the energy efficiency of asynchronous motors. Authors investigated the engines of power range from 30 kW to 45 kW and proved the expediency of co-use of design methods and the substantiation of main dimensions ratio.

Keywords: *analysis, engineering solution, energy efficiency, asynchronous motors*

Рассмотрены технические решения повышения энергоэффективности асинхронных двигателей. Исследованы двигатели в диапазоне мощности от 30 кВт до 45 кВт. Показана целесообразность сочетания конструктивных приемов с одновременным обоснованием соотношения главных размеров.

Актуальность работы определяется приоритетным направлением энергетической стра-

тегии России, связанной с энергосбережением.

Цель работы заключается в разработке и анализе конструктивных подходов к определению главных размеров активного объема асинхронного двигателя на базе основного уравнения проектирования электрической машины [1].

Объектом исследования являются трехфазные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, являющиеся силовым элементом электропривода современных регулируемых электромеханических систем [2].

Алгоритм решения исследовательской задачи обоснования и поиска путей повышения энергоэффективности рассматриваемого класса двигателей на данной стадии состоит из трех последовательных этапов [3, 4].

Первый этап предусматривает работу с патентной и научно-технической литературой, формирование массива значений коэффициента мощности, коэффициента полезного действия асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором рассматриваемого класса, анализ закономерностей количественных изменений этих энергетических показателей для существующих модификаций асинхронных двигателей.

Второй этап содержит инновационную составляющую: обоснование методов повышения энергоэффективности за счет сочетания целесообразных конструктивно-технических решений на методологической основе понятия «длинная и короткая машина» [1, 3].

Третий этап предполагает:

- выработку рекомендаций к проектированию новых энергоэффективных модификаций асинхронных двигателей напряжением до 1000 В, в диапазоне мощности от 10 кВт до 100 кВт;

- модернизацию методики расчета за счет введения фрагментов, отражающих определенный набор новых конструктивно-технических решений;

- автоматизацию методики расчета в компьютерной среде.

Основополагающим этапом в разработке конструкции любой электрической машины является определение главных размеров.

Под главными размерами асинхронных двигателей принято понимать внутренний диаметр сердечника якоря и расчетную длину воздушного зазора.

От профессионального обоснования отношения этих конструктивных параметров зависят все технико-экономические показатели: размеры активного объема, масса электрической машины, энергетические показатели, себестоимость и другие.

На данном этапе решения исследовательской задачи в методику проектирования асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором введен блок, предусматривающий расчет ряда альтернативных вариантов, формирование которых осуществляется на основе понятия «длинная и короткая машина» и одиночных простых конструктивно-технических решений активного объема.

Определение зависимости $\eta = (D)$ проведено при условии $Dl_\delta = \text{Const}$. Коэффициентом, характеризующим соотношение длины воздушного зазора и внутреннего диаметра статора является λ , который определяется формулой

$$\lambda = \frac{l_\delta}{\tau}, \text{ о.е.},$$

где τ – полюсное деление, м

$$\tau = \frac{\pi D}{2p}.$$

Поиск конструктивно-технических решений направлен на обеспечение энергоэффективности асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, диапазон изменения коэффициента значительно расширен по отношению к двигателям нормального исполнения и составляет $\lambda \in (0,4; 1,6)$ о.е.

В качестве примера в таблице представлены некоторые результаты электромагнитного расчета, в частности значения электрических потерь в обмотке якоря и коэффициента полезного действия для пяти вариантов конструктивно-технических решений активного объема асинхронного двигателя мощностью 45 кВт.

Расширение диапазона значений коэффициента λ предопределяет введение в методику электромагнитного расчета определенный набор механических расчетов. Совершенно

очевидно, что при уменьшении наружного диаметра ротора и увеличении его длины снижается жёсткость вала, увеличивается значение прогиба вала, и, как следствие, значение статического эксцентриситета ротора, что, в свою очередь, может привести к соприкосновению поверхностей ротора и статора, ограничивающих область воздушного зазора.

Для оценки прогиба вала при различных конструктивно-технических решениях активного объема асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в программном комплексе Autodesk Inventor Professional построена 3D модель короткозамкнутого ротора исследуемого двигателя. Расчетная модель включает в себя насаженный на вал сердечник магнитопровода ротора с короткозамкнутой обмоткой. На валу установлены подшипники качения. Особенность 3D модели заключается в том, что она учитывает не только геометрическую форму и размерные соотношения элементов конструкции ротора, но и свойства материалов, используемых при изготовлении вала, сердечника магнитопровода и обмотки ротора с короткозамыкающими кольцами. На рисунке видны результаты расчетов, а именно значение прогиба вала. Он равен максимальному смещению ротора относительно собственной оси вращения.

Таблица – Зависимости $P_{эл.1}$, $\eta = (D)$ при условии

$$Dl_{\delta} = \text{Const}$$

D , м	0,214	0,237	0,261	0,284	0,308
l_{δ} , м	0,258	0,210	0,173	0,146	0,124
λ , о.е.	1,535	1,128	0,844	0,655	0,513
$P_{эл.1}$, Вт	1605,27	1706,87	1869,43	2031,99	2275,83
η , %	92,09	92,06	91,77	91,35	90,01

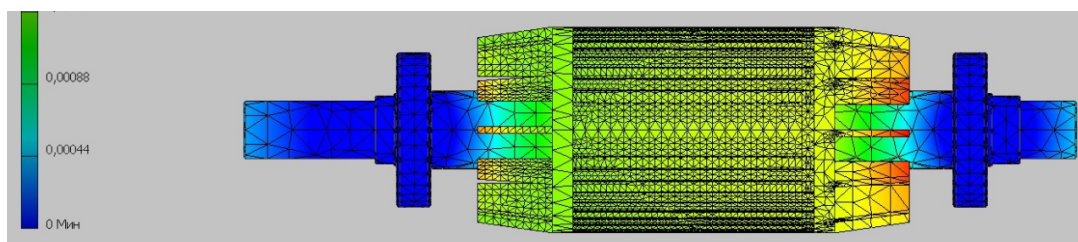


Рисунок – Ротор двигателя ($\lambda = 1,535$)

Для нормальных условий работы статический прогиб вала не должен превышать 10% от величины воздушного зазора. Из расчетов двигателя заданной мощности, посвященной видно, что данное условие соблюдается, значение прогиба вала допустимо [2-4].

В целом по работе, посвященной исследованию влияния конструктивно-технических решений на повышение энергоэффективности асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, сделаны следующие выводы.

- Анализ выполненных исследований показал, что одним из эффективных путей обеспечения энергоэффективности является оптимизация соотношения внутреннего диаметра статора и длины активного объема электрической машины.

- С увеличением номинальной мощности асинхронного двигателя и синхронной частоты вращения при прочих равных условиях возрастают коэффициент мощности и коэффициент полезного действия за счет специфической закономерности между соотношением главных размеров и повышением уровня электромагнитных нагрузок.

- При разработке новых модификаций низковольтных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором напряжением до 1000 В резервной зоной обеспечения энергоэффективности является оптимизация главных размеров при условии постоянства их активного объема.

- Для оценки рекомендуемых к разработке вариантов конструкции в методику электромагнитного расчета введен дополнительный блок, предназначенный для определения энергетического коэффициента полезного действия по условию выполнения допустимого значения прогиба вала, определяемого на основании механического расчета, выполненного в программном комплексе Autodesk Inventor Professional.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1 Домбровский, В.В. Асинхронные машины: теория, расчет, элементы проектирования / В.В. Домбровский, В.В. Зайчик. -Л.: Энергоатомиздат, 1990. -368 с.

1 V.V. Dombrovskiy, V.V. Zaychik. Asynchronous machines: theory, calculation, design elements [Asinkhronnye mashiny: teoriya, raschet, elementy projektirovaniya]. Leningrad. Energoatomizdat Publ.

2 Копылов, И.П. Справочник по электрическим машинам / Под общ. ред. И.П. Копылова и Б.К. Клокова. -Т.1. -М.: Энергоатомиздат, 1988. -456 с.

3 Темлякова, З.С. Компьютерная поддержка проектирования высоковольтных асинхронных двигателей / З.С. Темлякова, В.В. Гречкин, Ю.Г. Соловейчик, М.Г. Персова // -Электротехника. -2014. -№12. -С. 33-35.

4 Темлякова, З.С. Исследование эксплуатационных свойств асинхронного двигателя на основе численного моделирования / З.С. Темлякова, А.А. Шевченко, В.В. Гречкин // -Электротехника. Электротехнология. Энергетика (ЭЭЭ-2015) = Electrical engineering. Electrotechnology. Energy (EEE-2015): сб. науч. тр. 7 междунар. науч. конф. молодых ученых, Новосибирск, 9-12 июня 2015 г. В 3 ч. - Новосибирск: Изд-во Новосиб. гос. техн. ун-в., 2015. -Ч.1. Секция «Электротехника». -С. 79-82.

1990. 368 p.

2 I.P. Kopylov, B.K. Klovov. Handbook of electric machines [Spravochnik po elektricheskim mashinam]. Moscow. Energoatomizdat Publ. 1988. Vol. 1. 456 p.

3 Z.S. Temlyakova, V.V. Grechkin, Yu.G. Soloveychik, M.G. Persova. Computer support for the design of high-voltage asynchronous motors [Komp'yuternaya podderzhka proektirovaniya vysokovol'tnykh asinkhronnykh dvigateley]. *Elektrotehnika*. 2014. No. 12. pp. 33-35.

4 Z.S. Temlyakova, A.A. Shevchenko, V.V. Grechkin. Research of the performance properties of an induction motor based on numerical simulation [Issledovanie ekspluatatsionnykh svoystv asinkhronnogo dvigatelya na osnove chislennogo modelirovaniya]. *Electrical engineering. Electrotechnology. Energy (EEE-2015) [Elektrotehnika. Elektrotehnologiya. Energetika (EEE-2015)]*. Novosibirsk. Novosibirsk St. Techn. Univ. Publ. 2015. Vol. 1. pp. 79-82.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: анализ, технические решения, энергоэффективность, асинхронные двигатели

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ: Темлякова Зоя Савельевна, докт. техн. наук, профессор НГТУ
Вильбергер Михаил Евгеньевич, канд. техн. наук, доцент НГТУ
Морозов Павел Владимирович, канд. техн. наук, доцент НГТУ
Темляков Антон Александрович, студент НГТУ

ПОЧТОВЫЙ АДРЕС: 630092, г.Новосибирск, пр.К.Маркса, 20, НГТУ

РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО СНИЖЕНИЮ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ (НА ПРИМЕРЕ ОАО «ПЕНДЖИКЕНТСКИЕ ЭС» РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Г.В. Шведов, С.Р. Чоршанбиев

POWER LOSS REDUCTION MEASURES DEVELOPMENT IN HV ELECTRICAL GRIDS - EVIDENCE FROM "PANJAKENT POWER NETWORKS" JSC, TAJIKISTAN

National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (MPEI) 14, Krasnokazarmen-naya St., Moscow, 111250, Russia

Galaktion V. Shvedov (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of MPEI)

Sirodzhiddin R. Chorshanbiev (Graduate student of MPEI)

ABSTRACT: In this paper, the authors show the results of structural analysis of technical losses in 35-500 kV electrical systems of the national power distribution company "Barki Tochik" in Tajikistan. The great part of technical losses was observed in power transmission lines of Panjakent Power Networks Jsc. Considering this, the calculation and analysis of electric power losses in high-voltage electrical networks was carried out by the online computation method. Obtained data let authors develop power loss reduction procedures in the high-voltage electrical networks of Panjakent Power Networks Jsc.

Keywords: power losses, load graph, power transmission line, cable, power loss reduction measures, Republic of Tajikistan

Приведены результаты структурного анализа технических потерь электроэнергии в электрических сетях напряжением 35-500 кВ национальной энергетической компании ОАХК «Барки Точик» Республики Таджикистан. Среди технических потерь наибольшие потери наблюдались в линиях электропередач (ЛЭП) (нагрузочные) в ОАО «Пенджикентские ЭС». Исходя из этого был проведен расчет и анализ потерь электроэнергии в высоковольтных электрических сетях ОАО «Пенджикентские ЭС». Исходя из имеющейся информации, расчет был проведен методом оперативных расчетов. По полученным результатам расчета, дан анализ потерь электроэнергии в высоковольтных электрических сетях ОАО «Пенджикентские ЭС». На основе анализа разработано мероприятие по снижению потерь электроэнергии в высоковольтных электрических сетях ОАО «Пенджикентские ЭС».

Уровень потерь электроэнергии в электрических сетях считается основным показателем эффективности и экономичности работы энергосистемы каждой страны. При этом уровень потерь электроэнергии и их ежегодного роста является одним из наиболее актуальных вопросов энергетиков, как в зарубежных странах мира, так и в Республике Таджикистан.

Согласно [1], уровень потерь в 10% является максимальным с точки зрения физики передачи электроэнергии по сетям. Несмотря на то, что в Республике Таджикистан разработка методов расчета, анализа потерь электроэнергии и выбора экономически обоснованных мероприятий по их снижению ведется уже более 20 лет, до сих пор во многих городских и районных электрических сетях Республики Таджикистан, уровень потерь электроэнергии остается выше максимального 10%, и находится в пределах 12-20% [2-6].

Анализ потерь электроэнергии. В таблице 1 приведены нагрузочные и условно-

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

постоянные потери электроэнергии в электрических сетях 35-500 кВ ОАХК «Барки Точик» и по отдельным предприятиям электрических сетей [2, 3].

Таблица 1 – Технические потери электроэнергии в электрических сетях 35-500 кВ ОАХК «Барки Точик»

Наименование электрических сетей	Передача электро-энергии млн. кВт·ч	Технические потери, млн кВт·ч											
		Нагрузочные				Условно-постоянные						Всего	%
		ЛЭП	%	Трансформа-торы	%	Климатиче-ские	%	Холостой ход трансформа-тора	%	Расход СН ПС	%		
Южные	1164	29,13	48,4	8,60	14,3	3,66	6,1	12,00	23,8	6,71	11,2	60,1	5,2
Кулябские	487	17,08	56,3	4,73	15,6	1,32	4,4	4,85	16,0	2,34	7,72	30,3	6,2
Дангаринские	106	0,62	27,4	0,84	37,2	0,09	4,0	0,46	20,4	0,25	11,1	2,3	2,1
Кулябские го-родские	314	2,10	57,2	1,04	28,3	0,05	1,4	0,40	10,9	0,08	2,2	3,7	1,2
Яванские	313	3,8	58,1	0,80	12,2	0,14	2,1	1,53	23,4	0,27	4,1	6,5	2,1
Пенджикентские городские	405	37,76	85,2	1,18	2,7	0,57	1,3	2,41	5,4	2,39	5,4	44,3	10,9
Истаравшанские городские	1019	29,40	56,8	4,75	9,2	2,52	4,9	9,25	17,9	5,84	11,3	51,8	5,1
Худжандские го-родские	596	1,31	34,3	1,15	30,1	0,02	0,5	1,07	28,0	0,27	7,1	3,8	0,6
Сугд	1576	62,9	66,5	5,18	5,5	4,88	5,2	12,50	13,2	9,17	10,0	94,6	6,0
Исфаринские го-родские	247	3,52	45,4	1,05	13,5	0,40	5,2	1,65	21,3	1,14	3,1	7,8	3,1
Чкаловские	122	0,20	9,5	1,00	47,6	–	–	0,67	31,9	0,23	11,0	2,1	1,7
Турсун-Задевские го-родские	225	3,30	75,2	0,52	11,8	0,02	0,5	0,48	10,9	0,07	1,6	4,4	2,0
Центральные	1161	19,04	49,4	5,80	15,0	1,35	3,5	8,08	21,0	4,29	11,1	38,6	3,3
Нурекские	115	0,95	37,3	0,57	22,4	0,05	2,0	0,84	32,9	0,14	5,5	2,6	2,2
Раштские	216	9,33	68,6	0,80	5,9	0,70	5,2	1,66	12,2	1,11	8,2	13,6	6,3
Душанбинские городские	3086	33,67	48,8	21,01	30,4	0,58	0,8	9,04	13,1	4,70	6,8	69,0	2,2
ТАЛКо	3015	1,81	100	–	–	–	–	–	–	–	–	1,8	0,1
Афганистан	1778	71,34	97,7	–	–	1,71	2,3	–	–	–	–	73,1	4,1
Магистральные линии	17208	567,5	80,8	37,71	5,4	55,53	7,9	19,19	2,73	22,35	3,2	702,3	4,1
Система	17208	821,6	72,1	96,73	8,5	73,59	6,5	86,08	7,55	61,35	5,4	1139	6,6

Как следует из таблицы 1, среди технических потерь наибольшие потери наблюдаются в линиях электропередач (ЛЭП) (нагрузочные). В ОАО «Пенджикентские городские ЭС» – 85,22%, ОАО «Сугд ЭС» – 66,47%, ОАО «Турсун-Задевские городские ЭС» – 75,15% и ОАО «Раштские ЭС» – 68,6%.

Исходя из этого, в качестве объекта исследования была выбрана ЛЭП ОАО «Пенджикентские городские ЭС».

Среди высоковольтных воздушных линий электропередач (ВЛЭП) 35-110 кВ ОАО «Пенджикентские городские ЭС» ВЛЭП «Л-110 кВ «Рудаки» является основной ВЛЭП. Вся система электроснабжения ОАО «Пенджикентские городские ЭС» берет питание от этой линии.

Определим среднюю плотность тока в ВЛЭП «Л-110 кВ «Рудаки» по следующей форму-

ле

$$j_{cp} = \frac{I_{cp}}{F_{пр}} = \frac{260,83}{120} = 2,173\sqrt{b^2 - 4ac}, \quad (1)$$

где I_{cp} – средний ток в ВЛЭП «Л-110 кВ «Рудаки» на 01.01.2016 г., $I_{cp} = 260,83$ А;
 $F_{пр}$ – существующее сечение провода ВЛЭП «Л-110 кВ «Рудаки», $F_{пр} = 120/19$.

Из (1) видно, что средняя плотность тока равна 2,173, то есть больше единицы. Это говорит о том, что данная линия является загруженной. В связи с этим далее исследуется ВЛЭП «Л-110 кВ Рудаки». В таблице 2 приведены исходные данные ВЛЭП «Л-110 кВ Рудаки» [7].

Таблица 2 – Исходные данные ВЛЭП «Л-110 кВ Рудаки»

Наименование ЛЭП	Диспетчерское название	Тип рова	Длина, км	Удельное активное сопротивление, Ом/км	Количество цепей	Год эксплуатации
ЛЭП-110 кВ «Рудаки»	ЛР-110-1	АС-120/19	95,3	0,244	1	1965

На рисунке 1 приведен суточный график тока в «Л-110 кВ Рудаки» за 01.01.2016 г. [7]. Для остальных дней 2016 г. имеется такая же информация.

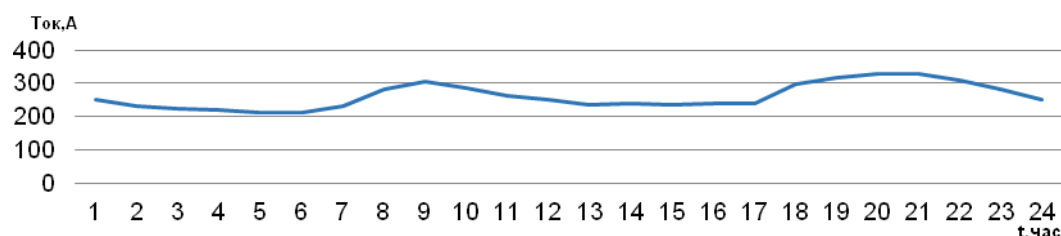


Рисунок 1 – Суточный график ток в «Л-110 кВ Рудаки» за 01.01.2016 г.

Имеющая информация однозначно позволяет рассчитать потери электроэнергии в «Л-110 кВ Рудаки» методом оперативных расчетов [8, 9].

Исходя из имеющийся информации расчет потерь электроэнергии в «Л-110 кВ Рудаки» в за каждый час рассчитано по формуле [8] при провода марки АС-120/19

$$\Delta \mathcal{E}_n = 3RI_{ij}^2 \Delta t_{ij} = 3 \cdot 23,253 \cdot 250^2 \cdot 1 = 44359,975 \text{ кВт} \cdot \text{ч},$$

где Δt_{ij} – интервал времени, в течение которого токовую нагрузку I_{ij} i -го элемента сети с сопротивлением R принимают неизменным.

Таким же образом были рассчитаны потери электроэнергии за каждый час каждого дня 2016 г. Сумма ежедневных и ежемесячных потерь электроэнергии за 2016 г. приведена в таблице 3.

Из таблицы 3 видно, что в «Л-110 кВ Рудаки» за 2016 г. потери электроэнергии составили 33,102 млн. кВт·ч.

Мероприятие по снижению потерь электроэнергии. Повышение энергоэффективности сетевой компании при таких высоких потерях электроэнергии в ВЛЭП может быть обеспечено только в случае замены проводов. Поэтому можно предложить следующее мероприятие по снижению потерь электроэнергии в ВЛЭП «Л-110 кВ «Рудаки» в ОАО «Пенджикентские городские ЭС» Республики Таджикистан – замена существующего провода марки АС-120/19 в «Л-110 кВ Рудаки» на новый провод марки АС-240/32.

Таблица 3 – Ежемесячные потери электроэнергии в «Л-110 кВ Рудаки» за 2016 г., млн. кВт·ч (марка провода АС-120/19)

Календарный месяц	Потери электроэнергии
Январь	3,197
Февраль	3,326
Март	3,055
Апрель	2,770
Май	2,145
Июнь	2,341
Июль	2,570
Август	2,212
Сентябрь	1,997
Октябрь	2,242
Ноябрь	3,021
Декабрь	4,222
Всего:	33,102

Результаты расчетов потерь электроэнергии в «Л-110 кВ Рудаки» при проводе марки

АС-240/32 приведены в таблице 4.

Из таблицы 4 видно, что при использовании провода марки АС-240/32 в «Л-110 кВ Рудаки» за 2016 г. потери электроэнергии составили 16,008 млн. кВт·ч.

После замены существующего провода марки АС-120/19 на провод марки АС-240/32 потери электроэнергии за год снизятся на 17,094 млн. кВт·ч./год (51,6%).

Согласно [10] стоимость потерь электроэнергии ($c_{\text{эл}}$) составляет 0,1685 сомони за кВт·ч.

Определим ежегодный доход при замене провода марки АС-120/19 на провод марки АС-240/32 в «Л-110 кВ Рудаки»

$$D_t = \delta(\Delta W)_t c_{\text{эл}} =$$

$$= 17,094 \cdot 0,1685 = 2,880 \text{ млн. сомони/год.}$$

За нормативный срок службы провода АС-240/32 45 лет экономический эффект от его использования составляет $2,880 \cdot 45 = 126,9$ млн. сомони.

Оценим эффективность дополнительных капиталовложений при замене провода марки АС-120/19 на провод марки АС-240/32 в «Л-110 кВ Рудаки».

Удельная стоимость новых проводов марки АС-240/32 на 1 км с учетом доставки, на российском рынке переводилась в национальную валюту сомони и составила 82800 сомони/км.

Таким образом, стоимость новых проводов марки АС-240/32 в «Л-110 кВ Рудаки» при длине 95,3 км

$$K_{\text{ЛЭП-110кВ}} = 82800 \cdot 95,3 = 7,890 \text{ млн. сомони.}$$

Согласно [2], монтажные и демонтажные работы в ВЛЭП-110 кВ составляют 30% от стоимости проекта для замены проводов

$$K_{\text{демонтаж-110кВ}} = K_{\text{монтаж-110кВ}} = 7,890 \cdot 0,30 = 2,367 \text{ млн. сомони;}$$

Определим сумму затрат на замену проводов марки АС-240/32 в «Л-110 кВ Рудаки» с учетом монтажных и демонтажных работ

$$K_{\text{сумма-110 кВ}} = K_{\text{ЛЭП-110 кВ}} + K_{\text{монтаж-110 кВ}} + K_{\text{демонтаж-110 кВ}} = 7,890 + 2,367 + 2,367 = 12,624 \text{ млн. сомони.}$$

Определим интегральный срок окупаемости замены провода марки АС-120/19 на провод марки АС-240/32 в «Л-110 кВ Рудаки»

$$T_{\text{ок}} = \frac{\ln\left(1 - E \frac{K_{\text{сумма-110кВ}}}{D_t}\right)}{\ln(1 + E)} = \frac{\ln\left(1 - 0,1 \frac{12,624}{2,880}\right)}{\ln(1 + 0,1)} \approx 6 \text{ лет.}$$

Полученное значение интегрального срока окупаемости (менее 10 лет), говорит об эффективности данного мероприятия.

Исходя из результатов экономических расчетов, можно сделать вывод о том, что для снижения потерь электроэнергии и повышения энергоэффективности в электрических сетях ОАО «Пенджикентские городские ЭС» в «Л-110 кВ Рудаки» необходимо заменить провода марки АС-120/32 на провода марки АС-240/32, так как ежегодное снижение потерь электроэнергии от замены составит 17,094 млн. кВт·ч/год (2,880 млн. сомони/год) со сроком окупаемости 6 лет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Бохмат, И.С. Снижение коммерческих потерь в электроэнергетических системах / И.С. Бохмат, В.Э. Воронницкий, Е.П. Татаринов // -Электрические станции. - 1998. -№9. -С. 53-59.
- 2 Информация за 2016 г ОАХК «Барки Точик». - Режим доступа: <http://www.barqitojik.tj>. -05.05.2018 г.
- 3 Шведов, Г.В. Структурный анализ потерь элек-

REFERENCES

- 1 I.S. Bokhmat, V.E. Vorotnitskiy, E.P. Tatarinov. Reducing commercial losses in electric power systems [Snizhenie kommercheskikh poter' v elektroenergeticheskikh sistemakh]. *Elektricheskie stantsii*. 1998. No. 9. pp. 53-59.
- 2 Information for 2016 year. OSHC "Barki Tojik" [Informatsiya za 2016 g OAKhK Barki Tochik]. -URL: <http://www.barqitojik.tj>. -05 May 2018.
- 3 G.V.Shvedov, S.R.Chorshanbiev, Kh.B.Nazirov. Structural analy-

трознергии в электрических сетях 35-500 кВ Республики Таджикистан / Г.В. Шведов, С.Р. Чоршанбиев, Х.Б. Назиров // -Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. -2018. -№1(41). -С. 73-85.

4 Чоршанбиев, С.Р. Расчет потерь электроэнергии в высоковольтных городских электрических сетях г. Душанбе Республики Таджикистан / С.Р. Чоршанбиев, Г.В. Шведов // Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии (ПЭЭЭ-2017): сб. тр. V Всероссийской научно-технической конференции (к 50-летию юбилею кафедры «Электроснабжение и электротехника» Института энергетики и электротехники) ТГУ, 01-06 ноября 2017 г. -Тольятти: Изд-во ТГУ, 2017. -С. 178-183.

5 Шведов, Г.В. Анализ потерь электроэнергии в городских электрических сетях напряжением 6-10 кВ г. Душанбе Республики Таджикистан / Г.В. Шведов, С.Р. Чоршанбиев, М.У. Холматова // -Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. -2018. -№2(42). -С. 36-42.

6 Шведов, Г.В. Расчет и анализ технических потерь электроэнергии в городских распределительных электрических сетях 6-10/0,4 кВ г. Душанбе / Г.В. Шведов, С.Р. Чоршанбиев // -Известия: Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. -2017. -№4(44). -С. 317-324.

7 Информация за 2016 года ОАО «Пенджикентские электрические сети». -Режим доступа: <http://www.barqitojik.tj/about/dependents/transmission/369/196418/>. -05.06.2018 г.

8 Приказ Министерства энергетики РФ от 30 декабря 2008 г. №326 «Об организации в Министерстве энергетики Российской Федерации работы по утверждению нормативов технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям» // СПС «Консультант-Плюс».

9 Шведов, Г.В. Потери электроэнергии при ее транспорте по электрическим сетям: расчет, анализ, нормирование и снижение / Г.В. Шведов, О.В. Сипачева. Под ред. Ю.С. Железко. -М.: Издательский дом МЭИ, 2013. -424 с.

10 Прейскурсант №09-01-2016 «Тарифы на электрическую и тепловую энергию». Открытая Акционерная Холдинговая Компания (ОАХК) «Барки Точик». -Душанбе, 2017. -40 с.

sis of electric power losses in electrical networks 35-500 kV of the Republic of Tajikistan [Strukturnyy analiz poter' elektroenergii v elektricheskikh setyakh 35-500 kV Respubliki Tadjikistan]. *Politekhicheskiy vestnik. Seriya: Inzhenernye issledovaniya*. 2018. No. 1(41). pp. 73-85.

4 S.R. Chorshanбиеv, G.V. Shvedov. Calculation of electric power losses in high-voltage urban electrical networks in the Dushanbe, Republic of Tajikistan [Raschet poter' elektroenergii v vysokovol'tnykh gorodskikh elektricheskikh setyakh g. Dushanbe Respubliki Tadjikistan]. *Problemy elektrotekhniki, elektroenergetiki i elektrotekhnologii (PEEE-2017)*. Tol'yatti. Tol'yatti St. Univ. Publ. 2017. pp. 178-183.

5 G.V. Shvedov, S.R. Chorshanбиеv, M.U. Kholmatoва. Analysis of electric power losses in urban electrical networks with a voltage of 6-10 kV in the Dushanbe, Republic of Tajikistan [Analiz poter' elektroenergii v gorodskikh elektricheskikh setyakh napryazheniem 6-10 kV g. Dushanbe Respubliki Tadjikistan]. *Politekhicheskiy vestnik. Seriya: Inzhenernye issledovaniya*. 2018. No. 2(42). pp. 36-42.

6 G.V. Shvedov, S.R. Chorshanбиеv. Calculation and analysis of electricity technical losses in urban distribution electrical networks 6-10/0.4 kV in the Dushanbe [Raschet i analiz tekhnicheskikh poter' elektroenergii v gorodskikh raspredelitel'nykh elektricheskikh setyakh 6-10/0,4 kV g. Dushanbe]. *Digest: Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov [Izvestiya: Kyrgyzskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. I. Razzakova]*. 2017. No. 4(44). pp. 317-324.

7 Information for 2016 year. OJSC "Panjakent's electric networks" [Informatsiya za 2016 goda OAO "Pendzhikentskie elektricheskije seti"]. URL: <http://www.barqitojik.tj/about/dependents/transmission/369/196418/>. -05 Jun. 2018.

8 Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation dated December 30, 2008 No. 326 "On the organization of the Ministry of Energy of the Russian Federation" [Prikaz Ministerstva energetiki RF ot 30 dekabrya 2008 g. №326 "Ob organizatsii v Ministerstve energetiki Rossiyskoy Federatsii raboty po utverzhdeniyu normativov tekhnologicheskikh poter' elektroenergii pri ee peredache po elektricheskim setyam"]. SPS Konsultant-Plyus

9 G.V. Shvedov, O.V. Sipacheva. Pod red. Yu.S. Zhelezko. Electricity losses during its transportation through electric networks: calculation, analysis, rationing and reduction [Poteri elektroenergii pri ee transporte po elektricheskim setyam: raschet, analiz, normirovanie i snizhenie]. Moscow. Izdatel'skiy dom MEI Publ. 2013. 424 p.

10 Pricelist №09-01-2016 «Tariffs for electric and thermal energy». Open Stock Holding Company (OSHC) "Barki Tojik" [Preyskursant №09-01-2016 «Tarify na elektricheskuyu i teplovuyu energiyu». Otkrytaya Aktsionernaya Kholdingovaya Kompaniya (OAKhK) "Barki Tochik"]. Dushanbe. 2017. 40 p.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: потери электроэнергии, график нагрузок, линия электропередач, провод, мероприятия по снижению потерь, Республика Таджикистан

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ: Шведов Галактион Владимирович, канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»
Чоршанбиев Сироджиддин Ражаббокиевич, аспирант ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

ПОЧТОВЫЙ АДРЕС: 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14, ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

СТАБИЛИЗАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ПЕРСПЕКТИВНЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

ФГБОУ ВО «Омский государственный университет путей сообщения»

ФГБОУ ВО «Нижевартовский государственный университет»

В.Т. Черемисин, Е.А. Третьяков, Г.Е. Головнев, Н.Н. Малышева

STABILIZATION OF VOLTAGES IN DISTRIBUTIVE TRACTION POWER NETWORKS

Omsk State Transport University (OSTU) 35, Prospekt Marksa, Omsk, 644046, Russia

Nizhnevartovsk State University (NVSU) 56, Lenina St., Nizhnevartovsk, 628605, Russia

Vasily T. Cheremisin (Holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Prof. of OSTU)

Evgeniy A. Tret'yakov (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of OSTU)

Grigoriy E. Golovnev (Graduate student of OSTU)

Nadezhda N. Malysheva (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of NVSU)

ABSTRACT: The article proposes algorithm for multi-agent control system of voltage in power networks. Using this method, the authors performed simulation modeling of changing the parameters mode due to maintain the voltage level. The obtained simulation results show that proposed approaches can be applied to voltage stabilization projects powered by modern equipment.

Keywords: sources of reactive power, stabilization of voltages, agent-based method, state diagram, modeling

Предложен алгоритм групповой системы мультиагентного управления напряжением в электрической сети и на его основе выполнено имитационное моделирование при изменении параметров режима для поддержания уровня напряжения. Полученные результаты моделирования свидетельствуют об обоснованности подходов к стабилизации напряжения методами мультиагентного управления и возможности их практической реализации на базе современного оборудования.

Внедрение регулируемых устройств компенсации реактивной мощности (КУ) в распределительных электрических сетях железных дорог открывает новые возможности для повышения эффективности их работы за счет методов группового управления напряжением на основе агентного подхода. В последние годы многие работы посвящены исследованию мультиагентных методов управления напряжением. Большинство авторов при этом придерживаются подходов управления напряжением в распределительных электрических сетях на основе оптимизационных задач по минимуму затрат на генерацию активной и реактивной мощности при условии минимума управляющих воздействий и обеспечения напряжения в заданных пределах [1-3], а также в электрических сетях высокого напряжения с помощью силовых электронных устройств [4].

В данном исследовании представлен подход к мультиагентному управлению напряжением по минимуму среднеквадратического отклонения напряжения на основе управляющих воздействий, полученных путем ранжирования соотношений «стоимости» выполнения задачи КУ к чувствительности шины электрической сети по напряжению и выбора наилучших предложений для целей управления путем их координации по типу «аукцион». Аукцион проводится итерационно, пока все задачи по стабилизации напряжений не будут распределены между локальными агентами КУ наилучшим образом. В качестве локальных агентов выступают контроллеры регулируемых КУ.

Величина инъекций КУ локальных агентов определяется в результате решения задачи с учетом известных ограничений параметров режима

$$\Delta U_D \rightarrow \min, \quad (1)$$

$$\Delta U_D = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (U_j - U_{\text{зад}})^2}{N-1}};$$

$$\sum_{j=1}^N (b_{jk} \Delta Q_j) = \Delta U_D;$$

где $U_j, U_{\text{зад}}$ – текущее и заданное напряжение;

b_{jk} – чувствительности k -ой шины электрической сети по напряжению к инъекции реактивной мощности ΔQ_j , которая определяется на основе элементов матрицы Якоби [5].

Алгоритм управления напряжением за счет координированной выработки реактивной мощности в электрической сети представлен на рисунке 1а.

реактивной мощности

Рассмотрим реализацию моделирования мультиагентного управления напряжением в распределительных электрических сетях железных дорог в программном продукте AnyLogic на примере фрагмента электрической сети 10 кВ, представленной на рисунке 1б.

Модель мультиагентного управления напряжением в распределительной электрической сети железных дорог в Anylogic может быть представлена в виде известного описания установившихся режимов [5] и характеристик локальных агентов, и агентов-координаторов в виде диаграмм состояний, онтологии, алгоритмов взаимодействия и координации [6-7].

Для описания поведения рассматриваемых агентов в AnyLogic на основе представленного алгоритма и принципов их координации разработаны диаграммы состояний локального агента КУ (измерение (Metering), ожидание работы (Waiting), работа (Control)) и агента-координатора, представленные на рисунке 2.

На рисунках 3 и 4 представлены результаты моделирования мультиагентного управления напряжением на шинах 1 и 2 в тестовой электрической сети (рисунок 1б) на основе представленных подходов в программе AnyLogic.

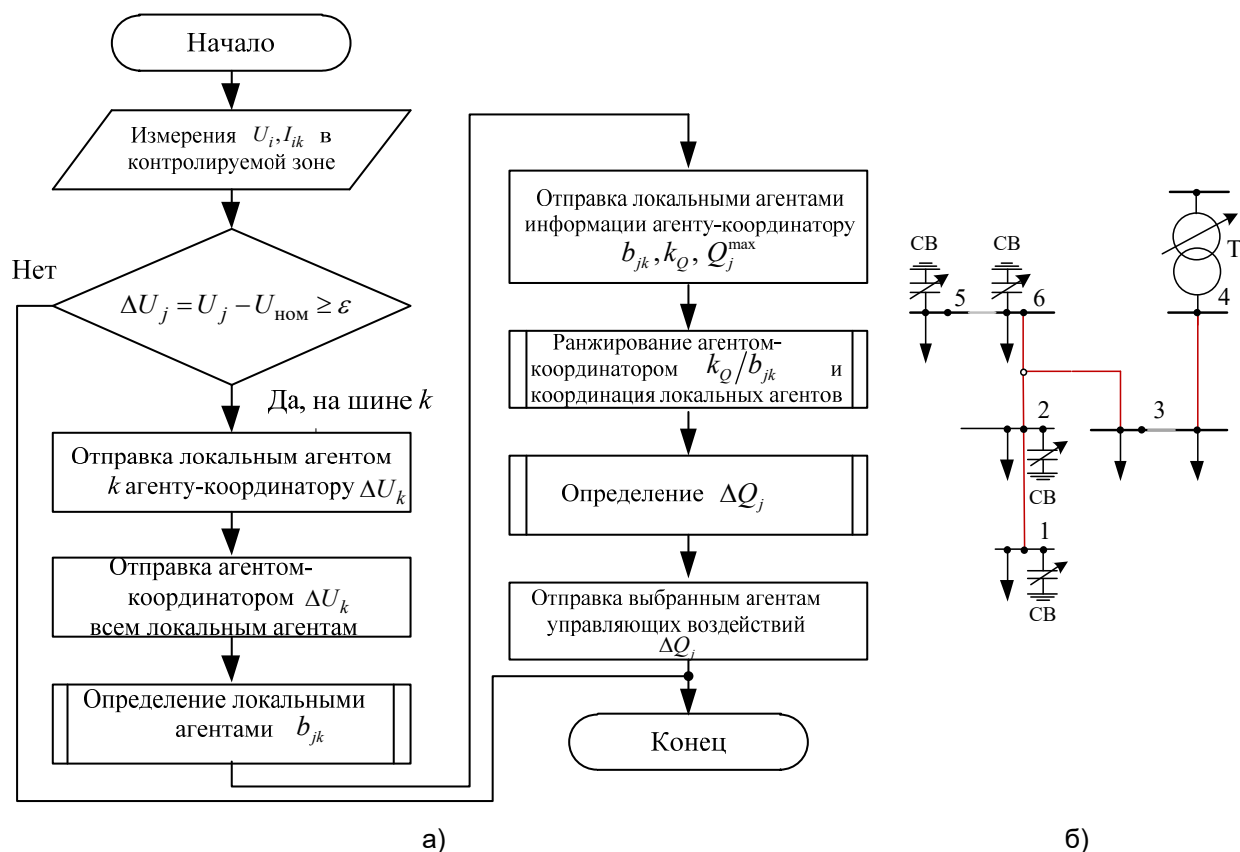


Рисунок 1 – Алгоритм управления напряжением (а) в электрической сети (б): k_Q -коэффициент по реактивной мощности

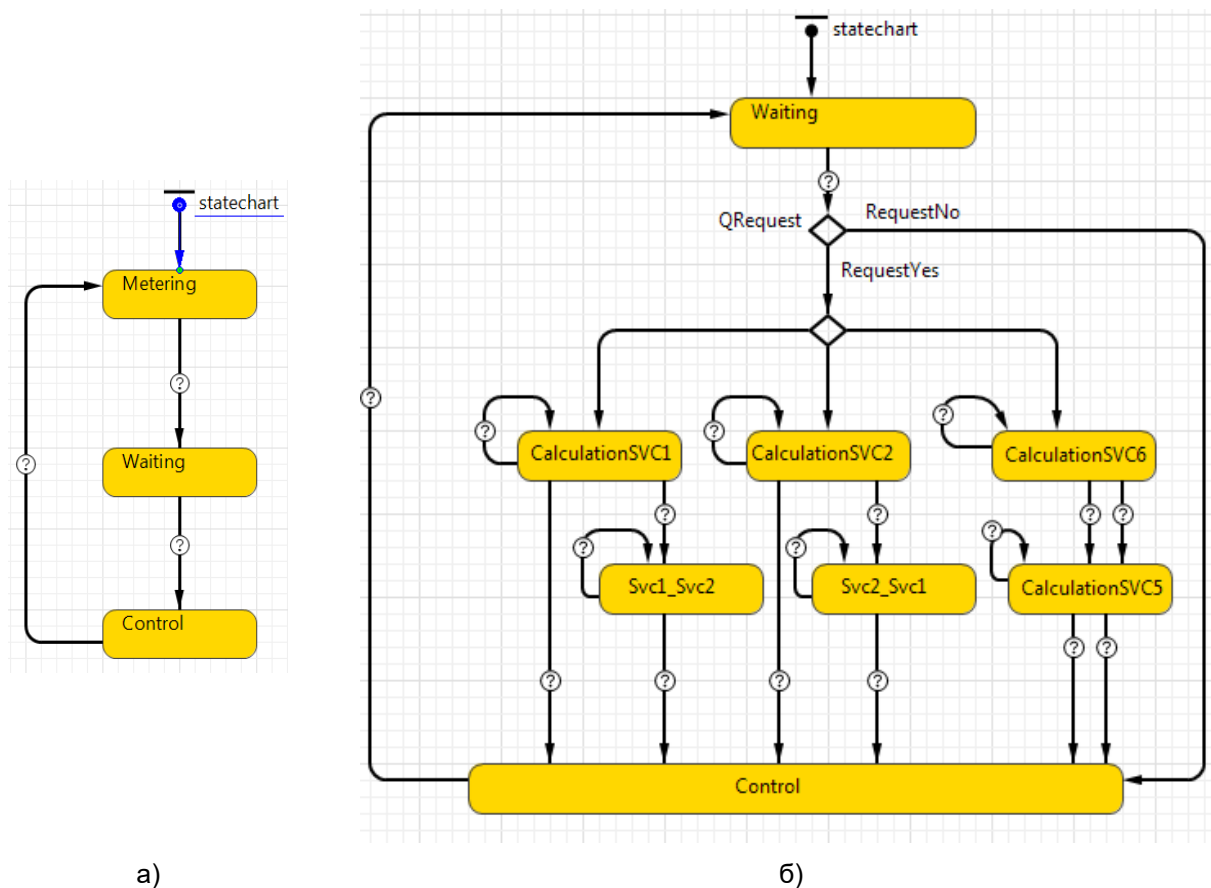


Рисунок 2 – Диаграмма состояний локального агента КУ (а) и агента-координатора (б)

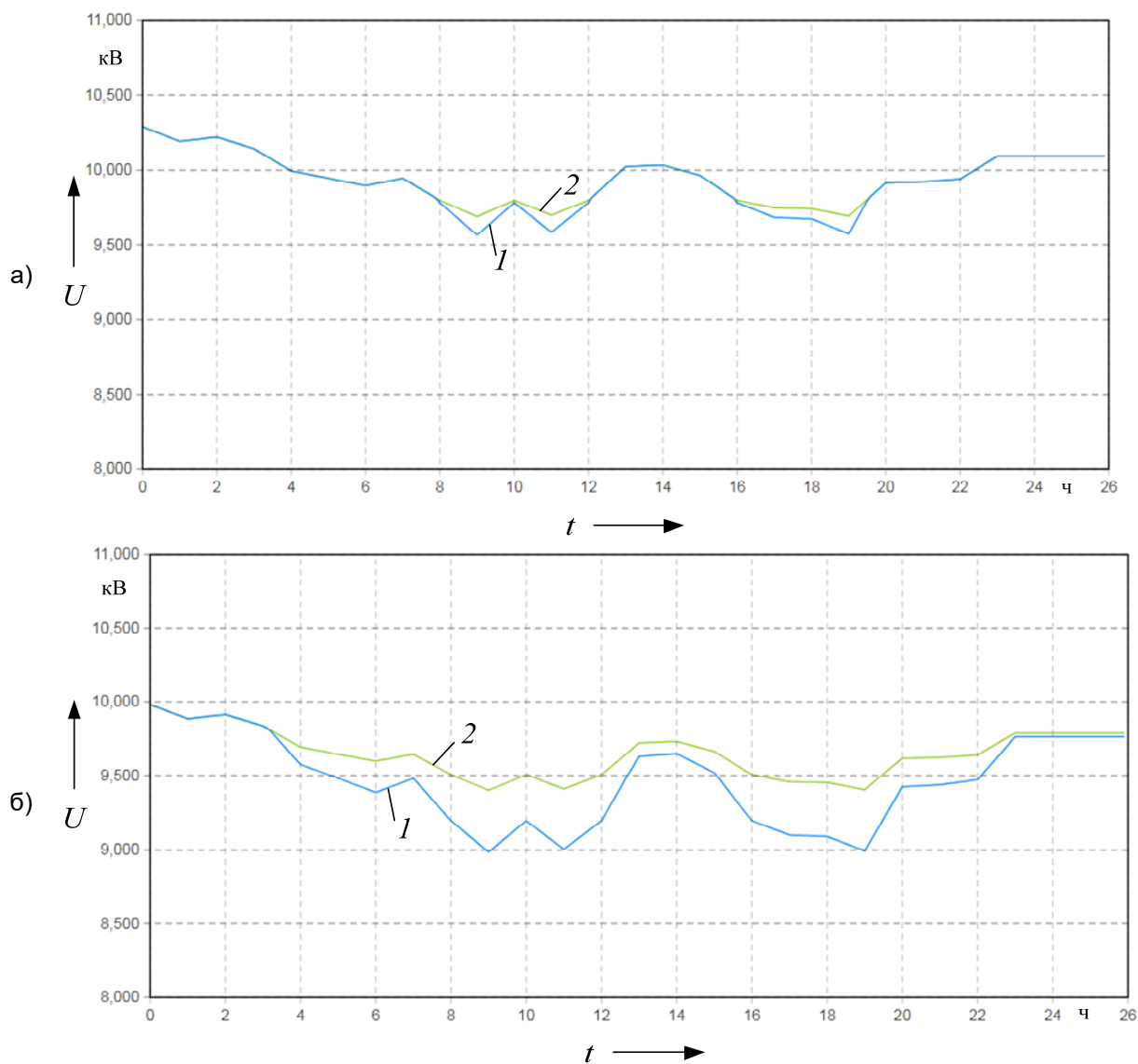


Рисунок 3 – Результаты моделирования напряжения на шине 2 (а), на шине 1 (б) электрической сети: 1-без стабилизации напряжения; 2-с управлением напряжением с помощью КУ

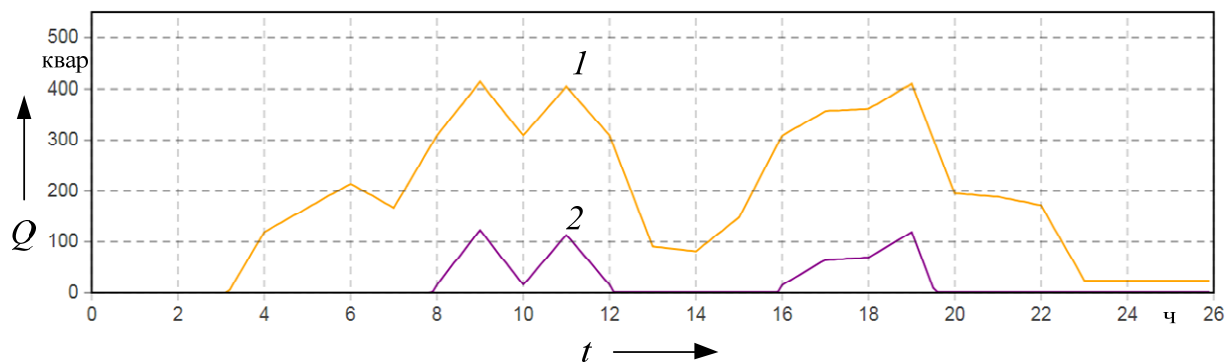


Рисунок 4 – Реактивная мощность, вырабатываемая КУ для стабилизации напряжений: 1-на шине 1; 2-на шине 2

Результаты моделирования свидетельствуют о работоспособности моделирования мультиагентного управления напряжением в электрической сети. По условиям моделирования допустимое отклонение на шинах задано в пределах $\pm 6\%$, предел реактивной мощности КУ 400 квар. Устройство КУ на шине 2 тестовой электрической сети включается в работу только при невозможности КУ на шине 1 обеспечить стабилизацию уровня напряжений в заданных пределах, что основывается на принципах координации локальных агентов и решении оптимизационной задачи (1).

Результаты исследований показали практическую реализуемость моделирования управления напряжением в распределительных электрических сетях на основе представленного подхода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

- 1 Morattab, A. Decentralised coordinated secondary voltage control of multi-area power grids using model predictive control / A. Morattab, O. Akhrif, M.Saad // *IET Generation, Transmission & Distribution*. -2017. -no. 11. -pp. 4546-4555.
- 2 Alobeidli, K. Novel coordinated secondary voltage control strategy for efficient utilisation of distributed generations / K. Alobeidli, S. Moursi // *IET Renewable Power Generation*. -2013. -vol. 8, no. 5. -pp. 569-579.
- 3 Yassami, H. Coordinated voltage control of wind-penetrated power systems via state feedback control / H. Yassami, F. Bayat, A. Jalilvand, A. Rabiee // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. -2017. -no. 93. -pp. 384-394.
- 4 Исмоилов, С.Т. Моделирование и анализ эффективности регулирования напряжения в электрической сети с распределенной генерацией / С.Т. Исмоилов, А.Г. Фишов // -Научн. пробл. трансп. Сиб. и Дальн. Вост. -2014. -№1-2. -С. 302-305.
- 5 Овчаренко, Н.И. Автоматика энергосистем / Н.И. Овчаренко; под ред. А.Ф. Дьякова. -М: Издательский дом МЭИ, 2016. -476 с.
- 6 Пат. 2587128 Российская Федерация. Способ управления системой электроснабжения железных дорог / Е.А. Третьяков; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщ. -№2015103374/11; заявл. 02.02.2015; опубл. 10.06.2016, Бюл. №16. -4 с.
- 7 Рассел, С. Искусственный интеллект: современный подход; пер. с англ. / С. Рассел, П. Норвиг. -М.: Издательский дом Вильямс, 2006. -1408 с.
- 1 A. Morattab, O. Akhrif, M.Saad. Decentralised coordinated secondary voltage control of multi-area power grids using model predictive control. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2017. No. 11. pp. 4546-4555.
- 2 K. Alobeidli, S. Moursi. Novel coordinated secondary voltage control strategy for efficient utilisation of distributed generations. *IET Renewable Power Generation*. 2013. Vol. 8, No. 5. pp. 569-579.
- 3 H. Yassami, F. Bayat, A. Jalilvand, A. Rabiee. Coordinated voltage control of wind-penetrated power systems via state feedback control. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2017. No. 93. pp. 384-394.
- 4 S.T. Ismoilov, A.G. Fishov. Modelling and analysis of voltage regulation efficiency in the electric circuit with distributed generation [Modelirovanie i analiz effektivnosti regulirovaniya napryazheniya v elektricheskoy seti s raspredelennoy generatsiei]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*. 2014. No. 1-2. pp. 302-305.
- 5 N.I. Ovcharenko, A.F. D'yakov. Power systems automatics [Avtomatika energosistem]. Moscow: Izdatel'skiy dom MEI Publ. 2016. 476 p.
- 6 E.A. Tretyakov. The railways power supply system control method [Sposob upravleniya sistemoy elektrosnabzheniya zheleznikh dorog]. Omsk. Omsk St. Univ of Railways Publ. 4 p.
- 7 S. Russell, P. Norvig. Artificial intelligence: a modern approach [Iskusstvennyy intellekt: sovremennyy podkhod]. Moscow. Izdatel'skiy dom Vil'yams Publ. 2006. 1408 p.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: источники реактивной мощности, стабилизация напряжений, агентный подход, диаграмма состояний, моделирование

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ: Черемисин Василий Титович, докт. техн. наук, профессор ФГБОУ ВО «ОмГУПС»
Третьяков Евгений Александрович, канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «ОмГУПС»
Головнев Григорий Евгеньевич, аспирант ФГБОУ ВО «ОмГУПС»
Малышева Надежда Николаевна, канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «НВГУ»
ПОЧТОВЫЙ АДРЕС: 644046, г.Омск, пр.К.Маркса, 35, ФГБОУ ВО «ОмГУПС»
628602, г.Нижневартовск, ул.Ленина, 56, ФГБОУ ВО «НВГУ»

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ ЗАЩИТ ПРИСОЕДИНЕНИЙ 6-35 кВ

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»

В.Н. Аносов, В.В. Жуловян, Б.В. Малозёмов, Е.Г. Порсев

COMPARATIVE ANALYSIS OF 6-35 KV MICROPROCESSOR PROTECTIVE RELAYS

Novosibirsk State Technical University (NSTU) 20, Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630092, Russia

Vladimir N. Anosov (Holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Assoc. Prof. of NSTU)

Vladimir V. Zhulovyan (Holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Prof. of NSTU)

Boris V. Malozemov (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of NSTU)

Evgeniy G. Porsev (Holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Prof. of NSTU)

ABSTRACT: Today, there are hundreds of models made by dozens of different manufacturers on the market of microprocessor-based devices for relay protection and automation. The article analyzes the technical data of protective relays, including indicators that a posteriori affect the technical excellence and reliability of the devices, as well as their cost.

Keywords: reliability, operation, transportation systems, microprocessor devices, relay protection

Сегодня на рынке микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики (МП РЗА) присутствуют сотни моделей десятков различных производителей. В статье проводится анализ технических данных МП РЗА, в том числе показателей, которые апостериорно влияют на техническое совершенство и надежность функционирования устройств, а также на их стоимость.

В течение последнего десятилетия устройства защиты оборудования тяговых подстанций электрифицированных железных дорог, городского и промышленного транспорта претерпело значительное техническое развитие и преобразование, но при этом накопилось и

много вопросов, с которыми ранее не приходилось иметь дело.

Основным назначением релейной защиты является выявление места возникновения тока короткого замыкания (КЗ) и быстрое автоматическое отключение выключателей поврежденного оборудования или участка сети от остальной неповрежденной части электрической установки или сети.

Вторым назначением является, выявление нарушений нормальных режимов работы оборудования и подача предупредительных сигналов обслуживающему персоналу или отключение оборудования с выдержкой времени.

Релейная защита работает в режиме ожидания запроса на срабатывание в случае превышения значения заданного параметра (уставки).

Основные требования к релейной защите: селективность, чувствительность, быстрдействие, надежность [1].

Структурная схема релейной защиты (рисунок 1) включает датчики 1, пороговые элементы 2, измерительную 3, логическую 4 части и выходной усилитель 5 [2-6].

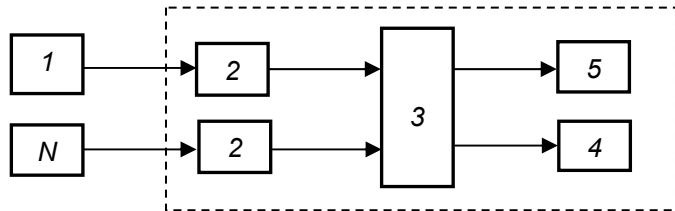


Рисунок 1 – Структурная схема релейной защиты

Длительно усилия разработчиков были направлены на создание электронных, а затем и МП РЗА, проблема была в устойчивости работы электроники в сильных стационарных и импульсных магнитных полях. В настоящее время цифровая электроника позволила создать надёжные устройства, выпускаемые группой ведущих компаний мира: ABB, Areva, SEL, Siemens, General Electric, Schneider, НИИЭФА – Энерго и другие.

