

ISSN 1816-210X

ТРУДЫ НГТУ

ИМ. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА

Нижний Новгород

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»

ТРУДЫ НГТУ

им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА

Журнал издается с 2010 года

№ 3 (122)

Нижний Новгород 2018

УДК 050(06)
ББК 9я54
Т 78

Т 78 Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2018. №3(122).
– 184 с.

Выходит 4 раза в год

Журнал включен ВАК при Минобрнауки России

в «Перечень рецензируемых научных изданий», в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук» по специальностям: 05.05.03 – Колесные и гусеничные машины; 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации; 05.13.17 – Теоретические основы информатики; 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы; 05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая проектирование и вывод из эксплуатации

Главный редактор С.М. Дмитриев

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Н.Ю. Бабанов (зам. гл. редактора), В.П. Хранилов (ответственный секретарь),
О.В. Пугина (отв. редактор), А.В. Крылова (гл. редактор выпуска)

Члены редколлегии: В.В. Беляков, Г.Я. Вагин, В.А. Горбунов, Г.О. Котиев, В.В. Кондратьев,
А.А. Куркин, А.Л. Куликов, В.Н. Ланцов, А.Б. Лоскутов, В.Н. Наумов, Н.А. Прибатурин, А.Е. Хробостов

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

**И.О. председателя,
заместитель председателя**

Сергей Михайлович Дмитриев
(д. т. н., проф., ректор НГТУ им. Р.Е. Алексеева)

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОГО СОВЕТА

Пелиновский Дмитрий Ефимович

PhD, проф. математики, Университет Мак Мастер,
Гамильтон, Онтарио, Канада

Палкович Ласло

Проф. Сечени Иштван Университет, Дьёр, Венгрия

Варлаки Петер

Проф. Сечени Иштван Университет, Дьёр, Венгрия

Виджай Кумар Чакка

PhD, проф., Университет Шив Надар, Индия

Ялцинер Ахмет Джевдет

д., проф., METU, директор OERC, Турция

Учредитель

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»
(603950, Нижегородская обл., г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24)

Электронная версия журнала:
<http://www.nntu.ru/content/trudy/>

*Свидетельство о регистрации
периодического печатного издания:*
ПИ № ФС 77-56417

УДК 050(06)
ББК 9я54

© Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексеева, 2018

**MINISTRY OF SCIENCE EDUCATION AND OF THE RUSSIAN FEDERATION
FEDERAL STATE BUDGETARY EDUCATIONAL INSTITUTION
OF HIGHER EDUCATION
NIZHNY NOVGOROD STATE TECHNICAL UNIVERSITY
n. a. R.E. ALEKSEEV**

**TRANSACTIONS
of NNSTU n.a. R.E. ALEKSEEV**

Published since 2010

№ 3 (122)

Nizhny Novgorod 2018

The journal is issued 4 times a year

The journal is included in HAC Ministry of Education and Science

in the "List of peer-reviewed scientific publications where must be published basic scientific results of dissertations on competition of a scientific degree of Candidate of Science, on competition of a scientific degree of Doctor of Science" in specialties: 05.05.03 – Wheeled and tracked vehicles; 05.13.01 – System analysis, management and information processing; 05.13.17 – Theoretical foundations of computer science; 05.14.02 – Electric power stations and electric power systems; 05.14.03 – Nuclear power plants, including design and decommissioning

Editor-in-Chief S.M. Dmitriev

EDITORIAL BOARD

N.Yu. Babanov (Deputy Editor-in-Chief), V.P. Khranilov (Executive Secretary),
O.V. Pugina (Executive Editor), A.V. Krylova (Executive Editor)

Members of Editorial Board: V.V. Belyakov, G.Ya. Vagin, V.A. Gorbunov, G.O. Kotiev, V.V. Kondratiev,
A.A. Kurkin, A.L. Kulikov, V.N. Lantsov, A.B. Loskutov, V.N. Naumov, N.A. Pribaturin, A.Ye. Khrobostov

EDITORIAL COUNCIL

**Acting Chairman,
Vice-chairman**

Sergei Mikhailovich Dmitriev
Doctor of Technical Science, Professor, NNSTU Rector (Nizhny Novgorod, Russia)

Members of Editorial Council

Pelenovski Dmitri Efimovich

PhD, Doctor of Mathematical Science, Professor
McMaster University (Ontario, Canada)

László Palkovics

The Széchenyi István University (Győr, Hungary)

Péter Várlaki

The Széchenyi István University (Győr, Hungary)

Vijay Kumar Chakka

PhD, Doctor of Philosophical Science, Professor
Shiv Nadar University (India)

Yalciner Akhmet Cevdet.

Professor, Head of Ocean Engineering Research Center of
Middle East Technical University (Turkey)

The certificate on registration of periodic printed editions:
ППИ № ФС 77-56417

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ.....	8
Богатырев Д.В., Макаров С.Н., Антонова М.А., Быстров М.И., Нетронин И.В. Использование порталных технологий с целью развития производственной системы «Росатма».....	8
Виноградов О.И., Ломакина Л.С., Сильянов Н.В. Алгоритм обеспечения отказоустойчивости вычислительных систем на граф-моделях.....	16
Никулин Е.А. Исследование фрактальных полилиний.....	23
Шагалова П.А. Разработка и реализация алгоритма распознавания трещин на изображениях, полученных при микроскопии.....	32
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ.....	37
Андреев В.В., Андреев Н.Г., Кувшинова А.А., Леванов С.Л., Худяков И.С. Расчётно-теоретическое обоснование конструкции нейтронного конвертера.....	37
Валеев И.М., Мусаев Т.А. Оценка эффективности внедрения работ под напряжением на предприятиях электрических сетей.....	46
Горбунов В.А., Лоншаков Н.А. Оптимизация затрат энергии турбопитательных насосов блока АЭС нейросетевыми методами моделирования.....	54
Дмитриев С.М., Добров А.А., Легчанов М.А. Расчетное исследование эффективности перемешивающих решеток в области направляющего канала ТВС-квадрат с использованием программы ANSYS CFX.....	61
Калинин Е.В. Магнитное поле в анизотропном шихтованном сердечнике. Часть 2. Экспериментальное обоснование применения при расчетах магнитного поля векторных характеристик намагничивания холоднокатаных электротехнических сталей	71
Соснина Е.Н., Шалуха А.В., Липужин И.А., Кечкин А.Ю., Ворошилов А.А. Повышение эффективности децентрализованных систем электроснабжения.....	81
Тихомиров В.А. Методика расчета энергетических показателей преобразовательных устройств.....	92
МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО	107
Бутин Д.А., Тумасов А.В., Вашурин А.С., Аникин А.А., Палутин Ю.И. Исследование режимов качения пневматической шины при испытаниях управляемости и устойчивости.....	107
Вахидов У.Ш., Молев Ю.И., Черевастов М.Г., Согин А.В., Слюсарев А.С. Прямые оценки качества реакции движения автомобиля на ступенчатое управляющее воздействие.....	111
Гаевский В.В., Иванов А.М. Проблемы применения интеллектуальных систем помощи водителю на одноколейных транспортных средствах.....	121
Гончаров Р.Б., Зузов В.Н. Проблемы поиска оптимальных конструктивных параметров бампера автомобиля при ударном воздействии с позиций пассивной безопасности.....	130

Дыгало В.Г., Ларин Е.С., Котов В.В., Дыгало Л.В., Сморгачев А.Е., Деянов Д.С. Диагностический комплекс приводов систем активной безопасности автомобиля.....	137
Жуков И.С., Дыгало В.Г. Оценка тепловой нагруженности пар трения автоматизированной тормозной системы автомобиля.....	147
Никитин А.В., Чистопрудов Д.А., Столяревский С.П. Идентификация тепловых процессов в поддоне картера двигателя специального транспортного средства с помощью нейронечетких математических моделей	153
Пикулькин А.А., Бердников Л.А., Корчажкин М.Г., Захаров Л.А., Бажан П.И. Исследование повышения термического сопротивления изоляции центрального корпуса турбокомпрессора автомобильных ДВС.....	164
Шадрин С.С. Геоинформационное обеспечение автономного движения наземного транспорта.....	172

CONTENTS

INFORMATICS AND MANAGEMENT IN TECHNICAL AND SOCIAL SYSTEMS....	8
Bogatyrev D.V., Makarov S.N., Antonova M.A., Bystrov M.I., Netronin I.V. Application of portal technologies for the purpose of the rosatom's production system development.....	8
Vinogradov O.I., Lomakina L.S., Sil'yanov N.V. Algorithm of ensuring fault-tolerance of computing systems based on graph-models.....	16
Nikulin E.A. Investigation of fractal polylines.....	23
Shagalova P.A. Development and implementation of an algorithm for cracks recognition in microscopy images.....	32
ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES.....	37
Andreev V.V., Andreev N.G., Kuvshinova A.A., Levanov S.L., Khudiakov I.S. Neutron converter design calculations and theoretical underpinnings.....	37
Valeev I.M., Musaev T.A. Evaluation of economic efficiency implementation of under voltage works on the electric networks enterprises.....	46
Gorbunov V. A., Lonshakov N. A. Cost optimization of energy turbine drive feed water pumps of nuclear power plant unit using neural network modeling techniques.....	54
Dmitriev S.M., Dobrov A.A., Legchanov M.A. Numerical analysis of mixing grid efficiency in the control rod area of the tvs-kvadrat fuel assembly using ANSYS CFX.....	61
Kalinin E.V. Magnetic field in an anisotropic laminated magnetic core. Part 2. experimental substantiation of application at calculations of magnetic field of the vector magnetization characteristics of cold-rolled electrical steels	71
Sosnina E. N., Shalukho A.V., Lipuzhin I.A., Kechkin A.Yu., Voroshilov A.A. Efficiency improvement of decentralized electrical supply systems.....	81
Tikhomirov V.A. Method of calculation of energy indicators of conversion devices.....	92
MECHANICAL AND TRANSPORT: THEORY, TECHNOLOGY, PRODUCTION...	107
Butin D. A., Tumasov A. V., Vashurin A. S., Anikin A.A., Palutin Y.I. Study of rolling of a pneumatic tire during tests of controllability and stability.....	107
Vakhidov U.Sh., Molev Y.I., Cherevastov M.G., Sogin A.V., Slyusarev A.S. Direct assessments of the quality of the motor vehicle reaction on step-managed impact.....	111
Gaevskiy V.V., Ivanov A.M. The problems of using intelligent driver assistance systems on single-track vehicles.....	121
Goncharov R. B., Zuzov V. N. Crashworthiness design for foam-filled bumper beam....	130
Dygalo V.G., Larin E.S., Kotov V.V., Dygalo L.V., Smochkov A.E., Dejanov D.S. Diagnostic complex of active system active safety actuators.....	137
Zhukov I.S., Dygalo V.G. Estimation of thermal loading of the friction pairs of the automated brake system of a vehicle.....	147
Nikitin A.V., Chistoprudov D. A., Stolyarevskiy S. P. Identification of thermal processes in the oil sump of the engine special vehicles by using neuro mathematical models.....	153
Pikulkin A.A., Berdnikov L.A., Korchazhkin M.G., Zakharov L.A., Bazhan P.P. Research of increase thermal resistance of insulation the central body of an automobile turbocharger internal combustion engines.....	164
Shadrin S. S. Geoinformation support of ground vehicles' autonomous driving.....	172

ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

УДК 381.3

Д.В. Богатырев, С.Н. Макаров, М.А. Антонова, М.И. Быстров, И.В. Нетронин

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОРТАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ С ЦЕЛЮ РАЗВИТИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ «РОСАТОМА»

АО «ОКБМ Африкантов», г. Н. Новгород

Предмет, тема, цель работы: Создание комплекса средств поддержки внедрения и развития Производственной системы «Росатома» (ПСР) в АО «ОКБМ Африкантов», оперативного информационного обеспечения всех участников производственного процесса, наглядного представления информации с возможностью ее интерактивной корректировки и актуализации всеми участниками, оперативного сбора и обработки данных на базе оперативно создаваемых интерактивных форм, упорядоченного хранения и обработки материалов проектов ПСР, справочной, методической, нормативной, оперативной информации по тематике ПСР, поддержки групповой работы участников проектов ПСР, тематических и рабочих групп.

Метод / методология проведения работы: Поставленные задачи решены путем реализации и внедрения интерактивного Веб-портала ПСР предприятия на базе разработанного программно - аппаратного комплекса «Система управления проектной деятельностью» (СУПД) и ресурсного домена второго уровня в среде виртуально-го кластера системы VM Ware 6.

Результаты и область их применения: Созданное решение позволяет обеспечить поддержку внедрения и развития предприятия, организацию коллективной работы участников проектов ПСР, информационное обеспечение пользователей системы ПСР предприятия.

Выводы: Использование порталных технологий является перспективным методом поддержки внедрения ПСР на предприятии и может быть в дальнейшем расширено за счет использования оперативных коммуникаций, технологий социальных сетей и GroupWare.

Ключевые слова: производственная система «Росатома» (ПСР), Веб-портал, MSSharePoint, система 5C, повышение эффективности.

Производственная система «Росатома» (ПСР) – это культура бережливого производства и система непрерывного совершенствования процессов для обеспечения конкурентного преимущества на мировом уровне [1].

Внедрение производственной системы «Росатома» – масштабный отраслевой проект [2], призванный повысить производительность труда до уровня зарубежных конкурентов Госкорпорации «Росатом». Он предполагает гибкость в управленческих решениях, качественную и быструю реакцию по отношению к нашим заказчикам (как внешним, так и внутренним).

Основной целью ПСР является сокращение потерь, которые есть в деятельности каждого сотрудника, независимо от того, кем он является – рабочим, специалистом, руководителем [1]. Производственная система «Росатом» является значимым инструментом конкурентоспособности предприятия. Как предприятие, занимающее лидирующее место в развитии ПСР, мы уделяем повышенное внимание данной системе и делаем ее доступной для всех, сокращая потери в процессе внедрения, развития ПСР в организации [3].

В 2015 году АО «ОКБМ Африкантов» было включено в реестр системного развёртывания ПСР, по итогам 2015 г. получен статус «Лидер ПСР», по итогам 2016 г. 1-е место в рейтинге лидеров ПСР [4].

Условиями успешного внедрения и развития системы на предприятии являются:

- оперативное информационное обеспечение всех участников производственного процесса, включающее наглядное представление информации с возможностью ее интерактивной корректировки и актуализации всеми участниками;
- возможность оперативного сбора и обработки данных на базе оперативно создаваемых интерактивных форм;
- организация упорядоченного хранения и обработки материалов, реализуемых на предприятии проектов ПСР, справочной, методической, нормативной, оперативной информации по тематике ПСР;
- наличие средств поддержки групповой работы участников проектов ПСР, тематических и рабочих групп.

Традиционно указанные задачи решались на базе структурированных архивов файлов на фал-сервере предприятия. В последнее время появилась возможность на качественно новом уровне решить эти задач на базе порталных технологий (рис. 1).

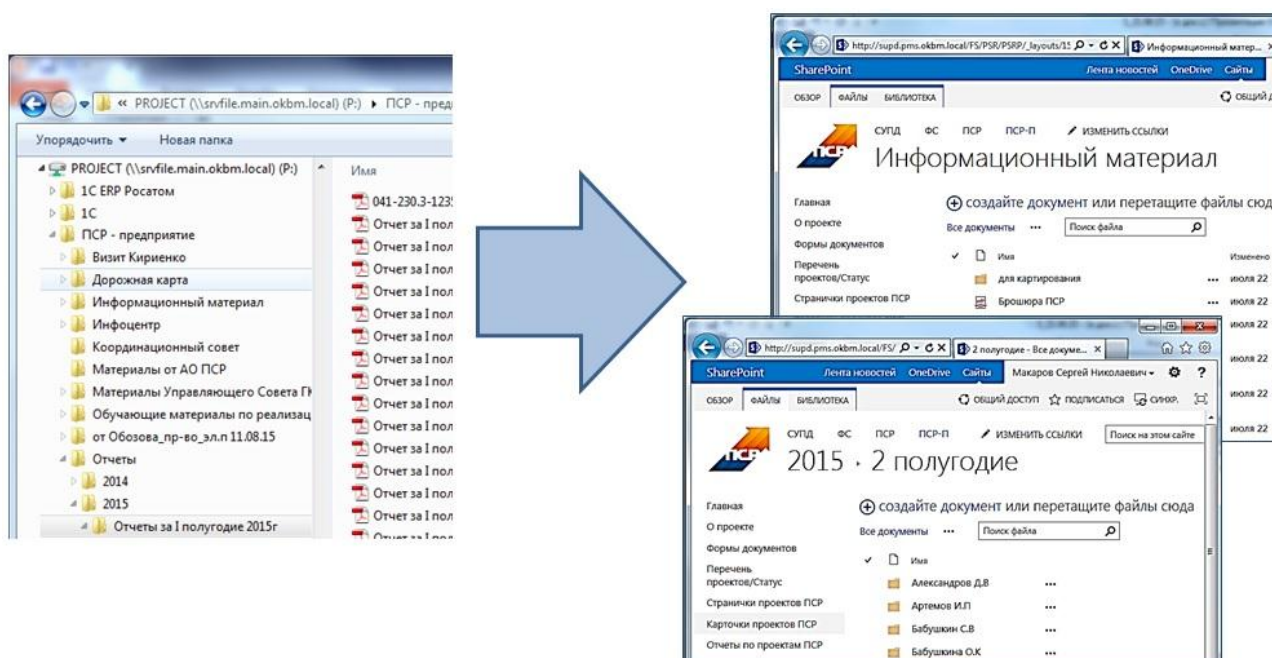


Рис. 1. Использование порталных библиотек вместо архивов файл-сервера

В целях централизованного информационного обеспечения работ по ПСР, оперативной координации и поддержки групповой работы участников проекта «ПСР-предприятие», Приказом «О вводе в эксплуатацию Веб-портала проекта «ПСР-Предприятие» введен в эксплуатацию веб-портал проекта «ПСР-предприятие» на базе технологии MS Share Point [5] программно-аппаратного комплекса системы управления проектной деятельностью (далее – Портал [7]).

Портал (рис. 2) технически является частью системы управления проектной деятельностью, функционирующей на платформе MS Share Point Server [5] в составе программно-аппаратного комплекса, обеспечивающего следующие сервисы:

- централизованные системы управления проектами Oracle Primavera, MS Project; основные пользователи – отделы управления проектами, отдел управления инвестициями, производственно-диспетчерский отдел и др.;
- порталная ферма MS SharePoint (с набором базирующихся на портале систем и сервисов Project Server, Visio Server, Excel Service и др.);

- набор порталных приложений и ресурсов: календари присутствия руководства предприятия, Портал ПСР, сайты проектов (сайты организационных и бизнес-проектов), архив административно-хозяйственного направления, организационная схема предприятия, сайты функциональных подразделений и подготавливаемых к внедрению систем BPM (Business Performance Management– управление бизнес-процессами, контроль операций) и др. Пользователи – все пользователи КВС предприятия;
- интегрированная с доменом и порталом система внутренних оперативных коммуникаций на базе MS Exchange (с веб-интерфейсом).

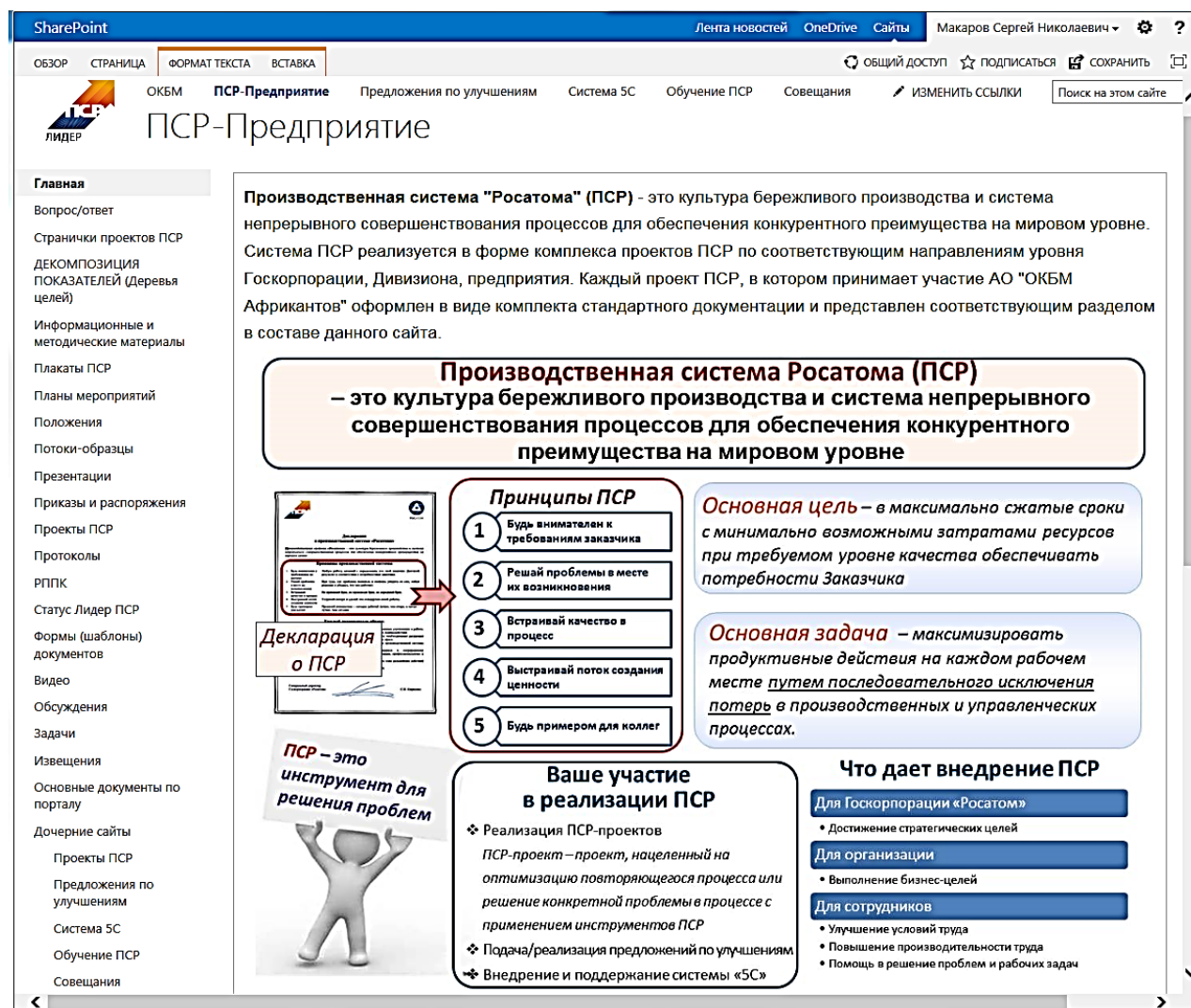


Рис. 2. Портал проекта ПСР-предприятие

Комплекс реализован как набор виртуальных серверов кластера под управлением VM Warev Sphere 6 [6]. Использование виртуальной архитектуры позволило упростить системное администрирование и поддержку комплекса (например, благодаря возможности оперативного копирования, восстановления, клонирования виртуальных машин серверов, оперативного перераспределения ресурсов между ними).

Комплекс является «надстройкой» над корпоративной вычислительной сетью (КВС) предприятия, реализован как домен второго уровня КВС предприятия. Домен комплекса полностью интегрирован с доменом КВС предприятия. Регистрация на Портале (ввод логина / пароля) не требуется, так как реализована «прозрачная» аутентификация пользователей по протоколу Kerberos [8]. Все пользователи, вошедшие в КВС предприятия, имеют доступ к ресурсам комплекса без повторной регистрации в системе (рис. 3).



Рис. 3. Схема доступа пользователей предприятия к ресурсам комплекса СУПД

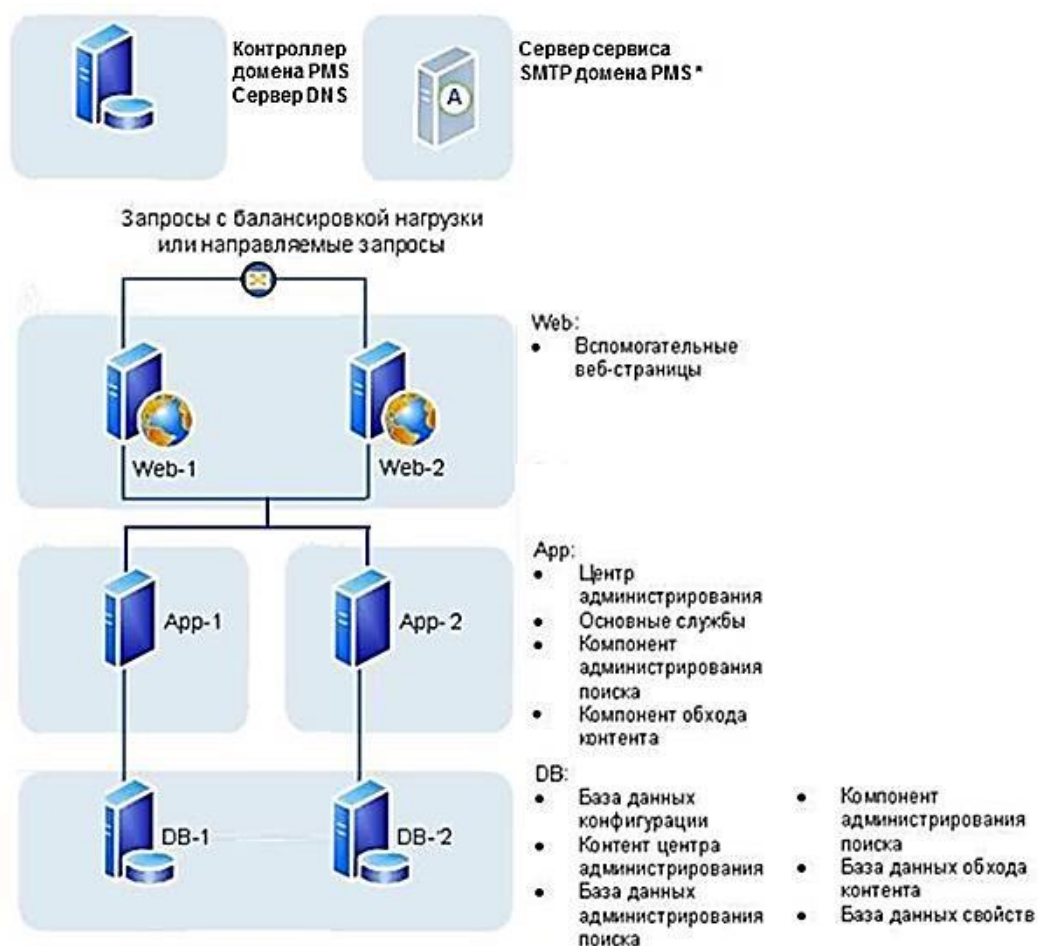


Рис. 4. Реализованная архитектура фермы SharePoint

Реализованная в составе комплекса ферма MS Share Point имеет трехуровневую архитектуру: Web Front-End серверы, серверы приложений (APP-серверы), серверы баз данных (рис. 4).

Большая часть содержания на Портале сводится к следующим основным типам данных и технологий их обработки:

- работа с библиотеками документов (с функциями документооборота);

- работа со списками;
- работа с задачами и планами (включая MS Project Server, функционирующий на платформе MS Share Point);
- справочная информация, энциклопедия, поиск;
- оперативные коммуникации, обмен информацией, поддержка рабочих групп (GroupWare);
- специальные виды контента и специализированные подсистемы (электронные формы InfoPath, сервер Visio, аналитические службы и др.).

Основным достоинством MS Share Point является возможность использования его функций аналогично другим приложениям MS Office:

- продукт позиционируется производителем как часть пакета MS Office и имеет унифицированное с MS Office меню, такие же элементы, кнопки, команды, легко узнаваемые пользователями;
- основные операции создания элементов, ввода и редактирования контента выполняются на портале через «стандартное пользовательское меню MS Office» на том же уровне сложности и в той же форме, как редактирование документа в офисных программах (MS Word, MS Power Point, MS Excel).

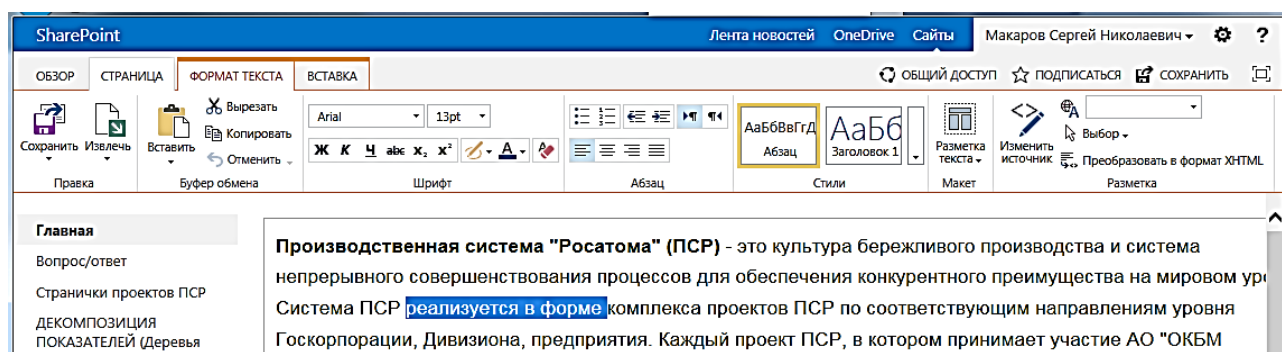


Рис. 5. Пример использования стандартного контекстного меню MS Office в процессе интерактивного редактирования текста и информации веб-страницы портала

С точки зрения пользователя, интерактивное редактирование текста и информации веб-страницы на портале Share Point практически не отличается от подобной работы в MS Word. Поэтому освоение работы с MS Share Point требует минимального обучения и адаптации пользователей и позволяет осуществить основные работы по наполнению и текущему вводу содержания портала силами самих пользователей (без привлечения программистов) (рис. 5).

Создание, администрирование, поддержка эксплуатации Портала обеспечено силами отдела развития системы контроллинга совместно с ИТ-службой предприятия. Администраторами разработаны инструкции пользователей Портала, организовано обучение ключевых пользователей. Силами Отдела анализа и повышения эффективности процессов на постоянной основе обеспечено управление информационным содержанием Порталом. Наполнение Портала информацией по реализации проектов ПСР осуществляется непосредственно ключевыми пользователями.

На Портале размещено множество методических материалов, брошюр, инструкций, шаблонов. Создана база проектов ПСР, где по каждому проекту размещаются все документы проекта (рис. 6).

Созданы дочерние сайты: сайт предложений по улучшениям (ППУ) [9], сайт 5С [10], сайт обучения ПСР и др. На каждом из них собраны документы по соответствующим направлениям. Так, на дочернем сайте ППУ, помимо общей информационно-методической документации, находятся протоколы заседания рабочих групп по рассмотрению ППУ.

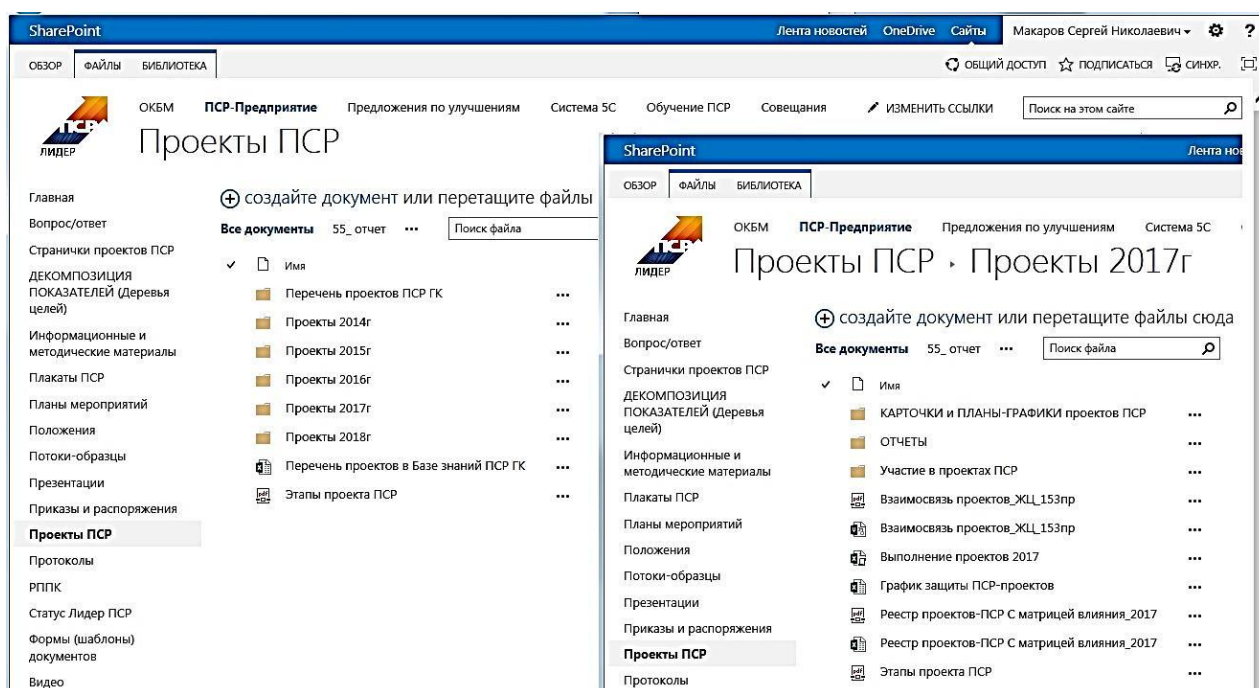


Рис. 6. База материалов проектов ПСР в иерархических библиотеках веб-портала

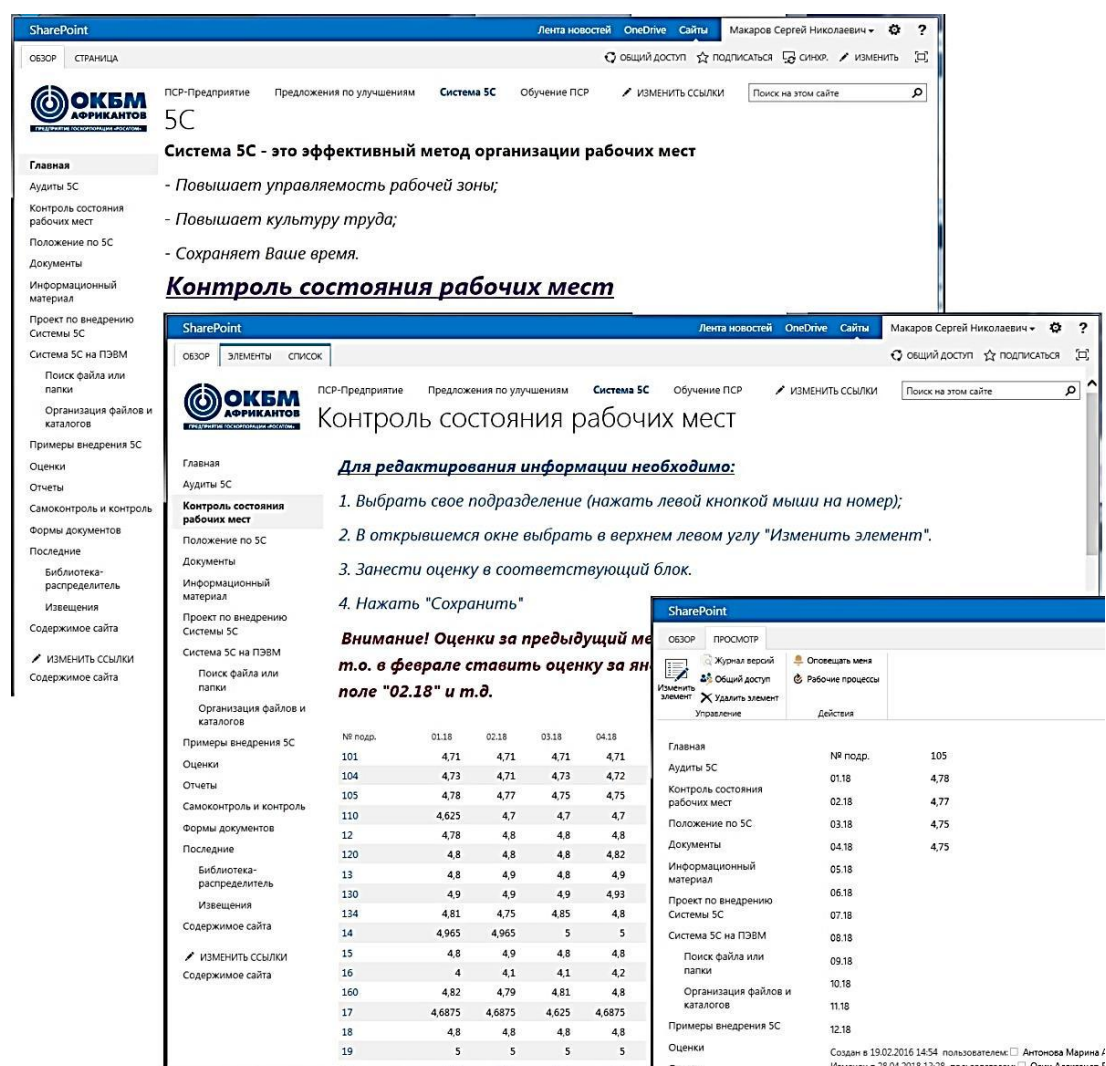


Рис. 7. Веб-интерфейс для сбора и обработки оценок рабочих мест по системе 5С

Для автоматизации сбора данных, обработки заявок на Портале созданы соответствующие веб-приложения. Примером подобного приложения служит реализованная на дочернем сайте 5С веб-страница «Контроль состояния рабочих мест», на базе которой осуществляется сбор оценок по 5С [10]. Каждый месяц ответственные в подразделениях проставляют оценку, специалист отдела анализа и повышения эффективности процессов выгружает информацию в MS Excel и формирует отчетную диаграмму для инфоцентра предприятия. Данный функционал Портала значительно повышает эффективность процесса, сокращая время на сбор информации и ее обработку, также позволяя всем отделам видеть динамику оценок, и возможность сравнения с другими (рис. 7).

Примером реализации интерактивных форм в среде Портала является обработка заявок на обучение на дочернем сайте «Обучение ПСР». Реализован функционал записи на обучение по ПСР. Любой сотрудник может подать заявку на обучение, заполнив необходимые поля на Портале. Поданные заявки обрабатываются сотрудниками отдела технического обучения с соответствующим разграничением прав доступа и доступных функций.

В результате нам удалось реализовать систему, которая смогла вобрать в себя все материалы по тематике ПСР, с которыми могут ознакомиться все сотрудники организации. Любой из сотрудников может быть в курсе проводимых проектов и результатов их реализации.

Использование Портала позволяет сокращать потери:

- лишние движения – пользователь быстро находит необходимую информацию на ресурсе, не совершая дополнительных звонков, обращений в отдел анализа и повышения эффективности процессов (далее ПСР-офис);
- ненужная транспортировка – пользователи без помощи ПСР-офиса могут разместить информацию по проектам, поставить оценки по 5С, подать заявку на обучение, то есть информация сразу попадает в нужный раздел, без промежуточной стадии, ненужной транспортировки информации в ПСР-офис;
- излишние запасы – использование портала дает возможность не дублировать информацию по проекту у нескольких пользователей, она вся размещается в одном месте;
- ожидание – все проекты распределены за ответственными ПСР-офиса и в случае отсутствия сотрудника нет необходимости ждать его появления, а получить информацию на портале.