Потребляемая мощность в токовых цепях, отличается у разных производителей до 20 раз. Однако это отличие не имеет практического значения, так как сопротивление соединительных проводов от вторичных обмоток трансформатора тока (ТТ) (датчиков) до входа в устройство защиты установлено правилами устройства электроустановок (ПУЭ). Гораздо более важно обратить внимание на требования к нагрузке ТТ, чтобы обеспечить их работу в классе точности и надёжное действие защиты. Такие требования и методы расчета приведены в техническом описании фирм, например, [3-5].

При определении необходимой стойкости цепей напряжения к превышению номинальных значений напряжения следует исходить, очевидно, из статистических данных временных перенапряжений, приведенных в ГОСТ 13109-97 [7]. В соответствии с ними коэффициент временного перенапряжения и [6] точках присоединения сети общего назначения составляет 1,15; 1,31; 1,47 с длительностью перенапряжений соответственно до 60, 20 и 1 с. Количество таких перенапряжений в году составляет около 30. Можно заключить, что термическая устойчивость микропроцессорных (МП) защит в течение длительного времени должна составлять минимум $(1,3 - 1,35)U_n$, а кратковременная (в течение 1 с) – минимум $1,5U_n$. Соответствующие показатели приведены в таблице 1, пункт 11, 12.

Основная погрешность измерения токов (пункт 5) составляет от 1 до 5%, а напряжения (пункт 13) – 0,5-5%. Другие показатели функций измерения не приводятся. Но и в правовом, и в техническом отношении функции измерения в МП терминалах могут служить только для индикации электрических величин, а не для их измерения.

Производители МП релейной защиты и автоматики (РЗА) в функции измерения включают измерение токов, напряжений, активной, реактивной и полной мощности, счетчиков активной и реактивной энергии и даже предлагают отказаться от измерительных приборов. При этом игнорируется ряд очевидных фактов, делающих такие предложения неправомерными.

Для использования МП РЗА для цепей измерения, они, включая каналы передачи данных, должны пройти метрологическую аттестацию, быть в Государственном реестре измерительных средств РФ и проходить периодическую проверку метрологических характеристик [5]. Если все эти требования будут выполнены, возникает проблема наличия и подключения подменных защит на энергообъекте на время изъятия МП защит, проходящих метрологическую проверку.

Если даже класс точности при измерении электрических величин самими МП РЗА соот-

ветствует метрологическим требованиям, в особенности для коммерческого и технического учета электроэнергии, точность измерений не обеспечивают ТТ классов точности 5P и 10P, используемых для подключения устройств РЗА.

Подключение МП РЗА к ТТ, служащим для целей измерения, как указывают разработчики ТТ, недопустимо из-за их быстрого насыщения при первичных токах выше номинального по условиям обеспечения безопасности приборов.

В результате при больших кратностях токов КЗ защиты могут отказывать в действии из-за больших токовых погрешностей таких ТТ, могущих превышать 50%. В особенности это касается устройств, токовые измерительные органы которых реагируют только на 1-ю гармонику основной частоты, значение которой при насыщении ТТ быстро уменьшается по отношению к полному действующему значению вторичного тока ТТ.

Таким образом, функция измерения электрических величин в МП РЗА может использоваться только для целей индикации этих величин при осциллографировании, анализе аварийных ситуаций и т.п., но не для их измерений вместо измерительных приборов.

Для возможности использования МП РЗА вместо измерительных приборов они должны дополнительно, помимо ТТ для защиты, подключаться к ТТ, служащим для целей измерения, а электрические величины для целей измерения должны обрабатываться в МП устройствах независимо от обработки сигналов для целей защиты. Такое разделение функций измерения и защиты потребовало бы дополнительной обработки нескольких аналоговых сигналов, что в ряде случаев может потребовать увеличенной производительности МП. При этом, безусловно, должны выполняться требования о метрологической аттестации.

Оптимальным выходом из положения была бы разработка специальной новой серии ТТ для МП РЗА, объединяющих в себе функции как измерения, так и защиты. Такие ТТ должны иметь высокий класс точности до номинальных значений тока и большие значения тока номинальной предельной кратности. Однако подобная разработка, как с технической, так и с финансовой точки зрения в условиях России проблематична из-за дальнейшего дробления электроэнергетики и отсутствия мощных компаний, способных обеспечить инвестирование такой разработки.

МП РЗА питаются от источников постоянного, переменного напряжения, а также от источников выпрямленного напряжения. В соответствии с [2], длительное допустимое отклонение напряжения питания должно составлять +10...–20% при использовании аккумуляторной батареи и +10...–15% при использовании выпрямленного оперативного тока, получающего энергию от сети переменного тока 380/220 В.

Однако сеть переменного оперативного напряжения 380/220 В, питаемая от трансформаторов собственных нужд (ТСН), может подвергаться таким же временным перенапряжениям, как и высоковольтная сеть, с коэффициентами временного перенапряжения, указанными выше. Кроме того, при обрыве нулевого проводника в трехфазной сети с глухозаземленной нейтралью, блоки питания МП РЗА могут повреждаться, если их устойчивость к указанным воздействиям не обеспечивается номинальными параметрами или технологически запасами.

Дискретные входы импортных терминалов питаются от источников постоянного напряжения 24–250 В, а устройств российского производства – от источников постоянного или переменного напряжения 110–220 В. Потребляемый ток дискретных входов составляет от 1,8 до 20 мА в состоянии покоя (через 40–50 мс после появления сигнала на дискретном входе). Значение тока по дискретному входу при появлении сигнала (срабатывании по дискретному входу), который создается за счет разряда специально вводимого в схему дискретного входа конденсатора, может быть таким же, как в состоянии покоя, или больше. У большинства терминалов ток дискретного входа при срабатывании неизвестен.

Суть вопроса заключается в том, что минимальный коммутируемый ток у реле российского производства составляет 10 мА при напряжении 24 В и 5 мА при напряжении 220 В [8]. Обычно через «сухие» контакты таких реле или блок контакты выключателей подаются команды на дискретные входы. При меньших токах реле могут не коммутировать вследствие того, что не пробивается окисная пленка на серебряных контактах. В реле импортного производства для изготовления контактов часто применяются специальные сплавы на основе серебра, которые обеспечивают значительно меньшие минимально коммутируемые токи, чем в случае применения контактов из чистого серебра. Поэтому в зарубежных терминалах

значение токов дискретных входов может быть не рассчитано на российские условия. Потребителям рекомендуется уточнять недостающую информацию у производителей во избежание отказов при не прохождении команд по дискретным входам.

При питании дискретных входов переменным или выпрямленным напряжением от ТСН остаются те же проблемы временных перенапряжений, которые были рассмотрены выше.

Выбирая число дискретных входов/выходов, не стоит упускать из виду то обстоятельство, что каждый дополнительный вход или выход обойдется в среднем в сумму от 500 до 1500 руб. Степень защиты ни одного МП РЗА не соответствует требованиям РД [2] – IP54. Основные характеристики МП РЗА приведены в таблице.

Таблица – Структурная схема релейной защиты

Технические характеристики	Терминалы с аналоговыми входами по току			Терминалы с аналоговыми входами по току и напряжению		
	SIPROTEC 7SJ61 (Siemens)	Sepam 1000+S20 (Schneider Electric)	SPAS -810 (ООО «АББ Автоматизация»)	БМРЗ -ВВ,-ВЛ,-СВ (НТЦ Мехатроника)	Sepam 1000+S42 (Schneider Electric)	Micom P143 (Areva)
$I_{ном}$, А	1*, 5	1*, 5	1*, 5	5	1*, 5	1*, 5
$I_{ном}$, ЗНЗ, А	1,6	0,1; 2; 20	1; 0,2; 5*	н/д	0,1; 2; 5; 20	1; 0,2*
Рабочий диапазон вторичных I , ТТ (I_n), А	0,05-37	0,1-24	0-50	0,3-20	0,1-24	0-64
Рабочий диапазон вторичных I , ТТ ЗНЗ (I_n), А	0,003-175	0,1-300	0-25	0,05-2,5; 0,5-25; 1,5-100	0,1-300	0-2
Основная погрешность измерения I , %	±1	от ±2 до ±5	н/д	±4	±1	±1
Затрата цепей I , ВА/ф	0,3	0,025	0,2	0,2	0,025	0,15
Затрата цепей I ЗНЗ, ВА	0,05 (1А)	***	***	0,2	***	0,2
Номинальное U , В	–	–	100 110*	100	100-230/ 3*	110-120/ 380-480
Рабочий диапазон U , В	–	–	до $2U_n$	1-120	0-230	0-240/ 0-880
Предельно допустимое U , В -10 с	–	–	н/д	н/д	480(1)	312/1144
Потребление цепей U , ВА/ф	–	–	0,2	0,5	0,18	0,5
Потребление цепей оперативного тока (I) покоя /срабатывания, Вт	3/7	6/11 ВА ~9/15 ВА	9/15	15/25	=6/11 ~6/25	15/20
Основная погрешность измерения U , %	–	–	н/д	±5	±(0,5-2,0)	±1
Входной ток – (I дискретный входной.), мА	срабатывание	н/д	25	н/д	н/д	н/д
	покой	1,8	3,6	4	3	5
Минимальная длительность входного дискретного сигнала, мА	н/д	н/д	30	50	н/д	20

*-по заказу; н/д- в документации нет данных о наличии функции

На основании проведенного анализа можно рекомендовать использование отечественных устройств с оптимальным соотношением цены и качества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Кузнецов, С.М. Защита тяговой сети от токов короткого замыкания / С.М. Кузнецов. -Новосибирск: Изд-во Новосибир. гос. техн. унив., 2005. -352 с.
- 2 РД 34.35.310-97. Общие технические требования к микропроцессорным устройствам защиты и автоматике энергосистем (с изм. 1.1998). Российское акционерное общество энергетики и электрификации «ЕЭС России». Департамент науки и техники.
- 3 SIEMENS SIPROTEC 7SJ61 v.4.0/4.1 Максимально - токовая защита, защита от перегрузки и защита двигателей

REFERENCES

- 1 S.M. Kuznetsov. Traction network protection against short circuit currents [Zashchita tyagovoy seti ot tokov korotkogo zamykaniya]. Novosibirsk. Novosibirsk St. Techn. Univ. Publ. 2005. 352 p.
- 2 General technical requirements for microprocessor protection and automation of power systems [RD 34.35.310-97. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya k mikroprotsessornym ustroystvam zashchity i av-tomatiki energosistem].
- 3 SIEMENS SIPROTEC 7SJ61 v.4.0/4.1 Maximum current protection, overload protection and motor protection with cell control functions. Manual C53000 П1140 C1181.

с функциями управления ячейкой. Руководство по эксплуатации. С53000 П1140 С118 1.

4 Schneider Electric. Sepam1000+. Подстанция. Трансформатор. Двигатель. Сборные шины. Защита и контроль.

5 Блок микропроцессорной релейной защиты БМРЗ-100. Руководство по эксплуатации. ДИВГ.648228.001 РЭ.

6 AREVA. Техническое описание MICOM P141, P142, P143. Защита линий. TG8612A.

7 ГОСТ 13109-97(2002). Электрическая энергия. Электромагнитная совместимость технических средств. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего применения. -М.: Стандартинформ, 2006. -31 с.

8 Закон РФ №4871-1 «Об обеспечении единства измерений». В ред. ФЗ№15 ФЗ от 10.01.2003 // СПС «Консультант-Плюс».

4 Schneider Electric. Sepam1000+. Substation. Transformer. Engine. Busbars. Protection and control.

5 Block of microprocessor relay protection BMRP-100. Manual. DIVG.648228.001 RE.

6 AREVA. Technical description MICOM P141, P142, P143. Lines protection. TG8612A.

7 GOST 13109-97 (2002). Electric Energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Quality standards of electrical energy in general power supply systems [Elektricheskaya energiya. Elektromagnitnaya sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego primeneniya]. Moscow. Standartinform Publ., 2006. 31 p.

8 Law of the Russian Federation No. 4871-1 "On ensuring the uniformity of measurements." In ed. Federal Law №15 Federal Law dated January 10, 2003.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: надежность, эксплуатация, транспортные системы, микропроцессорные устройства, релейная защита

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ: Аносов Владимир Николаевич, докт. техн. наук, доцент НГТУ
Жуловян Владимир Владимирович, докт. техн. наук, профессор НГТУ
Малозёмов Борис Витальевич, канд. техн. наук, доцент НГТУ
Порсев Евгений Георгиевич, докт. техн. наук, профессор НГТУ

ПОЧТОВЫЙ АДРЕС: 630092, г.Новосибирск, пр.К.Маркса, 20, НГТУ

РАСЧЕТ И УТОЧНЕНИЕ УСТАВОК МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ БЛОКОВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ ЛИНИЙ 6-10 кВ

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»

В.В. Жуловян, В.Н. Аносов, Б.В. Малозёмов, Е.Г. Порсев

CALCULATION AND REFINEMENT OF MICROPROCESSOR PROTECTIVE RELAY THRESHOLDS IN 6-10 KV LINES

Novosibirsk State Technical University (NSTU) 20, Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630092, Russia

Vladimir V. Zhulovyan (Holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Prof. of NSTU)

Vladimir N. Anosov (Holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Assoc. Prof. of NSTU)

Boris V. Malozemov (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of NSTU)

Evgeniy G. Porsev (Holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Prof. of NSTU)

ABSTRACT: The article describes the method of analytic calculation of a special factor, which is called the rating of characteristic, according to which the type of dependent characteristic is selected. Authors show how the issue of calculating and choosing the time threshold is being solved. The optimal thresholds and permissible limits are calculated according to the terms of coordination with the subsequent and previous protection. This procedure allows to make the calculation of various protection devices of both Russian and foreign manufacturers as well.

Keywords: reliability, operation, transportation systems, microprocessor devices, relay protection

Описан разработанный способ аналитического расчёта специального коэффициента, названного рейтингом характеристики, по которому и производится выбор типа зависимой характеристики. Показано, как решается вопрос расчёта и выбора уставки (коэффициента) времени. Рассчитаны оптимальные уставки и допустимые пределы по условиям согласования с последующей и предшествующей защитами. При этом составленная программа позволяет вести расчёт разных устройств защиты отечественных и зарубежных производителей.

К настоящему времени на линиях 6-10 кВ в эксплуатации имеются микроэлектронные и микропроцессорные устройства релейной защиты различных производителей – это такие устройства, как УЗА-АТ, БМРЗ, Сириус, ТЭМП, а также устройства и европейских фирм «Areva» (Alstom), «Microelettrica scientifica», «Siemens», «ABB» и др.

В отличие от электромеханических реле (РТ-85, РТВ и др.), имеющих одну характеристику зависимости времени срабатывания от тока, микропроцессорные устройства релейной защиты и автоматики (МП РЗА) имеют несколько характеристик. Устройства производителей России и стран СНГ, как правило, имеют одну независимую характеристику и от двух до пяти типов зависимых характеристик. Устройства европейских фирм имеют одну независимую характеристику и до 11 и более типов зависимых характеристик. Функции $t = f(i)$ зависимых характеристик описываются математическими формулами, выполненными: по стандарту Международной электротехнической комиссии (МЭК); по стандарту ANSI/IEEE (используют только европейские производители); по фирменной разработке (аналоги РТ-80, РТВ и др.).

Например, для реле с зависимыми характеристиками, выполненными по стандарту МЭК, зависимость между током и временем срабатывания выражается следующим образом

$$t = \frac{k\beta}{(I/I >)^{\alpha}} - 1, \quad (1)$$

где t – время срабатывания, с;

k – коэффициент времени;

I – ток в реле, А;

$I >$ – уставка тока срабатывания, А;

α, β – постоянные, значение которых даётся в документации производителя реле.

Основные требования к релейной защите достигаются следующим образом:

– чувствительность – расчётом уставки тока срабатывания с коэффициентом чувствительности не менее 1,5 в основной зоне защиты и не менее 1,2 в зоне резервирования в минимальном режиме работы системы;

– надёжность – за счёт двух моментов: конструктивного – это выбор аппаратуры по имеющейся статистике отказов; по уставкам релейной защиты (РЗ) – это обеспечение хорошего запаса по селективности;

– селективность – выбором уставок с большей степенью селективности по времени и току, а это возможно при использовании более подходящего типа характеристики. Желание иметь высокую селективность может противоречить требованию быстродействия, и тут важно находить разумный баланс;

– быстродействие – в зависимости от выбранного типа характеристики и уставок.

На этапах проектирования и ввода в эксплуатацию МП РЗА встаёт проблема выбора подходящего типа характеристики и расчёта уставок защиты. В [1] на примере аппаратуры Sepam (16 типов характеристик) рекомендуется начинать с пробы одной конкретной характеристики. В [2] с использованием аппаратуры Micom (11 типов характеристик) даются примеры применения конкретных характеристик для разных условий, что требует предварительных знаний и опыта. В обоих случаях предлагается действовать методом проб, а это с учётом необходимости согласования с нижестоящей и вышестоящей защитами весьма трудоёмко. Именно поэтому часто не используются зависимые характеристики, хотя они и обеспечивают лучшее согласование и селективность.

При создании компьютерной программы «Расчёт уставок релейной защиты линий 6–10 кВ с микропроцессорными защитами с зависимыми характеристиками» возникла проблема автоматизации выбора типа характеристики. Графический метод, принятый в [1, 2] для оценки селективности, рассчитан на визуальную оценку, что для автоматизации расчёта не подходит. Автором разработан и реализован алгоритм аналитического выбора типа характеристики. Для количественного анализа вводится новое понятие «рейтинг характеристики». Расчёт рейтинга всех характеристик позволяет аналитически оценить привлекательность каждой из них по условию согласования с нижестоящей и вышестоящей защитами.

Рейтинг характеристики – это некая вычисленная абстрактная величина, позволяющая сравнить эффективность использования характеристик устройств релейной защиты (УРЗ) для условий конкретной линии. В качестве примера рассмотрим расчёт защиты линии 2 на рисунке 1.

Токи короткого замыкания (КЗ) в начале линии 1 – 2600 А, в начале линии 2 – 7000 А; 1РЗ – нижестоящая защита с реле БМРЗ, тип характеристики – инверсная, ток срабатывания 350 А, уставка времени 0,3 с; 3РЗ – вышестоящая защита с реле УЗА-АТ, тип характеристики – зависимая нормальная, ток срабатывания 800 А, уставка времени 0,8 с; 2РЗ – рассчитываемая защита с реле REJ 525 «ABB» (имеет пять типов зависящих характеристик).

Ток срабатывания защиты рассчитывается по условиям отстройки от тока нагрузки, согласования с нижестоящей и с вышестоящей защитами и по чувствительности в соответствии с [3]. По этим условиям предварительно был принят ток срабатывания 500 А.

На рисунке 2 приведены перечень характеристик с рассчитанным рейтингом и меню вы-

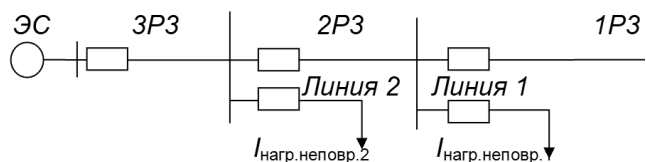


Рисунок 1 – Расчетная схема для выбора уставок релейной защиты 2РЗ

бора типа характеристики. Рейтинг рассчитан для первых трёх характеристик, с которыми задача имеет решение.

Реле – REJ 525		
Выберите тип характеристики с высоким Рейтингом		
1. Нормально инверсная	МЭК	0.50
2. Сильно инверсная	МЭК	8.20
3. Чрезвычайно инверсная	МЭК	5.48
4. Длительно инверсная	МЭК	Не согласована "сверху"
5. Инверсная типа – RI		Нет решения

8.2 – Сильно инверсная МЭК
5.48 – Чрезвычайно инверсная МЭК
0.50 – Нормально инверсная МЭК

Рисунок 2 – Перечень характеристик МП РЗА с рассчитанным рейтингом и меню выбора

Для пояснения приведена диаграмма, представленная на рисунке 3.

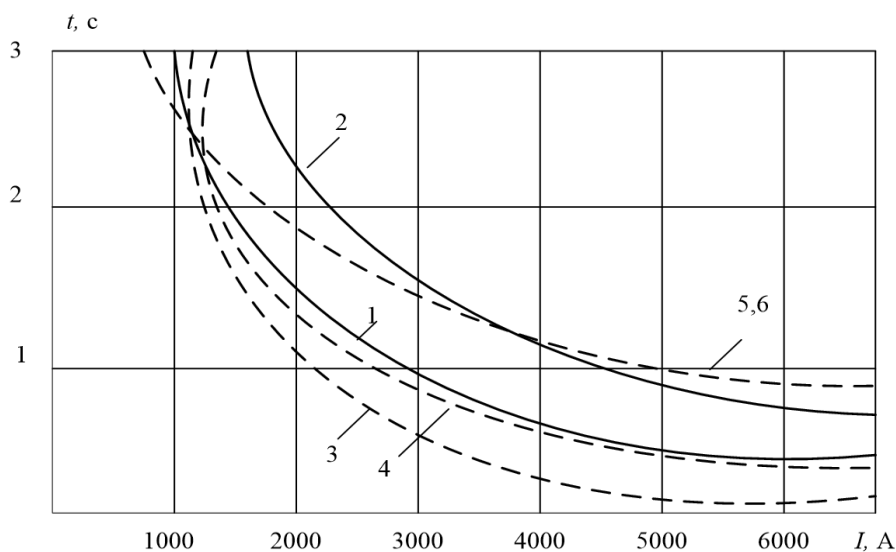


Рисунок 3 – Диаграмма выбора типа характеристики реле графическим методом

Для трёх типов характеристик, предлагаемых в меню на рисунке 3, построены кривые исходя из того, что при обеспечении условий приведённых далее выражений (2) и (3) в каждой точке кривой срабатывания нижестоящей защиты можно рассчитать минимально возможную уставку времени защиты 2РЗ [4]. Так построены кривые срабатывания 1, 3 и 5, обеспечивающие селективность с нижестоящей защитой (коэффициенты времени – 0,21, 0,13 и 0,25 соответственно). При обеспечении условий выражений (4) и (5) в каждой точке кривой срабатывания вышестоящей защиты можно рассчитать максимально возможную уставку времени защиты 2РЗ. Так построены кривые срабатывания 2, 4 и 6, обеспечивающие селективность с вышестоящей защитой (коэффициенты времени – 0,38, 0,20 и 0,25 соответственно).

$$I_{сз2} \geq k_{нс1} (I_{сз1} + I_{нагр.неповр.1}); \quad (2)$$

$$t_{сз2} \geq t_{сз1} + \Delta t_1; \quad (3)$$

$$I_{сз3} \geq k_{нс2} (I_{сз2} + I_{нагр.неповр.2}); \quad (4)$$

$$t_{сз3} \geq t_{сз2} + \Delta t_2, \quad (5)$$

где $I_{сз1}, I_{сз2}, I_{сз3}$ – ток, срабатывания защиты 1РЗ, 2РЗ и 3РЗ соответственно;

$k_{нс1}, k_{нс2}$ – коэффициенты надёжности;

$t_{сз1}, t_{сз2}, t_{сз3}$ – время срабатывания защиты 1РЗ, 2РЗ и 3РЗ соответственно;

$\Delta t_1, \Delta t_2$ – ступени селективности;

$I_{нагр.неповр.1}, I_{нагр.неповр.2}$ – токи нагрузки неповреждённых присоединений (рисунок 1).

Для данного расчёта было принято $k_{nc1} = k_{nc2} = 1,2$ и $\Delta t_1 = \Delta t_2 = 0,3$ с.

Итак, для каждой характеристики построены две кривые, образующие некий «коридор», в пределах которого защита линии согласована.

Кривые 1 и 2 (сильно инверсная характеристика, её рейтинг самый высокий) образуют самый широкий «коридор» (коэффициенты времени 0,21 и 0,38 соответственно). Можно выбрать уставку времени так, чтобы кривая срабатывания защиты лежала между кривыми 1 и 2. Это повысит запас по селективности.

Кривые 3 и 4 (чрезвычайно инверсная характеристика, её рейтинг средний) образуют менее широкий «коридор» (коэффициенты времени 0,13 и 0,20 соответственно). Возможности «манёвра» по улучшению селективности здесь меньше.

Кривые 5 и 6 (нормально инверсная характеристика, её рейтинг самый низкий). Здесь «коридор» вообще отсутствует (коэффициенты времени 0,25 и 0,25 соответственно), то есть ширина «коридора» нулевая. Можно реализовать защиту только на одной единственной уставке.

Получается, что каждая характеристика в конкретном расчёте может характеризоваться шириной «коридора».

Что касается характеристик (рисунок 2), не получивших рейтинг:

- длительно инверсная характеристика не согласуется с вышестоящей защитой. Это означает, что при принятых значениях k_{nc2} и Δt_2 при любой уставке времени, которую можно выставить на реле, расчётная характеристика недопустимо сближается с характеристикой вышестоящей защиты или даже пересекает её;

- «нет решения» для характеристики «инверсная типа RI» означает, что ширина «коридора» получилась отрицательной, то есть уставка времени по согласованию с вышестоящей защитой оказывается меньше уставки по согласованию с нижестоящей защитой, что недопустимо.

Из рассмотренного примера видно, что чем шире «коридор», тем больше возможность выбора уставки с увеличенным запасом по селективности и есть запас для увеличения уставки при наращивании потребляемой мощности.

Помимо формулы, описывающей функцию рассчитываемой характеристики, ширина «коридора» зависит от следующих параметров:

- уставок и формы характеристики нижестоящей и вышестоящей защит;
- токов КЗ (влияют на зону, в пределах которой производится согласование);
- всех величин, участвующих в выражениях (2)-(5). Например, уменьшение k_{nc2} или Δt_2 расширяет «коридор», но ухудшает селективность.

Алгоритм расчёта составлен так, что чем шире «коридор», тем выше будет рейтинг, а при близких значениях ширины «коридора» рейтинг будет выше у характеристики, обеспечивающей меньшее время срабатывания при больших токах.

При желании, а также при отсутствии явно выраженного лидера по рейтингу можно построить диаграмму, аналогичную рисунку 3 (по данным файла с рассчитанными кривыми в табличной форме). Таблица сопровождается примечанием с исходными и рассчитанными данными, необходимыми для анализа.

Особенностью выбора типа характеристики по рейтингу является то, что можно произвести несколько расчётов линии с разными типами МП РЗА (с неодинаковыми характеристиками), сравнить рейтинги их характеристик и выбрать наиболее подходящий тип МП РЗА.

Выбор уставки (коэффициента) времени производится аналитически. Продолжим рассмотрение на примере рисунка 1, но при наличии токовых отсечек: нижестоящая защита – уставка по току 1200 А, по времени 0,2 с; а для рассчитываемой линии по предварительному расчёту (по отстройке от КЗ на линии 1) приняты уставки – по току 3600 А, по времени 0,1 с. Для дальнейшего расчёта выберем характеристику с наивысшим рейтингом – сильно инверсную. Программа вычисляет нижний и верхний допустимые пределы уставки (коэффициента) времени по условиям согласования с нижестоящей и вышестоящей защитами и по техническим возможностям МП РЗА (по диапазону и дискретности уставок), которые оказываются равными 0,21 и 0,38 соответственно. Автоматически рассчитывается некоторая «оптимальная» уставка исходя из следующего:

- с целью повышения селективности она должна находиться посередине допустимого предела (в примере 0,21-0,38);

– с целью обеспечения быстродействия можно ограничиться заведомо достаточной ступенью селективности по времени от нижестоящей защиты (0,7 с заложено в программе). В примере «оптимальная» уставка получилась равной 0,25.

Окончательно уставка задаётся человеком, а программа контролирует корректность задания уставки.

По данным файла с рассчитанными кривыми в табличной форме можно построить диаграмму для анализа выбранных уставок графическим методом. На диаграмме (рисунок 4) для рассмотренного примера даны кривые срабатывания нижестоящей 1 и вышестоящей 5 защит, кривые срабатывания защиты линии на уставках, обеспечивающих согласование с нижестоящей 2 и вышестоящей 4 защитами, и на «оптимальной» уставке 3. Диаграмма позволяет наглядно оценить правильность выбранных уставок как по времени, так и по току.

Все исходные данные, введенные в ходе расчёта, запоминаются. Повторный расчёт занимает порядка 20 с, поэтому не составляет труда просчитать варианты с изменением каких-то данных (тока срабатывания $k_{\text{нс}2}$, Δt_2 с другой характеристикой и др.).

Могут выполняться расчёты устройств релейной защиты, если формулы, описывающие функцию $t = f(I)$, выполнены по стандартам МЭК или ANSI/IEEE либо используются формулы фирменной разработки, уже имеющиеся в составе программы.

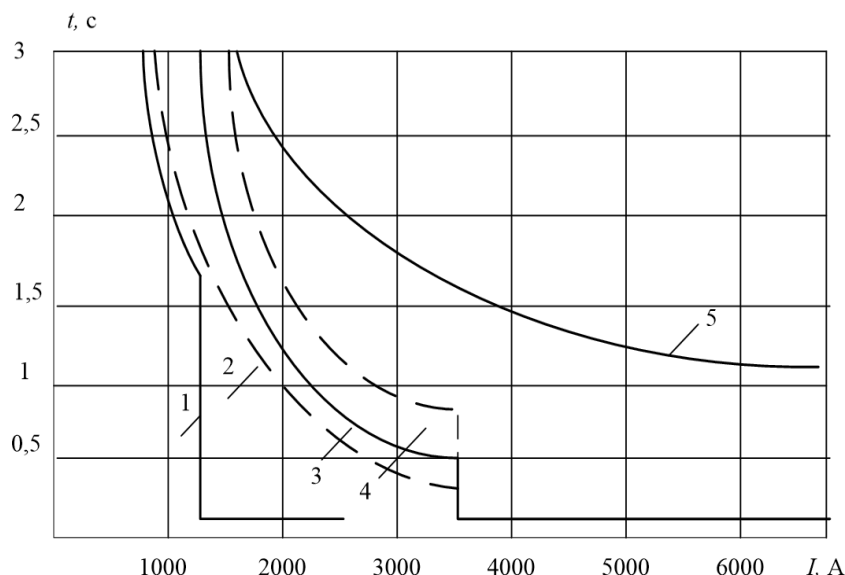


Рисунок 4 – Диаграмма селективности защиты линии с примыкающими защитами

Взаимодействие пользователя с программой по рассмотренному примеру происходит следующим образом:

- программа рассчитывает допустимый ток срабатывания максимальной токовой защиты (МТЗ) и токовой отсечки (ТО) по каждому из условий (отстройка, согласование, чувствительность);
- пользователь выбирает уставку;
- программа анализирует выбранную уставку и, если надо, корректирует её и выдаёт свои замечания;
- программа рассчитывает рейтинг каждого типа характеристики;
- пользователь выбирает характеристику по рейтингу или с дополнительным анализом диаграммы (аналогично рисунку 3);
- программа рассчитывает «оптимальную» уставку и допустимые пределы уставки по времени;
- пользователь выбирает уставку аналитически или по диаграмме (аналогично рисунку 4).

Расчёт окончен. Можно повторить расчёт частично или полностью.

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

- Разработан способ, позволяющий для рассчитываемой линии 6-10 кВ аналитически выбрать оптимальный тип зависимой характеристики устройства релейной защиты на мик-

ропроцессорной основе путём расчёта специального коэффициента, который назван рейтингом характеристики.

– По рейтингу характеристики можно подобрать и тип устройства защиты с более приемлемыми характеристиками для конкретной линии.

– Одновременное рассмотрение согласования с нижестоящей и вышестоящей защитами позволяет более гармонично выбрать уставки защиты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Соловьёв, А.П. Выбор характеристик и уставок защиты электрооборудования с использованием микропроцессорных терминалов / А.П. Соловьёв // -Библиотечка электротехника. -2008. - №4(112). -50 с.

2 Гловацкий, В.Г. Рекомендации по выбору уставок защит электротехнического оборудования с использованием микропроцессорных устройств концерна ALSTOM / В.Г. Гловацкий. -Киев: Энергомаш, 2000. -120 с.

3 Шабат, М.А. Расчёты релейной защиты и автоматики распределительных сетей / М.А. Шабат. -Л.: Энергоатомиздат, 1985. -296 с.

4 Флегинский, Н.М. Расчёт уставок релейной защиты линий 6-10 кВ с микропроцессорными защитами с зависимыми характеристика / Н.М. Флегинский // -Электрические станции. -2009. -№4. -С. 36-39.

REFERENCES

1 A.P. Solov'ev. Selection of characteristics and protection settings for electrical equipment using microprocessor terminals [Vybor kharakteristik i ustavok zashchity elektrooborudovaniya s ispol'zovaniem mikroprotssessornykh terminalov]. *Library of electrical engineering [Bibliotekha elektrotehnika]*. 2008. No. 4(112). 50 p.

2 V.G. Glavatskiy. Recommendations on the choice of electrical equipment protection set points using microprocessor devices of the ALSTOM concern [Rekomendatsii po vyboru ustavok zashchit elektrotekhnicheskogo oborudovaniya s is-pol'zovaniem mikroprotssessornykh ustroystv kontserna ALSTOM]. Kiev. Energomash Publ. 2000. 120 p.

3 M.A. Shabad. Calculations of relay protection and automation of distribution networks [Raschety releyroy zashchity i avtomatiki raspredelitel'nykh setey]. Leningrad. Energoatomizdat Publ. 1985. 296 p.

4 N.M. Fleginskiy. Calculation of set points for relay protection of 6-10 kV lines with microprocessor protection with dependent characteristics [Raschet ustavok releyroy zashchity liniy 6-10 kV s mikroprotssessornymi zashchitami s zavisimymi kharakteristika]. *Electric stations [Elektricheskie stantsii]*. 2009. No. 4. pp. 36-39.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: надёжность, эксплуатация, транспортные системы, микропроцессорные устройства, релейная защита

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ: Жуловян Владимир Владимирович, докт. техн. наук, профессор НГТУ
Аносов Владимир Николаевич, докт. техн. наук, доцент НГТУ
Малозёмов Борис Витальевич, канд. техн. наук, доцент НГТУ
Порсев Евгений Георгиевич, докт. техн. наук, профессор НГТУ

ПОЧТОВЫЙ АДРЕС: 630092, г.Новосибирск, пр.К.Маркса, 20, НГТУ

РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ГОРОДСКОГО ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА НА ОСНОВЕ НАУЧНОЙ КОНЦЕПЦИИ О ПОСТРОЕНИИ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»

А.Э. Аухадеев, Р.С. Литвиненко, Л.Н. Киснеева, А.Г. Хайруллин

DEVELOPMENT OF THE THEORY OF TRACTION POWER EQUIPMENT FOR CITY PUBLIC TRANSPORT ON THE BASIS OF "ELECTRIC TRACTION PROCESS DESIGN" SCIENTIFIC CONCEPT

Kazan State Power Engineering University (KSPEU) 51, Krasnoselskaya St., Kazan, 420066, Russia

Aver E. Aukhadееv (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of KSPEU)

Ruslan S. Litvinenko (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of KSPEU)

Lyaylya N. Kisneeva (Senior Lecturer of KSPEU)

Al'bert G. Khayrullin (Senior Lecturer of KSPEU)

ABSTRACT: Authors formulated a scientific concept based on a system-synergetic methodology, which allows interpreting the implementation of the operating modes of electric rolling stock as the topological basis of a multi-level configuration of an open complexly organized electric traction.

Keywords: city electric transport, traction power equipment, electric traction

Сформулирована основанная на системно-синергетической методологии научная концепция, позволяющая интерпретировать реализации режимов работы тягового электрооборудования электроподвижного подвижного состава как топологическую основу многоуровневой конфигурации открытого сложноорганизованного процесса электрической тяги.

Известно, что вопросы теории тягового электрооборудования (ТЭО) связанные с расчетом технологических режимов его работы лежат в предметной области теории электрической тяги (ЭТ). Этот факт определяет возможность развития теории и методов расчета рациональных режимов работы ТЭО путем совершенствования основополагающих представлений о принципах построения ЭТ как процесса преобразования электрической энергии в

целенаправленное механическое движение электроподвижного состава (ЭПС) при реализации всех технологических условий производственно-технической системы городского электрического транспорта (ГЭТ) [1, 2]. В данной научной статье сформулирована основанная на системно-синергетической методологии научная концепция о построении движения ЭПС, позволяющая интерпретировать ЭТ как открытый сложноорганизованный процесс, топологической основой многоуровневой конфигурации которого является работа ТЭО [3, 4]. Подобный подход позволит развить представления об особенностях формирования режима работы ТЭО, об архитектуре взаимодействий с другими техническими, технологическими и производственными процессами характеризующими реализацию ЭТ, что будет способствовать решению актуальной научной проблемы повышения эффективности использования электрической энергии в системе ГЭТ.

На основании предлагаемой научной концепции технологический процесс ЭТ, основной задачей которого является целенаправленное механическое движение ЭПС, реализуемое ТЭО, в общем случае может быть представлен совокупностью иерархически выстроенных подпроцессов. Для описания этих подпроцессов целесообразно воспользоваться теорией «построения движения», предложенной знаменитым биомехаником первой половины XX в. Н.А. Бернштейном [5] и нашедшей применение в баллистике и даже в мехатронике [6].

По этой теории реализация управляемого движения объектов или систем различной природы осуществляется посредством его «построения». При этом построение движения происходит в общем случае по пяти уровням («А», «В», «С», «D», «Е»), которые называются «уровни построения движения» [5]. Теория «построения движения» определяет механизмы контроля и управления движением, которые формируются особым образом по уровням и имеют сложную иерархическую структуру. Такой механизм «построения движения» позволяет организовать эффективный алгоритм «построения решений» в управлении движением сложных динамических систем [6].

Процесс движения ЭПС можно условно представить как «механическую» составляющую реализации ЭТ. Очевидно, что присутствует и «электротехническая» составляющая, которая определяет процессы преобразования электрической энергии, формирования электрических режимов ТЭО, взаимодействия с окружающей средой, энергетической системой, другими ЭПС и т.д. Такие процессы также имеют четкую иерархическую структуру и, в общем случае, могут быть представлены 5 уровнями построения системы ЭТ (как на постоянном, так и на переменном токе) [7].

Анализ условно выделенных механической и электротехнической составляющих технологического процесса ЭТ позволяет сделать выводы, что основной процесс также представляет собой систему уровней, связанных иерархической подчиненностью, и во взаимосвязи реализующих различные специфические задачи, которые в совокупности решают основную задачу. Реальный технологический процесс ЭТ невозможно однозначно разделить на механическую и электротехническую составляющие, но схожесть их иерархических структур позволяет сформулировать основные принципы построения процесса ЭТ: многоуровневость процесса, иерархичность уровней, параллельность и взаимосвязь подпроцессов, обмен энергетическими, материальными и информационными ресурсами.

С учетом вышесказанного сформулируем теоретическую систему (научную концепцию) построения процесса ЭТ в системе ГЭТ.

Многоуровневость процесса ЭТ, определяется наличием в его структуре нескольких подпроцессов, каждый из которых решает конкретную специфическую задачу, отличающуюся от других, но в совокупности с другими направленную на решение основной задачи процесса. Такой подпроцесс или группа подпроцессов может сформировать один из уровней системы. Так в структуре процесса ЭТ предлагается выделить 5 уровней.

– Уровень энергетического обеспечения ($У_1$). По аналогии с уровнем «А» построения движения является определяющим для всего процесса ЭТ. На данном уровне не происходит формирование ЭТ как таковой, а обеспечивается функциональная готовность процесса к деятельности путем обеспечения стабильного и надежного энергообеспечения перевозочного процесса.

– Уровень реализации работы тягового электрооборудования ($У_2$). По аналогии с уровнем «В», на данном уровне формируется подпроцесс, реализуемый в системе ограниченной собственными координатами объекта (в данном случае в системе ЭПС), без учета действия

внешних сил, но при условии обмена энергией, материей и веществом с внешней средой – нагревание и остывание ТЭО, электромагнитные взаимодействия, изменение влажности и т.д.

Подпроцесс данного уровня характеризуется определенными алгоритмами работы ТЭО и системой косвенного управления, которые определяются паспортными характеристиками входящих в них элементов. Данные алгоритмы формируются на этапе проектирования ЭПС и однозначно определяют реализуемые режимы работы.

– Уровень управляемого движения ЭПС (Y_3). На данном уровне, по аналогии с уровнем «С», формируется подпроцесс взаимодействия ЭПС с окружающим пространством и его элементами. Так при взаимодействии колесной пары с элементами пути возникает внешняя по отношению к ЭПС касательная сила тяги F_k , приводящая к движению, а электромеханические характеристики ТЭО формируют тяговую характеристику ЭПС. Создаваемая F_k является управляемой, что позволяет реализовать управляемое движение ЭПС. Различные параметры окружающего пространства, выражающиеся в физических характеристиках плана и профиля пути, климатических условий, напряжения на токоприемнике и др., определяют реализации ЭТ. Квалификации водителя на этом уровне не учитывается.

– Уровень реализации технологического процесса ГЭТ (Y_4). На данном уровне, по аналогии с уровнем «D», формируется подпроцесс взаимодействия ЭПС с окружающим пространством и его элементами с учетом их конкретных свойств и характеристик, например, реализация требуемой ходовой скорости на перегоне с учетом графика движения, обеспечение ограничения скорости на отдельных участках и др. Движение уже не просто «управляемое», а «целенаправленное», то есть направленное на достижение конкретной цели – обеспечение перевозки пассажиров по маршрутной сети в соответствии с технологией перевозочного процесса ГЭТ. На данном уровне ЭТ зависит от уровня профессиональной квалификации водителя или машиниста ЭПС.

– Уровень реализации производственного процесса ГЭТ (Y_5). Данный уровень системы построения ЭТ является абстрактным и соответствует уровню «Е» в теории построения движения. Условно, на этом уровне «выстраивается программа», по которой должен реализовываться процесс ЭТ, в соответствии с прогнозируемым «идеализированным» процессом, которая непрерывно управляет этим процессом и предопределяет его (например, прогнозируемые уровень потребления электроэнергии, пассажиропоток и др.). Данный подпроцесс выстраивается с учетом стратегии производственного процесса транспортного производства ГЭТ. Теоретическая система иерархии уровней построения процесса ЭТ графически представлена на рисунок 1.

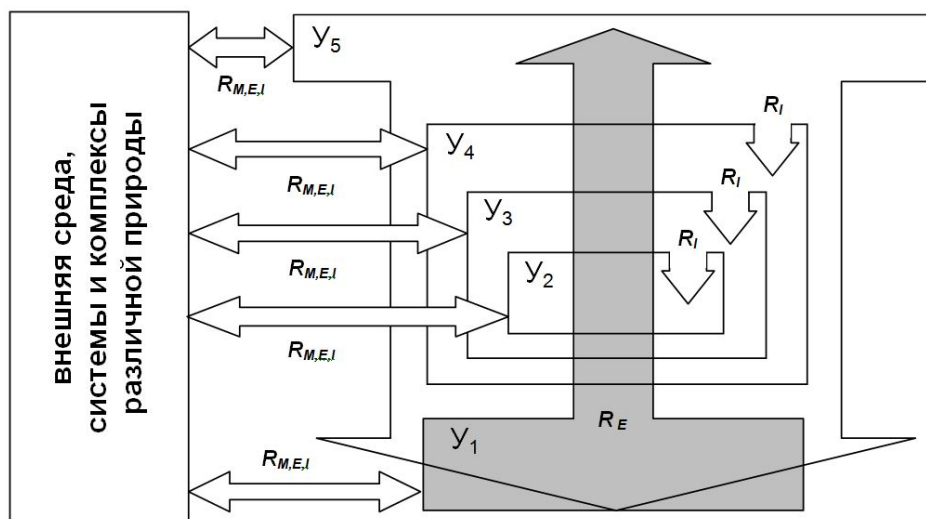


Рисунок 1 – Система построения процесса ЭТ: Y_1 - Y_5 -уровни построения процесса ЭТ; $R_{M,E,I}$ – материальные, энергетические, информационные ресурсы.

Иерархичность процесса ЭТ, определяется тем, что подпроцессы нижних уровней входят в состав подпроцессов более высоких уровней (рисунок 1). Процессы более высоких

уровней «подчиняют» себе подпроцессы более низких – задают параметры и условия их реализации (поток информационных ресурсов R_i). Чем выше уровень системы, тем более сложную задачу реализации ЭТ он решает и тем больше он открыт для взаимодействия $R_{M,E,I}$ с внешней средой и другими системами и комплексами различного назначения (природы).

Параллельность подпроцессов, происходящих на каждом уровне обусловлена механизмом реализации ЭТ и вертикальной иерархией уровней системы. Уровни более высокого порядка формируют свои подпроцессы не по окончании подпроцесса нижнего уровня системы, а в момент его реализации при непрерывном взаимодействии, что и определяет взаимосвязь подпроцессов. При этом реализацию своей специфической задачи вышестоящий уровень выстраивает на основе задачи нижестоящего уровня, полностью определяя условия и параметры ее реализации (рисунок 1).

Обмен энергетическими, материальными и информационными ресурсами $R_{M,E,I}$ между уровнями и внешней средой является одним из основных условий реализации процесса ЭТ в открытой сложноорганизованной системе ГЭТ [8]. Очевидно, что данное условие строго реализуется только в общем случае, а в реальных условиях, как правило, очевидны лишь некоторые взаимодействия. Так, например, очевидны обмены электрической, тепловой, механической энергией и др. Под материей обычно понимают только материально-технические ресурсы (в том числе финансовые и кадровые), хотя в общем случае можно предполагать и физические поля (электрические, магнитные, гравитационные и др.). Под обменом информацией, являющейся синергетической методологии «мерой Хаоса» согласно, будем понимать любые взаимодействия, приводящие к «повышению порядка» процессов и системы в целом. Это могут быть различные ограничения, условия, требования к параметрам протекающих процессов и явлений, выражающиеся в том числе и в регламентах, инструкция, нормах и др. То есть все то, что ограничивает («упорядочивает») многочисленное множество («Хаос») вариантов реализации того или иного процесса или его структуры. Условно структурная схема обмена энергетическими R_E , материальными R_M и информационными R_I ресурсами между уровнями построения ЭТ и внешней средой представлена также на рисунке 1.

На основании вышесказанного можно сделать вывод, что авторами сформулирована научная концепция, представляющая технологический процесс электрической тяги, основной задачей которого является преобразование электрической энергии источника в целенаправленное механическое движение ЭПС, совокупностью иерархически выстроенных подпроцессов, каждый из которых, находясь в подчинении подпроцесса вышестоящего уровня и формируя условия реализации подпроцесса нижестоящего, решает отдельную специфическую подзадачу построения движения ЭПС. Предложенная научная концепция о построении ЭТ позволит развить общую теорию ТЭО ГЭТ путем совершенствования методологических основ принципов формирования режимов работы ТЭО при реализации технологии перевозочного процесса в производственно-технической системе ГЭТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

- 1 Слепцов, М.А. Основы электрического транспорта / М.А. Слепцов, Г.П. Долаберидзе, А.В. Прокопович. -М.: ИЦ «Академия», 2006. -464 с.
- 2 Аухадеев, А.Э. Моделирование режимов тяги силового электрооборудования электрического транспорта / А.Э. Аухадеев. -Казань: Изд-во Каз. гос. энерг. ун-в., 2006. -176 с.
- 3 Рылов, Ю.А. Реализация электрической тяги в производственно-технической системе городского электрического транспорта / Ю.А. Рылов, А.Э. Аухадеев, А.Х. Мукимов, В.И. Каримов // -Современные научные исследования и разработки. -2017. -№8(16). -С. 487-491.
- 4 Аухадеев, А.Э. Городской электрический транспорт с позиций синергетической методологии / А.Э. Аухадеев, Р.С. Литвиненко, Ю.А. Рылов, А.Г. Хайруллин // -Мир транспорта и технологических машин. -2018. -№1(60). -С. 67-73.
- 5 Бернштейн, Н.А. О построении движений / Н.А. Бернштейн. -М.: Медгиз, 1947. -234 с.

- 1 M.A. Sleptsov, G.P. Dolaberidze, A.V. Prokopovich. Basics of electric transport [Osnovy elektricheskogo transporta]. Moscow. Akademiya Publ, 2006. 464 p.
- 2 A.E. Aukhadееv. Traction modes modeling of power electric equipment of electric transport [Modelirovaniye rezhimov tyagi silovogo elektrooborudovaniya elektricheskogo transporta]. Kazan'. Kaz an' St. Energy Univ. Publ. 2006. 176 p.
- 3 Ю.А. Рылов, А.Э. Аухадеев, А.Х. Мукимов, В.И. Каримов. The implementation of electric traction in the production and technical system of urban electric transport [Realizatsiya elektricheskoy tyagi v proizvodstvenno-tekhnicheskoy sisteme gorodskogo elektricheskogo transporta]. Modern research and development [Sovremennye nauchnye issledovaniya i razrabotki]. 2017. No. 8(16). pp. 487-491.
- 4 A.E. Aukhadееv, R.S. Litvinenko, Yu.A. Rylov, A.G. Khayrullin. City electric transport from the point of view of synergetic methodology [Gorodskoy elektricheskoy transport s pozitsiy sinergeticheskoy metodologii]. World of Transport and Technological Machines [Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin]. 2018. No. 1(60). pp. 67-73.
- 5 N.A. Bernshteyn. On the construction of motion [O postroenii dvizheniy]. Moscow. Medgiz Publ. 1947. 234 p.

6 Платонов, А.К. О построении движений в баллистике и мехатронике / А.К. Платонов // Прикладная механика и управление движением: сб. статей. -М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2010. -С. 127-222.

7 Сопов, В.И. Системы электроснабжения электрического транспорта на постоянном токе / В.И. Сопов, Н.И. Щуров. -Новосибирск: Изд-во Новосибир. гос. техн. унив., 2013. -728 с.

8 Аухадеев, А.Э. Саморазвитие транспортной системы современного города: Поиск инновационной модели интеллектуального управления / А.Э. Аухадеев. -М.: ВИНИТИ, 2014. -220 с.

6 A.K. Platonov. On the construction of motion in ballistics and mechatronics [O postroenii dvizheniy v ballistike i mekhatronike]. *Applied mechanics and motion control [Prikladnaya mekhanika i upravlenie dvizheniem]*. Moscow. Keldysh Inst. of Applied Mathematics, 2010. pp. 127-222.

7 V.I. Sopov, N.I. Shchurov. Electric power supply systems of the direct current electric transport [Sistemy elektrosnabzheniya elektricheskogo transporta na postoyannom toke]. Novosibirsk. Novosibirsk St. Techn. Univ. Publ. 2013. 728 p.

8 A.E. Aukhadееv. Self-development of the modern city transport system: Search for an innovative model of intelligent management [Samorazvitiye transportnoy sistemy sovremennogo goroda: Poisk innovatsionnoy modeli intellektual'nogo upravleniya]. Moscow. All Russian Inst. for Scientific and Techno Information of the Russian Acad. of Sciences. 2014. 220 p.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: городской электрический транспорт, тяговое электрооборудование, электрическая тяга, уровни построения движения
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ: Аухадеев Авер Эрикович, канд. техн. наук, доцент КГЭУ
 Литвиненко Руслан Сергеевич, канд. техн. наук, доцент КГЭУ
 Киснеева Ляйля Нургалеевна, старший преподаватель КГЭУ
 Хайруллин Альберт Гадильевич, старший преподаватель КГЭУ
ПОЧТОВЫЙ АДРЕС: 420066, г.Казань, ул.Красносельская, 51, КГЭУ

КОМПЬЮТЕРНАЯ ПРОГРАММА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНДУКТИВНОЙ НИЗКОЧАСТОТНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ПОМЕХИ ПО КОЭФФИЦИЕНТУ НЕСИММЕТРИИ НАПРЯЖЕНИЯ ПО ОБРАТНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Омский институт водного транспорта (филиал) ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»
 ООО «Вымпелсетьстрой»
 ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»

**А.И. Антонов, Ю.М. Денчик, М.Н. Иванов, М.Н. Иванов,
 А.А. Руппель, В.Г. Сальников**

COMPUTER PROGRAM FOR DETERMINATION OF CONDUCTIVE LOW-FREQUENCY ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE USING THE VOLTAGE UNBALANCE COEFFICIENT BY REVERSE SEQUENCE

Omsk Institute of Water Transport (branch) Siberian State University of Water Transport (OIWT) 4, Ivan Alekseev St., Omsk, 644099, Russia

Vympelset'stroi (Vympelset'stroi) 35, Varshavskoe shosse St., Moscow, 117105, Russia

Siberian State University of Water Transport (SSUWT) 33, Schetinkina St., Novosibirsk, 630099, Russia

Aleksandr I. Antonov (Senior Lecturer of OIWT)

Juliya M. Denchik (Ph.D. of Engineering Sciences, Lead Engineer of Vympelset'stroi)

Mikhail N. Ivanov (Ph.D. of Engineering Sciences, Senior Lecturer of SSUWT)

Mikhail N. Ivanov (Ph.D. of Engineering Sciences, Senior Lecturer of SSUWT)

Aleksandr A. Ruppel (Holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Prof. of OIWT)

Vasilij G. Sal'nikov (Holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Prof. of SSUWT)

ABSTRACT: The authors consider a software, which makes it possible to make an automated calculation of the probability of getting voltage unbalance coefficients by reverse sequence over the limits and the probability of conductive low-frequency electromagnetic interference with a given coefficient.

Keywords: voltage unbalance, quality of power supply, electromagnetic interference, electromagnetic compatibility, computer program

Рассматривается компьютерная программа для ЭВМ, позволяющая производить автоматизированный расчёт вероятности выхода коэффициентов несимметрии напряжений по обратной последовательности за нормируемые значения и вероятность появления кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи по данному коэффициенту.

Многие системы электроснабжения по ряду причин характеризуются некачественной электроэнергией, в результате чего обостряется проблема электромагнитной совместимости (ЭМС) технических средств. В связи с этим возникают кондуктивные низкочастотные электромагнитные помехи (ЭМП) в системах электроснабжения [1]. Данные ЭМП различаются по показателям качества электрической энергии (КЭ), в частности по коэффициенту несимметрии напряжений по обратной последовательности (δK_{2U}). Существует множество причин появления δK_{2U} [2].

Основным научным направлением решения проблемы ЭМС технических средств является улучшение электромагнитной обстановки (ЭМО). Однако, рассматриваемая проблема

достаточно многогранна и одна из научных задач – автоматизированное определение кондуктивных низкочастотных ЭМП по коэффициенту несимметрии напряжений по обратной последовательности на основе моделирования процессов несимметрии напряжений, необходимое для повышения качества функционирования сетей среднего напряжения – не решена.

Известные программные продукты, которые могут быть использованы для исследования режимов работы сетей с искажающей нагрузкой в рамках концепции подавления кондуктивных низкочастотных ЭМП и обеспечения нормируемых уровней ЭМС технических средств, представляются двумя семействами в зависимости от вида математической модели: модели в виде системы дифференциальных уравнений для математических программ (Mahtcad, MatLab, Simnon, Matrix и т.д.); модели в виде схем замещения (принципиальных схем, блок–схем) для программ моделирования Spice, Microcap, Electronics Workbench, Saber и т.д.) [3].

Однако, вышеперечисленные программы не имеют функциональных возможностей производить автоматизированное определение кондуктивных низкочастотных ЭМП δK_{2U} (параметры распределения, вероятность их появления), необходимое для повышения качества функционирования сетей среднего напряжения.

Поэтому разработана компьютерная программа, которая позволяет производить автоматизированный расчет параметров ЭМО на основании алгоритма определения кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи по коэффициенту несимметрии напряжений по обратной последовательности [4].

Разработанная программа для ЭВМ называется «Обработка экспериментальных данных показателей качества электрической энергии по коэффициенту несимметрии напряжений по обратной последовательности» [5]. Данная программа разработана в среде программирования LabVIEW – это графическая среда разработки, позволяющая управлять, синхронизировать и осуществлять обмен данными с аппаратными средствами, содержащая математические библиотеки, дающие возможность осуществлять их комплексный анализ, включая временной, амплитудный, спектральный, корреляционный, порядковый, статистический и др. [6].

Программа для ЭВМ, разработанная средствами LabVIEW, позволяет создавать пользователю удобный интерфейс, получить все необходимые значения для оценки результатов измерений показателей качества электрической энергии. Кроме того, большинство современных приборов для измерения показателей качества электроэнергии, включая измерительно-вычислительный комплекс (ИБК) «Омск-М», позволяет экспортировать результаты измерений в формате MS EXCEL [7].

Программирование осуществляется на уровне функциональных блок-схем (блок-диаграмм) с использованием графического языка G. IBM PC. Программа способна работать на операционных системах Microsoft Windows XP/2003/Vista/7/8/10. Объем программы – 210 Мб.

На рисунке 1 представлена блок-схема программы. Блок-схема представляет собой совокупность взаимосвязанных элементов и модулей, выполняющих определённые функции, такие как моделирование физических процессов, представление физических процессов передаточными функциями и т.д. Характеристика элементов блок-схемы приведена в таблице 1.

Программа для ЭВМ обеспечивает совместимость с MatLab (Simulink), имеет большое количество виртуальных приборов и средств управления и производит автоматизацию расчётов и вывода результатов (графики, диаграммы, осциллограммы, гистограммы и т.д.).

Для полного использования функциональных возможностей, необходимо создать инсталлятор, то есть загрузочный файл (Setup), позволяющий установить программу на компьютер [7].

После установки программы на компьютер через загрузочный файл, она готова к работе. Интерфейс программы представлен на рисунке 2.

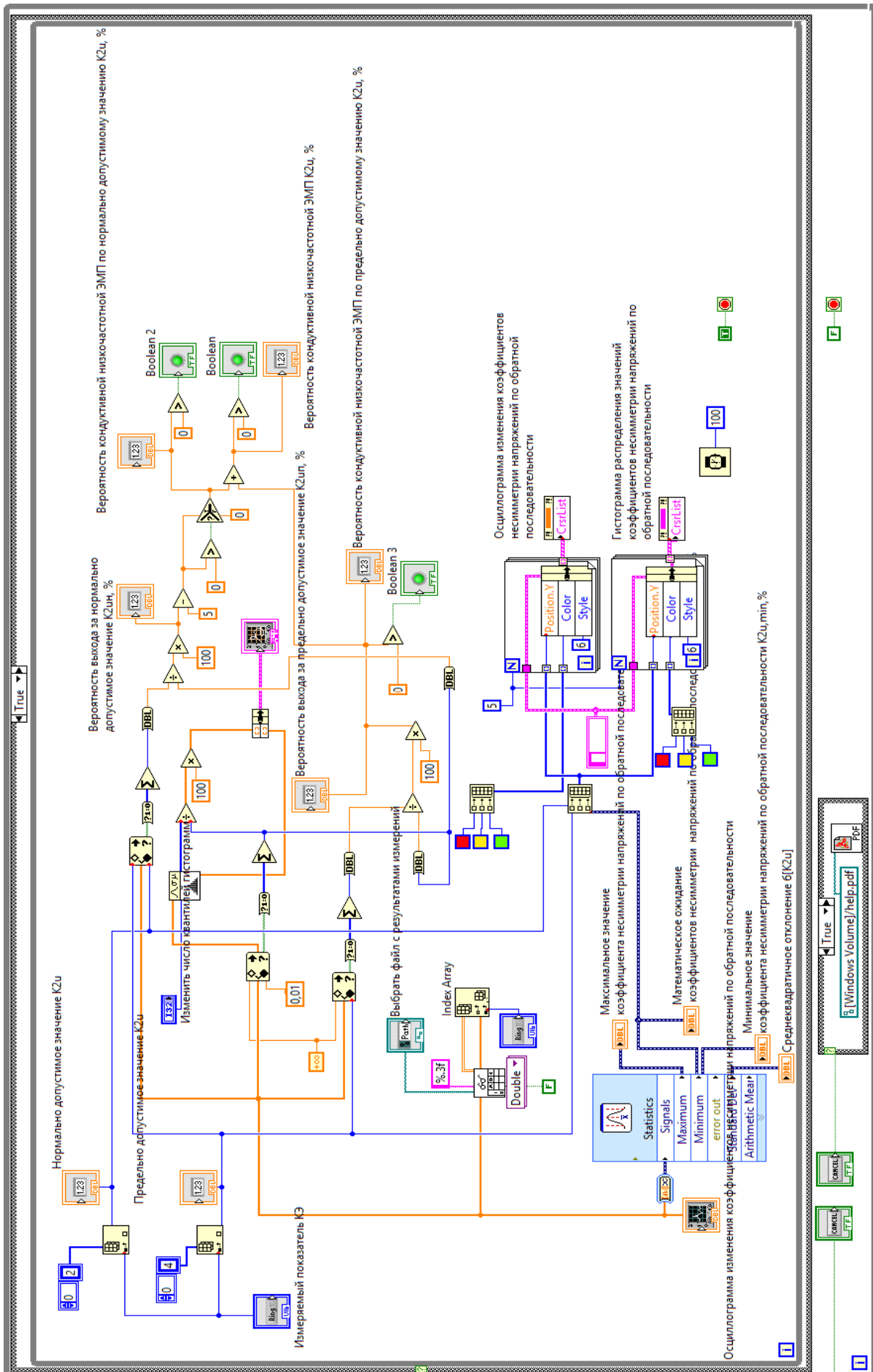
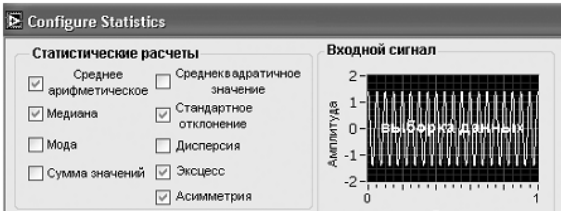
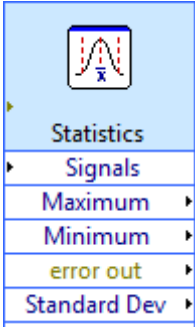
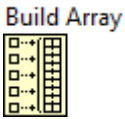


Рисунок 1 – Блок-схема программы для ЭВМ

Таблица 1 – Характеристика элементов блок-схемы

Элемент блок-схемы	Описание элемента
	Виртуальный прибор для выбора файла с результатами экспериментальных исследований
	Блок выбора столбца данных в массиве
	Осциллограмма изменения коэффициентов несимметрии напряжений по обратной последовательности
	Гистограмма распределения значений коэффициентов несимметрии напряжений по обратной последовательности
	Окно настройки выходных данных виртуального прибора статистической обработки
	Окно настройки выходных данных виртуального прибора статистической обработки
	Виртуальный прибор, формирующий массив данных
	Виртуальный прибор для расчёта параметров гистограммы
	Цветовой индикатор
	Виртуальный прибор выбора цвета курсоров
	Кнопка True/False
	Массив констант
	Сумма всех входящих значений

Программа работает с массивом данных. С помощью измерительно-вычислительных комплексов (например, ИБК «Омск-М»), можно получить массив данных, принадлежащий генеральной совокупности. В данных ИБК применяют математико-статистические методы оценки генеральной совокупности с помощью выборочной. Причем выборочный контроль может быть как одноступенчатым, так и многоступенчатым, что повышает надёжность исследований.

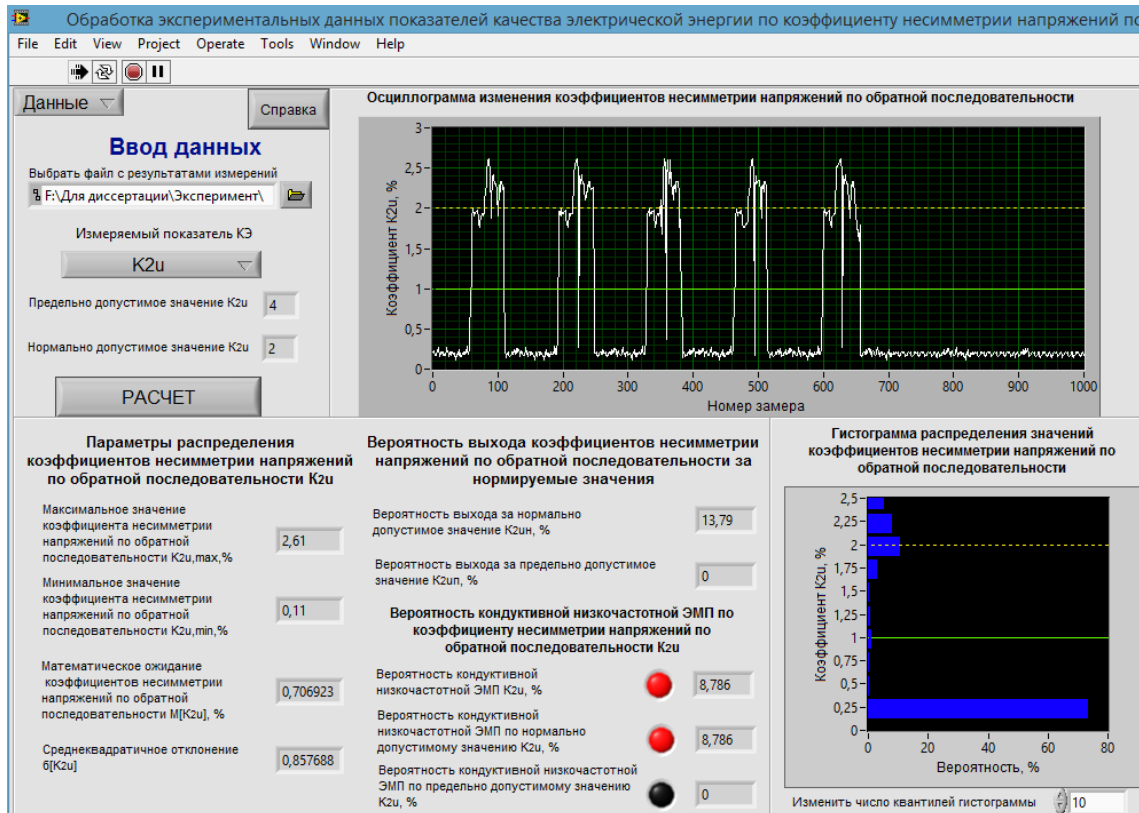


Рисунок 2 – Интерфейс программы для ЭВМ «Обработка экспериментальных данных показателей качества электрической энергии по коэффициенту несимметрии напряжений по обратной последовательности»

Для проведения статистической обработки полученных данных, предлагается сначала экспортировать эти данные в документ MS EXCEL. Это не представляет каких-либо технических сложностей, так как большинство современных ИБК позволяют экспортировать результаты измерений в формате MS EXCEL.

После этого следует пересохранить полученные файлы из формата MS EXCEL как текстовые файлы (с разделителями табуляции). Сохранённый файл с полученными в ходе исследований данными необходимо ввести в программу с помощью функции «ввод данных». В программе уже заложены границы нормально допустимых и предельно допустимых значений δK_{2u} , приведённых в [1].

Для построения программой гистограммы распределения значений необходимо выбрать число квантилей гистограммы. Рекомендуется число квантилей выбирать таким образом, чтобы граница квантиля совпадала с границей нормируемого значения, а их количество было минимальным для заданной точности расчета.

После ввода массива данных в программу для ЭВМ, происходит обработка этих данных: программа производит автоматизированный расчёт параметров закона распределения случайной величины δK_{2u} , таких как математическое ожидание $M[\delta K_{2u}]$ и среднеквадратичное отклонение $\sigma[\delta K_{2u}]$ (рисунок 3); определяет вероятности появления исследуемой помехи $P(\delta K_{2u})$ за расчётный период (рисунок 4). Если вероятности кондуктивной низкочастотной ЭМП по нормально и (или) предельно допустимым значениям превышают нормируемые, то световая индикация изменяет свой цвет на красный.

Параметры распределения коэффициентов несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2u}

Максимальное значение коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности $K_{2u, \max}$, %

Минимальное значение коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности $K_{2u, \min}$, %

Математическое ожидание коэффициентов несимметрии напряжений по обратной последовательности $M[K_{2u}]$, %

Среднеквадратичное отклонение $\sigma[K_{2u}]$

Рисунок 3 – Параметры распределения значений δK_{2u}

Вероятность выхода коэффициентов несимметрии напряжений по обратной последовательности за нормируемые значения

Вероятность выхода за нормально допустимое значение $K_{2uн}$, %

Вероятность выхода за предельно допустимое значение $K_{2uп}$, %

Вероятность кондуктивной низкочастотной ЭМП по коэффициенту несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2u}

Вероятность кондуктивной низкочастотной ЭМП K_{2u} , %

Вероятность кондуктивной низкочастотной ЭМП по нормально допустимому значению K_{2u} , %

Вероятность кондуктивной низкочастотной ЭМП по предельно допустимому значению K_{2u} , %

Рисунок 4 – Вероятность выхода δK_{2u} за нормируемые значения

Кроме этого, программа позволяет визуализировать массив данных, полученный в ходе экспериментальных исследований, с помощью осциллограммы (рисунок 5) и гистограммы (после определения ИВК закона распределения значений δK_{2u} как случайной величины теории вероятностей и математической статистики)

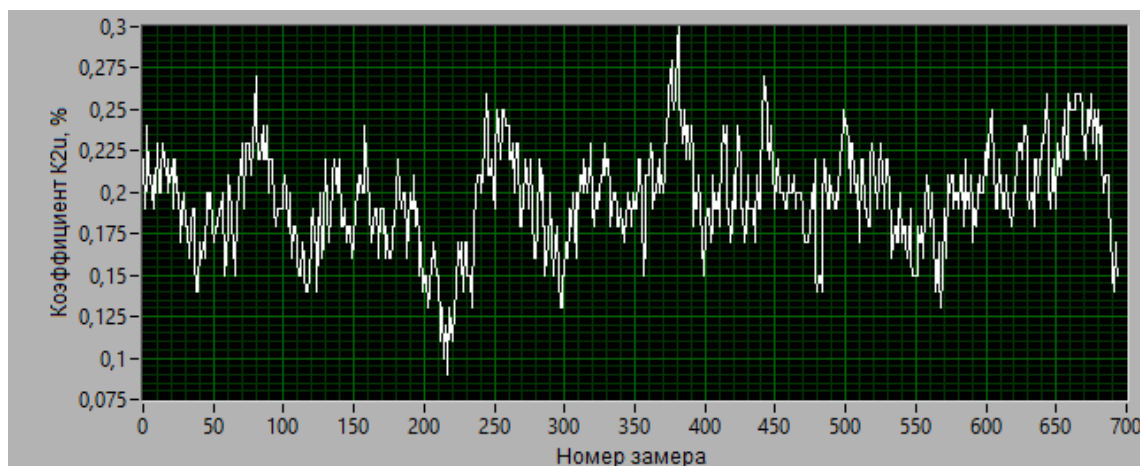


Рисунок 5 – Осциллограмма массива данных

На данную программу получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [5].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 ГОСТ 32144-2013. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. -Взамен ГОСТ 13109-97; введ. 2014-07-01. - М.: Стандартинформ, 2014. -20 с.
- 2 Данилов, Г.А. Повышение качества функционирования линий электропередачи / Г.А. Данилов, Ю.М. Денчик, М.Н. Иванов, Г.В. Ситников, под ред. В.П. Горелова, В.Г. Сальникова. -Новосибирск: Новосиб. гос. акад. водн. трансп., 2013. -559 с.
- 3 Пугачёв, В.С. Теория вероятностей и математической статистики / В.С. Пугачёв. -М.: Наука, 1979. -478 с.
- 4 Алгоритм определения кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи по коэффициенту несимметрии напряжений по обратной последовательности / А.И. Антонов, Ю.М. Денчик, Д.А. Зубанов [и др.]. // - 248

REFERENCES

- 1 GOST 32144-2013. Interstate standard. Electric Energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Standards of quality of electrical energy in general-purpose power supply systems [Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya]. Moscow. Standartinform Publ. 2014. 20 p.
- 2 G.A. Danilov, Yu.M. Denchik, M.N. Ivanov, G.V. Sitnikov. Improving the functioning quality of power lines [Povyshenie kachestva funktsionirovaniya liniy elektroperedachi]. Novosibirsk. Novosibirsk St. Acad. of Water Transp. Publ. 2013. 559 p.
- 3 B.C. Pugachev. Probability Theory and Mathematical Statistics [Teoriya veroyatnostey i matematicheskoy statistiki]. Moscow. Nauka Publ. 1979. 478 p.
- 4 A.I. Antonov, Yu.M. Denchik, D.A. Zubanov. Algorithm for determining conductive low-frequency electromagnetic interference by the stress asymmetry coefficient by reverse order [Algoritm opredeleniya

№23380; заявл. 27.12.2017 г.; опубл. хроники объединённого фонда электронных ресурсов «Наука и образование» №12 (103) декабрь 2017 -С. 65.

5 Государственная регистрация программы для ЭВМ RU2016661752. Обработка экспериментальных данных показателей качества электрической энергии по коэффициенту несимметрии напряжений по обратной последовательности / А.И. Антонов, Ю.М. Денчик, Д.А. Зубанов [и др.]. -№2016619225; заявл. 30.08.16, опубл. 20.11.16. Бюл 11(121). -1 с.

6 Суранов, А.Я. LabVIEW 8.20: Справочник по функциям / А.Я. Суранов. -М.: ДМК Пресс, 2007. -536 с.

7 Зубанов, Д.А. Обработка результатов экспериментальных исследований показателей качества электрической энергии средствами программы LabView / Д.А. Зубанов, В.И. Клеутин, А.А. Сидоренко и др. // -Сб. науч. тр. ОИВТ. -2012. -№10. -С. 118-122.

konduktivnoy nizkочастотnoy elektromagnitnoy pomekhi po koeffitsientu nesimmetrii napryazheniy po obratnoy posledovatel'nosti]. Chronicles of the united fund of electronic resources "Science and Education" [Khroniki ob'edinennogo fonda elektronnykh resursov "Nauka i obrazovanie"]. No. 12(103). 2017. pp. 65.

5 State registration of program for computer machines RU2016661752. Processing the experimental data on the quality of electrical energy according to the stress asymmetry coefficient in the reverse order.

6 A.Ya. Suranov. LabVIEW 8.20: Function guide [LabVIEW 8.20: Spravochnik po funktsiyam]. Moscow. DMK Press Publ. 2007. 536 p.

7 D.A. Zubanov, V.I. Kleutin, A.A. Sidorenko. Processing the results of experimental studies of electric energy quality indicators by means of the LabView program [Obработка rezul'tatov eksperimental'nykh issledovaniy pokazateley kachestva elektricheskoy energii sredstvami programmy LabView]. -Omsk. Omsk Inst. of Water Transp. Publ. 2012. No. 10. pp. 118-122.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: несимметрия напряжений, качество электроэнергии, электромагнитная помеха, электромагнитная совместимость, компьютерная программа

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ: Антонов Александр Игоревич, старший преподаватель ОИВТ (филиал) ФГБОУ ВО «СГУВТ»

Денчик Юлия Михайловна, канд. техн. наук, ведущий инженер ООО «Вымпелсетьстрой»

Иванов Михаил Николаевич, канд. техн. наук, старший преподаватель ФГБОУ ВО «СГУВТ»

Иванов Михаил Николаевич, канд. техн. наук, старший преподаватель ФГБОУ ВО «СГУВТ»

Руппель Александр Александрович, докт. техн. наук, профессор ОИВТ (филиал) ФГБОУ ВО «СГУВТ»

Сальников Василий Герасимович, докт. техн. наук, профессор ФГБОУ ВО «СГУВТ»

ПОЧТОВЫЙ АДРЕС: 644099, г.Омск, ул.И.Алексеева, 4, ОИВТ (филиал) ФГБОУ ВО «СГУВТ»

117105, г.Москва, ул.Варшавское шоссе, 35, ООО «Вымпелсетьстрой»

630099, г.Новосибирск, ул.Щетинкина, 33, ФГБОУ ВО «СГУВТ»

КРИТЕРИЙ ВЛИЯНИЯ НЕСИММЕТРИЧНОЙ НАГРУЗКИ В НИЗКОВОЛЬТНОЙ СЕТИ НА ИСКАЖЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В СЕТИ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

Омский институт водного транспорта (филиал) ФГБОУ ВО
«Сибирский государственный университет водного транспорта»
ООО «Вымпелсетьстрой»
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»

**А.И. Антонов, Ю.М. Денчик, М.Н. Иванов, Е.В. Иванова,
А.А. Руппель, В.Г. Сальников**

CRITERION OF ASYMMETRIC LOAD EFFECT IN A LOW-VOLTAGE GRID ON DISTORTION OF VOLTAGE IN A MEDIUM VOLTAGE GRID

Omsk Institute of Water Transport (branch) Siberian State University of Water Transport (OIWT) 4, Ivan Alekseev St., Omsk, 644099, Russia

Vympelset'stroi (Vympelset'stroi) 35, Varshavskoe shosse St., Moscow, 117105, Russia

Siberian State University of Water Transport (SSUWT) 33, Schetinkina St., Novosibirsk, 630099, Russia

Aleksandr I. Antonov (Senior Lecturer of OIWT)

Juliya M. Denchik (Ph.D. of Engineering Sciences, Lead Engineer of Vympelset'stroi)

Mikhail N. Ivanov (Ph.D. of Engineering Sciences, Senior Lecturer of SSUWT)

Elena V. Ivanova (Holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Prof. of SSUWT)

Aleksandr A. Ruppel (Holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Prof. of OIWT)

Vasiliy G. Sal'nikov (Holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Prof. of SSUWT)

ABSTRACT: An empirical mathematical model shows that the level of effect of a distorting load in a 0.4 kV power grid on a 10 kV grid depends on the impedance of the power step-down transformer.

Keywords: distorting load, power supply quality, adjacent grid, electromagnetic compatibility, mathematical model

Приведена эмпирическая математическая модель, на основании которой видно, что критерий влияния искажающей нагрузки в сети 0,4 кВ на сеть 10 кВ зависит от полного сопротивления силового понижающего трансформатора.

Большинство экспериментальных исследований проводятся в рабочей сети 0,4 кВ, так как проведение пассивных экспериментальных исследований в сети 10 кВ технически затруднено и функционально не представляется возможным. Поэтому на основании проблемно-ориентированных математических моделей объекта исследования разработана имитационная модель, которая позволяет проводить активные эксперименты в смежных электри-

ческих сетях 0,4 кВ и 10 кВ.

На данном объекте исследования в сети 0,4 кВ присутствует несимметричная резкопеременная нагрузка. Данной нагрузкой являются 4 двухфазные дуговые сталеплавильные печи, каждая мощностью 170 кВ·А. Дуговые двухфазные сталеплавильные печи рассматриваются как приёмники электроэнергии с несимметричными электрическими параметрами (комплексными сопротивлениями фаз). Они являются нагрузкой, искажающей электрическую сеть среднего напряжения, то есть сеть 10 кВ является в данном случае рецептором. Чтобы определить данные сети как рецепторы технологической зависимости от искажающей электрической нагрузки, необходимо определить критерий влияния несимметричной нагрузки в сети 0,4 кВ на искажение напряжения в сети 10 кВ.

Имитационная модель (рисунок 1) позволяет провести активные эксперименты на объекте исследования в сетях 10/0,4 кВ [1]. Объект исследования состоит из источника питания напряжением 10 кВ, силового понижающего трансформатора ТМЗ 1000-10/0,4, четырёх трансформаторов ОЭСК 250/40, четырёх установок электрошлакового литья с дуговым способом нагрева, работающих при напряжении 42 В.

В ходе исследований определено, что значения получаемых по результатам моделирования коэффициентов несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} зависят от мощности несимметричной нагрузки и мощности силового трансформатора. В общем случае можно записать

$$\left[K_{2U(0,4)}, K_{2U(10)} \right] = f(S_{тр}, S_{нагр.}), \quad (1)$$

где $K_{2U(10)}$ — значение K_{2U} в сети 10 кВ;

$K_{2U(0,4)}$ — значение K_{2U} в сети 0,4 кВ;

$S_{тр}$ — мощность силового понижающего трансформатора;

$S_{нагр.}$ — мощность искажающей сеть нагрузки.

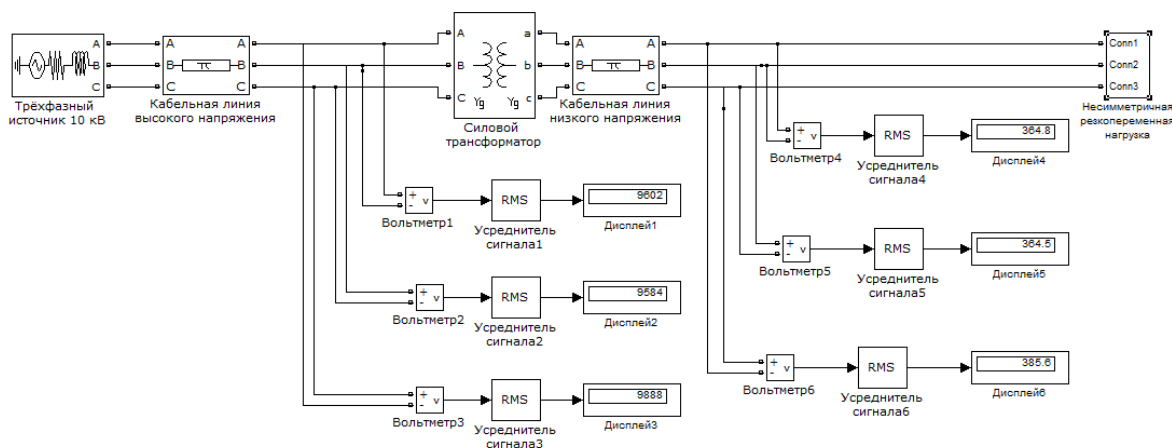


Рисунок 1 – Имитационная модель исследуемой сети объекта исследования с резкопеременной нагрузкой

Введём величину λ , позволяющую оценивать K_{2U} в смежных сетях общего назначения по электрической цепи «источник несимметрии напряжений – система электроснабжения общего назначения». Данная величина является критерием распределения кондуктивной низкочастотной ЭМП по K_{2U} . В нашем случае, воздействие несимметричной нагрузки оказывается со стороны низкого напряжения, соответственно величина λ является критерием распределения кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи (ЭМП) по K_{2U} (δK_{2U}) от сети 0,4 кВ в сеть 10 кВ.

Поскольку величина λ по своей сути является некоторым коэффициентом, определяющим изменения значений δK_{2U} при переходе кондуктивной низкочастотной ЭМП в смежную сеть, то справедливо записать следующее выражение

$$\lambda = \frac{K_{2U(10)}}{K_{2U(0,4)}}. \quad (2)$$

На основе экспериментальных данных активного эксперимента получена величина λ для сети объекта исследования при мощности силового трансформатора 1000 кВ·А, (0,548). Механизм распространения кондуктивной низкочастотной ЭМП от сети 0,4 кВ в сеть 10 кВ для объекта исследования представлен на рисунке 2.

На основе экспериментальных данных получена величина λ при различных мощностях силового трансформатора. При этом обнаружено, что при увеличении мощности силового трансформатора величина λ растёт. Объясняется это тем, что при увеличении мощности трансформатора уменьшается его сопротивление. Зная полное сопротивление Z трансформаторов различной мощности, построен график зависимости величины λ от этих сопротивлений (рисунк 3).

Из данного графика видно, что зависимость между величиной λ и полным сопротивлением Z силового понижающего трансформатора 10/0,4 кВ нелинейная. Получим эмпирическую математическую модель для данной зависимости.

Эта зависимость имеет следующий вид [2]

$$y = a \exp(bZ). \quad (3)$$

Прежде чем определять численные значения коэффициентов в выбранной эмпирической формуле, необходимо проверить возможность её использования методом выравнивания. Лишь после этого можно перейти к отысканию тех значений постоянных коэффициентов, которые дадут наилучшее приближение опытных и вычисленных величин.

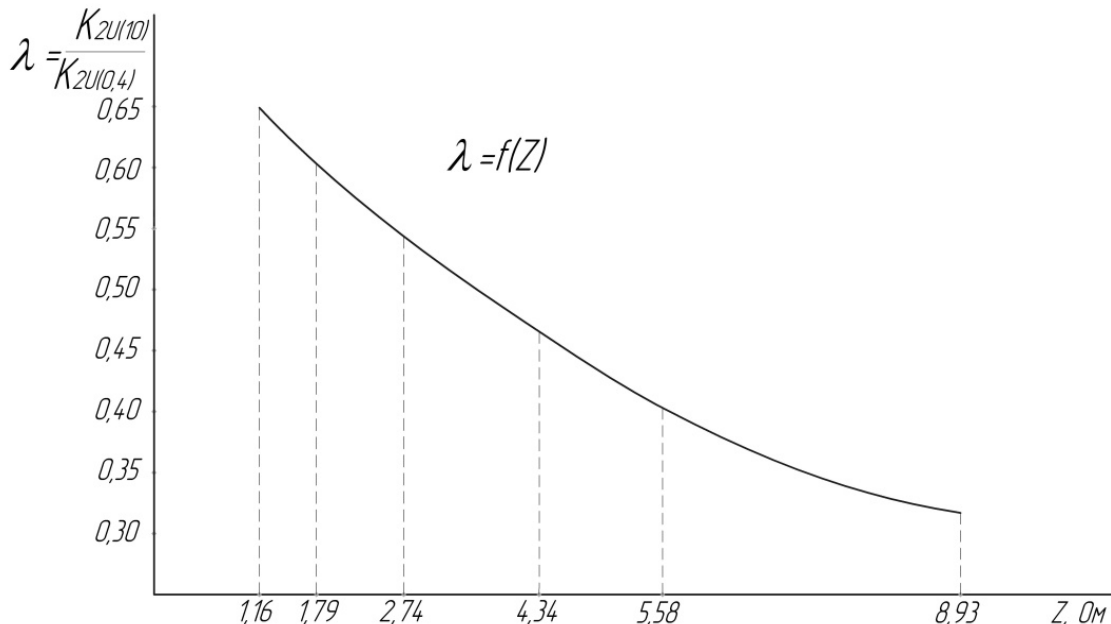


Рисунок 3 – Зависимость величины λ от полного сопротивления силового трансформатора

Используя метод выравнивания путём логарифмирования, получаем [3]

$$\lg \lambda = \lg a + \frac{b}{2,303} Z. \quad (4)$$

Все данные, необходимые для дальнейших вычислений, представлены в таблице 1

Таблица 1 – Исходные данные для получения эмпирической математической модели

№	Величина λ	Мощность трансформатора S , кВ·А	Полное сопротивление трансформатора Z , Ом	$\lg \lambda$
1	0,317	250	8,93	-0,499
2	0,403	400	5,58	-0,395
3	0,468	630	4,34	-0,329
4	0,548	1000	2,74	-0,261
5	0,603	1600	1,79	-0,219
6	0,649	2500	1,16	-0,188

Определяем коэффициенты, входящие в эмпирическую формулу способом средних значений. Для этого составляем 6 уравнений (так как имеются 6 пар значений Z и $\lg \lambda$). Преобразуя уравнение (4) и зная численные значения исходных данных, получаем систему дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned} -0,499 &= \lg a + 3,878b; \\ -0,395 &= \lg a + 2,423b; \\ -0,329 &= \lg a + 1,884b; \\ -0,261 &= \lg a + 1,189b; \\ -0,219 &= \lg a + 0,777b; \\ -0,188 &= \lg a + 0,504b. \end{aligned}$$

Разбиваем полученные 6 уравнений на две равные группы по 3 условных уравнения, а затем суммируем их, получая систему двух уравнений с двумя неизвестными

$$\begin{cases} -1,223 = 3\lg a + 8,185b \\ -0,668 = 3\lg a + 2,47b \end{cases}$$

Решая систему двух уравнений, находим: $a = 0,719$; $b = -0,097$. Эмпирическая математическая модель примет вид

$$\lambda = 0,72 \frac{1}{\exp(0,1Z)}. \quad (6)$$

Для проверки полученной математической модели вычислим относительные погрешности значений, полученных эмпирически λ_z и значений, рассчитанных по данной математической модели λ_p (5). Относительная погрешность Δ вычисляется по формуле [4]

$$\Delta = \frac{|\lambda_z - \lambda_p|}{\lambda_z} 100\%. \quad (7)$$

Зная относительную погрешность для каждого значения величин λ_z и, можно определить среднее значение относительной погрешности Δ_{cp} значений этих величин. Все полученные значения сведены в таблице 2.

Таблица 2 – Относительная погрешность Δ величин λ_z и λ_p

№	Эмпирическое значение критерия λ_z	Расчётное значение критерия λ_p	Относительная погрешность величин λ_z и λ_p , %	Среднее значение относительной погрешности Δ_{cp} , %
1	0,317	0,302	4,7	1,9
2	0,403	0,418	3,7	
3	0,468	0,472	0,9	
4	0,548	0,551	0,5	
5	0,603	0,604	0,2	
6	0,649	0,641	1,2	

Таким образом, среднее значение относительной погрешности значений, рассчитанных по (6), составляет 1,9%.

Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что мощность силового трансформатора для смежных сетей влияет на критерий влияния несимметричной нагрузки в низковольтной сети на искажение напряжения в сети среднего напряжения. При этом необходимо иметь ввиду, что в сетях с более высоким напряжением мощность трёхфазного короткого замыка-

ния имеет большее значение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Герман-Галкин, С.Г. Электрические машины: лабораторные на ПК / С.Г. Герман-Галкин, Г.А. Кардонов. - СПб.: КОРОНА принт, 2003. -256 с.
- 2 Пугачёв, В.С. Теория вероятностей и математической статистики / В.С. Пугачёв. -М.: Наука, 1979. - 478 с.
- 3 Батунер, Л.М. Математические методы в химической технике / Л.М. Батунер, М.Е. Позин. - Л.: Химия, 1971. -824 с.
- 4 Авдеев, Б.Я. Основы метрологии и электрические измерения: учеб. для вузов / Б.Я. Авдеев [и др.]. - Л.: Энергоатомиздат, 1987. -480 с.

REFERENCES

- 1 S.G. German-Galkin, G.A. Kardonov. Electrical machines: lab works on PC [Elektricheskie mashiny: laboratornye na PK]. S.Petersburg. KORONA print Publ. 2003. 256 p.
- 2 B.C. Pugachev. Probability Theory and Mathematical Statistics [Teoriya veroyatnostey i matematicheskoy statistiki]. Moscow. Nauka Publ. 1979. 478 p.
- 3 L.M. Batuner, M.E. Pozin. Mathematical methods in chemical engineering [Matematicheskie metody v khimicheskoy tekhnike]. Leningrad. Khimiya Publ. 1971. 824 p.
- 4 B.Ya. Avdeev. Fundamentals of Metrology and Electrical Measurements [Osnovy metrologii i elektricheskie izmereniya]. Leningrad. Energoatomizdat Publ. 1987. 480 p.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

искажающая нагрузка, качество электроэнергии, смежные сети, электромагнитная совместимость, математическая модель

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

*Антонов Александр Игоревич, старший преподаватель ОИВТ (филиал) ФГБОУ ВО «СГУВТ»
Денчик Юлия Михайловна, канд. техн. наук, ведущий инженер ООО «Вымпелсетьстрой»
Иванов Михаил Николаевич, канд. техн. наук, старший преподаватель ФГБОУ ВО «СГУВТ»
Иванова Елена Васильевна, докт. техн. наук, профессор ФГБОУ ВО «СГУВТ»
Руппель Александр Александрович, докт. техн. наук, профессор ОИВТ (филиал) ФГБОУ ВО «СГУВТ»
Сальников Василий Герасимович, докт. техн. наук, профессор ФГБОУ ВО «СГУВТ»
644099, г.Омск, ул.И.Алексеева, 4, ОИВТ (филиал) ФГБОУ ВО «СГУВТ»
117105, г.Москва, ул.Варшавское шоссе, 35, ООО «Вымпелсетьстрой»
630099, г.Новосибирск, ул.Щетинкина, 33, ФГБОУ ВО «СГУВТ»*

ПОЧТОВЫЙ АДРЕС:

АЛГОРИТМ СИММЕТРИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ НА ОСНОВЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОЙ СХЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Омский институт водного транспорта (филиал) ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»
ООО «Вымпелсетьстрой»
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»

**А.И. Антонов, Ю.М. Денчик, М.Н. Иванов, Е.В. Иванова,
А.А. Руппель, В.Г. Сальников**

ALGORITHM FOR VOLTAGE BALANCING IN THE ELECTRIC GRID BASED ON DETERMINING THE EFFECTIVE ELECTRICAL POWER SUPPLY CIRCUIT OF THE CONSUMERS

Omsk Institute of Water Transport (branch) Siberian State University of Water Transport (OIWT) 4, Ivan Alekseev St., Omsk, 644099, Russia

Vympelset'stroi (Vympelset'stroi) 35, Varshavskoe shosse St., Moscow, 117105, Russia

Siberian State University of Water Transport (SSUWT) 33, Schetinkina St., Novosibirsk, 630099, Russia

Aleksandr I. Antonov (Senior Lecturer of OIWT)

Juliya M. Denchik (Ph.D. of Engineering Sciences, Lead Engineer of Vympelset'stroi)

Mikhail N. Ivanov (Ph.D. of Engineering Sciences, Senior Lecturer of SSUWT)

Elena V. Ivanova (Holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Prof. of SSUWT)

Aleksandr A. Ruppel (Holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Prof. of OIWT)

Vasily G. Sal'nikov (Holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Prof. of SSUWT)

ABSTRACT: The authors study a voltage balancing algorithm which helps to make the only correct and expedient technical solution, in order to reduce the voltage asymmetry by reverse sequence to improve the quality of power networks operation.

Keywords: voltage unbalance, quality of power supply, electromagnetic interference

Рассматривается алгоритм симметрирования напряжений, позволяющий принять единственно верное и целесообразное техническое решение, позволяющее снизить несимметрию напряжений по обратной последовательности для повышения качества функционирования электрических сетей.

Существует ряд причин, из-за которых системы электроснабжения характеризуются достаточно низким качеством функционирования, в результате чего обостряется проблема электромагнитной совместимости (ЭМС) технических средств. В связи с этим возникают кондуктивные низкочастотные электромагнитные помехи (ЭМП) в системах электроснабже-

ния. Данные ЭМП различаются по показателям качества электрической энергии (ПКЭ) [1].

Одним из ПКЭ является коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} . Согласно международному государственному стандарту ГОСТ 32144-2013, K_{2U} определён как вид искажения электроэнергии в электрических сетях общего назначения [1].

Поскольку кондуктивная низкочастотная ЭМП по K_{2U} приводит к ряду негативных последствий, таких как сокращение срока службы асинхронных и синхронных двигателей, трансформаторов и конденсаторов, выход из строя трехфазных электроприборов и энергосберегающих ламп у однофазных потребителей, повышение потерь и неточный учет электроэнергии и т. д., улучшение электромагнитной обстановки (ЭМО) не представляется возможным, поэтому необходимо данную помеху подавлять [2].

Установлены следующие уровни ЭМС технических средств для кондуктивной низкочастотной ЭМП по K_{2U} : нормально допустимый уровень значений K_{2UH} , равный 2%, и предельно допустимый уровень значений K_{2UP} , равный 4%. Значения K_{2U} вычисляются по следующей формуле [1]

$$K_{2U} = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}}, \quad (1)$$

где $\beta = \frac{U_{12fund}^4 + U_{23fund}^4 + U_{31fund}^4}{(U_{12fund}^2 + U_{23fund}^2 + U_{31fund}^2)^2}$, в свою очередь U_{ijfund} - основная составляющая напряжения между фазами i и j .

Для разработки алгоритма симметрирования напряжений использовалось имитационное моделирование объекта исследования с несимметричными резкопеременными нагрузками. Для имитационного моделирования использовалась прикладная программа Simulink и библиотека блоков SimPowerSystem из ядра пакета Matlab (рисунок 1).

В сети 0,4 кВ присутствует несимметричная резкопеременная нагрузка. Данная нагрузка является источником (акцептором) кондуктивных низкочастотных ЭМП по K_{2U} , а сети 10/0,4 кВ – рецепторами. Резкопеременный характер симитирован генератором случайных чисел (ГСЧ), способный имитировать изменение значений полных мощностей нагрузок по нормальному закону распределения случайной величины [3].

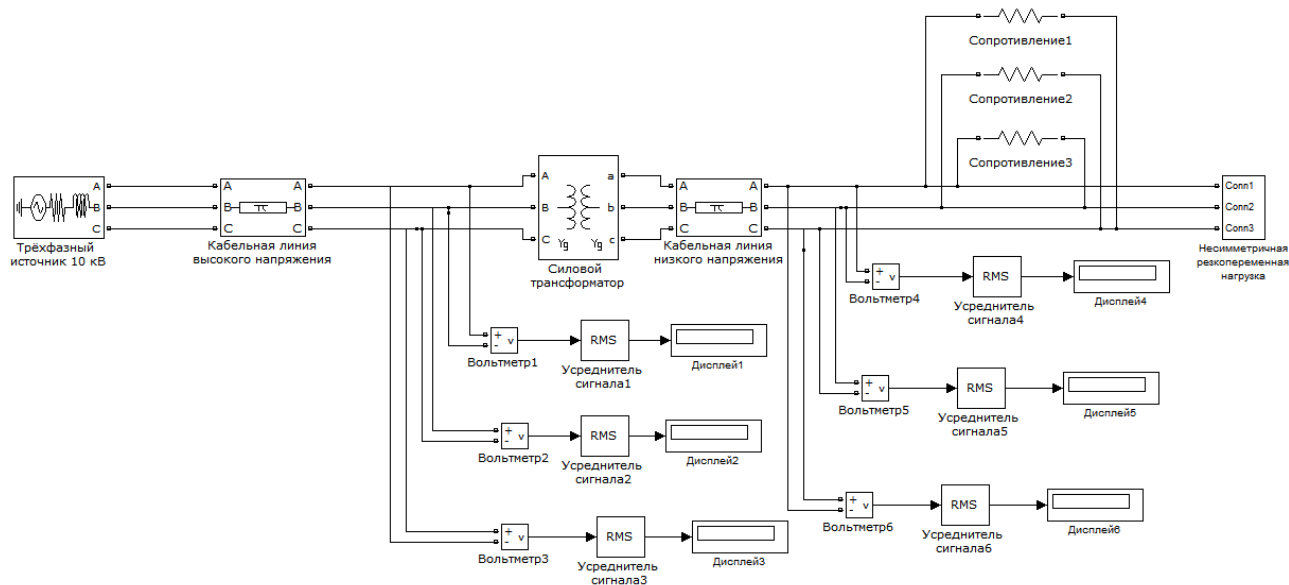


Рисунок 1 – Имитационная модель объекта исследования с несимметричной резкопеременной нагрузкой

С помощью измерительных вольтметров и дисплеев визуализированы полученные в ходе моделирования значения линейных напряжений U_{AB} , U_{BC} и U_{AC} в сетях высокого и низ-

кого напряжения. С помощью формулы (1) вычислены значения K_{2U} .

Одним из способов снижения K_{2U} является выравнивание нагрузок электрической сети по фазам. Введение межфазных добавочных сопротивлений в электрическую сеть (рисунок 1) является техническим решением данного способа. Сам метод не новый, однако, до настоящего времени никто не занимался последовательностью регулирования значений данных сопротивлений. Нет определённого закона или зависимостей значений K_{2U} от значений межфазных добавочных сопротивлений, позволяющих определить единственный верный путь для подбора значений этих сопротивлений таким образом, чтобы уменьшить значения K_{2U} .

Для начала определимся, что существуют три случая перегрузки по фазам (в случае соединения потребителей по схеме «треугольник»): перегружены фазы А и В, перегружены фазы В и С и перегружены фазы А и С. Под перегрузкой здесь понимается, что на данные фазы подключено большее значение сопротивления нагрузки, чем на оставшуюся третью фазу [2].

Для исследования зависимости значений K_{2U} от значений межфазных добавочных сопротивлений, принято решение изменять значения этих сопротивлений поочередно. Модель получает значения линейных напряжений, а используя формулу (1), можно вычислить значения K_{2U} .

За исходные значения каждого межфазного добавочного сопротивления взяли по 1,25 Ом. Значения всех межфазных добавочных сопротивлений задали равными между собой для того, чтобы данная схема была эквивалентна схеме при отсутствии данных сопротивлений. Поочередно изменяя значения каждого межфазного добавочного сопротивления, получили значения линейных напряжений для каждого случая. Зная их, вычислили значения K_{2U} . Все полученные и вычисленные значения сведены в таблицы 1–3.

Таблица 1 – Изменение значений K_{2U} в условиях перегрузки по фазам А и В в сети 0,4 кВ при изменении значений R_{ab}

R_{ab} , Ом	R_{bc} , Ом	R_{ca} , Ом	U_{ab} , В	U_{bc} , В	U_{ca} , В	K_{2U} , %
1,25	1,25	1,25	348,1	350,2	363,2	2,1
1,30	1,25	1,25	351,4	352,7	361,9	1,5
1,35	1,25	1,25	354,4	354,6	361	1,0
1,40	1,25	1,25	355	356,3	360,4	0,7
1,45	1,25	1,25	357,2	357,1	359,3	0,5
1,50	1,25	1,25	357,2	358,4	359,5	0,3
1,55	1,25	1,25	357,8	358,9	359,1	0,2
1,60	1,25	1,25	358,7	359,8	356,6	0,1
1,65	1,25	1,25	359,2	360,2	358,5	0,1
1,70	1,25	1,25	359,5	360,1	359,3	0,1
1,75	1,25	1,25	359,1	359,2	358,7	0,1

Таблица 2 – Изменение значений K_{2U} в условиях перегрузки по фазам В и С в сети 0,4 кВ при изменении значений R_{bc}

R_{ab} , Ом	R_{bc} , Ом	R_{ca} , Ом	U_{ab} , В	U_{bc} , В	U_{ca} , В	K_{2U} , %
1,25	1,25	1,25	366,9	349,2	346,8	2,9
1,25	1,30	1,25	365,8	351,1	349,2	2,3
1,25	1,35	1,25	364,7	353,2	351,3	1,9
1,25	1,40	1,25	364,1	354,7	352,7	1,6
1,25	1,45	1,25	363,6	355,9	353,6	1,3
1,25	1,50	1,25	363,1	356,9	354,5	1,1
1,25	1,55	1,25	362,8	357,7	355,3	0,9
1,25	1,60	1,25	362,5	358,3	356,0	0,8
1,25	1,65	1,25	362,2	358,9	356,2	0,7
1,25	1,70	1,25	362,0	359,4	357,1	0,6
1,25	1,75	1,25	361,8	359,8	357,5	0,6

Таблица 3 – Изменение значений K_{2U} в условиях перегрузки по фазам А и С в сети 0,4 кВ при изменении значений R_{ca}

R_{ab} , Ом	R_{bc} , Ом	R_{ca} , Ом	U_{ab} , В	U_{bc} , В	U_{ca} , В	K_{2U} , %
1,25	1,25	1,25	350,7	366,3	344,7	2,9
1,25	1,25	1,30	353,3	365,2	347,6	2,3
1,25	1,25	1,35	355,2	364,3	349,7	1,9
1,25	1,25	1,40	356,6	363,7	351,2	1,6
1,25	1,25	1,45	357,8	363,2	352,4	1,4
1,25	1,25	1,50	358,7	362,8	353,3	1,2
1,25	1,25	1,55	359,4	362,4	354,0	1,1
1,25	1,25	1,60	360,0	362,1	355,8	1
1,25	1,25	1,65	360,5	361,9	356,1	0,9
1,25	1,25	1,70	360,9	361,7	356,6	0,8
1,25	1,25	1,75	361,2	361,5	357,0	0,8

При этом установлены следующие зависимости линейных напряжений от изменения значений межфазных добавочных сопротивлений:

- при увеличении R_{ab} и постоянных значениях R_{bc} и R_{ca} : U_{ab} и U_{bc} – увеличиваются, а U_{ca} – уменьшается; при уменьшении R_{ab} – U_{ab} и U_{bc} – уменьшаются, а U_{ca} – увеличивается;
- при увеличении R_{bc} и постоянных значениях R_{ab} и R_{ca} : U_{bc} и U_{ca} – увеличиваются, U_{ab} – уменьшается; при уменьшении R_{bc} – U_{bc} и U_{ca} уменьшаются, а U_{ab} – увеличивается;
- при увеличении R_{ca} и постоянных значениях R_{ab} и R_{bc} : U_{ca} и U_{ab} – увеличиваются, а U_{bc} – уменьшается; при уменьшении R_{ca} – U_{ca} и U_{ab} уменьшаются, а U_{bc} – увеличивается.

Для наглядности установленных в ходе моделирования зависимостей разработана блок-схема, представленная на рисунке 2. Данные полученные зависимости позволяют определить, какие значения межфазных добавочных сопротивлений необходимо увеличивать или уменьшать, чтобы линейные напряжения выравнивались, а значения K_{2U} при этом уменьшались.

Исследования проводились для всех трех вариантов перегрузок фаз и установлено - блок-схема (рисунок 2) справедлива для всех этих вариантов.

При этом прослеживается следующее явление: значения одного из линейных напряжений в определённой степени больше двух других, причём при разных вариантах перегрузки фаз это напряжение разное. При этом можно заметить, что допустим, при перегрузке фаз А и В целесообразно увеличивать значения межфазного добавочного сопротивления R_{ab} , в этом случае значение K_{2U} должен уменьшаться, так как согласно блок-схеме (рисунок 2) линейное напряжение U_{ca} в этом случае уменьшается, а линейные напряжения U_{ab} и U_{bc} увеличиваются (таблица 1). Одновременно с этим целесообразно поочередно уменьшать значения сопротивлений R_{bc} и R_{ca} , так как согласно блок-схеме (рисунок 2) линейные напряжения U_{ab} и U_{bc} будут поочередно увеличивать свои значения, а линейное напряжение U_{ca} в обоих случаях будет своё значение уменьшать. Таким образом, произойдёт симметрирование напряжений. Аналогично действуем для остальных вариантов фазовых перегрузок.

Таким образом, по итогам моделирования и анализа полученных зависимостей значение одного из линейных напряжений на определённое значение больше двух оставшихся (при этом оставшиеся два линейных напряжения примерно равны между собой), и при различных вариантах перегрузки это линейное напряжение разное:

- в случае перегрузки фаз А и В линейное напряжение U_{ca} всегда больше двух других

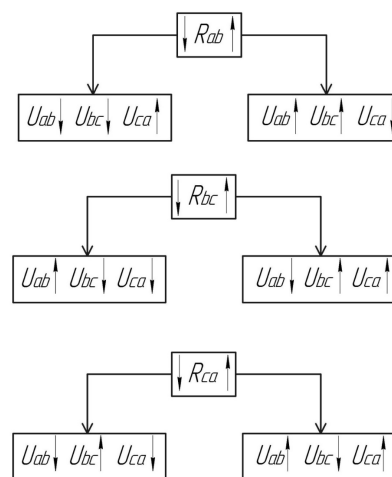


Рисунок 2 – Блок-схема зависимостей линейных напряжений от межфазных добавочных сопротивлений

линейных напряжений, то есть

$$U_{ca} > U_{ab} \approx U_{bc}; \quad (2)$$

– в случае перегрузки фаз В и С линейное напряжение U_{ab} больше двух других линейных напряжений, то есть

$$U_{ab} > U_{bc} \approx U_{ca}; \quad (3)$$

– в случае перегрузки фаз А и С линейное напряжение U_{bc} больше двух других линейных напряжений, то есть

$$U_{bc} > U_{ab} \approx U_{ca}. \quad (4)$$

Выражения (2), (3) и (4) справедливы при отсутствии межфазных добавочных сопротивлений или, когда значения этих сопротивлений равны между собой. Данные зависимости позволили разработать алгоритм симметрирования напряжений в электрической сети на основе определения эффективной схемы электроснабжения потребителей (рисунок 3) [4].

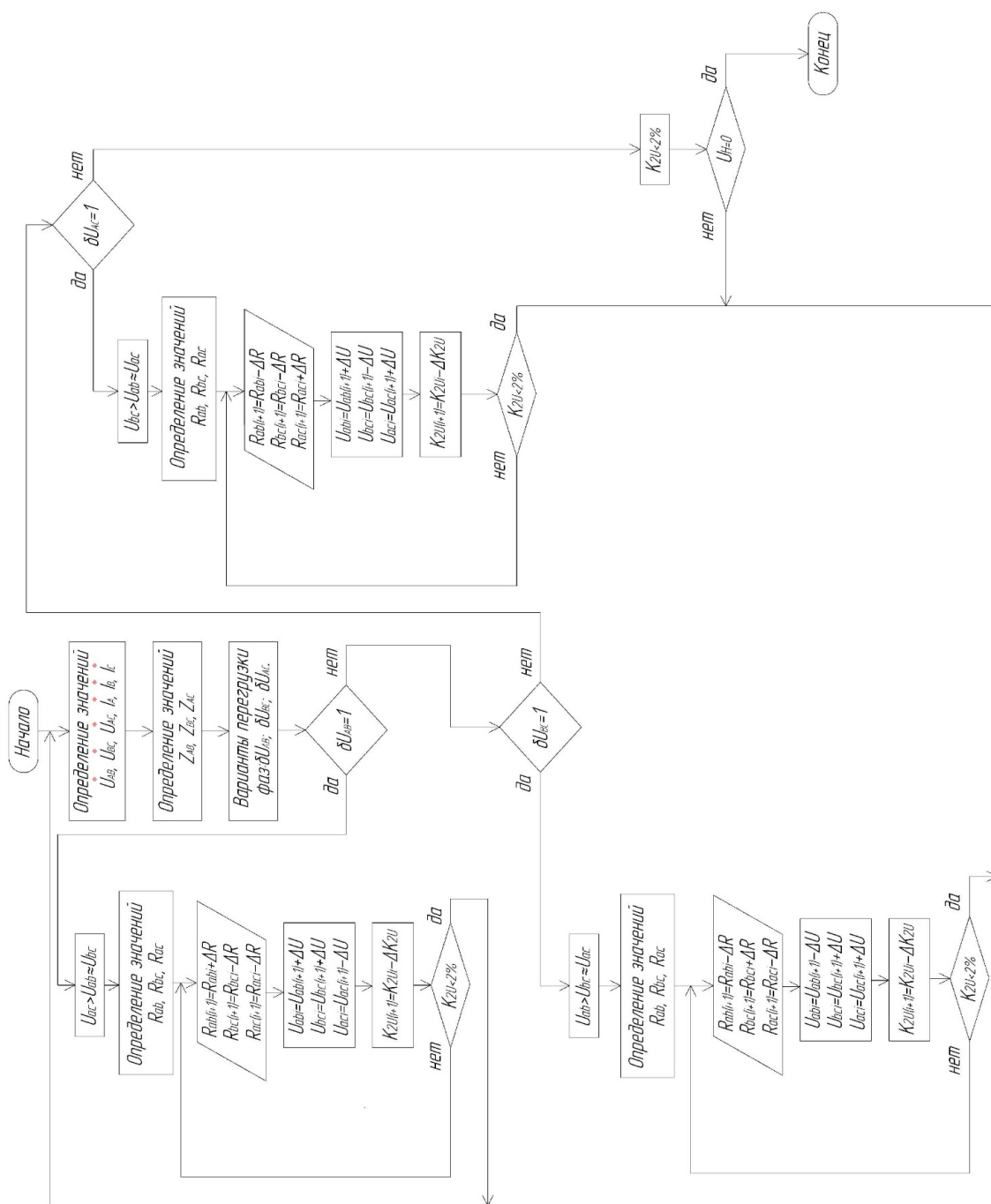


Рисунок 3 – Алгоритм симметрирования напряжений в электрической сети на основе определения эффективной схемы электроснабжения потребителей

Данный алгоритм справедлив как для сетей 0,4 кВ, так и для сетей 10 кВ. Он охватывает все три варианта перегрузки: перегрузки по фазам А и В (δU_{AB}); перегрузки по фазам В и С (δU_{BC}); перегрузки по фазам А и С (δU_{AC}).