Неоспорим тот факт, что внедрение портала сокращает потери, позволяет эффективнее выполнять работу, повышая эффективность не только сотрудников ПСР-офиса, но и других сотрудников организации. Так же положительно влияние на уровень вовлеченности в ПСР.

В настоящее время прорабатываются дальнейшие перспективы развития Портала, включая создание системы управления функциями и структурно-функционального моделирования предприятия в среде созданного комплекса, поэтапно внедряются средства коллективной работы и система внутренних оперативных коммуникаций и другой функционал.

Библиографический список

1. Производственная система «Росатом». [Электронный ресурс] URL: <http://www.rosatom.ru/about/system/>
2. Отраслевой проект внедрения ПСР в ГК «Росатом». [Электронный ресурс] URL: <https://strana.rosatom.local/sites/psr/SitePages/%D0%9E%20%D0%BF%D1%81%D1%80.aspx>
3. Развитие и внедрение ПСР в АО «ОКБМ Африкантов». [Электронный ресурс] URL: <http://okbm.nnov.ru/russian/-l-r>
4. По итогам 2016 года лидерами по разворачиванию Производственной системы «Росатом» были признаны 12 предприятий. [Электронный ресурс] URL: <http://www.ps-rosatom.ru/about/novosti/95-po-itogam-2016-goda-liderami-po-razvertyvaniyu-proizvodstvennoj-sistemy-rosatom-byli-priznany-12-predpriyatij>
5. SharePoint. [Электронный ресурс] URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/SharePoint>
6. vSphere и vSphere with Operations Management [Электронный ресурс] URL: <https://www.vmware.com/ru/products/vsphere.html>

7. Веб-портал wikipedia.org [Электронный ресурс] URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%B5%D0%B1-%D0%BF%D0%BE%D1%80%D1%82%D0%B0%D0%BB>
8. Kerberos [Электронный ресурс] // URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Kerberos>
9. ПСР и ППУ [Электронный ресурс] URL: <https://crypto.rosatom.ru/innovatsii/psr-i-ppu/>
10. 5S [Электронный ресурс] URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/5S>

*Дата поступления
в редакцию 10.06.2018*

D.V. Bogatyrev, S.N. Makarov, M.A. Antonova, M.I. Bystrov, I.V. Netronin

APPLICATION OF PORTAL TECHNOLOGIES FOR THE PURPOSE OF THE ROSATOM'S PRODUCTION SYSTEM DEVELOPMENT

JSC «Afrikantov OKBM», Nizhny Novgorod

Subject, topic, purpose of the work: Creation of a tool complex to support implementation and development of the ROSATOM's production system (PSR) in JSC "Afrikantov OKBM", online information support of all production process participants, visual presentation of information with possibility of its interactive correction and updating by all participants, on-line data collecting and processing based on interactive forms created on-line, well-ordered storage and processing of PSR project materials as well as reference, methodical, regulative and online information related to PSR, support of teamwork of participants in PSR projects, topic and working groups.

Work method / methodology: The allotted tasks are solved through implementation and introduction of an interactive company's PSR Web portal based on the developed software hardware complex *Design Activity Management System* (SUPD) and resource second-level domain in VM Ware 6 virtual cluster environment.

Results and area of their application: The found solution provides support for implementation and development of the ROSATOM's production system (PSR), arrangement of teamwork for employees involved in PSR projects, information support of users of the company's PSR system.

Conclusions: Application of portal technologies is a prospective method to support PSR implementation in the company and it may be further expanded due to applied online communications, technologies of social media and GroupWare.

Key words: production system of ROSATOM (PSR), Web portal, MS Share Point, 5S System, enhancement of efficiency.

УДК 004.724.2+004.272.43

О.И. Виноградов, Л.С. Ломакина, Н.В. Сильянов

АЛГОРИТМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НА ГРАФ-МОДЕЛЯХ

Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева

Работа посвящена проблеме отказов многопроцессорных вычислительных систем из-за блокировки пакетов данных между узлами. Исследованы варианты построения неблокирующих сетей. В качестве неблокирующей структуры выбран расширенный обобщенный гиперкуб. Узлы гиперкуба связаны простейшими сетями, имеющими структуру квазиполного однородного двудольного графа. Разработан алгоритм построения отказоустойчивой многопроцессорной системы со структурой расширенного обобщенного гиперкуба. Приведен пример программной реализации алгоритма в виде консольного приложения на языке Java.

Ключевые слова: отказоустойчивость, неблокирующая сеть, квазиполный граф, расширенный обобщенный гиперкуб.

В настоящее время одним из актуальных вопросов построения многопроцессорных систем является эффективность использования необходимого количества портов для коммуникаций между узлами. Наиболее распространенным отказом многопроцессорной сети является блокировка пакетов данных между узлами, что приводит к простоям процессоров и негативно сказывается на времени выполнения задачи. Также при этом повышаются затраты на обслуживание системы. В связи с изложенным целесообразно рассматривать проблему еще на стадии проектирования системы.

Разработаны алгоритмы построения отказоустойчивой многопроцессорной системы со структурой расширенного обобщенного гиперкуба. Преимущество этого метода заключается в использовании «квазиполных» графов, которые позволяют построить отказоустойчивую и масштабируемую архитектуру, сохранив при этом маршрутные свойства.

Основные понятия

Базовым понятием в данной работе является сеть Клоза. Сеть Клоза – один из видов многокаскадной неблокирующей коммутационной сети. Это означает, что в данной сети любой входной порт может быть подключен к любому свободному выходу без влияния на уже существующие соединения. Пример сети Клоза показан на рис. 1.

Сеть Клоза имеет три каскада: входной, промежуточный и выходной. Каждый каскад состоит из перекрестных коммутаторов, носящих название кроссбар. Каждый сигнал попадает на входной кроссбар, после чего направляется в любой кроссбар промежуточного каскада, который имеет свободную линию связи с входными и выходными кроссбарами, после чего направляется на кроссбар выходного яруса [1].

Моделью межсоединений в сети Клоза является полный однородный двудольный граф. Однородный двудольный граф $D(X, Y, m, r)$ – граф, состоящий из двух непустых множеств вершин с одинаковой степенью, где X – множество кроссбаров первого и третьего каскадов; Y – множество кроссбаров второго каскада, а m и r – степень вершин X и Y соответственно. В данной работе рассматривается случай, когда в каждой доле имеется одинаковое количество вершин ($X = Y = m = r$) – такие графы называют симметричными [2].

Как можно заметить из рис. 2, а, основным недостатком полного графа является большое количество связей. Поэтому возникает вопрос уменьшения количества связей между узлами. И его можно решить при помощи квазиполных графов. Однородный двудольный граф называется «минимально квазиполным», если каждый элемент множества X связан со всеми

остальными элементами своего множества единственным путем длины 2, который проходит через один из элементов множества Y [2]. Пример такого графа показан на рис. 2, б.

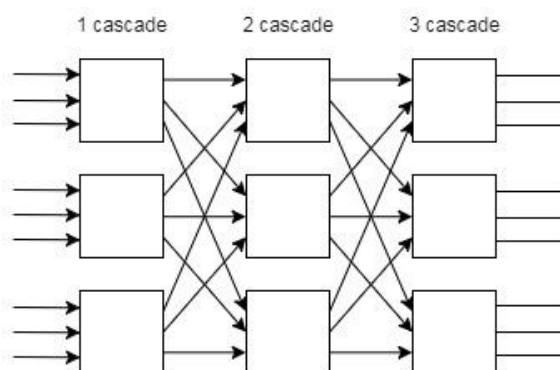


Рис. 1. Сеть Клоза

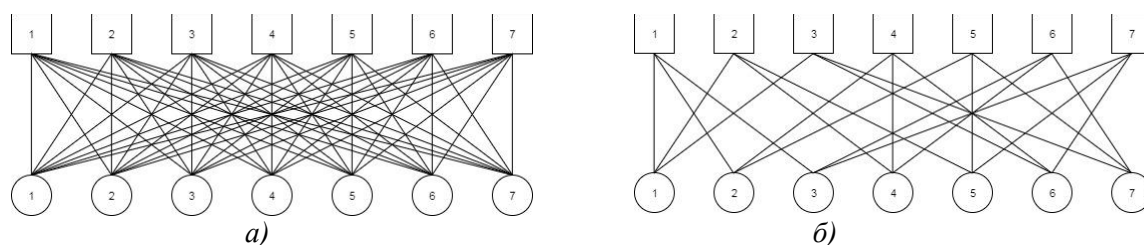


Рис. 2. Однородные двудольные графы:

а – полный с параметрами $X = Y = m = r = 7$;

б – минимально квазиполный с параметрами $X = Y = 7, m = r = 3$

Как видно из рис. 2, минимально квазиполный граф имеет намного меньше ребер. Количество вершин равно $N = X = Y = \frac{m(m-1)}{\sigma} + 1$, где $\sigma < m$ и задает число путей длины 2 между двумя различными узлами. В данном случае $\sigma = 1$.

Описанные структуры используются при построении связей в обобщенном гиперкубе.

Обобщенный гиперкуб представляет собой n -мерный s -ный гиперкуб, который имеет $V = s^d$ узлов степени $d(s-1)$, размещенных в строках или столбцах по s узлов, задающих геометрические ребра d -мерного простого куба. Узлы данного обобщенного гиперкуба по столбцам и строкам будут иметь топологию полного однородного двудольного графа. Пример обобщенного гиперкуба показан на рис. 3.

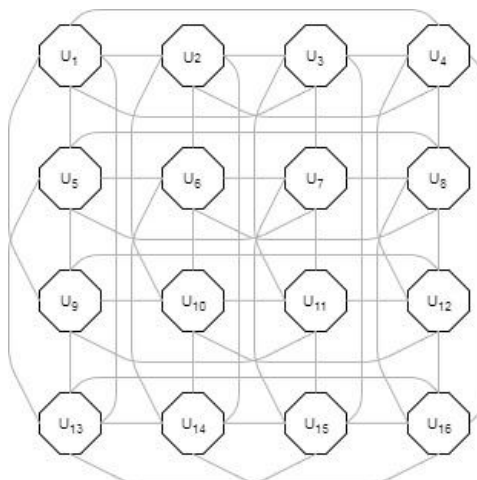


Рис. 3. Обобщенный гиперкуб с параметрами $V = 16, d = 2, s = 4$

Для реализации системной сети с топологией обобщенного гиперкуба каждый из узлов должен иметь следующую схемную реализацию: узел U_i содержит процессорный узел A_i , «коммутатор измерений» $g \times g$ ($g = d + \pi$ и d коммутаторов каналов $1 \times m$, где $m = s - 1$) для реализации ребер полного графа в каждой строке или столбце [3]. Пример такого узла показан на рис. 4.

Как отмечалось ранее, полный граф имеет слишком большое количество связей и для решения этой проблемы необходимо перейти на структуру квазиполного графа. Расширенный обобщенный гиперкуб является модификацией обобщенного гиперкуба. Для его получения необходимо заменить топологию связей с полного однородного двудольного графа на топологию простейшей сети, которая имеет структуру квазиполного однородного двудольного графа.

Простейшая сеть имеет набор параметров N, m, σ , где N – число элементов и блоков; m – число блоков, в которые входит каждый элемент, и число элементов, входящих в каждый блок; σ – задает число блоков, в которые входит каждая пара элементов.

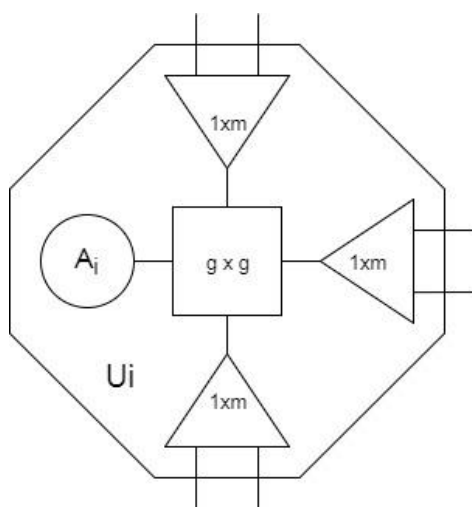


Рис. 4. Общая схемная реализация узла обобщенного гиперкуба

Алгоритм построения системы

В общем виде алгоритм построения системы можно описать следующим образом:

1. Построение обобщенного гиперкуба;
2. Разработка простейших сетей;
 - 2.1 Проверка возможности существования минимального квазиполного графа;
 - 2.2 Построение минимального квазиполного графа;
3. Построение расширенного обобщенного гиперкуба.

На первом этапе строится базовая модель обобщенного гиперкуба. Пример выполнения этого этапа показан на рис. 3.

На втором этапе происходит разработка минимально квазиполных графов. На этапе 2.1 решается вопрос существования минимальных квазиполных графов. Доказать существование минимального квазиполного графа можно при помощи теоремы Брука, Райзера и Човла о существовании симметричных блок-схем.

Теорема Брука, Райзера и Човла [4]: Если существует симметричная блок-схема с параметрами N, m, σ , то, полагая $\eta = m - \sigma$, получаем:

- 1) если N четно, то η есть квадратцелого числа;
- 2) если N нечетно, то уравнение $z^2 = \eta x^2 + (-1)^{\frac{N-1}{2}} \sigma y^2$ имеет решение в целых числах x, y, z , не равных одновременно нулю.

В работе [5] была выведена уравнение, связывающее параметры n и s . Оно имеет следующий вид: $n = s(s - 1)/\sigma + 1$.

В работе [6] приведены возможные параметры для симметричных блок-схем, представленные в табл. 1 и табл. 2.

Таблица 1

Параметры N и m при $\sigma = 1$

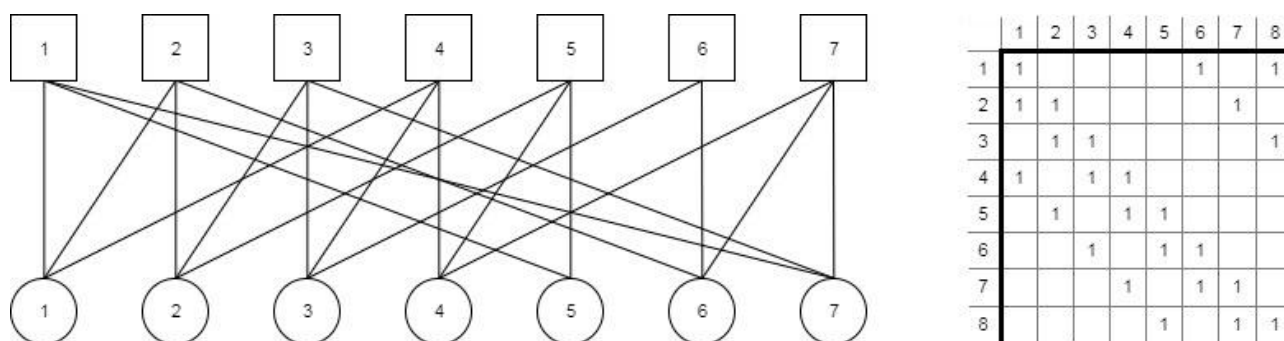
$B(N, m, 1)$						
m	2	3	4	5	6	8
N	3	7	13	21	31	57

Таблица 2

Параметры N и m при $\sigma = 2$

$B(N, m, 2)$						
m	2	3	4	5	6	9
N	2	4	7	11	16	37

На этапе 2.2 выполняется построение минимального квазиполного графа. Имеется несколько методов построения [2]. На рис. 5 изображен пример выполнения этого этапа.

Рис. 5. Вариант с параметрами $N = 7, m = 3, \sigma = 1$

В качестве примера выбрана симметричная блок-схема с параметрами $N = 7, m = 3, \sigma = 1$. В результате были получены следующие данные:

- минимальный квазиполный граф, построенный по имеющейся матрице. Квадратами на рис. 5 будут коммутаторы размерностью $m \times x$, а кругами узлы U_i ;
- матрица, описывающая связи между коммутаторами (строки) и узлами (столбцы) (1-существование ребра).

Получившиеся симметричные блок-схемы можно использовать для описания простейшей сети, которая является неблокируемой самомаршрутизируемой сетью. Это означает, что перестановка пакетов данных между абонентами может осуществляться в нем бесконфликтно по прямым каналам (без промежуточной буферизации пакетов), причем каждый абонент прокладывает свой канал самостоятельно [2].

В свою очередь, простейшие сети используются для построения расширенного обобщенного гиперкуба.

На рис. 6 представлен обобщенный гиперкуб с параметрами $V = 16, d = 2, s = 4$, построенный на этапе 3. Для построения расширенного обобщенного гиперкуба заменим топологию полного графа на получившиеся на предыдущем этапе простейшие сети. Поскольку число узлов в простейшей сети превосходит число имеющихся узлов, то увеличим число узлов с 4 до 7, тем самым «расширив» обобщенный гиперкуб с s до N . В результате получает-

ся расширенный обобщенный гиперкуб, в котором узлы всех строк и столбцов связаны в σ прямыми каналами.

Для формирования отказоустойчивой конфигурации простейшая сеть может быть заменена на 1-расширенную простейшую сеть. В такой сети малая часть узлов одной доли связана $\sigma + 1$ путями длины 2, а остальные – σ путями длины 2. Получившиеся дополнительные независимые пути позволяют формировать $(\sigma - 1)$ -отказоустойчивость по каналам и коммутаторам $m \times m$ каждой простейшей сети. Следует заметить, что при $\sigma = 1$, связи не обеспечивают отказоустойчивость по связным узлам.

Также для обеспечения отказоустойчивости можно использовать избыточность расширенного обобщенного гиперкуба. Для этого необходимо разбить узлы каждой строки на пары четный-нечетный. Каждая такая пара должна входить в состав строки каждого измерения. Это приведет к уменьшению числа строк всех измерений, кроме первого, в два раза, но обеспечит два варианта перехода между строками разных измерений [3].

Аналогичным образом можно строить и отказоустойчивые расширенные обобщенные гиперкубы. Для этого строки должны разбиваться на группы по $(\mu + 1)$ узлов. Однако в этом случае будет уменьшаться пропускная способность между измерениями.

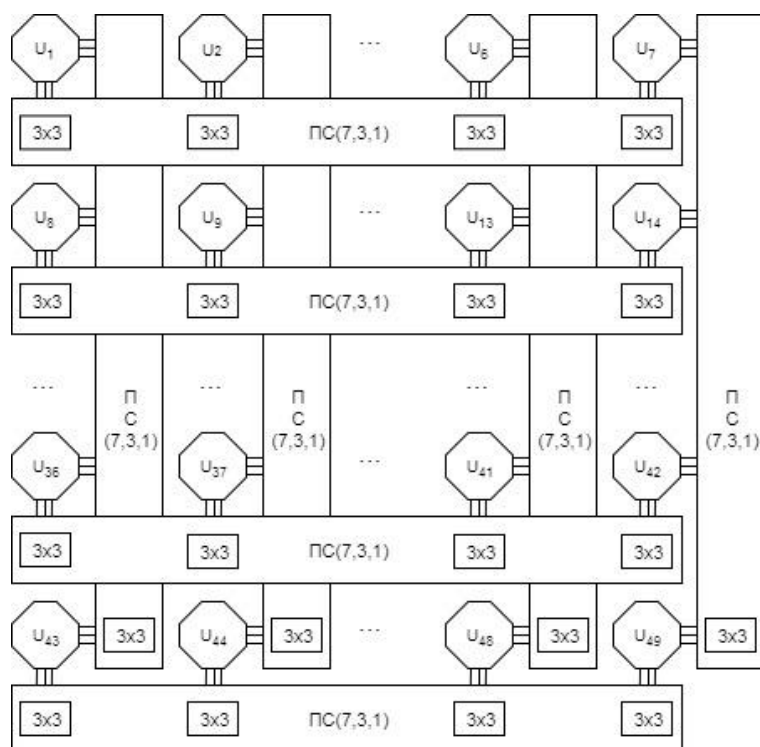


Рис. 6. Расширенный обобщенный гиперкуб с параметрами $V = 49, d = 2, s = 7$, узлы которого связаны (по столбцам и строкам) простейшими сетями с параметрами $N = 7, m = 3, \sigma = 1$

Программная реализация

Разработанный алгоритм реализован в виде консольного приложения на языке Java. Для хранения параметров симметричных блок-схем используется система управления базами данных MySQL. Структура проекта показана на рис. 7.

В модуле **algorithms** хранятся алгоритмы построения симметричных блок-схем. На данный момент реализован один комбинаторный алгоритм для построения симметричных блок-схем с параметром $\sigma=1$.

В модуле **infrastructure** хранятся вспомогательные классы. Основным классом является класс Database.java, реализующий соединение и работу с базой данных MySQL. Осуществляется данный функционал при помощи драйвера MySQL-connector.

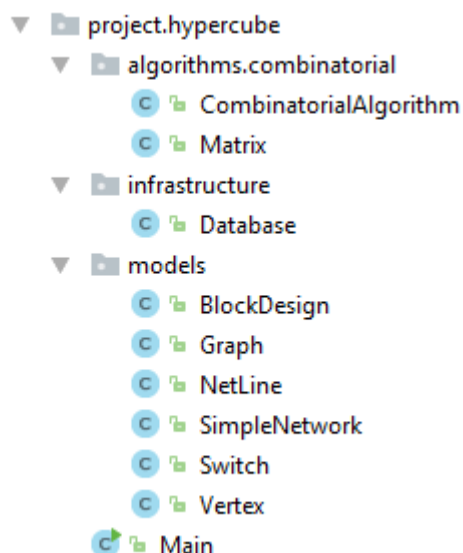


Рис. 7. Структура проекта

Модуль **models** содержит основные модели, используемые для моделирования выполнения алгоритма: BlockDesign для квазиполного графа, Graph для графа гиперкуба, NetLine для каналов связи, SimpleNetwork для системных сетей, Switch для коммутатора, Vertex для узла гиперкуба.

После ввода параметров программа построит гиперкуб, обобщенный гиперкуб и выведет параметры сети. После каждого шага пользователю будет предложено просмотреть список построенных каналов, как показано на рис. 8.

```

Гиперкуб:
Данная модель содержит: 5 узл. и 4 кан.
Получить список каналов ? (Д/Н) Д
Switch №1 [id: 1639705018] <-> Switch №1 [id: 1627674070]
Switch №1 [id: 1627674070] <-> Switch №1 [id: 1360875712]
Switch №1 [id: 1360875712] <-> Switch №1 [id: 1625635731]
Switch №1 [id: 1625635731] <-> Switch №1 [id: 1580066828]
  
```

Рис. 8. Список построенных каналов

Выводы

Модель построения расширенного обобщенного гиперкуба позволяет проектировать системы с увеличивающимся количеством узлов и увеличивающимся числом независимых каналов между любыми парами узлов при сохранении числа портов. Это дает возможность обеспечивать масштабируемость и решить проблему блокировок пакетов данных сети.

Библиографический список

1. **Назаров, А.Н.** АТМ: Технические решения создания сетей: справочное издание / А.Н. Назаров, И.А. Разживин, М.В. Симонов. – М.: Горячая Линия - Телеком, 2001. – С. 376.
2. **Каравай, М.Ф.** Комбинаторные методы построения двудольных однородных минимальных квазиполных графов (симметричных блок-схем) / М.Ф. Каравай, П.П. Пархоменко, В.С. Подлазов // Автоматика и телемеханика. – 2009. – Вып. 2. – С. 153–170.
3. **Каравай, М.Ф.** Расширенный обобщенный гиперкуб как отказоустойчивая системная сеть для многопроцессорных систем / М.Ф. Каравай, В.С. Подлазов // Управление большими системами. – 2013. – Вып. 45. – С. 344–371.
4. **Холл, М.** Комбинаторика / М. Холл. – М.: Мир, 1970.

5. **Подлазов, В.С.** Обобщенные сети Клоза / В.С. Подлазов, В.В. Соколов // Автоматика и телемеханика. – 2009. – Вып. 10. – С. 158–171.
6. **Каравай, М.Ф.** Топологические резервы суперкомпьютерного интерконнекта / М.Ф. Каравай, В.С. Подлазов // Управление большими системами. – 2013. – Вып. 41. – С. 395–423.

*Дата поступления
в редакцию 10.06.2018*

O.I. Vinogradov, L.S. Lomakina, N.V. Sil'yanov

ALGORITHM OF ENSURING FAULT-TOLERANCE OF COMPUTING SYSTEMS BASED ON GRAPH-MODELS

Nizhni Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

Purpose: The article is devoted to multiprocessor systems fault-tolerance problem, when data packets from one node can block another node.

Methodology: Variants of designing non-blocking networks are researched. The extended generalized hypercube is chosen as a non-blocking structure. Nodes of extended generalized hypercube are connected with an elemental networks. Structure of elemental network can be shown as quasi-complete homogeneous bipartite graph.

Findings: The algorithm of designing fault-tolerant multiprocessor system based on extended generalized hypercube is developed.

Research implications: This model allows to scale network structure without any essential modifications of algorithm.

Originality: The example of Java console application realizing the algorithm is shown. Parameters of the model stored with MySQL database.

Key words: fault-tolerance, non-blocking network, quasi-complete graph, extended generalized hypercube.

УДК 681.3.513

Е. А. Никулин

ИССЛЕДОВАНИЕ ФРАКТАЛЬНЫХ ПОЛИЛИНИЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева

Тема работы: Исследование статистических свойств и фрактальной размерности случайных полилиний.**Цель работы:** Установление статистических и фрактальных закономерностей случайных полилиний.**Метод решения:** Случайное ортогональное смещение средних точек отрезков полилинии.**Оригинальность:** Предложен метод оценки размерности неоднородных фракталов.**Выводы:** Получены статистические свойства и фрактальная размерность случайных полилиний.*Ключевые слова:* фрактальная полилиния, срединное смещение, фрактальная размерность.

Многие объекты окружающего мира обладают свойством самоподобия, или **масштабной инвариантности** – точного или приближённого сходства объектов с их отдельными фрагментами и больших фрагментов с меньшими. Математическое описание бесконечно дробимых объектов уравнениями линий или поверхностей [1] чрезвычайно громоздко из-за необъятного количества мельчайших фрагментов. Для преодоления этой трудности математиком Исследовательского центра IBM Бенуа Мандельбротом в 1975 г. был введён термин «**фрактал**» (от лат. *fractus* – дробный), а в 1978 г. опубликован основополагающий труд [2], где описаны свойства фрактальных множеств, методы их получения и применения в моделировании природных явлений.

В компьютерной графике фрактальная тема получила наибольшее распространение для формирования объектов природного ландшафта – линий горизонта, неровных поверхностей, холмов, гор, каньонов и прочих самоподобных, но нерегулярных образований. Нерегулярность самоподобия означает, что фрагменты объекта не точно повторяют его форму в уменьшенном масштабе, а имеют некоторые отклонения от регулярности, носящие случайный (стохастический) характер. Случайность доставляет фрактальному объекту неповторимость, живость и близость к реальным природным образованиям, каждый из которых уникален.

Метод срединного смещения

Всё многообразие методов рандомизации фрактальных множеств объять невозможно, поэтому сосредоточим дальнейшее внимание лишь на одном из них – **методе срединного смещения** [2, 3], основанном на рекурсивном разбиении объекта средними точками и их смещении на случайные расстояния в детерминированном либо случайном направлении. Управление возмущениями заключается в осознанном выборе параметров генераторов случайных чисел (ГСЧ) и уменьшении смещения средних точек по мере уменьшения размеров элементов фрактала.

Используем для моделирования случайных процессов функции генераторов, определённые в [4]:

- $rf(\lambda)$ – генератор центрированных (с нулевым средним) случайных чисел z , распределённых по некоторому закону с параметром разброса λ . Нецентрированные случайные числа со средним значением μ генерируются по формуле $\mu + rf(\lambda)$;
- равномерный ГСЧ $urf(s) = rnd(2s) - s$ с постоянной плотностью вероятности $p(z) = 1/2s$ в ограниченном в интервале $z \in [-s, s]$ и нулевой плотностью вне этого интервала;
- нормальный ГСЧ $nrf(\sigma)$ с гауссовой плотностью вероятности $p(z) = e^{-z^2/2\sigma^2} / \sigma\sqrt{2\pi}$, нулевым средним и среднеквадратичным отклонением (СКО) σ .

Алгоритм построения ФПЛ

Рассмотрим формирование стохастических фракталов на примере построения **фрактальной полилинии** (ФПЛ) на некотором **базовом отрезке** ab . В практических применениях она может изображать след молнии, траекторию случайного блуждания некоторой частицы (наподобие броуновского движения) или линию горизонта холмистой местности. Эта хорошо заметная линия разделяет светлую область неба, где рисуются фрактальные облака, и тёмную область земли с фрактальными деревьями, кустарниками и травой.

На рис. 1, *а* показаны первые три шага дробления отрезка ab с управляемыми случайными **ортогональными смещениями** средних точек разбиваемых отрезков. Величина смещения средней точки $c = (a+b)/2$ является случайным числом $|rf(\lambda)| \cdot |b-a|$, где λ — параметр **нормированного разброса** смещения средней точки, приходящегося на единицу длины отрезка. Знак смещения в ортогональном к отрезку направлении $Lrot(b-a)$, где $Lrot(V) = [-V_y, V_x]$ — функция вращения вектора $V = [V_x, V_y]$ влево на 90° , равновероятно принимает значения «+» либо «-». Например, равномерный ГСЧ $urf(s) \cdot |b-a|$ даёт равновероятное в интервале $[-s, s]$ число длин отрезка ab .

Рекурсивная функция $FPLrec(L, b, \lambda, \delta, r)$ построения **фрактальной полилинии** с аргументами L (списком вершин построенной части линии, последняя вершина которой a является началом следующего отрезка ab), точкой b , параметром разброса λ , минимальной длиной разбиваемого отрезка δ и глубиной рекурсии r работает следующим образом.

	$FPLrec(L, b, \lambda, \delta, r)$
$\{ a = L_{size(L)}, V = b - a;$	// начало отрезка и его направление
если $\{r=0\} \vee \{ V < \delta\}$, то	// условия останова разбиения отрезка
$\{ b \rightarrow L;$	// добавление в список новой точки
$line(a, b);$	// вывод отрезка ab
возврат L };	// выход из рекурсии
$c = a + 0.5V, d = c + rf(\lambda) \cdot Lrot(V);$	// средняя точка и её смещение
$L = FPLrec(L, d, \lambda, \delta, -r);$	// разбиение отрезка ad
возврат $FPLrec(L, b, \lambda, \delta, r);$	// разбиение отрезка db
}	
	

Построение ФПЛ на отрезке ab осуществляется однократным вычислением списка её вершин $L = FPLrec(a, b, \lambda, \delta, r)$. Для создания фрактала на базовой полилинии $p_1 p_2 \dots p_n$ инициализируется начальный список из её первой вершины $L = \{p_1\}$, после чего в цикле

$$L = FPLrec(L, p_i, \lambda, \delta, r) \quad \forall i = \overline{2, n}$$

к нему подстраиваются ФПЛ на отрезках $p_{i-1} p_i$. Фактически это означает построение **фрактальной интерполяционной линии** на узловых точках $p_1 \div p_n$.

На рис. 1, *б* показаны три реализации алгоритма $FPLrec$ на базовом единичном отрезке с применением **равномерного** ГСЧ $urf(s)$ и параметрами $s \in \{0.1, 0.2, 0.3\}$, $\delta = 0$ и $r = 8$. Моделирование с разными значениями s установило следующие **закономерности формы генерируемых линий**:

- при $s < 0.1$ они монотонно направлены от начала к концу базового отрезка, немного отклонены от него и подходят для моделирования молний;
- при $0.2 \leq s < 0.3$ на линиях появляются участки с попятным направлением движения,

они перестают быть монотонными вдоль базового отрезка и подходят для моделирования линий горизонта горных рельефов;

- при $s \geq 0.3$ на ФПЛ появляются петли, что затрудняет их использование как линий горизонта, но делает похожими на природное броуновское движение.

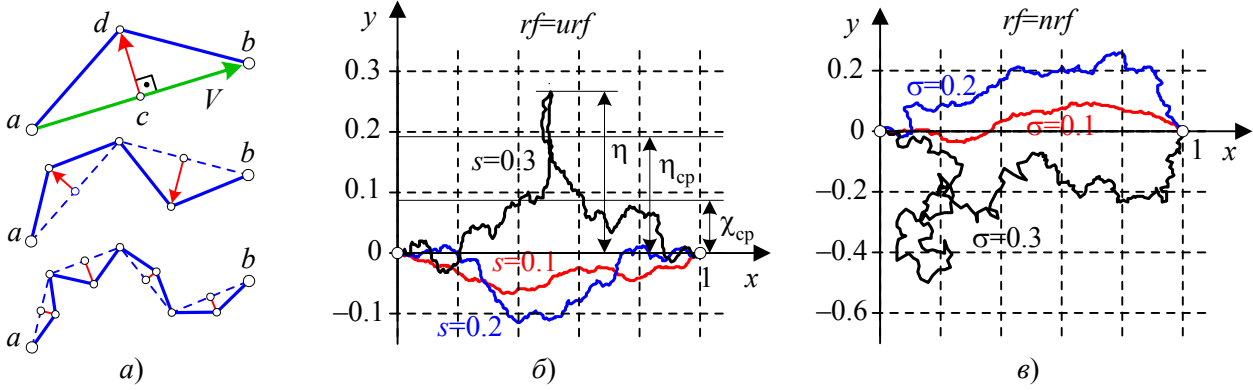


Рис. 1. Фрактальные полилинии

Таким образом, для исключения самопересечений ФПЛ алгоритм рекомендуется использовать при значениях параметра разброса ГСЧ $s < 0.2$, опасно при $0.2 \leq s < 0.3$ и противопоказано при $s \geq 0.3$.

В отличие от равномерного ГСЧ *нормальный генератор* $nrf(\sigma)$ создаёт большую часть случайных чисел с малыми отклонениями от нуля, а меньшую – с большими, при этом максимум отклонений теоретически неограничен. Три реализации алгоритма *FPLrec* с параметрами $\sigma \in \{0.1, 0.2, 0.3\}$, $\delta=0$ и $r=8$ построены на рис. 1, в. Сравнение большого числа реализаций равномерно и нормально распределённых ФПЛ позволяет сделать вывод, что **максимальные отклонения этих двух типов полилиний в среднем одинаковы при соотношении между параметрами разброса $s \approx 2\sigma$** .

Статистические свойства ФПЛ

Для выработки дальнейших практических рекомендаций по использованию алгоритма *FPLrec* с равномерным ГСЧ $urf(s)$ предпримем небольшое статистическое исследование. Каждая фрактальная полилиния $p_1 p_2 \dots p_n$, построенная за r рекурсий разбиения отрезков средними точками, имеет $n=2^r+1$ вершин $p_i = [x_i \ y_i]$, где $i=\overline{1, n}$, и следующие **максимальное** и **среднее отклонения** от базового горизонтального отрезка единичной длины:

$$\eta = \max_{i \in [1, n]} |y_i|, \quad \chi = \text{mean}(|y_i|). \quad (1a)$$

Важной статистической характеристикой полилинии, отражающей её непрямолинейность, является **коэффициент удлинения** — отношение полной длины линии к расстоянию между её концами:

$$\gamma = \sum_{i=1}^{n-1} |p_i - p_{i+1}| / |p_1 - p_n|. \quad (1б)$$

Зададим набор параметров разброса $s_j = 0.01j \ \forall j = \overline{0, 50}$ и для каждого s_j сгенерируем ансамбль из $K=100$ фрактальных полилиний с вычисленными по (1) отклонениями η_k , χ_k и коэффициентами удлинения $\gamma_k \ \forall k = \overline{1, K}$. Рассчитаем средние параметры ансамбля:

$$\eta_{cp} = \text{mean}(\eta_k), \quad \chi_{cp} = \text{mean}(\chi_k), \quad \gamma_{cp} = \text{mean}(\gamma_k). \quad (2)$$

Соответствующие графики для $r=8$ рекурсий приведены на рис. 2, а. Первые две зави-

симости в (2) хорошо аппроксимируются изображёнными пунктирно линейными функциями, а третья — показательно-степенной:

$$\eta_{cp}(s) \approx 0.65s, \quad \chi_{cp}(s) \approx 0.29s, \quad \gamma_{cp}(s) \approx 2^{5.7s^{1.8}}.$$

Вскоре нам потребуется связь коэффициента γ_{cp} не только с параметром разброса s при $r=8$, но и с **переменным числом рекурсий** r . Моделирование усреднённой длины ФПЛ при $r=1, 15$ показало степенную зависимость её двоичного логарифма от s (рис. 2, б) и линейную зависимость от r (рис. 2, в). В результате наилучшее двухпараметрическое приближение коэффициента удлинения обрело следующий вид:

$$\gamma_{cp}(s, r) \approx 2^{\alpha s^\beta r}, \quad \alpha \approx 0.71, \quad \beta \approx 1.82. \quad (3)$$

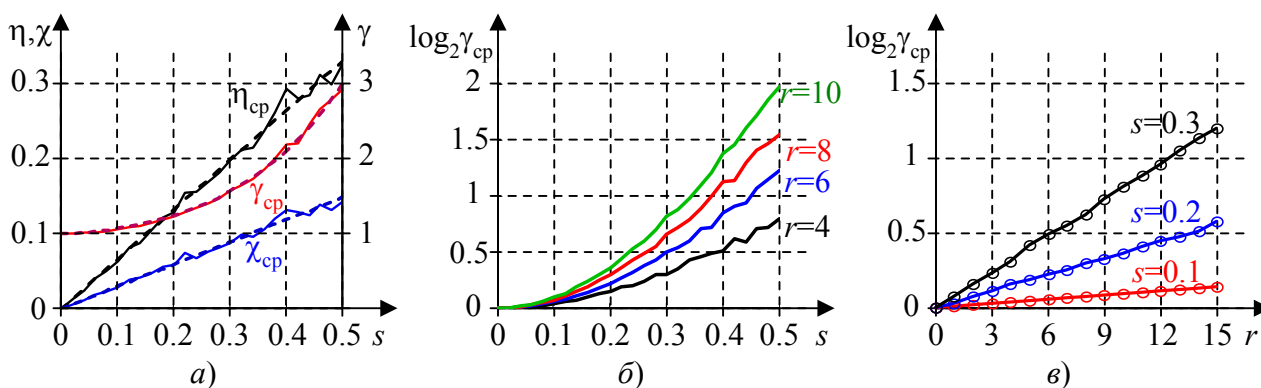


Рис. 2. Свойства усреднённых ФПЛ

А вот каковы статистические оценки ФПЛ с **нормальным** ГСЧ $nrf(\sigma)$:

$$\eta_{cp}(\sigma) \approx 1.23\sigma, \quad \chi_{cp}(\sigma) \approx 0.5\sigma, \quad \gamma_{cp}(\sigma, r) \approx 2^{10.2\sigma^{1.52}r}.$$

Фрактальная размерность

Почему мы так уверенно говорим, что обычная линия одномерна, полигон двумерен, а полиэдр трёхмерен, т. е. описываем число их степеней свободы **топологической размерностью** D_T ? Ведь ясно, что показателем размерности объекта служит не **евклидова размерность** $D_E \geq D_T$, определяемая числом координат пространства, а нечто другое. Линия с $D_T=1$ может быть и на плоскости ($D_E=2$), и в объёме ($D_E=3$), но всё равно она одномерна по числу возможностей движения точки по ней в одну либо обратную стороны. То же касается и поверхности – двумерного объекта ($D_T=2$), который может существовать и в пространстве с евклидовой размерностью $D_E=3$.

Независимо от метода построения все фракталы имеют одно важное общее свойство, характеризующее степень их раздробленности и предельные свойства. Это некоторое число D , называемое **фрактальной размерностью** Хаусдорфа [2, 3]. Следуя Мандельброту и методу Монте-Карло вычисления площадей фигур, её можно определить подсчётом числа N элементов, принадлежащих фрактальному множеству, при различных разрешениях δ – минимальных **линейных размерах элементов**. При достаточно малом δ выполняется условие $N\delta^D \approx \text{const}$. Задав значения δ_1, δ_2 и подсчитав соответствующие числа N_1 и N_2 , из условия $N_1\delta_1^D \approx N_2\delta_2^D$ получим **оценку** размерности объекта

$$D \approx \frac{\log(N_2/N_1)}{\log(\delta_1/\delta_2)}.$$

Здесь и далее оба логарифма могут быть по произвольному, но одинаковому основанию.

Это соотношение приближённое потому, что при определении принадлежности элементов объекту по принципу «да/нет» значение N собрано из округлённых единиц. Иначе пришлось бы учитывать дробные части элементов, что требует разрешения, меньшего δ . Поэтому правильнее будет определить формулу **предельной размерности**:

$$D = \lim_{i \rightarrow \infty} \frac{\log(N_i/N_{i-1})}{\log(\delta_{i-1}/\delta_i)} \quad \text{при } \delta_i < \delta_{i-1}. \quad (4a)$$

Вычислим по ней размерность плоской замкнутой фигуры с **постоянной границей**. Зададим начальное разрешение пространства плоскости $\delta_0=1$, построим растр с этим разрешением и подсчитаем число «узлов» растра, которые закрываются фигурой. Оно, как видно на рис. 3, а, равно $N_0=9$. Первое дробление разрешения до $\delta_1=0.5$ даёт число новых «пикселей» $N_1=43$ (рис. 3, б) и оценку размерности

$$D_1 = \log_2(43/9) \approx 2.2563.$$

Продолжая двукратное уменьшение δ (рис. 3, в), получаем последовательность размерностей

$$D_2 = \log_2(167/43) \approx 1.9574, \quad D_3 = \log_2(683/167) \approx 2.032,$$

$$D_4 = \log_2(2733/683) \approx 2.0005, \quad D_5 = \log_2(10903/2733) \approx 1.9962,$$

быстро сходящуюся к значению $D=2$, равному топологической размерности **площадного нефрактального объекта**.

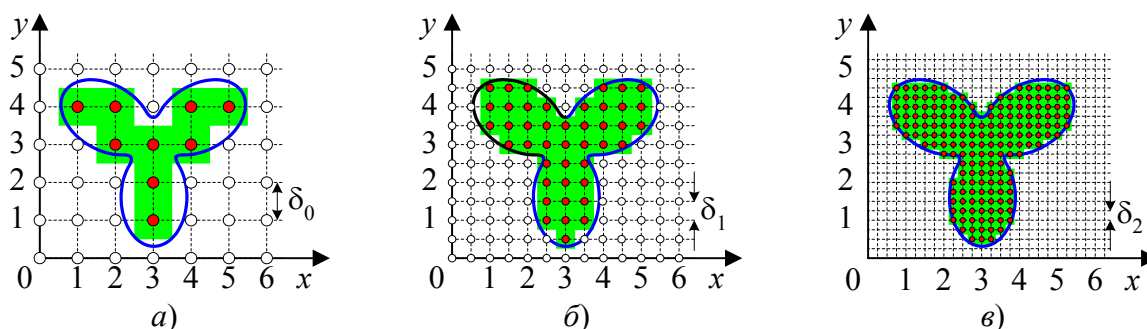


Рис. 3. Вычисление размерности нефрактального объекта

Аналогично вычисляется размерность $D=3$ объёмных тел, ограниченных фиксированными поверхностями. Таким образом, **размерность объектов с постоянными границами равна их топологической размерности D_T** .

При выборе разрешений δ_i совсем не принципиально условие их кратности. Но если при уменьшении разрешения в целое число раз $k_\delta = \delta_{i-1}/\delta_i$ предельный коэффициент увеличения числа элементов $k_N = \lim_{i \rightarrow \infty} (N_i/N_{i-1})$ постоянен, то получим более простую, чем (4a), формулу расчёта размерности фрактального объекта, созданного в **режиме замены** [3]:

$$D = \frac{\log k_N}{\log k_\delta} = \log_{k_\delta} k_N. \quad (4б)$$

В отличие от привычных геометрических объектов фрактальное множество не имеет постоянной границы. Она изменяется с каждым уменьшением разрешения. У аддитивных фракталов происходит приращение «вещества», у субтрактивных — его сокращение. В результате **размерность фрактала может быть дробной!** Так, если **однородный** терагон строится по шаблону, заменяющему единичный отрезок основы на $n \geq 1$ отрезков одинаковой длины $r < 1$, то подставляя в (4б) значения $k_\delta = 1/r$ и $k_N = n$, получим его фрактальную размерность

$$D = -\frac{\log(n)}{\log(r)} = -\log_r(n) = \log_{1/r}(n). \quad (4в)$$

Например, на каждой итерации построения знаменитой **снежинки Коха** [2 – 4] длины элементов уменьшаются вдвое, а их число учетверяется. Фрактальная размерность подобных объектов оценивается по (4в) числом $D = \log_3 4 \approx 1.262$.

Дробные размерности фрактальных множеств — их самая удивительная особенность. Однако не этот признак отличает фрактальные объекты от обычных геометрических фигур. Вычисленное по (4в) значение D вполне может оказаться и целым числом k при $n = r^{-k}$. Особенно интересны фракталы с размерностью $D = D_T + 1$, например, непрерывные **линии Пеано** [2 – 4] с размерностью $D = 2$, свойственной поверхностям. И действительно, аттракторы этих линий плотно (без просветов и наложений) заполняют определённые участки плоскости. Из линий Пеано можно сделать и фрактальные поверхности ($D_T = 2$) размерности $D = 3$, плотно заполняющие 3d-объёмы.

Универсальный способ вычисления размерности фрактала связан с анализом поитерационного изменения числа N_i и количества фрактального «вещества» — **массы фрактала** $M_i = N_i \delta_i^{D_T}$. Масса линейного фрактала с топологической размерностью $D_T = 1$ равна суммарной **длине** всех отрезков, площадного с $D_T = 2$ — сумме **площадей**, а объёмного с $D_T = 3$ — сумме **объёмов** всех N_i элементов, сгенерированных на i -й итерации с линейным разрешением δ_i [2].

Из сравнения $N_{i-1} \delta_{i-1}^D \approx N_i \delta_i^D$, точного в пределе $i \rightarrow \infty$, получим отношение масс фрактала на соседних итерациях при $N_i / N_{i-1} = (\delta_{i-1} / \delta_i)^D$:

$$\frac{M_i}{M_{i-1}} = \frac{N_i}{N_{i-1}} \cdot \left(\frac{\delta_{i-1}}{\delta_i} \right)^{-D_T} = \left(\frac{N_i}{N_{i-1}} \right)^{1-D_T/D} = \left(\frac{\delta_{i-1}}{\delta_i} \right)^{D-D_T}.$$

Теперь расчёт размерности фрактала можно произвести в дополнение к (4а) ещё в двух предельных формах:

$$D = \lim_{i \rightarrow \infty} D_T \left(1 - \frac{\log(M_i / M_{i-1})}{\log(N_i / N_{i-1})} \right)^{-1} = D_T + \lim_{i \rightarrow \infty} \frac{\log(M_i / M_{i-1})}{\log(\delta_{i-1} / \delta_i)}. \quad (4г)$$

Из этих универсальных формул следует:

- при **ненулевой и конечной предельной массе** фигуры M_∞ её фрактальная размерность D совпадает с топологической D_T . Поэтому **не все фрактальные множества имеют дробные или отличные от топологической размерности**;

- если предельная масса **аддитивного фрактала** с возрастающей итерационной массой $M_i > M_{i-1}$ неограниченно растёт, т. е. $M_\infty \rightarrow \infty$, то его размерность $D > D_T$ и может стать дробной;

- если предельная масса **субтрактивного фрактала** с убывающей итерационной массой $M_i < M_{i-1}$ сходится к $M_\infty \rightarrow 0$, то его размерность $D < D_T$ и также может быть дробной;

- для однородного фрактала, созданного поэлементной заменой основы с массой $M_0 = N_0 \delta_0^{D_T}$ шаблоном из $n \geq 1$ элементов с **линейным размером** $r < 1$, на i -й итерации имеем $\delta_i = r^i$, $N_i = N_0 n^i$ и $M_i = M_0 (nr^{D_T})^i$. Отсюда следует $\delta_{i-1} / \delta_i = 1/r$, $N_i / N_{i-1} = n$, $M_i / M_{i-1} = nr^{D_T}$ и совпадающая с (4в) размерность

$$D = D_{\tau} + \frac{\log(nr^{D_{\tau}})}{\log(r^{-1})} = -\frac{\log(n)}{\log(r)}.$$

Формулы (4) полагают, что фрактал состоит из однородных элементов, как, например, линия Коха или треугольник Серпинского. Однако таковы не все фрактальные множества, например, изучаемые здесь фрактальные полилинии (см. рис. 1) и все линии и поверхности, созданные методом срединного смещения, сложены из элементов **разных** размеров, т. е. являются **неоднородными** [2].

Обозначив длины n элементов шаблона как $r_1 \div r_n$, оценим суммарную относительную массу элементов в D_{τ} -пространстве $m = r_1^{D_{\tau}} + r_2^{D_{\tau}} + \dots + r_n^{D_{\tau}}$ с точностью до множителя, связывающего их линейные и площадные или объёмные размеры. Мандельброт в [2] определил **размерность подобия** неоднородного фрактала как корень степенного уравнения

$$D: r_1^D + r_2^D + \dots + r_n^D = 1.$$

В случае **однородного шаблона** с единым значением $r_k = r < 1 \quad \forall k = \overline{1, n}$ корень уравнения $nr^D = 1$ совпадает с (4в).

Во избежание решения нелинейного уравнения найдём на i -й итерации число элементов фрактала $N_i = N_0 n^i$ и его массу $M_i = M_0 m^i$. Тогда простая беспредельная формула **массовой фрактальной размерности** принимает вид

$$D = D_{\tau} \left(1 - \frac{\log(m)}{\log(n)} \right)^{-1} = \frac{D_{\tau}}{1 - \log_n(m)} = \frac{\log(n)}{\log(n) - \log(m)} D_{\tau}. \quad (5)$$

Она применима при естественных требованиях $r_k < 1 \quad \forall k = \overline{1, n} \Rightarrow m < n$, означающих, что в шаблоне нет ни одного отрезка с длиной $r_k \geq 1$, приводящей к неограниченному росту массы фрактала и отсутствию у него аттрактора. При $n=1$ и $m < 1$ размерность фрактала, вырождающегося в точку, становится нулевой.

В случае **однородного шаблона** со всеми значениями $r_k = r < 1 \quad \forall k = \overline{1, n}$ и массой $m = nr^{D_{\tau}}$ размерность (5) также становится равной (4в).

У аддитивного фрактала, созданного путём **добавления** $n \geq 1$ элементов **неоднородного шаблона** к каждому элементу предыдущей итерации, число элементов и масса на i -й итерации представляют собой суммы геометрических прогрессий

$$N_i^{\Sigma} = \sum_{k=0}^i N_k = \frac{n^{i+1} - 1}{n - 1} N_0, \quad M_i^{\Sigma} = \sum_{k=0}^i M_k = \frac{m^{i+1} - 1}{m - 1} M_0.$$

При $m < 1$ масса аттрактора конечна и сходится к $M_{\infty}^{\Sigma} = M_0 / (1 - m)$, иначе она бесконечна из-за расходимости геометрической прогрессии. Предельная масса фрактала с однородным шаблоном массой $m = nr^{D_{\tau}}$ конечна при $nr^{D_{\tau}} < 1$, т. е. при линейном размере $r < n^{-1/D_{\tau}}$.

Размерность **неоднородного аддитивного фрактала** находится по первой формуле (4г), в которой N_i и M_i заменены на N_i^{Σ} и M_i^{Σ} . Вычислив пределы

$$\lim_{i \rightarrow \infty} \frac{N_i^{\Sigma}}{N_{i-1}^{\Sigma}} = \lim_{i \rightarrow \infty} \frac{n^{i+1} - 1}{n^i - 1} = n, \quad \lim_{i \rightarrow \infty} \frac{M_i^{\Sigma}}{M_{i-1}^{\Sigma}} = \lim_{i \rightarrow \infty} \frac{m^{i+1} - 1}{m^i - 1} = \max\{m, 1\},$$

получим беспредельные формулы расчёта размерностей аддитивных фракталов:

- если суммарная масса элементов шаблона $m < 1$ и, как говорилось ранее, масса аттрактора конечна, то его размерность равна топологической:

$$D = \frac{D_T}{1 - \log(1)/\log(n)} = D_T;$$

- при $m \geq 1$ фрактальная размерность аддитивного фрактала вычисляется по (5) и составит значение $D \geq D_T$.

Экспериментальная оценка размерности ФПЛ

Фрактальная полилиния является стохастическим линейным фракталом с неоднородными элементами. Оценим размерность ФПЛ, генерируемых функцией $FPLrec(a, b, s, 0, r)$ (см. рис. 1, б), с учётом зависимости (3) коэффициента удлинения $\gamma_{cp}(s, r)$ от параметра разброса s равномерного ГСЧ $urf(s)$ и числа рекурсий r . Так как на каждой рекурсии число отрезков удваивается ($N_r = 2^r$) и общая длина ФПЛ оценивается по (3) значением $M_r(s) \approx 2^{\alpha s \beta r} > M_{r-1}(s)$ при $\alpha \approx 0.71$ и $\beta \approx 1.82$, то по (4г) получим быструю оценку фрактальной размерности ФПЛ

$$D_r(s) = \frac{1}{1 - \log_2(M_r(s)/M_{r-1}(s))} = \frac{1}{1 - \alpha s \beta} = \text{const } \forall r. \quad (6)$$

Например, $D_r(0.1) \approx 1.011$, $D_r(0.2) \approx 1.04$ и $D_r(0.3) \approx 1.086$.

На рис. 4, а построены зависимости коэффициентов удлинения ФПЛ $\gamma_{cp}(s, r)$, усреднённые по 100 реализациям функции $FPLrec(a, b, s, 0, r)$ для каждого числа рекурсий $r = \overline{0, 15}$ и значения параметра разброса $s \in \{0.1, 0.2, 0.3\}$. Пунктиром показаны графики $M_r(s)$, достаточно близко, гладко и быстро аппроксимирующие долго вычисляемые зависимости $\gamma_{cp}(s, r)$.

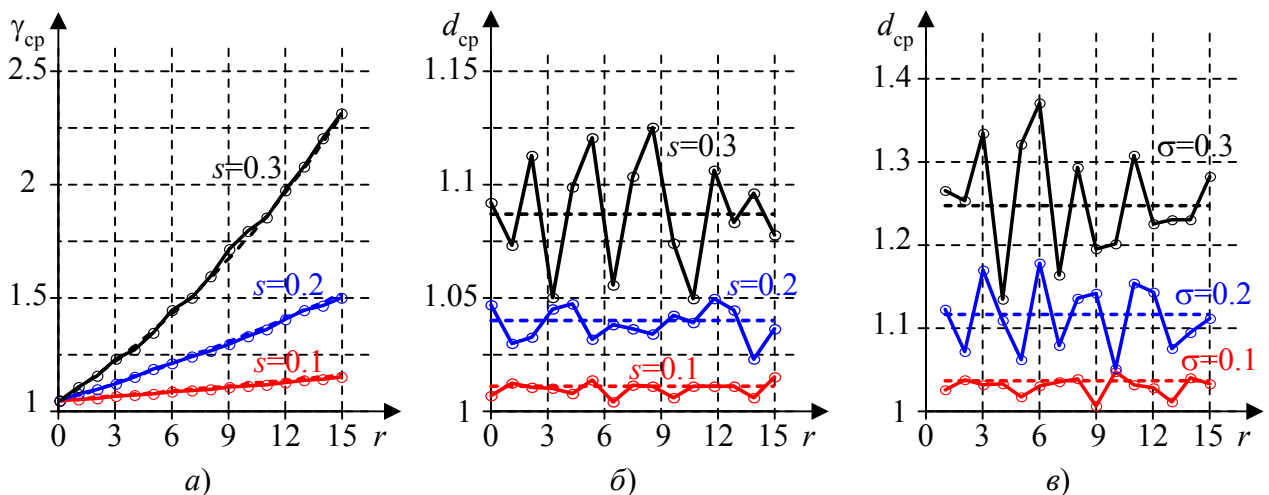


Рис. 4. Усреднённые длина и размерность ФПЛ

На рис. 4, б построены также долго вычисляемые негладкие усреднённые зависимости фрактальной размерности $d_{cp}(s, r)$ и их быстро вычисляемые по (6) аппроксимирующие оценки $D_r(s) = (1 - 0.71s^{1.82})^{-1}$, независимые от числа рекурсий r . Для сравнения на рис. 4, в приведены графики усреднённых размерностей $d_{cp}(\sigma, r)$ ФПЛ с нормальным ГСЧ $nrf(\sigma)$ для значений СКО $\sigma \in \{0.1, 0.2, 0.3\}$ при оценке массы фрактала (длины ФПЛ) $M_r(\sigma) \approx 2^{1.34\sigma^{1.58}r}$. Пунктиром построены графики $D_r(\sigma) = (1 - 1.34\sigma^{1.58})^{-1}$, проходящие на уровнях $D_r(0.1) \approx 1.036$, $D_r(0.2) \approx 1.117$ и $D_r(0.3) \approx 1.248$, независимых от числа рекурсий.

Заключение

Итак, мы получили усреднённые характеристики ФПЛ, создаваемых с помощью генераторов равномерно и нормально распределённых случайных чисел. Теперь стало возможно как оценить область расположения полилинии вокруг базового отрезка при заданных значениях s , σ и r , так и задать эти параметры сообразно её желаемому поведению.

Библиографический список

1. **Никулин, Е. А.** Компьютерная графика. Модели и алгоритмы : учеб. пособие для вузов / Е. А. Никулин. – СПб.: Лань, 2017. – 708 с.
2. **Мандельброт, Б.** Фрактальная геометрия природы / Б. Мандельброт. – М.: Институт компьютерных исследований, 2002. – 656 с.
3. **Кроновер, Р. М.** Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории / Р. М. Кроновер. – М.: Постмаркет, 2000. – 352 с.
4. **Никулин, Е. А.** Компьютерная графика. Фракталы : учеб. пособие для вузов / Е. А. Никулин. – СПб.: Лань, 2018. – 100 с.

*Дата поступления
в редакцию 01.06.2018*

E.A. Nikulin

INVESTIGATION OF FRACTAL POLYLINES

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

Purpose: The establishment of statistical and fractal regularities of random polylines.

Methodology: Random orthogonal displacement of midpoints of polyline segments.

Experiments: A statistical experiment was performed to evaluate the length and dimension of a fractal polyline.

Results: Statistical properties and fractal dimension of random polylines are obtained.

Findings: A method for estimating the dimension of inhomogeneous fractals is proposed.

Research implications: Computer synthesis of random fractal objects with desired properties.

Key words: fractal polyline, mean displacement, fractal dimension.

УДК 004.93

П.А. Шагалова

РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА РАСПОЗНАВАНИЯ ТРЕЩИН НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ МИКРОСКОПИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Цель: Данное исследование посвящено разработке подхода к решению проблемы распознавания трещин на изображениях, полученных при микроскопии.

Методология / подход: Разработанный алгоритм основан на анализе скелета изображения и применении детектора угловых точек.

Результаты: Разработана и протестирована система обнаружения трещин.

Применение: Предложенный подход может быть использован для автоматизации решения задач оптической микроскопии путем анализа изображений.

Оригинальность / значение: Исследования в области обработки изображений, полученных при микроскопии, позволят повысить эффективность исследований материалов.

Ключевые слова: автоматизация, распознавание образов, трещина, микроскопия.

Микроскопический анализ растрескивания материала – инструмент, используемый для исследования его состава и свойств. Такой подход используется для оценки поврежденности металла в задаче определения ресурсных характеристик оборудования [1], при изучении механизма взрывного разрушения горных пород [2], в задачах медицинской диагностики (например, при кристаллографии биологической жидкости [3]). Автоматизация распознавания изображений трещин, полученных при микроскопии исследуемого образца, является важной и перспективной областью, позволяющей повысить эффективность исследований материалов.

Каждая задача в прикладных областях имеет свою специфику и требует разработки и применения соответствующих алгоритмов решения. В данной работе предложен подход, применяемый для решения наиболее общих частей задачи распознавания трещин на изображениях. Применение разработанного алгоритма к конкретной задаче требует его настройки подбором значений части параметров алгоритма, а также дополнением его особенностями, свойственными конкретной задаче.

Задача распознавания трещин часто сводится к распознаванию линий на изображении, поэтому одним из основных алгоритмов, применяемых для поиска трещин, является преобразование Хафа. Однако алгоритм Хафа позволяет определить только четкие и прямые трещины. Задача поиска трещин произвольной формы остается открытой и требует иных подходов.

В разработанном алгоритме каждая трещина рассматривается как кривая на плоскости. На изображении кривая определяется множеством пикселей и может быть описана в виде функции координат пикселей, заданной в параметрической форме:

$$\begin{cases} y = y(t) \\ x = x(t) \end{cases} \quad (1)$$

где $t = [1, 2, \dots, N]$ (N – количество пикселей в кривой); $x(t)$ – координаты по оси абсцисс пикселей трещины; $y(t)$ – координаты по оси ординат пикселей трещины. Такой способ описания позволяет осуществить хранение и обработку трещин любого вида.

Также при разработке алгоритма было учтено то, что в большинстве случаев на входном изображении представлена не одна трещина, а целая сеть трещин, соединенных друг с другом. При этом ключевой информацией для определения количества и вида трещин являются точки их соединения. Принимая этот факт во внимание, были сформулированы три основных этапа алгоритма.

На первом этапе предлагается построить скелет изображения. Скелет изображения, с одной стороны, отражает информацию о трещинах, являющихся искомыми объектами на изображении, а с другой – позволяет рассматривать каждую трещину как функцию, поскольку толщина скелета изображения составляет один пиксель. Построение скелета происходит в три этапа: выполняется бинаризация, применяются операции морфологического открытия и закрытия, исследуется алгоритм утончения. Выбор конкретного алгоритма бинаризации, алгоритма утончения, а также размера фильтра для морфологических операций (при необходимости их применения) определяются спецификой конкретной задачи.

На втором этапе выполняется поиск угловых точек. Угловыми точками называются ключевые точки, в которых сходятся две или более граней (рис. 1).

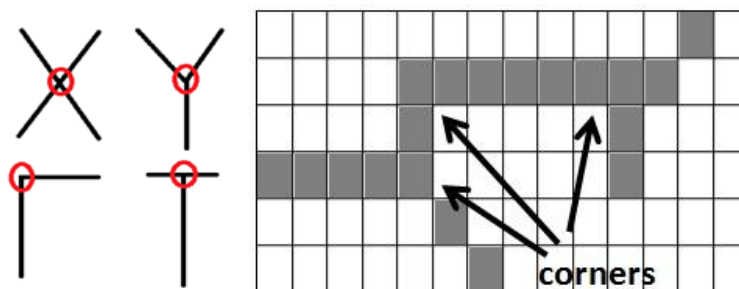


Рис. 1. Примеры угловых точек

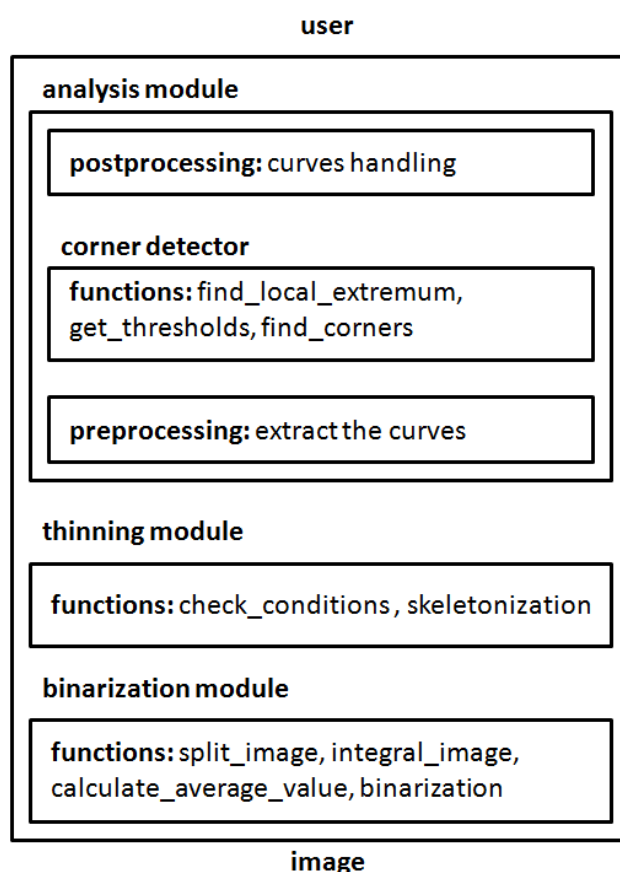


Рис. 2. Структура разработанного программного обеспечения

На третьем этапе скелет разбивается по угловым точкам. В зависимости от особенностей формирования трещин в конкретной задаче выполняется их обработка, например, удаляются мелкие трещины или трещины, угол между которыми составляет 180 град., объединяются в одну.

Реализация разработанного алгоритма выполнена на языке C++ с использованием библиотеки OpenCV. Разработанное программное обеспечение включает три основных модуля: модуль бинаризации, модуль утончения, модуль анализа трещин. Структура разработанного программного обеспечения представлена на рис. 2.

Модуль бинаризации содержит реализацию алгоритма Брэдли – адаптивного алгоритма, при котором исходное изображение разбивается на сектора и для каждого из них рассчитывается величина порога бинаризации по формуле

$$threshold = Im + t, \quad (2)$$

где Im – среднее значение яркости пикселей рассматриваемого сектора; t – 15% от среднего значения яркости пикселей.

Кроме того, в алгоритме Брэдли для скорости и удобства проведения вычислений используется интегральное изображение. Таким образом, в модуле бинаризации реализованы функции построения интегрального изображения, разбиения изображения на сектора, вычисления значения порога для каждого сектора и бинаризация.

Для утончения изображения в разработанном программном обеспечении был реализован алгоритм Зонг-Суня [4], предполагающий построение скелета удалением из бинаризованного изображения пикселей, удовлетворяющих условиям, определенным в алгоритме. При реализации данного алгоритма были написаны две функции: первая выполняет проверку условий алгоритма, вторая – скелетизацию изображения.

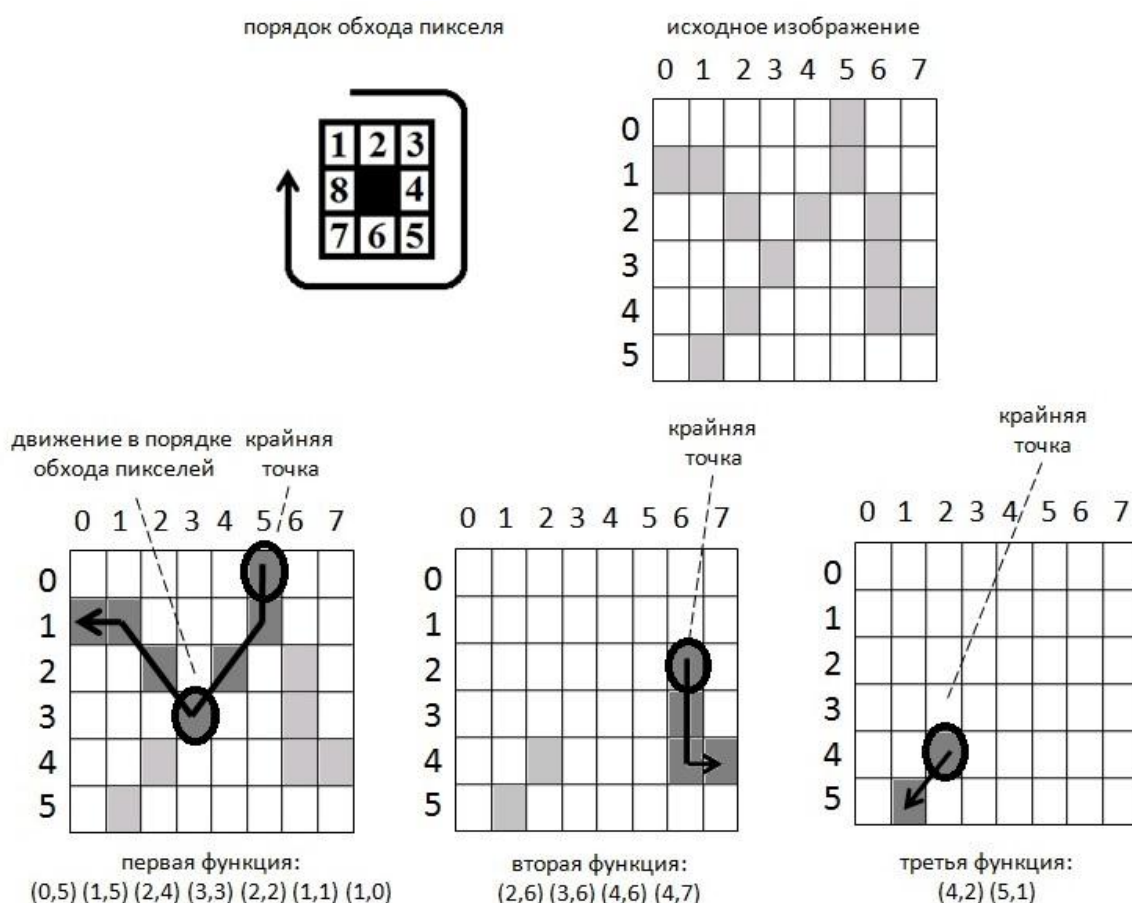


Рис. 3. Пример начального деления скелета на трещины

Модуль анализа трещин содержит три части: предобработку изображения, поиск угловых точек и постобработку изображения. В процессе предобработки происходит начальное деление скелета на функции (трещины). Крайними точками будем называть пиксели, окрестность которых содержит только один закрашенный пиксель. Связными будем называть два со-

седних закрашенных пикселя. При выполнении процесса выделения каждой очередной функции осуществляется просмотр всех пикселей изображения скелета (слева направо и сверху вниз) до обнаружения крайней точки, затем осуществляется движение по связным пикселям, направление движения при этом определяется порядком обхода окрестности пикселя (рис. 3).

Для анализа трещин с целью выявления их угловых точек был выбран подход, описанный в детекторе, основанном на глобальных и локальных свойствах кривизны [5]. Предложенный в детекторе подход заключается в построении для каждой функции-трещины соответствующей функции кривизны и последующем анализе точек экстремума (рис. 4).

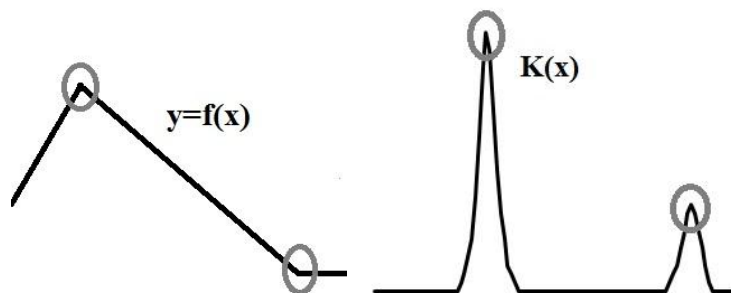


Рис. 4. Пример функции и соответствующая ей функция кривизны

Согласно алгоритму, основанному на глобальных и локальных свойствах кривизны:

- для каждой функции-трещины рассчитывается функция кривизны по формуле (3):

$$K_i^j = \frac{\Delta x_i^j \Delta^2 y_i^j - \Delta^2 x_i^j \Delta y_i^j}{[(\Delta x_i^j)^2 + (\Delta y_i^j)^2]^2}, \quad (3)$$

где x_i^j, y_i^j – координаты i -го пикселя j -й трещины, $\Delta x_i^j = \frac{x_{i+1}^j - x_{i-1}^j}{2}$, $\Delta y_i^j = \frac{y_{i+1}^j - y_{i-1}^j}{2}$, $\Delta^2 x_i^j = \frac{\Delta x_{i+1}^j - \Delta x_{i-1}^j}{2}$, $\Delta^2 y_i^j = \frac{\Delta y_{i+1}^j - \Delta y_{i-1}^j}{2}$;

- выполняется поиск экстремумов каждой функции кривизны;
- точки экстремума являются кандидатами в угловые точки;
- для каждой трещины выполняется расчет значения адаптивного порога

$$T(u) = \frac{R}{L_1 + L_2 + 1} \sum_{i=u-L_2}^{u+L_1} |K_i| \quad (4)$$

где R – коэффициент; u – точка экстремума функции кривизны; $L_1 + L_2$ – ширина окрестности с центром в точке u ;

- слабые углы, т.е. точки, значение кривизны в которых меньше порогового, отбрасываются.

Подмодуль поиска угловых точек содержит функцию поиска экстремумов, функцию расчета адаптивного порога и функцию отсеивания ложных углов.

Реализация постобработки изображения включает в себя удаление мелких трещин и объединение трещин, угол между которыми составляет 180 град. (рис. 5).

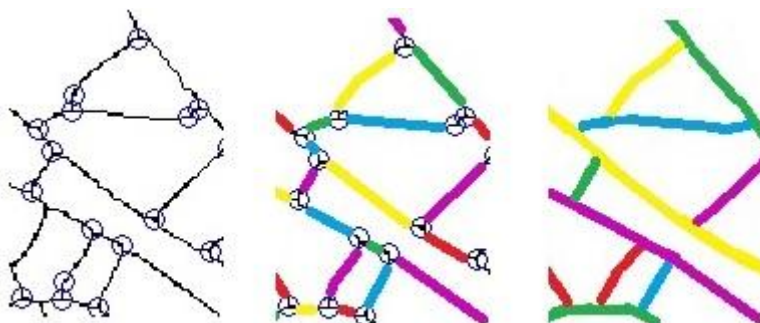


Рис. 5. Пример разбиения скелета по угловым точкам

Апробация алгоритма производилась на изображениях микроструктуры поверхности металлов и сплавов, а также биомедицинских изображениях. Для проведения тестирования было отобрано множество из трехсот изображений. В качестве метрик оценки эффективности разрабатываемой системы распознавания трещин с помощью микроскопии были использованы точность (precision) и полнота (recall). Точность работы алгоритма распознавания трещин на изображениях с растрескиванием материала составила 99,2%, полнота 96,7%.

Для определения эффективности разработанного алгоритма было проведено его сравнение на тестовом множестве с реализованным алгоритмом Хафа. Эксперимент показал, что алгоритм Хафа действительно позволяет распознать на изображениях только четкие прямые трещины, при этом показатели точности и полноты решений составляют 96 и 78% соответственно.

В ходе работы был проведен анализ современного состояния проблемы поиска трещин на изображениях, выявивший актуальность задач повышения точности решений. В результате исследований разработан алгоритм распознавания трещин, включающий в себя выделение скелета, поиск угловых точек с последующим разбиением скелета на трещины. Отличительной особенностью представленного в статье алгоритма является возможность поиска трещин любого вида. Проведенные экспериментальные исследования, а также сравнение работы предложенного алгоритма с известными показали его эффективность. Реализованный алгоритм продемонстрировал высокую точность распознавания трещин на изображениях, что позволяет рекомендовать его к применению при решении практических задач оценки поврежденности поверхностей металлических конструкций или диагностике заболеваний по анализу изображений высохших биологических жидкостей.

Библиографический список

1. **Андреева, О.В.** Модель накопления поврежденности на изображениях микроструктуры поверхности металлов и сплавов на базе клеточных автоматов // Системы управления и информационные технологии. – 2016. – Т. 66. – № 4–1. – С. 114–117.
2. **Кочанов, А.Н.** Динамика развития трещины в граните при взрывном воздействии // Физика. – 2016. – Т. 21. – №3. – С. 795–797.
3. **Шабалин, В.Н.** Морфология биологических жидкостей человека / В.Н. Шабалин, С.Н. Шатохина // Хризостом. – 2001. – 304 с.
4. **Zhang, T.Y.** A fast parallel algorithm for thinning digital patterns / T.Y. Zhang, C.Y. Suen // Commun. – 1984. – V. 27. – №. 3. – P. 236–239.
5. **Chen He, X.** Corner detector based on global and local curvature / X. Chen He, N. Yung // Optical Engineering. – 2008. – V. 47. – №. 5. – P. 1–12.

*Дата поступления
в редакцию 10.06.2018*

P.A. Shagalova

DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF AN ALGORITHM FOR CRACKS RECOGNITION IN MICROSCOPY IMAGES

Nizhni Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

Purpose: The study focuses on solving the problem of automation of cracks recognition in images obtained from microscope.

Design / methodology / approach: The proposed theoretical framework is based on the use of image skeletonization and corner detector.

Findings: The design and testing of the system for cracks recognition.

Research limitations / implications: Proposed approach is used for automation of microscopy image analyzing.

Originality / value: It is possible to conclusion that research in the field of automation of handling of microscopy images will increase efficiency of materials research.

Key words: automation, image recognition, crack, microscopy.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

УДК 621.039.55

В.В. Андреев¹, Н.Г. Андреев², А.А. Кувшинова¹, С.Л. Леванов¹, И.С. Худяков¹

РАСЧЁТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ НЕЙТРОННОГО КОНВЕРТЕРА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
АО «ОКБМ Африкантов»²

Проведено расчётно-теоретическое обоснование конструкции нейтронного конвертера. Выполнены нейтронно-физический расчет установки по программам DOT-III и MCNP-5 и расчёт степени активации материалов по программе DOTActiv. Получены значения мощности дозы на поверхности установки и плотности потока тепловых нейтронов в канале для измерений.

Ключевые слова: нейтронный конвертер, биологическая защита, нейтронная физика, DOT-III, MCNP-5.

В соответствии с программой развития НГТУ как опорного вуза лабораторная установка «Нейтронный конвертер» является базовым направлением развития кафедры ЯРиЭУ и всего ИЯЭиТФ в целом. Нейтронный конвертер - установка, предназначенная для конвертации потока нейтронов в тепловую область спектра. Область применения установки – проведение научно-исследовательских и лабораторных работ.

На начальном этапе реализации проекта, в соответствии с техническим заданием, требовалось расчётно-теоретическое обоснование конструкции конвертера.

При выполнении расчётно-теоретического обоснования были решены задачи определения:

- потока тепловых нейтронов в центральном канале установки;
- мощности дозы излучения на поверхности установки;
- активности материалов установки после окончания срока её эксплуатации.

В ходе работы использованы три расчётные программы: DOT-III [1] и MCNP-5 [2] и DOT-Activ [3]. Данные программы основаны на разных математических методах решения поставленных задач: DOT-III - на методе дискретных ординат, MCNP-5 - на методе Монте-Карло. Именно это позволяет повысить достоверность полученных результатов.

Исходные данные

Основными исходными данными для проведения расчёта являются мощность и спектр плутоний-бериллиевого источника, использованного в конвертере, геометрия установки, ядерные концентрации материалов.