Изначально по векторам линейных напряжений $\dot{U}_{ab}, \dot{U}_{bc}, \dot{U}_{ca}$ и токов i_A, i_B, i_C определяются значения сопротивлений несимметричной нагрузки Z_{AB}, Z_{BC}, Z_{AC} . Так как несимметричная нагрузка является источником кондуктивных низкочастотных электромагнитных помех, то именно на основании этих значений сопротивлений можно определить значения добавочных сопротивлений R_{ab}, R_{bc}, R_{ca} .

Если следовать разработанному алгоритму, то возможны четыре варианта развития событий, связанных с несимметрией напряжений.

– Произошло событие δU_{AB} , соответственно, больше двух других линейных напряжений, то есть выполняется выражение (2). При этом целесообразно уменьшать значения сопротивлений R_{bc} и R_{ca} с шагом ΔR и увеличивать значение сопротивления R_{ab} с шагом ΔR . При этом линейное напряжение U_{ca} будет уменьшать свои значения на шаг ΔU , а линейные напряжения U_{ab} и U_{bc} – увеличивать на шаг ΔU , соответственно значение K_{2U} будет уменьшаться на шаг ΔK_{2U} до пределов, нормируемых ГОСТ 32144-2013, то есть меньше 2%.

– Произошло событие δU_{BC} , соответственно, U_{ab} больше двух других линейных напряжений, то есть выполняется выражение (3). При этом целесообразно уменьшать значения сопротивлений R_{ab} и R_{ca} с шагом ΔR и увеличивать значение сопротивления R_{bc} с шагом ΔR . При этом линейное напряжение U_{ab} будет уменьшать свои значения на шаг ΔU , а линейные напряжения U_{bc} и U_{ca} – увеличивать на шаг ΔU , соответственно значение K_{2U} будет уменьшаться на шаг ΔK_{2U} до пределов, нормируемых ГОСТ 32144-2013, то есть меньше 2%.

– Произошло событие δU_{AC} , соответственно, U_{bc} больше двух других линейных напряжений, то есть выполняется выражение (4). При этом целесообразно уменьшать значения сопротивлений R_{ab} и R_{bc} с шагом ΔR и увеличивать значение сопротивления R_{ca} с шагом ΔR . При этом линейное напряжение U_{bc} будет уменьшать свои значения на шаг ΔU , а линейные напряжения U_{ab} и U_{ac} – увеличивать на шаг ΔU , соответственно значение K_{2U} будет уменьшаться на шаг ΔK_{2U} до пределов, нормируемых ГОСТ 32144-2013, то есть меньше 2%.

– Если ни одно из предыдущих трех событий не произошло, то изначально значения K_{2U} не превышают пределов, нормируемых ГОСТ 32144-2013, то есть данные значения меньше 2%. Однако, при наличии нагрузки в сети всегда будет существовать вероятность появления одного из событий δU_{AB} , δU_{BC} или δU_{AC} . Поэтому при таком условии прекращать алгоритм нельзя, необходимо возвращаться к началу алгоритма и проверять предыдущие три события на их наличие. Прекращать алгоритм можно лишь в том случае, когда нагрузка в сети по тем или иным причинам отсутствует. В этом случае будет отсутствовать источник кондуктивных низкочастотных ЭМП по K_{2U} .

Данный алгоритм вполне наглядно показывает, как регулировать значения межфазных добавочных сопротивлений и как при этом изменяются значения линейных напряжений, а, следовательно, и значения K_{2U} . Преимущество данного алгоритма заключается в том, что он адаптируется под случайный характер помехи, возникающей в сети под действием несимметричной резкопеременной нагрузки. На данный алгоритм получено свидетельство о государственной регистрации в объединённом фонде электронных ресурсов «Наука и образование» (ОФЭРНИО) [4].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 ГОСТ 32144-2013. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Взамен ГОСТ 13109-97; введ. 2014-07-01. – М.: Стандартинформ, 2014. – 20 с.
- 2 Данилов, Г.А. Повышение качества функционирования линий электропередачи / Г.А. Данилов, Ю.М. Денчик, М.Н. Иванов, Г.В. Ситников, под ред.

REFERENCES

- 1 GOST 32144-2013. Interstate standard. Electric Energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Standards of quality of electrical energy in general-purpose power supply systems [Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya]. Moscow. Standartinform Publ. 2014. 20 p.
- 2 G.A. Danilov, Yu.M. Denchik, M.N. Ivanov, G.V. Sitnikov. Improving the functioning quality of power lines [Povyshenie kachestva funktsion-

В.П. Горелова, В.Г. Сальникова. -Новосибирск: Новосибир. гос. акад. водн. трансп., 2013. -559 с.

3 Пугачёв, В.С. Теория вероятностей и математической статистики / В.С. Пугачёв. -М.: Наука, 1979. - 478 с.

4 Алгоритм определения кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи по коэффициенту несимметрии напряжений по обратной последовательности / А.И. Антонов, Ю.М. Денчик, Д.А. Зубанов [и др.]. // -№23380; заявл. 27.12.2017 г.; опубл. хроники объединённого фонда электронных ресурсов «Наука и образование» №12 (103) декабрь 2017 -С. 65.

irovaniya liniy elektroperedachi]. Novosibirsk. Novosibirsk St. Acad. of Water Transp. Publ. 2013. 559 p.

3 B.C. Pugachev. Probability Theory and Mathematical Statistics [Teoriya veroyatnostey i matematicheskoy statistiki]. Moscow. Nauka Publ. 1979. 478 p.

4 A.I. Antonov, Yu.M. Denchik, D.A. Zubanov. Algorithm for determining conductive low-frequency electromagnetic interference by the stress asymmetry coefficient by reverse order [Algoritm opredeleniya konduktivnoy nizkochastotnoy elektromagnitnoy pomekhi po koeffitsientu nesimmetrii napryazheniy po obratnoy posledovatel'nosti]. Chronicles of the united fund of electronic resources "Science and Education" [Khroniki ob"edinennogo fonda elektronnykh resursov "Nauka i obrazovanie"]. No. 12(103). 2017. pp. 65.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: несимметрия напряжений, качество электроэнергии, электромагнитная совместимость, алгоритм симметрирования напряжений, voltage balancing algorithm

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ: Антонов Александр Игоревич, старший преподаватель ОИВТ (филиал) ФГБОУ ВО «СГУВТ»
Денчик Юлия Михайловна, канд. техн. наук, ведущий инженер ООО «Вымпелсетьстрой»
Иванов Михаил Николаевич, канд. техн. наук, старший преподаватель ФГБОУ ВО «СГУВТ»
Иванова Елена Васильевна, докт. техн. наук, профессор ФГБОУ ВО «СГУВТ»
Руппель Александр Александрович, докт. техн. наук, профессор ОИВТ (филиал) ФГБОУ ВО «СГУВТ»
Сальников Василий Герасимович, докт. техн. наук, профессор ФГБОУ ВО «СГУВТ»

ПОЧТОВЫЙ АДРЕС: 644099, г.Омск, ул.И.Алексеева, 4, ОИВТ (филиал) ФГБОУ ВО «СГУВТ»
117105, г.Москва, ул.Варшавское шоссе, 35, ООО «Вымпелсетьстрой»
630099, г.Новосибирск, ул.Щетинкина, 33, ФГБОУ ВО «СГУВТ»

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТОКОВ КОРРОЗИИ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»

**Б.В. Палагушкин, Ю.В. Дёмин, А.С. Лесных, С.Н. Реутов,
А.Ю. Кузнецов, А.М. Глаголев**

METHODS OF CALCULATION OF CORROSION CURRENT FOR GROUNDING ELECTRICAL SYSTEMS

Siberian State University of Water Transport (SSUWT) 33, Schetinkina St., Novosibirsk, 630099, Russia

Boris V. Palagushkin (Holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Prof. of SSUWT)

Yuriy V. Demin (Holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Prof. of SSUWT)

Aleksey S. Lesnih (Ph.D. of Engineering Sciences, Senior Lecturer of SSUWT)

Sergey N. Reutov (Engineer of SSUWT)

Aleksey Yu. Kuznetsov (Ph.D. of Engineering Sciences, Senior Lecturer of SSUWT)

Aleksandr M. Glagolev (Student of SSUWT)

ABSTRACT: The authors developed mathematical models of underground and galvanic corrosion in their separate and joint action.

Keywords: corrosion currents, method of calculation

Разработаны математические модели грунтовой и электрической коррозии при их раздельном и совместном действии.

В основе математических моделей лежат системы уравнений, связывающих значения электродных электрохимических потенциалов и коррозионных (стекающих и втекающих) токов линейных коррозионных систем (LKS). Электрическое поле блуждающих токов оцениваются по его напряженности в грунте (в местах планируемого расположения LKS) и также учитывается при определении коррозионных токов.

В собственные значения «поперечных» сопротивлений между элементами LKS, помимо сопротивления растеканию, включены их сопротивления поляризации («анодные» или «катодные»). Характер поляризации для каждого элемента определяется путем предварительного анализа остаточной системы уравнений, получаемой путем вычитания из исходной системы уравнений уравнения, рассматриваемого элемента. При этом, тип сопротивления поляризации элементов в остаточной системе уравнений определяется соотношением электродных потенциалов рассматриваемых элементов. Знак суммы токов в остаточной системе уравнений определяет характер поляризации исследуемого (исключенного) элемента, поскольку сумма коррозионных токов должна равняться нулю.

В выполненных решениях поляризационные характеристики элементов задаются в виде

анодных и катодных сопротивлений поляризации (R_{ii}^A и R_{ii}^K) и электродных потенциалов (U_i) для случая грунтовой коррозии или напряженности (E_i) блуждающих токов при электрокоррозии. При более строгом решении учитывается нелинейная зависимость сопротивлений поляризации каждого i -го элемента от величины действующего на него коррозионного тока. Последнее достигается заданием исходной информации о значениях «анодного» и «катодного» напряжений, отвечающих фиксированным величинам коррозионных токов.

Помимо сопротивлений поляризации, в состав поперечных сопротивлений элементов входят также собственные (R_{ii}^r) и взаимные (R_{ij}^r) значения сопротивлений растеканию «элемент-грунт», расчет которых выполняется по специальным формулам. При этом, поскольку действие коррозионных токов и напряжений определяется, в основном, параметрами «ближней зоны», при вычислении значений R_{ij}^r предусмотрена возможность для каждого i -го элемента использовать свое удельное сопротивление грунта (ρ_{π}). При расчетах же взаимных сопротивлений R_{ij}^r используется среднее значение ρ_r для исследуемого сооружения.

Решение рассматриваемой задачи сильно осложняется отсутствием исходной информации о характере поляризации (анодная или катодная) соединенных в систему элементов. Существующие в настоящее время методики [1-4] не учитывают взаимных сопротивлений R_{ij}^r -гальванических связей. Использование же итерационного решения без задания исходной информации о типе сопротивления поляризации элементов зачастую ведет к расхождению итерационного процесса.

В наших решениях исходный тип поляризации для каждого элемента определяется путем предварительного анализа исходной системы уравнений с учетом гальванических связей всех элементов. И только в случае несовпадения знаков коррозионных токов, полученных по предварительному анализу и при окончательном решении полной системы уравнений для отдельных элементов, для них производится смена типа поляризации с последующим запуском итерационного цикла. При этом, как правило, случаи использования итераций ограничены и обычно связаны с некорректной постановкой задачи. В случае необходимости уточнения полученного решения с учетом нелинейной зависимости сопротивлений поляризации, а их типы не меняются.

Для каждого типа коррозии рассмотрены два варианта – эквипотенциальный и неэквипотенциальный. При эквипотенциальном характере сооружений пренебрегается продольное сопротивление элементов по сравнению с их поперечным сопротивлением. В этом случае все элементы «как бы соединены звездой» и имеют единый компромиссный потенциал (U_0).

При неэквипотенциальном варианте учитывается связанное с продольными токами падение напряжений (потенциалов), которое приводит к возникновению попеременного компромиссного потенциала, что существенно усложняет задачу. В этом случае составлять две системы линейных уравнений, первая из которых связывает потенциалы с поперечными токами и сопротивлениями, а вторая – падение напряжений с продольными токами и сопротивлениями. Решение этих уравнений выполняется способом узловых потенциалов (проводимостей). При этом, в состав «узловых» проводимостей включается как «продольные», так и «поперечные» проводимости, примыкающие к каждому узлу элементов. Правую часть уравнений «узловых» потенциалов составляют фиктивные токи, якобы вводимые в узлы сооружения за счет напряженности внешнего поля при электрической коррозии и электродных потенциалов – при грунтовой. Окончательные значения коррозионных токов определяется по первой системе уравнений с учетом переменной составляющей действующих напряжений.

Сопротивление растеканию между вертикальными элементами. Сопротивление растеканию R_{ij} определяется с помощью двукратного интегрирования (по i -му и j -му элементам) сопротивления точка-точка

$$R_{ij} = \frac{\rho_r}{4\pi} \left\{ \left[(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2 \right]^{-1} + \left[(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2 \right]^{-1} \right\}, \quad (1)$$

где x_i, y_i, z_i – координаты точки на i -ом элементе;

x_j, y_j, z_j – координаты точки на j -ом элементе.

Обозначив координаты i -го элемента (z_i^H, z_i^K, x_i, y_i) и проведя двойное интегрирование

(1) по координатам z_i и z_j вдоль обоих элементов получим

$$R_{ij} = \frac{\rho_r}{4\pi l_i l_j} \left\{ \left[F_3(t_1, d) + F_3(t_2, d) - F_3(t_3, d) - F_3(t_4, d) \right] + \left[F_3(t_5, d) + F_3(t_6, d) - F_3(t_7, d) - F_3(t_8, d) \right] \right\}, \quad (2)$$

где

$$F(t, d) = t \operatorname{Arsh} \frac{t}{d} - \sqrt{t^2 + d^2} = t l_N \left[\frac{(t + \sqrt{t^2 + d^2})}{d} \right] - \sqrt{t^2 + d^2};$$

$$t_1 = \operatorname{abs}(z_i^H - z_j^K); t_2 = \operatorname{abs}(z_i^K - z_j^H); t_3 = \operatorname{abs}(z_i^H - z_j^H); t_4 = \operatorname{abs}(z_i^K - z_j^K);$$

$$t_5 = z_i^K - z_j^K; t_6 = z_i^H - z_j^H; t_7 = z_i^H - z_j^K; t_8 = z_i^K - z_j^H;$$

$$d = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}.$$

При выходе обоих элементов на поверхность земли решение (2) упростится и примет вид

$$R_{ij} = \frac{\rho_r}{4\pi l_i l_j} \left\{ \left[S_1 \operatorname{Arsh} \frac{S_1}{d} - \sqrt{S_1^2 + d^2} \right] - \delta_1 \operatorname{Arsh} \frac{\delta_1}{d} - \sqrt{\delta_1^2 + d^2} \right\} =$$

$$t \operatorname{Arsh} \frac{t}{d} - \sqrt{t^2 + d^2} = t l_N \left[\frac{(t + \sqrt{t^2 + d^2})}{d} \right] - \sqrt{t^2 + d^2}; \quad (3)$$

$$R_{ij} = \frac{\rho_r}{4\pi l_i l_j} \left\{ 2 \left[l_i l_N \left(l_i + \frac{\sqrt{l_i^2 + r_i^2}}{r_i} - \sqrt{l_i^2 + r_i^2} \right) + r_i \right] + \left\{ 2z_i^K l_N \left[2z_i^K + \frac{\sqrt{(2z_i^K)^2 + r_i^2}}{r_i} - \sqrt{(2z_i^K)^2 + r_i^2} \right] \right\} \right. \\ \left. \left\{ 2z_i^H l_N \left[2z_i^H + \frac{\sqrt{(2z_i^H)^2 + r_i^2}}{r_i} - \sqrt{(2z_i^H)^2 + r_i^2} \right] \right\} - \left\{ (z_i^H + z_i^K) l_N \left[(z_i^H + z_i^K) + \frac{\sqrt{(z_i^H + z_i^K)^2 + r_i^2}}{r_i} \right] - \sqrt{(z_i^H + z_i^K)^2 + r_i^2} \right\} \right\}. \quad (4)$$

Очевидно, что сопротивление растеканию между двумя идентичными (по размеру и расположению) элементами также будет описываться выражением (4) при замене в нем радиуса r_i на расстояние d . Для вертикального элемента, выходящего на поверхность земли, получим в соответствии с выражениями (3) и (4)

$$R_{ij} = \frac{\rho_r}{4\pi l_i l_j} \left\{ \left[S_1 \operatorname{Arsh} \frac{S_1}{d} - \sqrt{S_1^2 + d^2} \right] - \delta_1 \operatorname{Arsh} \frac{\delta_1}{d} - \sqrt{\delta_1^2 + d^2} \right\}. \quad (5)$$

Приведем также значение сопротивления растеканию для двух элементов, вершины которых расположены на одной глубине H (наиболее часто встречающийся случай)

$$R_{ij} = \frac{\rho_r}{4\pi l_i l_j} \left\{ \left[l_i l_N \left(\frac{l_i + \sqrt{l_i^2 + d^2}}{d} \right) - \sqrt{l_i^2 + d^2} \right] + \left[l_i l_N \left(\frac{l_i + \sqrt{l_i^2 + d^2}}{d} \right) - \sqrt{l_i^2 + d^2} \right] + d - \right. \\ \left. - \left[\delta_1 l_N \left(\frac{\delta_1 + \sqrt{\delta_1^2 + d^2}}{d} \right) - \sqrt{\delta_1^2 + d^2} \right] + \left[S_{h1} l_N \left(\frac{S_{h1} + \sqrt{S_{h1}^2 + d^2}}{d} \right) - \sqrt{S_{h1}^2 + d^2} \right] \right\}, \quad (6)$$

$$+ \left[2H l_N \left(\frac{2H + \sqrt{4H^2 + d^2}}{d} \right) - \sqrt{4H^2 + d^2} \right] - \left[S_{hj} l_N \left(\frac{S_{hj} + \sqrt{S_{hj}^2 + d^2}}{d} \right) - \sqrt{S_{hj}^2 + d^2} \right] - \\ - \left[S_{hi} l_N \left(\frac{S_{hi} + \sqrt{S_{hi}^2 + d^2}}{d} \right) - \sqrt{S_{hi}^2 + d^2} \right]$$

где

$$S_{h1} = 2H + l_i + l_j; S_{hj} = 2H + l_j; S_{hi} = 2H + l_i.$$

Сопротивление растеканию между горизонтальными и вертикальными элементами.

Обозначив координаты горизонтального i -го элемента (a_i^H, a_i^K, b_i, z_i) , а вертикального j -го соответственно (z_j^H, z_j^K, a_j, b_j) , и проведя двойное интегрирование выражения (6) по координатам a_i и z_j вдоль обоих элементов получим для случаев $(z_j^H < z_j^K \leq z_i)$ или $(z_i \leq z_j^H < z_j^K)$

$$R_{ij} = \frac{\rho_r}{4\pi l_i l_j} \left\{ \left[F_4(a_i, b_0, c_1) + F_4(a_2, b_0, c_2) - F_4(a_1, b_0, c_2) - F_4(a_2, b_0, c_1) \right] + \right. \\ \left. \left[F_4(a_1, b_0, c_3) + F_4(a_2, b_0, c_4) - F_4(a_1, b_0, c_4) - F_4(a_2, b_0, c_3) \right] \right\}, \quad (7)$$

где

$$F_4(a, b, c) = a \operatorname{Arsh} \frac{c}{\sqrt{a^2 + b^2}} + \frac{a}{\sqrt{b^2 + c^2}} - \frac{ac}{b\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} = \\ = a l_N \left[\frac{c + \sqrt{a^2 + b^2 + c^2}}{\sqrt{a^2 + c^2}} \right] + c l_N \left[\frac{a + \sqrt{a^2 + b^2 + c^2}}{\sqrt{b^2 + c^2}} \right] - b \operatorname{arctg} \frac{ac}{b\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}}; \\ a_1 = a_i^H - a_j \text{ и } a_2 = a_i^K - a_j \text{ при } a_i^K > a_i^H \geq a_j; \\ a_1 = a_j - a_i^K \text{ и } a_2 = a_j - a_i^H \text{ при } a_i^H < a_i^K \leq a_j; \\ c_1 = z_i - z_j^K \text{ и } c_2 = z_i - z_j^H \text{ при } z_j^K < z_j^H \leq z_i; \\ c_1 = z_j^H - z_i \text{ и } c_2 = z_j^K - z_i \text{ при } z_j^H > z_j^K \geq z_i; \\ c_3 = z_i - z_j^H, \quad c_4 = z_i + z_j^K, \quad b_0 = \operatorname{abs}(b_i - b_j).$$

В решении (7) при $a = 0$ и $c = 0$ функция $F_4(a, b, c)$ обращается в нуль, а при $b = 0$ равен нулю только третий член этой функции, содержащий адрес-тангенс, в соответствии с этим при выходе вертикально элемента на поверхность земли ($z_j^H = 0$) рассматриваемое решение упроститься и для $z_j^H < z_j^K \leq z_i$ примет следующий вид

$$R_{ij} = \frac{\rho_e}{4\pi l_i l_j} \{ F_4(a_1, b_0, c_1) + F_4(a_2, b_0, c_5) - F_4(a_1, b_0, c_5) - F_4(a_2, b_0, c_1) \}, \quad (8)$$

где

$$c_5 = c_6 + 2l_j.$$

Во втором случае ($z_j^K > z_j^H = z_i = 0$), когда на поверхность земли выходят и вертикальные и горизонтальные элементы, решение (7) записывается в виде

$$R_{ij} = \frac{\rho_e}{4\pi l_i l_j} \{ F_4(a_2, b_0, c_6) - F_4(a_1, b_0, c_6) \}. \quad (9)$$

где

$$c_6 = l_j.$$

Альтернативные вариант к условиям решения (7) является случай $z_j^H < z_i \leq z_j^K$, то есть когда точка пересечения горизонтального и вертикального элементов делит последний (вертикальный элемент) на 2 части. В соответствии с этим получим

$$R_{ij} = \frac{\rho_r}{4\pi l_i l_j} \left\{ \left[F_4(a_1, b_0, c_7) + F_4(a_2, b_0, c_8) - F_4(a_1, b_0, c_7) - F_4(a_1, b_0, c_8) \right] + \right. \\ \left. \left[F_4(a_1, b_0, c_3) + F_4(a_2, b_0, c_4) - F_4(a_1, b_0, c_4) - F_4(a_2, b_0, c_3) \right] \right\}, \quad (10)$$

где

$$c_7 = z_j^K - z_i; \quad c_8 = z_i - z_j^H.$$

При этом, в случае выхода вертикального элемента на поверхность земли ($z_j^H = 0$) имеем

$$R_{ij} = \frac{\rho_e}{4\pi l_i l_j} \{ F_4(a_2, b_0, c_7) + F_4(a_2, b_0, c_4) - F_4(a_1, b_0, c_7) - F_4(a_1, b_0, c_4) \}. \quad (11)$$

В решении (10) рассматривался случай, когда горизонтальный элемент располагается только по одну сторону от вертикального. В случае полного взаимного пересечения ($a_i^H < a_i < a_i^K$ и $z_j^H < z_i \leq z_j^K$), когда фактически взаимодействуют уже 4 отрезка, рассматриваемое решение приобретает следующий вид

$$R_{ij} = \frac{\rho_r}{4\pi l_i l_j} \left\{ \left[F_4(a_1, b_0, c_7) + F_4(a_1, b_0, c_8) - F_4(a_1, b_0, c_4) - F_4(a_1, b_0, c_3) \right] + \right. \\ \left. \left[F_4(a_2, b_0, c_7) + F_4(a_2, b_0, c_8) - F_4(a_2, b_0, c_4) - F_4(a_2, b_0, c_3) \right] \right\}. \quad (12)$$

Определение значений сопротивления поляризации.

Будем определять сопротивление поляризации ($R_3^{A,K}$) как отношение подаваемого на поляризуемый элемент напряжения $U_3^{A,K}$ (за вычетом величины электродного потенциала $U_{30}^{A,K}$) к создаваемому этим напряжением коррозионному току ($I_3^{A,K}$)

$$R_3^{A,K} = \frac{U_3^{A,K} - U_{30}^{A,K}}{I_3^{A,K}}, \quad (13)$$

С этой целью измерим с помощью электрода сравнения электродный потенциал рассматриваемого одиночного элемента (при этом $I_3^{A,K} = 0$), а затем будем увеличивать или уменьшать (алгебраически) этот потенциал путем подачи на элемент дополнительных напряжений от внешнего источника. При этом будем одновременно измерять и значение искусственно создаваемого потенциала (с помощью электрода сравнения) и величину возникающего в результате поляризации элемента поляризационного тока. Определение тока выполняется с помощью подключения между элементом и землей измерительной цепи, содержащей стандартизированное сопротивление и милливольтметр.

Проводя вышеописанные измерения при алгебраическом уменьшении (U_3^K) искусственно создаваемых на элементе потенциалов (по отношению к электронному) или их увеличении (U_3^A), получим соответственно анодные или катодные поляризационные кривые, определяющие значение анодного (R_3^A) или катодного (R_3^K) сопротивления поляризации для фиксированной величины анодного ($I_3^A = \text{Const}$) или катодного ($I_3^K = \text{Const}$) коррозионного тока (рисунок).

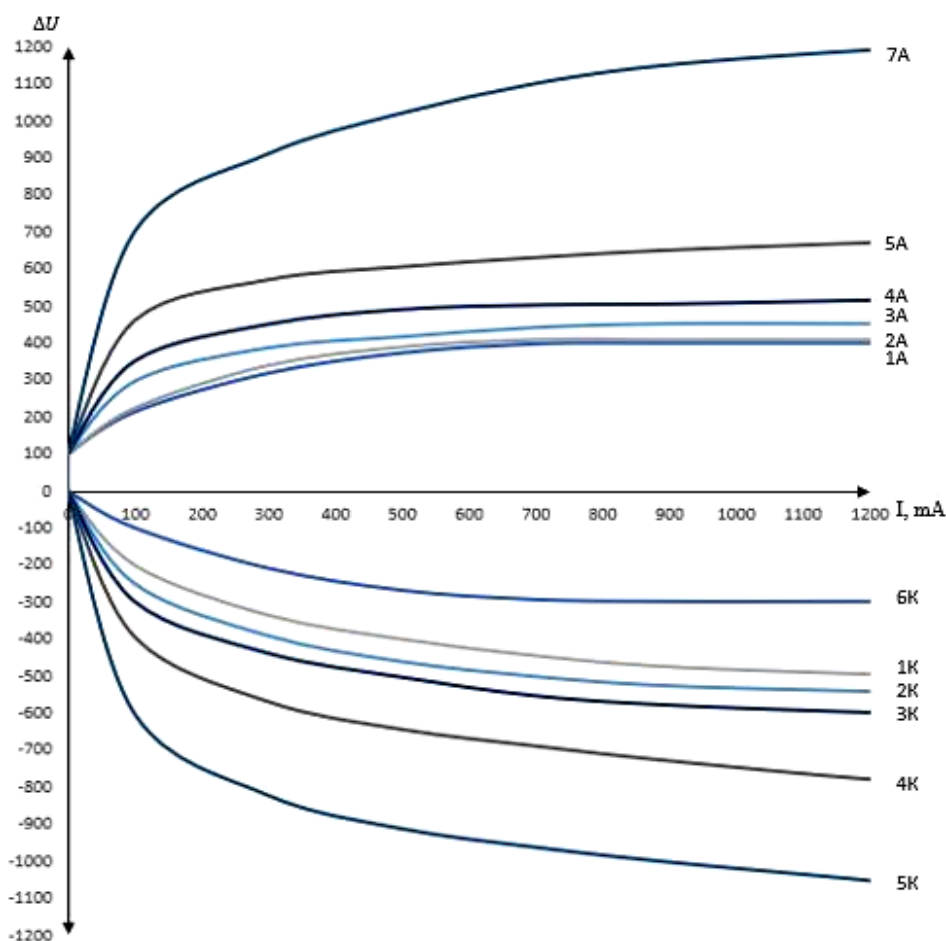


Рисунок – Поляризационные кривые элементов ЗС: 1А, 1К-анодные и катодные кривые стальных элементов $\ell = 12$ м; 2А, 2К-анодные и катодные кривые стальных элементов $\ell = 9$ м; 3А и 3К-анодные и катодные кривые стальных элементов $\ell = 6$ м; 4А и 4К-анодные и катодные кривые стальных элементов $\ell = 2,5$ м; 5А и 5К-анодные и катодные кривые стальных элементов $\ell = 0,5$ м; 6К-катодная кривая для железобетонной стойки $\ell = 2,5$ м; $d = 30$ см; 7А-анодная кривая углеродистого электрода $\ell = 1,5$ м; $d = 11,4$ см

Таким образом, сопротивление поляризации нелинейного зависит от величины коррозионного тока. При этом, как правило, характер анодных и катодных поляризационных кривых (а, следовательно, и величины отвечающих им сопротивлений поляризации) оказывается существенно различным. Более того, электродные потенциалы (начальные значения поляризационных кривых при $I_0^{A,K} = 0$) при анодной и катодной поляризации элемента могут иметь разные значения.

На первом этапе расчетов коррозионных токов и напряжений (для системы элементов) в качестве первого приближения можно взять значение сопротивления поляризации ($R_0^{A,K}$), отвечающие осредненным линейным зависимостям, аппроксимирующие фактические кривые анодной и катодной поляризации рассматриваемых элементов (или же линейную аппроксимацию линейной части кривых $(U_0^{A,K} - U_{30}^{A,K}) = F(I_0^{A,K})$). Далее (в случае необходимости) полученные значения коррозионных токов и напряжений уточняются с помощью итераций, содержащих уточненные (по предыдущему циклу) величины сопротивлений поляризации $R_0^{A,K} = F(I_0^{A,K})$.

По результатам многочисленных натурных изменений на отдельных элементах заземляющих систем (ЗС) на подстанциях и воздушных линиях (ВЛ), расположенных в различных регионах РФ, были получены обобщенные удельные поляризационные характеристики

$$|\Delta U_A| = |U_A - U_0| = F_A(j_A); |\Delta U_K| = |U_K - U_0| = F_K(j_K). \quad (14)$$

Указанные характеристики сняты для стальных элементов заземляющих систем, железобетонных стоек и углеграфитовых электродов, используемых в качестве анодов при катодной защите.

Для стальных элементов получены следующие зависимости абсолютных значений приращения анодных и катодных напряжений (мВ)

$$\Delta U_A^{CT} = 1,9 \ln^2 j_A + 43,3 \ln j_A; \Delta U_K^{CT} = 9,38 \ln^2 j_K + 3,4 \ln j_K. \quad (15)$$

Соответственно, для железобетонных (ЖБ) стоек, выступающих, как правило, в роли катода, и для углеграфитовых (анодных) электродов имеем

$$\Delta U_A^{YF} = 8,2 \ln^2 j_A + 95 \ln j_A; \Delta U_K^{ЖБ} = 7,55 \ln^2 j_K + 5,4 \ln j_K. \quad (16)$$

Большой крутизной и, соответственно, большими значениями ΔU_A и ΔU_K обладают стальные элементы малой длины. При этом анодные кривые имеют больший перепад напряжений, чем катодные. Катодная кривая для ЖБ стойки имеет наиболее пологий характер. Анодная кривая углеграфитовых электродов имеет наибольший перепад напряжений, что и определяет их использование в качестве анодов или катодной защите.

В соответствии с крутизной кривых сопротивления поляризации $R_{ii}^{A,K}$ рассматриваемых элементов меняются от десятков Ом в области малых токов, до десятых долей Ом при больших коррозионных токах. Наиболее распространён следующий интервал сопротивлений поляризации:

- для стальных элементов $R_{ii}^{A,K} = 3,6-6,6$ Ом;
- для ЖБ стоек $R_{ii}^{A,K} = 0,8-1,7$ Ом.

Суммируя (алгебраически) относительные значения поляризационных напряжений с величиной электродных потенциалов при $I_{A,K}$ получим полные поляризационные характеристики (анодные и катодные).

В выполнявшихся расчётах электродные потенциалы принимались:

- для горизонтальных элементов $U_{i0} = (-400)-(800)$ мВ;
- для вертикальных элементов $U_{i0} = -700$ мВ;
- для приповерхностных (заземляющих спусков) элементов $U_{i0} = (-300)-(-400)$ мВ;
- для ЖБ стойки $U_{i0} = -100$ мВ, а углеграфитовые электроды $U_{i0} = 300$ мВ.

Следует отметить, что предполагаемый подход к определению сопротивления поляризации несколько отличен от дифференциального значения $R_0^{A,K}$ (по касательной), используемого при решении задач о приконтактной коррозии способом интегральных уравнений. В нашем случае (интеграционный способ решения системы уравнений) при таком подходе потребовалось бы на каждом инерциальном цикле вводить новые значения электродных потенциалов, получаемых по пересечению касательной к поляризационной кривой с осью на-

пряжения при $I_{\Sigma}^{A,K} = 0$. Происходящие при этом изменения в правой части исходной системы уравнений (14) могут приводить к существенному изменению уровня компромиссного потенциала, а, следовательно, и характера поляризации ряда элементов, что резко усложняет ход итерационного процесса.

Предлагаемое нами определение сопротивления поляризации способствует более устойчивому ходу итерационного процесса, поскольку уточняется только один параметр – сопротивление поляризации, а значения электродных потенциалов остаются неизменными. Вместе с тем, следует, по-видимому, иметь в виду, что вопрос определения значений сопротивления поляризации требует дальнейшего уточнения при решении задач об электрической коррозии или катодной защите, когда величина коррозионных токов и напряжений оказывается особенно высокой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Клековкин, И.В. Методика расчета долговечности электросетевых конструкций / И.В. Клековкин // Разработка и внедрение новых материалов, конструкций и технологий для электросетевого строительства: тезисы докл. всесоюз. науч.-техн. совещ. 30 мая-1 июня 1989 г. - Новосибирск, 1989. -6 с.
- 2 Стрижевский, И.В. Теория и расчет влияния электрифицированной железной дороги на подземные металлические сооружения / И.В. Стрижевский, В.И. Дмитриев. -М.: Стройиздат. 1967. -247 с.
- 3 Бургодорф, В.В. Заземляющие устройства электроустановок / В.В. Бургодорф, А.И. Якобс. -М.: Энергоатомиздат, 1987. -400 с.
- 4 Демин, Ю.В. Обеспечение долговечности электросетевых материалов и конструкций в агрессивных средах. Кн. 1. Теоретические основы / Ю.В. Демин, Р.Ю. Демина, В.П. Горелов; под ред. В.П. Горелова. - Новосибирск: Изд-во Новосиб. гос. акад. вод. трансп., 1998. -209 с.

REFERENCES

- 1 I.V. Klekovkin. Method of calculating the durability of power grid structures [Metodika rascheta dolgovechnosti elektrosetyevykh konstruktсий]. *Development and introduction of new materials, structures and technologies for power grid construction* [Razrabotka i vnedrenie novykh materialov, konstruktсий i tekhnologiy dlya elektrosyetevogo stroitel'stva]. Novosibirsk, 1989. 6 p.
- 2 I.V. Strizhevskiy, V.I. Dmitriev. Theory and calculation of the electrified railway influence on the underground metal structures [Teoriya i raschet vliyaniya elektrifitsirovannoy zheleznoy dorogi na podzemnye metallicheskie sooruzheniya]. Moscow. Stroyizdat Publ. 1967. 247 p.
- 3 V.V. Burgodorf, A.I. Yakobs. Electrical installation grounding devices [Zazemlyayushchie ustroystva elektrostanovok]. Moscow. Energoatomizdat Publ. 1987. 400 p.
- 4 Yu.V. Demin, R.Yu. Demina, V.P. Gorelov. Ensuring the durability of power grid materials and structures in aggressive environments [Obespechenie dolgovechnosti elektrosetyevykh materialov i konstruktсий v agressivnykh sredakh]. Novosibirsk. Novosibirsk St. Acad. of Water Transp. Publ. 1998. 209 p.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

токи коррозии, методика расчета

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Палагушкин Борис Владимирович, докт. техн. наук, профессор ФГБОУ ВО «СГУВТ»

Демин Юрий Васильевич, докт. техн. наук, профессор ФГБОУ ВО «СГУВТ»

Лесных Алексей Станиславович, канд. техн. наук, старший преподаватель ФГБОУ ВО «СГУВТ»

Реутов Сергей Николаевич, инженер ФГБОУ ВО «СГУВТ»

Кузнецов Алексей Юрьевич, канд. техн. наук, старший преподаватель ФГБОУ ВО «СГУВТ»

Глаголев Александр Максимович, студент ФГБОУ ВО «СГУВТ»

ПОЧТОВЫЙ АДРЕС:

630099, г.Новосибирск, ул.Щетинкина, 33, ФГБОУ ВО «СГУВТ»

СОВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ НА БАЗЕ ОПТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»

К.С. Мочалин, Л.В. Пахомова, А.С. Ярославцева

OPTICAL CONVERTERS BASED MODERN METEREING TRANSFORMERS

Siberian State University of Water Transport (SSUWT) 33, Schetinkina St., Novosibirsk, 630099, Russia

Konstantin S. Mochalin (Ph.D. of Engineering Sciences, Senior Lecturer of SSUWT)

Lyudmila V. Pakhomova (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of SSUWT)

Anna S. Yaroslavl'tseva (Senior Lecturer of SSUWT)

ABSTRACT: The use of modern current transformers can improve the quality of electricity metering, due to the use of a single digital protocol, instead of using an analog signal converted into digital. This helps to minimize the probability of differences in the values between the original signal data and the converted ones, for use in automated power metering systems.

Keywords: electric power metering, metering current transformer, fiber optic cable, optical converter

Применение современных трансформаторов тока позволяет повысить качество учета электроэнергии, за счет используемого единого цифрового протокола, вместо использования аналогового сигнала преобразуемого в цифровой. Это дает возможность снизить до минимума вероятность различия значений между исходными данными сигнала и преобразованными, для использования в автоматизированных системах учета.

XXI век является эпохой развития высоких технологий. Однако, технологии технологиями, но без электричества никуда, из-за чего необходимо также совершенствовать не только сами потребители тока, но и средства создания и передачи тока.

Важную роль в передаче тока играют трансформаторы. В наше время, эти устройства выполняют не только работу по преобразованию тока, но и являются частью системы измерения его величины.

Что такое «трансформатор»? Слово «трансформатор» происходит от английского слова «transform» - преобразовывать, изменяться. Из этого следует, что данное устройство преобразует, посредством электромагнитной индукции, одной или нескольких систем (напряжений) переменного тока в одну или несколько систем (напряжений), без смены частоты.

На рисунке 1 представлена схема простейшего трансформатора, состоящего из двух обмоток и магнитопровода (сердечника), представленного железными пластинами. Ток I_1 приходит на катушку с напряжением U_1 и образует на магнитопроводе магнитное поле с потоком Φ_{cm} , которое, в свою очередь, рождает электрический ток в катушке с напряжением U_2 . Катушка с напряжением U_1 называется первичной обмоткой, на которую ток «приходит», катушка с напряжением U_2 называется вторичной обмоткой, с которой ток «снимают». От количества витков на катушках зависит и напряжение, а, значит, и ток. Также ток зависит от толщины проводника, из которого состоят катушки. При понижении напряжения, ток повышается, а при увеличении – ток уменьшается.

В настоящее время на электростанциях и подстанциях используются измерительные трансформаторы.

Данный вид трансформаторов нужен для измерения выходного тока, то есть тока, идущего к потребителям. Так как на подстанциях и станциях идет работа сотнями киловольт, необходим контроль во время всего процесса, но, из-за больших величин тока, такой контроль не возможен ввиду большой опасности для обслуживающего персонала, а обычные устройства попросту не смогут выдержать такого напряжения и сгорят. Тут и нужны измерительные трансформаторы тока (далее ИТТ).

ИТТ отличаются от обычных трансформаторов по ряду особенностей, обусловленных их специализацией.

Схема простейшего представителя ИТТ, представленная на рисунке 2.

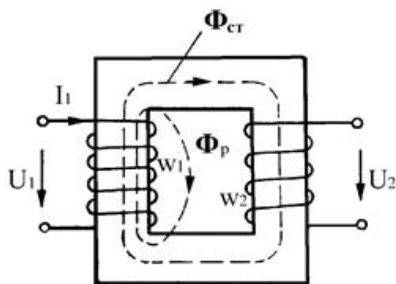


Рисунок 1 – Схема простейшего трансформатора

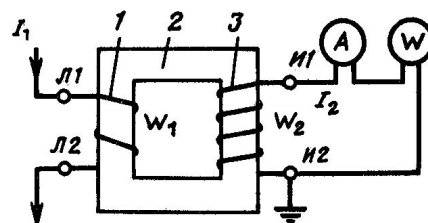
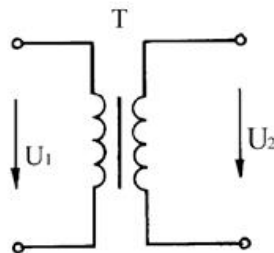


Рисунок 2 – Схема ИТТ

Как мы видим, все его отличие от обычного ТТ заключается в том, что вторичная обмотка (позиция 3 на рисунке 1) на выходе имеет заземление и подключение к измерительным приборам (в данном случае амперметр и ваттметр). Также ИТТ имеют в своей схеме обязательную изоляцию между первичной и вторичной обмотками во избежание короткого замыкания.

ИТТ бывают разных видов, отличающихся, в основном, конструкцией, родом установки в сеть, числом ступеней трансформации, коэффициентом трансформации и т.д.

Однако в действительности происходит организация единой информационной сети между подстанциями при помощи установки на них «умных» устройств, которые производят обмен данными между подстанциями при помощи цифровых протоколов.

Современные ИТТ обладают аналоговым входным сигналом, для которого необходим преобразователь в цифровой сигнал, нужный чтобы устройство учета смогло его расшифровать и записать. Данная схема снижает продуктивность работы всей системы, так как один и тот же аналоговый входной сигнал будет иметь различные значения после преобра-

зования.

Из-за этого в настоящее время все большее предпочтение отдается измерительным трансформаторам на базе оптических преобразователей (ОТТ), которые обладают единым цифровым протоколом и дают возможность снизить до минимума вероятность различия значений между данными. Также данный вид трансформаторов является «свободным» от других недостатков, свойственных ИТТ.

Вот лишь некоторые положительные изменения, которые воплощаются в этом классе трансформаторов:

- более высокая точность измерений;
- возможность работы не только с переменным током, но и постоянным;
- возможность проведения измерений в большем диапазоне значений;
- универсальность для практически всех цифровых систем контроля тока (напряжения);
- гораздо меньшие габариты (примерно в 2-2,5 раза) и масса (масса стандартных ИТТ, используемых на подстанциях, от 100 кг, а масса ОТТ от 15 кг);
- снижение затрат на эксплуатацию (до 30%);
- повышение наблюдаемости объекта;
- повышение взрыво-, искро- и пожаробезопасности.

Также данный вид трансформаторов дает возможность постепенного перехода к цифровой станции, то есть ОТТ встраиваются в систему станции гораздо проще и не мешают работе подстанции в штатном режиме.

Конечно же, данный вид трансформаторов имеет и ряд отрицательных качеств, таких как:

- проблемность пайки в случае повреждения оптоволоконного кабеля, используемого для подключения трансформаторов в систему;
- снижение величины пропускаемого тока в месте спайки.

В настоящее время основными разработчиками и поставщиками данного вида оборудования являются канадская фирма NXTPHase и российская компания Profotech в содружестве с американской компанией MaxWell Technologies Inc.

Исходя из выше сказанного, можно сделать вывод, что измерительные трансформаторы на основе оптоволоконного кабеля (или оптических преобразователей) является более экономным и более технологичным вариантом, так как ОТТ, имея малое количество отрицательных черт, превосходят ныне используемые ИТТ по ряду параметров, что в свою очередь обеспечивает, при дальнейшем развитии технологий, более высокую продуктивность учета электроэнергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Петрович, В.П. Силовые преобразователи электрической энергии / В.П. Петрович, Н.А. Воронина, А.В. Глазачев. -Томск: Изд-во Томс. политех. ун-в., 2009. -240 с.
- 2 Инструкция по монтажу силовых трансформаторов напряжением до 110 кВ включительно. ВСН 342-75. -М.: Альвис, 2014. -156 с.
- 3 Инструкция по определению характера внутренних повреждений трансформаторов по анализу газа из газового реле. РД 34.46.502. -Л.: Энергия, 2014. -441 с.
- 4 Инструкция по проверке трансформаторов тока, используемых в схемах релейной защиты и измерения. РД 153-34.0-35.301-2002. -М.: Альвис, 2014. -136 с.
- 5 Тихомиров, П.М. Расчёт силовых трансформаторов / П.М. Тихомиров. -М.: Книга по Требованию, 2012. -544 с.
- 6 Трамбический, А.В. Расчет трансформаторов / А.В. Трамбический. -М.: Книга по Требованию, 2012. -382 с.
- 7 Якобсон, И.А. Испытания переключающих устройств силовых трансформаторов / И.А. Якобсон. -М.: Наука, 2006. -56 с.

REFERENCES

- 1 V.P. Petrovich, N.A. Voronina, A.V. Glazachev. Power converters of electrical energy [Silovye preobrazovateli elektricheskoy energii]. Tomsk. Tomsk Politechn. Univ. Publ. 2009. 240 p.
- 2 Departmental Building Code (VSN) 342-75. Installation Guidelines to Power Transformers up to 110 kV, Inklusiv [Instruktsiya po montazhu silovykh transformatorov napryazheniem do 110 kV vkluychitel'no] Moscow. Al'vis Publ. 2014. 156 p.
- 3 RD 34.46.502. Guidelines for the Determination of Nature of Internal Damage to Transformers by Analysis of Gas from Gas Relay [Instruktsiya po opredeleniyu kharaktera vnutrennikh povrezhdeniy transformatorov po analizu gaza iz gazovogo rele]. Leningrad. Energiya Publ. 2014. 441 p.
- 4 RD 153-34.0-35.301-2002. Guidelines for Testing Transformers Current used in Relay Protection Circuits and Measurement [Instruktsiya po proverke transformatorov toka, ispol'zuemykh v skhemakh releynoy zashchity i izmereniy]. Moscow. Al'vis Publ. 2014. 136 p.
- 5 P.M. Tikhomirov. Calculation of power transformers [Raschet silovykh transformatorov]. Moscow. Kniga po Trebovaniyu Publ. 2012. 544 p.
- 6 A.V. Trambitskiy. Calculation of transformers [Raschet transformatorov]. Moscow. Kniga po Trebovaniyu Publ. 2012. 382 p.
- 7 I.A. Yakobson. Tests of power transformers' switching devices [Ispytaniya pereklyuchayushchikh ustroystv silovykh transformatorov]. Moscow. Nauka Publ. 2006. 56 p.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: измерение электроэнергии, измерительный трансформатор тока, оптоволоконный кабель, оптический преобразователь

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ: Мочалин Константин Сергеевич, канд. техн. наук, старший преподаватель ФГБОУ ВО «СГУВТ»

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ОБМОТКАХ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОВОЗОВ СЕРИИ 2ЭС6 В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

ФГБОУ ВО «Омский государственный университет путей
сообщения»

Сервисное локомотивное депо Московка ООО «СТМ-сервис»

В.В. Бублик, О.В. Гателюк, Е.А. Третьяков, Д.В. Юрасов

ANALYSIS OF ELECTRICAL TRANSIENT PROCESSES IN THE WINDINGS OF THE TRACTION MOTORS SERIES 2ЭС6 DURING OPERATION

Omsk State Transport University (OSTU) 35, Prospekt Marksa, Omsk, 644046, Russia

Service locomotive depot of Moscovka (Service locomotive depot of Moscovka) 1, Depovskaya St., Omsk, 644048, Russia

Vladimir V. Bublik (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of OSTU)

Oleg V. Gatelyuk (Ph.D. of Physico-mathematical Sciences, Assoc. Prof. of OSTU)

Evgeniy A. Tret'yakov (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of OSTU)

Dmitriy V. Yurasov (Engineer of Service locomotive depot of Moscovka)

ABSTRACT: The analysis of electrical transient processes in the windings of traction motors of electric locomotives of the 2ЭС6 series is carried out in order to identify the characteristics of currents distribution in power supply circuit of the traction motors in transients caused by a voltage surge, as well as the resulting overvoltages. The authors consider time dependences of currents and voltages are obtained under various characteristics of an inductive shunt and excitation currents of traction motors under the conditions.

Keywords: electric locomotive 2ЭС6, transient processes, traction motor, overvoltages

Выполнен анализ электрических переходных процессов в обмотках тяговых двигателей электро-
возов серии 2ЭС6 с целью выявления особенностей распределения токов в силовой цепи питания тя-
говых двигателей в переходных режимах, вызванных скачком напряжения, а также возникающих при
этом перенапряжений. Получены временные зависимости токов и напряжений при различных харак-
теристиках индуктивного шунта и токов возбуждения тяговых двигателей в рассматриваемых услови-
ях.

Пробой изоляции и межвитковые замыкания обмоток якоря, возбуждения, с перебросами
электрической дуги по коллектору – весьма частые события, связанные с процессом экс-
плуатации тяговых электродвигателей (ТЭД) грузовых электровозов серии 2ЭС6.

Они вызваны, в основном, по мнению ряда авторов [1, 2] конструктивными особенностями ТЭД, рабочем независимым возбуждением, снижением номинального расхода охлаждающего воздуха и т.д. Известные проблемы [2] возникают с ТЭД также и при питании двух последовательно включенных обмоток возбуждения от одного преобразователя собственных нужд. При этом значительная часть указанных отказов возникает именно в неустановившихся режимах работы ТЭД.

Постановка задачи. Исследования переходных процессов в коллекторных ТЭД постоянного тока электровозов различных серий нашли отражение в работах, связанных с анализом их потенциальной устойчивости в переходных режимах [2], моделировании бросков тока, напряжений, коммутационных процессов в ТЭД с последовательным возбуждением электро-
возов постоянного тока старых серий [4].

В задачи исследования входит математическое описание состояния токов и напряжений в силовой цепи питания ТЭД типа ЭДП 810; выявление особенностей распределения токов в его обмотке возбуждения и шунтовой ветви в переходных режимах; определение бросков токов и перенапряжений.

На характер переходных процессов в ТЭД существенное влияние оказывают параметры внешних цепей. Схема силовых цепей электровозов серии 2ЭС6 для параллельной ветви из двух последовательно включенных ТЭД представлена на рисунке 1.

Основным рабочим режимом возбуждения ТЭД является независимое, при необходимости – последовательное. В контур обмоток возбуждения ТЭД введен сглаживающий реактор (шунт) $L_{ш}$, который также включен в цепь обмоток якоря [3].

Так как, электромагнитные процессы в электрических цепях протекают быстрее по сравнению с изменениями скорости электровоза, поэтому уравнения моментов на валу ТЭД

можно не рассматривать [4], приняв постоянной частоту его вращения. А вот влияние вихревых токов при анализе переходных режимов необходимо учитывать, так как они затягивают изменение основного магнитного потока в магнитопроводе и способствуют возникновению затяжных бросков тока якоря.

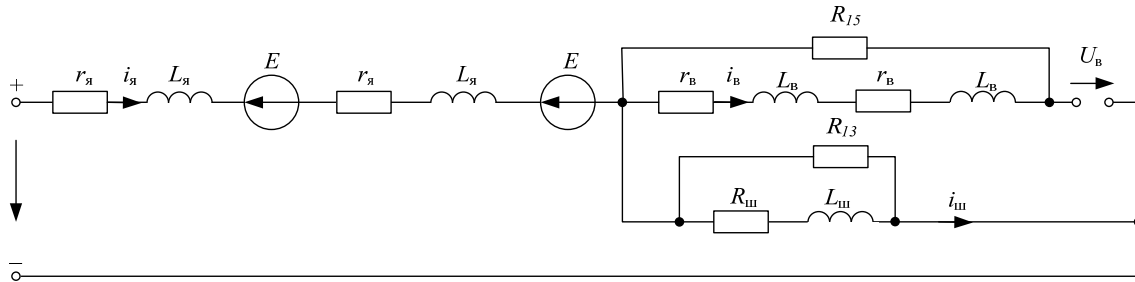


Рисунок 1 – Схема подключения тяговых двигателей электровоза 2ЭС6

Представленная схема подключения тяговых двигателей может быть описана следующей системой уравнений

$$\begin{cases} U_{\text{я}} = 2L_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt} + L_{\text{ш}} \frac{di_{\text{ш}}}{dt} + 2i_{\text{я}}r_{\text{я}} + i_{\text{ш}} \frac{r_{\text{ш}}R_{13}}{r_{\text{ш}} + R_{13}} + E \\ U_{\text{б}} = i_{\text{б}} \frac{2r_{\text{б}}R_{15}}{2r_{\text{б}} + R_{15}} - i_{\text{ш}} \frac{r_{\text{ш}}R_{13}}{r_{\text{ш}} + R_{13}} - L_{\text{ш}} \frac{di_{\text{ш}}}{dt} + 2L_{\text{б}} \frac{di_{\text{б}}}{dt}, \\ i_{\text{я}} = i_{\text{б}} + i_{\text{ш}}; i_{\text{б}} = i_{\mu} + 2p\sigma w_{\text{б}} \frac{T_{\text{вТ}}}{L_{\text{б}}} \frac{d\Phi}{dt} \\ \Phi = f(i_{\mu}) \end{cases} \quad (1)$$

где $L_{\text{я}}, L_{\text{б}}, L_{\text{ш}}$ – индуктивные сопротивления обмоток якоря (добавочных полюсов, компенсационной обмотки), возбуждения, шунта соответственно (рисунок 1);

$r_{\text{я}}, r_{\text{б}}$ – сопротивление обмоток якоря, возбуждения;

$i_{\text{я}}, i_{\text{б}}, i_{\text{ш}}$ – токи якоря, возбуждения и шунта;

i_{μ} – ток намагничивания, соответствующий по нагрузочной характеристике ТЭД $\Phi = f(i_{\mu})$ текущему значению магнитного потока;

p – число пар полюсов ТЭД;

σ – коэффициент рассеяния;

$w_{\text{б}}$ – число витков катушки обмотки возбуждения;

$T_{\text{вТ}}$ – постоянная времени электрических переходных процессов в контуре вихревых токов;

E – якорная противо-ЭДС

$$E = 2C_{\text{н}}\Phi n;$$

$C_{\text{н}}$ – конструктивный коэффициент;

Φ – магнитный поток;

n – частота вращения ТЭД.

При исследовании переходных процессов представляется возможным не считаться с влиянием на магнитный поток машины поперечной реакции якоря, так как действие реакции якоря в переходном процессе в значительной степени уравнивается действием вихревых токов [2].

Результаты моделирования. Графики электрических переходных процессов, полученные в результате решения системы дифференциальных уравнений (1), представлены на рисунке 2. Ток якоря ТЭД при скачке напряжения ΔU выражается через начальное значение тока якоря, протекающего до начала переходного процесса $I_{\text{я}}(0)$ [1]

$$I_{\text{я}}^{\text{max}} = I_{\text{я}}(0) + \frac{\Delta U}{r_{\text{д}}}, \quad (2)$$

где r_d – сопротивление двигательной цепи.

Регулирование тока возбуждения ТЭД электровоза 2ЭС6 осуществляется по закону [2]

$$I_b = I_{b0} + kI_a, \quad (3)$$

где I_{b0} – задание минимального тока возбуждения, установленное системой управления;

k – коэффициент компаундирования обратной связи по току якоря, определяемый через отношение омического сопротивления реактора $L_{ш}$ к суммарному сопротивлению цепи реактора и возбуждения.