В качестве источников нейтронов предполагается использовать шесть источников типа ИБН-6, представляющих собой герметичные двойные ампулы из нержавеющей стали, заполненные интерметаллическим соединением плутония с бериллием. Мощность каждого нейтронного источника $\sim 5 \cdot 10^5$ нейтр/с в 4π телесный угол [4]. В качестве расчетного был принят спектр Pu-Be источника, приведенный в книге К. Бекурца и К. Виртца «Нейтронная физика» [5]. Оцифрованный спектр представлен на рис. 1.

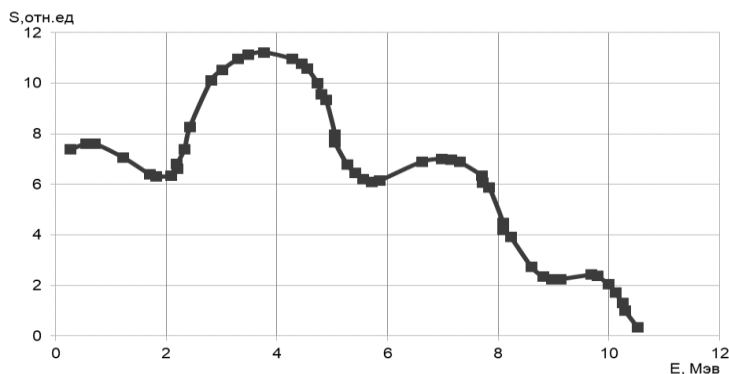


Рис. 1. Оцифрованный спектр Pu-Be источника

Конструктивная схема нейтронного конвертера представлена на рис. 2. Биологическая защита тепловой колонны представляет собой стальные конструкции, заполненные первичным замедлителем (парафином) в месте расположения источников излучения и сплавом парафина с борной кислотой ($31,3\% \text{C}_{30}\text{H}_{62} + 68,7\% \text{H}_3\text{BO}_3$) на периферии. В центре колонны в качестве основного замедлителя использован реакторный графит.

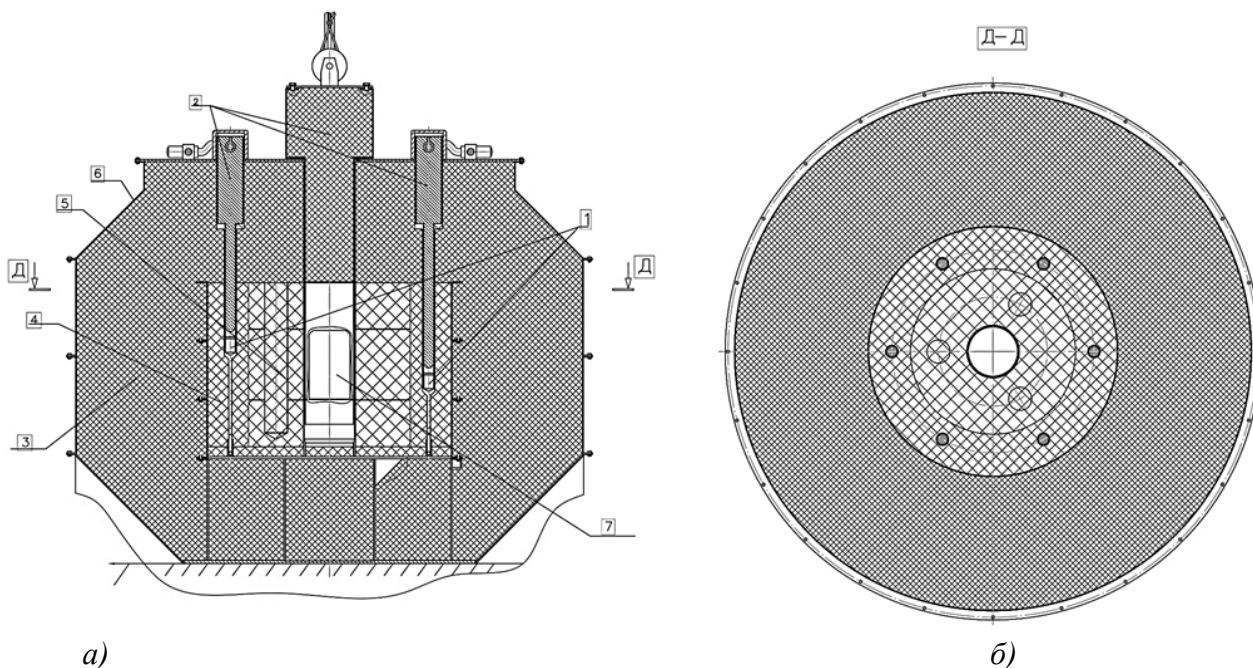


Рис. 2. Конструктивная схема нейтронного конвертера:

а – горизонтальный разрез; б – вертикальный разрез;

1 – источники нейтронов; 2 – пробки; 3 – защита; 4 – парафин; 5 – графит;

6 – корпус; 7 – рабочая полость (канал)

Центральный графитовый блок имеет цилиндрическую воздушную «рабочую» полость с линейными размерами, обеспечивающими размещение в ней исследуемых материалов для облучения. Также в конструкции колонны предусмотрен измерительный блок для помещения образцов на разной высоте

Расчёт по DOT-III

При расчете по программе DOT-III спектр излучения Pu-Be источника усреднялся по энергетическим группам библиотеки констант CASK-40 [6]. Определялась мощность дозы на внешней боковой поверхности установки. Так как программа DOT-III выполняет расчет в двухмерной геометрии, был выполнен расчёт моделей в R-Z и X-Y геометриях. Отметим, что в R-Z геометрии невозможно учесть влияние нескольких источников излучения на мощность

дозы, то есть расчёт можно произвести только для одного источника. В X-Y геометрии модели можно произвести расчёт для всех источников, но при этом не будет учитываться конечный размер высоты источника. Чтобы учесть все указанные условия, необходимо провести ряд дополнительных расчётов.

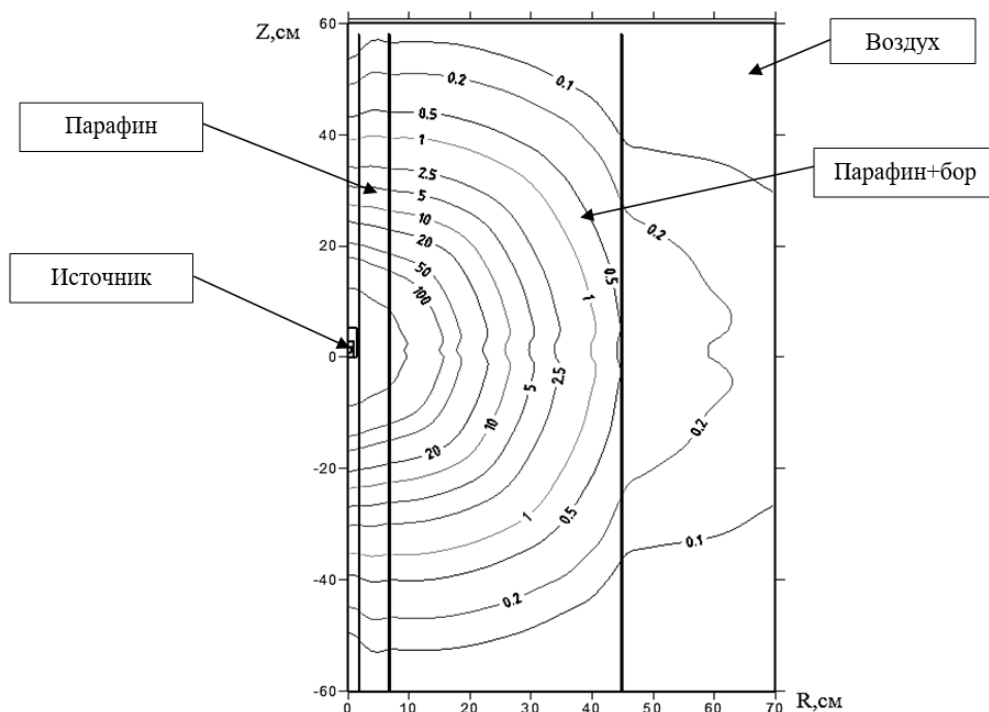


Рис. 3. Распределение суммарной мощности дозы нейтронного и γ -излучения от первого источника (R-Z геометрия), мкЗв/ч

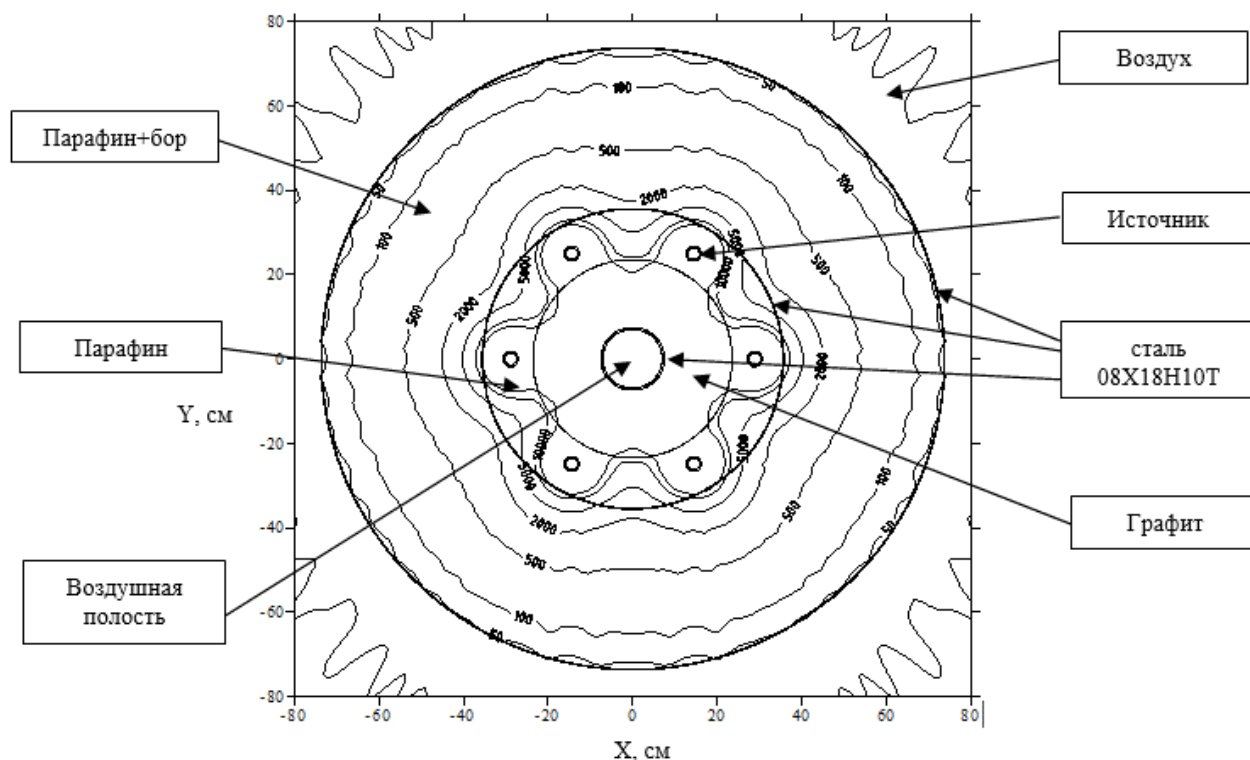


Рис. 4. Распределение суммарной мощности дозы нейтронного и γ -излучения от шестити источников (X-Y геометрия), мкЗв/ч

Схемы расчетных моделей с результатами расчетов суммарной мощности дозы нейтронного и γ -излучения приведены на рис. 3 и рис. 4. Расчеты выполнены с одним источником в R - Z геометрии и с одним и шестью источниками излучения в X - Y геометрии. Расчеты в R - Z геометрии позволяют учесть конечный размер тепловой колонны по радиусу и высоте, а расчеты в X - Y геометрии позволяют учесть влияние шести источников на мощность дозы.

Сравнение результатов расчётов для одного и шести источников в X - Y геометрии позволяет получить коэффициент, показывающий увеличение мощности дозы в зависимости от числа источников. Коэффициент находим по следующей формуле:

$$K = \frac{P_6^{X-Y}}{P_1^{X-Y}},$$

где P_1^{X-Y} и P_6^{X-Y} - мощность дозы в X - Y геометрии для первого источника и для шести источников соответственно.

$$K = \frac{P_6^{X-Y}}{P_1^{X-Y}} = \frac{36,79 \text{ мкЗв/ч}}{23,23 \text{ мкЗв/ч}} = 1,58.$$

Помножив на этот коэффициент результаты, полученные при расчёте в R - Z геометрии, получим значения, отражающие реальную картину распределения излучения:

$$P = K \cdot P_1^{R-Z}$$

где P_1^{R-Z} - мощность дозы в R - Z геометрии для первого источника.

Для вычисления коэффициента были использованы результаты расчета в программе DOT-III.

Мощность дозы на боковой поверхности составляет

$$P = K \cdot P_1^{R-Z} = 1,58 \cdot 0,37 = 0,59 \text{ мкЗв/ч}.$$

При этом мощность дозы γ -излучения – 0,15 мкЗв/ч, нейтронного излучения – 0,44 мкЗв/ч. Полученные значения мощности дозы учитывают количество источников и геометрию тепловой колонны.

Результаты расчёта мощности дозы нейтронного и гамма-излучения представлены в виде изолиний на рис. 3, рис. 4, а также в табл. 1.

Таблица 1
Мощность дозы в средней части внешней боковой
поверхности тепловой колонны

Мощность дозы, мкЗв/ч		
нейтроны	гамма-кванты	сумма
0,44	0,15	0,59

Расчёт по MCNP-5

Первым этапом расчета нейтронного конвертера по программе MCNP-5 является построение расчетной модели установки, которую будет обрабатывать расчетный код.

Расчетная модель включает:

- геометрические параметры установки;
- материалы, использованные в установке;
- мощность, спектр и расположение источников нейтронов.

Геометрия расчетной модели установки представляет собой ряд соосных цилиндров, ограниченных сверху и снизу плоскостями, расположенными на разной высоте. В качестве спектра был принят спектр Pu-Be источника (рис. 1) [5].

Исходя из перечисленного и в соответствии с чертежом общего вида, была построена расчетная модель нейтронного конвертера (рис. 5).

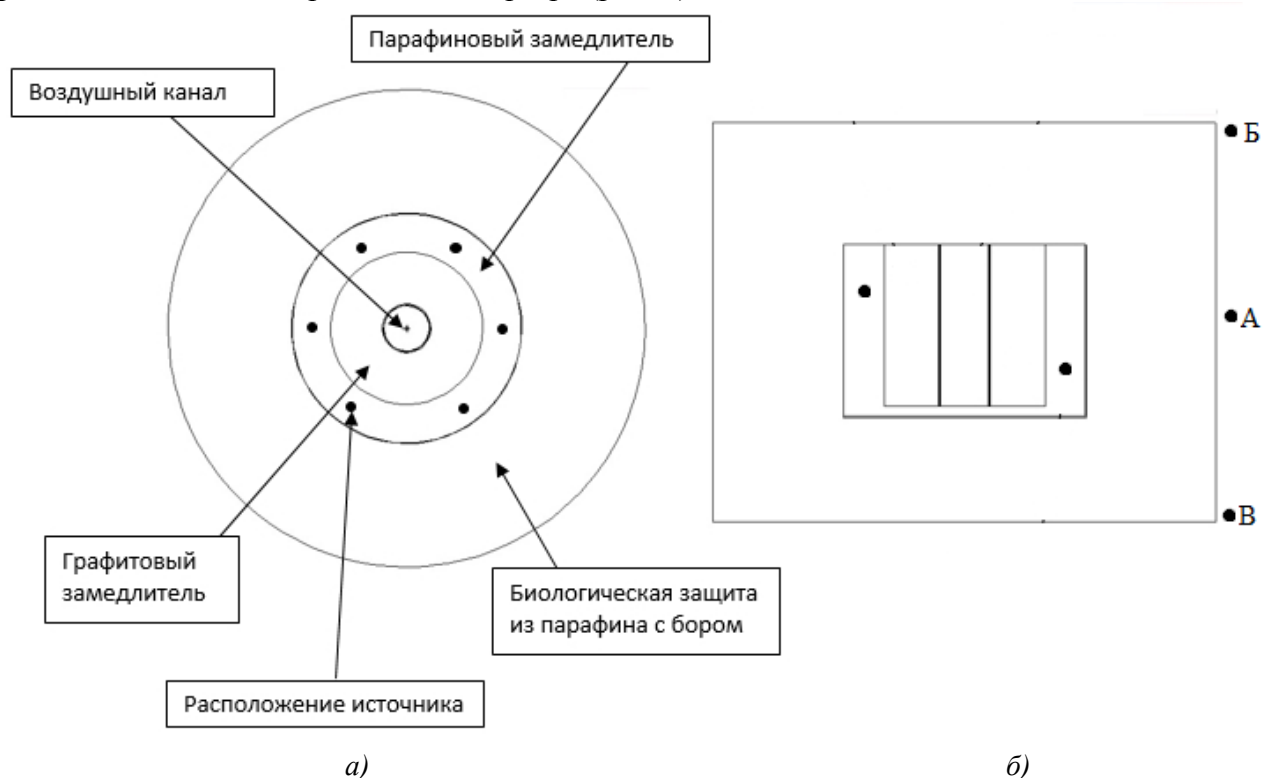


Рис. 5. Расчетная модель установки:
а - горизонтальный разрез; б - вертикальный разрез

Расчет распределения потока тепловых нейтронов по высоте центрального канала

Так как в конструкции колонны предусмотрен измерительный блок, который позволяет помещать образцы в центральный измерительном канале на разной высоте, целесообразно построить распределение потока нейтронов по высоте канала. Для этого в центре канала была создана еще одна ячейка, представляющая собой цилиндр диаметром 1 см. Эта ячейка была разбита на 10 сегментов высотой по 5 см. Расчетная модель центрального канала представлена на рис. 6.

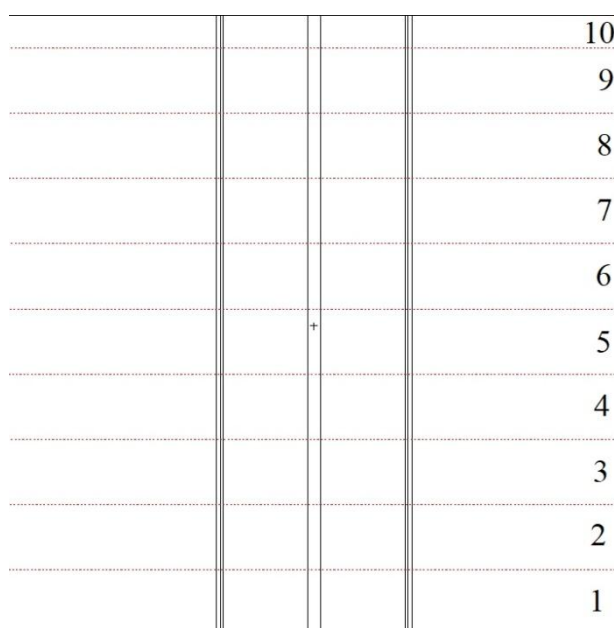


Рис. 6. Расчетная модель центрального канала

В этих ячейках находился средний поток тепловых нейтронов. Распределение потока тепловых нейтронов по радиусу канала в каждом сечении близко к равномерному с небольшим ростом от центра к периферии. Для получения результата необходимой степени точности (среднеквадратичное отклонение $\sigma < 10\%$) было разыграно 50 млн историй. Результаты расчета распределения потока тепловых нейтронов по высоте измерительного канала представлены в табл. 2.

Таблица 2**Распределение потока тепловых нейтронов по высоте центрального канала**

№ сегмента	Высота, см	Поток тепловых нейтронов
1	0-5	318 ± 53 нейтр/см ² с
2	5-10	351 ± 54 нейтр/см ² с
3	10-15	391 ± 53 нейтр/см ² с
4	15-20	417 ± 54 нейтр/см ² с
5	20-25	424 ± 54 нейтр/см ² с
6	25-30	403 ± 54 нейтр/см ² с
7	30-35	350 ± 52 нейтр/см ² с
8	35-40	274 ± 43 нейтр/см ² с
9	40-45	192 ± 36 нейтр/см ² с

Поскольку помещение исследуемых образцов под крышку установки не планируется, результаты расчета потока нейтронов в сегменте 10 не приводятся.

Максимальный поток тепловых нейтронов в измерительном канале составил 424 ± 54 нейтр/см²с. Средний поток тепловых нейтронов по объёму центрального канала равен 331 ± 13 нейтр/см²с.

Несимметричность распределения потока тепловых нейтронов по высоте канала вызвана наличием парафинового замедлителя непосредственно под каналом.

Расчет мощности дозы на поверхности установки

Определение мощности дозы сводится к определению потока нейтронов и фотонов около определенной поверхности с дальнейшим умножением потоков на дозовые коэффициенты. Дозовые коэффициенты использовались из НРБ-99/2009 [7]. Для получения консервативной оценки мощности дозы применялись дозовые коэффициенты при внешнем облучении всего тела в ПЗ геометрии.

Внешняя поверхность установки была разделена на 11 сегментов, в которых определялся поток нейтронов и фотонов для расчета мощности дозы излучения по высоте боковой поверхности. При этом первый сегмент находился в нижней части тепловой колонны.

Результаты расчетов мощности дозы P по высоте боковой поверхности установки представлены в табл. 3.

Таблица 3**Распределение мощности дозы на боковой поверхности по высоте**

№ сегмента	Высота, см	P_n , мкЗв/ч	P_{ph} , мкЗв/ч	P , мкЗв/ч
1	2	3	4	5
3	20-30	$0,13 \pm 0,01$	$0,09 \pm 0,0009$	$0,22 \pm 0,009$
4	30-40	$0,24 \pm 0,013$	$0,12 \pm 0,001$	$0,36 \pm 0,011$

Окончание табл. 3

1	2	3	4	5
5	40-50	$0,37 \pm 0,015$	$0,14 \pm 0,0011$	$0,52 \pm 0,012$
6	50-60	$0,47 \pm 0,018$	$0,16 \pm 0,0011$	$0,62 \pm 0,014$
7	60-70	$0,42 \pm 0,015$	$0,15 \pm 0,0011$	$0,58 \pm 0,012$
8	70-80	$0,31 \pm 0,014$	$0,13 \pm 0,001$	$0,44 \pm 0,011$
9	80-90	$0,19 \pm 0,012$	$0,1 \pm 0,0009$	$0,29 \pm 0,011$

Из анализа результатов расчета видно, что наибольшая мощность дозы от нейтронного и γ -излучения наблюдается в средней части боковой поверхности установки (60-70 см от низа) и составляет 0,62 мкЗв/ч. Результаты расчетов мощности дозы в двух нижних и двух верхних сегментах 1, 2, 10, 11 не приводятся из-за отличия реальной геометрии колонны и геометрии расчетной модели в этой области.

Расчёт активности

Расчётно-теоретическое обоснование конструкции тепловой колонны подразумевает рассмотрение всего жизненного цикла установки, поэтому необходим расчёт активности конструкционных материалов нейтронного конвертера, который был выполнен в программе DOTActiv [3] с использованием модели в X-Y геометрии. Расчёт можно считать консервативным, так как в нем присутствуют шесть источников бесконечной длины, обеспечивающих большую плотность потока нейтронов, чем в реальной установке.

Была использована модель, представленная на рис. 4.

Модель состоит из шести зон:

- зона 1 – воздушная полость;
- зона 2 – источник;
- зона 3 – сталь 08X18H10T;
- зона 4 – парафин + бор;
- зона 5 – парафин;
- зона 6 – графит.

С использованием модели был проведен расчет активации установки при назначенном времени эксплуатации 30 лет (в соответствии с техническим заданием). Полученные результаты были представлены в виде удельных активностей, вычисленных с учетом массы конструкционных материалов в соответствующих зонах.

В табл. 4 приведены удельные активности для радионуклидов, период полураспада которых превышает 2 ч. Удельные активности были вычислены с учетом массы конструкционных материалов в соответствующих зонах.

Таблица 4

Удельная активность изотопов на момент вывода из эксплуатации, Бк/кг

Изотоп	Зона					Сумма
	2	3	4	5	6	
1	2	3	4	5	6	7
Fe ⁵⁵	4,76·10	8,03·10	0	0	0	1,28·10 ²
Fe ⁵⁹	1,42	2,33	0	0	0	3,75
Mn ⁵⁴	3,05·10	1,15·10	0	0	0	4,19·10
Mn ⁵⁶	1,58·10 ²	2,49·10 ²	0	0	0	4,06·10 ²

Окончание табл. 4

1	2	3	4	5	6	7
Cr ⁵¹	6,80·10	1,15·10 ²	0	0	0	1,83·10 ²
Co ⁵⁸	6,16·10	2,33·10	0	0	0	8,49·10
Co ⁶⁰	9,10	1,39·10	0	0	0	2,30·10
Ni ⁵⁹	4,17·10 ⁻²	7,06·10 ⁻²	0	0	0	1,12·10 ⁻¹
Ni ⁶³	4,74	8,10	0	0	0	1,28·10
Ni ⁶⁵	8,80·10 ⁻¹	1,47	0	0	0	2,35
C ¹⁴	0	0	2,28·10 ⁻⁴	1,45·10 ⁻³	2,68·10 ⁻³	1,30·10 ⁻²
Сумма	3,82·10 ²	5,05·10 ²	2,28·10 ⁻⁴	1,45·10 ⁻³	2,68·10 ⁻³	9,20·10 ²

Из приведённых результатов видно, что основная часть радионуклидов образуется в зонах 2 и 3 модели, материалом в которых является сталь. Полученные значения активности по каждому изотопу сравнивались с приведенными значениями в ОСПОРБ-99/2010 [8]. В результате было показано, что все величины находятся ниже предела, установленного данным нормативным документом. Следовательно, материалы тепловой колонны после назначенного срока эксплуатации 30 лет не относятся к категории РАО.

Выводы

В ходе расчётно-теоретического обоснования конструкции тепловой колонны были получены распределение потоков тепловых нейтронов в измерительном канале, мощность дозы на поверхности установки и рассчитана активность материалов установки на момент вывода её из эксплуатации. Из двух полученных по различным расчетным кодам значений мощности дозы выбираем наибольшее - 0,62 мкЗв/ч (из консервативных соображений).

В соответствии со ОСПОРБ-99/2010, продолжительность работы с установкой составляет 2000 ч/г. Исходя из этого годовая доза облучения будет составлять 1,24 мЗв, что меньше предельной годовой дозы для персонала группы Б, согласно [7], с учётом коэффициента запаса в соответствии с [8].

Основные результаты расчетов приведены в табл. 5.

Таблица 5

Основные результаты расчётно-теоретического обоснования конструкции нейтронного конвектора

Параметр	Значения
Максимальный поток тепловых нейтронов в измерительном канале, нейтр/см ² ·с	424±54
Максимальная мощность дозы от нейтронного и гамма излучения на боковой поверхности, мкЗв/ч	0,62
Способ утилизации	Как бытовые отходы

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках реализации программы развития Опорного университета НГТУ им. П.Е. Алексеева.

Библиографический список

1. **Rhoades, W.A.** The DOT III Two Dimensional Discrete Ordinates Transport Code / W.A. Rhoades, F.R. Mynatt // ORNL TM4280, 1973.
2. X-5 Monte Carlo Team MCNP — A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5. V. I // Overview and Theory LANL. – 2003. – April 24.
3. **Андреев Н.Г., Вавилкин В.Н.** Разработка программы DOT-Activ для расчета источников и уровней излучения остановленного реактора в 2D-геометрии / Н.Г. Андреев, В.Н. Вавилкин // Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях: сб. ст. X российской науч. конф. – М., 2015.
4. Источники нейтронного излучения. [Электронный ресурс] URL: <http://www.isotop.ru/files/treecontent/nodes/attaches/0/96/noname..pdf>
5. **Бекуриц, К.** Нейтронная физика / К. Бекуриц, К. Виртц. – М.: Атомиздат, 1968.
6. CASK, 40 Groups Coupled Neutron and Gamma ray Cross Section Data. RSIC Data Library DLC23, 1973.
7. СанПиН 2.6.1.2523–09. Нормы радиационной безопасности НРБ 99/2009. [Электронный ресурс] URL: <http://docs.cntd.ru/document/902170553>
8. СП 2.6.1.2612-10 Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010). [Электронный ресурс] URL: <http://nucloweb.jinr.ru/nucloserv/inform/instructions/osprb-99-2010.pdf>

Дата поступления
в редакцию 01.06.2018

V.V. Andreev¹, N.G. Andreev², A.A. Kuvshinova¹, S.L. Levanov¹, I.S. Khudiakov¹

**NEUTRON CONVERTER DESIGN CALCULATIONS
AND THEORETICAL UNDERPINNINGS**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev¹,
JSC OKBM AFRICANTOV, N. Novgorod²

Purpose: The purpose was the theoretical calculation of the converter design at the initial stage of the project implementation.

Design/methodology/approach: We used three calculation programs during the work: DOT-III, MCNP 5 and DOT-Activ. These programs based on different mathematical methods for solving the tasks: DOT-III - on the discrete ordinate method, MCNP-5 - on the Monte Carlo method. This makes it possible to increase the reliability of the results obtained.

Findings: In the course of the theoretical and theoretical substantiation of the thermal column construction, the distribution of thermal neutron fluxes in the measuring channel, the dose rate at the installation surface and the activity of the plant materials at the time of its decommissioning were calculated. From the two values of the dose rate obtained by different calculation codes, we choose the largest - 0.62 $\mu\text{Sv/h}$ from conservative considerations.

Research limitations/implications: The present study provides a starting-point for further research in the scientific sector.

Originality/value: In accordance with the program of development of the NSTU as a basic university, the laboratory installation "Neutron converter" is the basic direction of the development of the Department of Nuclear Reactors and Power Plants and the whole of INPEAP as a whole. The field of application of the plant is research and laboratory work.

Key words: neutron converter, biological protection, neutron physics, DOT-III, MCNP-5.

УДК 621.311

И.М. Валеев¹, Т.А. Мусаев²**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ РАБОТ ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ
НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ**Казанский государственный энергетический университет», Казань¹,ОАО «Сетевая компания», Казань²

Предлагается подход к оценке внедрения технологии работ под напряжением на показатели эффективности предприятия электрических сетей.

Ключевые слова: оценка, работы под напряжением, показатели надёжности электроснабжения.

Известно, что одной из важнейших задач управления современных предприятий является обеспечение устойчивости его работы в условиях постоянного роста стоимости топливно-энергетических ресурсов и неустойчивости рынка сбытов [1, 4, 5].

Необходимо также отметить, что современная мировая тенденция развития электроэнергетики в целом обуславливает оценку деятельности электросетевых предприятий через определение показателей надёжности электроснабжения. Показатели надёжности электроснабжения, в свою очередь, определяют качество услуг, оказываемых электросетевыми организациями, в частности надёжность и бесперебойность обеспечения потребителей электроэнергией. Значения показателей позволяют оценить уровень развития территориального электросетевого комплекса, выявить «узкие» места, провести прогноз дальнейшего развития организации и т.д.

Современные технологические процессы, бытовые приборы, микропроцессорная техника характеризуются высокой чувствительностью к перерывам в электроснабжении, избежать которых возможно, в том числе и путём оптимизации режима работы системы электроснабжения городского района [6]. Однако на сегодняшний день одним из перспективных технологических направлений, призванным сократить перерывы электроснабжения потребителей, является проведение работ под напряжением (РПН).

Как показывает опыт зарубежных стран, предлагаемая методика проведения работ способствует повышению устойчивости работы электроустановок, улучшению условий эксплуатации электрооборудования.

В качестве рисков проведения РПН необходимо отметить:

- опасность для нормальной работы электроустановок и для обслуживающего персонала;
- повышение вероятности возникновения аварийных ситуаций;
- возникновение различных нештатных ситуаций, в процессе эксплуатации электрооборудования (с течением времени снижается электрическая характеристика изоляции, изнашиваются токоведущие части, обмотки и подшипники электрических машин, отдельные механические детали). В результате этого, а также из-за заводских дефектов, неправильных действий персонала, загрязнения, неблагоприятных атмосферных условий и других причин происходит износ и повреждение электрооборудования.

Однако, несмотря на существующие риски, внедрение РПН на различных классах напряжения – один из приоритетных направлений в мировой энергетике.

Несмотря на явные преимущества внедрения технологии РПН, для подтверждения целесообразности метода необходимо провести оценку влияния данного типа работ на условия работы потребителей. Оценка потенциала влияния работ под напряжением на показатели устойчивости и экономической эффективности, надёжности электроснабжения потребителей может быть осуществлена через рассмотрение величины сокращения «недоотпуска» электроэнергии при воздействии РПН.

Такой подход был реализован в данной статье, а именно, осуществлен поиск методов оценки влияния РПН на указанные показатели, что делает предлагаемую работу своевременной и актуальной.

1. Оценка величины сокращения недоотпуска электроэнергии при проведении работ под напряжением

Во исполнение приказа Министерства энергетики Российской Федерации от 29 ноября 2016 г. № 1256 «Об утверждении Методических указаний по расчёту уровня надёжности и качества поставляемых товаров и оказываемых услуг для организации по управлению единой национальной (общероссийской) электрической сетью и территориальных сетевых организаций» [2], предприятиями электрических сетей должен вестись расчёт следующих показателей надёжности электроснабжения:

- показатель продолжительности отключений в результате технологических нарушений $\Pi^{ag} saidi$;
- показатель частоты отключений, в результате технологических нарушений $\Pi^{ag} saifi$.

Дополнительно, некоторыми территориально-сетевыми организациями проводится расчёт следующего типа показателей:

- показатель продолжительности отключений в результате плановых отключений $\Pi^{pl} saidi$;
- показатель частоты отключений, в результате плановых отключений $\Pi^{pl} saifi$.

При этом устанавливаются требования по заполнению таблицы специальной формы, содержащей основные сведения об отключениях [2]:

- время возникновения технологического нарушения;
- время восстановления электроснабжения потребителей;
- количество отключенных потребителей;
- суммарный недоотпуск электроэнергии в результате технологического нарушения и т.д.

Следует отметить, в настоящее время на практике сведения о количестве суммарного "недоотпуска" электроэнергии в результате отключений, вызванных проведением ремонтных работ, в основном ограничены или вообще отсутствуют. При этом оценку потенциала внедрения РПН возможно осуществить только при наличии показателей электроэнергии. Таким образом, задача сводится к определению суммарного недоотпуска электроэнергии в результате отключений, вызванных проведением ремонтных работ.

Учитывая имеющиеся сведения о недоотпуске электроэнергии возможно проведение приблизительной оценки влияния внедрения РПН на этот показатель. Условно считаем, что при проведении РПН отключение потребителей не происходит.

Общий подход и алгоритм решения данной задачи по оценке сокращения недоотпуска электроэнергии при проведении работ под напряжением заключается в выявлении величины недоотпуска электроэнергии по причине плановых и аварийных отключений. Далее, полученные значения всех потерь преобразуются в стоимость, в соответствии на единицу тарифа. Далее алгоритм проведения оценки включает вычисление объема недоотпуска электрической энергии, используя данные, содержащие информацию по недоотпуску отдельных инцидентов.

Недоотпуск плановых отключений может быть определен через пропорциональную зависимость между показателями отключения: значение показателя надёжности электроснабжения $SAIDI$, общим количеством отключений, количеством отключённых потребителей, суммарным временем отключения потребителей.

Показатель надёжности электроснабжения SAIDI:

$$\Pi_{SAIDI}^{n-1} = \frac{\Pi_{SAIDI}^{III, n-1}}{\Pi_{SAIDI}^{AB, n-1}}, \quad (1)$$

$$\Pi_{SAIDI}^n = \frac{\Pi_{SAIDI}^{III,n}}{\Pi_{SAIDI}^{AB,n}}, \quad (2)$$

$$\Pi_{CP} = \frac{\Pi_{SAIDI}^n + \Pi_{SAIDI}^{n-1}}{2}, \quad (3)$$

где Π_1^{n-1} - отношение показателей SAIDI по плановым и аварийным отключениям за предыдущий период (год); $\Pi_{SAIDI}^{III,n-1}$ - показатель SAIDI по плановым отключениям за предыдущий период (год); $\Pi_{SAIDI}^{AB,n-1}$ - показатель SAIDI по аварийным отключениям за предыдущий период (год); Π_1^n - отношение показателей SAIDI по плановым и аварийным отключениям за текущий период (год); Π_{SAIDI}^{III} - показатель SAIDI по плановым отключениям за текущий период (год); $\Pi_{SAIDI}^{AB,n-1}$ - показатель SAIDI по аварийным отключениям за текущий период (год); Π_{CP} - среднее значение показателя.

Таким образом, определяется соотношение между параметрами плановых и аварийных отключений.

Для детализации разницы, необходимо рассмотреть параметры, влияющие на выявленное соотношение:

- *общее количество отключений k:*

$$k^{n-1} = \frac{k_{III}^{n-1}}{k_{AB}^{n-1}}, \quad (4)$$

$$k^n = \frac{k_{III}^n}{k_{AB}^n}, \quad (5)$$

$$k_{CP} = \frac{k_1^{n-1} + k_1^n}{2}, \quad (6)$$

где k^{n-1} - отношение количества отключений, вызванных проведением ремонтных работ к количеству отключений из-за технологических нарушений, за предыдущий период (год); k_{III}^{n-1} - количество отключений, вызванных проведением ремонтных работ за предыдущий период (год); k_{AB}^{n-1} - количество отключений, вызванных технологическими нарушениями за предыдущий период (год); k^n - отношение количества отключений, вызванных проведением ремонтных работ, к количеству отключений из-за технологических нарушений за текущий период (год); k_{III}^n - количество отключений, вызванных проведением ремонтных работ за предыдущий период (год); k_{AB}^n - количество отключений, вызванных технологическими нарушениями за предыдущий период (год);

- *общее количество отключенных потребителей Ni:*

$$N_i^{n-1} = \frac{N_{i,III}^{n-1}}{N_{i,AB}^{n-1}}, \quad (7)$$

$$N_i^n = \frac{N_{i,III}^n}{N_{i,AB}^n}, \quad (8)$$

$$N_{i,CP} = \frac{N_i^{n-1} + N_i^n}{2}, \quad (9)$$

где N_i^{n-1} - отношение количества отключенных потребителей в результате проведения ремонтных работ к количеству потребителей, отключенных в результате технологического нарушения, за предыдущий период (год); $N_{i,III}^{n-1}$ - количество отключенных потребителей в

результате проведения ремонтных работ в предыдущем периоде (год); $N_{i,AB}^{n-1}$ - количество потребителей, отключенных в результате технологического нарушения в предыдущем периоде (год); $N_{i,ПЛ}^n$ - количество отключенных потребителей в результате проведения ремонтных работ в текущем периоде (год); $N_{i,AB}^n$ - количество потребителей, отключенных в результате технологического нарушения в текущем периоде (год).

- суммарное время отключения T_i :

$$T_i^{n-1} = \frac{T_{i,ПЛ}^{n-1}}{T_{i,AB}^{n-1}}, \quad (10)$$

$$T_i^n = \frac{T_{i,ПЛ}^n}{T_{i,AB}^n}, \quad (11)$$

$$T_{i,CP} = \frac{T_i^{n-1} + T_i^n}{2}, \quad (12)$$

где T_i^{n-1} - отношение суммарного времени прекращения электроснабжения в результате проведения ремонтных работ к суммарному времени прекращения электроснабжения в результате технологического нарушения за предыдущий период (год); $T_{i,ПЛ}^{n-1}$ - суммарное время прекращения электроснабжения в результате проведения ремонтных работ за предыдущий период (год); $T_{i,AB}^{n-1}$ - суммарное время прекращения электроснабжения в результате технологического нарушения за предыдущий период (год); T_i^n - отношение суммарного времени прекращения электроснабжения в результате проведения ремонтных работ к суммарному времени прекращения электроснабжения в результате технологического нарушения за текущий период (год); $T_{i,ПЛ}^n$ - суммарное время прекращения электроснабжения в результате проведения ремонтных работ за текущий период (год); $T_{i,AB}^n$ - суммарное время прекращения электроснабжения в результате технологического нарушения за текущий период (год);

Основываясь на средних значениях параметров, которые оказывают влияние на степень соотношения величины плановых и аварийных отключений, необходимо выявить параметр, характеризующий степень взаимосвязанности характеристик плановых и аварийных ситуаций ξ :

$$\xi = \frac{\Pi_{CP} + k_{CP} + N_{i,CP} + T_{i,CP}}{4}. \quad (13)$$

Полученный коэффициент целесообразно использовать для связи параметров плановых и аварийных отключений.

Для оценки степени влияния параметров на выявленный коэффициент предлагается определить вес каждого критерия p ,

- вес соотношения показателей SAIDI

$$p_{\Pi} = \frac{\Pi_{CP}}{4 \cdot \xi}; \quad (14)$$

- вес количества отключений

$$p_k = \frac{k_{CP}}{4 \cdot \xi}; \quad (15)$$

- вес количества отключенных потребителей

$$p_{Ni} = \frac{N_i}{4 \cdot \xi}; \quad (16)$$

- вес суммарного времени отключения

$$p_{Ti} = \frac{T_i}{4 \cdot \xi}. \quad (17)$$

На основе полученных значений определяется параметр, который имеет наибольшее влияние на коэффициент соотношения показателей плановых и аварийных отключений.

2. Практическое применение результатов

Для практического применения полученных формул проведена оценка потенциала внедрения РПН на показатели эффективности и надежности электроснабжения потребителей. Все исходные данные условны и призваны продемонстрировать работоспособность предлагаемого подхода. Для проведения расчётов использованы исходные данные, представленные в табл. 1.

Таблица 1
Исходные данные показателей надёжности
электроснабжения для проведения расчётов

№	Наименование параметра	Значение параметра
1	$\Pi_{SAIDI}^{ПЛ, 2016}$	3
2	$\Pi_{SAIDI}^{ПЛ, 2017}$	17
3	$\Pi_{SAIDI}^{AB, 2016}$	2
4	$\Pi_{SAIDI}^{AB, 2017}$	15
5	$k_{ПЛ}^{2016}$	220 000
6	$k_{ПЛ}^{2017}$	30 000
7	k_{AB}^{2016}	5 500
8	k_{AB}^{2017}	4 400
9	$N_{i, ПЛ}^{2016}$	3 900 000
10	$N_{i, ПЛ}^{2017}$	4 030 000
11	$N_{i, AB}^{2016}$	3 500 000
12	$N_{i, AB}^{2017}$	1 980 000
13	$T_{i, ПЛ}^{2016}$	83 000
14	$T_{i, ПЛ}^{2017}$	105 000
15	$T_{i, AB}^{2016}$	5 700
16	$T_{i, AB}^{2017}$	5 900

Используя формулы (1)–(17), получены искомые значения, которые сведены в табл. 2.

Таблица 2
Полученные результаты

№	Наименование параметра	Значение параметра
1	2	3
1	Π_{SAIDI}^{2016}	1,35
2	Π_{SAIDI}^{2017}	1,13

Окончание табл. 2

1	2	3
3	Π_{CP}	1,24
5	k^{2016}	40
6	k^{2017}	6,82
7	k_{CP}	23,41
9	N_i^{2016}	1,11
10	N_i^{2017}	2,04
11	$N_{i,CP}$	1,58
13	T_i^{2016}	14,56
14	T_i^{2017}	17,8
15	$T_{i,CP}$	16,18
16	ξ	10,6
17	p_{Π}	3,29
18	p_k	19,26
19	p_{Ni}	7,58
20	p_{Ti}	30,67

Получив коэффициент взаимосвязи ξ , а также учитывая, что значения по недоотпуску электроэнергии в результате технологического нарушения заранее известны, получим соотношение недоотпуска и стоимости (рис. 1).

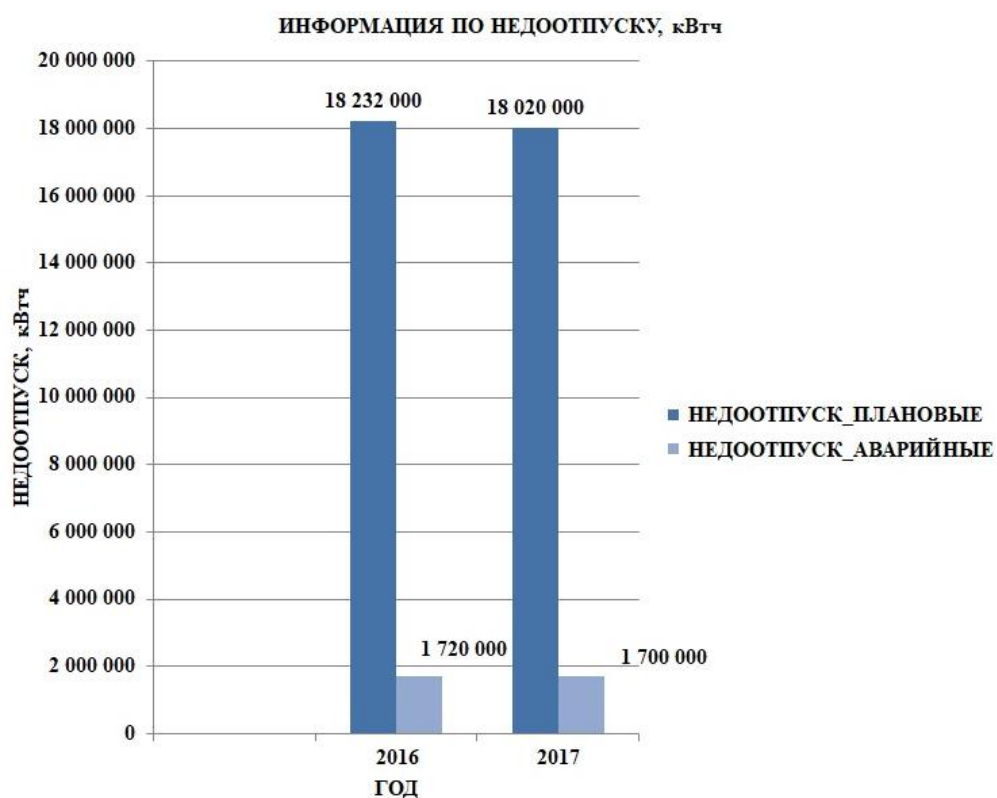


Рис. 1. Информация по недоотпуску электроэнергии

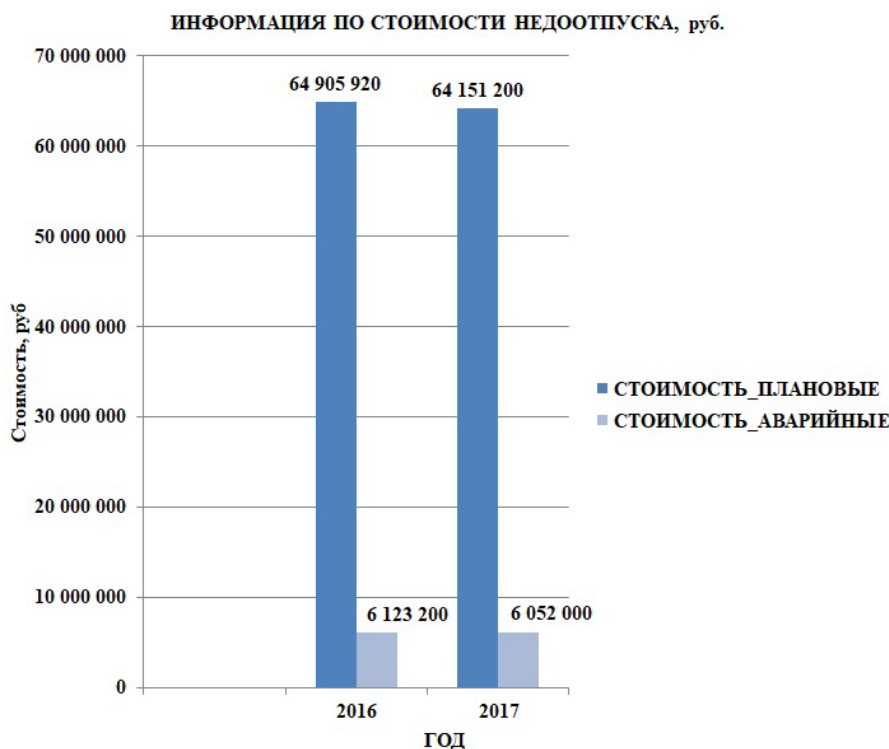


Рис. 2. Информация по стоимости недоотпуска электроэнергии

Рисунки демонстрируют, что потенциал эффективности внедрения работ под напряжением для приведённых исходных данных составляет около 65 млн руб. в год – данный эффект достижим лишь при условии полного проведения всех плановых работ под напряжением (не всегда допустимо на практике). Однако, обладая информацией о показателях отключений (длительности, количестве отключенных потребителей и т.д.), персонал предприятий электрических сетей может провести конкретную оценку потенциала внедрения РПН по изложенному в статье подходу.

Выводы

По результатам проведённой работы можно сделать следующие выводы:

- внедрение технологии РПН обладает существенным потенциалом для повышения показателей эффективности и надежности электроснабжения потребителей;
- исходя из базовой информации об отключениях, содержащейся в таблице, обязательной к заполнению ПЭС [2], возможно вычисление дополнительных показателей (формулы (1-17)), на основании которых можно провести оценку эффективности внедрения технологии РПН.

Таким образом, разработан подход, позволяющий оценить эффективность внедрения технологии работ под напряжением в условиях действующей системы электроснабжения в части экономических показателей.

Библиографический список

1. **Грунтович, Н.В.** Совершенствование систем управления энергетической эффективностью и экономической безопасностью промышленных предприятий / Н.В. Грунтович [и др.] // Вестник Чувашского университета. – 2015. – № 3. – С. 40–48.
2. Приказ Министерства энергетики Российской Федерации от 29 ноября 2016 г. №1256 «Об утверждении Методических указаний по расчету уровня надежности и качества поставляемых товаров и оказываемых услуг для организации по управлению единой национальной (общероссийской) электрической сетью и территориальных сетевых организаций». [Электронный ресурс] URL: <https://minjust.consultant.ru/documents/21986>

3. Приказ Федеральной службы по тарифам от 24 декабря 2014 г. № -э "Об утверждении методических указаний по учету степени загрузки объектов электросетевого хозяйства при формировании тарифов и (или) их предельных минимальных и (или) максимальных уровней на услуги по передаче электрической энергии". [Электронный ресурс] URL:<http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70777972/>
4. **Федоров, О.В.** Энергосберегающая политика: учеб. пособие / О.В. Федоров, А.Б. Дарьенков. – М.: КноРус, 2015. – 294 с.
5. **Голубцов, Н.В.** Проблема эффективности использования энергоресурсов / Н.В. Голубцов, Л.Г.Ефремов, О.В. Федоров // Вестник Чувашского университета. – 2014. – № 2. – С. 18–22.
6. **Мусаев, Т.А.** Повышение эффективности методов управления режимом работы системы электроснабжения городского района напряжением 6(10 кВ: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Чуваш.гос. ун-т им. И.Н. Ульянова. – Чебоксары. –2015. – 20 с.

*Дата поступления
в редакцию 01.07.2018*

I.M. Valeev¹, T.A. Musaev²

EVALUATION OF ECONOMIC EFFICIENCY IMPLEMENTATION OF UNDER VOLTAGE WORKS ON THE ELECTRIC NETWORKS ENTERPRISES

Kazan State Power Engineering University, Kazan¹,
JSC "Grid Company", Kazan²

Purpose: asearch for ways to assess the potential impact of work under voltage on the indicators of economic efficiency.

Design/methodology/approach: calculation of additional indicators of economic efficiency on the basis of known values of indicators of reliability of electricity supply.

Findings: Indicators that allow to estimate the economic efficiency of implementing the technology of under voltage work.

Research limitations/implications: The present study provides a starting-point for further research in the in the field of power supply reliability.

Originality/value: Introduction of the technology of under voltage work has a significant potential for increasing the indicators of economic efficiency and reliability of electricity supply to consumers, based on the information on outages, it is possible to calculate additional indicators, which it is possible to assess the effectiveness of the introduction of the technology under voltage work.

Key words: evaluation, under voltage work, indicators of reliability of electricity supply.

УДК 621.165.51-58; 621.486

В.А. Горбунов, Н.А. Лоншаков

ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАТРАТ ЭНЕРГИИ ТУРБОПОПИТАТЕЛЬНЫХ НАСОСОВ БЛОКА АЭС НЕЙРОСЕТЕВЫМИ МЕТОДАМИ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина

Представлены результаты анализа параллельной работы двух турбопитательных насосов (ТПН) энергоблока атомной электрической станции с реакторов типа ВВЭР-1000 на основе эксплуатационных данных. Используя методы статистического анализа с привлечением нейросетевой технологии, построена математическая модель работы насоса на основе эксплуатационных данных, с помощью которой определены удельные затраты тепловой энергии на работу ТПН, а также выявлены возможные снижения затрат энергии, отпускаемой на работу приводной турбины питательного насоса с учетом специфики эксплуатации каждого отдельного ТПН.

Ключевые слова: турбопитательный насос, паровая турбина, нейронные сети, энергия собственных нужд, повышение мощности, эффективность эксплуатации.

В условиях рыночных отношений в энергетической отрасли важной задачей становится четкое проведение технологических мероприятий, направленных на оптимизацию работы оборудования и систем, что позволит увеличить выработку электрической энергии при сохранении или снижении уровня эксплуатационных затрат, отпускаемых на работу энергетического предприятия.

Основными потребителями энергии собственных нужд на АЭС с реакторными установками ВВЭР-1000 являются: питательные турбонасосы (1,5–2,0% от общей выработки электроэнергии энергоблока), главные циркуляционные насосы (1,25%), насосы системы циркуляционного водоснабжения (0,75%), конденсатные электронасосы (0,2%) [1]. С учетом современной тенденции по увеличению единичной мощности энергоблока до 107–110% от номинальной оптимизация затрат энергии на работу оборудования является одной из важнейших задач. Повышение единичной мощности энергоблока также влечет за собой проблему сдвига рабочих характеристик оборудования из расчетных областей, определенных заводом-изготовителем при проектировании агрегатов. Таким образом, оптимизация работы оборудования должна проходить с учетом факторов, оказывающих влияние на качество и надежность работы оборудования в нерасчетных режимах с учетом специфики эксплуатации каждого конкретного агрегата.

В качестве объекта исследования был выбран питательный турбонасос, установленный на блоке атомной электрической станции с реактором ВВЭР-1000 проекта В-338. Данный агрегат включает в себя приводную паровую турбину ОК-12А «Калужского турбинного завода», спроектированную в 60-х годах прошлого века на номинальное давление пара перед турбиной $9,9 \text{ кгс/см}^2$ (0,97 МПа) и температуру 248°C, на мощность 11680 кВт. Турбина ОК-12А работает на переменных параметрах пара, отбираемого из нитки за сепаратором-пароперегревателем, а при малых нагрузках или аварийном режиме от быстродействующей редуccionной установки коллектора собственных нужд (БРУ-СН). Предполагается, что суммарная наработка турбины при питании ее от БРУ-СН не должна превышать 20% общего времени ее эксплуатации. Работая с переменной частотой вращения, паровая турбина обеспечивает необходимую для привода питательного и предвключенного насосов мощность [2].

Питательный насос ПТ-3750-75 мощностью 9130 кВт предназначен для подачи питательной воды от деаэратора к парогенератору и в дальнейшем для создания давления питательной воды, достаточного для прохождения пара после парогенератора через проточную

часть паровой турбины К-1000-60/1000 вплоть до конденсаторов. Насос ПТ-3750-75 рассчитан на подачу 3760 м³/ч питательной воды с напором 80,8 кгс/см² (0,79 МПа).

Предвключенный насос 400-QND-spec (БН-3800-20) мощностью 2378 кВт предназначен для создания дополнительного подпора на входе в питательный насос для снижения вероятности возникновения кавитации на рабочих колесах питательного насоса. Привод предвключенного насоса осуществляется с вала приводной турбины через понижающий редуктор Р-2.

На энергоблоке АЭС с реактором ВВЭР установлено два ТПН, работающих параллельно при нормальных условиях эксплуатации. Отказ одного турбопитательного насоса влечет за собой снижение мощности блока до 50% от номинальной мощности. При отказе обоих ТПН энергоблока его мощность разгружается до 5% от номинальной мощности.

Исходными данными для проведения исследования являлись эксплуатационные данные, полученные в ходе параллельной работы двух ТПН на одном энергоблоке в течение 287 суток с 1 декабря 2016 г. по 13 сентября 2017 г. с интервалом между измерениями в 1 ч. За весь период наблюдения блок АЭС не был остановлен вследствие аварии или мероприятий по плановому техническому обслуживанию, при этом мощность энергоблока варьировалась от 240 МВт до 1083,6 МВт (от 24 до 108% от номинальной мощности). Для каждого турбопитательного насоса был снят следующий комплекс параметров:

- давление питательной воды до и после ТПН;
- температура питательной воды после ТПН;
- расход пара, отпускаемого на работу приводной турбины;
- давление пара в отборе на ТПН, давление пара до и после регулирующего клапана ТПН;
- температура пара в конденсаторе приводной турбины;
- температура охлаждающей воды на входе и выходе из конденсатора ТПН;
- мощность энергоблока в конкретный момент времени, параметры системы регулирования и смазки ТПН и т.д.

Таким образом, для проведения исследования для каждого ТПН получены более 200 000 значений различных эксплуатационных параметров.

Для определения эффективности работы турбопитательных насосов выбран термодинамический метод определения КПД агрегата в целом. Данный подход не требует отдельного нахождения гидравлического, объемного и механического коэффициентов полезного действия составных элементов ТПН. В соответствии с термодинамическим методом [3], эффективность работы турбонасоса определялась по формуле

$$\eta = \frac{Q \cdot (p_2 - p_1)}{G \cdot (h_1 - h_2)} \cdot 100\% \quad (1)$$

где Q – объемный расход питательной воды через ТПН, м³/с; p_1 и p_2 – давление питательной воды на входе и выходе из ТПН соответственно, кПа; G – массовый расход пара, отпускаемый на работу приводной турбины, кг/с; h_1 и h_2 – энтальпия пара на входе в приводную турбину и энтальпия конденсата на выходе из конденсатора приводной турбины соответственно, кДж/кг.

Преимуществом данного метода является достаточность значений параметров, полученных со штатных контрольно-измерительных приборов (КИП) энергоблока АЭС, для оценки эффективности работы оборудования, что снижает количество точек измерений, не требует затрат, связанных с приобретением и установкой дополнительных КИП на исследуемое оборудование, способствует оперативному и эффективному анализу работы оборудования [4].

В ходе предварительного анализа работы ТПН №1 и №2 энергоблока АЭС установлен диапазон изменения КПД по формуле (1) за исследуемый промежуток времени. Эффективность работы турбопитательного насоса №1 варьировалась от 4,13 до 9,08%, эффективность турбопитательного насоса №2 изменялась от 0,64 до 8,99% (рис. 1).

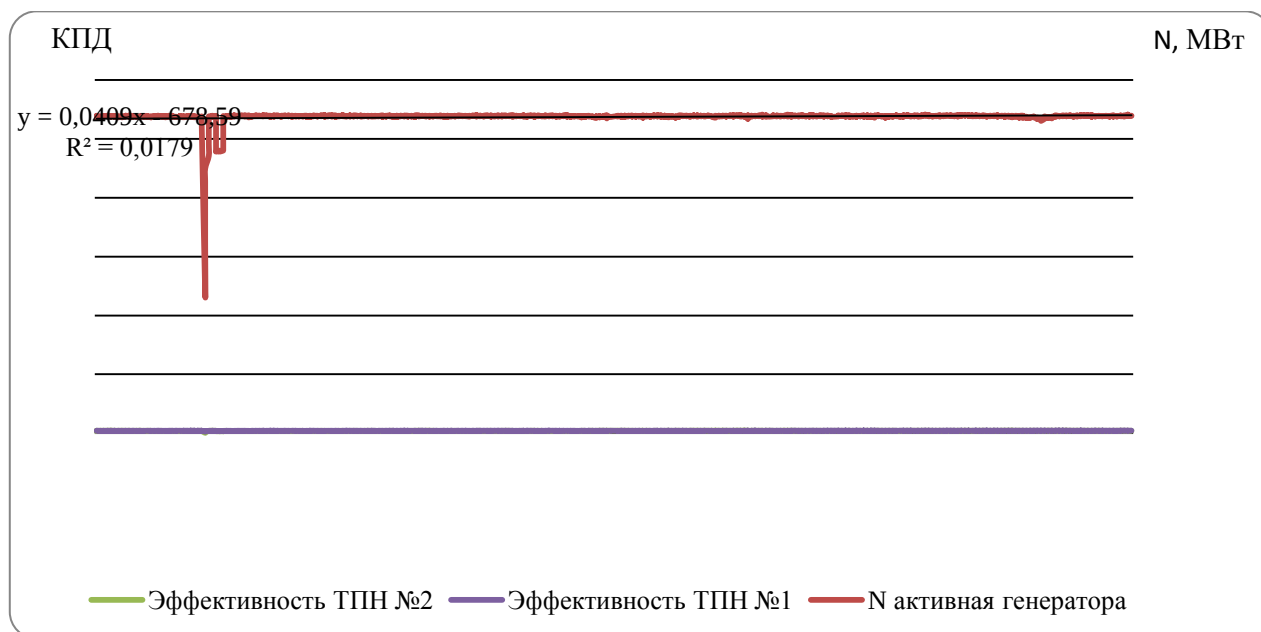


Рис. 1. Изменение эффективности работы ТПН за исследуемый период

Также были определены затраты энергии на работу каждого насоса в течение 287 суток, которые составили 386 183 Гкал (1 614 632 ГДж) и 382 606 Гкал (1 600 825 ГДж) для ТПН №1 и ТПН №2 соответственно (рис. 2).

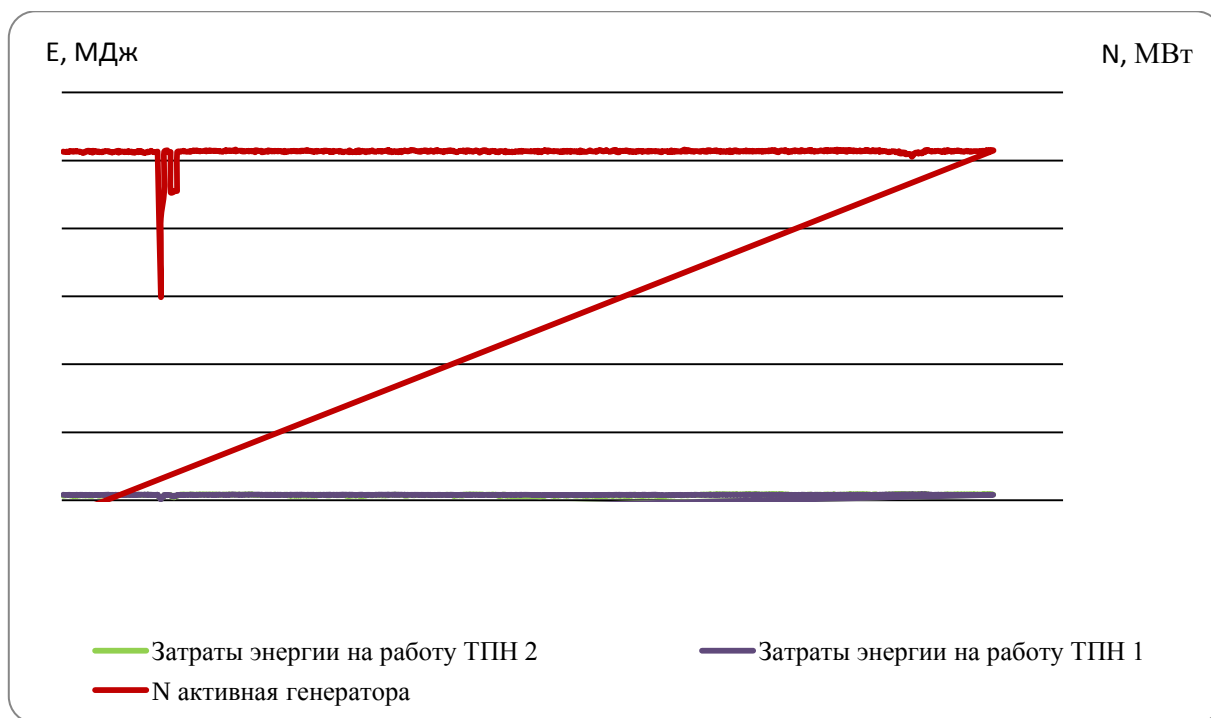


Рис. 2. Затраты энергии на работу ТПН №1 и ТПН №2 за исследуемый период

Далее на основе полученных данных строились математические модели с привлечением нейросетевой технологии для каждого ТПН. Входными параметрами для каждой модели являлись эксплуатационные данные, отражающие работу турбопитательного насоса со стороны систем питательной воды, паропроводов собственных нужд энергоблока и системы циркуляционного водоснабжения конденсаторов ТПН №1 (табл. 1) и ТПН №2 (табл. 2).

Таблица 1

Диапазон изменения входных параметров для математической модели ТПН 1

Наименование параметра	Диапазон изменения
Расход пара на работу приводной турбины, т/ч (кг/с)	67,2 – 87,8 (18,7 – 24,4)
Давление пара до стопорного клапана приводной турбины, кгс/см ² (МПа)	8,4 – 9,8 (0,82 – 0,96)
Температура пара перед главной паровой задвижкой ТПН, С°	177,1 – 245,4
Давление пара за регулирующим клапаном ТПН, кгс/см ² (МПа)	2,37 – 5,71 (0,23 – 0,56)
Температура пара в конденсаторе приводной турбины, С°	20,3 – 37,1
Температура охлаждающей воды до конденсатора ТПН, С°	7,7 – 28,2
Температура охлаждающей воды за конденсатором ТПН, С°	13,7 – 34,3
Давление питательной воды на подводе к бустерному насосу ТПН, кгс/см ² (МПа)	19,5 – 23,2 (1,9 – 2,3)
Давление питательной воды на напоре питательного насоса ТПН, кгс/см ² (МПа)	66,75 – 82,5 (6,5 – 8,1)
Температура пара на выхлопе приводной турбины, С°	23,1 – 39,4
Расход питательной воды от ТПН, м ³ /ч	1570 – 3830
Давление в конденсаторе приводной турбины, кПа	3,26 – 10,12
Коэффициент полезного действия	4,13 – 9,08
Удельные затраты энергии на перекачку 1000 т питательной воды, ГДж	58,63 – 114,81

Таблица 2

Диапазон изменения входных параметров для математической модели ТПН 2

Наименование параметра	Диапазон изменения
Расход пара на работу приводной турбины, т/ч (кг/с)	66,6 – 90,2 (18,5 – 25,1)
Давление пара до стопорного клапана приводной турбины, кгс/см ² (МПа)	8,1 – 9,5 (0,79 – 0,93)
Температура пара перед главной паровой задвижкой ТПН, С°	176,7 – 246,3
Давление пара за регулирующим клапаном ТПН, кгс/см ² (МПа)	1,62 – 5,39 (0,16 – 0,53)
Температура пара в конденсаторе приводной турбины, С°	20,9 – 37,2
Температура охлаждающей воды до конденсатора ТПН, С°	7,6 – 28,5
Температура охлаждающей воды за конденсатором ТПН, С°	13,1 – 34
Давление питательной воды на подводе к бустерному насосу ТПН, кгс/см ² (МПа)	19,9 – 23,9 (1,9 – 2,3)
Давление питательной воды на напоре питательного насоса ТПН, кгс/см ² (МПа)	66,5 – 84,1 (6,5 – 8,2)
Температура пара на выхлопе приводной турбины, С°	23,1 – 39,1
Расход питательной воды от ТПН, м ³ /ч	240 – 3620
Давление в конденсаторе приводной турбины, кПа	3,26 – 9,14
Коэффициент полезного действия	0,64 – 8,99
Удельные затраты энергии на перекачку 1000 т питательной воды, ГДж	64,09 – 712,17

Целевой функцией для каждой модели являлась эффективность работы насоса, определяемая по формуле (1).

Отдельно были созданы математические модели работы ТПН, предназначенные для определения удельных затрат тепловой энергии собственных нужд, необходимых на перекачку питательной воды каждым ТПН при заданном комплексе исходных параметров по формуле (2).

$$\eta = \frac{G \cdot (h_1 - h_2)}{Q} \cdot 1000 \quad (2)$$

Удельные затраты тепловой энергии на перекачку 1000 т питательной воды варьировались в диапазоне от 14,01 Гкал (58,63 ГДж) до 27,44 Гкал (114,81 ГДж) для турбопитательного насоса №1, от 15,32 Гкал (64,09 ГДж) до 170,21 Гкал (712,17 ГДж) для турбопитатель-

ного насоса №2. Большие удельные затраты энергии для ТПН №2 связаны с его активным вовлечением в регулирование подачи при переходных режимах, в том числе в режимах пуска и останова энергоблока АЭС.

Преимущество применения нейросетевой технологии по сравнению с другими методами статистического анализа заключается в возможности нахождения сколь угодно сложной зависимости без необходимости задания вида исходной функции [5,6].

Погрешность работы полученных математических моделей не превышала 3% в заданном диапазоне изменения параметров, используемых при ее построении.

На основе полученных моделей с учетом особенностей эксплуатации исследуемых ТПН проводилась оптимизация работы насосов за счет поиска комбинации варьируемых параметров, обеспечивающей максимальный КПД работы установки в конкретных эксплуатационных условиях. В качестве варьируемых параметров приняты физические величины, на которые оператор энергоблока может непосредственно воздействовать в процессе эксплуатации: расход пара на работу приводной турбины, давление пара после стопорно-регулирующего клапана приводной турбины, глубина вакуума в конденсаторе приводной турбины.

В ходе оптимизации работы турбопитательного насоса №1 выявлена возможность снижения затрат энергии собственных нужд, отпускаемой на работу приводной турбины ТПН №1 на 5 242 Гкал (21 917 ГДж) за 287 суток работы насоса (рис. 3). При этом расход пара на работу ТПН №1 снижается в среднем на 1,3 т/ч (0,36 кг/с).

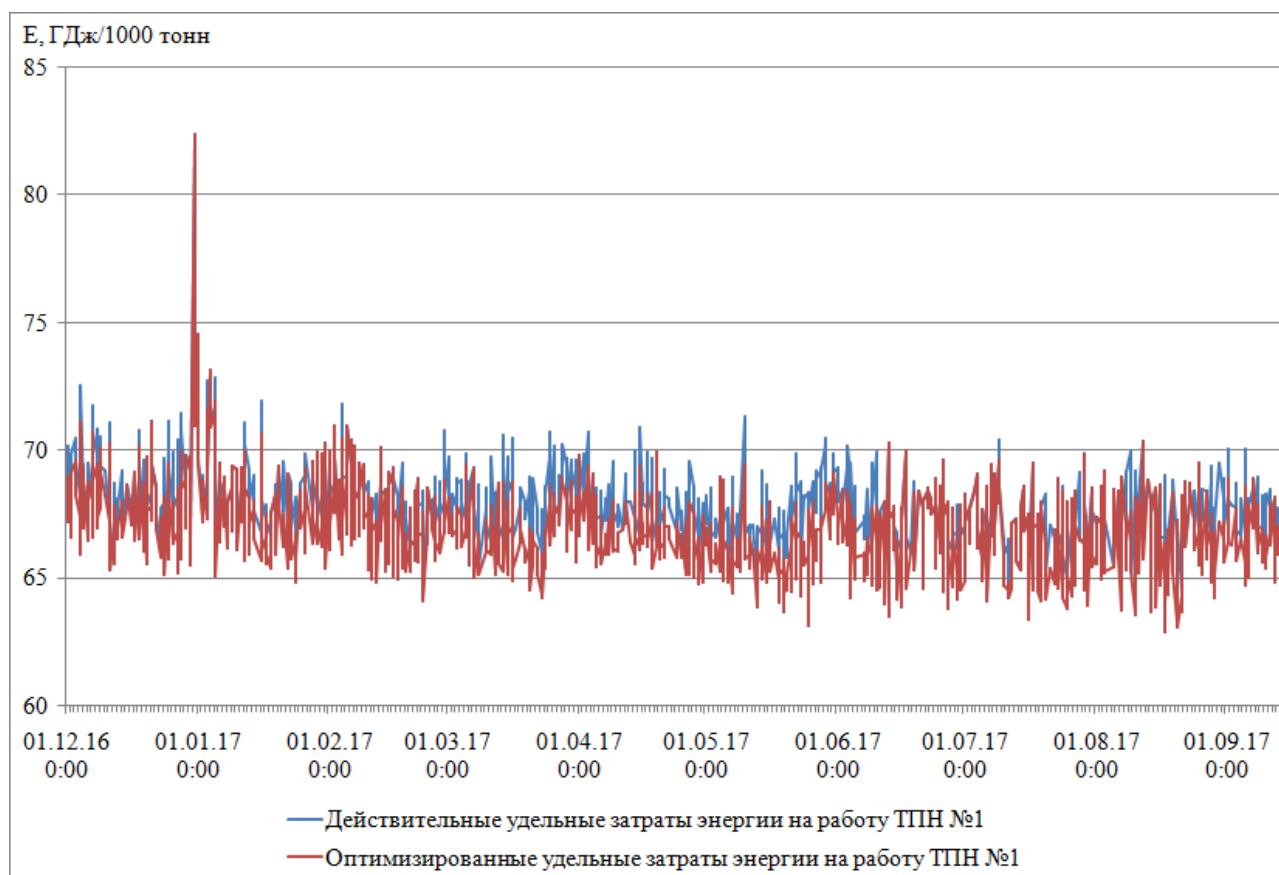


Рис. 3. Оптимизированные удельные затраты энергии на работу ТПН №1

Аналогичная работа проведена с турбопитательным насосом №2, работающим параллельно с первым на протяжении всего периода исследования. Возможность снижения затраты энергии собственных нужд, отпускаемой на работу приводной турбины ТПН №2, составила 14 274 Гкал (59 680 ГДж) (рис. 4). Расход пара в среднем снижается на 3,1 т/ч (0,86 кг/с).

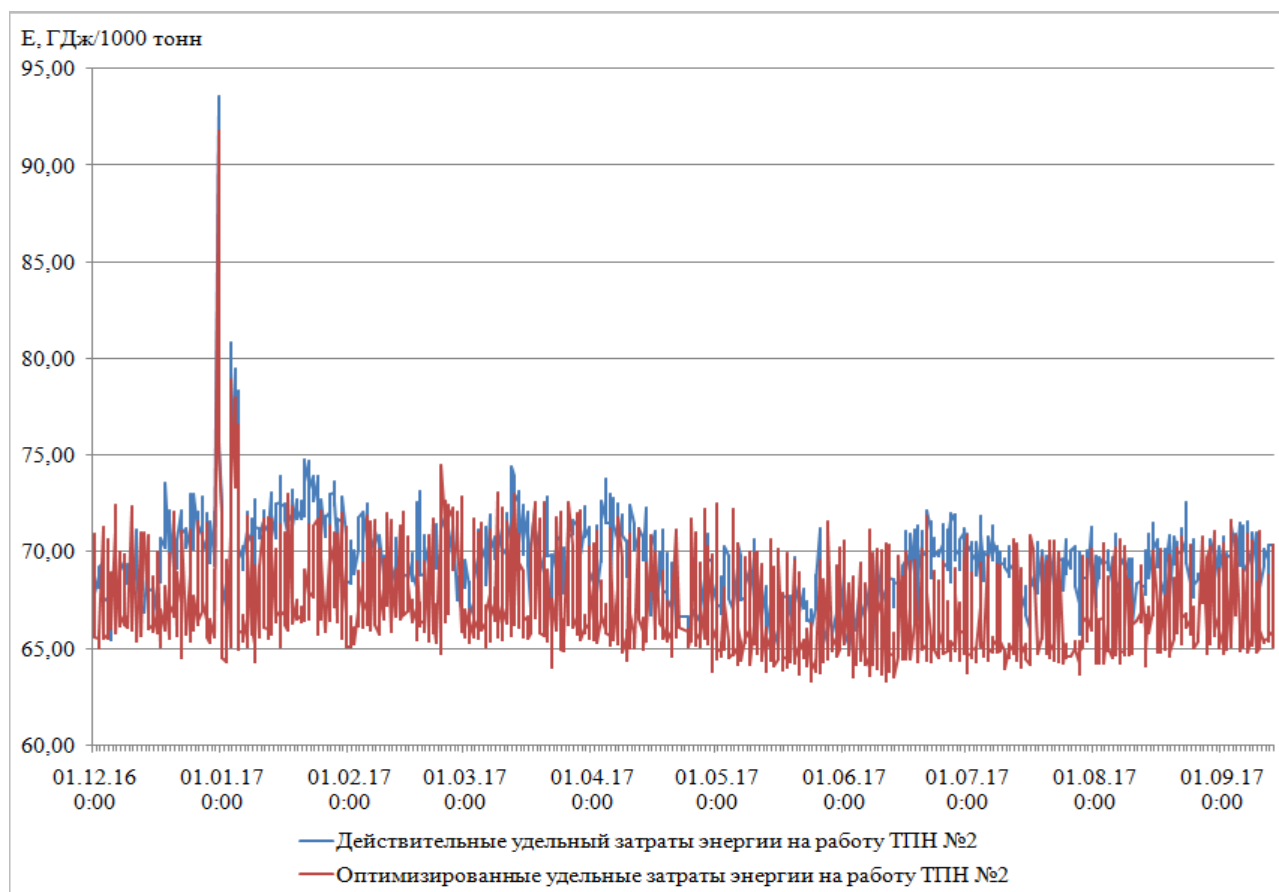


Рис. 4. Оптимизированные удельные затраты энергии на работу ТПН №2

Выводы

В ранее проведенной работе по анализу эффективности эксплуатации одного турбопитательного насоса аналогичного энергоблока АЭС получены схожие результаты с представленными в рамках данной статьи [7, 8].

Проведенный анализ параллельно работающих турбопитательных насосов энергоблока АЭС с реактором типа ВВЭР–1000 с привлечением статистических методов, основанных на нейросетевой технологии, охватывает весь основной тракт питательной воды энергоблока и показывает возможность снижения затрат энергии собственных нужд, отпускаемых на работу приводных турбин питательных насосов, на 19 516 Гкал (81 597 ГДж) в течение 287 работы пары ТПН, что приведет к повышению электрической мощности энергоблока в среднем на 1 МВт.

С помощью построенных математических моделей определены удельные затраты тепловой энергии каждого питательного турбонасоса исходя из конкретных условий эксплуатации и получены технически обоснованные нормы расхода энергии на привод ТПН.

Результаты моделирования работы энергетических установок на основе нейросетевых технологий имеют широкий спектр применения для диагностирования эффективности работы оборудования и систем, для прогнозирования развития технологических процессов в условиях недостаточной информационной обеспеченности.