Распределение токов в обмотке возбуждения и шунтовой ветви ТЭД играет определяющую роль в их надежности при переходных режимах.

На рисунке 2 представлен график зависимости тока возбуждения от тока якоря в ТЭД электровоза 2ЭС6 при скачке напряжения на 20%.

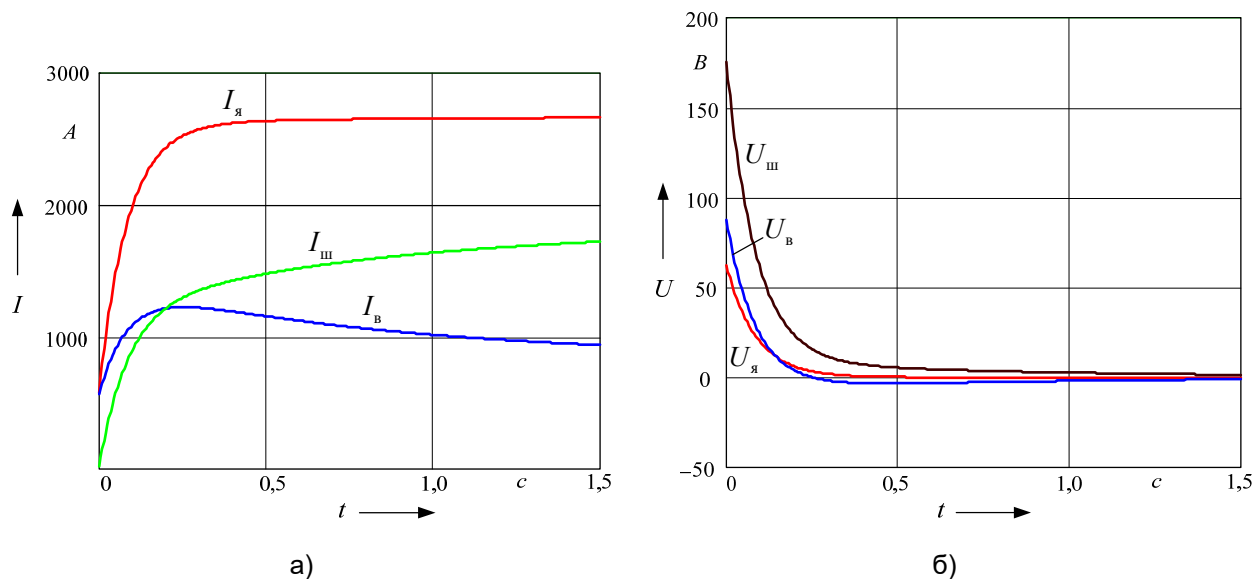


Рисунок 2 – График электрических переходных процессов токов (а) и напряжений (б) в ТЭД ЭДП 810 при скачке напряжения

На начальном этапе переходного процесса наблюдается существенная разница в значениях токов возбуждения и якоря, что существенно ухудшает потенциальные условия на коллекторе ТЭД.

Величина тока возбуждения определяется величиной напряжения статического преобразователя и тока якоря.

На качество переходных процессов по условиям коммутации оказывает влияние соотношение между током якоря и возбуждения, особенно в режимах ослабления возбуждения. Поэтому индуктивные и активные сопротивления шунтовой ветви должны обеспечивать необходимое качество переходных процессов при скачке напряжения со стороны питания ТЭД.

Интерпретация полученных результатов.

При скачке напряжения на 20% в цепи питания ТЭД расчетный бросок тока якоря составляет около 4,5 от номинального, возбуждения – 1,4. Таким образом, основной бросок тока якоря приходится на шунтовую ветвь, при этом существенно меняется соотношение между токами якоря и возбуждения относительно номинального режима. Перенапряжения на обмотках ТЭД не превышают 95 В.

Увеличение индуктивности реактора в шунтовой ветви не позволяет полностью сбалансировать временные процессы изменения токов якоря и возбуждения. Тем более указанный реактор, установленный в цепи тока возбуждения, сглаживает пульсации преобразователя собственных нужд и не может иметь значительную индуктивность, в том числе из-за возрастания перенапряжений и ухудшения качества регулирования тока возбуждения системой управления.

Заключение. Практическая значимость данного исследования заключается в получении представленных результатов амплитуд и временного распределения токов и напряжений в силовой цепи питания ТЭД электровоза 2ЭС6 в переходном режиме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Савелов, Н.С. Ускоренный анализ переходных процессов в тяговом двигателе постоянного тока / Н.С. Савелов, П.Г. Колпахчан, Ч.Д. Мань // -Известия высших учебных заведений. Серия Электромеханика. -2010. -№4. -С. 14-17.

2 Дурандин, М.Г. Анализ потенциальной устойчивости тяговых электродвигателей грузовых электровозов 2ЭС6 / М.Г. Дурандин, И.Г. Иванов // -Транспорт Урала. -2015. -№1(44). -С. 84-92.

3 Электровоз грузовой постоянного тока 2ЭС6 с коллекторными тяговыми двигателями. Руководство по эксплуатации. -В.Пышма: Изд-во Уральского завода железнодорожного машиностроения, 2008. -Ч.1. -166 с.

4 Щербаков, В.Г. Тяговые электрические машины / Под ред. В.Г. Щербакова, А.Д. Петрушина. -М.: УМЦ ЖДТ, 2016. -641 с.

REFERENCES

1 N.S. Savelov, P.G. Kolpakhch'yan, Ch.D. Man'. Accelerated analysis of transients in a direct current traction motor [Uskorennyy analiz perekhodnykh protsessov v tyagovom dvigatele postoyannogo toka]. *Digest of higher educational institutions. Electromechanics series [Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya Elektromekhanika]*. 2010. No. 4. pp. 14-17.

2 M.G. Durandin, I.G. Ivanov. Analysis of potential stability of traction electric motors for freight electric locomotives "2ЭС6" [Analiz potencial'noy ustoychivosti tyagovykh elektrodvigatelay gruzovykh elektrovozov 2ES6]. *Transport of the Urals [Transport Urala]*. 2015. No. 1(44). pp. 84-92.

3 Direct current electric freight «2ЭС6» with collector traction motors. Manual [Elektrovoz gruzovoy postoyannogo toka 2ES6 s kolektornymi tyagovymi dviga-telyami. Rukovodstvo po ekspluatatsii]. V.Pyshma. Ural railway engineering plant Publ. 2008. Vol 1. 166 p.

4 V.G. Shcherbakov, A.D. Petrushin. Traction electrical machines [Tyagovye elektricheskie mashiny]. Moscow. UMTs ZhDT Publ. 2016. 641 p.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: электровоз серии 2ЭС6, переходные процессы, тяговый двигатель, перенапряжения

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ: Бублик Владимир Васильевич, канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «ОмГУПС»

Гателюк Олег Владимирович, канд. физ.-мат. наук, доцент ФГБОУ ВО «ОмГУПС»

Третьяков Евгений Александрович, канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «ОмГУПС»

Юрасов Дмитрий Вениаминович, мастер СЛД Москва

ПОЧТОВЫЙ АДРЕС: 644046, г.Омск, пр.К.Маркса, 35, ФГБОУ ВО «ОмГУПС»

644048, г.Омск, ул.Деповская, 1, СЛД Москва

АНАЛИЗ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ТРАНСПОРТОМ С УЧЕТОМ РАСПОЛОЖЕНИЯ ДОРОЖНОЙ СЕТИ

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»

О.В. Рослякова, Д.В. Панов

ANALYSIS OF AIR POLLUTION FROM TRANSPORT CONSIDERING ROAD NETWORK

Siberian State University of Water Transport (SSUWT) 33, Schetinkina St., Novosibirsk, 630099, Russia

Oksana V. Roslyakova (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of SSUWT)

Dmitriy V. Panov (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of SSUWT)

ABSTRACT: The article shows the results of assessment of road traffic contribution to the general air pollution.

Keywords: air pollution, ecological assessment, road network, landform

Приведены результаты оценки вклада автотранспорта в общее загрязнение атмосферы.

В крупных городах наиболее остро стоят вопросы повышения качества окружающей природной среды, поскольку их социально-экономическое развитие, и как следствие, их экологическое состояние, напрямую связаны с увеличением техногенной нагрузки на окружающую среду. Процесс загрязнения, как основное проявление техногенного воздействия, в городских условиях имеет повсеместное распространение, протекает в течение всего времени освоения и использования территории и отражается на всех землях. Общие тенденции изменения экологических условий территории специфичны для каждого города с характерными для него природной обстановкой, структурой застройки и техногенными источниками.

Распределение загрязнений атмосферного воздуха в городе характеризуется сильной пространственной неоднородностью. Это связано с разными фактами. Существенное влияние оказывает не только количество источников и метеорологические условия, но и топография поверхности и характер городской застройки. Совокупность всех этих факторов приводит к тому, что распределение загрязнений атмосферного воздуха в городе характеризуется сильной пространственной неоднородностью. А знание такой неоднородности важно при планировании новых объектов строительства на территории города [1].

Чаще всего городские власти могут позволить себе получать информацию о состоянии

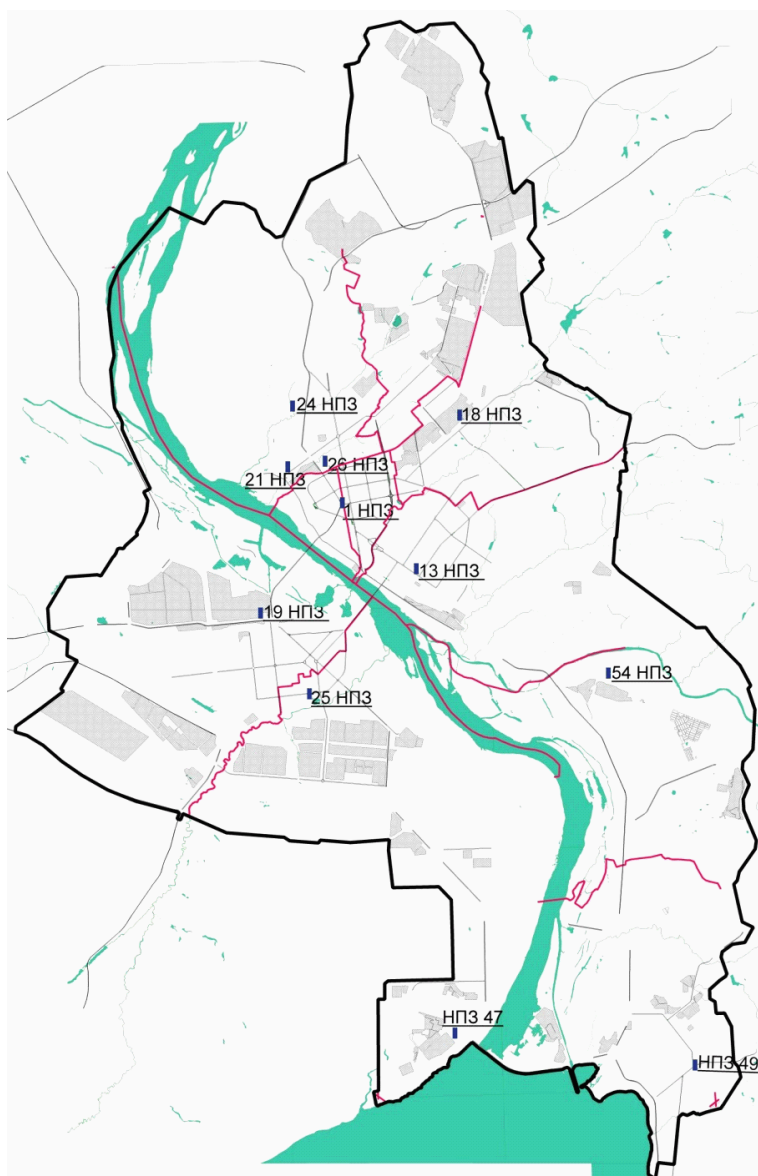


Рисунок 1 – Карта схема размещения постов города Новосибирска

атмосферы в ограниченном количестве точек. Так, в Новосибирске Центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды проводит регулярные наблюдения за загрязнением атмосферного воздуха на 11 стационарных постах, что, естественно, не может дать подробную достоверную картину состояния атмосферы города (рисунок 1).

Однако данные, полученные на таких постах, могут служить критерием работоспособности теоретических моделей, описывающих пространственное распределение загрязнений. Но планирование и размещение постов наблюдения происходило без учета последующей планировки и застройки. С 2010 г. в Новосибирске происходит активное строительство жилых домов, планирование новых жилых массивов и микрорайонов. Сочетание этих факторов послужило толчком для проведения, специальных исследований по получению данных о загрязнении воздуха в новых микрорайонах.

Исследования по оценке влияния автотранспорта на общее загрязнение атмосферы производились в Ленинском районе рядом с микрорайоном «Новомарусино».

Строительство микрорайона началось в 2012 г. Ближайший пост наблюдения за состоянием атмосферы находится на расстоянии 7 км (НПЗ 19). Поэтому на этот участок в Новосибирском Центре по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды информации нет. Для оценки вклада автотранспорта в общее загрязнение атмосферы в районе микрорайона «Новомарусино» и на прилегающих к ней территории в июле 2017 г. были проведены натурные исследования транспортного потока, и затем рассчитана концентрация угарного газа и оксидов азота на прилегающей к этому микрорайону территории.

Учет транспорта проводился студентами Сибирского государственного университета водного транспорта, обучающихся по специальности «Инженерная защита окружающей среды». Натурные исследования и производимые расчеты осуществлялись по методике расчетов выбросов в атмосферу загрязняющих веществ автотранспортом на городских магистралях [2]. В настоящее время в мире имеется большое количество таких методик. В основе большинства из них лежит определение пробегового выброса всего транспортного потока на автомагистрали и последующее гауссовское распределение загрязнителей по прилегающей территории [3].

Учет автотранспорта проводился по одному часу непрерывно три раза в день (7-8; 14-15; 17-18 часов) в течение недели. Отдельно учитывали легковые и грузовые автомобили. Общая интенсивность транспортного потока показана в таблице 1.

Таблица 1 – Среднесуточная интенсивность транспортного потока и концентрация загрязнителей в атмосфере с учетом климатических явлений

Дни недели	Интенсивность потока, ед./ч	Оксид углерода, мг/м ³	Оксид азота, мг/м ³	Скорость ветра, м/с	Предельно допустимая концентрация (ПДК _{с.с.}), мг/м ³	
					Оксид углерода	Оксид азота
Понедельник	1429	0,38	0,04	4	5	0,06
Вторник	1731	0,46	0,05	—	5	0,06
Среда	1613	0,43	0,05	2	5	0,06
Четверг	1835	0,48	0,06	3	5	0,06
Пятница	2520	0,66	0,08	4	5	0,06
Суббота	2623	0,69	0,08	5	5	0,06
Воскресенье	2500	0,66	0,08	5	5	0,06

Проанализировав полученные результаты можно отметить, что наблюдается небольшое превышение по оксиду азота в выходные дни. Это связано с тем, что по улице Большая в выходные дни проезжает большой поток автомашин на дачные участки и садовые общества туда и обратно.

Чтоб утверждать о репрезентативности натурных исследований и пригодности расчетных методов для оценки роли автотранспорта в состоянии атмосферы города необходимо повторное проведение эксперимента с применением портативного газоанализатора.

Так же сложившаяся на настоящий момент структура транспортной сети не способствует форсированию благоприятных экологических условий.

Основными проблемами состояния существующей улично-дорожной сети города является: недостаточная протяженность магистральных улиц и дорог – всего по городу 260 км, а с учетом только застроенной территории – 223 км, что не обеспечивает пропуск возрастаю-

щих транспортных потоков, создает аварийные ситуации. Низкая плотность магистральной сети, которая составляет в целом по городу 0,52 км² и значительно различается по районам города, в результате ряд районов и зон существующей индивидуальной застройки не имеет устойчивых транспортных связей с другими частями города. Отсутствие дублирующих магистралей по основным направлениям, что вынуждает пропускать интенсивные потоки транспорта по немагистральным улицам и по магистралям федерального значения, в результате происходит ухудшение общего экологического состояния жилых зон, загрязнение атмосферы, снижается пропускная способность магистралей внешнего транспорта.

Недостаточный уровень обустройства и ненормативные параметры магистральных улиц и дорог (из 80 магистральных улиц только 24 имеют ширину проезжей части 20 м и более, то есть 6 полос движения в обе стороны; у остальных улиц ширина дорожного покрытия составляет около 12 м), препятствует организации нормальных условий уличного движения [4].

Анализ расположения дорожной сети с учетом модели рельефа показал, что большая часть дорог города располагается на возвышенностях. Из-за сильной изрезанности рельефа были построены дороги с меньшим числом полос. Особенности рельефа в некоторых случаях приводят к накоплению снега.

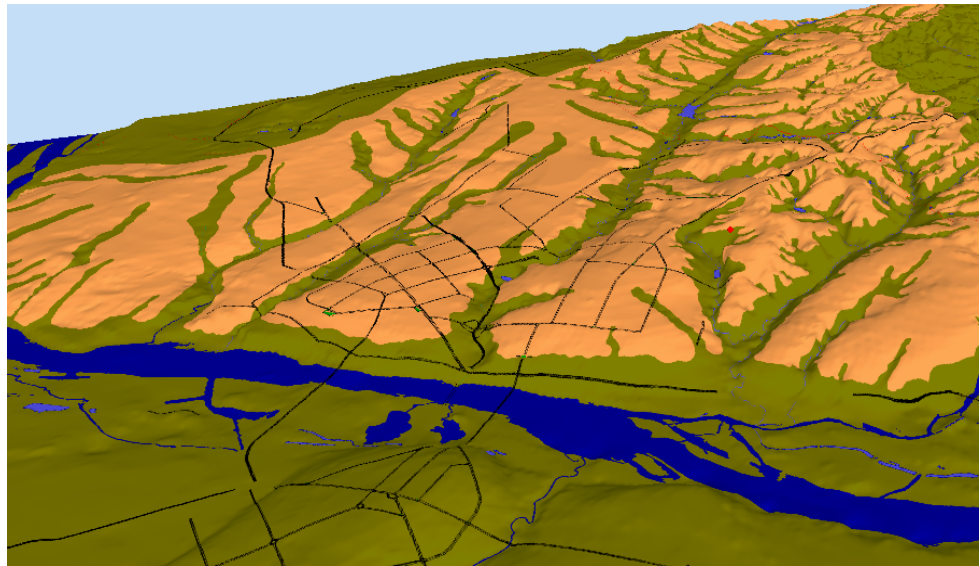


Рисунок 2 – Расположение дорог в городе Новосибирске

Отсутствие систем ливневой канализации, несоответствие поперечного профиля и организации рельефа по ряду магистральных улиц и их частей нормативным требованиям, усугубляет условия эксплуатации и снижает пропускную способность улично-дорожной сети в различные сезоны года.

На рисунке 2 показано пространственное расположение автомагистралей.

Пропускная способность улично-дорожной сети напрямую влияет на количество выбросов от автомобильного транспорта.

В заключение необходимо отметить, что вклад автотранспорта в общее загрязнение атмосферы города, несомненно, значителен и необходимы дальнейшие исследования с получением не только данных об интенсивности транспортных потоков, но и фактических значений концентраций загрязнителей. Наличие таких данных позволит сделать вывод о возможности применения методики расчета концентрации загрязнителей поллютантов в конкретной точке пространства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Трубина, Л.К. Некоторые аспекты учета экологической составляющей при мониторинге земель городских территорий / Л.К. Трубина, Д.В. Панов // -Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. -2012. -№2/1. -С. 121-123.
- 2 Дьяков, А.Б. Экологическая безопасность транспортных потоков / Под ред. А.Б. Дьякова. -М.: Транспорт, 1989. -128 с.
- 3 Панов, Д.В. Анализ пространственного загрязнения атмосферы транспортом с использованием 3D-модели городской территории / Д.В. Панов, Л.А. Черновский, А.А. Юдина // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012: VIII междунар. науч. конгр., 10-12 апреля 2012г. - Новосибирск: Изд-во Сиб. гос. геодез. акад., 2012. -220 с.

REFERENCES

- 1 L.K. Trubina, D.V. Panov. Some aspects of environmental accounting in urban territories monitoring [Nekotorye aspekty ucheta ekologicheskoy sostavlyayushchey pri monitoringe zemel' gorodskikh territoriy]. *Geodesy and aerial photography [Geodeziya i aerofotos'emka]*. 2012. No. 2/1. pp. 121-123.
- 2 A.B. D'yakova. Environmental Safety of traffic flows [Ekologicheskaya bezopasnost' transportnykh potokov]. Moscow. Transport Publ. 1989. 128 p.
- 3 D.V. Panov, L.A. Chernovskiy, A.A. Yudina. Analysis of the atmosphere spatial pollution by transport using a 3D model of an urban area [Analiz prostanstvennogo zagryazneniya atmosfery transportom s ispol'zovaniem 3D-modeli gorodskoy territorii]. *Interexpo GEO-Siberia-2012: VIII International Scientific Congress 10-12 Apr. 2012. Novosibirsk. 2012.* 220 p.
- 4 Department of construction and architecture of the city hall of No-

4 Департамент строительства и архитектуры мэрии города Новосибирска. Состояние транспортной инфраструктуры. -Режим доступа: <http://dsa.novosibirsk.ru/ru/site/1576.html>. -01.06.2018 г.

vosibirsk. The state of the transport infrastructure [Departament stroitel'stva i arkhitektury merii goroda Novosibirska. Sostoyanie transportnoy infrastruktury]. -Режим доступа: <http://dsa.novosibirsk.ru/ru/site/1576.html>. -01 Jun 2018.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: загрязнение атмосферы, экологическая оценка, дорожная сеть, рельеф
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ: Рослякова Оксана Вячеславовна, канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «СГУВТ»
Панов Дмитрий Владимирович, канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «СГУВТ»
ПОЧТОВЫЙ АДРЕС: 630099, г.Новосибирск, ул.Щетинкина, 33, ФГБОУ ВО «СГУВТ»

ПОВЫШЕНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВОДОРОДСОДЕРЖАЩЕГО СИНТЕЗ-ГАЗА

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения»

В.В. Красников

INCREASING THE ECOLOGICAL PERFORMANCE OF MARINE DIESEL ENGINE USING THE PARTIAL CONVERSION OF DIESEL FUEL IN THE HYDROGEN-CONTAINING SYNGAS

Siberian Transport University (STU) 191, Dusi Koval'chuk St., Novosibirsk, 630049, Russia
Vasilily V. Krasnikov (Senior Lecturer of, STU)

ABSTRACT: The use of hydrogen-containing additives to the main fuel of internal combustion engine is considered in this paper. As an additive, the authors decided to apply hydrogen in the synthesis gas composition. Experiments have been made, help authors to analyze the possibilities of using catalytic converters on the ship, as well as the resulting changes in the environmental and economic characteristics of various diesel engines.

Keywords: diesel, hydrogen fuel, syngas, the ecology of transportation, fuel efficiency

Рассмотрены вопросы использования водородсодержащих добавок к основному топливу в энергетических установках с двигателями внутреннего сгорания. В качестве добавок рассматривается водород в составе синтез-газа. Приведён анализ возможностей использования каталитических конверторов на судне, а также полученные в результате экспериментов изменения экологических и экономических характеристик различных дизельных ДВС.

Большое количество судов, передвигающихся по водным артериям всего мира, используют в качестве силовой установки двигатель внутреннего сгорания (ДВС), работающий на тяжёлых углеводородных топливах – мазуте, дизельном топливе (ДТ). Вредные выбросы, производимые силовой установкой, существенно влияют на экологическое положение многих стран, и в первую очередь – городов, где расположены морские порты и терминалы.

Одно из возможных решений данной проблемы кроется в повышении экологических и экономических показателей установок за счёт улучшения характеристик топлива. Именно горюче-смазочные материалы (ГСМ) – один из основных затратных пунктов при расчёте стоимости перевозок, и снижение расхода топлива способно снова сделать речные и морские перевозки конкурентоспособными. Однако перевод силовой установки на другие виды топлива, в том числе на газообразные, зачастую означает переработку проекта судна для выполнения всех требований сертификации и обучение персонала.

Ранее проводившиеся исследования по использованию водородсодержащего топлива в судовых дизельных установках успешны и показали улучшение эксплуатационных характеристик ДВС даже при частичном замещении основного топлива [1]. Но при применении в чистом виде водород обладает рядом недостатков, в том числе необходимостью внесения кардинальных изменений в существующие конструкции ДВС. Неэффективные и тяжёлые системы хранения, необходимость модернизации существующей инфраструктуры, взрыво- и пожароопасность – всё это усложняет внедрения водородного топлива на транспорте.

Развитие каталитических технологий дало возможность открытия нового направления использования водорода, а именно в виде частичной подачи одновременно с основным топливом синтез-газа. Конвертирование в синтез-газ возможно для многих видов топлив, однако для дизельного топлива проблема каталитического риформинга считалась трудно реализуемой из-за сложности испарения тяжёлых фракций углеводородов и опасения быстрого выхода каталитического реактора из строя в связи с наличием серы. Использование для каталитической конверсии иного вида топлива, требующего дополнительные площади для

размещения на борту, не всегда возможно.

Сотрудникам ФГБОУ ВО СГУПС совместно с учеными Института катализа СО РАН удалось реализовать конвертирование дизельного топлива [2, 3].

Реализация возможности использования конвертора на судне представлена разработанной и запатентованной схемой питания (рисунок 1) [4].

В лаборатории ФГБОУ ВО СГУПС в рамках научно-исследовательской работы по гранту были проведены экспериментальные исследования на дизельных установках 1Ч8,2/7,5 и 4ЧН9,5/11,5 [5, 6]. Для измерения экологических характеристик использовалось несколько приборов, способных проанализировать большое количество различных вредных примесей в отработавших газах двигателя: анализаторы дымовых газов «testo 350» и «Инфракар 08.01», измеритель дымности отработавших газов «Мета-01 МП 0.1». При исследованиях осуществлялась работа двигателей в разных эксплуатационных режимах.

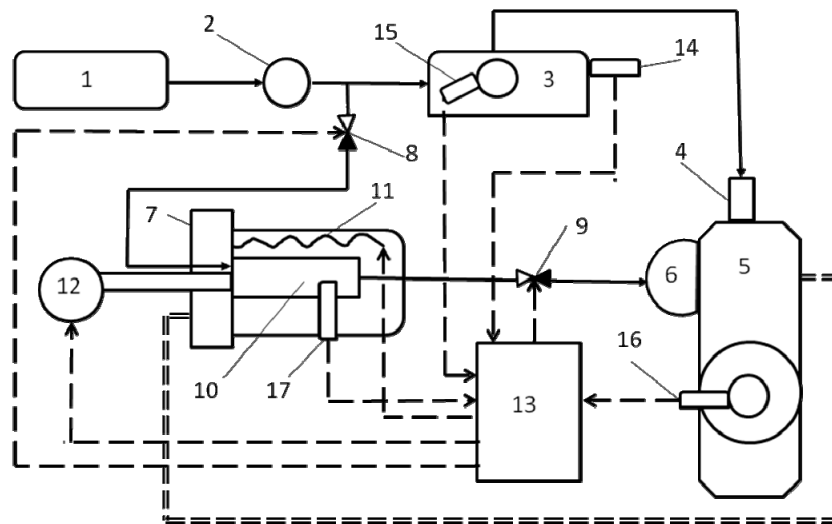


Рисунок 1 – Схема системы питания топливом судовой энергетической установки с каталитическим генератором синтез-газа (Патент №179096): 1-топливный танк; 2-топливоподкачивающий насос; 3-топливный насос высокого давления; 4-топливные форсунки; 5-ДВС; 6-впускной коллектор; 7-теплообменник; 8-клапан-дозатор; 9-впускной клапан; 10-каталитический конвертор; 11-испаритель; 12-нагнетатель воздуха; 13-блок управления подачей синтез-газа; 14-датчик положения рейки топливного насоса; 15-датчик положения органа управления подачей топлива; 16-датчик частоты вращения коленчатого вала двигателя; 17-датчик температуры каталитического элемента

Двигатель 1Ч8,2/7,5 в составе дизель-генератора марки ВСН-7Д, имеющий ручное управление ТНВД:

- минимальная устойчивая частота вращения коленчатого вала без подачи нагрузки при механически зафиксированной топливоподаче;
- номинальная частота вращения коленчатого вала с подачей нагрузки 3 кВт при зафиксированной топливоподаче.

Двигатель 4ЧН9,5/11,5 в составе дизель-генератора марки HUAFA 495ZD, имеющий электронно-управляемый ТНВД и постоянную частоту вращения коленчатого вала 1500 об/мин:

- подача нагрузки не осуществляется;
- подача нагрузки 20 кВт.

Для первых режимов работы без нагрузки отмечена нецелесообразность подачи синтез-газа, поскольку газоанализаторы углеводородов (СН), так же происходит увеличение расхода топлива с учетом части преобразованного ДТ в синтез-газ. Кроме того, при превышении порога 10% подачи водорода в составе синтез-газа по массе от основного расходующего топлива были отмечены вспышки во всасывающем патрубке и общая неустойчивая работа установки 1Ч8,2/7,5, вплоть до ее полного останова. Регулировочные характеристики показали так же и снижение температуры отработавших газов, что косвенно может повлиять и на процесс горения рабочей смеси в камере сгорания (рисунки 2 и 3) [7].

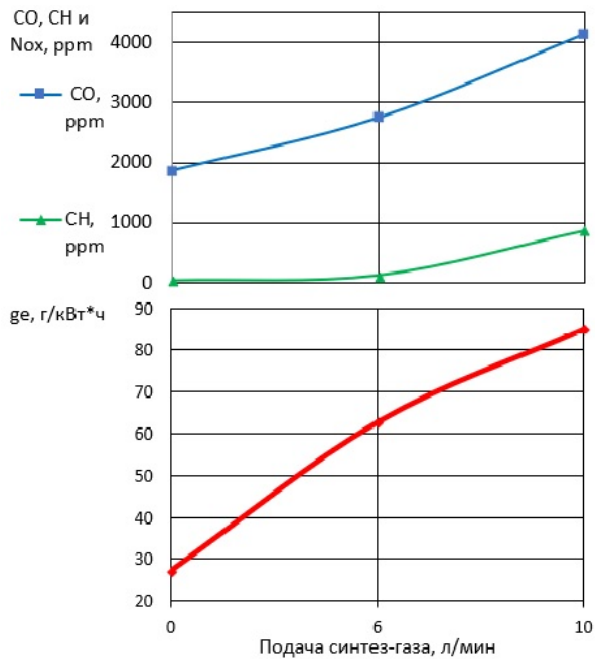


Рисунок 2 – Регулировочная характеристика двигателя 1Ч8,2/7,5 при подаче синтез-газа без нагрузки

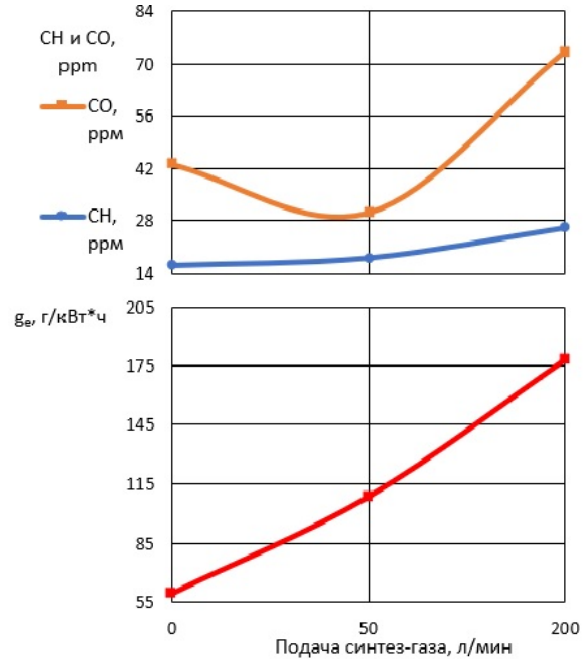


Рисунок 3 – Регулировочная характеристика двигателя 4ЧН9,5/11,5 при подаче синтез-газа без нагрузки

В нагрузочных режимах, в первую очередь, отмечается резкое снижение содержания твёрдых частиц, являющихся концентраторами ароматических углеводородов, опасных для живых организмов. Кроме того, снижение расхода топлива обеспечивает экономический эффект применения синтез-газа в ДВС (рисунки 4, 5). В многоцилиндровый двигатель с системой наддува синтез-газ подавался после турбокомпрессора, для исключения возникновения всплеск от соприкосновения с горячими элементами турбины [8].

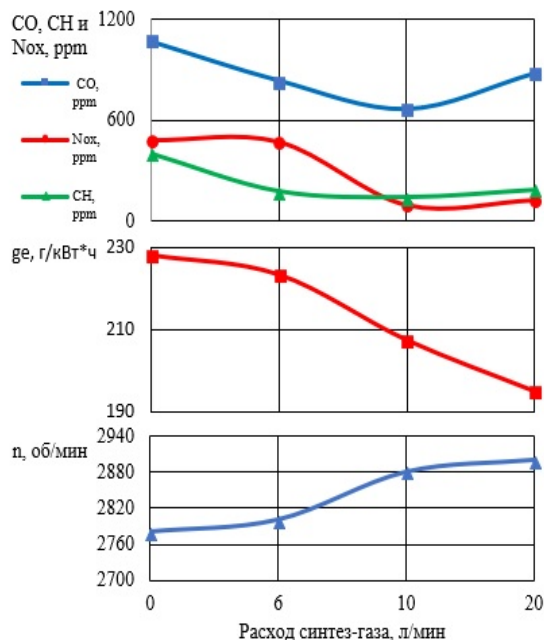


Рисунок 4 – Регулировочная характеристика двигателя 1Ч8,2/7,5 при подаче синтез-газа с нагрузкой

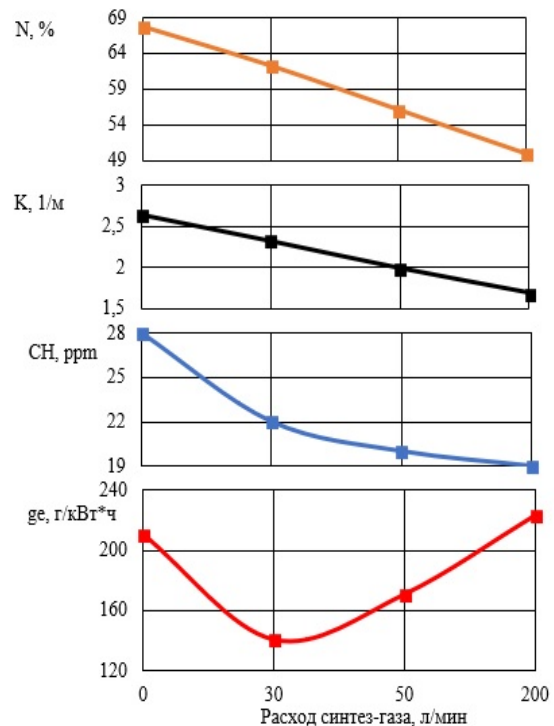


Рисунок 5 – Регулировочная характеристика двигателя 4ЧН9,5/11,5 при подаче синтез-газа с нагрузкой

Анализ возможности использования систем частичной конвертации дизельного топлива в водородсодержащий синтез-газ и его подача в судовые дизельные установки показывает возможность успешного применения водородсодержащего топлива в традиционных поршневых двигателях [9]. Это позволяет решить множество регламентирующих и эксплуатационных проблем и повысить конкурентоспособность водного транспорта. Установка, работающая с добавлением синтез-газа, способна выполнить жёсткие предписания международных требований к экологичности судов, а судовладельцы смогут сэкономить на дорогостоящей модернизации транспорта. Каталитические конверторы на сегодняшний день имеют малые размеры, простоту конструкции и надёжность в эксплуатации, доказанную при работе на автотранспорте, обеспечивают наименьшие технологические и экономические затраты при разработке и запуске переработки нефти в альтернативные источники энергии [10].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Титов, С.В. Исследование влияния водородосодержащей газовой присадки на концентрацию окислов азота в отработавших газах судового дизеля / С.В. Титов, В.Е. Антонов, Г.С. Юр // -Науч. пробл. трансп. Сиб. и Дал. Вост. -2008. -№1. -С. 204-206.
- 2 Кириллов, В.А. Катализаторы конверсии углеводородных и синтетических топлив для бортовых генераторов синтез газа / В.А. Кириллов и др. // -Катализ в промышленности. -2011. -№1. -С. 60-67.
- 3 Porsin, A. Catalytic reactor with metal gauze catalysts for combustion of liquid fuel / A. Porsin, A. Kulikov, I. Dalyuk, V.Rogozhnikov, V. Kochergin // -Chemical Engineering Journal. -2015. -№282. -P. 233-240.
- 4 Патент РФ №179096, МПК F02B 43/08 F02M 25/10 F02M 25/12. Система питания двигателя внутреннего сгорания водородсодержащим топливом / В.И. Кочергин, В.В. Красников, С.П. Глушков №2017100388. Заявл. 09.01.2017; опубл. 26.04.2018. Бюл. №12.
- 5 Глушков, С.П. Исследование влияние добавок водородосодержащего синтез-газа на рабочий процесс дизельных ДВС / С.П. Глушков, В.И. Кочергин, В.В. Красников, Н.С. Вахрина // Политранспортные системы материалы: сб. материалов IX Международной научно-технической конференции. -Новосибирск: Изд-во Сиб. гос. ун-в. путей сообщ., 2017. -С. 512-515.
- 6 Исследование влияния частичной конвертации дизельного топлива в водородсодержащий синтез-газ на эксплуатационные показатели энергетических установок: отчет о НИР / рук. работы С.П. Глушков; исполн.: В.И. Кочергин [и др.]. -Новосибирск: Изд-во Сиб. гос. ун-в. путей сообщ., 2017. -100 с.
- 7 Глушков, С.П. Влияние неравномерности крутящего момента на динамические характеристики энергетических установок / С.П. Глушков, В.И. Кочергин; отв. ред. А.С. Ильных. -Новосибирск: Изд-во Сиб. гос. ун-в. путей сообщ., 2018. -118 с.
- 8 Глушков, С.П. Влияние использования альтернативных видов топлива на характеристики рабочих процессов ДВС / С.П. Глушков, В.И. Кочергин, В.В. Красников // -Вестник Астр. гос. техн. ун-в.: Мор. техн. и техн. -2018. -№1. -С. 24-32.
- 9 Глушков, С.П. Улучшение экологических характеристик судовых энергетических установок путем применения водородсодержащего синтез-газа / С.П. Глушков, В.И. Кочергин, В.В. Красников, А.Ю. Кирпичников // -Вестник Астр. гос. техн. ун-в.: Мор. техн. и техн. -2017. -№3. -С. 44-50.
- 10 Родионов, В.В. Водородная энергетика на автомобильном транспорте / В.В. Родионов, А.С. Денисов, Н.В. Горшков. -Саратов: Изд-во Саратов. гос. техн. ун-в., 2011. -158 с.

REFERENCES

- 1 S.V. Titov, V.E. Antonov, G.S. Yur. Research of the hydrogen-containing gas additives influence on the concentration of nitrogen oxides in the exhaust gases of marine Diesel [Issledovanie vliyaniya vodorodosoderzhashchey gazovoy prisadki na kontsentratsiyu okislov azota v otrabotavshikh gazakh sudovogo dizelya]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*. 2008. No. 1. pp. 204-206.
- 2 V.A. Kirillov. Catalysts of the conversion of hydrocarbon and synthetic fuels for onboard gas synthesis generators [Katalizatory konversii uglevodorodnykh i sinteticheskikh topliv dlya bortovykh generatortov sintez gaza]. *Kataliz v promyshlennosti*. 2011. No. 1. pp. 60-67.
- 3 A. Porsin, A. Kulikov, I. Dalyuk, V.Rogozhnikov, V. Kochergin. Catalytic reactor with metal gauze catalysts for combustion of liquid fuel. *Chemical Engineering Journal*. 2015. No. 282. pp. 233-240.
- 4 V.I. Kochergin, V.V. Krasnikov, S.P. Glushkov. RF patent No. 179096. The supply system of the internal combustion engine by hydrogen-containing fuel [Sistema pitaniya dvigatelya vnutrennego sgoraniya vodorodosoderzhashchim toplivom]. Vol. 12. 26 Apr. 2018.
- 5 S.P. Glushkov, V.I. Kochergin, V.V. Krasnikov, N.S. Vakhrina. The research of the hydrogen-containing synthesis gas additives influence on the working process of internal combustion Diesel engines [Issledovanie vliyaniya dobavok vodorodosoderzhashchego sintez-gaza na rabochiy protsess dizel'nykh DVS]. *Polytransport systems: IX International scientific and technical conference materials [Politransportnye sistemy materialy]*. Novosibirsk. Siberian St. Transp. Univ. Publ. 2017. pp. 512-515.
- 6 S.P. Glushkov, V.I. Kochergin. The research of the Diesel fuel partial conversion effect into hydrogen-containing synthesis gas on the operational performance of power plants [Issledovanie vliyaniya chastichnoy konvertatsii dizel'nogo topliva v vodorodosoderzhashchiy sintez-gaz na ekspluatatsionnye pokazateli energeticheskikh ustanovok]. Novosibirsk. Siberian St. Transp. Univ. Publ. 2017. 100 p.
- 7 S.P. Glushkov, V.I. Kochergin. The effect of torque non-uniformity on the dynamic characteristics of power plants [Vliyaniye neravnomernosti krutyashchego momenta na dinamicheskie kharakteristiki energeticheskikh ustanovok]. Novosibirsk. Novosibirsk. Siberian St. Transp. Univ. Publ. 2018. 118 p.
- 8 S.P. Glushkov, V.I. Kochergin, V.V. Krasnikov. The application impact of alternative fuels on the characteristics of the engine working processes [Vliyaniye ispol'zovaniya al'ternativnykh vidov topliva na kharakteristiki rabochikh protsessov DVS]. *Bulletin Of Astrakhan St. Techn. Univ. Marine technic and technology*. 2018. No. 1. pp. 24-32.
- 9 S.P. Glushkov, V.I. Kochergin, V.V. Krasnikov, A.Yu. Kirpichnikov. Improving the environmental performance of ship power plants through the use of hydrogen-containing synthesis gas [Uluchsheniye ekologicheskikh kharakteristik sudovykh energeticheskikh ustanovok putem primeneniya vodorodosoderzhashchego sintez-gaza]. *Bulletin Of Astrakhan St. Techn. Univ. Marine technic and technology*. 2017. No. 3. pp. 44-50.
- 10 V.V. Rodionov, A.S. Denisov, N.V. Gorshkov. Hydrogen economy in automobile transport [Vodorodnaya energetika na avtomobil'nom transporte]. Saratov. Saratov St. Techn. Univ. 2011. 158 p.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: дизель, водородное топливо, синтез-газ, экология на транспорте, топливная экономичность
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ: Красников Василий Викторович, преподаватель СГУПС
ПОЧТОВЫЙ АДРЕС: 630049, г.Новосибирск, ул.Д.Ковальчук, 191, СГУПС

ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА ВОДОЗАЩИТНЫХ ДАМБ НА РЕКЕ БЕРДЬ НА ВОДНЫЕ БИОЛОГИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ И СРЕДУ ИХ ОБИТАНИЯ

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»

В.В. Шамова, П.Д. Мурин

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF WATER RETAINING STRUCTURES CONSTRUCTION ON THE BERD RIVER ON WATER BIOLOGICAL RESOURCES AND ECOSYSTEM

Siberian State University of Water Transport (SSUWT) 33, Schetinkina St., Novosibirsk, 630099, Russia

Vera V. Shamova (Ph.D. of Engineering Sciences, Prof. of SSUWT)

Pavel D. Murin (Graduate student of SSUWT)

ABSTRACT: The article examines fish fauna, benthic and plankton organisms of the river Berd. The amount of damage to water biological resources caused by construction of dams is being calculated.

Keywords: *Berd river, Maslyanino urban locality, water biological resources, fish fauna, benthos, plankton, amount of damage*

Рассмотрена ихтиофауна, бентические и планктонные организмы реки Бердь. Вычислена величина ущерба водным биологическим ресурсам от строительства дамб.

Рабочий поселок Маслянино – административный центр Маслянинского района Новосибирской области. Расположен поселок в 119 км к юго-востоку от Новосибирска [1].

Климат района – резко континентальный. Средняя годовая температура воздуха отрицательная и составляет минус 0,7 °С. Средняя температура самого холодного месяца (января) – минус 19,9 °С. Средняя температура самого теплого месяца (июля) – плюс 18,0 °С. Средняя годовая скорость ветра – 2,9 м/с. Годовое количество осадков – 472 мм [4].

Гидрография рассматриваемого района представлена рекой Бердь, которая является правобережным притоком первого порядка реки Обь. Впадает в Обь на расстоянии 2989 км от её устья. Общая длина Берди составляет 363 км, площадь водосбора – 8740 км². Средний годовой расход воды – 45,8 м³/с [7].

Ихтиофауна реки Бердь представлена следующими видами рыб: щука обыкновенная (лат. *Esox lucius*), плотва (лат. *Rutilus rutilus*), елец (лат. *Leuciscus leuciscus baikalensis*), лещ (лат. *Abramis brama*), язь (лат. *Leuciscus idus*), пескарь (лат. *Gobiogobio*), голец обыкновенный (лат. *Phoxinus phoxinus*), карась обыкновенный (лат. *Carassius carassius*), щиповка (лат. *Cobitis melanoleuca*), голец (лат. *Barbatulati*), налим (лат. *Lota lota*), окунь обыкновенный (лат. *Perca fluviatilis*), ёрш обыкновенный (лат. *Gymnocephalus cernuus*), судак (лат. *Sander lucioperca*), таймень (лат. *Huchota imen*) и сибирский хариус (лат. *Thymallus arcticus*) [6].

Таймень, сибирский хариус занесены в Красную книгу Новосибирской области. В бассейне реки Бердь кормовой базой для рыб являются организмы зоопланктона и зообентоса.

Зоопланктонное сообщество составляют коловратки (лат. *Rotifera*), веслоногие ракообразные (копеподы) (лат. *Sopropoda*), ветвистоусые ракообразные (кладоцеры) (лат. *Cladocera*).

Основными группами бентосных организмов в реке Бердь в районе пос. Маслянино являются: олигохеты, пиявки, мизиды, гаммариды, хирономиды, ручейники, поденки, прочие двукрылые [5].

На основании Приказа Федерального агентства по рыболовству от 17.09.2009 г. №818 река Бердь является водным объектом рыбохозяйственного значения высшей категории [3].

Целью данной работы является выполнение анализа воздействия на водные биологические ресурсы и среду их обитания от работ по строительству водозащитных сооружений, определить последствия негативного воздействия планируемой деятельности на их состояние, разработать мероприятия по возмещению ущерба и сохранению водных биологических ресурсов и среды их обитания.

Актуальность работы заключается в том, что на многих объектах Новосибирской области проводятся мероприятия по защите территорий от затопления посредством строительства водозащитных сооружений и сопровождаются нанесением вреда водным биологическим ресурсам.

В соответствии с Федеральным законом от 20.12.2004 г. №166-ФЗ водные биологические ресурсы – это рыбы, водные беспозвоночные, водные млекопитающие, водоросли, дру-

гие водные животные и растения, находящиеся в состоянии естественной свободы [8].

Для защиты территории рабочего поселка Маслянино от негативного воздействия вод реки Бердь и предусматривается строительство защитных сооружений на четырех участках.

В период строительства и эксплуатации защитных сооружений затрагиваются площади в русле и пойме реки.

На данных площадях будет происходить полная гибель кормовых организмов (зообентоса). Кроме того, в период работ в русле водотока также будет образовываться объем повышенной мутности, в котором происходит гибель зоопланктона. Под действием течения реки взвеси будут образовывать объем дополнительной мутности, на площади и в объеме которой будет происходить соответственно частичная гибель зообентоса и зоопланктона.

В период строительства предусматривается забор воды из реки на производственные нужды. В объеме забираемой воды будет происходить полная гибель планктонных организмов, гибель ранней молоди рыб в период ее ската (в июне).

При производстве работ затрагивается площадь и в водоохранной зоне реки Бердь (вне русла и поймы). Негативное воздействие на данной площади будет определяться сокращением (перераспределением) естественного стока с деформированной поверхности водосборной площади водного объекта рыбохозяйственного значения.

Строительные работы планируется выполнять 3 года 8 месяцев, с марта 2019 г. по октябрь 2021 г. Период эксплуатации составит 50 лет.

Расчет ущерба, наносимого водным биологическим ресурсам и среде их обитания, производился в соответствии с «Методикой исчисления размера вреда, причиненного водным биологическим ресурсам», утвержденной приказом Федерального агентства по рыболовству от 25.11.2011 г. №1166 [2].

Величина общего ущерба водным биологическим ресурсам реки Бердь за период строительства и период эксплуатации складывается из потерь от гибели кормовых организмов (зоопланктона) в объеме забираемой воды, в объеме повышенной мутности и в объеме зоны дополнительной мутности, от гибели кормовых организмов (зообентоса) на площади нарушения русла, на площади зоны дополнительной мутности, на площади поймы, от гибели ранней молоди в объеме забираемой воды, из ущерба в результате утраты рыбохозяйственного значения русла, ущерба в результате утраты рыбохозяйственного значения поймы, а также в результате сокращения (перераспределения) естественного стока с деформированной поверхности водосборного бассейна и составляет 974,87 кг в натуральном выражении.

Для восстановления нарушенного состояния водных биологических ресурсов предлагается выполнение мероприятий по искусственному воспроизводству молоди рыб.

Согласно выполненным расчетам, количество молоди, необходимого для восстановления нарушенного состояния водных биоресурсов составляет: 50 643 экземпляра осетра, или 12 186 экземпляров нельмы, или 33 850 экземпляров муксуна.

При реализации проектных решений и во избежание образования дополнительного ущерба рыбным запасам работы должны проводиться с соблюдением мер по сохранению водных биологических ресурсов и среды их обитания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Официальный сайт Администрации рабочего поселка Маслянино Маслянинского района Новосибирской области. -Режим доступа: <http://admpmasl.nso.ru>. -15.05.2018 г.

2 Приказ Росрыболовства от 25.11.2011 №1166 «Об утверждении Методики исчисления размера вреда, причиненного водным биологическим ресурсам» // СПС «Консультант-Плюс».

3 Приказ Федерального агентства по рыболовству от 17.09.2009 г. №818 «Об установлении категорий водных объектов рыбохозяйственного значения и особенностей добычи (вылова) водных биологических ресурсов, обитающих в них и отнесенных к объектам рыболовства» // СПС «Консультант-Плюс».

4 Строительство водозащитных дамб на реке Бердь в р.п. Маслянино Маслянинского района Новосибирской области: проектная документация. - Новосибирск: Запсибгипроводхоз, 2018.

REFERENCES

1 The official site of the Administration of the Maslyanino camp, Maslyaninsky District, Novosibirsk Region [Ofitsial'nyy sayt Administratsii rabochego poselka Maslyanino Maslyaninskogo rayona Novosibirskoy oblasti]. URL: <http://admpmasl.nso.ru>. -15 May 2018.

2 Order of the Russian Federal Agency for Fishery dated November 25, 2011 No. 1166 "On approval of the Methodology for calculating the amount of damage caused to aquatic biological resources" [Ob utverzhdenii Metodiki ischisleniya razmera vreda, prichinennogo vodnym biologicheskimi resursam].

3 Order of the Federal Agency for Fishery dated September 17, 2009 No. 818 "On the establishment of categories of water bodies of fisheries significance and features of extraction (catch) of aquatic biological resources inhabiting them and referred to objects of fisheries" [Ob ustanovlenii kategoriy vodnykh ob"ektov rybokhozyaystvennogo znacheniya i osobennostey dobychi (vylova) vodnykh biologicheskikh resursov, obitayushchikh v nikh i otnesennykh k ob"ektam rybolovstva].

4 Construction of water protection dams on the Berd river in the Maslyanino camp, Maslyaninsky district, Novosibirsk region [Stroitel'stvo vodozashchitnykh dam na reke Berd' v r.p. Maslyanino Maslyaninskogo rayona

5 Прусевич, Л.С. Кормовая база рыб (зоопланктон и зообентос) в крупных водоемах Новосибирской области / Л.С. Прусевич, В.Ф. Зайцев // Актуальные проблемы биологии и методики ее преподавания в школе и вузе: сб.статей. -Омск, 2012. -С. 51-55.

6 Ростовцев, А.А. Рыбохозяйственная характеристика реки Берди / А.А. Ростовцев. -Новосибирск, 2017. -53 с.

7 Русское Географическое Общество. Новосибирское отделение. -Режим доступа: <http://rgo-sib.ru>. -05.05.2018 г.

8 Федеральный закон от 20.12.2004 г. №166-ФЗ (ред. от 05.12.2017) «О рыболовстве и сохранении водных биологических ресурсов» // СПС «Консультант-Плюс».

Novosibirskoy oblasti: proektnaya dokumentatsiya]. Novosibirsk. Zapsibgiprovodkhoz Publ. 2018.

5 L.S. Prusevich, V.F. Zaytsev. Fodder base of fish (zooplankton and zoobenthos) in large reservoirs of the Novosibirsk region [Kormovaya baza ryb (zooplankton i zoobentos) v krupnykh vodoemakh Novosibirskoy oblasti]. *Actual problems of biology and its teaching methods in school and university* [Aktual'nye problemy biologii i metodiki ee prepodavaniya v shkole i vuze]. Omsk. 2012. pp. 51-55.

6 A.A. Rostovtsev. Fishery characteristics of the Berd river [Rybohozyaystvennaya kharakteristika reki Berdi]. Novosibirsk. 2017. 53 p.

7 Russian Geographical Society. Novosibirsk branch [Russkoe Geograficheskoe Obshchestvo. Novosibirskoe otdelenie]. URL: <http://rgo-sib.ru>. -05 May 2018.

8 Federal Law of 20.12.2004 No. 166-FZ (as amended on 05.12.2017) "On Fisheries and the Conservation of Aquatic Biological Resources" [O rybolovstve i sokhranenii vodnykh biologicheskikh resursov].

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: река Бердь, поселок Маслянино, водные биологические ресурсы, ихтиофауна, бентос, планктон, величина ущерба

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ: Шамова Вера Васильевна, канд. техн. наук, профессор ФГБОУ ВО «СГУВТ»
Мулин Павел Дмитриевич, аспирант ФГБОУ ВО «СГУВТ»

ПОЧТОВЫЙ АДРЕС: 630099, г.Новосибирск, ул.Щетинкина, 33, ФГБОУ ВО «СГУВТ»

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ВОПРОСОВ ОБОСНОВАНИЯ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ СБОРА И ПЕРЕРАБОТКИ ПЛАВАЮЩЕЙ ДРЕВЕСИНЫ НА НОВОСИБИРСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»

Е.С. Енаки, В.А. Седых, Е.М. Сорокин

SOLUTIONS TO THE PROBLEM OF THE COLLECTION AND PROCESSING OF DRIFTWOOD ON THE NOVOSIBIRSK RESERVOIR

Siberian State University of Water Transport (SSUWT) 33, Schetinkina St., Novosibirsk, 630099, Russia

Ekaterina S. Enaki (Graduate student of SSUWT)

Vitaliy A. Sedykh (Holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Prof. of SSUWT)

Evgeniy M. Sorokin (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of SSUWT)

ABSTRACT: The paper considers threat of driftwood movement when the flood comes. The authors propose transport and technological schemes for collecting and processing driftwood due to its negative effect on the technological operation of spillway of a dam.

Keywords: coastline, Novosibirsk reservoir, bank erosion

Рассмотрена угрозы движения плавающей древесины в паводок. Предложены транспортно-технологические схемы сбора и переработки плавающей древесины в связи с ее негативным влиянием на технологический режим работы водосбросных устройств в створе плотины ГЭС.