Библиографический список

1. Маргулова, Т. Х. Атомные электрические станции: учеб. для вузов / Т. Х. Маргулова. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во АТ, 1994. – 289 с.
2. Пак, П.Н. Насосное оборудование атомных станций / П. Н. Пак, А. Я. Белоусов, С. П. Пак. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 450 с.

3. **Васильев, В.А.** Определение КПД турбопитательной насосной установки термодинамическим способом // Вестник ЮУрГУ. – 2005. – №1. – С. 162–167.
4. An artificial - neural network Method for the identification of Saturated Turbogenerator Parameters dased on a coupled Finite-Element/State-Space Computational algorithnm / S.R. Chaudhry [et al.] // IEEE Trans. on Energy Conversion. – 1995. – V. 10. – № 4.
5. **Горбунов, В.А.** Использование нейросетевых технологий для повышения энергетической эффективности теплотехнологических установок / В.А. Горбунов. – Иваново: ИГЭУ им. В.И. Ленина, 2011. – 475 с.
6. Screening power system contingencies using a backpropagation trained multiperceptron. / M.E. Aggoune [et al.] // ISCAS.89 (486-489).-5654. Artificial neural networks for power system static security assessment. – 1989. – P. 490–494.
7. **Дунаев, В.А.** К вопросу о повышении эффективности и безопасности эксплуатации тепломеханического оборудования АЭС / В.А. Дунаев, Н.А. Лоншаков, В.А. Горбунов // Глобальная ядерная безопасность. – 2015. – № 2(15). – С. 63–70.
8. **Горбунов, В.А.** Повышение точности определения параметров эффективности турбоустановок с применением нейронных сетей / В.А. Горбунов [и др.] // Вестник ИГЭУ. – 2017. – №. 4. – С. 5–12.

*Дата поступления
в редакцию 15.06.2018*

V. A. Gorbunov, N. A. Lonshakov

COST OPTIMIZATION OF ENERGY TURBINE DRIVE FEED WATER PUMPS OF NUCLEAR POWER PLANT UNIT USING NEURAL NETWORK MODELING TECHNIQUES

Ivanovo state power engineering university n. a. V. I. Lenin

Background: improving the efficiency of equipment operation is one of the most urgent problems in the global trend of optimization and reduction of operating costs. The measures aimed at solving this problem are based on the methods of statistical and deterministic modeling of equipment behavior, as well as engineering methods with low accuracy for optimization and forecasting tasks. In this regard, the most urgent task is to optimize the operating modes of the equipment with the involvement of innovative technologies.

Materials and methods: the paper used archival data obtained from the regular information and computing system of the NPP power unit, reflecting its work for 287 days, were used for the construction and training of mathematical models based on neural network technology. Neural networks, in comparison with other statistical methods, do not require knowledge of the nature of the dependence of performance indicators on the input parameters. Mathematical models are configured to determining the specific cost of thermal energy and efficiency turbine drive feed water pumps (TPN) under various conditions of operation.

Results: the result was construction of four neural network models for determination of efficiency and unit cost of energy to operate each of TPNs. The possibility of reducing the energy costs for the operation of the turbine drive of TPN № 1 and № 2 by 5,242 Gcal and 14,274 Gcal, respectively, was revealed, which in turn increases the power of the power unit by an average of 1 MW.

Conclusions: the reliability of the results is confirmed by the verification of neural network models from data not involved in the process of their construction. The error in determining the performance does not exceed 3%. The results obtained are used in the process of operation to analyze the efficiency of the plants, to determine technically sound energy consumption rates.

Key words: turbine drive feed water pump, steam turbine, neural network, energy needs, increasing capacity, efficiency of operation.

УДК 621.039

С.М. Дмитриев, А.А. Добров, М.А. Легчанов

**РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕМЕШИВАЮЩИХ
РЕШЕТОК В ОБЛАСТИ НАПРАВЛЯЮЩЕГО КАНАЛА ТВС-КВАДРАТ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММЫ ANSYS CFX**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлен обзор критериев для количественной оценки эффективности перемешивающих решёток, приведены результаты численного моделирования теплогидравлических процессов в потоке теплоносителя для ячейки ТВС в области направляющего канала. Получены численные значения критериев, характеризующих эффективность перемешивания для решеток с дефлекторами различной геометрической формы.

Ключевые слова: активная зона, тепловыделяющая сборка, вычислительная гидродинамика, перемешивающая решетка, направляющий канал.

На протяжении нескольких лет важной и актуальной исследовательской задачей атомной энергетики является исследование структуры турбулентного потока и особенностей перемешивания теплоносителя в топливных сборках ядерных реакторов. В настоящее время для решения широкого круга прикладных задач проектирования объектов атомной энергетики активно используются программы трёхмерного теплогидравлического расчета (CFD), позволяющие помочь конструкторам оптимизировать форму перемешивающих решеток ТВС еще до изготовления и тем самым сократить объем экспериментальных исследований.

В результате проведенного аналитического обзора современных российских и международных публикаций, посвященных применению CFD-программ для исследования течения потока теплоносителя в ТВС с перемешивающими решётками [1-9] были отмечены основные моменты, необходимые для создания реалистичной модели ТВС и анализа эффективности перемешивающих решеток.

Многие исследователи придерживаются следующих требований к расчётным моделям:

1) расчётная область, чаще всего, представляет собой фрагмент ТВС, состоящий из нескольких твэлов. При этом на боковых границах расчетной области применяются периодические граничные условия или условия симметрии, позволяющие смоделировать либо бесконечно большой в поперечном сечении пучок твэлов, либо полное сечение ТВС;

2) поперечный размер сеточных элементов в большинстве случаев выбирается из условия равенства $1/25$ – $1/20$ диаметра твэлов, при этом авторы используют различные типы сеток: блочно-структурированная шестигранная, неструктурированная тетраэдрическая либо полиэдрическая, а также адаптивные декартовы сетки. Для описания «гладкого» пучка твэлов размеры элементов в длину выбираются из диапазона 100–150 от поперечного размера. Во всех расчётах с неструктурированными сетками строятся призматические пристеночные элементы, высота которых определяется требованиями моделей турбулентности;

3) весьма эффективными для моделирования турбулентных характеристик потока теплоносителя за перемешивающими решетками являются вихреразрешающие модели турбулентности типа LES, DES и SAS. Однако для сравнения различных конструкций решеток, оценки их эффективности и выбора оптимальных вариантов из большого набора многие авторы используют RANS модели. Такой подход значительно менее требователен к вычислительным ресурсам и позволяет быстро получить осреднённые характеристики течения, необходимые для расчёта критериев эффективности решёток с достаточной для инженерной практики точностью;

4) наиболее точными среди RANS-моделей по сравнению с результатами верифика-

ционных экспериментов оказываются SST-модель турбулентности при условии подробного разбиения пристеночных слоёв, а также модель Рейнольдсовых напряжений. Данная модель, построенная на базе $k-\omega$ модели, способна учесть анизотропию турбулентности и вторичные течения, возникающие как в «гладком» пучке твэлов, так и при протекании теплоносителя через перемешивающую решетку ТВС.

Основными критериями, характеризующими эффективность перемешивающих решеток, являются критическая тепловая мощность и коэффициент запаса до кризиса теплоотдачи. Важно отметить, что текущий уровень трехмерного математического моделирования не позволяет напрямую определить эти величины с помощью CFD-программ. Поэтому современные расчетные исследования направлены на определение характеристик перемешивающих решеток для однофазного теплоносителя. Для анализа эффективности решеток различными авторами предлагаются следующие критерии эффективности:

- 1) относительный коэффициент местного гидравлического сопротивления решетки;
- 2) поперечная скорость в межтвэльных зазорах за решеткой;
- 3) коэффициент межъячеечного перемешивания;
- 4) величина локальных осевых скоростей теплоносителя за решеткой;
- 5) критерии, характеризующие вихревое воздействие дефлекторов;
- 6) относительный коэффициент теплоотдачи (число Нуссельта);
- 7) температура поверхности твэла;
- 8) температура теплоносителя по сечению ТВС;
- 9) неравномерность температуры по сечению ТВС;
- 10) увеличение статического давления на твэл;
- 11) пульсации давления на стенке твэла, возникающие за перемешивающей решеткой;
- 12) расстояние затухания гидродинамических возмущений, вызванных дефлекторами;
- 13) прочность конструкции перемешивающей решетки;
- 14) увеличение металлоёмкости конструкции дистанционирующей решетки за счет дефлекторов.

Настоящая работа является продолжением расчетных исследований, представленных в [10]. Расчетный анализ, основанный на оценке критериев относительного коэффициента гидравлического сопротивления (КГС), относительного числа Нуссельта, распределения температуры поверхности твэла и относительной поперечной скорости, позволил выбрать конструкции дефлекторов, наиболее эффективных с точки зрения теплогидравлики в рассмотренном в [10] фрагменте ТВС, состоящем из одинаковых (стандартных) межтвэльных ячеек.

Однако необходимо рассмотреть эффективность выбранных дефлекторов применительно к гидравлическим ячейкам вблизи направляющего канала (НК) ТВС, поскольку в данной области нарушается структура расположения дефлекторов, вызванная установкой НК, имеющего больший диаметр по сравнению с твэлами.

Расчетная область и методика проведения расчетов

Рассмотренная расчетная модель фрагмента ТВС-КВАДРАТ (рис. 1) представляла собой твэльный пучок 4×4 твэла с дистанционирующей перемешивающей решеткой. В длину модель соответствовала одному пролету между ДР. В центральной части пучка имитировался один направляющий канал, имеющий диаметр больше, чем у твэлов. Перемешивающая дистанционирующая решетка в районе направляющего сконструирована таким образом, что на каждую гидравлическую ячейку вблизи НК приходится только по одному дефлектору.

В процессе поиска оптимальной конструкции проводилось исследование формы дефлекторов посредством изменения представленных геометрических параметров:

- угла отгиба α ;
- высоты H ;
- угла наклона линии сгиба β .

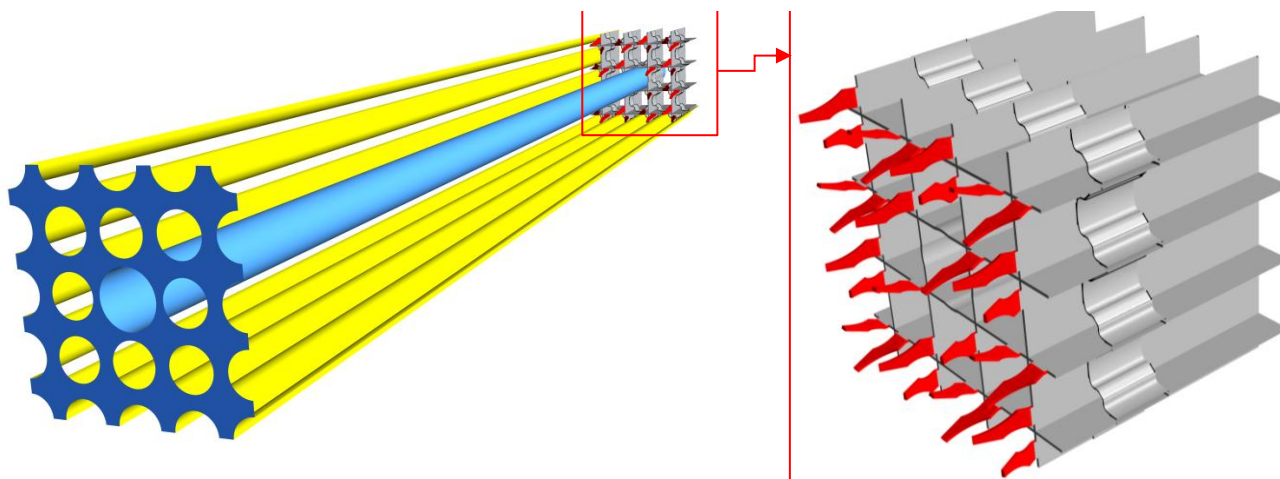


Рис. 1. Общий вид расчетной модели

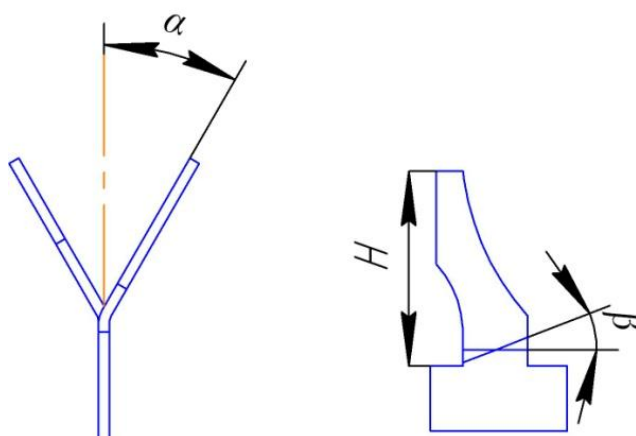


Рис. 2. Геометрические характеристики deflectоров

В области дистанционирующих решёток генерировалась тетраэдрическая сетка с призматическими слоями на поверхностях.

Таблица 1

Основные характеристики расчётной сетки

Параметр	Величина
Максимальный размер элемента в поперечном сечении, мм	0,5
Общее число сеточных элементов, млн	25
Число призматических слоев	15
Значение безразмерного расстояния от стенки y^+	1÷3
Максимальный продольный размер, мм	10
Коэффициент роста продольных элементов	1,1
Высота первого пристеночного элемента, мм	0,002
Коэффициент роста призматических слоёв	1,25

Размер элемента в поперечном сечении выбирался из условия равенства его 1/20 гидравлического диаметра, высота первого пристеночного элемента подбиралась исходя из требований модели турбулентности y^+ в диапазоне от 1 до 3. Далее эта сетка выдавливалась методом нормальной экструзии вдоль твэлов. Максимальный продольный размер сеточного элемента при этом соответствовал гидравлическому диаметру. Общий вид расчетной сетки представлен на рис. 3.

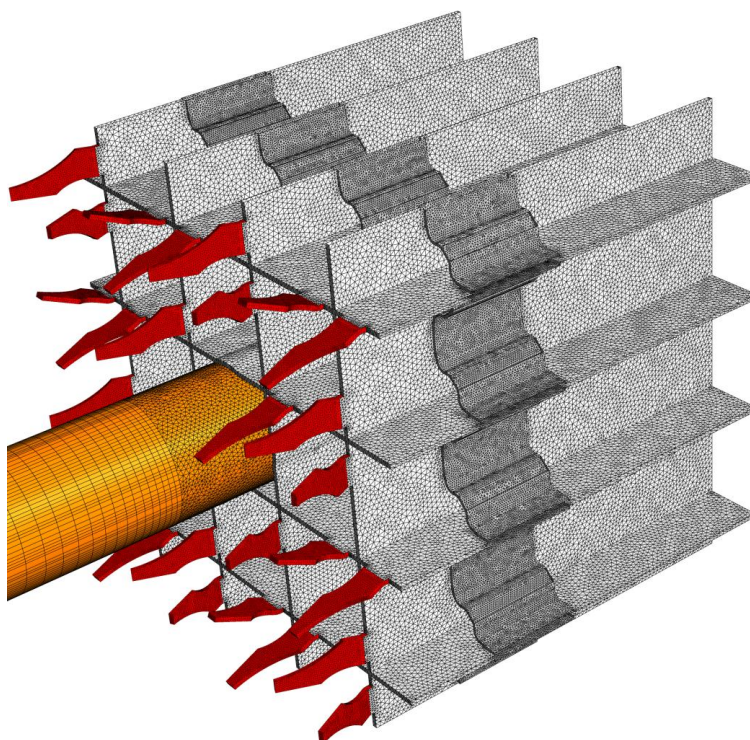


Рис. 3. Общий вид расчётной сетки

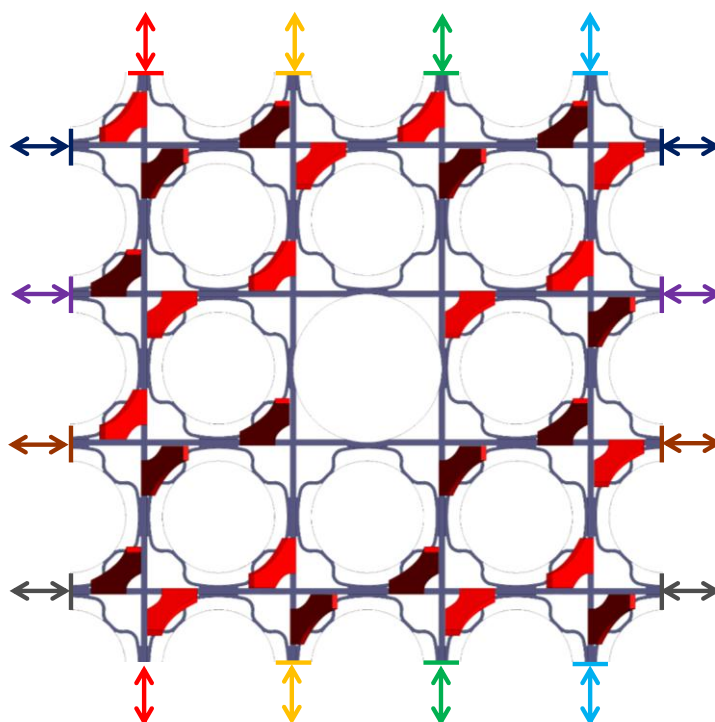


Рис. 4. Схема расположения поверхностей с граничными условиями периодичности

Настраиваемые параметры решателя Ansys CFX 14.0 следующие:

- тип расчёта – стационарный;
- модель жидкости – сплошная несжимаемая среда;
- свойства жидкости – неизменные;
- модель турбулентности – модель Рейнольдсовых напряжений BSL-RSM (поскольку она позволяет учесть анизотропию турбулентности, вызванную дефлекторами).

В качестве граничных условий задавались режимные параметры теплоносителя, характерные для активных зон реакторов PWR:

- среднерасходная скорость теплоносителя на входе в модель – 4,46 м/с (задавался профиль скорости, соответствующий стабилизированному течению теплоносителя в пучке стержней);
- температура теплоносителя на входе – 308°C;
- нулевое статическое избыточное давление на выходе из модели;
- тепловой поток на поверхности ТВЭЛов – 657000 Вт/м²;
- поверхности (ТВЭЛов, направляющего канала, дистанционирующей решётки) – адиабатические гладкие без проскальзывания (условие прилипания).

С целью увеличения представительности результатов был проведён начальный расчёт модели с дистанционирующей решёткой без дефлекторов потока для получения стабилизированных профилей граничных условий. Полученные в процессе начального расчёта данные – профиль скорости, рейнольдсовых напряжений и температуры на расстоянии пяти калибров после дистанционирующей решётки – экспортировались в качестве граничного условия на входе для расчётов с дефлекторами.

Кроме того, согласно схеме на рис. 4, задавались периодические граничные условия на противолежащих гранях, что позволило смоделировать бесконечно большой в поперечном сечении пучок ТВЭЛов.

Результаты

В данной работе теплогидравлическая эффективность дефлекторов перемешивающей-дистанционирующей решетки оценивается с точки зрения следующих критериев:

- *относительное число Нуссельта* (Nu/Nu_0) – критерий, характеризующий изменение интенсивности теплоотдачи в ТВС, где Nu – относительное число Нуссельта дистанционирующей решётки с соответствующим типом дефлекторов; Nu_0 – относительное число Нуссельта дистанционирующей решётки без дефлекторов;
- *распределение температуры по поверхности твэла* – критерий, позволяющий оценить степень неравномерности температуры стенки твэла;
- *неравномерность локальных осевых скоростей за решёткой* – критерий, характеризующий изменение локальной осевой скорости теплоносителя при протекании через дистанционирующую решетку с дефлекторами.

Сравнительный анализ распределения поперечных скоростей теплоносителя в моделях ТВС с НК и без него (рис. 5), позволяющий оценить, как НК влияет на теплогидравлические характеристики ТВС, показал:

- отсутствие четырех дефлекторов перемешивающей решетки в районе НК оказывает влияние на гидродинамику потока в прилегающих ячейках, а также на части ячеек второго ряда (на рисунке выделены две ячейки второго ряда, при сравнении которых с аналогичными результатами ячеек регулярной области делается вывод о степени влияния направляющего канала);
- измененная структура течения потока теплоносителя в районе НК ТВС приводит к изменению условий охлаждения четырех ТВЭЛ, находящихся в непосредственной близости к НК;
- условия охлаждения остальных ТВЭЛ соответствуют регулярной области ТВС и совпадают с результатами расчета модели пучка ТВЭЛ без НК.

Для дальнейшего анализа был выбран твэл, отмеченный на рис. 5, условия охлаждения которого являются ухудшенными. На рис. 6 представлено распределение относительного числа Нуссельта по поверхности исследуемого твэла в нескольких сечениях по высоте для стандартного дефлектора с высотой 9 мм и углом отгиба 25 град. Под относительным числом Нуссельта в данном случае понимается отношение числа Нуссельта для моделей области НК с дефлекторами к числу Нуссельта для модели области НК без дефлекторов. В целях упро-

щения визуализации на рис. 6 и на последующих двух прочерчена утолщённая линия окружности с единичным радиусом, совпадающая с образующей твэла.

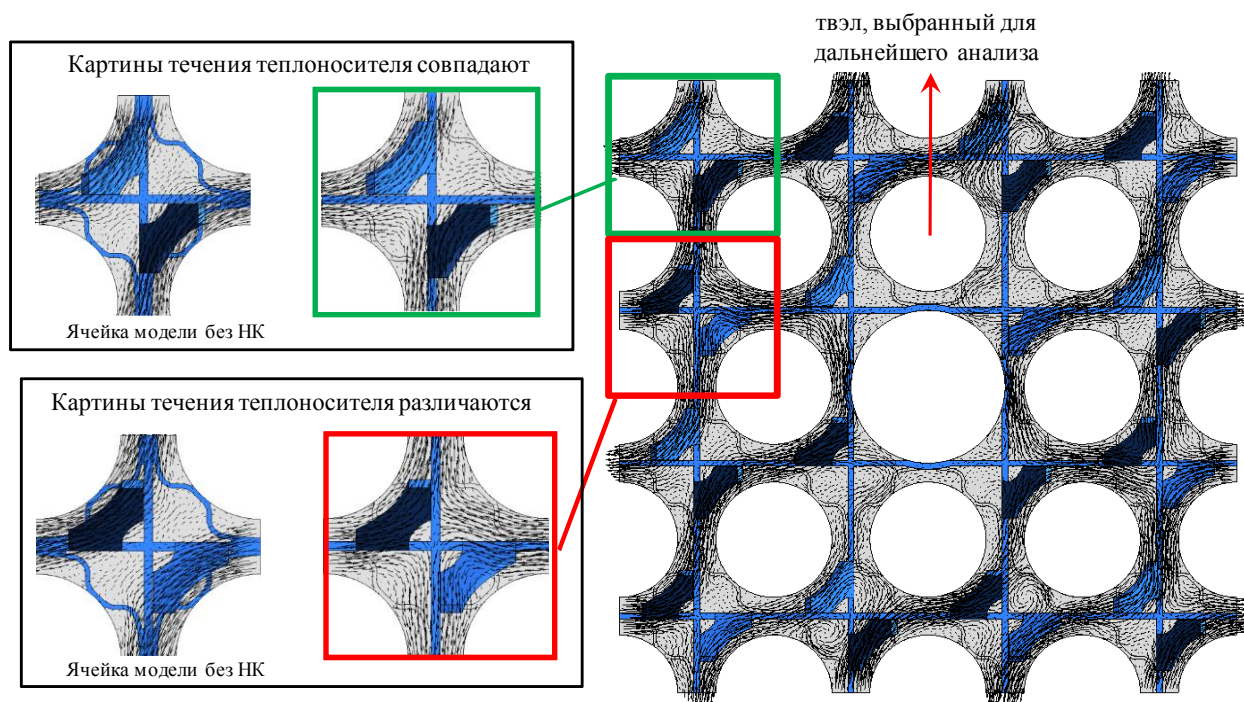
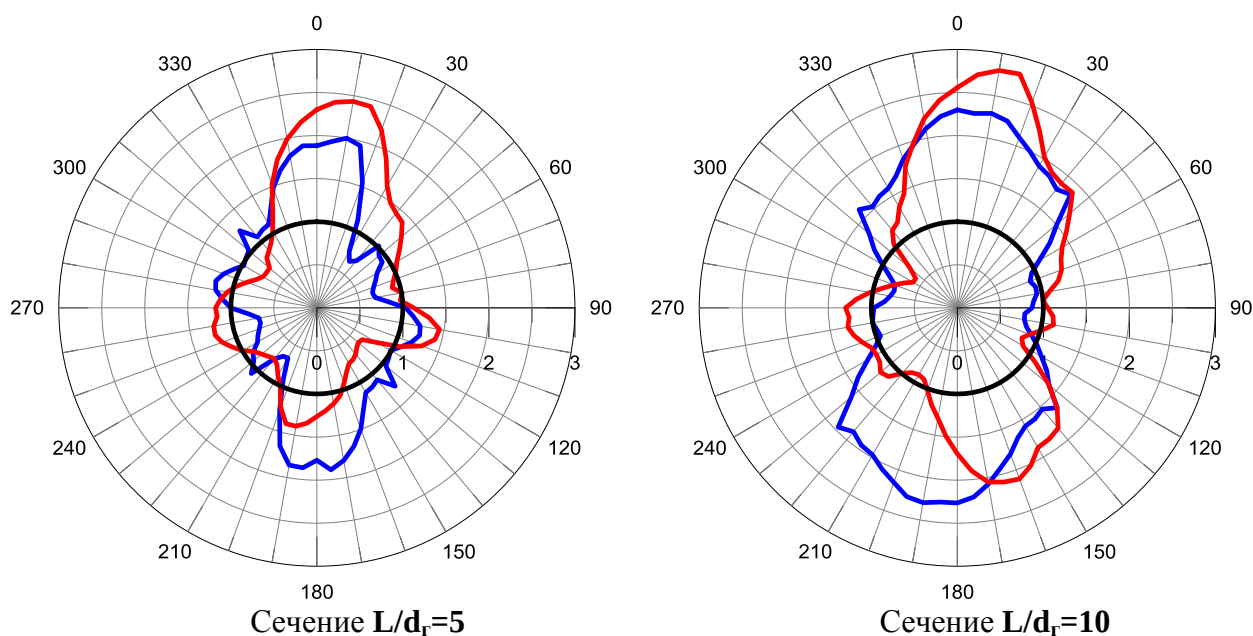


Рис. 5. Сравнительный анализ распределения поперечных скоростей теплоносителя в моделях ТВС с НК и без него

Данные из рис. 6 показывают, что существуют области, в которых относительное число Нуссельта меньше единицы, что свидетельствует о том, что установка стандартных дефлекторов на решётке привела к отрицательному эффекту с точки зрения теплоотдачи по сравнению со случаем без дефлекторов.

Для детального анализа в дальнейшем рассматривается распределение относительного числа Нуссельта по периметру твэла, прилегающего к НК, в сечении, расположенном за решёткой на расстоянии пяти гидравлических диаметров (рис. 7).



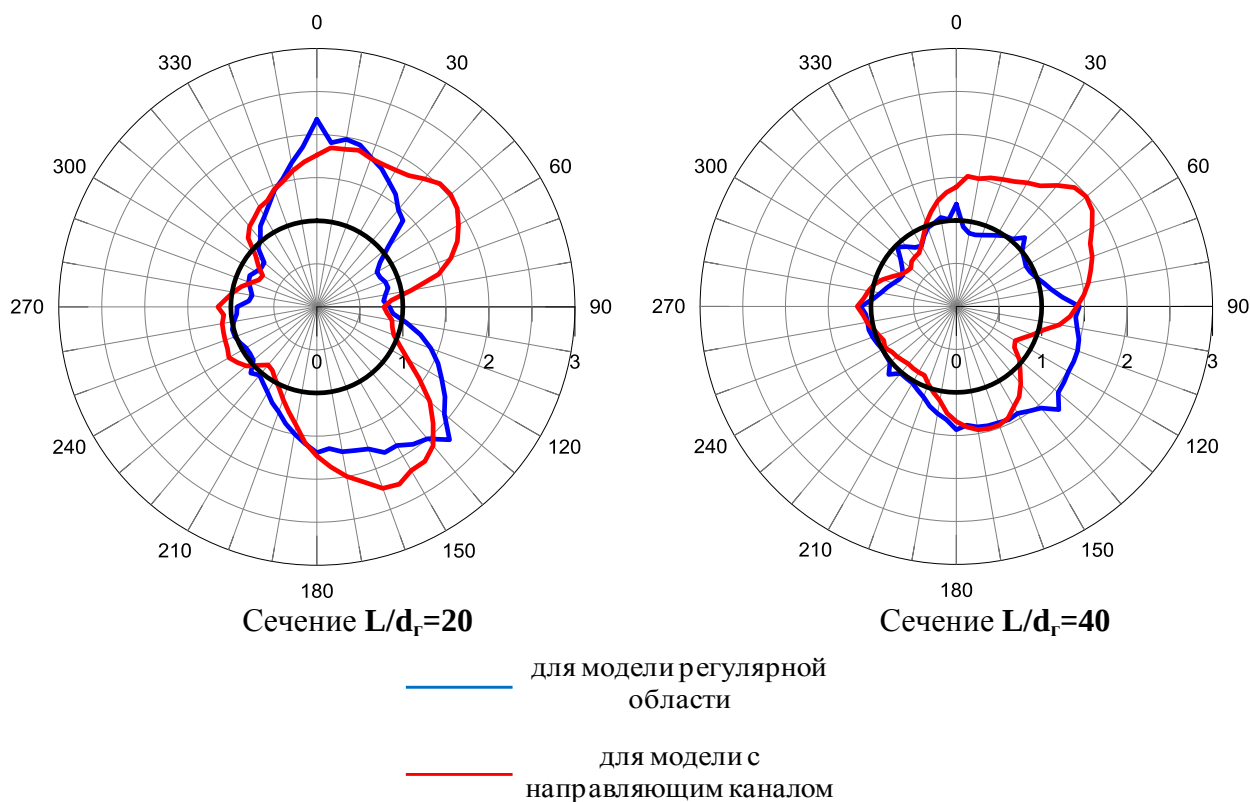


Рис. 6. Распределение относительного числа Нуссельта по поверхности исследуемого твэла в нескольких сечениях по высоте для стандартного дефлектора

Оказалось, несмотря на то, что стандартный дефлектор в регулярных ячейках обеспечивал высокую интенсификацию теплообмена, в области НК он явился не столь эффективным. Из рис. 7 видно, что установка дефлекторов такого типа не обеспечивает положительный эффект на всей поверхности твэла, существуют области в которых происходит снижение эффективности теплоотдачи.

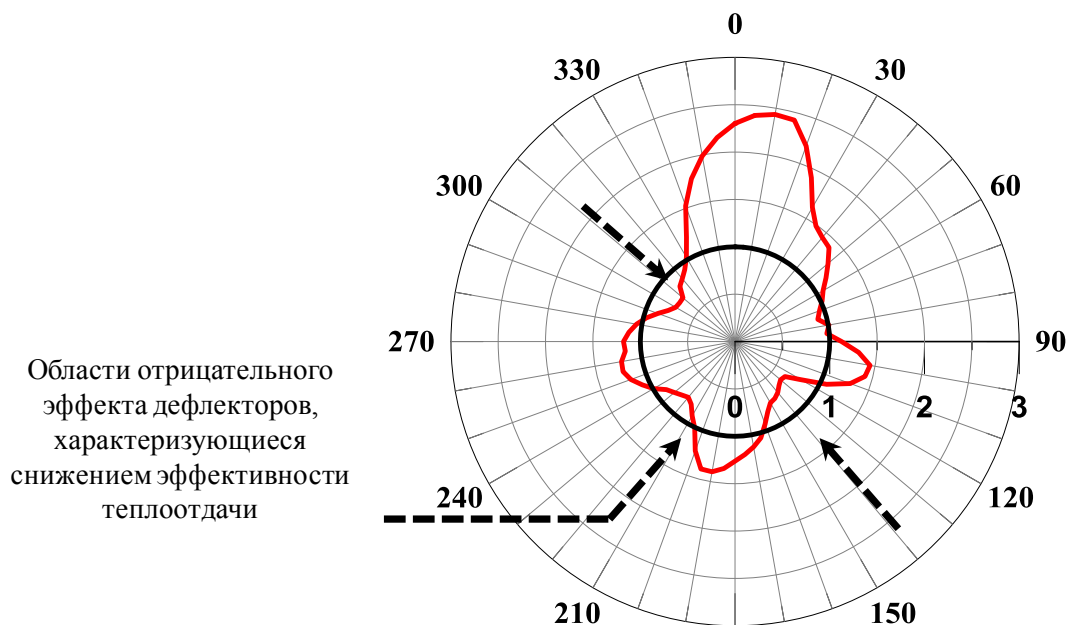


Рис. 7. Распределение относительного числа Нуссельта по поверхности исследуемого твэла в сечении, расположенном а решёткой на расстоянии пяти гидравлических диаметров

Дальнейшей задачей был поиск взаимосвязи гидродинамических характеристик и температурного состояния стенки твэла. На рис. 8 представлено наложение контурного графика относительной осевой скорости, векторного поля поперечной скорости, а также распределения относительного числа Нуссельта по периметру твэла для сечения, расположенного после ПР на расстоянии пяти гидравлических диаметров.

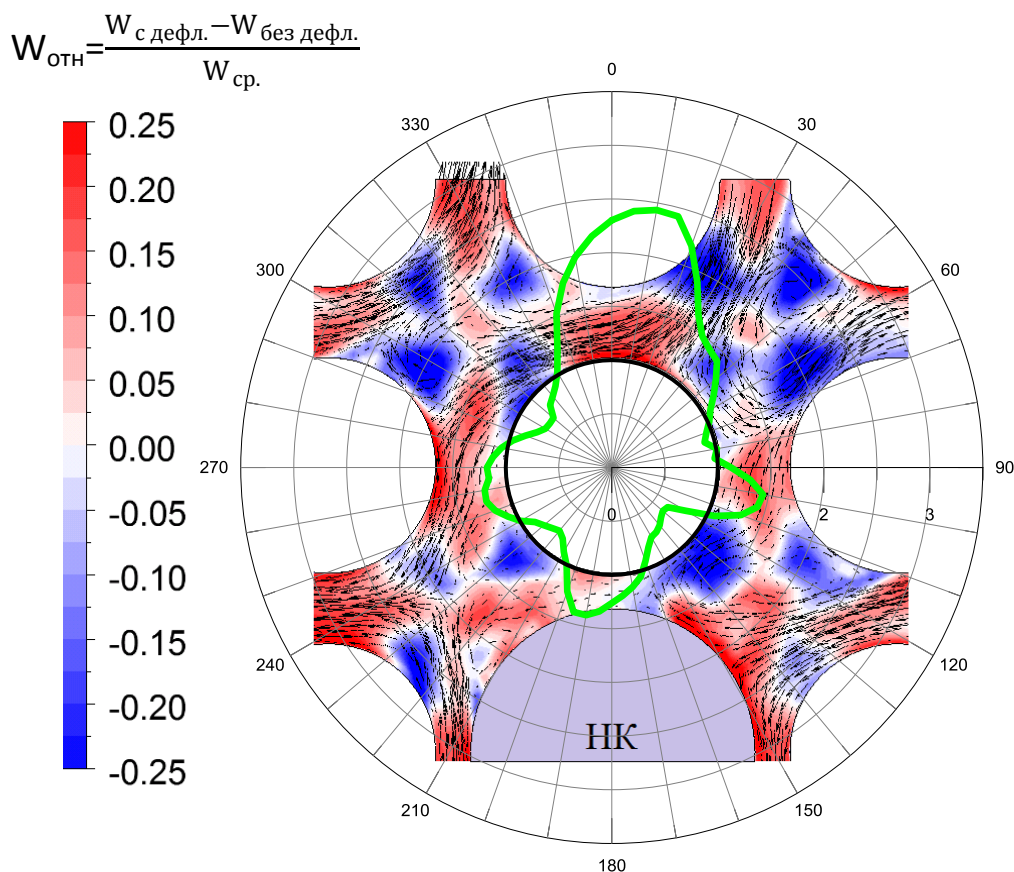


Рис. 8. Наложение контурного графика относительной осевой скорости, векторного поля поперечной скорости, а также распределения относительного числа Нуссельта по периметру твэла для сечения, расположенного после ПР на расстоянии пяти гидравлических диаметров

Под относительной скоростью в данном случае понимается увеличение или уменьшение осевой скорости по сравнению со случаем без дефлекторов в долях от среднерасходной скорости. Соответственно положительные значения свидетельствуют об увеличении локальной скорости, отрицательные – об уменьшении. Из рис. 8 можно видеть, что области периметра твэла, в которых происходит ухудшение теплосъёма, соответствуют зонам снижения осевой скорости потока теплоносителя вблизи стенки твэла. При этом возникновение поперечных скоростей в этих зонах не компенсирует данный отрицательный эффект.

В дальнейшем представленная методика была применена к нескольким конструкциям дефлекторов. Анализ полученных данных позволил установить, что дефлектор с высотой 8 мм, углом отгиба 30 град. и углом линии сгиба 15 град., является лучшим из рассмотренного диапазона геометрических параметров, поскольку при его установке на дистанционирующую решётку практически отсутствуют области на поверхности твэла, на которых значения относительного числа Нуссельта меньше единицы.

Заключение

Комплексный анализ результатов численного моделирования течения потока теплоносителя во фрагменте ТВС-КВАДРАТ с перемешивающей дистанционирующей решёткой позволили сделать следующие выводы:

1. Отсутствие четырех дефлекторов перемешивающей решетки в районе НК оказывает влияние на два прилегающих ряда гидравлических ячеек ТВС
2. В зависимости от конструкции дефлекторов на поверхностях твэлов могут возникать области, в которых происходит снижение эффективности теплоотдачи.
3. Из рассмотренных вариантов формы дефлекторов предпочтительным является дефлектор с высотой 8 мм, углом отгиба 30° и углом наклона линии сгиба 15° .

Предложенная методика оценки теплогидравлической эффективности различных перемешивающих решёток позволяет ускорить процесс поиска оптимальных вариантов конструкции, а также сократить объём экспериментальных исследований. Кроме того, данная методика может быть адаптирована для анализа конструкций других ТВС.

Библиографический список

1. **Peña-Monferrer, C.** CFD Turbulence Study of PWR Spacer-Grids in a Rod Bundle : research article / C. Peña-Monferrer, J. L. Muñoz-Cobo, S. Chiva // Hindawi Publishing Corporation Science and Technology of Nuclear Installations. – 2014. – V. 2.
2. **Chang, S.K.** Turbulent mixing in a rod bundle with vaned spacer grids: OECD/NEA–KAERI CFD benchmark exercise test / S.K. Chang, S. Kim, C.H. Song // Nuclear Engineering and Design. – 2014. – № 279. – P. 19–36.
3. **Dongil Chang, Stavros Tavoularis** Hybrid simulations of the near field of a split-vane spacer grid in a rod bundle / Department of Mechanical Engineering, University of Ottawa // International Journal of Heat and Fluid Flow. – 2014. – P. 42–54.
4. **Song, K.N.** Performance Evaluation Of New Spacer Grid Shapes For Pwrs / K.N. Song, Soo-Bum Lee, Sang-Hoon Lee // Nuclear Engineering And Technology. – 2007. – V. 39 – № 6. – P. 737–746.
5. **Khan, M. O.** CFD Study of Single Phase Flow in a PWR Spacer Grid // Proceedings of 2013 10th International Bhurban Conference on Applied Sciences & Technology (IBCAST). – Islamabad (Pakistan). – 2013. – P. 243–248.
6. **Kazuo, I.** CFD application to advanced design for high efficiency spacer grid // Nuclear Engineering and Design. – 2014. – P. 10.
7. **Byung, S. S.** Experimental study on the effect of angles and positions of mixing vanes on CHF in a 2×2 rod bundle with working fluid R-134a / S. S. Byung, Soon Heung Chang // Nuclear Engineering and Design. – 2005. – № 235. – P. 1749–1759.
8. **Матюшенко, А. А.** Расчет течения вдоль пучка цилиндров при наличии локальных завихрителей потока / А. А. Матюшенко, А. В. Гарбарук // Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических технологиях : XIX школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика А. И. Леонтьева. – Орехово-Зуево, 2010. – С. 20–24.
9. **Носков, А. С.** Применение CFD кода для анализа эффективности смесительных дефлекторов решеток ТВС / А. С. Носков, А. А. Фальков, Д. Л. Шипов // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: материалы 8-й Междунар. научно-технич. конф. – Подольск, 2013.
10. **Добров, А.А.** Применение современных CFD-кодов для моделирования теплогидравлических процессов в ТВС-КВАДРАТ реактора PWR / А.А. Добров [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2016. – № 3. – С. 55–63.

Дата поступления
в редакцию 15.06.2018

S.M. Dmitriev, A.A. Dobrov, M.A. Legchanov

**NUMERICAL ANALYSIS OF MIXING GRID EFFICIENCY IN THE CONTROL ROD
AREA OF THE TVS-KVADRAT FUEL ASSEMBLY USING ANSYS CFX**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

Purpose: Numerical simulation of coolant flow in the TVS-KVADRAT fuel assembly with mixing grid using ANSYS CFX program.

Design/methodology/approach: Computational domain was the fragment of TVS-KVADRAT fuel assembly with mixing grid and control rod. The main characteristics of the mesh properties applied are maximum size of element (0,5 mm), number of elements (25 million) and number of prism layers (15). As boundary conditions inlet flow velocity, temperature of coolant, pressure in the model, the rate of heat transfer have been used. Reynolds stress turbulence model (BSL-RSM) has been chosen as it considers the anisotropy of turbulence.

Results: Application of vanes has led to distortion of temperature profile, at that, there are areas where temperature has increased compared to the spacer grid without mixing vanes. It probably happens due to the local speed reduction of coolant in these areas.. The maximum value of Nusselt number corresponds to vanes with the maximum angle of bending, however decreasing of the heat transfer efficiency occurs at shorter distance than at all others. Based to data obtained vanes with construction which allows to minimize both the average temperature and the fuel rod perimeter temperature unevenness have been chosen.

Key words: reactor core, nuclear reactor, fuel assembly, coolant hydrodynamics, spacing grid, mixing grid, computational fluid dynamics.

УДК 621.314:621.318

Е.В. Калинин

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В АНИЗОТРОПНОМ ШИХТОВАННОМ СЕРДЕЧНИКЕ.**Ч. 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИ РАСЧЕТАХ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ВЕКТОРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАМАГНИЧИВАНИЯ ХОЛОДНОКАТАНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СТАЛЕЙ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Цель: Известна необходимость в проведении сравнительного анализа результатов расчета магнитного поля при использовании векторных характеристик намагничивания холоднокатаных электротехнических сталей с данными экспериментального определения распределения вектора магнитной индукции $\mathbf{B}$ в анизотропном шихтованном сердечнике.

Методология: Для сталей 3413 и 2412 с одинаковым химическим составом, но существенно отличающимися доменной структурой и анизотропией магнитных свойств проведен цикл совместных магнитных измерений полосовых образцов и кольцевых шихтованных сердечников с отношением радиусов $r=2,1$. На частотах $f=50$ и 400 Гц получены экспериментальные зависимости амплитуды индукции $B_m(\rho)$ от радиальной координаты ρ кольцевых сердечников при различных значениях средней по сечению индукции B_m в двух угловых положениях, совпадающих с осями магнитной анизотропии $\alpha=0$ и 90° . Для обеих марок сталей на частоте $f=50$ Гц экспериментально определены угловые характеристики магнитной анизотропии $\psi(B_m, \alpha)$.

Результаты: Описана методика эксклюзивного подхода к экспериментам, позволяющая без нарушения целостности шихтованного сердечника производить локальные магнитные измерения.

Значение исследования: Хорошее согласие результатов расчета и эксперимента при различных значениях степени магнитной анизотропии K сталей доказывает правильность выбранной концепции используемых векторных характеристик магнитной анизотропии.

Новизна/ценность: Получено экспериментальное подтверждение особенностей перераспределения магнитного поля в анизотропном шихтованном сердечнике в ненасыщенных режимах, связанных с величинами степени анизотропии $K(f)$, пространственного угла $\psi(\mathbf{B})$ между векторами магнитного поля $\mathbf{B}$ и $\mathbf{H}$, а также коэрцитивной силы используемой стали $H_c(f)$.

Ключевые слова: векторные характеристики намагничивания, холоднокатаные электротехнические стали, кольцевой анизотропный сердечник, локальные измерения, магнитная индукция, сравнение эксперимента с расчетом.

Свойственная холоднокатаным электротехническим сталям магнитная анизотропия характеризуется наличием пространственного угла ψ между векторами индукции $\mathbf{B}$ и напряженности $\mathbf{H}$ магнитного поля в плоскости прокатки, кроме намагничивания вдоль осей анизотропии, где $\psi=0$. В отечественной и зарубежной справочной литературе [1-5] в качестве характеристик намагничивания анизотропных сталей приводятся амплитудные зависимости $H_{ам}(B_m, \alpha)$, полученные на полосовых испытательных образцах при согласованном способе шихтовки в аппарате Эпштейна. При этом $H_{ам}$ – проекция вектора $\mathbf{H}_m$ на направление вырубки α , кроме направлений $\alpha=0$, $\alpha=90^\circ$ (и $\alpha=55^\circ$ - при насыщении). Неполнота таких характеристик очевидна, однако получение более полной информации для анизотропных сталей ГОСТом [6] не предусматривается.

Нами опубликованы материалы по экспериментальному определению векторных характеристик намагничивания (ВХН) текстурованной стали 3413 в виде семейств $H_{ам}(B_m, \alpha)$ и $\psi(B_m, \alpha)$ [7], их математическому описанию [8, 9] и использованию при расчетах магнитного поля шихтованного анизотропного сердечника кольцевой формы в функции насыщения и отношения радиусов r [10-12]. Показано принципиальное отличие распределения магнитной индукции $\mathbf{B}$ анизотропного сердечника от изотропного при учете угловых зависимостей $\psi(B_m, \alpha)$. Установлено, что использование в качестве характеристик анизотропного материала семейства справочных (скалярных) кривых намагничивания $H_{ам}(B_m, \alpha)$ [1-5], то есть с

принятием дополнительного условия $\psi(B_m, \alpha) = 0$, приводит к такому же распределению вектора $\mathbf{B}$ в кольцевом сердечнике, как и при отсутствии магнитной анизотропии.

Результаты исследований апробированы и подтверждены актами внедрения Всесоюзного проектно-конструкторского и технологического института трансформаторостроения (ВИТ) (г. Запорожье), Всесоюзного проектно-конструкторского и технологического института электромашиностроения (ВНИПТИЭМ) (г. Владимир), Института электродинамики АН УССР (ИЭД) (г. Киев). При этом экспертами высказывались пожелания об экспериментальном подтверждении результатов моделирования. Необходимость экспериментальной проверки результатов расчета магнитного поля анизотропного шихтованного сердечника с учетом ВХН обусловлена и разным пониманием характеристик магнитной анизотропии [8, 9, 14-20].

Так, в работе [16] измерения характеристик произведены при несогласованной шихтовке полосовых образцов в пакет с ошибочным предположением, что при этом вектор $\mathbf{H}$ будет совпадать с направлениями вырубki полосовых образцов. В [15] приводятся ВХН для стали марки М6 в статике ($f = 0$). В то же время в [8, 9] показано, что степень анизотропии магнитных свойств K холоднокатаных сталей, равная отношению максимальных магнитных проницаемостей по осям анизотропии материала

$$K = \mu_{\max} / \mu_{\min}, \quad (1)$$

зависит от частоты перемагничивания f . Поэтому при расчетах рекомендуется применять ВХН, полученные при соответствующей f . В публикациях [17, 18] при расчетах фактически использовано семейство скалярных кривых намагничивания текстурованной стали.

Авторами более поздних работ [19, 20] остались непонятными результаты наших исследований по анализу, математическому описанию ВХН, обобщению их для других холоднокатаных сталей [8, 9] и не замечены выводы по экспериментальному определению распределения индукции в кольцевом анизотропном сердечнике [13]. В отмеченных работах вместо реальных ВХН используется векторная модель намагничивания $\mathbf{H}(\mathbf{B})$ на основе введения потенциальной функции $F(\mathbf{B})$. Приведенные результаты моделирования, представленные семействами характеристик намагничивания для сталей марок 3405 и Э320, не соответствуют действительности и противоречат экспериментальным данным [7-9, 14, 15]. Как следствие, в [19] для случая линейной анизотропии с отношениями проницаемостей по осям $K=10$ делаются выводы о незначительном влиянии анизотропии на распределение $\mathbf{B}$ в кольцевом образце с отношением радиусов $r = 1,67$. Выводы противоречат нашим результатам [8, 10, 12], где при меньших значениях $r = 1,4$ и степени анизотропии $K=7$ наблюдается существенное перераспределение индукции $\mathbf{B}$.

В связи с неоднозначностью подходов к определению ВХН, а также противоречивостью выводов разных авторов о результатах их использования при расчетах появляется потребность в подробном описании экспериментальных исследований, отдельные результаты которых представлены в [13].

При проведении экспериментов приняты следующие рекомендации.

1. Для определения фактического характера распределения $\mathbf{B}_m$ предложено использовать анизотропный шихтованный сердечник кольцевой формы с тем, чтобы обеспечить:

- равномерное намагничивание по периметру;
- минимум влияющих геометрических и технологических факторов;
- удобство при расчетах магнитного поля в полярных координатах (ρ, φ).

По результатам таких расчетов [10, 11] ранее установлено, что кольцевой анизотропный сердечник имеет наибольшие аномалии распределения магнитного поля вдоль радиальной координаты ρ в угловых положениях $\varphi = 0$ и 90° , соответствующих осям анизотропии материала $\alpha = 0$ и 90° , где направления векторов магнитного поля совпадают, при этом $\mathbf{B} = B_\varphi$, $\mathbf{H} = H_\varphi$ [11]. Указанные угловые положения φ и рекомендованы для проведения измерений.

2. Для определения зависимостей $B_m(\rho)$ по радиальной координате в интервале радиусов $\rho \in [R_n; R_v]$ (где R_n , R_v - наружный и внутренний радиусы) требуется проведение локальных измерений. Сверление отверстий в исследуемых зонах сердечника для размещения локальных измерительных обмоток индукции недопустимо, так как приведет к искажению исходной картины магнитного поля.

В [21] предложен метод, основанный на измерении локальным индукционным датчиком-зондом тангенциальной составляющей напряженности H_t в воздухе на поверхности пластин сердечника в разных точках с учетом принципа непрерывности этой составляющей на границе сталь - воздух.

Суть метода состоит в определении значений $B_{fm}(\rho)$ по измеренным $H_{fm}(\rho)$ с использованием достоверных экспериментальных характеристик $H_m(B_m)$ стали, из которой изготовлен испытуемый сердечник, для угловых положений $\alpha = 0$ и 90° . Для получения указанных характеристик проводятся дополнительные экспериментальные исследования на вырубленных под различными углами к прокатке пакетов стандартных полосовых испытательных образцов [14, 15] или на специальных кольцевых образцах по методике [22, 23].

В нашем эксперименте шихтованный кольцевой сердечник для повышения качества измерений H_{fm} разделён на два полупакета с воздушным промежутком для размещения датчика-зонда. В угловых положениях $\varphi = 0$ и 90° для доступа к боковой поверхности предусмотрены радиальные каналы, поперечные размеры которых допускают свободное перемещение датчика- зонда вдоль радиальной координаты ρ , а сам датчик сориентирован так, что $H_{tm} = H_{fm}$. Шихтовка отдельных пластин сердечника осуществлена согласованным способом, чтобы направления прокатки соседних колец пакета совпадали.

3. Расчет магнитного поля сердечника с целью сопоставления результатов с экспериментом также требует достоверные ВХН материала кольцевого сердечника. Поэтому совместно с кольцевым сердечником из одного и того же рулона холоднокатаной стали изготовлены и подвергнуты восстановительному отжигу пакеты полосовых образцов для различных угловых положений вырубки $\alpha \in [0; 90^\circ]$ к направлению прокатки.

4. Выбраны холоднокатаные электротехнические стали с разными уровнями анизотропии. С ними произведен полный цикл запланированных экспериментальных исследований в расширенном частотном диапазоне f (для более полной информации), а измерения выполнены на высоком метрологическом уровне.

Исследования проводились в лаборатории физических методов испытаний (ФМИ) Центральной заводской лаборатории Верх-Исетского металлургического завода (ВИЗ) на комплекте магнитно-измерительной аппаратуры производства Японии под руководством старшего инженера лаборатории Малыгина М.А. В процессе подготовки были отобраны две марки холоднокатаной стали с одинаковым химическим составом, но с разной технологией прокатки: текстурованная трансформаторная сталь с полосовой доменной структурой марки 3413 толщиной $d=0,35$ мм и динамная сталь с мелкой доменной структурой марки 2412 толщиной $d=0,5$ мм. Из одного отрезка рулона каждой марки стали нарублены пакеты стандартных полосовых образцов 280×30 мм в шести угловых положениях к направлению прокатки ($\alpha = 0; 20^\circ; 30^\circ; 55^\circ; 75^\circ; 90^\circ$) и изготовлены пакеты кольцевых образцов с наружным диаметром $D_n=231,2$ мм и внутренним - $D_v=110$ мм (то есть с отношением радиусов $r = D_n/D_v = 2,1$). В соответствии с требованиями ГОСТ [6] и условиями эксперимента, все изготовленные образцы подверглись совместному восстановительному отжигу в проходной печи. Кольцевые пакеты обеих марок сталей выполнены с воздушным промежутком посередине размером 2,5 мм и двумя радиальными каналами в требуемых угловых положениях с шириной 20 мм, в соответствии с габаритными размерами датчика - зонда. Сам датчик H_f с поперечными размерами 10×10 мм, числом витков $W_h=2500$ на частоте $f=50$ Гц имел коэффициент напряженности магнитного поля $Kh=191$ [А/(м·мВ)], заранее установленный путем тарирования в эталонном магнитном поле. Амплитуда напряженности магнитного поля

$H_m = H_{fm}$ в точке измерения связана при этом со средним значением э.д.с. $E_{ср}$ датчика, измеренной в [мВ], равенством $H_{fm} = K_h \cdot E_{ср}$ [А/м].

Кольцевые пакеты, уложенные согласованным способом шихтовки, для исключения влияния механических напряжений от стягивающих усилий собраны путем фиксации между собой соседних пластин в нескольких точках клеем «Момент». Массы кольцевых сердечников из сталей 3413 и 2412 с $r=2,1$ равны $m = 674$ и 719 г при соответствующих числах пластин $N = 8$ и 6 . При этом ограничение по массе стали пакетов до 1000 г связаны с требованиями по синусоидальности питающего напряжения источника Т-1000 измерительного комплекта. После изоляции пакетов снаружи электротехническим картоном на сердечники равномерно по периметру намотаны измерительная и намагничивающая обмотки с одинаковыми числами витков W и $W_n = 100$. На сердечнике из текстурованной стали 3413 в угловых положениях $\varphi = 0; 55^\circ$ и 90° дополнительно размещены три локальные по угловой координате измерительные обмотки для контроля амплитуды средней по сечению магнитной индукции B_m с одинаковым числом витков $W_l=10$.

На рис. 1 представлен кольцевой шихтованный сердечник из стали 3413 с двумя радиальными каналами и всеми обмотками, подготовленный для проведения измерений.

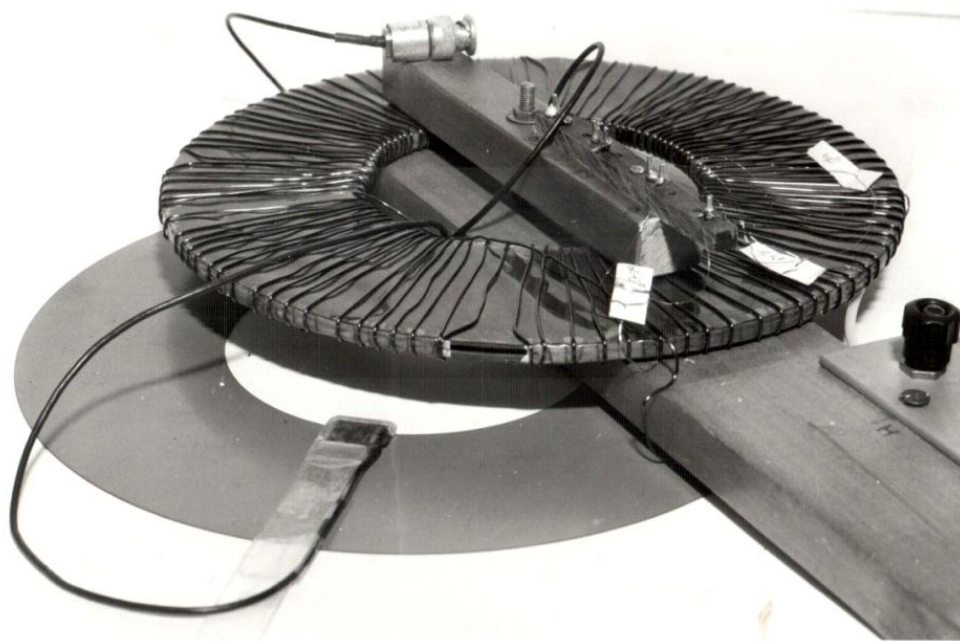


Рис. 1. Кольцевой шихтованный сердечник из стали 3413 с отношением радиусов $r=2,1$
(внизу отдельная кольцевая платина сердечника и датчик-зонд в положении для локальных измерений в точке -1, ближайшей к внутреннему радиусу)

При частоте $f=50$ Гц на установке ESS-2S с двухобмоточным аппаратом Эпштейна на пакетах полосовых образцов, уложенных согласованно, для различных углах α измерены составляющие напряженности магнитного поля H_{am} и H_{nm} при фиксированных значениях B_m . Каждый пакет также делился на два полупакета и между ними в свободных от обмоток ядрах сердечника размещались локальные индукционные датчики напряженности магнитного поля. По измеренным зависимостям составляющих $H_{nm}(B_m, \alpha)$ и $H_{am}(B_m, \alpha)$ и формуле $\psi = \arctg(H_{nm}/H_{am})$ рассчитаны значения ψ в точках измерения B_m при различных α . На рис. 2, а, б сплошными линиями представлены зависимости $\psi(\alpha)$ при различных $B_m = \text{const}$ и $\psi(B_m)$ при различных $\alpha = \text{const}$ сталей 3413 и 2412, согласующиеся с результатами [8, 9]. В угловых положениях $\alpha=0$ и 90° , являющихся осями магнитной анизотропии, вектора $\mathbf{B}$ и $\mathbf{H}$ совпадают по направлению и угол $\psi(B_m)=0$.

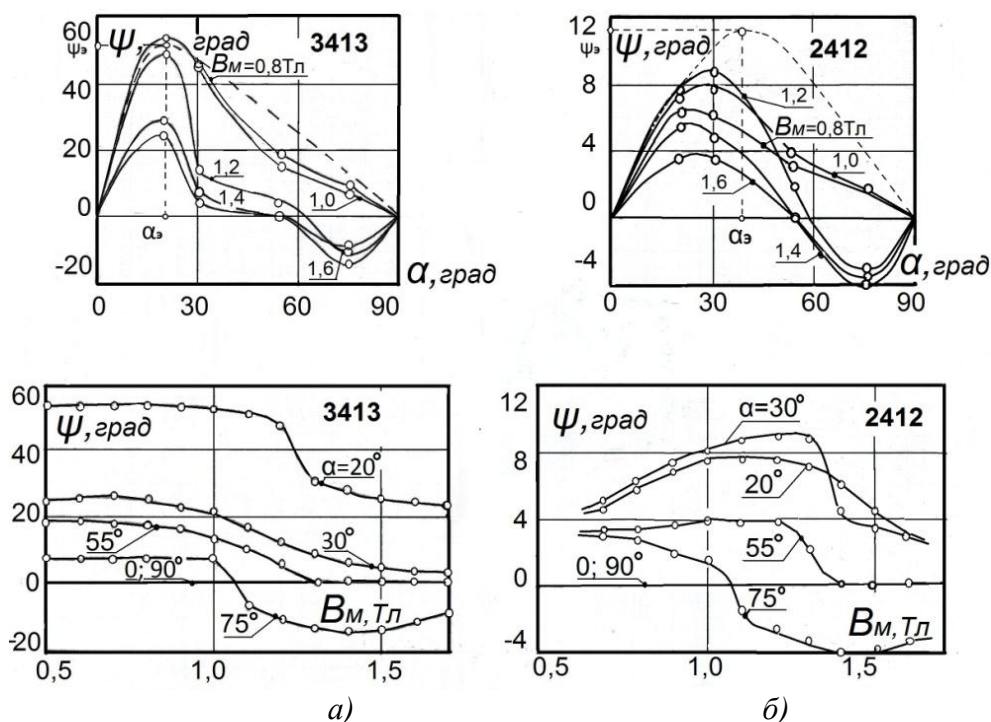


Рис. 2. Угловые характеристики магнитной анизотропии сталей 3413 – (а) и 2412 – (б):
 — экспериментальные зависимости $\psi(\alpha)$ при $B_m = (0,8; 1,0; 1,2; 1,4; 1,6)$ Тл
 и зависимости $\psi(B_m)$ при $\alpha = (0; 20^\circ; 30^\circ; 55^\circ; 75^\circ; 90^\circ)$ и расчетные для линейной анизотропии,
 - - - - - для $B_m = 0,8$ Тл

Как отмечено [8, 9], угловые характеристики являются универсальными для сравнения магнитной анизотропии различных текстурованных сталей, нахождения и обобщения закономерностей. Кривые $\psi(B_m)$ при различных $\alpha = \text{const}$ позволяют анализировать характер изменения угла ψ с ростом насыщения, а $\psi(\alpha)$ при различных $B_m = \text{const}$ - особенности изменения от угла α . Из рис. 2, а, б видно, что для обеих сталей угол ψ достигает наибольших значений в ненасыщенных режимах, когда магнитные свойства сталей близки к линейным.

В линейной среде с 90-градусной магнитной анизотропией для угла ψ в интервале $\alpha \in [0; 90^\circ]$ справедливо аналитическое выражение [8]

$$\Psi = \arctg(K \tan \alpha) - \alpha, \quad (5)$$

с экстремальным значением ψ_Σ и его угловым положением α_Σ :

$$\psi_\Sigma = 90^\circ - 2 \arcsin(1/\sqrt{1+K}); \quad \alpha_\Sigma = \arcsin(1/\sqrt{1+K}). \quad (6)$$

В части 1 работы [24] предложен способ определения K с необходимым для этого набором экспериментальных магнитных характеристик, выявлены основные причины снижения K с ростом динамики перемагничивания, произведен расчет их значений при $f=0; 50$ и 400 Гц. При рабочей для этих марок сталей частоте $f=50$ Гц: у стали 3413 $K=6,8$; у стали 2412 - $K=1,5$ (соответствующих применению в задачах магнитостатики [24]). На рис. 2, а, б на зависимостях $\psi(\alpha)$ пунктиром обозначены зависимости $\psi(\alpha)$, рассчитанные при названных значениях K по формуле (5). Для стали 3413 с большим уровнем анизотропии наблюдается их хорошее согласие с экспериментом в ненасыщенных режимах (в том числе значений $\psi_\Sigma=48^\circ$ и $\alpha_\Sigma=21^\circ$) в диапазоне углов α от 0 до α_Σ - слева от максимума ψ . Поведения кривых $\psi(\alpha)$ справа от максимума до $\alpha=90^\circ$ отличается от рассчитанных по (5) из-за влияния третьей оси анизотропии, хотя имеет качественно схожий характер.

У стали 2412 с минимальными значениями K и ψ_Σ в ненасыщенных режимах также наблюдается сходство характера $\psi(\alpha)$ с 90-градусной магнитной анизотропией ($\psi_\Sigma=11,5^\circ$ и

$\alpha = 39^\circ$), но относительное влияние присутствия третьей 55-градусной оси анизотропии [8] здесь значительно выше, чем у стали 3413. В работах [8, 9] предлагается математическое описание векторных характеристик намагничивания текстурованных сталей, в основу которого заложено использование зависимостей (5), (6). Проведенный анализ результатов измерения магнитных характеристик холоднокатаных сталей 3413 и 2412 также подтверждает правомерность применения для них математического описания ВХН [8, 9].

Для обоих кольцевых сердечников на частотах $f=50$ и 400 Гц в угловых положениях $\varphi=0$ и 90° в шести точках по радиальной координате ρ датчиком-зондом экспериментально определены значения амплитуды $H_{\text{фм}}$ в функции индукции $B_{\text{мс}}$. По кривым намагничивания $H_{\text{ам}}(B_{\text{м}})$ каждой стали, измеренным на полосовых образцах для соответствующих частоты f и углового положения вырубки α к направлению прокатки, найдены значения $B_{\text{фм}}$ и построены зависимости $B_{\text{фм}}(\rho)$ при различных $B_{\text{мс}}=\text{const}$.

На рис. 3, а представлены экспериментальные кривые распределения амплитуды магнитной индукции по радиальной координате кольцевых сердечников $B_{\text{фм}}(\rho)$ с отношением радиусов $r=2,1$ из стали 3413 при перемагничивании на частотах $f=50$ Гц, $K=6,8$ и $f=400$ Гц, $K=2,6$ [24] в угловых положениях $\varphi=0$ и 90° , совпадающих с осями магнитной анизотропии сталей $\alpha=0$ и 90° , при $B_{\text{мс}}=(0,3; 0,5; 0,8; 1,2; 1,4)$ Тл. На рис. 3, б аналогичные зависимости для стали 2412 при $K=1,5$ и $1,2$ [24]. При верхних значениях $B_{\text{мс}}=1,2$ и $1,4$ Тл условие неизменности магнитного потока по угловой координате не выполняется, что для стали 3413 показывают результаты измерений при $f=50$ Гц по локальным обмоткам $W_{\text{л}}=10$ в угловых положениях $\varphi=0; 55^\circ$ и 90° , сведенные в табл. 1. При этом значения $\delta B_{\text{мах}}$ показывают относительную величину наибольшего изменения магнитного потока по угловой координате φ при различных $B_{\text{мс}}$, измеренных по охватывающей обмотке $W_{\text{и}}=100$.

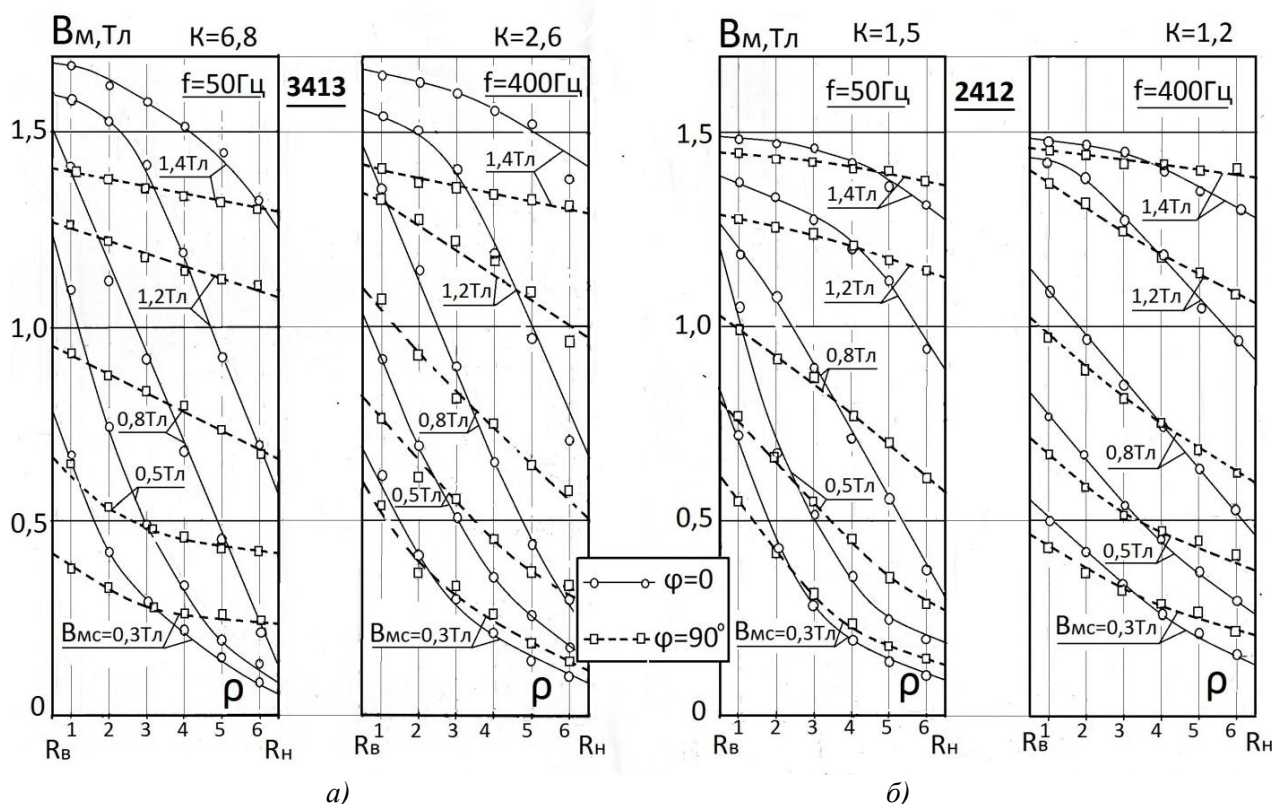


Рис. 3. Экспериментальные зависимости $B_{\text{фм}}(\rho)$ в угловых положениях $\varphi=0; 90^\circ$ при частотах $f=50; 400$ Гц для различных значений средней по сечению магнитной индукции $B_{\text{мс}}=\text{const}$ кольцевых сердечников с отношением радиусов $r=2,1$ из стали 3413 (а) и из стали 2412 (б)

Таблица 1

Распределение средней по сечению магнитной индукции $B_{м.ср}$ в кольцевом сердечнике из стали 3413 по угловой координате ($\varphi=0; 55^\circ$ и 90°)

$B_{м.ср}, \text{Тл}$	Магнитная индукция - по охватывающей обмотке $W_i=100$						
	0,3	0,5	0,8	1,0	1,2	1,4	1,5
	Магнитная индукция по локальным обмоткам $W_l=10$						
	$\varphi = 0$	$\varphi = 55^\circ$	$\varphi = 90^\circ$	$\delta B_{\max}, \%$			
$\varphi = 0$	0,303	0,503	0,802	1,003	1,209	1,458	1,606
$\varphi = 55^\circ$	0,300	0,500	0,800	1,00	1,198	1,356	1,442
$\varphi = 90^\circ$	0,298	0,498	0,797	0,998	1,196	1,386	1,453
$\delta B_{\max}, \%$	1,6	1,0	0,6	0,5	1,1	7,5	11,4

Сравнительный анализ экспериментальных зависимостей на рис. 3 позволяет сделать следующие выводы:

1. Магнитная анизотропия приводит к перераспределению магнитного поля в кольцевом сердечнике и тем выше, чем больше значение K . Наибольших значений эффект достигает в кольцевом сердечнике из стали 3413 на частоте $f=50$ Гц ($K=6,8$), наименьших – из стали 2412 на частоте $f=400$ Гц ($K=1,2$).

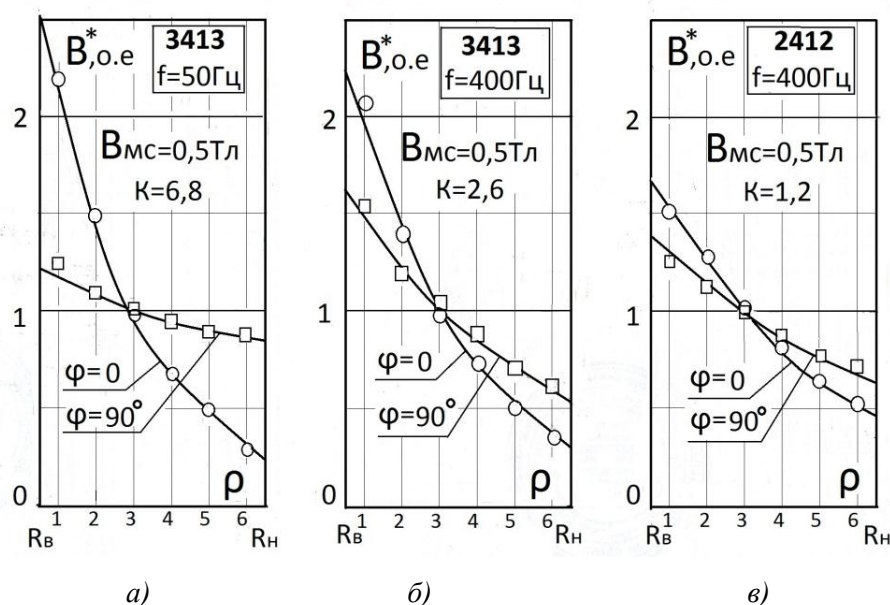


Рис. 4. Экспериментальные значения (точки) и расчетные кривые (сплошные линии) распределения по радиальной координате r магнитной индукции в относительных единицах $B^*_{o.e}(r)$ в угловых положениях $\varphi=0$ и 90° кольцевых сердечников с отношением радиусов $r=2,1$ при отсутствии насыщения ($B_{м.ср}=0,5 \text{ Тл}$) для различных значений степени магнитной анизотропии K :
 $a - 6,8$; $b - 2,6$; $v - 1,2$

2. Максимальное перераспределение магнитной индукции $B_{фм}(r)$ наблюдается при $B_{м.ср} < 0,8$ Тл в угловом положении кольцевого сердечника $\varphi = 0$, совпадающем с направлением оси легкого намагничивания стали $\alpha=0$, минимальное - в положении $\varphi = 90^\circ$, совпадающем с направлением оси трудного намагничивания стали $\alpha=90^\circ$.

3. В режимах перемагничивания кольцевого сердечника, прилегающих на характеристиках намагничивания к области Релея ($B_{м.ср} < 0,5$ Тл), аномальное влияние магнитной анизотропии дополнительно усиливается. Особенно это проявляется у стали 2412 на $f=50$ Гц из-за большей величины коэрцитивной силы H_c , увеличивающей длину начального пологого участка кривой намагничивания [24].

4. С ростом насыщения неравномерность распределения магнитного поля $B_{\text{фм}}(\rho)$ в кольцевом сердечнике по осям $\varphi = 0$ и $\varphi = 90^\circ$ заметно снижается.

Произведено сопоставление экспериментальных данных с результатами расчётов магнитного поля в кольцевом анизотропном сердечнике путем решения плоской задачи магнитостатики [10, 11]. При этом предложена улучшенная математическая модель ВХН, основанная на описании [8, 9], с использованием экспериментальных данных сталей 3413 и 2412. Изучению особенностей распределения магнитного поля в кольцевом сердечнике при изменении основных параметров модели ВХН холоднокатаных сталей будет посвящена третья часть настоящей работы.

В качестве примера на рис. 4 приведены расчетные кривые $B_{\text{фм}}(\rho)$ для различных значений K при $B_{\text{мс}} = 0,5$ Тл с максимальным перераспределением индукции в угловых положениях $\varphi = 0$ и 90° , аналогичные экспериментальным зависимостям, представленным на рис. 3. Для наглядности результаты приведены к нормализованному виду (в относительных единицах) $B^* = B_{\text{фм}}/B_{\text{мс}}$. Экспериментальные значения на рис. 4 отмечены точками.

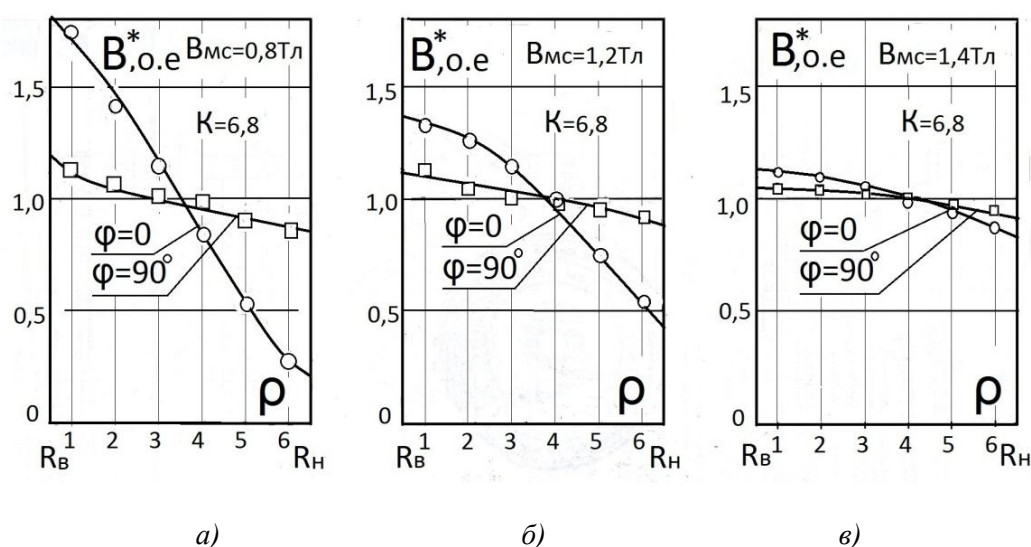


Рис. 5. Экспериментальные значения (точки) и расчетные кривые (сплошные линии) распределения по радиальной координате ρ магнитной индукции в относительных единицах $B^*_{\text{o.e.}}(\rho)$ в угловых положениях $\varphi = 0$ и 90° кольцевого сердечника из стали 3413 при $f = 50$ Гц ($K = 6,8$) для значений $B_{\text{мс}}$: а – 0,8Тл; б – 1,2Тл; в – 1,4Тл

На рис. 5 подобные сравнения расчетных и экспериментальных данных проведены в функции насыщения $B_{\text{мс}} = 0,8; 1,2; 1,4$ Тл для наибольшей степени анизотропии $K = 6,8$. Для $B_{\text{мс}} = 1,4$ Тл экспериментальные значения B^* рассчитывались с учетом фактических величин $B_{\text{мс}}$ в угловых положениях $\varphi = 0$ и 90° (табл. 1).

Представленные на рис. 4, рис. 5, результаты расчетов на математической модели показывают хорошее соответствие с экспериментом, подтверждая правильность подхода к описанию ВХН по угловым характеристикам магнитной анизотропии. Как показано в первой части исследования [24], особое внимание при этом следует обращать на правильность определения степени анизотропии K и необходимость наличия достоверных экспериментальных данных на используемые холоднокатаные стали.

Библиографический список

1. Grain-oriented electrical steel. – Armco (USA). – 1957. – 57 p.
2. Cold rolled oriented electrical steel strip. – River brand. – RG-Core (Japan). – 1961. – 100 p.
3. Orient Cor. Grain-oriented electrical sheet steels. – Nippon Steel Corporation (Japan). – 1970. – 88 p.