В период прохождения половодий и паводков, а также после оползней высоких берегов в реки попадают свалившиеся деревья. Деревья сваливаются не только на размываемых берегах, но и выносятся из логов. Первые деревья, плывущие в потоке, поднимаются с водой с мелей в начале паводка. С повышением уровня воды все интенсивнее происходит процесс обрушения берегов, и усиливаются оползни с крутых склонов. Увеличивается число деревьев, смытых в поток и падающих в русло.

При движении в речном потоке в зоне транзита дерево быстро теряет крону. Сохраняется лишь ствол с корневой системой и отдельными ветвями. Такие плывущие деревья принято называть карчами. На малых и средних реках карча движется, опираясь на дно реки корнями и направленным вдоль течения стволом. На излуцинах карча, опираясь о берег стволом, разворачивается корневой системой вперед. В период дождей и паводков, водные потоки насыщаются продуктами разрушения берегов, и формируется карчеход. При последующем увеличении глубин и скоростей потока появляется возможность сдвижки карчей, отложившихся на пойме и других случайных преградах после предыдущих паводков. В период спада паводка начинается оседание карчей. В дальнейшем они могут стать подпитывающим источником карчехода при очередном паводке.

Плывущие в потоке карчи активно взаимодействуют с местными локальными сооружениями (мостовыми переходами, защитными сооружениями водозаборов, конструкциями ле-

дорезов, опорами линий электропередач и т.д.). Особенно опасны заломы при малой скорости движения карчи. Остановка одного дерева вызывает остановку других, образуя залом местные перепады уровней воды. При повышении уровней в движение может вовлечься вся масса мощного залома карчей.

В зоне выклинивания подпорных уровней водохранилища, т.е. в зоне расширения транзитного потока происходит снижение скоростей течения с образованием крупномасштабных водоворотных зон и возвратно-поступательных движений воды. Это идеальное место для накопления карчей. Их перемещение становится беспорядочным. Но при наполнении водохранилища они приходят в раскачивание и дальнейшее движение в сторону нижнего бьефа гидроузла.

Под воздействием ветровых дрейфовых течений скопления карчей происходит на мелководьях прибрежных акваторий, в том числе вблизи подходов судов к причалам вокзалов. Создавая аварийную ситуацию на судовых ходах, наибольшую опасность приплывающие карчи наносят технологическому режиму работы водосбросных устройств в створе плотины ГЭС.

Возникает проблема решения и необходимость влияния на условия карчехода вблизи створа гидроузла. Сбор карчей и их утилизация в прибрежной полосе водохранилища – это лишь частичное решение проблемного последствия. Требуются учреждающие технические мероприятия и более эффективные технологии снижения риска аварийных повреждений от карчехода. Карчеход представляет собой движение в паводок деревьев с кроной и корневой системой. Он имеет широкое распространение на всей горной и лесотундровой территории Сибири. Это природное явление широко исследовано в связи с развитием методов проектирования мостовых переходов, а также в области лесосплава в условиях карчехода. Большой вклад в исследования внесли К.Н. Коржавин, Л.Н. Пашовский, Н.Н. Панов, В.Д. Синютин, В.И. Жуков, Ф.Х. Юрков, В.Н. Домогашев и др.

В итоге были получены расчетные зависимости для оценки средней скорости движения карчи в потоке

$$V_k = V_{cp} - q \sqrt{\frac{(m_k - \zeta W_{kn})(f \cos \alpha - \sin \alpha)}{0,5q\zeta C \omega_k}}, \quad (1)$$

где V_{cp} – скорость течения воды, м/с;

m_k – масса карчи, кг;

ζ – плотность воды;

W_{kn} – объем погруженной в воду части карчи, м³;

f – коэффициент сцепления карчи с дном русла (математическое ожидание коэффициента $f = 0,25$);

q – ускорение свободного падения, $q = 9,81$ м/с²;

C – коэффициент гидродинамического сопротивления карчи;

ω_k – площадь корневой системы карчи, м².

По результатам опытов и замерам в натуре была получена расчетная зависимость для определения гидродинамического коэффициента сопротивления карчи

$$C = \frac{2qP_b}{\zeta q \omega_k V^2}, \quad (2)$$

где P_b – влекущая сила потока.

График зависимости коэффициента C от ω_k показан на рисунке 1. При проведении эксперимента скорость модельной карчи заменяли, если подтверждалось условие сцепления с дном лотка. Результаты опытов подтверждены замерами в натуре на реках Кюбюме и Куйдуле.

Наибольшее расстояние, которое может проплыть карча за один паводок, оценивается расчетом

$$S_k = V_k t_{расч}, \quad (3)$$

где $t_{расч}$ – расчетное время сплава карчей, определяемое с использованием реального гидрографа стока за период паводка.

Для упрощения оценки скорости движения карчи В.Н. Домогашевым предложены вспо-

могательные графические зависимости, представленные на рисунке 2.

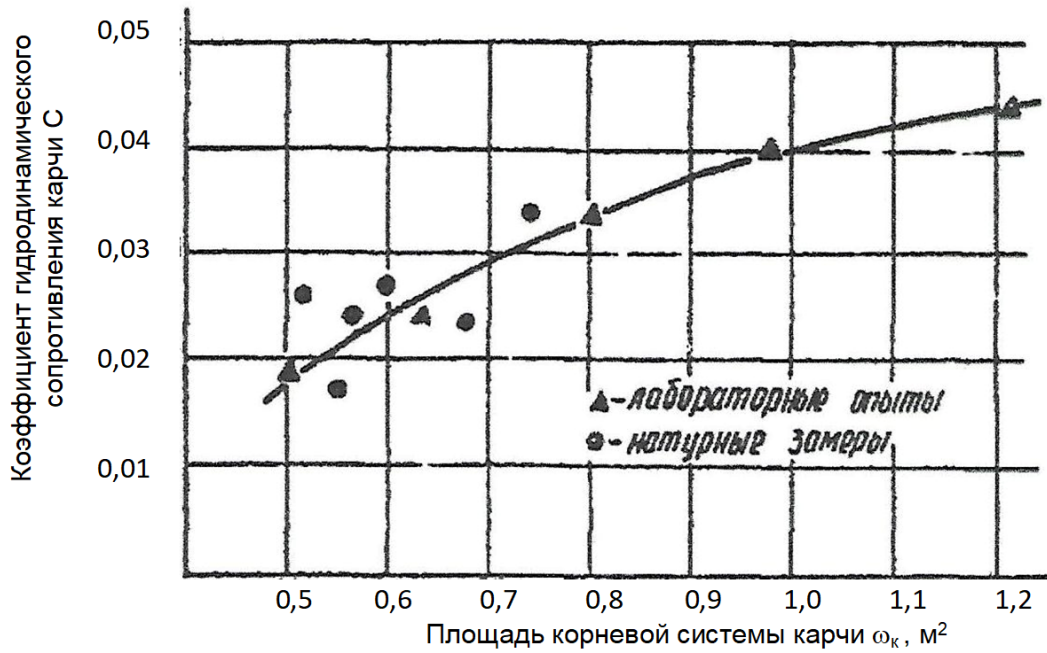


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента гидродинамического сопротивления от площади корневой системы карчи

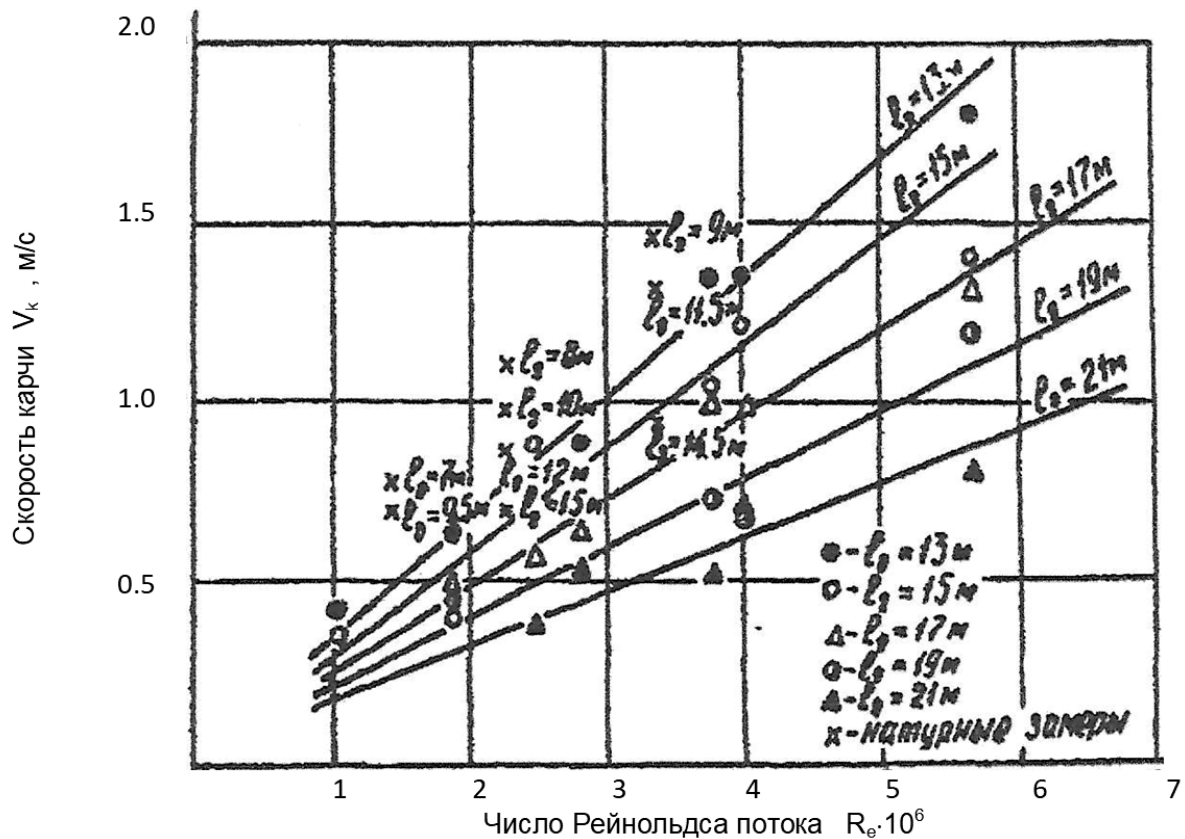


Рисунок 2 – Определение скорости карчи

При наплыве карчей на защитные гидротехнические решетки наибольшую опасность повреждения конструкций силой лобового давления потока, особенно при наплыве залома. Натурные исследования показали существенное отличие залома из карчей от бревенных и ледобревенных пыжей, формирующихся на запанях. В отличие от пыжей в изломе происхо-

дит сложное переплетение карчей своими корневищами и кроной, что позволяет считать его «жестким» телом, в котором отсутствует распорная сила. Другой особенностью является осадка. Залом в отличие от пыжа всегда формируется до дна реки, чем приводит к необходимости учета сил сцепления с дном реки. Исследования в натурных условиях подтвердили правомерность использования коэффициента $f=0,25$, полученного ранее при изучении движения карчи в потоке. Третьей особенностью залома является изменяющаяся по высоте плотность. Наименьшая плотность в нижней части, которая состоит в основном из отдельных корневищ, опирающихся на дно водотока. Наиболее плотной формируется верхняя часть, состоящая из вершин деревьев, отдельных мелких карчей и множества другой мелкой древесины. По натурным измерениям средняя плотность залома колеблется в пределах $n=0,15-0,20$.

Воздействие водного потока определяется силой лобового давления потока на залом

$$P_n = \zeta q C_n \sum n \omega_k \frac{V_1^2}{2q}, \text{ Н}, \quad (4)$$

где V_1 – скорость потока перед заломом с учетом снижения средней скорости воды в результате образования подпоры;

C_n – коэффициент лобового сопротивления потока, оцениваемого величиной 1,73 при размерах ячейки решетки соизмеримой с диаметром карчи;

n – плотность залома.

Наблюдения в натурных условиях показывают, что надводная часть залома обычно не более 0,5 м, за исключением отдельных стволов, выступающих до 1,5 м и выше. При наличии карчехода большой интенсивности и объема на реке установленные защитные решетки на водосбросах плотин правомерно рассматривать как карчезадерживающие сооружения при расчетной силе лобового давления потока и выполнении соответствующих прочностных расчетов конструкций.

Выше было отмечено, что скорости стокового течения по длине Новосибирского водохранилища находятся в диапазоне величин: от 1,5 м/с в верхней части при половодье до 0,3 м/с в приплотинной зоне. Принято считать, что ветровые течения при юго-западных ветрах для средней нижней акватории водохранилища составляют $0,2 \div 0,3$ м/с. Наряду с этим отмечено, что диапазон скоростей юго-западного ветра составляет $5 \div 20$ м/с, а высоты волн в верхнем бьефе достигают 2,6 м.

Следовательно, при оценке силовых нагрузок на защитные конструкции необходимо учитывать локальные величины нагрузок от гидродинамических воздействий. В частности, при проверке неблагоприятных сочетаний гидродинамических нагрузок целесообразно оценивать величины вдольбереговых течений при сгонно-нагонных явлениях на водоёме в период штормового воздействия.

В пределах береговой отмели шириной более 100 м по Судольскому средняя скорость вдольберегового течения может составить величину

$$v_{cp} = h_{1\%} P_\alpha \exp \left[- (0,014B - 0,5H_{cp}) \right] + 10^{-2} (0,70 + 0,33 \lg H_{cp}) W_{10}^{1,5} \sin \alpha_w, \quad (5)$$

где $h_{1\%}$ – высота волны 1% обеспеченности;

P_α – параметр, зависящий от угла α° , между углом волны и нормально к линии берега и определяется по таблице 1;

B – общая ширина береговой отмели, м;

H_{cp} – средняя глубина на береговой отмели, м;

W_{10} – скорость ветра на высоте 10 м над водной поверхностью, м/с;

α_w – угол между направлением ветра и нормально к линии берега.

Таблица 1 – К определению параметра P_α

Очертание берега	Угол подхода волн к берегу α° , град						
	10°	30°	50°	70°	90°	110°	130°
Выпуклый	0,60	0,94	1,00	0,97	0,85	0,65	0,35
Прямолинейный	0,60	0,94	1,00	0,95	0,82	0,55	0,15
Вогнутый	0,60	0,94	1,00	0,94	0,78	0,44	0,00

Степень экстремальных неблагоприятных сочетаний можно оценить при совместном использовании расчетных зависимостей.

Таблица 2 – Кинематические показатели Новосибирского водохранилища и расчетная нагрузка на залом (карчезадерживающие решетки)

Участки водохранилища	Скорость течения, м/с	Средняя глубина при НПУ, м	Число Рейнольдса	Число Фруда	Лобовое давление воды на залом из 100 карчей, кН
Речной	1,5	6	$687 \cdot 10^4$	0,038	165,0
Озерно-речной	0,9	9	$618 \cdot 10^4$	0,009	59,5
Озерный (В.Б.)	0,3	15	$343 \cdot 10^4$	0,0006	6,6

При оценке были использованы зависимости:

– для числа Рейнольдса

$$R_e = \frac{VT}{\nu},$$

где V – скорость течения;

T – средняя глубина при НПУ;

ν – кинематический коэффициент вязкости воды, $\nu = 0,0131 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$;

– для числа Фруда

$$F_q = \frac{V^2}{\alpha T}, \text{ при } \alpha = 9,81 \text{ м/с}^2.$$

Определение силы лобового давления на карчезадерживающее устройство осуществлено по зависимости (40 от одной карчи при $\omega_k = 0,5 \text{ м}^2$)

$$P_{\Lambda} = 9810 \cdot 1,73 \cdot 0,17 \cdot 0,5 \frac{V^2}{2\alpha} = 73,5V, \text{ Н} \quad (6)$$

или для силы лобового давления от 100 карчей (задержка в виде залома)

$$P_{\Lambda} = 73,5V, \text{ кН}. \quad (7)$$

В порядке сопоставления показателей Новосибирского водохранилища (таблица 2.) ниже приведены динамика давлений залома по результатам опытов В.Н. Домогашева для верхнего речного участка, откуда обычно начинается корчеход (рисунок 3). При сбросе воды через плотинные водосливы и турбины, следует учитывать возникновение локальных скоростей течения, то есть целесообразность расчета защитных решеток ориентировать на наиболее опасные неблагоприятные сочетания факторов.

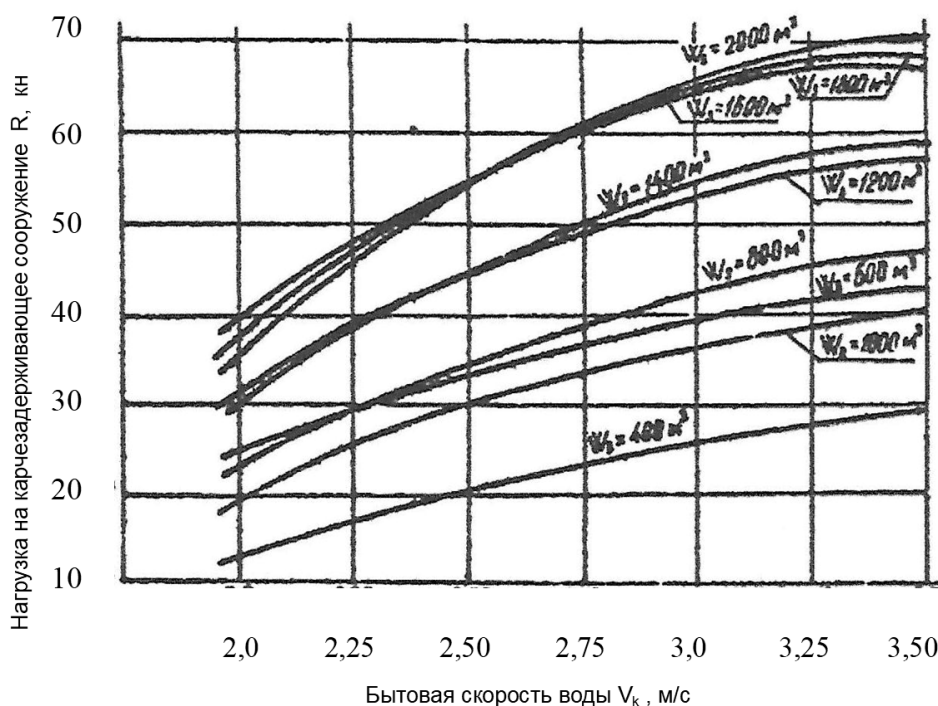


Рисунок 3 – Давление залома на карчезадерживающее сооружение

В условиях Новосибирского водохранилища при сборе и разделке теплой древесины целесообразно арендовать у районных подразделений Администрации водных путей Обского бассейна и судоходства руслоочистительные карчекраны, отнесенные регистром по району плавания к разряду «0».

Как дополнительный вариант для оперативного сбора плавающих карчей предлагается сбор и разделка их на металлических сухогрузных площадках разряда «0» с преданием их грейферных кранов грузоподъемностью до 16 т. Для нужд связи и доставки продуктов и работников бригад потребуются и разъездные суда типа «Ярославец».

Негативное влияние плавающей древесины зависит от гидрологических и морфологических особенностей участков запаней и в меньшей степени от продолжительности пребывания древесины в воде.

На основании вышеизложенного в работе предлагаются следующие транспортно-технологические схемы сбора и переработки плавающей древесины:

- зачистка прибрежной полосы;
- сбор плавающей древесины с водной поверхности водохранилища;
- зачистка водохранилища от плавающего и затонувшего леса;
- утилизация собранного лесного материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Домогашев, В.Н. Определение скорости карчи при прогнозировании объема карчехода / В.Н. Домогашев. -М.: ЦБИТИ Минавтодора РСФСР, 1982. -35 с.

REFERENCES

1 V.N. Domogashev. Determination of the driftwood velocity in the prediction of timber drifting volume [Opredelenie skorosti karchi pri prognozirovanii ob"ema karchekhoda]. Moscow. TsBITI Minavtodora RSFSR Publ. 1982. 35 p.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Новосибирское водохранилище, береговая полоса, разрушения берегов

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ: Енаки Екатерина Сергеевна, аспирант ФГБОУ ВО «СГУВТ»
Седых Виталий Алексеевич, докт. техн. наук, профессор ФГБОУ ВО «СГУВТ»
Сорокин Евгений Михайлович, канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «СГУВТ»

ПОЧТОВЫЙ АДРЕС: 630099, г.Новосибирск, ул.Щетинкина, 33, ФГБОУ ВО «СГУВТ»

ИССЛЕДОВАНИЕ СТОКА р. БЕРДЬ В РАЙОНЕ с. СТАРЫЙ ИСКИТИМ

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»

В.В. Шамова, П.Д. Мурин

STUDY OF RIVER BERD FLOW IN THE STARY ISKITIM VILLAGE AREA

Siberian State University of Water Transport (SSUWT) 33, Schetinkina St., Novosibirsk, 630099, Russia

Vera V. Shamova (Ph.D. of Engineering Sciences, Prof. of SSUWT)

Pavel D. Murin (Graduate student of SSUWT)

ABSTRACT: The article provides calculation of the average annual river Berd discharge reliability. This study let authors draw a reliability graph.

Keywords: river Berd, Stary Iskitim village, river discharge, reliability

Выполнен расчёт параметров обеспеченности среднегодовых расходов реки Бердь. Это исследование позволило построить график теоретической кривой обеспеченности.

Важным условием успешного развития народного хозяйства какой-либо территории является знание и учет различных природных факторов, в частности гидрологических характеристик водных объектов. Гидрологические данные необходимы при проектировании, строительстве и эксплуатации гидроэлектростанций, при организации лесосплава, орошении, мостостроении, коммунальном и промышленном водоснабжении. Невозможно проведение каких-либо гидротехнических мероприятий без достаточно полной характеристики гидрологического режима водного объекта.

Новосибирская область расположена на юго-востоке Западно-Сибирской равнины. Площадь территории области 177,76 тыс. км².

Река Бердь – правый приток Оби. Длина реки – 363 км, площадь водосборного бассейна – 8650 км². Исток находится на высоте 440 м в горном массиве Салаир, на границе Кемеровской области и Алтайского края. Большая часть русла расположена в Новосибирской области. Река впадает в Бердский залив Новосибирского водохранилища, при строительстве

которого была затоплена долина реки на 40 км от бывшего устья, образовав протяжённый залив. Река Бердь используется комплексно: для орошения, для питьевого и промышленного водоснабжения, а также для рекреационных целей двух густонаселенных районов – Маслянинского и Искитимского.

Целью работы является исследование стока реки Бердь в районе села Старый Искитим Новосибирской области.

Были использованы данные о среднегодовых расходах воды реки Бердь, представленные в Государственном докладе «О состоянии и об охране окружающей среды Новосибирской области».

Используя программное обеспечение MapInfoProfessional, была построена схема части Новосибирской области, включающая реки Иня, Бердь и нижний бьеф Оби, составлены таблицы атрибутивных характеристик рек и населенных пунктов, представленных на рисунке.

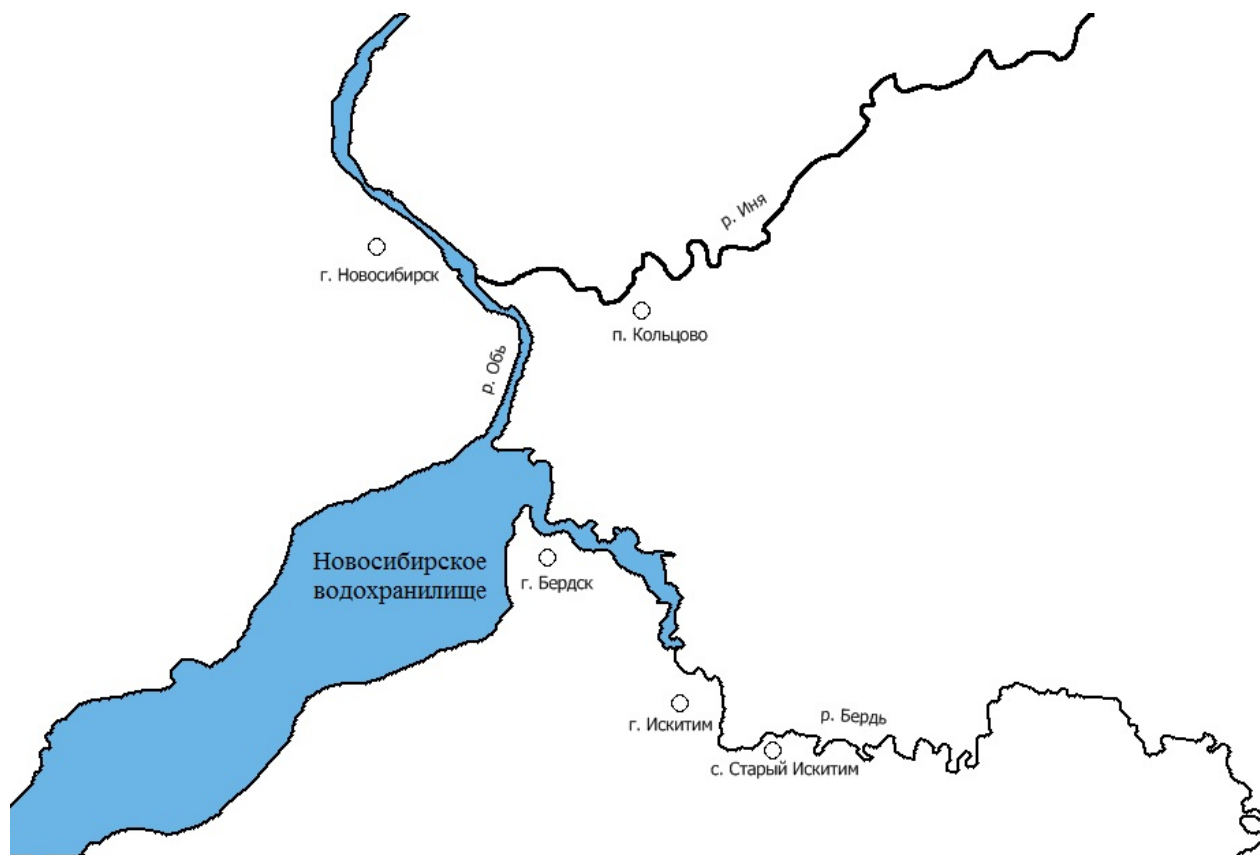


Рисунок – Схема части района Новосибирской области

Таблица 1 – Атрибутивные характеристики рек

Название реки	Длина реки, км	Площадь бассейна, км ²	Средняя скорость течения, м/с	Среднегодовой расход, м ³ /с
Бердь	363	8650	0,50	45,8
Обь	3650	2990000	1,00	12492
Иня	663	17600	0,45	45,6

Таблица 2 – Атрибутивные характеристики населенных пунктов

Название	Численность населения, человек	Площадь, км ²	Год основания
г.Новосибирск	1 602 915	505,62	1893
г.Бердск	103 290	67,00	1716
г.Искитим	57 032	29,90	1717
с.Старый Искитим	706	6,64	1719
п.Кольцово	15 938	18,80	1979

Для расчёта стока применялась таблица А. Фостера-С.И. Рыбкина. Предварительно определены следующие величины:

- Q_0 -среднее арифметическое ряда имеющихся значений характерных расходов Q_i ;
- C_v -коэффициент вариации, который характеризует отклонения величин характерных расходов от среднего;
- C_s -коэффициент асимметрии, который характеризует форму кривой распределения Пирсона.

Построение теоретической кривой обеспеченности производилось в следующем порядке:

- по имеющимся данным составлена таблица характерных расходов;
- вычислено значение Q_0 и для каждого члена полученного ряда определены последовательно модульные коэффициенты K_i , $K_i - 1$, $(K_i - 1)^2$, $(K_i - 1)^3$, затем $\sum (K_i - 1)^2$ и коэффициенты C_v и C_s : $Q_0 = 35,54 \text{ м}^3/\text{с}$; $C_v = 0,21$; $C_s = 0,4$;

Таблица 3 – Расчет параметров обеспеченности среднегодовых расходов

m	Годы	Q_i	$Q_i - Q_0$	$(Q_i - Q_0)^2$	K_i	$K_i - 1$	$(K_i - 1)^2$	$(K_i - 1)^3$	P_i
1	1966	50,6	15,06	226,75	1,42368	0,42368	0,17950	0,07605	1,79
2	1964	48,7	13,16	173,14	1,37022	0,37022	0,13706	0,05074	3,57
3	1979	48,3	12,76	162,77	1,35896	0,35896	0,12885	0,04625	5,36
4	1973	47,5	11,96	143,00	1,33645	0,33645	0,11320	0,03809	7,14
5	1972	45,6	10,06	101,17	1,283	0,283	0,08009	0,02266	8,93
6	1969	45	9,46	89,46	1,26611	0,26611	0,07082	0,01885	10,71
7	1985	44,9	9,36	87,58	1,2633	0,2633	0,06933	0,01825	12,50
8	1975	43,4	7,86	61,75	1,2211	0,2211	0,04888	0,01081	14,29
9	1971	42,1	6,56	43,01	1,18452	0,18452	0,03405	0,00628	16,07
10	2010	42,0	6,46	41,71	1,18171	0,18171	0,03302	0,00600	17,86
11	2001	41,9	6,36	40,43	1,17889	0,17887	0,03200	0,00573	19,64
12	1961	41,7	6,16	37,92	1,17327	0,17327	0,03002	0,00520	21,43
13	1993	41,6	6,06	36,70	1,17045	0,17045	0,02905	0,00495	23,21
14	1997	40,3	4,76	22,64	1,13388	0,13388	0,01792	0,00240	25,00
15	2011	39,9	4,36	18,99	1,12262	0,12262	0,01504	0,00184	26,79
16	1986	39,6	4,06	16,47	1,11418	0,11418	0,01304	0,00149	28,57
17	2007	39,5	3,96	15,67	1,11137	0,11137	0,01240	0,00138	30,36
18	1984	39,1	3,56	12,66	1,10011	0,10011	0,01002	0,00100	32,14
19	1988	38,7	3,16	9,97	1,08886	0,08886	0,00790	0,00070	33,93
20	2012	38,2	2,66	7,07	1,07479	0,07479	0,00559	0,00042	35,71
21	1994	37,9	2,36	5,56	1,06635	0,06635	0,00440	0,00029	37,50
22	1989	37,5	1,96	3,83	1,0551	0,0551	0,00304	0,00017	39,29
23	2002	36,9	1,36	1,84	1,03821	0,03821	0,00146	0,00006	41,07
24	1991	36,7	1,16	1,34	1,03259	0,03259	0,00106	0,00003	42,86
25	2016	36,3	0,76	0,57	1,02133	0,02133	0,00046	0,00001	44,64
26	1956	35,9	0,36	0,13	1,01008	0,01008	0,00010	0,00000	46,43
27	2003	35,9	0,36	0,13	1,01008	0,01008	0,00010	0,00000	48,21
28	1992	35,9	0,36	0,13	1,01008	0,01008	0,00010	0,00000	50,00
29	1977	35,7	0,16	0,03	1,00445	0,00445	0,00002	0,00000	51,79
30	1999	35,6	0,06	0,00	1,00164	0,00164	0,00000	0,00000	53,57
31	1962	35,5	-0,04	0,00	0,99882	-0,00118	0,00000	0,00000	55,36
32	1990	35,2	-0,34	0,12	0,99038	-0,00962	0,00009	0,00000	57,14
33	2013	35,1	-0,44	0,20	0,98757	-0,01243	0,00015	0,00000	58,93
34	2017	34,9	-0,64	0,41	0,98194	-0,01806	0,00033	-0,00001	60,71
35	1987	34,8	-0,74	0,55	0,97913	-0,02087	0,00044	-0,00001	62,50
36	1965	33,7	-1,84	3,39	0,94818	-0,05182	0,00269	-0,00014	64,29
37	1970	33,7	-1,84	3,39	0,94818	-0,05182	0,00269	-0,00014	66,07
38	2004	33,4	-2,14	4,59	0,93974	-0,06026	0,00363	-0,00022	67,86
39	1998	32,2	-3,34	11,17	0,90598	-0,09402	0,00884	-0,00083	69,64
40	1983	31,7	-3,84	14,76	0,89191	-0,10809	0,01168	-0,00126	71,43

Продолжение таблицы 3

m	Годы	Q_i	$Q_i - Q$	$(Q_i - Q)^2$	K_i	$K_i - 1$	$(K_i - 1)^2$	$(K_i - 1)^3$	P_i
41	1963	31	-4,54	20,63	0,87221	-0,12779	0,01633	-0,00209	73,21
42	1976	30,8	-4,74	22,48	0,86658	-0,13342	0,01780	-0,00237	75,00
43	2014	30,5	-5,04	25,42	0,85814	-0,14186	0,02012	-0,00285	76,79
44	2000	30,2	-5,34	28,54	0,8497	-0,1503	0,02259	-0,00340	57,57
45	2015	30	-5,54	30,71	0,84408	-0,15592	0,02431	-0,00379	80,36
46	1978	29,8	-5,74	32,97	0,83845	-0,16155	0,02610	-0,00422	82,14
47	2008	29,2	-6,34	40,22	0,82157	-0,17843	0,03184	-0,00568	83,93
48	1974	28,7	-6,84	46,81	0,8075	-0,1925	0,03706	-0,00713	85,71
49	1967	25	-10,54	111,13	0,7034	-0,2966	0,08797	-0,02609	87,50
50	2006	23,8	-11,74	137,87	0,66963	-0,33037	0,10914	-0,03606	89,29
51	1982	22,5	-13,04	170,09	0,63306	-0,36694	0,13465	-0,04941	91,07
52	1980	21,6	-13,94	194,37	0,60773	-0,39227	0,15387	-0,06036	92,86
53	1981	19,8	-15,74	247,80	0,55709	-0,44291	0,19617	-0,08689	94,64
54	2005	19,6	-15,94	254,14	0,55146	-0,44854	0,20119	-0,09024	96,43
55	2009	19,2	-16,34	267,06	0,54021	-0,45979	0,21141	-0,09720	98,21
Сумма:		1954,8			55,0	0	2,39961	-0,16072	

– задаваясь различными значениями обеспеченности, по таблице Фостера-Рыбкина определены соответствующие им величины отклонений $\Phi_{P\%}$;

– по значениям $\Phi_{P\%}$ определены соответствующие им модульные коэффициенты $K_{P\%}$ и расходы $Q_{P\%}$, по которым построена теоретическая кривая обеспеченности характерных расходов воды (рисунок 2).

Таблица – Таблица Фостера-Рыбкина (в сокращенном виде)

C_s	Значения обеспеченности в % (P_i)								
	0,01	1,0	5,0	25,0	50,0	70,0	90,0	95,0	99,0
0,2	4,16	2,48	1,69	0,67	-0,03	-0,55	-1,25	-1,58	-2,18
0,4	4,61	2,62	1,74	0,65	-0,06	-0,57	-1,22	-1,51	-2,03
0,6	5,05	2,77	1,79	0,62	-0,09	-0,58	-1,19	-1,45	-1,88

Таблица 5 – Расчет параметров обеспеченности среднегодовых расходов

m	$\Phi_{P\%}$	$\Phi_{P\%} C_V$	$K_{P\%}$	$Q_{P\%}$	m	$\Phi_{P\%}$	$\Phi_{P\%} C_V$	$K_{P\%}$	$Q_{P\%}$
1	2,37	0,4977	1,4977	53,23	29	-0,1	-0,021	0,979	34,80
2	1,93	0,4053	1,4053	49,95	30	-0,15	-0,0315	0,9685	34,42
3	1,71	0,3591	1,3591	48,30	31	-0,19	-0,0399	0,9601	34,12
4	1,56	0,3276	1,3276	47,19	32	-0,24	-0,0504	0,9496	33,75
5	1,41	0,2961	1,2961	46,07	33	-0,28	-0,0588	0,9412	33,45
6	1,28	0,2688	1,2688	45,10	34	-0,33	-0,0693	0,9307	33,08
7	1,2	0,252	1,252	44,50	35	-0,38	-0,0798	0,9202	32,71
8	1,11	0,2331	1,2331	43,83	36	-0,42	-0,0882	0,9118	32,41
9	1,02	0,2142	1,2142	43,15	37	-0,47	-0,0987	0,9013	32,03
10	0,93	0,1953	1,1953	42,48	38	-0,51	-0,1071	0,8929	31,74
11	0,84	0,1764	1,1764	41,81	39	-0,56	-0,1176	0,8824	31,36
12	0,77	0,1617	1,1617	41,29	40	-0,61	-0,1281	0,8719	30,99
13	0,71	0,1491	1,1491	40,84	41	-0,66	-0,1386	0,8614	30,62
14	0,65	0,1365	1,1365	40,39	42	-0,71	-0,1491	0,8509	30,24
15	0,59	0,1239	1,1239	39,95	43	-0,76	-0,1596	0,8404	29,87
16	0,53	0,1113	1,1113	39,50	44	-0,81	-0,1701	0,8299	29,50
17	0,47	0,0987	1,0987	39,05	45	-0,86	-0,1806	0,8194	29,12
18	0,42	0,0882	1,0882	38,68	46	-0,93	-0,1953	0,8047	28,60
19	0,37	0,0777	1,0777	38,30	47	-0,99	-0,2079	0,7921	28,15
20	0,31	0,0651	1,0651	37,86	48	-1,06	-0,2226	0,7774	27,63
21	0,26	0,0546	1,0546	37,48	49	-1,13	-0,2373	0,7627	27,11
22	0,21	0,0441	1,0441	37,11	50	-1,19	-0,2499	0,7501	26,66
23	0,16	0,0336	1,0336	36,74	51	-1,28	-0,2688	0,7312	25,99

Продолжение таблицы 5

m	$\Phi_{P\%}$	$\Phi_{P\%}C_V$	$K_{P\%}$	$Q_{P\%}$	m	$\Phi_{P\%}$	$\Phi_{P\%}C_V$	$K_{P\%}$	$Q_{P\%}$
24	0,12	0,0252	1,0252	36,44	52	-1,39	-0,2919	0,7081	25,17
25	0,07	0,0147	1,0147	36,06	53	-1,49	-0,3129	0,6871	24,42
26	0,03	0,0063	1,0063	35,77	54	-1,64	-0,3444	0,6556	23,30
27	-0,02	-0,0042	0,9958	35,39	55	-1,9	-0,399	0,601	21,36
28	-0,06	-0,0126	0,9874	35,09					

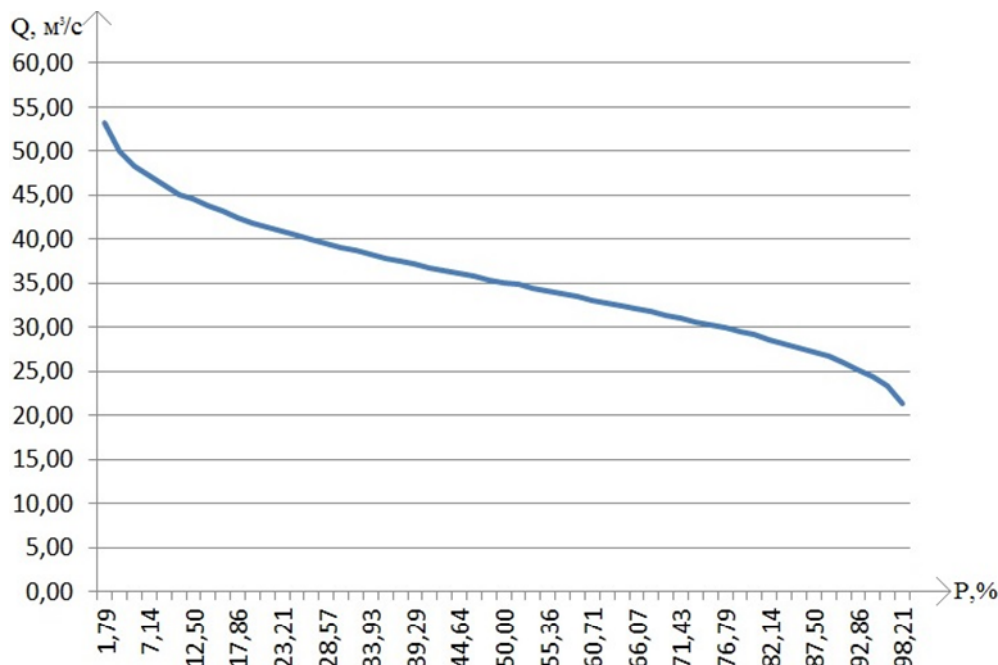


Рисунок 2 – График теоретической кривой обеспеченности

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

- 1 Шамова, В.В. Гидрология / В.В. Шамова. - Новосибирск: Новосиб. гос. акад. водн. трансп., 2013. -465 с.
- 2 Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Новосибирской области». - Новосибирск, 2017.
- 3 СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик.

- 1 V.V. Shamova. Hydrology [Gidrologiya]. Novosibirsk. Novosibirsk St. Acad. of Water Transp. Publ. 2013. 465 p.
- 2 State report "On the state and environmental protection of the Novosibirsk Region" [O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchey sredy Novosibirskoy oblasti]. Novosibirsk, 2017.
- 3 Set of rules 33-101-2003. Determination of design hydrological performance [Opredelenie osnovnykh raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik].

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: река Бердь, село Старый Искитим, расход воды, обеспеченность
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ: Шамова Вера Васильевна, канд. техн. наук, профессор ФГБОУ ВО «СГУВТ»
 Мурин Павел Дмитриевич, аспирант ФГБОУ ВО «СГУВТ»
ПОЧТОВЫЙ АДРЕС: 630099, г.Новосибирск, ул.Щетинкина, 33, ФГБОУ ВО «СГУВТ»

ТОЧНОЕ ВЫЧИСЛЕНИЕ НЕКОТОРОГО КЛАССА ОПРЕДЕЛЁННЫХ ИНТЕГРАЛОВ С ПОМОЩЬЮ РАЗЛОЖЕНИЯ ПОДЫНТЕГРАЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ В СХОДЯЩИЕСЯ СТЕПЕННЫЕ РЯДЫ ТЕЙЛОРА

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»

О.Г. Куделин, В.И. Фомин

ACCURATE CALCULATION OF SOME CLASS OF DEFINITE INTEGRALS BY USING TAYLOR EXPANSION OF INTEGRANDS
Siberian State University of Water Transport (SSUWT) 33, Schetinkina St., Novosibirsk, 630099, Russia
Oleg G. Kudelin (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of SSUWT)
Vasilii I. Fomin (Senior Lecturer of SSUWT)

ABSTRACT: This paper demonstrates that Taylor expansion of integrands helps to calculate some class of definite integrals with the previously specified accuracy.

Keywords: Taylor's series, definite integral, calculation

Показано, что разложение подынтегральных функций в сходящиеся степенные ряды Тейлора позволяют вычислять некоторые классы определённых интегралов с необходимой, ранее заданной точностью.

В монографии [1] авторы предлагали разложение подынтегральных функций в сходящиеся степенные ряды, которые после интегрирования позволяли получать суммы рядов, достаточно быстро приводившие к результатам вычисления некоторых классов определённых интегралов с заданной точностью.

В данной работе авторы развивают предложенную идею для получения точного результата вычисления некоторого класса определённых интегралов.

Как известно, с помощью разложения подынтегральной функции в сходящийся ряд Тейлора можно вычислить его лишь приближенно с некоторой наперёд заданной точностью. При этом, однако, всё - таки существуют такой класс интегралов, вычисление которых можно доводить до точного результата.

Однако, это возможно лишь в том случае, если подынтегральная функция не является слишком громоздкой и без труда разлагается в ряд Тейлора. При этом промежуток интегрирования должен целиком принадлежать области сходимости соответствующего ряда.

На этом промежутке степенной ряд можно интегрировать, применяя формулу Ньютона – Лейбница [2]. В результате получается разность двух сходящихся числовых рядов, которые при этом могут оказаться условно сходящимися.

Как известно, метод разложения подынтегральной функции в ряд является эффективным, тогда и только тогда, когда значение этого ряда приводится точному значению.

Считая известными суммы рядов [3]

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} = \frac{\pi^2}{6}; \quad \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{n^2} = \frac{\pi^2}{12}; \quad \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} = \frac{\pi^2}{8}, \quad (1)$$

а также разложения в сходящиеся степенные ряды функций:

– логарифмический ряд

$$\ln(1+x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1} x^n}{n}; \quad x \in (-1, 1]; \quad (2)$$

– ряд «высокого логарифма»

$$\ln \frac{1+x}{1-x} = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^{2n-1}}{2n-1}; \quad x \in (-1, 1), \quad (3)$$

можно точно вычислить некоторые классы определённых интегралов.

Итак, согласно (1), имеем

$$\int_0^1 \frac{\ln(1+x)}{x} dx = \int_0^1 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1} x^n}{n} dx = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{n} \int_0^1 x^{n-1} dx = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{n^2} = \frac{\pi^2}{12}. \quad (4)$$

Аналогично, получаем

$$\int_0^1 \frac{\ln(1-x)}{x} dx = -\int_0^1 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^n}{n} dx = -\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \int_0^1 x^{n-1} dx = -\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} = -\frac{\pi^2}{6}. \quad (5)$$

Исходя из результатов (4) и (5), а также формулы суммы « n » первых членов геометрической прогрессии

$$1 + q + q^2 + q^3 + \dots + q^{n-1} = \frac{1 - q^n}{1 - q}, \quad (6)$$

вычислим следующие определённые интегралы

$$\begin{aligned} \int_0^1 \frac{\ln(1 + x + x^2 + \dots + x^{n-1})}{x} dx &= \int_0^1 \frac{\ln\left(\frac{1-x^n}{1-x}\right)}{x} dx = \\ &= \int_0^1 \frac{\ln(1-x^n) - \ln(1-x)}{x} dx = \int_0^1 \frac{\ln(1-x^n)}{x} dx - \int_0^1 \frac{\ln(1-x)}{x} dx = \\ &= \left\{ \int_0^1 \frac{\ln(1-x^n)}{x} dx \right\} \left| \begin{array}{l} t = x^n \mapsto \frac{dx}{x} = \frac{dt}{nt} \\ 0 \mapsto 0, \quad 1 \mapsto 1 \end{array} \right. = \frac{1}{n} \int_0^1 \frac{\ln(1-t)}{t} dt = \\ &= \frac{1}{n} \int_0^1 \frac{\ln(1-t)}{t} dt - \int_0^1 \frac{\ln(1-x)}{x} dx = \\ &= \left(\frac{1}{n} - 1 \right) \int_0^1 \frac{\ln(1-x)}{x} dx = \frac{n-1}{6n} \pi^2; \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \int_0^1 \frac{\ln(1 - x + x^2 - x^3 + \dots + x^{2n})}{x} dx &= \int_0^1 \frac{\ln\left(\frac{1+x^{2n+1}}{1+x}\right)}{x} dx = \\ &= \int_0^1 \frac{\ln(1+x^{2n+1}) - \ln(1+x)}{x} dx = \int_0^1 \frac{\ln(1+x^{2n+1})}{x} dx - \int_0^1 \frac{\ln(1+x)}{x} dx = \\ &= \left\{ \int_0^1 \frac{\ln(1+x^{2n+1})}{x} dx \right\} \left| \begin{array}{l} t = x^{2n+1} \mapsto \frac{dx}{x} = \frac{dt}{(2n+1)t} \\ 0 \mapsto 0, \quad 1 \mapsto 1 \end{array} \right. = \\ &= \frac{1}{2n+1} \int_0^1 \frac{\ln(1+t)}{t} dt = \frac{1}{2n+1} \int_0^1 \frac{\ln(1+t)}{t} dt - \int_0^1 \frac{\ln(1+x)}{x} dx = \\ &= \left(\frac{1}{2n+1} - 1 \right) \int_0^1 \frac{\ln(1+x)}{x} dx = -\frac{2n}{2n+1} \int_0^1 \frac{\ln(1+x)}{x} dx = -\frac{n\pi^2}{6(2n+1)}; \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \int_0^1 \frac{\ln(1 - x + x^2 - x^3 + \dots - x^{2n-1})}{x} dx &= \int_0^1 \frac{\ln\left(\frac{1-x^{2n}}{1+x}\right)}{x} dx = \\ &= \int_0^1 \frac{\ln(1-x^{2n}) - \ln(1+x)}{x} dx = \int_0^1 \frac{\ln(1-x^{2n})}{x} dx - \int_0^1 \frac{\ln(1+x)}{x} dx = \\ &= \left\{ \int_0^1 \frac{\ln(1-x^{2n})}{x} dx \right\} \left| \begin{array}{l} t = x^{2n} \mapsto \frac{dx}{x} = \frac{dt}{2n \cdot t} \\ 0 \mapsto 0, \quad 1 \mapsto 1 \end{array} \right. = \\ &= \frac{1}{2n} \int_0^1 \frac{\ln(1-t)}{t} dt = \frac{1}{2n} \int_0^1 \frac{\ln(1-t)}{t} dt - \int_0^1 \frac{\ln(1+x)}{x} dx = \\ &= -\frac{1}{2n} \frac{\pi^2}{6} - \frac{\pi^2}{12} = -\frac{\pi^2}{12n} - \frac{\pi^2}{12} = -\frac{(n+1)\pi^2}{12n}; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \int_0^1 \frac{\operatorname{arctanh} x}{x} dx &= \int_0^1 \frac{1}{2} \frac{\ln\left(\frac{1+x}{1-x}\right)}{x} dx = \frac{1}{2} \int_0^1 \frac{\ln(1+x) - \ln(1-x)}{x} dx = \\ &= \frac{1}{2} \left(\int_0^1 \frac{\ln(1+x) dx}{x} - \int_0^1 \frac{\ln(1-x) dx}{x} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{\pi^2}{12} + \frac{\pi^2}{6} \right) = \frac{1}{2} \frac{\pi^2}{4} = \frac{\pi^2}{8}. \end{aligned} \quad (10)$$

Отметим, что интеграл (10) можно вычислить, если воспользоваться последним разложением в (1)

$$\begin{aligned} \int_0^1 \frac{\operatorname{arctanh} x}{x} dx &= \int_0^1 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n-1} x^{2n-1} dx = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n-1} \int_0^1 x^{2n-2} dx = \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)(2n-1)} \Big|_0^1 = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} = \frac{\pi^2}{8}. \end{aligned}$$

Поскольку отрезок интегрирования $[-1;0]$ симметричен $[0;1]$ относительно точки $x_0 = 0$, то рассмотренные методы вычислений, представленные выше, можно с таким же успехом применить в случае интегрирования и на отрезке $[-1;0]$, а также (посредством суммирования интегралов) на расширенном отрезке $[-1;1] = [-1;0] \cup [0;1]$. Предлагаем читателю проделать эту процедуру самостоятельно.

Предложенный способ вычисления определённых интегралов с помощью разложения подынтегральной функции в сходящийся степенной ряд с последующим интегрированием, сводит процедуру вычисления к суммам рядов, значения которых известны или определяются без особых трудностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Куделин, О.Г. Вычисление класса определённых интегралов и суммирование некоторых нестандартных функциональных рядов / О.Г. Куделин, Е.К. Смирнова, В.И. Фомин. -Новосибирск: - Новосибир. гос. акад. водн. трансп., 2009. -88 с.
- 2 Фиктенгольц, Г.М. Основы математического анализа / Г.М. Фиктенгольц. -СПб: Лань, 2001. -Т.1. -440 с.
- 3 Фиктенгольц, Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления / Г.М. Фиктенгольц. -М.: Изд-во Физ.-мат. литер., 1962. -Т.2, -807 с.

REFERENCES

- 1 O.G. Kudelin, E.K. Smirnova, V.I. Fomin. Calculation of certain class of definite integrals and summing of some nonstandard functional series [Vychislenie klassa opredelennykh integralov i summirovaniye nekotorykh nestandartnykh funktsional'nykh ryadov]. Novosibirsk. Novosib. St. Acad. Water Transp. 2009. 88 p.
- 2 G.M. Fikhtengol'ts. Mathematical analysis fundamentals [Osnovy matematicheskogo analiza]. -S.Peresburg. Lan' Publ. 2001. Vol. 1. 440 p.
- 3 G.M. Fikhtengol'ts. Differential and integral calculus [Kurs differentsial'nogo i integral'nogo ischisleniya]. Moscow. Fiziko-matematicheskoy literatury Publ. 1962. Vol. 2. 807 p.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ряд Тейлора, определённый интеграл, вычисление
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ: Куделин Олег Георгиевич, канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «СГУВТ»
 Фомин Василий Иванович, старший преподаватель ФГБОУ ВО «СГУВТ»
ПОЧТОВЫЙ АДРЕС: 630099, г.Новосибирск, ул.Щетинкина, 33, ФГБОУ ВО «СГУВТ»

ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ РАЗРАБОТКИ НЕЙРОСЕТЕВЫХ РЕАЛИЗАЦИЙ ТАБЛИЧНО ЗАДАННЫХ ФУНКЦИЙ ДЛЯ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»

Н.В. Голышев, С.В. Моторин, Е.А. Панич

SOFTWARE FOR DEVELOPMENT OF NEURO NETWORK REALIZATIONS OF TABLE FUNCTIONS

Siberian State University of Water Transport (SSUWT) 33, Schetinkina St., Novosibirsk, 630099, Russia
Nikolay V. Golyshev (Holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Prof. of SSUWT)
Sergey V. Motorin (Holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Prof. of SSUWT)
Ekaterina A. Panich (Master's Degree of SSUWT)

ABSTRACT: The authors demonstrate that the approximation of table data can be performed based on artificial neural networks, while the specified accuracy, continuity and differentiability of the function can be provided.

Keywords: neural network, approximation, table, multivariate function

Показано, что аппроксимация табличных данных может быть осуществлена на основе искусственных нейронных сетей, при этом могут быть обеспечены заданные точность, непрерывность и дифференцируемость функции.

Создание сред автоматизированного проектирования и расчетов на базе современных информационных технологий является актуальным направлением в различных областях науки и техники. Однако, разработка средств автоматизации расчетов в гидротехнике, гидравлике и гидроэкологии затрудняется тем, что в этих областях значительная часть информации, необходимой для расчетов представлена в виде графиков и таблиц [1, 2]. По этой причине в существующих методиках до настоящего времени широко применяются графоаналитические методы и линейная интерполяция данных по таблицам.

Для автоматизации таких расчетов и создания сред проектирования необходимо осуществить перевод имеющейся информации в удобную для применения в аналитических методах форму. Анализ существующих в гидравлике методов расчета показал, что в них используются в основном таблицы с одним или двумя входами. Круг решаемых при этом задач относится к определению корней систем нелинейных уравнений и нахождению экстремумов функций одного либо двух переменных [1, 3]. Таким образом, решение проблемы сводится к построению функций по конечным наборам значений.

В настоящей работе для построения функций, аппроксимирующих табличные данные используются нейронные сети. Известно, что эта задача является типичной для нейронных сетей [4, 5]. При этом обеспечение выполнения требований к функции производится путем выбора архитектуры сети, количества слоев, количества нейронов и число связей, а также выбором типов передаточных функций нейронов.

Структурная схема процесса разработки нейросетевой реализации функции, аппроксимирующей таблицу приведена на рисунке 1.

После проведения процедуры обучения и сохранения обученной нейронной сети, сеть представляет собой нейросетевую реализацию функции, аппроксимирующей таблицу и может быть использована в расчетах.

Предварительный выбор архитектуры и параметров элементов сети основывается на изучении видов операций, которые в них производятся. Так, в классических структурах нейронных сетей прямого распространения производятся вычисления линейных и нелинейных функций одного переменного, а также суперпозиций функции от функций, возникающих при каскадном соединении слоев нейронов сети.

Теоретические возможности нейронных сетей следуют из теорем Колмогорова и Стоуна. В них доказано, что произвольную непрерывную функцию N переменных можно построить с помощью нейронной сети прямого распространения (каскадной) с одним или двумя скрытыми слоями. В этих теоремах, рассматриваются нейронные сети без ограничений на число элементов и значения параметров [4,6].

В реальных случаях всегда имеются ограничения, как на количество слоев сети, так и на вид передаточных функций нейронов. Архитектура нейронной сети, удовлетворяющая этим требованиям, приведена на рисунке 2.

Как следует из приведенного рисунка, выходной сигнал сети z формируется в виде суперпозиции функций

$$z = \varphi_3 \left(\sum_{k=0}^{L_2} w_{1,k}^{(3)} y_k \right) = \varphi_3 \left\{ \sum_{k=0}^{L_2} w_{1,k}^{(3)} \varphi_2 \left[\sum_{i=0}^{L_1} w_{k,i}^{(2)} \varphi_1 \left(\sum_{n=0}^N w_{i,n}^{(1)} x_n \right) \right] \right\}, \quad (1)$$

где v_i – выходные сигналы нейронов 1-го скрытого слоя

$$v_i = \varphi_1 \left(\sum_{n=0}^N w_{i,n}^{(1)} x_n \right); \quad i = 0, 1 \dots L_1.$$

Соответственно

$$y_k = \varphi_2 \left(\sum_{i=0}^{L_1} w_{k,i}^{(2)} v_i \right) = \varphi_2 \left[\sum_{i=0}^{L_1} w_{k,i}^{(2)} \varphi_1 \left(\sum_{n=0}^N w_{i,n}^{(1)} x_n \right) \right],$$

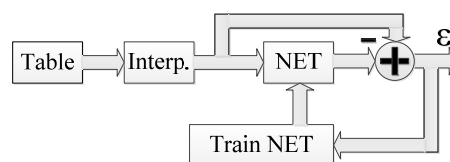


Рисунок 1 – Структурная схема процесса разработки функции, аппроксимирующей таблицу

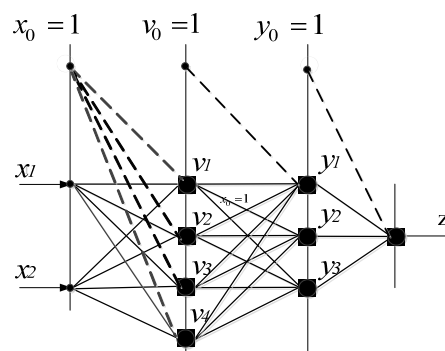


Рисунок 2 – Архитектура каскадной нейронной сети с двумя скрытыми слоями

где k – выходные сигналы нейронов 2-го скрытого слоя, $k = 0, 1 \dots L_2$;
 L_1, L_2 – количество нейронов в первом и втором скрытых слоях, соответственно;
 $\varphi_n(x)$ – передаточные функции нейронов в слоях сети;
 w_{ij} – весовые коэффициенты нейронов.

В работах [4, 6] предложено сформулировать ограничения на параметры нейронной сети на основе константы Липшица аппроксимируемой функции $f(x)$ в области D с евклидовой нормой

$$L_f = \sup_{x, y \in D, x \neq y} \frac{\|f(x) - f(y)\|}{\|x - y\|}. \quad (2)$$

Там же получены выражения для оценки константы Липшица сверху для основных операций и элементов структур каскадных нейронных сетей. На основе приведенных соотношений для выбранной архитектуры нейронной сети можно определить оценку константы Липшица функции, которую эта сеть может аппроксимировать.

Полученные на основе расчетов данные являются ориентировочными. На практике чаще всего используются нейронные сети с одним или двумя скрытыми слоями, причем количество нейронов в них заключается в пределах $(1-3)N$ [6, 7]. Окончательный выбор параметров нейронной сети производится на основе результатов вычислительного эксперимента с различными вариантами проектов сети.

Для разработки нейросетевых функций был создан программный модуль, который позволяет осуществлять в интерактивном режиме создание нейросетевых реализаций функций для аппроксимации данных, представленных в форме таблиц. Внешний вид основной панели модуля приведен на рисунке 3.

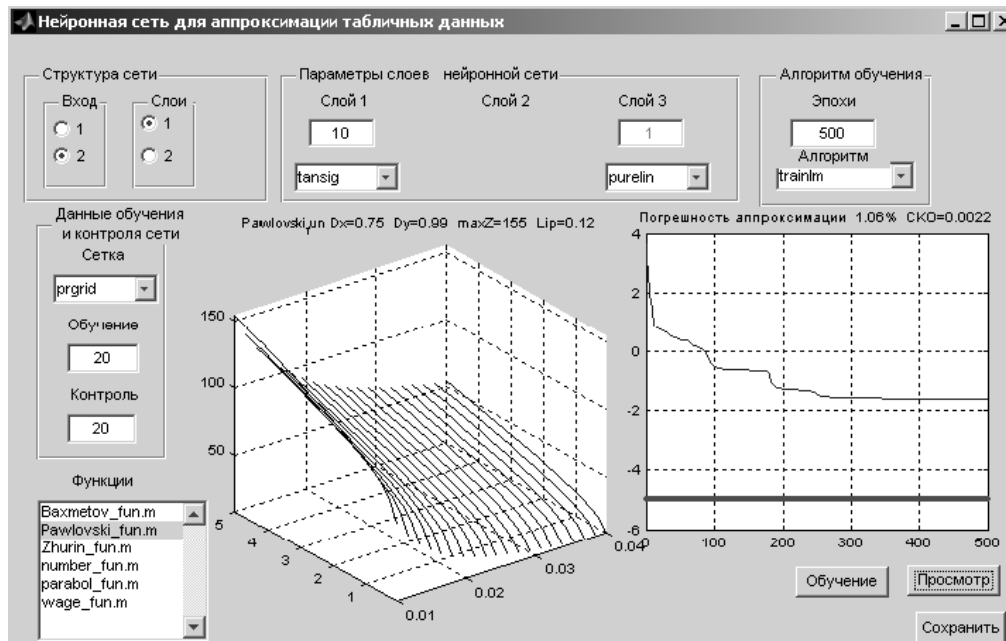


Рисунок 3 – Программный модуль для создания нейросетевых реализаций таблично заданных функций

При разработке модуля были использованы встроенные функции создания и обучения нейронных сетей пакета программ Neural Networks Toolbox системы MatLab [8].

В программном модуле предусмотрены все необходимые возможности для интерактивной разработки, визуального и количественного контроля, создаваемых нейросетевых реализаций табличных функций.

Задание структуры и выбора параметров нейронной сети, в частности, количества слоев и нейронов в них, передаточных функций нейронов и алгоритмов обучения сети.

Организация обучающего и контрольного множеств в виде случайной последовательности точек и регулярной сетки с заданным шагом.

Выбор алгоритма обучения сети, предельного количества итераций и порогового значения средней квадратической ошибки обучения.

Оценивание качества аппроксимации величинами относительной погрешности аппроксимации δ на контрольном множестве K

$$\delta = \frac{K \max |d_k - z_k|}{\sum_{k=1}^K |d_k|}, \quad (3)$$

и нормированной среднеквадратической ошибки

$$mse = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^K (d_k - z_k)^2}{\sum_{k=1}^K d_k^2}}, \quad (4)$$

где d_k, z_k – значения желаемого и выходного откликов нейронной сети на контрольном множестве, соответственно.

Для визуального контроля ошибок аппроксимации на контрольной сетке в программном модуле предусмотрен режим отображения текущих значений ошибок $\varepsilon_r = d_r - z_r$, $r = [1 \dots K \times K]$ по строкам матрицы координатных точек контрольного множества. Все основные этапы процесса разработки нейросетевой функции документируются и становятся доступными в режиме подробного просмотра.

Далее приведены результаты применения программного модуля для разработки нейросетевых реализаций некоторых функций, которые используются в гидравлических расчетах характеристик движения воды в каналах и естественных руслах [1, 3].

Функция Бахметева определяется интегралом

$$B(\eta, x) = \int \frac{d\eta}{1 - \eta^x} + C,$$

где η – относительная глубина потока;

x – гидравлический показатель русла;

C – постоянная интегрирования.

Эта функция двух переменных используется при расчете формы свободной поверхности уровня воды в призматических руслах рек и приводится в табличной форме. Аппроксимация функции проводилась в области $\eta = [0,1 \dots 0,9]$, $x = [1 \dots 4]$. Значение оценки константы Липшица в области $L = 0,15$. График поверхности функции Бахметева приведен на рисунке 4.

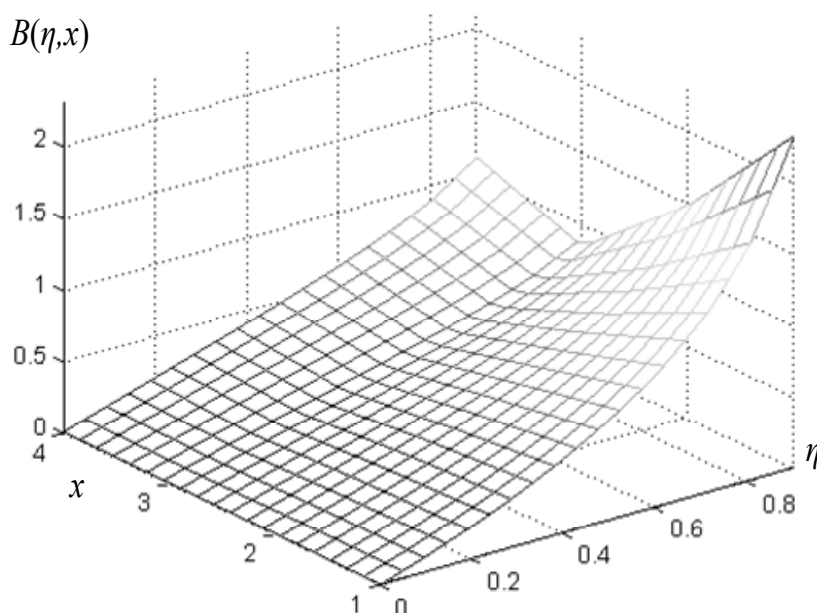


Рисунок 4 – График поверхности функции Бахметева

На основе анализа результатов проделанных экспериментов для нейросетевой реализации функции Бахметева принята нейронная сеть, содержащая два скрытых слоя нейронов с передаточными функциями сигмоидального типа. Количество нейронов в слоях было принято $L_1=8$ и $L_2=3$, соответственно. Обучение сети проводилось по критерию минимума средней квадратической ошибки (СКО) на равномерной сетке $[15 \times 15]$.

В качестве обучающего алгоритма был принят алгоритм Левенберга-Марквардта. Заданный порог СКО = 10^{-5} был достигнут при 175 итерациях.

На контрольном множестве размером $[20 \times 20]$ получено значение СКО = 0,004 и значение относительной погрешности аппроксимации менее 5%. Зависимость ошибки нейронной сети на контрольной сетке показана на рисунке 5.

Функция Павловского используется для вычисления значений коэффициента Шези в гидравлических расчетах и определяется формулами

$$C(n, R) = \frac{1}{n} R^y;$$

$$y = 2,5\sqrt{n} - 0,13 - 0,75(\sqrt{n} - 0,1),$$

где n – коэффициент шероховатости;

R – гидравлический радиус.

График поверхности функции Павловского приведен на рисунке 6.

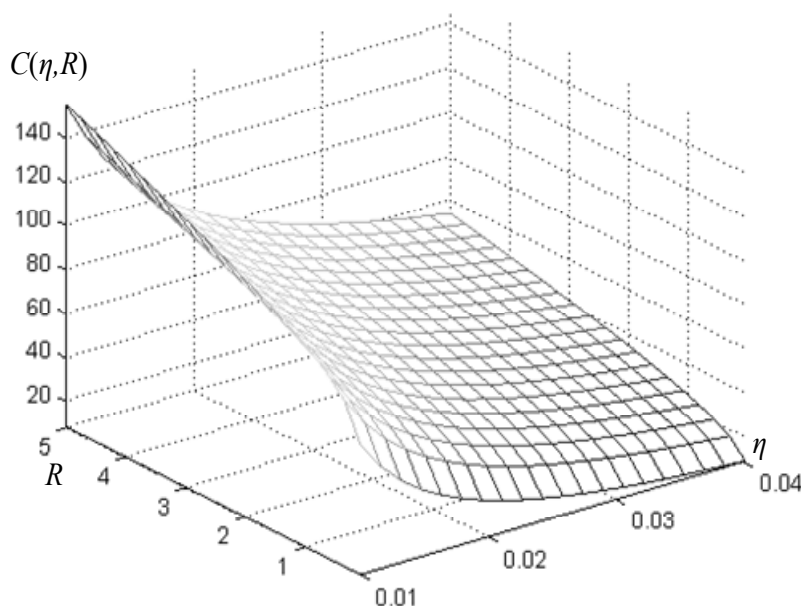


Рисунок 6 – График поверхности функции Павловского

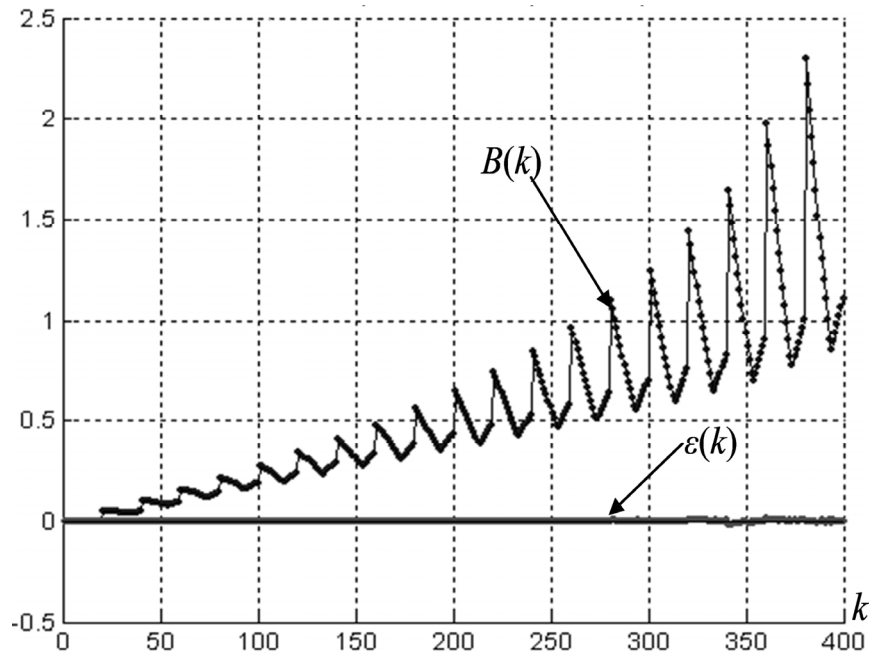


Рисунок 5 – Зависимость ошибки нейронной сети на контрольной сетке для функции Бахметева

Аппроксимация функции проводилась в области $\eta = [0,1 \dots 0,9]$, $R = [0,05 \dots 5]$. Значение оценки константы Липшица в области $L = 0,11$.

Для нейросетевой реализации функции Павловского принята нейронная сеть с одним скрытым слоем нейронов с передаточными функциями сигмоидального типа. Количество нейронов в слое было принято равным $L1 = 10$. Обучение сети проводилось по критерию минимума средней квадратической ошибки на равномерной сетке $[15 \times 15]$.

В качестве обучающего алгоритма был принят алгоритм Левенберга - Марквардта.. На контрольном множестве размером $[20 \times 20]$ получено значение $СКО = 0,002$ и значение относительной погрешности аппроксимации менее 3%. Зависимость ошибки нейронной сети на контрольной сетке показана на рисунке 7.

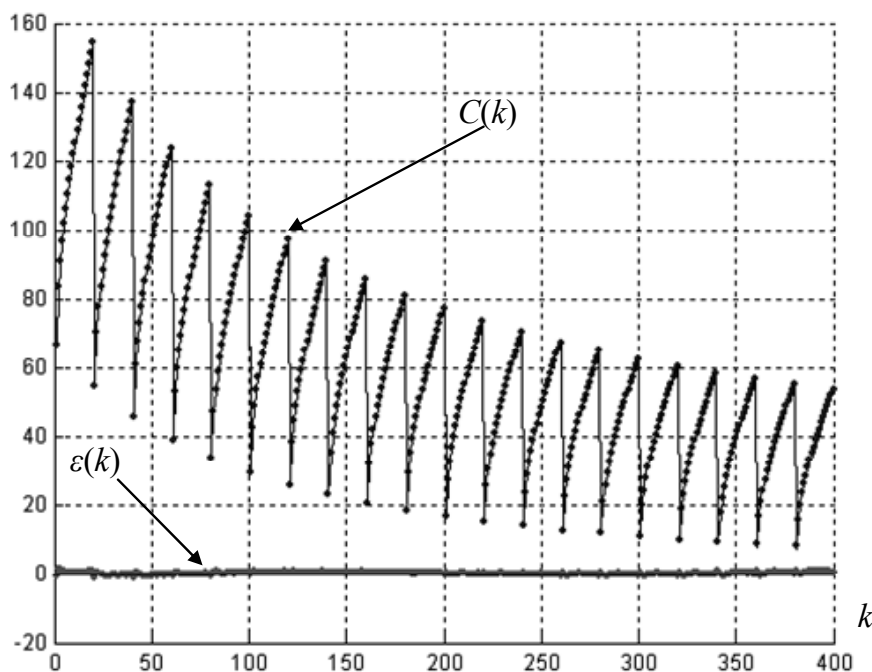


Рисунок 7 – Зависимость ошибки нейронной сети на контрольной сетке для функции Павловского

Функция Журина приводится в табличной форме и используется в расчетах характеристик неравномерного установившегося движения воды в каналах и естественных руслах. График поверхности функции Журина приведен на рисунке 8.

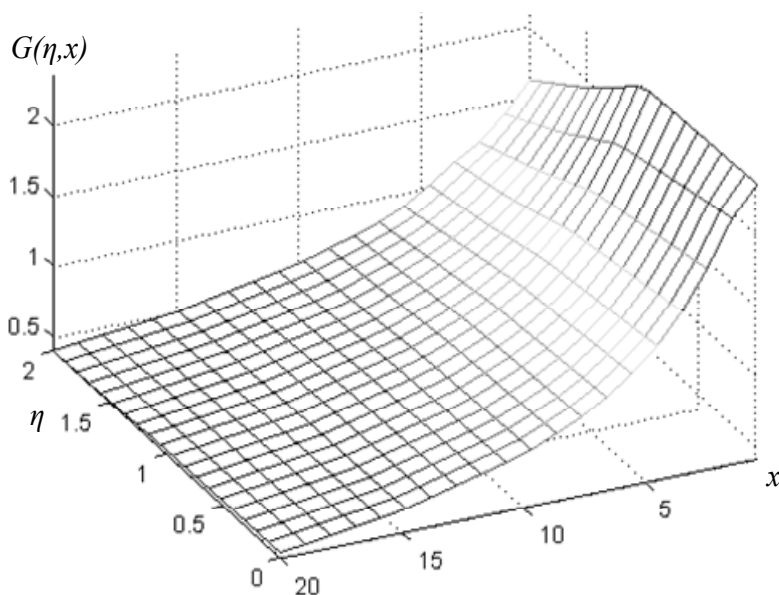


Рисунок 8 – График поверхности функции Журина

На рисунке 9 приведены результаты проверки нейросетевой реализации функции Журина.

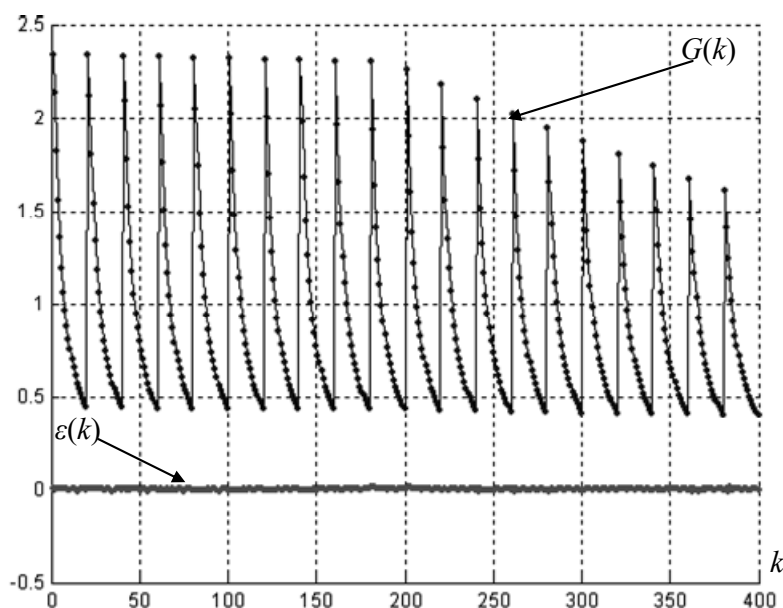


Рисунок 9 – Зависимость ошибки нейронной сети на контрольной сетке для функции Журина

На контрольном множестве размером $[20 \times 20]$ получено значение $СКО = 0,004$ и значение относительной погрешности аппроксимации менее 3%. Зависимость ошибки нейронной сети на контрольной сетке показана на рисунке 9.

В работе представлены результаты разработки и использования программного модуля для создания библиотек функций, аппроксимирующих данные представленные в форме таблиц. Разработка функций проводится на основе нейронных сетей. При этом обеспечение выполнения необходимых требований к функции производится путем выбора архитектуры сети и последующего обучения.

После проведения процедуры обучения и сохранения обученной нейронной сети, сеть представляет собой нейросетевую реализацию функции, аппроксимирующей таблицу и может быть использована в любых расчетах, как и «обычная» непрерывная функция.

Применение нейросетевых реализаций табличных функций позволяет преодолеть трудности создания сред автоматизации расчетов и проектирования в областях, в которых для проведения расчетов необходима информация, не представленная в аналитической форме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Чугаев, Р.Р. Гидравлика. Учебник для вузов / Р.Р.Чугаев. -Л.: Энергоиздат, 1982. -672 с.
- 2 Голышев, Н.В. Программный модуль для расчета и анализа локальных параметров русла на примере Обского бассейна / Н.В. Голышев, В.М. Ботвинков, С.В. Моторин, В.А. Седых, А.В. Ботвинков // -Науч. пробл. трансп. Сиб. и Дальн. Вост. -2014. -№3. -С. 86-93.
- 3 Богомолов, А.И. Гидравлика. Учебник для вузов / А.И. Богомолов, К.А. Михайлов. -М.: Стройиздат, 1972. -648 с.
- 4 Горбань, А.Н. Нейроинформатика / А.Н. Горбань, В.Л. Лунин, А.Н. Киндин и др. -Новосибирск: Наука, 1998. -296 с.
- 5 Горбань, А.Н. Нейронные сети на персональном компьютере / А.Н. Горбань, Д.А. Россиев. -Новосибирск: Наука, 1996. -276 с.
- 6 Оссовский, С. Нейронные сети для обработки информации. Пер. с польск. / С. Оссовский. -М.: Финансы и статистика, 2004. -344 с.
- 7 Голышев, Н.В. Краткосрочный прогноз уровней гидрологического ряда на основе нейронной сети / Н.В. Голышев, С.В. Моторин, А.А. Зуева // -Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. -2017. -№2. -С. 63-67.

REFERENCES

- 1 R.R.Chugaev. Hydraulics [Gidravlika]. Leningrad. Energoizdat Publ. 1982. 672 p.
- 2 N.V. Golyshev, V.M. Botvinkov, S.V. Motorin, V.A. Sedykh, A.V. Botvinkov. Software for calculating and analyzing local parameters of the riverbed using the example of the Ob river basin [Programmnyy modul' dlya rascheta i analiza lokal'nykh parametrov rusla na primere Obskogo basseyna]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*. 2014. No. 3. pp. 86-93.
- 3 A.I. Bogomolov, K.A. Mikhaylov. Hydraulics [Gidravlika]. Moscow. Stroyizdat Pubk. 1972. 648 p.
- 4 A.N. Gorban', V.L. Lunin, A.N. Kindin. Neuroinformatics [Neyroinformatika]. Novosibirsk. Nauka Publ. 1998. 296 p.
- 5 A.N. Gorban', D.A. Rossiev. Neural networks on a personal computer [Neyronnye seti na personal'nom komp'yutere]. Novosibirsk. Nauka Publ. 1996. 276 p.
- 6 S. Ossovskiy. Neural networks for information processing [Neyronnye seti dlya obrabotki informatsii]. Moscow. Finansy i statistika Publ. 2004. 344 p.
- 7 N.V. Golyshev, S.V. Motorin, A.A. Zueva. Short-term forecast of streamflow series levels based on a neural network [Kratkosrochnyy prognoz urovney gidrologicheskogo ryada na osnove neyronnoy seti]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*. 2017. No. №2. pp. 63-67.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: нейронная сеть, аппроксимация, таблица, архитектура, многомерная функция
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ: Голышев Николай Васильевич, докт. техн. наук, профессор ФГБОУ ВО «СГУВТ»
 Моторин Сергей Викторович, докт. техн. наук, профессор ФГБОУ ВО «СГУВТ»
 Панич Екатерина Александровна, магистрант ФГБОУ ВО «СГУВТ»
ПОЧТОВЫЙ АДРЕС: 630099, г.Новосибирск, ул.Щетинкина, 33, ФГБОУ ВО «СГУВТ»

МЕТОДЫ ИНТРОСПЕКТИВНОГО ОЦЕНИВАНИЯ АЛЬТЕРНАТИВ ОБУЧЕНИЯ ЭКИПАЖЕЙ СУДОВ

ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет»

А.Р. Халилов, В.А. Доровской

METHODS OF INTROSPECTIVE ESTIMATION OF SHIP CREWS TRAINING ALTERNATIVES

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kerch State Maritime Technological University" (FSFEI HE "KSMTU") 82, Ordzhonikidze St., Kerch, 298309, Russia

Ali R. Khalilov (Graduate student of FSFEI HE "KSMTU")

Vladimir A. Dorovskoi (Holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Prof. of FSFEI HE "KSMTU")

ABSTRACT: The authors propose a decision-making technique based on expert qualitative criterion estimation of alternatives, considering the situations of uncertainty. The aim and objective of the study is to improve the quality of decisions taken when managing a marine facility.

Keywords: *introspective estimation, training alternative, study analysis*

Предложен метод принятия решений на основе экспертного оценивания альтернатив по качественному критерию с учетом ситуаций неопределенности. Целью и задачей исследования является повышение качества принимаемых решений при управлении морским объектом.

При синтезе любой математической модели возникает задача получения первичной информации о взаимосвязи входа и выхода модели. На основе этой взаимосвязи в дальнейшем решается задача идентификации модели. В отличие от натуральных систем процесс многофакторного оценивания является интеллектуальной процедурой реализуемой модели. К сожалению, в большинстве случаев при идентификации моделей интеллектуальной деятельности не удается количественно измерить реакцию индивидуума, можно зарегистрировать лишь тип поведения и его качественные характеристики, являющиеся отражением его ощущений в некоторой ситуации. В этом случае требуются принципиально другие методы получения информации, необходимой для идентификации модели. Одним из возможных подходов получения такой информации является подход, известный как интроспективный анализ.

Целью интроспективного подхода является замещение необходимой для решения проблемы объективной, но недоступной по каким-либо причинам информации, субъективными, основанными на опыте, интуиции ощущениями лиц, принимающих решения (ЛПР). На этом подходе базируется теория экспертного оценивания.

Цель и задачи исследований. Повышение качества принимаемых решений при управлении морским объектом необходимо разработать метод экспертного оценивания альтернатив по качественному критерию. Для решения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: провести анализ методов идентификации, парных сравнений и метод Саати на основании которых и разработать метод экспертного оценивания альтернатив по качественному критерию.

Методы и материалы исследований. Принципиальной особенностью методологии экспертного оценивания по количественному критерию является его субъективизм и интервальный характер. При этом величина интервала (степень неопределенности) зависит от степени квалификации экспертов, понимания ими конечной цели экспертизы, обработки её результатов и т.п.

Метод компараторной идентификации [1-3] ориентирован на преодоление этого недостатка путем замены процедуры измерения силы ощущений процедурой их сравнения. Этот метод хорошо себя зарекомендовал для оценки альтернатив по качественному критерию. Особо необходимо отметить, что измерения по качественному критерию позволяют полу-

чить необходимую для принятия решения информацию не только в ходе активных, специально спланированных экспертиз, но и в ходе пассивных экспериментов путем наблюдения и регистрацией результатов актов оценивания ситуаций и выбора решений.

Результаты исследований. Конечным результатом описанных методов является установление относительной важности рассматриваемых альтернатив и установление на множестве альтернатив отношения порядка (строгого или частичного). Рассмотренные методы экспертных оценок обладают различными качествами, но приводят в общем случае к близким результатам. Практика применения этих методов показала, что наиболее эффективно комплексное применение различных методов для решения одной и той же задачи. Сравнительный анализ результатов повышает обоснованность получаемых выводов. При этом следует учитывать, что методом, требующим минимальных затрат, является ранжирование. Метод парного сравнения без дополнительной обработки не дает полного упорядочения альтернатив.

В основе проблемы принятия решений при оценивании альтернатив по качественному критерию используем методы парных сравнений: метод «линия» и метод Саати.

Рассмотрим некоторое множество $A = \{A_h\}$, $h = 1, k$ альтернатив, которые эксперт подвергает сравнению по некоторому качественному критерию C с целью определения относительных весов $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_h$ значимости. Из сущности этих коэффициентов следует, что они должны быть положительными и удовлетворять уравнению нормирования

$$\sum_{h=1}^k \omega_h = 1. \quad (1)$$

Если эксперт выполнит попарные сравнения некоторой альтернативы A_q с каждой из $(k-1)$ оставшихся альтернатив относительно критерия C , то в результате будет получено $D_q = \{d_{qh}\}$, $h \neq q$ степеней преимущества альтернативы A_q над остальными альтернативами. В общем случае альтернатива A_q может превосходить некоторые альтернативы и уступать другим.

Введем понятие абсолютного веса v_h альтернативы A_h , под которым будем понимать количественную меру степени выраженности у альтернативы A_h свойства, описываемого критерием C .

Присваивая A_q вес v_q и задавая функцию

$$v_h = f(v_q, d_{qh}), \quad (2)$$

вычисляем веса всех остальных альтернатив. На завершающем этапе, используя (1), нормируя значения v_h согласно (1), получаем коэффициенты значимости ω_h альтернатив относительно критерия C .

Трудоемкость такого алгоритма, называемого «линия», равна $(k-1)$, где k - количество альтернатив. Очевидным требованием к функции (2) является монотонность. Вид этой функции зависит от типа вопросов, которые ставятся перед экспертом в ходе парного сравнения. Если возникают мультипликативные сравнения, тогда $v_h = v_q \phi(d_{qh})$, где $\phi(d_{qh})$ - произвольная монотонная функция, удовлетворяющая условию $\phi(1) = 1$.

Метод парных сравнений является базовым для предложенных Саати методов аналитических иерархических процессов [4, 5] и аналитических сетевых процессов [6] поддержки принятия решений. Сущность метода Саати состоит в следующем: эксперту последовательно предъявляются пары альтернатив (A_i, A_j) и предлагается определить степень d_{ij} преимущества A_i над альтернативой A_j относительно некоторого качественного критерия C .

При предъявлении пары (A_i, A_j) эксперт определяет степень превосходства d_{ij} . Степень преимущества d_{ij} определяется уже без рассмотрения пары (A_j, A_i) , а только исходя из метризованного мультипликативного отношения:

$$P_{ij} = \begin{cases} d_{ij}, & \text{если } (A_i, A_j) \in P; \quad (A_j, A_i) \notin P; \\ 1, & \text{если } (A_i, A_j) \in P; \quad (A_j, A_i) \in P; \\ 1/d_{ij}, & \text{если } (A_i, A_j) \in P; \quad (A_j, A_i) \in P. \end{cases}$$

При наличии k альтернатив эксперт выполняет $k(k-1)/2$ сравнений, а соотношение

$$d_{ji} = 1/d_{ij},$$

является базовым при использовании метода Саати при определении относительных весов альтернатив. Элементы d_{ij} , $i, j = \overline{1, k}$ образуют сверх транзитивную квадратную матрицу парных сравнений:

$$D = \begin{bmatrix} \omega_1/\omega_1 & \omega_1/\omega_2 & \dots & \omega_1/\omega_k \\ \omega_2/\omega_1 & \omega_2/\omega_2 & \dots & \omega_2/\omega_k \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \omega_k/\omega_1 & \omega_k/\omega_2 & \dots & \omega_k/\omega_k \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Величину d_{ij} можно трактовать как отношение весов альтернатив A_i и A_j , то есть ω_i/ω_j .

Для вычисления относительных весов альтернатив исходя из матрицы, используем наиболее математически обоснованный, на наш взгляд, метод собственного вектора, предложенный Саати [7, 8]. В качестве множества относительных весов альтернатив используем компоненты собственного вектора, соответствующего максимальному характеристическому числу $\lambda_{\max}$. Если матрица (3) удовлетворяет требованию

$$d_{ij} = (\omega_i/\omega_j) = (\omega_i\omega_h/\omega_j\omega_h) = (\omega_i/\omega_h)(\omega_h/\omega_j) = d_{ih}d_{hj},$$

для

$$\forall ij, h,$$

тогда

$$\lambda_{\max} = k,$$

где k — количество альтернатив.

При этом для несогласованной матрицы всегда

$$\lambda_{\max} \geq k.$$

По Саати в качестве показателя согласованности элементов матрицы (3) используется величина индекса согласованности

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - k}{k - 1}.$$

В случае необходимости непосредственного оценивания альтернатив каждому эксперту предлагается оценивать альтернативные решения на множестве показателей качества и ситуаций неопределенности. Показатели качества в общем виде представим так:

$$X_t = \{\tilde{X}_{it} \mid i = \overline{1, n}; \quad t = \overline{1, v}\}; \quad (4)$$

$$\tilde{X}_{it} = \{x_{ijt} \mid i = \overline{1, n}; \quad j = \overline{1, z}; \quad t = \overline{1, v}\},$$

где X_t — множество оценок альтернатив по разным показателям качества, определенных t -ым экспертом;

$\tilde{X}_{it}$ — множество оценок i -ой альтернативы по разным показателям качества, данных t -ым экспертом;

x_{ijt} — оценка, определяемая t -ым экспертом для i -ой альтернативы по j -му показателю качества.

Ситуации неопределенности представим так

$$Y_t = \{\tilde{Y}_{it} \mid i = \overline{1, n}; \quad t = \overline{1, v}\}; \quad (5)$$

$$\tilde{Y}_{it} = \{y_{ikt} \mid i = \overline{1, n}; \quad k = \overline{1, n}; \quad k = \overline{1, l}; \quad t = \overline{1, v}\},$$

где Y_t — множество оценок альтернатив, определенной t -ым экспертом при проявлении разных ситуаций неопределенности;

$\tilde{Y}_{it}$ — множество оценок i -ой альтернативы, определенной t -им экспертом при проявлении разных ситуаций неопределенности;

y_{ikt} — оценка, данная t -ым экспертом i -ой альтернативе при возникновении k -ой си-

туации неопределенности.

Таким образом, при необходимости ранжирования альтернатив, каждому эксперту предлагается построить их ранжированный ряд по каждому показателю качества и каждой ситуации неопределенности, то есть каждой альтернативе поставить в соответствие определенный ранг.

Для рангов показателей качества имеем соотношения:

$$G_t = \{\tilde{G}_{it} | i = \overline{1, n}; t = \overline{1, v}\}; \quad (6)$$

$$\tilde{G}_{it} = \{g_{ijt} | i = \overline{1, n}; j = \overline{1, z}; t = \overline{1, v}\},$$

где G_t – множество рангов альтернатив по разным показателям качества, полученными t -ым экспертом;

$\tilde{G}_{it}$ – множество рангов i -ой альтернативы по разным показателям качества, предлагаемым t -ым экспертом;

g_{ijt} – ранг, данный t -ым экспертом i -ой альтернативе по j -му показателю качества.

Ситуации неопределенности соответствуют соотношения

$$Q_t = \{\tilde{Q}_{it} | i = \overline{1, n}; t = \overline{1, v}\}; \quad (7)$$

$$\tilde{Q}_{it} = \{q_{ikt} | i = \overline{1, n}; k = \overline{1, l}; t = \overline{1, v}\},$$

где Q_t – множество рангов альтернатив при проявлении разных ситуаций неопределенности, определенное t -ым экспертом;

$\tilde{Q}_{it}$ – множество рангов i -ой альтернативы при проявлении различных ситуаций неопределенности, определенное t -ым экспертом;

q_{ikt} – ранг, определенный t -ым экспертом i -ой альтернативе при возникновении k -ой ситуации неопределенности.

Парное сравнение альтернатив (4) при ситуациях неопределенности (5) проводится с использованием алгоритма, известного как задача Штейнгауза [9-11]. В результате получаем ранжированный список из n альтернатив по k_j -му показателю качества и n_j -ой ситуации неопределенности.

Аналогичным образом проводим парное сравнение альтернатив по другим показателям качества и ситуациям неопределенности и, в частности, описываемых выражениями (6) и (7).

Для обеспечения достоверности результатов возникает необходимость решения также таких задач: количественной оценки степени согласованности множества экспертных оценок; определения достаточности степени согласования этого множества; вычисления агрегированной согласованной экспертной оценки. Решение таких задач, в свою очередь, вызывает необходимость учета относительной компетентности экспертов. В частности, для определения агрегированной оценки вероятности P_j появления v -ой ситуации неопределенности используем выражение

$$P_j = \sum_{t=1}^v \alpha_t P_{jt},$$

где P_{jt} – вероятность появления j -ой ситуации неопределенности по мнению t -го эксперта;

α_t – нормированный коэффициент относительной компетентности t -го эксперта.

Коэффициенты компетентности должны удовлетворять условию

$$\sum_{t=1}^v \alpha_t = 1.$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Петров, К.Э. Компараторная структурно-параметрическая идентификация моделей скалярного многофакторного оценивания / К.Э. Петров, В.В. Крючковский. - Херсон : Олди-плюс, 2009. - 294 с.
- 2 Саати, Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати. - М.: Радио и связь, 1993. - 278 с.
- 3 R. Shank. Dynamic Memory: A Theory of Learning

REFERENCES

- 1 K.E. Petrov, V.V. Kryuchkovskiy. Comparator based structure and parameter identification of models of scalar multivariate estimation [Komparatornaya strukturno-parametricheskaya identifikatsiya modeley skalyarnogo mnogofaktornogo otsenivaniya]. Kherson. Oldi-plyus Publ. 2009. 294 p.
- 2 Thomas L. Saaty. Decision Making. The Analytic Hierarchy Process [Prinyatie resheniy. Metod analiza ierarkhiy]. Radio and com-

in Computers and People / R.Shank. -New York: Cambridge University Press. 1982.

4 Гнатиенко, Г.М. Экспертные технологии принятия решений / Г.М. Гнатиенко, В.Е. Снитюк. -Киев: Маклаут, 2008. -444 с.

5 Снитюк, В.Е. Прогнозирование. Модели. Методы. Алгоритмы / В.Е. Снитюк. -Киев: Маклаут, 2008. -364 с.

6 Тоценко, В.Г. Методы и системы поддержки принятия решений: Алгоритмический аспект / В.Г. Тоценко. -Киев: Наукова думка, 2002. -382 с.

7 Экенроде, Р.Т. Взвешенные многомерные критерии / Р.Т. Экенроде // -Статистические измерения качественных характеристик: сб.тр. -М.: Статистика, 1972. -С. 139-154.

8 Саати, Т. Аналитическое планирование. Организация систем / Т. Саати, К. Кернс. -М.: Радио и связь, 1991. -223 с.

munications [Radio i svyaz']. Moscow. 1993. 278 p.

3 R. Shank. Dynamic Memory: A Theory of Learning in Computers and People. New York. Cambridge University Press. 1982.

4 G.M. Gnatienco, V.E. Snityuk. [Ekspertnye tekhnologii prinyatiya resheniy]. Kiev. Maklout Publ. 2008. 444 p.

5 V.E. Snityuk. Prognozirovanie. Modeli. Metody. Algoritmy. Kiev. Maklout Publ. 2008. 364 p.

6 V.G. Totsenko. Methods and systems of decision making support: algorithmic aspect [Metody i sistemy podderzhki prinyatiya resheniy: Algoritmicheskiy aspekt]. Kiev. Naukova dumka Publ. 2002. 382 p.

7 Robert T. Eckenrode. Weighted multiple criteria [Vzveshennye mnogomernye kriterii]. Statistical measures of inherent specifications [Statisticheskie izmereniya kachestvennykh kharakteristik]. Moscow. Statistika Publ. 1972. pp. 139-154.

8 Thomas L. Saaty, Kevin P. Kearns. Analytical Planning: The Organization of Systems [Analitycheskoe planirovanie. Organizatsiya system]. Moscow. Radio i svyaz' Publ. 1991. 223 p.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: интроспективное оценивание, альтернатива обучения, анализ исследований

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ: Халилов Али Ринатович, аспирант ФГБОУ ВО «КГМТУ»

Доровской Владимир Алексеевич, докт. техн. наук, профессор ФГБОУ ВО «КГМТУ»
298309, г.Керчь, ул.Орджоникидзе, 82, ФГБОУ ВО «КГМТУ»

ПОЧТОВЫЙ АДРЕС:

ВОПРОСЫ РАЗРАБОТКИ ТРЕНАЖЕРОВ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ СУДОВЫХ МЕХАНИКОВ

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»

В.И. Осипов

ISSUES OF MARINE ENGINE ROOM SIMULATORS DEVELOPMENT

Siberian State University of Water Transport (SSUWT) 33, Schetinkina St., Novosibirsk, 630099, Russia

Viktor I. Osipov (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of SSUWT)

ABSTRACT: The article considers a variation of the visual training engine room simulator for marine engineer students.

Keywords: simulator, emulation, engine, training

Рассматривается вариант наглядного учебного тренажера для обучения студентов судовых механиков.

На качество эксплуатации двигателей внутреннего сгорания (ДВС), повышение ресурса их работы в большой степени влияет квалификация специалистов, обслуживающих эти двигатели, которая зависит от уровня постановки процесса обучения или переподготовки.

В последнее время в процесс обучения все больше внедряются компьютерные программы, которые в какой-то мере облегчают усвоение теоретического материала и, естественно, системы приближенные к практике. В этом плане наилучшим вариантом являются системы, использующие реальные ДВС с компьютерной обработкой результатов, позволяющих связать действия оператора с усвоением сущности процессов, протекающих в двигателе. Однако практика показывает, что совмещать судовой двигатель с компьютерной системой обработки весьма сложно. Главное здесь то, что проводить занятия вблизи работающего судового ДВС малоэффективно из-за очень высокого уровня шума и стесненных условий.

Сказанное означает, что следует идти по пути создания систем имитации двигателей, по возможности максимально приближенных к реальности.

Данная статья призвана реализовать попытку первого приближения такой системы. Главной целью является, в доступной степени, оптимизировать процесс восприятия, избавить обучаемого от множества формальных параметров, которые, как правило, быстро забываются и не создают качественной картины протекаемых процессов.

Особенно важно на начальном этапе изучения ДВС, как впрочем, и других устройств понять и «почувствовать» машину.

Я.А. Коменский считал обучение наглядным, если предмет усвоения был представлен в чувственной форме. Только после ознакомления с предметом изучения следует давать ему

объяснение. Он выдвинул «золотое для учащихся правило: всё должно быть представлено внешним чувствам, насколько это возможно, именно: видимое – зрению, слышимое – слуху, обоняемое – обонянию, вкушаемое – вкусу, осязаемое – осязанию, если же что-нибудь может быть одновременно воспринято несколькими чувствами, то и представлять этот предмет одновременно несколькими чувствами» [1].

Подводя итог сказанному можно сделать вывод о том, что на первом этапе обучения следует представить качественную (не количественную) картину процессов. Более конкретно ставилась цель сравнительно простыми и дешевыми средствами создать в сознании обучающихся модель процессов в работающем двигателе, которая впоследствии позволит связывать усваиваемый теоретический материал со сформированными представлениями. С учетом ограниченных возможностей построения такой модели и предполагая, что на начальном этапе учащиеся плохо представляют принцип работы ДВС, выбраны следующие функции модели:

- имитировать процесс запуска двигателя, сопровождая его характерными звуками (шумами);
- имитировать разгон двигателя до максимальных оборотов, формируя представление о скорости вращения вала и сопутствующих шумах;
- для понимания рабочих процессов в цилиндрах ДВС выводить на экран дисплея ЭВМ зависимость давления газов от угла поворота вала (индикаторную диаграмму);
- на выводимой диаграмме, достаточно похожей на реальную должны быть и реальные значения параметров;
- имитатор диаграммы должен обеспечить изменение ее вида в зависимости от изменения угла впрыска топлива, а также от изменения числа оборотов, наличия (отсутствия) наддува и неисправности форсунки.

На рисунке 1 представлена структурная схема разработанного на кафедре СДВС СГУВТ экземпляра тренажера, а на рисунке 2 – блок управления тренажером.

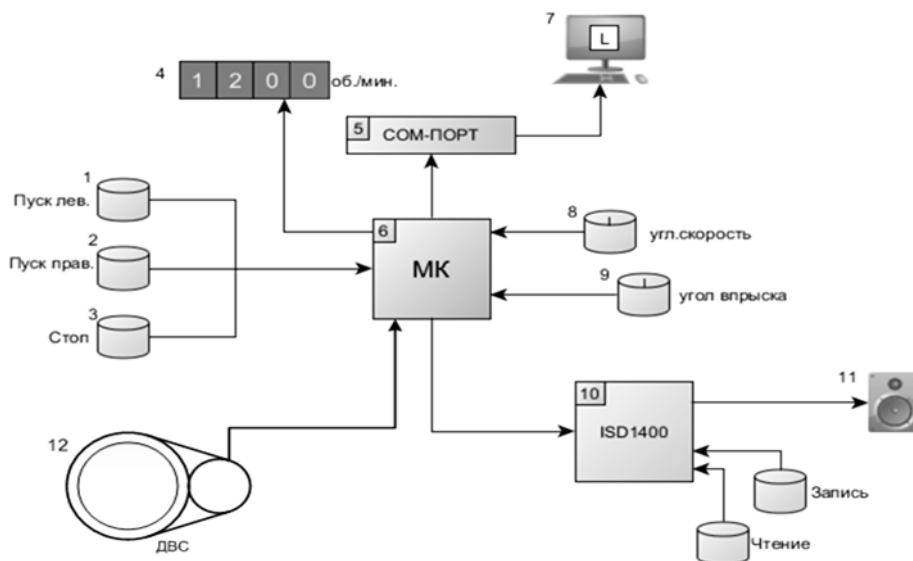


Рисунок 1 – Структура тренажера (сокращенно)

На структуре (рисунок 1) центральным компонентом является микроконтроллер МК, в данном случае ATmega 16, который выполняет следующие функции:

- прием логических сигналов от органов управления – кнопок пуска и останова, а также регуляторов угловой скорости имитатора вращения вала двигателя (позиция 2,4 на рисунке 2);
- цифровой индикатор указания частоты вращения вала (позиция 3 на рисунке 2);
- формирования посылки средствами встроенного устройства USART (приемопередатчика) и формирователя сигналов стандартного COM (RS-232) интерфейса для связи с внешним компьютером, например, ноутбуком;
- системой звукового сопровождения, выполненного на базе микросхемы ISD 1400, позволяющем записывать и воспроизводить звуковые фонограммы в аналоговой форме. По-

зиции 9 и 10 на рисунке 2 – переключатели режимов записи и воспроизведения в автономном режиме. Позиции 11 и 12 – регуляторы громкости и динамик;

– цифрой 11 на рисунке 1 помечена звуковая колонка;

– имитатор вращения вала реализован на мини электродвигателе постоянного тока с маломощным ШИМ регулятором (позиция 12 на рисунке 1), имитатор вращения вала – позиция 5 на рисунке 2.

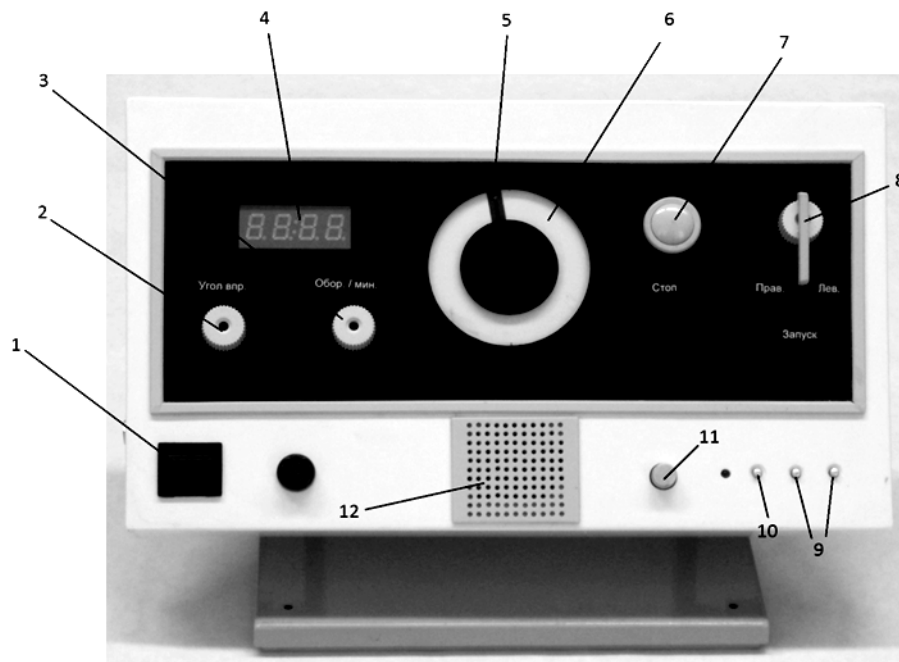


Рисунок 2 – Блок управления тренажером

При повороте ключа «Пуск» правого или левого вращения происходит постепенный разгон «двигателя», сопровождаемого звуками реального ДВС, записанными ранее. Разгон продолжается до установленного значения с помощью регулятора (позиция 3)

Цифровой указатель оборотов (позиция 4) получает информацию от установленного на валу диска с 128 отверстиями и оптического датчика.

На этом же диске установлен вращающийся светодиод, вспышки которого происходят соответственно установленному регулятором угла опережения значению (стробоскоп).

Работа ДВС сопровождается характерным шумом. Вместе с тем имеется возможность включать посторонние шумы (стуки), характерные при типовых неисправностях. К сожалению, пока источники таких звуков в достаточной мере не найдены.

Как уже указывалось, блок управления связан с компьютером, основная функция которого – обработка полученных данных и вывод на экран эмулированной индикаторной диаграммы, вид которой отображает основные процессы рабочего цикла двигателя. На рисунке 3 показан интерфейс программы эмуляции индикаторной диаграммы.

Приведенная на рисунке 3 индикаторная диаграмма выводится на фоне диаграммы чистого сжатия (без впрыска топлива), которая строится по аппроксимирующему выражению

$$P = 10 \left[1 + \sin \left(\frac{F - 90}{57} \right) \right]^4,$$

где F – угол поворота вала, град;

P – давление в цилиндре, МПа.

Индикаторная диаграмма строится из двух частей. Участок, соответствующий углу от нижней мертвой точки до момента впрыска соответствует, естественно, диаграмме чистого сжатия. Для углов более угла впрыска – строится по аппроксимирующей формуле

$$P = 10 \left[1 + \sin \left(\frac{F - 90}{57} \right) \right]^4 - (M + 10) \exp \left(\frac{F - F_{оп}}{50} \right) \left[1 - \exp \left(\frac{-F - F_{оп}}{50} \right) \right],$$

где $F_{оп}$ – угол впрыска, получаемый из блока управления.

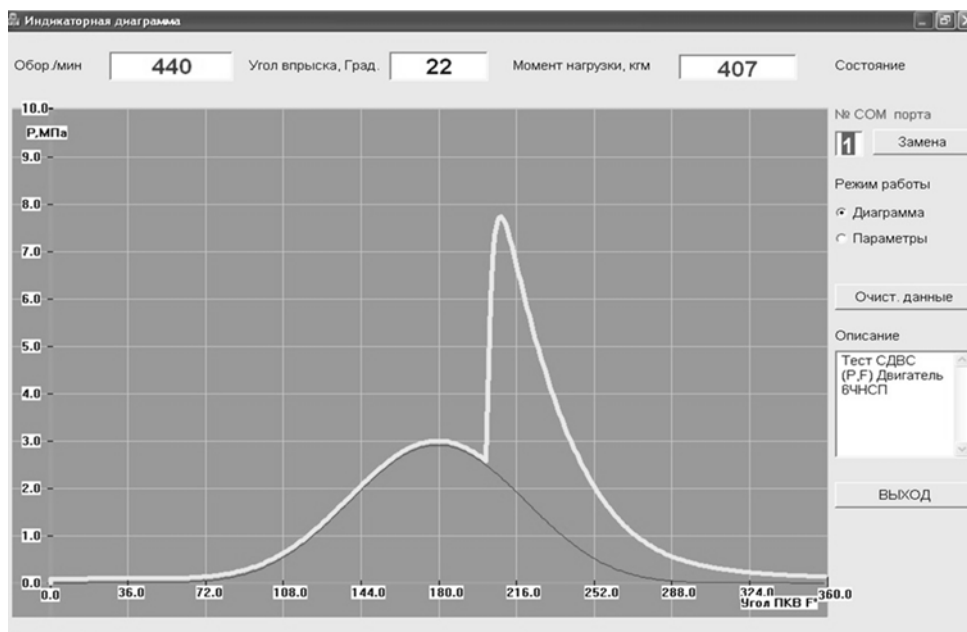


Рисунок 3 – Интерфейс программы обработки

В заключение следует отметить, что описанная система далека от совершенства и требует дополнительных усилий в плане расширения функциональных возможностей и приближения ее работы к реальной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Коменский, Я. Великая дидактика / Я. Коменский. -М.: Наркомпрос, 1939. -318 с.

REFERENCES

1 Ya. Komenskiy. The Great Didactics [Velikaya didaktika]. Moscow. Narkompros Publ. 1939. 318 p.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: тренажер, эмуляция, двигатель, обучение
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ: Осипов Виктор Иванович, канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «СГУВТ»
ПОЧТОВЫЙ АДРЕС: 630099, г.Новосибирск, ул.Щетинкина, 33, ФГБОУ ВО «СГУВТ»

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СИСТЕМЕ ТРАНСПОРТНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

АНОО ВО Центросоюза РФ «Сибирский университет потребительской кооперации»
 ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»

Н.Б. Тесля, Б.В. Малозёмов, К.Ч. Акберов

INFORMATION TECHNOLOGIES IN THE SYSTEM OF TRANSPORTATION RELATED EDUCATION

Siberian University of Consumer Cooperation (SUCC) 26, Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630076, Russia
 Novosibirsk State Technical University (NSTU) 20, Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630092, Russia

Natal'ya B. Teslya (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of SUCC)

Boris V. Malozemov (Ph.D. of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of NSTU)

Kamal Ch. Akberov (Ph.D. of Economic Sciences, Assoc. Prof. of SUCC)

ABSTRACT: For the purpose of creating e-learning materials and online courses in the system of transport related education, various kinds of information technologies have been analyzed. The authors revealed a trend of using computer technology in active learning and created a list of the most effective technologies. The authors proposed an educational e-learning shell "VinEx", which can be used as an automated control and training system both at the levels of secondary and higher educational institutions in transport related education.

Keywords: technologies, information technologies, e-learning, learning module, transport related education

Проанализированы различные информационные технологии для создания электронных учебных материалов и онлайн-курсов в системе транспортного образования. Выявлена тенденция развития технологий для активного обучения с использованием компьютерной техники. Сформирован перечень наиболее эффективных технологий. Предложена авторская оболочка «VinEx», обладающая возможностью применения в качестве единой автоматизированной контролирующе-обучающей системы уровня среднего и высшего учебного заведения в транспортном образовании.

Основным элементом современной информационной образовательной среды в транспортном образовании, как комплексном и разнонаправленном [1], является компьютерный учебный модуль, в качестве которого могут выступать: компьютерный учебник, тренажер, лабораторный практикум, тестирующая программа и другие компьютерные средства обучения [2].

Основой для создания компьютерного учебного модуля является авторская монография [1], то есть специализированное издание, содержащее структурированное доступное изложение учебных знаний в предметной области.

Методы исследования. Предлагается использовать когнитивные технологии, которые снижают трудозатраты на рутинную офисную работу по обработке документов, публикаций, отчетов, деклараций и т.д. Таким образом, возможно, предельно автоматизировать практически любую работу, связанную с обработкой информации.

Результаты исследования. Компьютерный учебник должен содержать не только изложение теории, но и демонстрационные примеры её практического использования [3]. Представление информации в компьютерном учебнике должно быть максимально наглядным, для этого применяется весь спектр современных мультимедийных технологий: изображения, графики, анимация, видео и аудиозаписи и др.

Компьютерный учебник должен содержать задачи для самостоятельного решения с методическими указаниями, вопросы для самоконтроля, предметный указатель, список литературы.

В компьютерный учебник должны быть включены различные виды контроля знаний (экзамен по всему курсу, контрольные работы по каждой главе, проверочные работы по каждому параграфу и т.д.).

Конструирование компьютерного учебного модуля включает в себя два обязательных этапа: разработку программной среды (оболочки), в которой будет реализован учебник, и наполнение компьютерного учебника информацией. Оболочка включает в себя информационную базу в виде базы данных, средства преподавателя, т.е. инструменты для наполнения оболочки предметным содержанием курса, и средства обучаемого, реализующие интерфейс студента к учебному модулю.

Сетевые и Интернет-учебники могут содержать также серверное приложение для организации взаимодействия клиентских программных средств.

Процесс создания оболочки включает в себя [5]:

- определение формы программной реализации компьютерного учебника и выбор технологии реализации;
- разработку открытой, зачастую, модульной программной структуры учебника;
- проектирование интерфейса и навигации в программных средствах;
- дизайн клиентских программных средств;
- разработку стандартных модулей (регистрация, авторизация, тестирование, работа с информационной базой и т.п.);
- создание системы помощи по работе с учебником.

Процесс наполнения компьютерного учебника включает в себя [2]:

- сканирование и форматирование текстовых данных;
- разработку мультимедийных материалов;
- разработку валидных тестовых заданий;
- разработку сценария обучения;
- создание нестандартных обучающих или тестирующих модулей.

Для стандартной оболочки характерно представление учебного материала в виде структурированной совокупности блоков теории и соответствующих тестов, по которым обучающийся может осуществлять навигацию произвольным образом.

Более продвинутый подход базируется на представлении процесса обучения как последовательности операций, результатом выполнения которой является достижение определенного уровня знаний.

Выделяют следующие уровни знаний (этапы обучения), для каждого из которых строится отдельная семантическая модель.

Этап овладения информацией описывается структурной моделью. Считается, что обучаемый достиг уровня овладения информацией, если он способен:

- указать место информационного фрагмента в учебной дисциплине;
- формулировать основные положения информационного фрагмента;
- отвечать на вопросы, связанные с содержанием информационного фрагмента;
- находить нужную информацию.

Этап выработки понимания описывается понятийно-сущностной моделью. Считается, что обучаемый достиг уровня выработки понимания, если он:

- знает связи между отдельными фрагментами информации (теоремами, определениями, алгоритмами и т.д.);
- может ответить на вопросы: «Почему?», «Откуда следует?»;
- дать характеристику свойств понятий.

Этап выработки умения описывается проблемно-алгоритмической моделью. Считается, что обучаемый достиг уровня выработки умения использовать информацию, если он в состоянии:

- идентифицировать задачу;
- записать порядок её решения;
- выполнить задание.

Этап выработки навыка описывается алгоритмической моделью. Считается, что обучаемый достиг уровня выработки навыка использовать информацию, если он способен:

- выполнять задания за заданное время;
- сводить нетиповые задачи к типовым задачам с последующим их решением.

Обсуждение. Компьютерный учебник, реализованный по такой схеме, содержит отдельные модули для каждого этапа обучения: теоретико-справочный модуль, вопросно-разъяснительный модуль, модуль упражнений, модуль с контролем итогового ответа.

Заданный порядок обучения и представления информации не запрещает возможности произвольного доступа к различным фрагментам компьютерного учебника. Рассмотрим алгоритм построения фреймовой структурной модели учебной дисциплины.

- Определить структуру учебного материала в данной дисциплине (разбиение на разделы, главы, параграфы и т.п.).
- Составить оглавление учебного курса в соответствии с принятой структурой.
- Записать названия фреймов информационных фрагментов в соответствии с оглавлением.
- Заполнить описания фреймов.
- Сформировать директивные фреймы и терминальные тексты.

Оболочка компьютерного учебника может содержать средства автоматизации построения фреймов структурной модели. Понятийно-сущностная модель формируется на основе связанной совокупности понятий и теорем учебной дисциплины.

Проблемно-алгоритмическая модель содержит классы типовых задач в совокупности с методами их решения. Алгоритмическая модель включает конкретные задания и алгоритмы их выполнения.

Конкретный вид этих моделей зависит от программной реализации оболочки компьютерного учебника. Как правило, эти модели реализуются в виде набора соответствующих элементов базы знаний и базы данных.

Основным элементом современной информационной образовательной среды является компьютерный учебный модуль, в качестве которого могут выступать компьютерный учебник, тренажер, лабораторный практикум, тестирующая программа и другие компьютерные средства обучения.

После анализа существующих программных пакетов, можно сделать вывод, что часть несложных проектов (курсы, электронные учебные материалы, презентации, опросы и автоматическое оформление библиографий и цитат) можно сделать с помощью 9 инструментов для создания учебных материалов (таблица 1).

Проанализировав достоинства и недостатки инструментов для создания учебных материалов, авторами была разработана автоматизированная интерактивная контролирующе-обучающая система «VinEx 3.06» предназначена для создания электронных учебников, тестов, симуляций, тренингов, а также для осуществления с их помощью интерактивного обучения и проверки знаний учащихся, в том числе и для систем транспортного образования [3].

TRANSPORT EDUCATION

Таблица 1 – Инструменты для создания учебных материалов

Сайт	Определение	Назначение
CourseLab	Мощное и одновременно простое в использовании средство для создания интерактивных учебных материалов (электронных курсов), предназначенных для использования в сети Интернет, в системах дистанционного обучения, на компакт-диске или любом другом носителе [3]	Можно создавать и редактировать учебный материал в среде WYSIWYG, не требующей знания языков программирования [1]
Smart Builder	Сервис, позволяющий создавать собственные электронные образовательные курсы, не обладая навыками программирования, использовать различные медиа, игровые элементы и т.д. [4]	Библиотека Smart Builder содержит «множество элементов от мультимедиа объектов до шаблонов страниц» [1]
Vyew	Виртуальный конференц-зал или переговорная комната [5]	Позволяет создавать онлайн-презентацию перед сотней людей или опубликовать документ для коллективного обсуждения и редактирования
Writing House	Сервис, который позволит вам автоматически создавать библиографию и оформлять цитирование в основных стандартах – MLA, APA, Chicago или Harvard [6]	Позволяет оформлять библиографию быстро, просто, бесплатно и что экономит временные затраты
MOS_Solo	Простой, но функциональный инструмент, который практически не требует обучения, но представляет множество возможностей в создании мультимедийного образовательного контента [7]	Позволяет конструировать динамические интерактивные графические электронные курсы, викторины, опросы и демонстрации
Izuui	Сервис для создания образовательных каналов на Facebook [8]	Новая версия сервиса в настоящий момент находится в разработке
Easy-generator	Сервис объединяет в себе простоту использования с мощностью и функциональностью [9]	Можно создать множество разнообразных проектов и опубликовать их в Интернете или импортировать в Power Point
Zenler	Один из самых мощных сервисов для создания образовательного контента (электронные курсы, которые будут работать где угодно, включая iPad, iPhone, Android [10])	Можно создавать курсы на основе ваших презентаций и материалов в PowerPoint, записывать видео с экрана, добавлять аудио и многое другое
Lesson Writer	Сервис для создания комплексных уроков по английскому языку [11]	Можно быстро и легко превратить любую статью в раздаточный материал, содержащий необходимые вопросы и задания

Закключение. Онлайн-образование становится основным форматом для транспортной системы образования, при этом удобнее получать знания в любое время и в любом месте, иметь доступ к учебным материалам на любых IT-устройствах. В таблице 1 проанализирована подборка инструментов для создания онлайн-курсов и образовательного контента, благодаря которым возможно легко сделать электронные версии имеющихся в наличии работ и материалов. На основе проведенного анализа синтезирована оболочка «VinEx», которая обладает возможностями работы в локальной вычислительной сети, поэтому может применяться в качестве единой автоматизированной контролирующе-обучающей системы уровня учебного заведения, а также для индивидуальной работы на учебных местах в системе транспортного образования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Малозёмов, Б.В. Информационные технологии в образовании / М.К. Черняков, К.Ч. Акберов, Б.В. Малозёмов, М.М. Чернякова, Б.Х. Мамедли; Под ред. Б.В. Малозёмова. -Новосибирск: Изд-во Новосиб. гос. техн. ун-в., 2018. -128 с.
- 2 Черняков, М.К. Методология создания компьютерных учебников / М.К. Черняков. -Новосибирск: Изд-во Сиб.

REFERENCES

- 1 M.K. Chernyakov, K.Ch. Akberov, B.V. Malozemov, M.M. Chernyakova, B.Kh. Mamedli. Information technology in education [Informatsionnye tekhnologii v obrazovanii]. Novosibirsk. Novosibirsk St. Techn. Univ. Publ. 2018. 128 p.
- 2 M.K. Chernyakov. Methodology for creating computer tutorials [Metodologiya sozdaniya komp'yuternykh uchebnikov]. Novosibirsk. Siberia Univ. of Consumer Coop. Publ. 2013. 136 p.

унив. потреб. кооп., 2013. -136 с.

3 Все, что нужно для удержания внимания даже самых занятых слушателей. -Режим доступа: <https://www.courselab.ru>. -06.05.2018 г.

4 We make glass software easy like no one else can. -Режим доступа: <https://smart-builder.com>. -06.01.2018 г.

5 Черняков, М.К. Управление в сфере образовательных услуг при помощи инновационных технологий / М.К. Черняков, М.М. Чернякова, В.В. Степанов. -Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/63EVN516.pdf>. -06.05.2018 г.

3 Everything you need to keep the attention of even the busiest listeners [Vse, chto nuzhno dlya uderzhaniya vnimaniya dazhe samykh zanyatykh slushateley]. URL: <https://www.courselab.ru>. -06 May 2018.

4 We make glass software easy like no one else can. URL: <https://smart-builder.com>. -06 Jun 2018.

5 M.K. Chernyakov, M.M. Chernyakova, V.V. Stepanov. Management in the field of educational services by means of innovative technologies [Upravlenie v sfere obrazovatel'nykh uslug pri pomoshchi innovatsionnykh tekhnologiy]. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/63EVN516.pdf>. -06 May 2018.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *технологии, информационные технологии, электронные учебники, учебный модуль, транспортное образование*

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ: *Тесля Наталья Борисовна, канд. техн. наук, доцент Сибирский университет потребительской кооперации (СибУПК)*

Малозёмов Борис Витальевич, канд. техн. наук, доцент НГТУ

Акберов Камал Чолуевич, канд. экон. наук, доцент Сибирский университет потребительской кооперации (СибУПК)

ПОЧТОВЫЙ АДРЕС: *630076, г.Новосибирск, пр.К.Маркса, 26, Сибирский университет потребительской кооперации (СибУПК)*

630092, г.Новосибирск, пр.К.Маркса, 20, НГТУ

CONTENTS

ЭКСПЛУАТАЦИЯ И ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА

Зачёсов А.В., Дерябина И.С. РЕГИОНАЛЬНАЯ ЦЕЛЕВАЯ ПРОГРАММА РАЗВИТИЯ РЕЧНОГО ТРАНСПОРТА СИБИРИ.....	5
Сахнов Д.Ю. ЗАДАЧИ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА ОРГАНИЗАЦИИ ЗАВОЗА ГРУЗОВ В ЗОНЫ ЗАПОЛЯРЬЯ.....	7
Гришкова Д.Ю., Тесленко И.О. ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ОПЕРАЦИЙ НА ОБЪЕКТАХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА.....	11
Масленников С.Н., Масленникова Е.А. ЭФФЕКТИВНОСТЬ АУТСОРСИНГА ЛОГИСТИЧЕСКИХ ИЗДЕРЖЕК.....	14
Базылев К.Ю., Корягин М.Е., Катаргин В.Н. РАВНОВЕСНАЯ ЦЕНА АВТОМОБИЛЯ В УСЛОВИЯХ КОНКУРЕНЦИИ ЗА ПОТРЕБИТЕЛЯ.....	16
Корягин М.Е., Березина А.С. МОДЕЛИРОВАНИЕ МАРШРУТНОЙ СЕТИ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ГОРОДА С МАНХЭТТЕНСКОЙ МЕТРИКОЙ.....	21
Синицын М.Г., Седунова М.В., Ноздрачёва Н.В. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ НА РЕЧНОМ ТРАНСПОРТЕ.....	25
Гюнтер А.В., Кадникова Е.С., Никифоров В.С. ИТОГИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РЕЧНЫХ ПЕРЕВОЗОВ В ЗАПАДНОЙ СИБИРИ.....	28
Шавыраа Ч.Д., Куулар О.О. ВЫБОР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И ТЕКУЩЕГО РЕМОНТА АВТОБУСОВ г.КЫЗЫЛ.....	31

TRANSPORT OPERATION AND ECONOMICS

A.V. Zachyesov, I.S. Deryabina DEVELOPMENT OF RIVER TRANSPORT OF SIBERIA REGIONAL GRANT PROGRAMME.....	5
D.Yu. Sakhnov ISSUES OF THE SYSTEM APPROACH TO ORGANIZATION OF CARGO TRAFFIC TO THE POLAR REGIONS.....	7
D.Yu. Grishkova, I.O. Teslenko WORKFLOW OPTIMIZATION IN RAIL TRANSPORT STRUCTURES.....	11
S.N. Maslennikov, E.A. Maslennikova THE EFFICIENCY OF LOGISTICS OUTSOURCING.....	14
K.Yu. Bazylev, M.E. Koryagin, V.N. Katargin EQUILIBRIUM VEHICLE PRICE IN COMPETITIVE ENVIRONMENT FOR THE COSTUMER LOYALTY.....	16
M.E. Koryagin, A.S. Berezhina SIMULATION OF THE ROUTE NETWORK OF THE RECTANGULAR CITY WITH TAXICAB GOMETRY.....	21
M.G. Sinitsyn, M.V. Sedunova, N.V. Nozdracheva INTELLIGENT RIVER TRANSPORT SYSTEMS.....	25
A.V. Gyunter, E.S. Kadnikova, V.S. Nikiforov OUTCOMES AND FUTURE PROSPECTS OF RIVER TRANSPORTATION IN WEST SIBERIA.....	28
Ch.D. Shavyraa, O.O. Kuular SELECTION OF ENGINEERING SOLUTIONS FOR CURRENT REPAIR AND MAINTAINANCE OF BUSES IN KYZYL.....	31

ПУТЬ. ПУТЕВОЕ ХОЗЯЙСТВО

Бик Ю.И., Дегтярева В.В. НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ВИСЯЧИХ МОСТОВ.....	36
Фомичева Н.Н. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ НАГРУЗКИ И ВОЗРАСТА БЕТОНА НА ЕГО ДЕФОРМАТИВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ.....	39
Шавыраа Ч.Д., Саая С.Ш. СНИЖЕНИЕ АВАРИЙНОСТИ ОТ СТОЛКНОВЕНИЙ С ЖИВОТНЫМИ НА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГАХ.....	42
Григорьев Е.М. ВАРИАНТ АЛГОРИТМА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГРАФИКА УРОВНЯ ВОДЫ НА МАЛЫХ РЕКАХ.....	46
Величко Д.В., Антерейкин Е.С. ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ГЕОТЕКСТИЛЯ.....	48
Пахомова Л.В., Шарутин В.А. ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ПОРТАЛЬНЫХ КРАНОВ ПО КРИТЕРИЯМ БЕЗОПАСНОСТИ РАСЧЕТНЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ.....	52
Самшорина А.А. ПАВОДКОВЫЕ ПОДТОПЛЕНИЯ НА РЕКЕ КАТУНЬ.....	54
Сорокин Е.М., Ворошилова М.И. ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ НОВОСИБИРСКОГО АКВАПАРКА.....	56
Григорьев Е.М. ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ И РУСЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЗОНЕ ВЫКЛИНИВАНИЯ ПОДПОРА НОВОСИБИРСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА.....	58

INFRASTRUCTURE OF TRANSPORT ROUTES

Yu.I. Bik, V.V. Degtyareva SOME FEATURES OF SUSPENSION BRIDGES.....	36
N.N. Fomicheva IMPACT OF AMBIENT TEMPERATURE AND CONCRETE AGE ON ITS STRESS-STRAIN BEHAVIOUR.....	39
Ch.D. Shavyraa, S.Sh. Saaya REDUCING THE RISK OF ANIMAL-VEHICLE COLLISIONS.....	42
E.M. Grigor'ev MINOR RIVERS WATER LEVEL GRAPH FORECASTING ALGORITHM.....	46
D.V. Velichko, E.S. Antereykin ASSESSMENT OF OPERATIONAL PROPERTIES OF GEOTEXTILES.....	48
L.V. Pakhomova, V.A. Sharutina ASSESSMENT OF THE RESIDUAL RESOURCE OF PORTAL CRANES BY THE SAFETY STANDARDS FOR ESTIMATED METAL STRUCTURES.....	52
A.A. Samshorina MINOR FLOODING ON THE KATUN RIVER.....	54
E.M. Sorokin, M.I. Voroshilova HYDRAULICS OF NOVOSIBIRSK WATER PARK.....	56
E.M. Grigor'ev HYDROLOGICAL MODE AND RIVERBED EVOLUTION IN TRANSIENT REGION OF THE NOVOSIBIRSK RESERVOIR.....	58

СОДЕРЖАНИЕ

СУДОВОЖДЕНИЕ

Кац В.А., Комаровский Ю.А. ХАРАКТЕРИСТИКИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПУТЕВОГО УГЛА НЕПОДВИЖНОГО GPS- ПРИЁМНИКА J-NAV500 В АВТОНОМНОМ РЕЖИМЕ ЕГО РАБОТЫ.....	61
Комаровский Ю.А. ВАРИАБЕЛЬНОСТЬ КООРДИНАТ НЕПОДВИЖНОГО СУДОВОГО ГЛОНАСС/GPS ПРИЁМНИКА БРИЗ КМ-К.....	64
Сичкарев В.И. УЧЁТ СТАТИСТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ ДЛИН И ПЕРИОДОВ ВЕТРОВЫХ ВОЛН ДЛЯ РЕЗОНАНСНЫХ ЗАДАЧ КАЧКИ СУДНА	68
Черный С.Г., Горячев И.С., Будник В.Ю. МОДЕЛИ ОПТИМАЛЬНОГО ТРАНСПОРТНОГО ПУТИ В АКВАТОРИИ КЕРЧЕНСКОГО ПРОЛИВА	73
Черепанов Ю.Н. НЕОБХОДИМЫЕ УСЛОВИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПЛАВАНИЯ МАЛОМЕРНЫХ ГЛИССИРУЮЩИХ СУДОВ НА ВНУТРЕННИХ ВОДНЫХ ПУТЯХ	77

MANAGEMENT AND MAINTENANCE OF MEANS OF TRANSPORT

V.A. Katz, Yu.A. Komarovskiy CHARACTERISTICS OF COURSE OVER GROUND DISTRIBUTION OF THE STATIONARY GPS-RECEIVER J-NAV500 IN STANDALONE OPERATING MODE	61
Yu.A. Komarovskiy VARIABILITY OF THE COORDINATES OF STATIONARY MARINE GLONASS/GPS "БРИЗ КМ-К" RECEIVER	64
V.I. Sichkarev CONSIDERATION OF STATISTICAL RELATIONSHIP OF WIND WAVE LENGTHS AND PERIODS FOR SOLVING THE ISSUES OF SHIP ROLL RESONANCE	68
S.G. Chernyy, I.S. Goryachev, V.Yu. Budnik OPTIMAL WATERWAY MODELS IN THE KERCH STRAIT	73
Yu.N. Cherepanov REQUIRED SAFETY CONDITIONS FOR SMALL PLANING VESSELS ON THE INLAND WATERWAYS	77

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

Кича Г.П., Надежкин А.В., Семенюк Л.А. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДВУХКОНТУРНОЙ СИСТЕМЫ КОМБИНИРОВАННОЙ ОЧИСТКИ МОТОРНОГО МАСЛА В СУДОВЫХ ТРОНКОВЫХ ДИЗЕЛЯХ	82
Кича Г.П., Тарасов М.И., Семенюк Л.А. ВЛИЯНИЕ УГАРА МАСЛА, КАЧЕСТВА ПРИМЕНЯЕМЫХ ГОРЮЧЕ-СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ФОРСИРОВКИ ДИЗЕЛЯ НА ЕГО ИЗНАШИВАНИЕ	88
Горлова Н.Н. ЗАВИСИМОСТЬ СТЕПЕНИ ОЧИСТКИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ ОТ ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И КОРРОЗИОННЫХ СВОЙСТВ ПОРИСТЫХ ПРОНИЦАЕМЫХ КАТАЛИТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ	94
Токарев А.О., Кузьмин В.И., Федотова Е.С., Светлолов Н.Е., Холопова В.А., Яценко К.Ю. ОЦЕНКА СТОЙКОСТИ ПЛАЗМЕННО НАПЫЛЕННЫХ ПОКРЫТИЙ К КОНТАКТНО- ИМПУЛЬСНОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ.....	97
Барановский А.М., Викулов С.В. ЗВУКОПОГЛОЩЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ	102
Кукис В.С., Омельченко Е.А., Щербак О.В. ВЛИЯНИЕ УТИЛИЗАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ КОГЕНЕРАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ С ПОРШНЕВЫМ ДВИГАТЕЛЕМ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ НА ЕЁ ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ	105
Кукис В.С., Омельченко Е.А., Щербак О.В. ОЦЕНКА ИНДИКАТОРНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ УТИЛИЗАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ КОГЕНЕРАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ НА БАЗЕ ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ	108
Ришко Ю.И., Барановский А.М., Коновалов В.В. АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА УПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПЕНСАТОРА СИЛ ИНЕРЦИИ.....	112
Бурков С.Н., Ефремов А.М. СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ ВИБРАЦИИ СУДОВОГО ДВИГАТЕЛЯ	116
Хуснутдинов А.Н., Черепенькин И.В., Хуснутдинова Э.М. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ТРУБ В СИСТЕМЕ	

HEAT POWER INDUSTRY

G.P. Kicha, A.V. Nadezhkin, L.A. Semenyuk EFFICIENCY OF THE DOUBLE PASS COMPLEX PURIFICATION SYSTEM OF MOTOR OIL IN MARINE TRUNK DIESELS	82
G.P. Kicha, M.I. Tarasov, L.A. Semenyuk EFFECT OF OIL BURNING, QUALITY OF LUBRICATING MATERIALS AND DIESEL BOOSTING ON ITS WEAR.....	88
N.N. Gorlova DEPENDENCE OF THE MARINE DIESELS' EXHAUST GASES PURIFICATION EFFICIENCY FROM PHYSICAL CHARACTERISTICS AND CORROSION PROPERTIES OF POROUS PERMEABLE CATALYTIC MATERIALS	94
A.O. Tokarev, V.I. Kuzmin, E.S. Fedotova, N.E. Svetolobov, V.A. Kholopova, K.Yu. Yatsenko ESTIMATION OF THE STABILITY OF PLASMA SURFACE COATINGS TO MECHANICAL IMPULSE EXPOSURE.....	97
A.M. Baranovsky, S.V. Vikulov SOUND ABSORPTION BY DIFFERENT MATERIALS	102
V.S. Kukis, E.A. Omel'chenko, O.V. Shcherbakova EFFECT OF THE WASTE HEAT RECOVERY SYSTEM OF THE COGENERATION UNIT CONSISTING OF PISTON INTERNAL COMBUSTION ENGINE ON ITS ENVIRONMENTAL INDICATORS	105
V.S. Kukis, E.A. Omel'chenko, O.V. Shcherbakova EVALUATION OF INDICATORS OF THE WASTE HEAT RECOVERY SYSTEM IN THE COGENERATION UNIT BASED ON INTERNAL COMBUSTION PISTON ENGINE	108
Yu.I. Rishko, A.M. Baranovsky, V.V. Konovalov TESTING OF THE METHOD OF CALCULATING THE ELASTIC PROPERTIES OF THE INERTIA DAMPER	112
S.N. Burkov, A.M. Efremov METHODS OF REDUCING VIBRATION OF MARINE ENGINES	116
A.N. Khusnutdinov, I.V. Cherepen'kin, E.M. Khusnutdinova STUDY OF HEAT SUPPLY SYSTEM OPERATION WITH MULTILAYER	

CONTENTS

ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ.....	122	PIPES.....	122
Жуловян В.В., Рыжов И.А. СОСТАВЛЕНИЕ УРАВНЕНИЙ ДВИЖЕНИЯ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ МЕТОДОМ КОНТУРНЫХ ТОКОВ.....	124	V.V. Zhulovyan, I.A. Ryzhov DERIVATION OF THE EQUATIONS OF MOTION OF OSCILLATORY MECHANICAL SYSTEMS BY THE MESH CURRENT METHOD.....	124
Тарасов В.В., Самсонов А.И. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕГЕНЕРИРОВАННОГО МОТОРНОГО МАСЛА НА ЗАЩИТУ ДЕТАЛЕЙ УЗЛОВ ТРЕНИЯ СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ ОТ ИЗНАШИВАНИЯ.....	130	V.V. Tarasov, A.I. Samsonov MODELING OF EFFECT OF REGENERATED MOTOR OIL PARAMETERS ON WEAR PROTECTION OF THE PARTS OF FRICTION ASSEMBLIES IN MARINE DIESELS.....	130
Дрозд М.С. КАЧЕСТВЕННО-КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ВТОРИЧНЫХ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ СУДОВЫХ СРЕДНЕОБОРОТНЫХ ДИЗЕЛЕЙ.....	135	M.S. Drozd QUALITATIVE AND QUANTITATIVE ANALYSIS OF WASTE ENERGY OF MARINE MEDIUM- SPEED DIESELS.....	135
Коньков А.Ю., Трунов А.И. ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИНДИКАТОРНОГО КАНАЛА НА РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ИНДИКАТОРНОЙ ДИАГРАММЫ ДИЗЕЛЯ Д49.....	140	A.Yu. Kon'kov, A.I. Trunov NUMERICAL INVESTIGATION OF THE INDICATOR CHANNEL EFFECT ON THE RESULTS OF PROCESSING OF THE INDICATOR DIAGRAM OF THE DIESEL Д49.....	140
Мукасеев А.В. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ПОРШНЕЙ.....	143	A.V. Mukaseev ANALYSIS OF THERMAL CONDITION OF DIESEL ENGINE PISTON.....	143
Истомин С.Г., Штраухман С.Г. ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ОТОПЛЕНИЯ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА ЭЛЕКТРОПОЕЗДОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА СЕРИИ ЭД4М.....	148	S.G. Istomin, S.G. Shtraukhman ASSESSMENT OF ENERGY EFFICIENCY OF EQUIPMENT FOR HEATING AND AIR CONDITIONING OF DC SUBURBAN ELECTRIC TRAINS OF ED4M SERIES.....	148
Мукасеев А.В. ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ АЛЮМИНИЕВЫХ ПОРШНЕЙ НА ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ИХ МАТЕРИАЛЕ.....	152	A.V. Mukaseev EFFECT OF THERMAL TREATMENT OF ALUMINUM PISTONS ON THEIR RESIDUAL STRESS.....	152
Осипов В.И., Подъячев А.А., Лобес И.Е. СИНХРОНИЗАЦИЯ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ И ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ.....	156	V.I. Osipov, A.A. Pod'yachev, I.E. Lobes SYNCHRONIZATION OF CYCLES OF INTERNAL COMBUSTION ENGINE AND DIGITAL DATA PROCESSING.....	156
Зуев А.К., Ришко Ю.И., Коновалов В.В. ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ МЕХАНИЗМА НА ЖЕСТКОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ.....	159	A.K. Zuev, Y.I. Rishko, V.V. Konovalov HOW GEOMETRY OF THE MECHANISM EFFECTS ON ITS STIFFNESS PROPERTIES.....	159
Тарасов В.В. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГЛУБИНЫ ОЧИСТКИ ОТРАБОТАННЫХ МОТОРНЫХ МАСЕЛ ОТ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ В ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ОЧИСТИТЕЛЯХ ПРИ ИХ РЕГЕНЕРАЦИИ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-СТАТИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ.....	162	V.V. Tarasov DETERMINATION OF DEPTH PARAMETERS OF CLEANING MOTOR OILS FROM MECHANICAL IMPURITIES IN CENTRIFUGAL CLEANERS IN THEIR REGENERATION BASED ON THE EXPERIMENTAL STATISTICAL MODEL.....	162
Тарасов В.В., Самсонов А.И. ОЦЕНКА ПРОТИВОИЗНОСНЫХ СВОЙСТВ РЕГЕНЕРИРОВАННЫХ ОТРАБОТАННЫХ МОТОРНЫХ МАСЕЛ РАЗЛИЧНОГО КАЧЕСТВА И УРОВНЯ ОСТАТОЧНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ И РАЗМЕРА МЕХАНИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ.....	167	V.V. Tarasov, A.I. Samsonov EVALUATION OF WEAR PROOF PROPERTIES OF REGENERATED USED MOTOR OILS OF DIFFERENT QUALITY AND LEVEL OF RESIDUAL CONCENTRATION AND SIZE OF MECHANICAL IMPURITIES.....	167
Масленников А.А. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОСВЕННОГО ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА ОБМОТОК АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ГЛУБОКОВОДНОЙ УСТАНОВКИ.....	172	A.A. Maslennikov MATHEMATICAL MODEL OF INDIRECT MEASUREMENT OF THE ASYNCHRONOUS ENGINE WINDING HEATING TEMPERATURE.....	172
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА		ELECTRIC POWER INDUSTRY	
Симаков Г.М., Топовский В.В. АЛГОРИТМ ДВУХКАНАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ДЕБАЛАНСНОГО ВИБРОМОДУЛЯ С ОБЕСПЕЧЕНИЕМ СВОБОДНОГО ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ.....	176	G.M. Simakov, V.V. Topovskii ALGORITHM OF TWO-CHANNEL CONTROL OF ELECTROMECHANICAL UNBALANCED MASS VIBRATION GENERATOR WITH FREE ROTATION.....	176
Веревкин В.Ф., Неделькин М.В. ГЕЛИОЭНЕРГЕТИКА НА ВОДНОМ		V.F. Verevkin, M.V. Nedel'kin SOLAR ENERGY ENGINEERING FOR WATER	

СОДЕРЖАНИЕ

ТРАНСПОРТЕ.....	180
Шкодун П.К., Долгова А.В. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КОЛЛЕКТОРНО-ЩЕТОЧНОГО УЗЛА ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА.....	184
Секретарев Ю.А., Меняйкин Д.А. МОДЕЛЬ РАСЧЕТА УЩЕРБА ОТ ПЕРЕРЫВА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ.....	188
Калужский Д.Л., Ефимова Ю.Б., Лаппи Ф.Э., Харитонов А.С. МЕТОДИКА ВЫБОРА ГЛАВНЫХ РАЗМЕРОВ АКТИВНЫХ ЧАСТЕЙ СИНХРОННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕНИЯ ГАБАРИТОВ.....	191
Калужский Д.Л., Ефимова Ю.Б., Харитонов А.С., Куликов А.Д. УПРАВЛЕНИЕ СИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ НА БАЗЕ БЕСПАЗОВОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ.....	194
Хоутанов А.М., Васильев П.Ф., Давыдов Г.И., Кобылин В.П. ОСОБЕННОСТИ УСТОЙЧИВОЙ РАБОТЫ ГЕНЕРАТОРОВ ЧЕРЕЗ ПОЛУВОЛНОВУЮ ЛИНИЮ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ.....	197
Литвинова О.В. ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ ИЗОЛИРОВАННОГО ПРОВОДНИКА.....	201
Киснеева Л.Н., Аухадеев А.Э., Хайруллин А.Г., Рашитова Р.А. ОБЗОРНО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ГОРОДСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА.....	204
Манусов В.З., Ахъев Д.С., Бумцэнд У. СОГЛАСОВАНИЕ ЭКСПЕРТНЫХ ОЦЕНОК В ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ СРЕДНЕАРИФМЕТИЧЕСКИХ И МЕДИАННЫХ ОЦЕНОК ПО КЕМЕНИ.....	207
Манусов В.З., Бумцэнд У. ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ ПОСЛЕ ПРИСОЕДИНЕНИЯ ТЯГОВЫХ НАГРУЗОК.....	211
Манусов В.З., Орлов Д.В., Месхишвили Н.З. ДИАГНОСТИКА ТЕКУЩЕГО ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА С ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМИ СВЕРХПРОВОДЯЩИМИ ОБМОТКАМИ (ВТСП) МЕТОДОМ АНАЛИЗА ИЕРАРХИИ.....	215
Темлякова З.С., Вильбергер М.Е., Морозов П.В., Темляков А.А. АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ.....	219
Шведов Г.В., Чоршанбиев С.Р. РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО СНИЖЕНИЮ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ (НА ПРИМЕРЕ ОАО «ПЕНДЖИКЕНТСКИЕ ЭС» РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН.....	222
Черемисин В.Т., Третьяков Е.А., Головнев Г.Е., Малышева Н.Н. СТАБИЛИЗАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ПЕРСПЕКТИВНЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ.....	226

TRANSPORT	180
P.K. Shkodun, A.V. Dolgova IMPROVEMENT OF DIAGNOSIS TECHNOLOGY OF THE COLLECTOR AND BRUSH ASSEMBLY IN ROLLING STOCK TRACTION MOTORS.....	184
Yu.A. Sekretarev, D.A. Menyaikin MODEL OF DAMAGE CALCULATION FROM POWER SUPPLY INTERRUPTIONS IN DISTRIBUTION NETWORKS	188
D.L. Kaluzhskii, J.B. Efimova, F.Ed. Lappi, A.S. Kharitonov METHOD OF SELECTING THE MAIN DIMENSIONS OF ACTIVE PARTS OF SYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE UNDER CONDITIONS OF SIZE RESTRICTIONS	191
D.L. Kaluzhskii, J.B. Efimova, A.S. Kharitonov, A.D. Kulikov SMOOTH-CORE ARMATURE ELECTRIC MACHINE BASED SYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE CONTROL	194
A.M. Khoiutanol, P.F. Vasilyev, G.I. Davydov, V.P. Kobylin ASPECTS OF GENERATORS STABLE OPERATION THROUGH THE HALF-WAVE POWER SUPPLY.....	197
O.V. Litvinova ELECTROMAGNETIC FIELD PARAMETERS FOR THE INSULATED CONDUCTOR	201
L.N. Kisneeva, A.E. Aukhadeev, A.G. Khayrullin, R.A. Rashitova REVIEW OF CALCULATION METHODS OF BALANCED MODES OF OPERATION OF ELECTRIC CITY TRANSPORT TRACTION POWER EQUIPMENT	204
V.Z. Manusov, D.S. Ahyoev, U. Bumtsend ALIGNMENT OF SCIENTIFIC ASSESSMENT IN TECHNICAL DIAGNOSTICS OF ELECTRICAL EQUIPMENT USING ARITHMETIC MEAN AND KEMENY-YOUNG METHOD	207
V.Z. Manusov, U. Bumtsend STUDY OF ELECTRICAL SUPPLY GRID VOLTAGE UNBALANCE WITH CONNECTED TRACTION LOADS.....	211
V.Z. Manusov, D.V. Orlov, N.Z. Meskhisvili DIAGNOSTICS OF HTS TRANSFORMER USING ANALYTIC HIERARCHY PROCESS METHOD	215
Z.S. Temlyakova, M.E. Vilberger, P.V. Morozov, A.A. Temlyakov ANALYSIS OF DESIGN AND ENGINEERING SOLUTIONS FOR INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF ASYNCHRONOUS MOTORS.....	219
G.V. Shvedov, S.R. Chorshanbiev POWER LOSS REDUCTION MEASURES DEVELOPMENT IN HV ELECTRICAL GRIDS - EVIDENCE FROM "PANJAKENT POWER NETWORKS" JSC, TAJIKISTAN	222
V.T. Cheremisin, E.A. Tret'yakov, G.E. Golovnev, N.N. Malysheva STABILIZATION OF VOLTAGES IN DISTRIBUTIVE TRACTION POWER NETWORKS.....	226

CONTENTS

Аносов В.Н., Жуловян В.В., Малозёмов Б.В., Порсев Е.Г. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ ЗАЩИТ ПРИСОЕДИНЕНИЙ 6-35 кВ 230	V.N. Anosov, V.V. Zhulovyan, B.V. Malozemov, E.G. Porsev COMPARATIVE ANALYSIS OF 6-35 KV MICROPROCESSOR PROTECTIVE RELAYS 230
Жуловян В.В., Аносов В.Н., Малозёмов Б.В., Порсев Е.Г. РАСЧЕТ И УТОЧНЕНИЕ УСТАВОК МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ БЛОКОВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ ЛИНИЙ 6-10 кВ 234	V.V. Zhulovyan, V.N. Anosov, B.V. Malozemov, E.G. Porsev CALCULATION AND REFINEMENT OF MICROPROCESSOR PROTECTIVE RELAY THRESHOLDS IN 6-10 KV LINES 234
Аухадеев А.Э., Литвиненко Р.С., Киснеева Л.Н., Хайруллин А.Г. РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ГОРОДСКОГО ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА НА ОСНОВЕ НАУЧНОЙ КОНЦЕПЦИИ О ПОСТРОЕНИИ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ 239	A.E. Aukhadееv, R.S. Litvinenko, L.N. Kisneeva, A.G. Khayrullin DEVELOPMENT OF THE THEORY OF TRACTION POWER EQUIPMENT FOR CITY PUBLIC TRANSPORT ON THE BASIS OF "ELECTRIC TRACTION PROCESS DESIGN" SCIENTIFIC CONCEPT 239
Антонов А.И., Денчик Ю.М., Иванов М.Н., Иванов М.Н., Руппель А.А., Сальников В.Г. КОМПЬЮТЕРНАЯ ПРОГРАММА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНДУКТИВНОЙ НИЗКОЧАСТОТНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ПОМЕХИ ПО КОЭФФИЦИЕНТУ НЕСИММЕТРИИ НАПРЯЖЕНИЯ ПО ОБРАТНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ 243	A.I. Antonov, J.M. Denchik, M.N. Ivanov, M.N. Ivanov, A.A. Ruppel, V.G. Sal'nikov COMPUTER PROGRAM FOR DETERMINATION OF CONDUCTIVE LOW- FREQUENCY ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE USING THE VOLTAGE UNBALANCE COEFFICIENT BY REVERSE SEQUENCE 243
Антонов А.И., Денчик Ю.М., Иванов М.Н., Иванова Е.В., Руппель А.А., Сальников В.Г. КРИТЕРИЙ ВЛИЯНИЯ НЕСИММЕТРИЧНОЙ НАГРУЗКИ В НИЗКОВОЛЬТНОЙ СЕТИ НА ИСКАЖЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В СЕТИ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ 249	A.I. Antonov, J.M. Denchik, M.N. Ivanov, E.V. Ivanova, A.A. Ruppel, V.G. Sal'nikov CRITERION OF ASYMMETRIC LOAD EFFECT IN A LOW-VOLTAGE GRID ON DISTORTION OF VOLTAGE IN A MEDIUM VOLTAGE GRID 249
Антонов А.И., Денчик Ю.М., Иванов М.Н., Иванова Е.В., Руппель А.А., Сальников В.Г. АЛГОРИТМ СИММЕТРИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ НА ОСНОВЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОЙ СХЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ 253	A.I. Antonov, J.M. Denchik, M.N. Ivanov, E.V. Ivanova, A.A. Ruppel, V.G. Sal'nikov ALGORITHM FOR VOLTAGE BALANCING IN THE ELECTRIC GRID BASED ON DETERMINING THE EFFECTIVE ELECTRICAL POWER SUPPLY CIRCUIT OF THE CONSUMERS 253
Палагушкин Б.В., Дёмин Ю.В., Лесных А.С., Реутов С.Н., Кузнецов А.Ю., Глаголев А.М. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТОКОВ КОРРОЗИИ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК 259	B.V. Palagushkin, Yu.V. Demin, A.S. Lesnih, S.N. Reutov, A.Yu. Kuznetsov, A.M. Glagolev METHODS OF CALCULATION OF CORROSION CURRENT FOR GROUNDING ELECTRICAL SYSTEMS 259
Мочалин К.С., Пахомова Л.В., Ярославцева А.С. СОВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ НА БАЗЕ ОПТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ 265	K.S. Mochalin, L.V. Pakhomova, A.S. Yaroslavl'tseva OPTICAL CONVERTERS BASED MODERN METEREING TRANSFORMERS 265
Бублик В.В., Гателюк О.В., Третьяков Е.А., Юрасов Д.В. АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ОБМОТКАХ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОВЗОВ СЕРИИ 23С6 В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ 268	V.V. Bublik, O.V. Gatelyuk, E.A. Tret'yakov, D.V. Yurasov ANALYSIS OF ELECTRICAL TRANSIENT PROCESSES IN THE WINDINGS OF THE TRACTION MOTORS SERIES 23C6 DURING OPERATION 268

ЭКОЛОГИЯ

Рослякова О.В., Панов Д.В. АНАЛИЗ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ТРАНСПОРТОМ С УЧЕТОМ РАСПОЛОЖЕНИЯ ДОРОЖНОЙ СЕТИ 272
Красников В.В. ПОВЫШЕНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВОДОРОДСОДЕРЖАЩЕГО СИНТЕЗ-ГАЗА 275
Шамова В.В., Мурин П.Д. ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА ВОДОЗАЩИТНЫХ ДАМБ НА РЕКЕ БЕРДЬ НА ВОДНЫЕ БИОЛОГИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ И СРЕДУ ИХ ОБИТАНИЯ 279
Енаки Е.С., Седых В.А., Сорокин Е.М. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ВОПРОСОВ ОБОСНОВАНИЯ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ СБОРА И ПЕРЕРАБОТКИ ПЛАВАЮЩЕЙ ДРЕВЕСИНЫ НА НОВОСИБИРСКОМ

ECOLOGY

O.V. Roslyakova, D.V. Panov ANALYSIS OF AIR POLLUTION FROM TRANSPORT CONSIDERING ROAD NETWORK 272
V.V. Krasnikov INCREASING THE ECOLOGICAL PERFORMANCE OF MARINE DIESEL ENGINE USING THE PARTIAL CONVERSION OF DIESEL FUEL IN THE HYDROGEN- CONTAINING SYNGAS 275
V.V. Shamova, P.D. Murin ASSESSMENT OF THE IMPACT OF WATER RETAINING STRUCTURES CONSTRUCTION ON THE BERD RIVER ON WATER BIOLOGICAL RESOURCES AND ECOSYSTEM 279
E.S. Enaki, V.A. Sedykh, E.M. Sorokin SOLUTIONS TO THE PROBLEM OF THE COLLECTION AND PROCESSING OF DRIFTWOOD ON THE NOVOSIBIRSK

СОДЕРЖАНИЕ

ВОДОХРАНИЛИЩЕ.....	281	RESERVOIR	281
Шамова В.В., Мурин П.Д.		V.V. Shamova, P.D. Murin	
ИССЛЕДОВАНИЕ СТОКА р. БЕРДЬ В		STUDY OF RIVER BERD FLOW IN THE STARY	
РАЙОНЕ с. СТАРЫЙ ИСКИТИМ	286	ISKITIM VILLAGE AREA.....	286
ТРАНСПОРТНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ		TRANSPORT EDUCATION	
Куделин О.Г., Фомин В.И		O.G. Kudelin, V.I. Fomin	
ТОЧНОЕ ВЫЧИСЛЕНИЕ НЕКОТОРОГО		ACCURATE	
КЛАССА ОПРЕДЕЛЁННЫХ ИНТЕГРАЛОВ С		CALCULATION	
ПОМОЩЬЮ РАЗЛОЖЕНИЯ		OF SOME CLASS OF DEFINITE	
ПОДЫНТЕГРАЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ В		INTEGRALS BY USING TAYLOR	
СХОДЯЩИЕСЯ СТЕПЕННЫЕ РЯДЫ		EXPANSION OF	
ТЕЙЛОРА	291	INTEGRANDS	291
Голышев Н.В., Моторин С.В., Панич Е.А.		N.V. Golyshev, S.V. Motorin, E.A. Panich	
ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ РАЗРАБОТКИ		SOFTWARE FOR DEVELOPMENT	
НЕЙРОСЕТЕВЫХ РЕАЛИЗАЦИЙ ТАБЛИЧНО		OF NEURO NETWORK	
ЗАДАНЫХ ФУНКЦИЙ ДЛЯ		REALIZATIONS OF TABLE	
ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ	293	FUNCTIONS.....	293
Халилов А.Р., Доровской В.А.		A.R. Khalilov, V.A. Dorovskoi	
МЕТОДЫ ИНТРОСПЕКТИВНОГО		METHODS OF INTROSPECTIVE	
ОЦЕНИВАНИЯ АЛЬТЕРНАТИВ ОБУЧЕНИЯ		ESTIMATION OF SHIP CREWS TRAINING	
ЭКИПАЖЕЙ СУДОВ	300	ALTERNATIVES.....	300
Осипов В.И.		V.I. Osipov	
ВОПРОСЫ РАЗРАБОТКИ ТРЕНАЖЕРОВ ДЛЯ		ISSUES OF MARINE ENGINE ROOM	
ПОДГОТОВКИ СУДОВЫХ МЕХАНИКОВ	304	SIMULATORS DEVELOPMENT	304
Тесля Н.Б., Малозёмов Б.В., Акберов К.Ч.		N.B. Teslya, B.V. Malozemov, K.Ch. Akberov	
ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В		INFORMATION TECHNOLOGIES IN THE	
СИСТЕМЕ ТРАНСПОРТНОГО		SYSTEM OF TRANSPORTATION RELATED	
ОБРАЗОВАНИЯ.....	307	EDUCATION	307

**Одному из основателей журнала
«Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока»
ЗАЧЕСОВУ Венедикту Петровичу исполнилось 80 лет**

После окончания в 1961 году с отличием факультета судовождения и эксплуатации Горьковского института инженеров водного транспорта и успешной защиты кандидатской диссертации в 1968 году Венедикт Петрович Зачёсов получает направление в НИИВТ, где в течение 50 лет плодотворно протекает его научная, педагогическая и общественная деятельность.

С 1968 по 1976 годы Венедикт Петрович Зачесов работает начальником научно-исследовательской лаборатории эксплуатации флота и экономических изысканий, доцентом кафедры Организации работы флота и портов, а с 1976 года избирается заведующим этой кафедры. В 1988 году утверждён в учёной степени доктора технических наук, а в 1989 г. – в учёном звании профессора. В 1991 году избран членом-корреспондентом, а в 1995 г. – академиком Академии транспорта РФ, в 1998 г. – академиком РАЕН.

С первых дней работы в НИИВТе Зачёсов В.П. активно включается в научно-исследовательские работы, направленные на решение важнейших проблем развития речного транспорта в пароходствах Восточных бассейнов. В результате выполнения комплекса исследований под его руководством формируется и успешно развивается новое направление – оптимизация использования технических средств речного транспорта на базе компьютерных технологий в бассейнах Сибири и Дальнего Востока.

Список его научных работ содержит около 250 наименований, в том числе более 150 печатных трудов (монографии, учебники, научные статьи, учебные пособия, конспекты лекций). Под руководством Зачёсова В.П. и при его непосредственном участии выполнено 40 научно-исследовательских работ, результаты которых широко используются в отрасли.

Зачёсов В.П. создал в Университете свою научную школу, которая в настоящее время успешно работает. В разное время на различных уровнях он занимался и занимается организацией отраслевой науки: в составе бюро Сибирского филиала Научного Совета России по комплексной проблеме единой транспортной системы страны, членом бюро Совета СО РАН «Транспорт сибирского севера», заместителем председателя этого Совета, Главным конструктором автоматизированных систем управления в бассейнах Сибири и Дальнего Востока, членом координационного Совета научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ отрасли по одному из основных направлений, членом четырёх диссертационных Советов по присуждению учёных степеней докторов и кандидатов наук, работает в Советах по присуждению учёных степеней доктора транспорта и доктора Российской Академии естественных наук. Более 10 лет работал научным руководителем отраслевой проблемы «Транспортное освоение малых рек».

Высокие достижения Зачёсова В.П. в научной и производственной деятельности неоднократно отмечались правительственными наградами: медалями «300 лет Российскому флоту», «Ветеран труда», памятной медалью РАЕН «За заслуги в деле возрождения науки и экономики России». В 1998 году ему присвоено почётное звание «Заслуженный деятель науки Российской Федерации», в 2000 г. Почётное звание и знак РАЕН «Рыцарь науки и искусств», в 2003 г. Звание «Почётный работник речного флота». В.П. Зачёсов зарегистрирован в Федеральном реестре экспертов научно-технической сферы. Научные работы Зачёсова В.П. широко используются в учебном процессе при подготовке специалистов отрасли.

Редакция журнала «Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока» поздравляет Венедикта Петровича Зачесова и надеется на продолжение нашего плодотворного сотрудничества.

Редакционная коллегия



**К 80-летию КИЧА
Геннадия Петровича**

9 апреля исполнилось 80 лет Геннадию Петровичу Киче, заведующему кафедрой судовых двигателей внутреннего сгорания судомеханического факультета, заслуженному деятелю науки и техники РФ, доктору технических наук, профессору.

Коллеги выражают ему искреннее уважение и признательность за многолетний подвижнический труд, верность призванию и Морскому университету. Крепкого Вам здоровья, Геннадий Петрович, семейного счастья, творческих удач и долгих лет жизни!

После окончания Одесского института инженеров морского флота, Геннадий Петрович два года работал в должности конструктора на Луганском тепловозостроительном заводе. С 1964 года началась его педагогическая деятельность в стенах Дальневосточного высшего инженерного морского училища им. адм. Г.И. Невельского.

В 1970 году после окончания аспирантуры при Центральном научно-исследовательском дизельном институте (Санкт-Петербург), он защитил кандидатскую диссертацию в 1971 г. в Ленинградском кораблестроительном институте. С тех пор его судьба неразрывно связана с дальневосточным морским вузом. Он последовательно занимал должности старшего преподавателя, доцента, а с 1984 года по настоящее время – начальника и заведующего кафедрой судовых двигателей внутреннего сгорания.

Кича Г.П. не только внес фундаментальные представления в прикладную область, но и установил закономерности поведения горюче-смазочных метаралов. Являясь учеником академика В.А. Сомова, Геннадий Петрович внес значительный вклад в развитие прикладной науки химмотологии, является руководителем и основателем Дальневосточной школы судовой химмотологии.

Докторскую диссертацию защитил в 1992 г. в Дальневосточном государственном техническом университете им. В.В. Куйбышева (г. Владивосток) и стал профессором по кафедре судовых двигателей внутреннего сгорания в 1993 г., а также Академиком Российской академии транспорта.

Геннадий Петрович является председателем Диссертационного Совета Д 223.005.01, под его руководством защищено 15 диссертаций.

Его многолетняя самоотверженная работа в сфере морского образования была неоднократно отмечена высокими наградами. Г.П. Киче присвоены звания Заслуженный деятель науки и техники РФ (1994 г.), Заслуженный изобретатель РФ (1986 г.), Почетный изобретатель Приморского края (1984 г.), награжден знаком «Лучший изобретатель морского флота» (1985 г.), лауреат премии ВСНТО за создание высокоэффективных технологий очистки моторных масел на судах. Награжден юбилейной медалью «300 лет Российскому Флоту» (1996 г.), Нагрудный значок «Почетному работнику морского флота» (2000 г.), Нагрудный знак «Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации» (2004 г.), Знак «Золотой фонд МГУ» (2004 г.), Знак отличия «За заслуги перед Владивостоком» (2013 г.). За достижения в научной деятельности Кича Г.П. включен в список выдающихся деятелей мировой науки по разделу «Наука и техника» («Marquis Who's Who Biographee»).

Награжден девятью (золотой, двумя серебряными и шестью бронзовыми) медалями ВДНХ СССР за разработку судовых комбинированных масло - и топливоочистительных комплексов (модулей), отмечен дипломами различных выставок за достижения в науке и технике. Член профессорского клуба г. Владивостока.

Редакция журнала «Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока» присоединяется к этим поздравлениям и надеется на продолжение нашего плодотворного сотрудничества.



Редакционная коллегия

ПОРЯДОК ПРИЕМА МАТЕРИАЛОВ

Уважаемые коллеги!

Редакция журнала «Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока», приглашает Вас опубликовать результаты Ваших научных исследований в очередном номере журнала. Материалы (заявку и статью) просим высылать ответственному секретарю журнала Коновалову В.В. по электронной почте: konovalov@nsawt.ru. Оригиналы по почте на адрес Университета с пометкой для Коновалова В.В.

Заявка на публикацию научной статьи

	на русском языке	на английском языке
НАЗВАНИЕ СТАТЬИ (без каких-либо сокращений и символов)		
Аннотация (до 300 знаков)		
Ключевые слова (от 3 до 10 слов)		
Организация (полное юридическое название и полный почтовый адрес работы каждого из авторов)		
Автор(ы) (ФИО полностью, ученая степень, занимаемая должность, числовой идентификационный номер автора: Author ID в системе РИНЦ)		
Количество ссылок на литературу		
Координаты для обратной связи (ФИО полностью, адрес электронной почты, мобильный телефон*)		

*-номер мобильного телефона необходим для оперативного решения возможных вопросов по поводу публикации и разглашению не подлежит

С условиями публикации ознакомлен(ы), представленный материал ранее не был опубликован, о рецензировании статьи компетентным по тематике статьи лицом не возражаем.

Дата

Подпись(и)

Требования к представлению материалов:

- 1 Статья (оригинал) и ее электронная версия в формате MS WORD (объем 3-5 страниц А4, шрифт Arial размер 14, одинарный интервал, поля 2 см).
- 2 Заявка (оригинал) и ее электронная версия в формате MS WORD на публикацию научной статьи.
- 3 Графический материал не подлежит правке при наборе (при выполнении рисунков поясняющий текст должен быть разборчив); размеры рисунка не более 15×15 см; глубина цвета – оттенки серого.
- 4 Ширина таблиц не более 15 см.
- 5 Все математические формулы и выражения должны быть набраны в специальном редакторе формул (Mathtype и др.), шрифт Arial.
- 6 Обязательные ссылки на список литературы выполняются сквозной нумерацией арабскими цифрами, в квадратных скобках в порядке указания. На каждый указанный в списке источник, должны быть ссылки в тексте статьи.

Редколлегия оставляет за собой право литературной редакции содержания статьи без согласования с автором(и)

С условиями публикации материалов можно ознакомиться у ответственного секретаря журнала Коновалова Валерия Владимировича по электронной почте: konovalov@nsawt.ru. Почтовый адрес: 630099, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, д. 33. ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта» а также на интернет-странице по адресу: <http://www.ssuwt.ru> в разделе «Наука-Научные издания». Для аспирантов очного отделения публикация материалов в журнале – бесплатно, в порядке очередности и актуальности.

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ
Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока
№2 за 2018 год

Главный редактор – Палагушкин Б.В.

Ответственный за выпуск – Коновалов В.В.

Перевод на английский язык – Руденко К.Д., Пинясов С.В.

Подписано в печать 25.06.2018 г. с оригинал-макета

Бумага офсетная №1, формат 60х84 1/8, печать трафаретная – Riso.

Усл. печ. л. 37,3; тираж 500 экз. Заказ №109

Цена свободная.

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»
(ФГБОУ ВО «СГУВТ»), 630099, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, тел. (383)222-64-68,
факс (383)222-49-76

Отпечатано в издательстве ФГБОУ ВО «СГУВТ»

Свидетельство о регистрации СМИ ПИ №ФС77-22440 выдано 20.12.2005 г.

ISSN 2071-3827

Подписной почтовый индекс 62390