4. Orient-Cor. HI-B. Grain-oriented electrical steel. – Nippon Steel Corporation (Japan). – 1972. – 26 p.
5. Холоднокатаные электротехнические стали: справочник / под ред. Б.В. Молотилова. – М.: Металлургия, 1989. – 168 с.
6. ГОСТ 12119.1-98. Сталь электротехническая. Методы определения магнитных и электрических свойств. Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации.- Взамен ГОСТ 12119-80. Введ.01.07.99. – М.: Изд-во стандартов, 1999. – 4 с.
7. **Любимый, В.И.** Исследование характеристик магнитной анизотропии трансформаторной электротехнической стали / В.И. Любимый, Н.И. Дианова // Электрические машины: сб. научн. тр. – Чебоксары. – 1982. – С. 52–57.
8. **Любимый, В.И.** Анализ и математическое описание характеристик намагничивания анизотропных холоднокатаных электротехнических сталей / В.И. Любимый [и др.] // Электричество. – 1985. – №10. – С. 34–37.
9. **Калинин, Е.В.** Экспериментальное исследование и математическое описание векторных характеристик намагничивания анизотропных листовых электротехнических сталей // Электротехника. – 2000. – Вып. 2. – С. 27–35.
10. **Любимый, В.И.** Расчет магнитного поля в магнитно – анизотропных средах // Электромагнитные методы контроля качества материалов и изделий: тез. докл. IV Всесоюзной межвуз. конф. – Омск. – 1983. – Ч. 2. – С. 44–47.
11. **Вагапов, Ю.Ф.** Математическая модель магнитного поля в магнитно – анизотропных сталях // Актуальные проблемы электроэнергетики: тез. докл. XVIII научно-технич. конф. НГТУ. – Н.Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 1999. – С. 52–64.
12. **Калинин, Е.В.** Влияние анизотропии магнитных свойств холоднокатаных электротехнических сталей на статические магнитные характеристики кольцевых образцов / Е.В. Калинин [и др.] // Электротехническая промышленность. Сер. Электротехнические материалы. – 1984. – Вып. 3. – С. 5–6.
13. **Калинин, Е.В.** Магнитное поле в кольцевом анизотропном седечнике // Электрооборудование промышленных установок: межвуз. сборн. научн. тр. – Н.Новгород. – 1998. – С. 127–132.
14. **Дружинин, В.В.**, Изучение нормальных составляющих индукции в текстурованной электротехнической стали // Физика металлов и металловедение. – 1973. – Т. 35. – Вып. – С. 973–977.
15. **Колесников, Э.В.** Экспериментальное исследование и математическое моделирование планарного перемагничивания холоднокатаной стали // Изв. вузов. Электромеханика. – 1983. – № 6. – С. 23–30.
16. **Дорожко, Л.И.** Характеристики анизотропной стали под разными углами к направлению прокатки // Электричество. – 1972. – №3. – С. 88–90.
17. **Дойников, Н.Р.** Численное моделирование магнитостатических полей с учетом магнитной анизотропии стали // Журнал технической физики. – 1975. – Т. 45. – Вып. 11. – С. 2204–2206.
18. **Тенетко, Н.И.** Приближенные аналитические выражения семейств характеристик намагничивания холоднокатаных анизотропных электротехнических сталей // Техническая электродинамика. – 1990. – №3. – С. 18–23.
19. **Рожненко, Ж.Г.** Особенности магнитных свойств и характеристик намагничивания листовых электротехнических сталей // Электротехника и электромеханика. – 2010. – №2. – С. 37–41.
20. **Толмачев, С.Т.** Некоторые проблемы построения векторных математических моделей нелинейных анизотропных ферромагнетиков // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – №4. – С. 32–37.
21. **Любимый, В.И.** Анализ и расчет магнитного поля изотропного статора асинхронного двигателя // Вентильные преобразователи с улучшенными энергетическими показателями: тез. докл. Горьковской областной науч.-технич. конф. – Горький. – 1977. – С. 54.
22. **А.С. № 1553930** Устройство для измерения магнитных характеристик материалов / Е.В. Калинин [и др.]. Зарег. 20.10.1986.
23. **Вагапов, Ю.Ф.** Определение векторных характеристик намагничивания анизотропных электротехнических сталей на кольцевых образцах // Методы и средства измерения физических величин: тез. докл. V Всерос. научно-технич. конф. – Н. Новгород. – 2000. – Ч. 4. – С. 11.

24. **Калинин, Е.В.** Магнитное поле в анизотропном шихтованном сердечнике. Ч. 1. Рекомендации к определению степени магнитной анизотропии холоднокатаных электротехнических сталей // Труды НГТУ им. Р.Е.Алексеева. – 2018. – №2(121).

*Дата поступления
в редакцию 20.06.2018*

E.V. Kalinin

**MAGNETIC FIELD IN AN ANISOTROPIC LAMINATED MAGNETIC CORE.
PART 2. EXPERIMENTAL SUBSTANTIATION OF APPLICATION AT
CALCULATIONS OF MAGNETIC FIELD OF THE VECTOR MAGNETIZATION
CHARACTERISTICS OF COLD-ROLLED ELECTRICAL STEELS**

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R. E. Alekseev

Purpose: The necessity of comparative analysis of magnetic field calculation results using the vector characteristics of magnetization of cold-rolled electrical steels with the data of experimental determination of magnetic induction vector distribution in an anisotropic laminated core is known.

Methodology: For steels 3413 and 2412 with the same chemical composition but significantly different domain structure and anisotropy of magnetic properties, a series of joint magnetic measurements of strip samples and annular laminated cores with a ratio of radii $r = 2,1$ is carried out.

At frequencies $f = 50$ and 400Hz the experimental dependences of the induction amplitude $B_m(\rho)$ of radial coordinate ρ at different values of the average cross-section of the induction of the $B_m(\rho)$ are obtained in two angular positions coinciding with the axes of magnetic anisotropy $\alpha = 0$ and 90° . Angular characteristics of magnetic anisotropy $\psi(B, \alpha)$ are experimentally determined for both steels at the frequency $f = 50\text{Hz}$.

Results: The technique of an exclusive approach to the experiments is described, which allows to perform local magnetic measurements without disturbing the integrity of the laminated core.

The value of research: Good agreement of the results of calculation and experiment proves the correctness of the chosen concept of the used vector characteristics of magnetic anisotropy.

Novelty / value: The experimental confirmation of the features of the redistribution of the magnetic field in the anisotropic magnetic circuit in unsaturated conditions associated with a change in frequency f , as well as the presence of the initial flat area in the characteristics of magnetization of electrical steels.

Key words: vector characteristics of magnetization, cold-rolled electrical steels, annular anisotropic core, local measurements, magnetic induction, comparison of experiment with calculation.

УДК 621.3.051

Е.Н. Соснина, А.В. Шалухо, И.А. Липужин, А.Ю. Кечкин, А.А. Ворошилов

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ СИСТЕМ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Проблема низкой эффективности децентрализованных систем электроснабжения (ДСЭ) может быть решена путем их объединения на основе технологий «виртуальной электростанции». Статья посвящена выбору оптимальной топологии электрической сети, связывающей несколько ДСЭ.

Предложен подход, в основе которого лежат теория графов и структурно-топологический анализ. На примере объединения трех ДСЭ проведено исследование возможных топологий электрической сети и с учетом предложенных критериев выбран ее оптимальный вариант. Корректность предложенного подхода проверена на PSCAD-модели данной системы.

Рассмотрены вопросы качества электроэнергии при объединении ДСЭ. Сформулированы рекомендации по проектированию подобных систем.

Ключевые слова: виртуальная электростанция, децентрализованная система электроснабжения, распределенная генерация, оптимальная топология, имитационная компьютерная модель, лабораторный стенд.

Национальные и стратегические задачи развития России (на период до 2024 г.) направлены на модернизацию электроэнергетического комплекса, в том числе за счет развития распределенной генерации (РГ) и возобновляемых источников энергии [1].

Распределенные источники энергии должны повысить качество электроснабжения в удаленных и осваиваемых территориях (Дальневосточный Федеральный округ, приарктическая зона), обеспечить быстрый ввод генерируемых мощностей в энергодефицитных районах (Калининградская область), повысить надежность энергообеспечения ответственных потребителей (военные пункты, добывающая промышленность).

Для решения поставленных задач крайне важно не только ежегодно увеличивать количество, суммарные установленные и удельные мощности РГ, но и максимально эффективно использовать их потенциал. В децентрализованных системах источники РГ преимущественно применяются для электроснабжения лишь близлежащих (собственных) потребителей. Многие энергоустановки работают с частичной загрузкой, поскольку излишки генерации не могут быть полезно использованы. По этой же причине разработки, направленные на повышение КПД и улучшение параметров отдельных энергоустановок, оказываются недостаточно результативными.

Для децентрализованных систем электроснабжения (ДСЭ) актуальным является развитие принципиально новых направлений, объединяющих последние достижения в электротехнике, электронике, IT-технологиях и системах управления. Новые разработки могут быть дороги и сложны в реализации. Однако в перспективе на 10-15 лет вперед их использование позволит осуществлять электроснабжение энергоудаленных потребителей на качественно новом уровне, обеспечит конкурентоспособность отечественной малой энергетики и сделает эту отрасль привлекательной для инвесторов, что станет драйвером продолжения развития. Таким направлением являются так называемые «виртуальные электростанции» (ВиЭС).

Под ВиЭС понимают интеллектуальную, управляемую микросеть, объединяющую источники РГ, накопители электроэнергии и регулируемые потребители путем обмена информацией и потоками электроэнергии [2, 3]. Особенностью ВиЭС является возможность передачи избытков собственной генерации соседним объектам и возможность взаимодействия нескольких источников РГ в качестве единого генерирующего объекта с более крупной энергосистемой.

В настоящее время исследованиями технологий ВиЭС занимаются ученые всех развитых стран мира. Как правило, наибольшее внимание уделяется системам управления и механизмам продажи/покупки электроэнергии. Однако не менее важным является решение технических вопросов объединения нескольких ДСЭ в единую электрическую сеть, в частности, актуален выбор оптимальной топологии такой электрической сети.

Теория графов и структурно-топологический анализ

Вопросам оптимизации топологии электрической сети, объединяющей децентрализованные комплексы с использованием технологий ВиЭС, посвящены многие исследования.

В работе научного коллектива из Бразильского Федерального университета Сеара [4] оптимальное месторасположение источников малой РГ в микросети определяется с учетом глобального индекса производительности, а в работе ученых из Иранского Исфаханского университета [5] такая задача решается с помощью бинарного оптимизационного алгоритма роя частиц. Оптимальное месторасположение и доля источников РГ в структуре ВиЭС проф. М. Р. Шарма предлагает определять на основе анализа индекса чувствительности по напряжению [6]. Задача оптимизации топологии ВиЭС решается научным коллективом из Жилинского университета (Словакия) на основе алгоритма роя ускоренных частиц в [7, 8], а научным коллективом из Шанхайского университета Цзяо Тун (Китай) на основе метода компромисса в [9]. Пио Алессандро Ломбарди и Кристоф Рудион предлагают решать эту задачу на основе оценки общих годовых затрат на эксплуатацию [10]. Проф. А. Ю. Абдельазиз и Ю. Г. Хегази для решений той же задачи с целью минимизации потерь мощности используют оптимизационные алгоритмы на основе модификации ВВ–ВС метода [11].

Представленные подходы к выбору оптимальной топологии электрической сети обладают рядом серьезных недостатков (большой объем исходных данных, необходимость тщательной настройки алгоритмов, сложность вычислений), ограничивающих их практическое использование при проектировании.

Для создания методологической базы объединения ДСЭ в единую электрическую сеть могут быть адаптированы методы, широко используемые при проектировании традиционных энергосистем высокого напряжения. Так, сложная структура электрической сети, объединяющей несколько ДСЭ, может быть представлена в виде графов [12]. Пример графа электрической сети, объединяющей три ДСЭ, приведен на рис. 1.

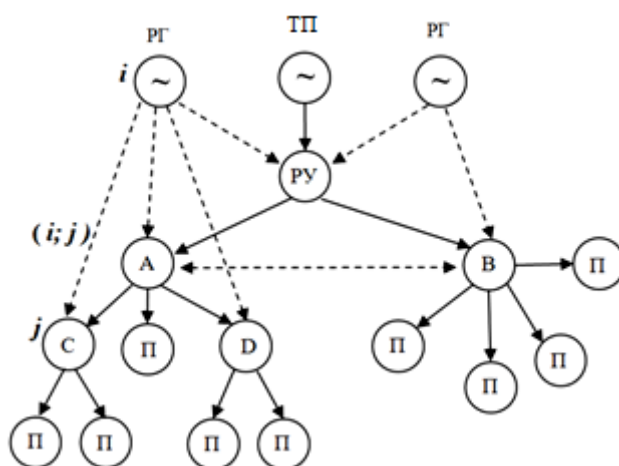


Рис. 1. Пример графа электрической сети, объединяющей ДСЭ:

i, j – узлы графа; $(i; j)$ – ветвь графа между i -й и j -й вершинами

Узлами графа являются компоненты ДСЭ: распределительные устройства (РУ), распределительные пункты (А–D), источники (РГ, ТП) и потребители электроэнергии (П). Узлы характеризуются мощностями источников и нагрузки. Ветви графа – линии электропередач.

Ветви характеризуются направлением передачи мощности, удельным сопротивлением, протяженностью, затратами на передачу электроэнергии. Пунктирными линиями на рис.1 показаны все возможные варианты объединения узлов ДСЭ с источниками питания и потребителями электроэнергии.

При объединении ДСЭ вначале следует установить заведомо нецелесообразные или малоэффективные пути передачи электроэнергии. Это производится путем оценки ветвей и узлов графа по ряду ограничивающих критериев. Для узлов обязательным является оценка отклонения напряжения. Ветви графа могут быть оценены по ряду критериев:

- пропускной способности ЛЭП;
- наибольшему целесообразному расстоянию передачи мощности с учетом потерь;
- наибольшему целесообразному расстоянию передачи мощности с учетом экономических затрат;
- другим критериям.

Для выбора окончательной топологии электрической сети предложено сравнивать возможные топологии (возможные графы) по их структурно-топологическим свойствам. Для этого определен перечень структурно-топологических характеристик, расчет которых следует проводить для каждого графа [13]:

- связность структуры s (чем выше значение связности, тем потенциально более надежной является топология электрической сети);
- структурная избыточность R (наиболее экономичная топология должна иметь минимальное количество избыточных электрических связей);
- неравномерность распределения связей ε^2 (характеризует недоиспользование возможностей заданной топологии в достижении максимальной связности);
- структурная компактность Q (чем меньше Q , тем меньше разделяющих связей в топологии, и тем топология более компактна);
- степень централизации в структуре δ (высокое значение δ предъявляет повышенные требования к пропускной способности центрального элемента в топологии электрической сети).

Совокупный учет всех структурно-топологических характеристик предложено осуществлять посредством интегрального показателя оценки сравниваемых топологий с помощью метода взвешенных сумм критериев [14, 15] по выражению

$$K_j = \sum_{i=1}^M k_i P_{ij}, i = 1, \dots, M, j = 1, \dots, N, \quad (1)$$

где N – количество сравниваемых топологий; M – количество сравниваемых структурно-топологических характеристик; P_{ij} – приведенная оценка i -й характеристики j -й топологии; k_i – средневзвешенный коэффициент ценности i -й характеристики, определяемый с помощью метода взвешенных сумм критериев.

С точки зрения структурно-топологического анализа наиболее оптимальной топологии электрической сети будет соответствовать максимальное значение критерия K_j .

Функционирование электрической сети, объединяющей ДСЭ, направлено на повышение эффективности электроснабжения за счет максимального использования всего потенциала распределенной генерации. Поэтому в качестве критерия, позволяющего оценить правильность выбора той или иной топологии электрической сети, может быть использована величина «освобожденной» мощности. Под «освобожденной» мощностью следует понимать мощность источников питания, которая после объединения ДСЭ может быть полезно использована в этой электрической сети (для питания новых потребителей) или передана в другую электрическую сеть (при наличии такой возможности). Для приведенного на рис. 1 графа «освобожденная» мощность может быть рассчитана по выражению

$$P_{\text{осв}} = P_{\text{ТП}}^{\text{до}} - P_{\text{ТП}}^{\text{после}} = \sum_{i=1}^m (P_{\Gamma i} - \Delta P_{\Gamma i}) = \sum_{i=1}^m \left(P_{\Gamma i} - \frac{P_{\Gamma i}^2}{U_{\text{ном}}^2} \cdot \sum_{j=1}^k (r_{0j} \cdot l_j) \right), \quad (2)$$

где $P_{\text{ТП}}^{\text{до}}$, $P_{\text{ТП}}^{\text{после}}$ – мощность, потребляемая от ТП до и после объединения ДСЭ в электрической сети; m – число узлов с избытком генерации; $P_{\Gamma i}$ – избыточная мощность i -го узла электрической сети; $\Delta P_{\Gamma i}$ – потери при передаче мощности от i -го узла с избыточной генерацией.

Наибольшая эффективность будет достигнута при максимальном значении данного критерия, когда вся мощность, выработанная источниками РГ, будет использована потребителями или передана через ТП в другую электрическую сеть.

Теоретические результаты

Апробация предложенного подхода выполнена на примере ДСЭ удаленного поселка (рис. 2). Потребители получают питание от ТП 10/0,4 кВ. ДСЭ поселка планируется объединить с двумя ДСЭ, источниками питания которых являются газопоршневая установка (ГПУ) мощностью 100 кВт и ветроэлектрическая станция (ВЭС) мощностью 100 кВт. Суммарная установленная мощность потребителей после объединения ДСЭ составит 250 кВт. Требуется выбрать оптимальную топологию электрической сети, объединяющей ДСЭ.

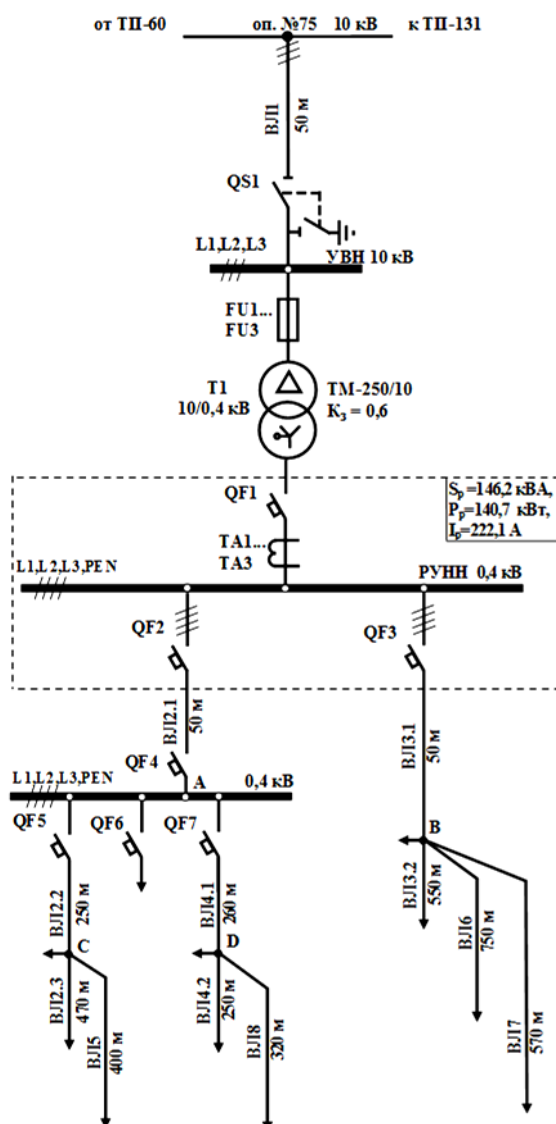


Рис. 2. Однолинейная электрическая схема ДСЭ удаленного поселка

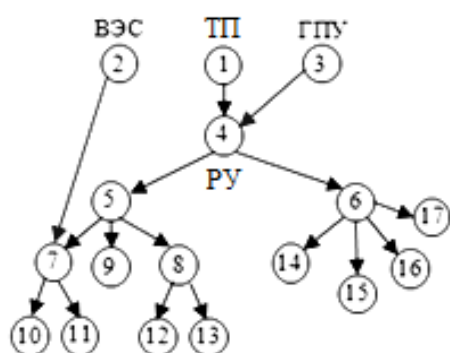
Граф электрической сети соответствует графу на рис. 1. После анализа узлов и ветвей графа по ограничивающим критериям сформировано 13 вариантов топологий электрической сети. Выполнен расчет структурно-топологических характеристик (C , R , ε^2 , Q , Z) и по (1) рассчитана их совокупная оценка. Результаты расчета для топологий с наибольшими значениями K_j приведены в табл. 1.

Таблица 1

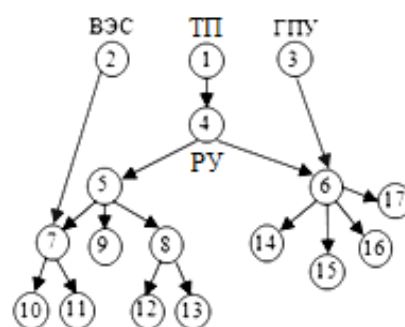
Результаты структурно-топологического анализа

Топология	C	R	ε^2	Q	δ	K_j
8	59	0	33,8	136	1,60	0,949
9	50	0	37,8	103	1,43	0,958
11	59	0	33,8	136	1,60	0,949
12	50	0	37,8	103	1,43	0,958

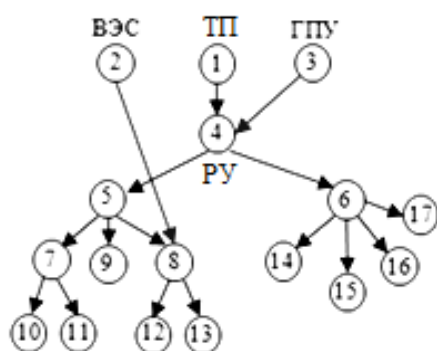
Графы электрической сети для топологий K_j показаны на рис. 3.



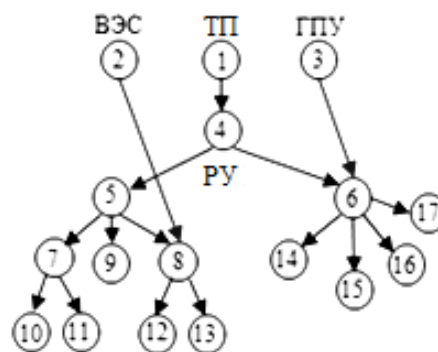
Топология 8



Топология 9



Топология 11



Топология 12

Рис. 3. Топологии электрической сети, объединяющей ДСЭ, с наилучшими результатами структурно-топологического анализа

Проверка корректности полученных теоретических результатов проводилась путем оценки величины «освобожденной» мощности для каждой из 13 топологий по (2).

Исследование критерия «освобожденной мощности»

Для оценки величины «освобожденной» мощности в программном комплексе PSCAD разработана имитационная компьютерная модель рассматриваемой электрической сети. Общий вид PSCAD-модели показан на рис. 4.

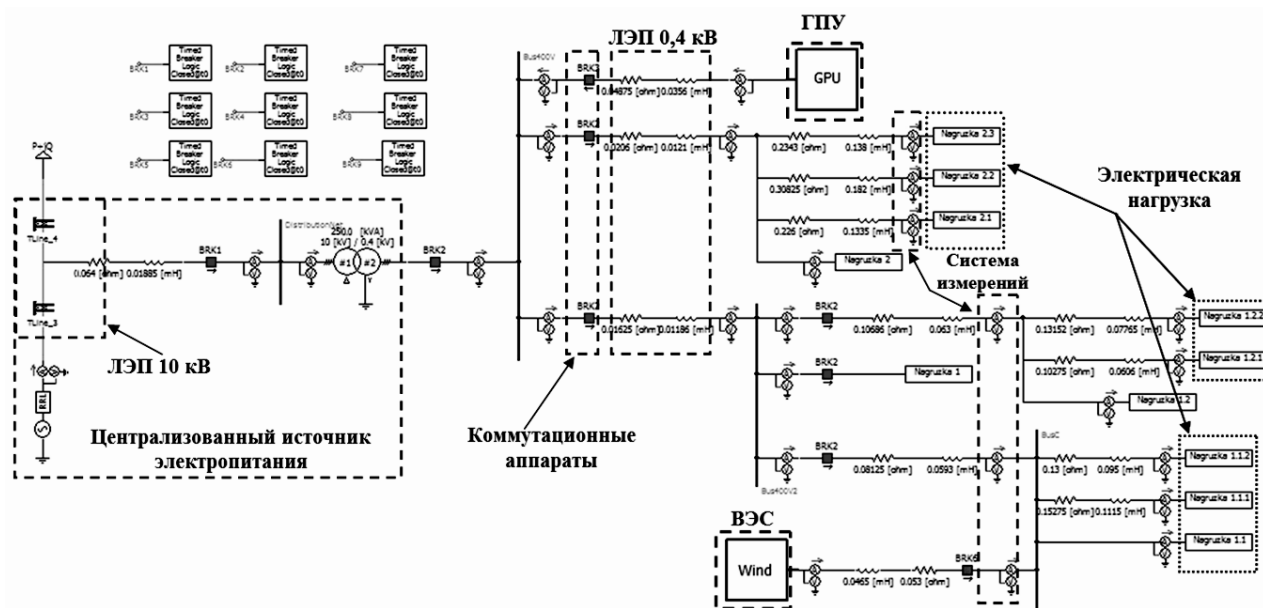


Рис. 4. Общий вид PSCAD-модели электрической сети, объединяющей ДСЭ

В состав PSCAD-модели входят: ВЭС мощностью 100 кВт; ГПУ мощностью 100 кВт; трансформаторная подстанция (ТМ-250/10/0,4), получающая питание от более мощного по сравнению с ГПУ и ВЭС источника (централизованный источник питания); ЛЭП 0,4 и 10 кВ; электрическая нагрузка суммарной мощностью 140,7 кВт; коммутационные аппараты; система измерений. Входные данные – параметры источников питания, ЛЭП и нагрузки.

Произведен расчет мощности, потребляемой от ТП ($P_{ТП}$), для сценария совместной работы ВЭС и ГПУ ($P_{ВЭС, ГПУ}$) при величине нагрузки 70% от установленной мощности. На основе выражения (2) выполнен расчет величины «освобожденной» мощности ($P_{осв}$). Результаты расчета для четырех лучших топологий (табл. 1) приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчета критерия «освобожденной» мощности

Параметр	Топология			
	8	9	11	12
$P_{ТП}$, кВт	189,7			
$P_{ВЭС, ГПУ}$, кВт	50,2	51,5	50,7	52,0
$P_{осв}$, кВт	139,5	138,2	139,0	137,7

Полученные результаты в целом совпали с результатами структурно-топологического анализа (табл. 1). Наибольшая величина критерия соответствует топологии 8. Данная топология принята для дальнейших исследований.

На PSCAD-модели для топологии 8 проведены исследования пяти режимов работы:

- режим 1 - питание нагрузки только от РЭС;
- режим 2 - питание нагрузки от РЭС и ВЭС;
- режим 3 - питание нагрузки от РЭС и ГПУ;
- режим 4 - питание нагрузки от РЭС, ВЭС и ГПУ;
- режим 5 - питание нагрузки от ВЭС и ГПУ (изолированный режим).

В каждом режиме имитировались четыре сценария работы, соответствующие изменению потребляемой мощности нагрузки 30, 50, 70 и 100% от установленной.

Параметры режимов, измеренные на шинах наиболее удаленного потребителя при максимальной нагрузке, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры режима при 100%-ной нагрузке на шинах удаленного потребителя

Номер режима	Ток I , А	Напряже- ние U , В	Отклонение напряжения от номинального δU , %
Режим 1	48,44	350,6	7,73
Режим 2	50,49	365,7	3,76
Режим 3	48,93	355	6,57
Режим 4	51,05	369,7	2,71
Режим 5	40,45	292,8	22,9

Величина отклонения напряжения во всех режимах поддерживается в диапазоне, удовлетворяющем ГОСТ 32144-2013 [21], и не превышает 7,7 %. При включении источников РГ на совместную работу с ТП уровень напряжения у потребителей повышается на 5%. При максимальной нагрузке в режиме 5 (изолированный режим) наблюдается резкое снижение величины напряжения, выходящее за пределы допустимых значений, что связано с дефицитом генерации от ВЭС и ГПУ. При снижении мощности нагрузки до 50% от установленной значение напряжения возрастает и входит в допустимый диапазон. Данный факт свидетельствует о необходимости контроля мощности нагрузки при нарушении питания от ТП.

Выполнена оценка потокораспределения при изменении соотношения мощности, генерируемой источниками РГ и потребляемой нагрузкой. В табл. 4 приведены значения мощности в контрольных точках в режиме совместной работы ТП и источников РГ при различной нагрузке.

Таблица 5

Параметры режима совместной работы ТП, ВЭС и ГПУ

Точка измерения	Мощность в режиме P , кВт		
	100%-ная нагрузка	50%-ная нагрузка	30%-ная нагрузка
Шины 10 кВ ТП	116,3	5,517	-42,46
Шины 0,4 кВ ТП	113,8	4,751	-43,34
Точка А	103,1	39,65	11,35
Точка В	104,1	58,54	39,69
Точка С	23,5	-7,41	-21,49
Точка D	67,04	37,28	23,38

При снижении мощности нагрузки до 50% от установленной наблюдается изменение направления потока мощности на участке подключения ВЭС. При сокращении нагрузки до 30% избыток мощности может быть передан через ТП в обратном направлении.

Режим выдачи избытка генерации от источников РГ через ТП является наиболее интересным и наименее изученным. Для данного режима актуален анализ показателей качества электроэнергии (ПКЭ) на шинах потребителей.

Анализ показателей качества электроэнергии

Анализ ПКЭ в режиме выдачи излишков генерации от источников РГ через ТП выполнен путем физического моделирования режима на лабораторном стенде «виртуальной электростанции», разработанном на кафедре «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника».

Однолинейная электрическая схема и внешний вид стенда представлены на рис. 5 и рис. 6 соответственно и подробно описаны в [16].

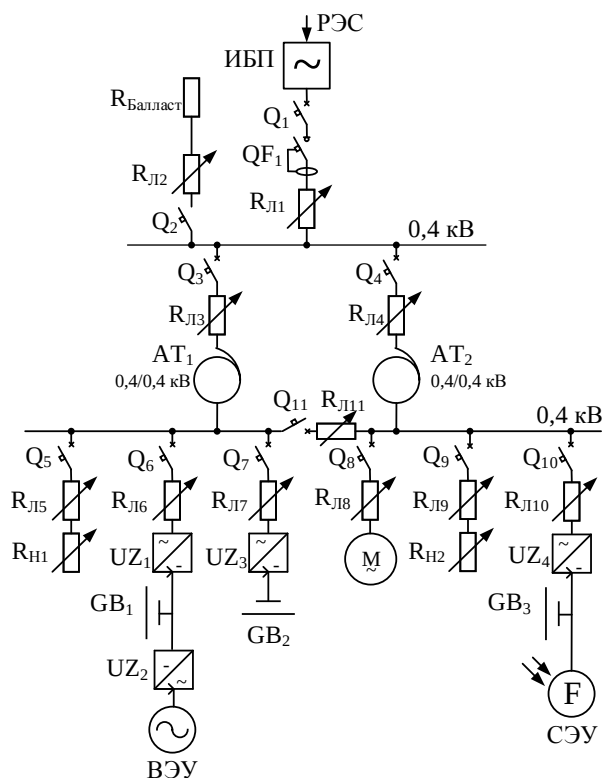


Рис. 5. Однолинейная схема лабораторного стенда:

1 – источник питания; 2 – регулировочный трансформатор; 3 – распределительное устройство;
4 – активная нагрузка; 5 – имитатор ветроэлектрической установки; 6 – накопитель электроэнергии; 7 – двигательная нагрузка; 8 – имитатор солнечной электростанции;
9 – контроллер системы управления

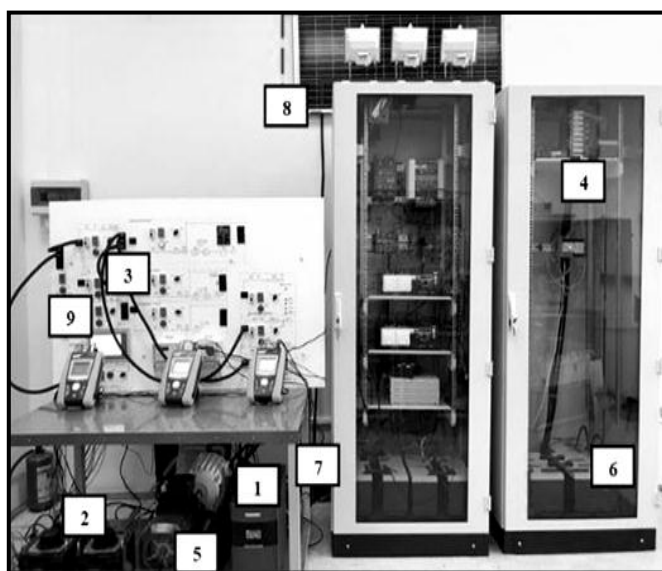


Рис. 6. Внешний вид лабораторного стенда

В основе стенда лежат масштабные модели элементов системы электроснабжения, приведенной на рис. 2. В соответствии с теоремой подобия Кирпичева-Гухмана [17], были пересчитаны параметры системы с коэффициентом масштабируемости, равном 100.

Лабораторный стенд выполнен в однофазном исполнении напряжением 220 В (50 Гц) суммарной установленной мощностью 8,5 кВт [16] и включает девять функциональных блоков (рис. 5).

С помощью лабораторного стенда проведены исследования совместной работы источников РГ (ветроэлектрическая установка и солнечная электростанция) с ТП при динамическом изменении нагрузки и изменении величины генерации источников РГ. Полученные осциллограммы тока и напряжения приведены на рис. 7.

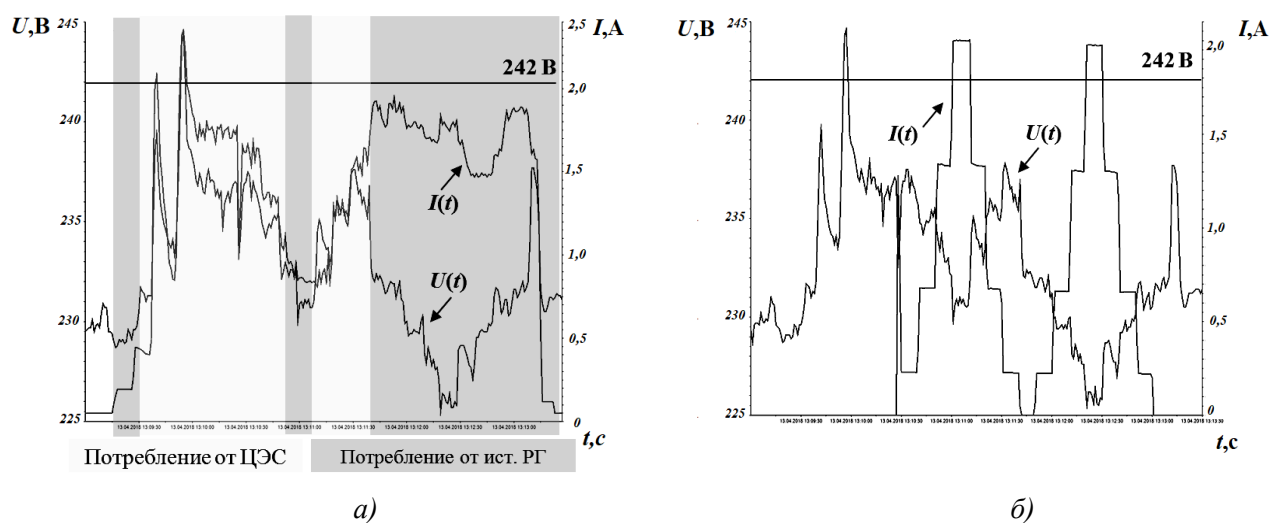


Рис. 7. Осциллограммы тока и напряжения при динамическом изменении нагрузки при совместной работе источников РГ и ТП:
а – на выводах НН трансформатора; *б* – на нагрузке

Результаты исследований показали, что совместная работа двух источников на основе ВИЭ с ТП сопровождается отклонением напряжения на шинах потребителей в 11,4%, что превышает установленный предел по ГОСТ 32144-2013. Включение инвертора в режиме выдачи мощности в «сеть» сопровождается кратковременным возрастанием тока в системе до 70% от тока установившегося режима. Установлено, что величина возрастания тока зависит от внутренних настроек преобразователя и не зависит от параметров внешней сети.

Проведенные с помощью лабораторного стенда исследования показали, что в электрической сети при совместной работе источников РГ и ТП потребители обеспечиваются электроэнергией требуемого качества. Однако в начальный момент выдачи в электрическую сеть мощности от РГ возможны отклонения напряжения выше предельно допустимых значений и возрастание тока. Учет данных факторов необходим при выборе линий электропередач, выборе и настройке аппаратов защиты и автоматики.

Заключение

В статье представлены результаты исследования электрической сети, объединяющей децентрализованные системы электроснабжения с использованием технологий «виртуальной электростанции». Рассмотрены вопросы определения оптимальной топологии такой электрической сети. Основная идея заключается в оценке эффективности и надежности топологии электрической сети с помощью структурно-топологического анализа ее графа. Совокупный учет структурно-топологических характеристик графа (связность структуры, структурная избыточность и др.) предложено осуществлять посредством интегрального показателя оценки методом взвешенных сумм критериев.

В качестве объектов исследования рассмотрены три децентрализованные системы электроснабжения, получающие питание от трансформаторной подстанции, газопоршневой установки и ветроэлектрической станции. Построен граф электрической сети, объединяющей три децентрализованные системы. Для 13 возможных вариантов топологий рассчитаны структурно-топологические характеристики. Выделены четыре варианта топологии с наибольшей величиной интегрального показателя оценки.

Корректность полученных теоретических результатов проверена имитационным компьютерным моделированием. На PSCAD-модели для каждого варианта топологии исследуемой сети выполнена оценка величины «освобожденной» мощности. Результаты имитационного моделирования в целом совпали с теоретическими.

Для режима передачи избытка мощности от источников распределенной генерации на лабораторном стенде проведен анализ качества электроэнергии на шинах потребителей. Проведенные исследования показали, что при проектировании подобных систем необходимо учитывать алгоритмы работы преобразовательного оборудования и производить первичную настройку преобразователей перед подключением источников распределенной генерации к системе. При работе инверторов в режиме выдачи в «Сеть» наблюдались кратковременное увеличение тока до 70% от установившегося значения и отклонения напряжения на 5–20% выше допустимых значений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственное задание №13.2078.2017/4.6 от 31.05.2017 г.).

Библиографический список

1. **Sosnina, E.** Stability Investigation of the Virtual Power Plants Electrical Systems / E. Sosnina [et al.] // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – V. 10. – № 24. – P. 44363–44368.
2. План мероприятий («дорожная карта») «Энерджинет» Национальной технологической инициативы. [Электронный ресурс] URL: http://www.rvc.ru/nti/roadmaps/dk_energynet_new.pdf
3. **Barbosa, J.A.** Decentralised Energy Management System to Virtual Power Plants / J.A. Barbosa [et al.] // International Conference on Renewable Energies and Power Quality. – Granada (Spain). – 2010.
4. **Bahrami, S.** Optimal Placement of Distributed Generation Units for Constructing Virtual Power Plant Using Binary Particle Swarm Optimization Algorithm / S. Bahrami, A. Imari // Electrical & Electronic Systems. – 2014. – V. 3, Issue 2.
5. **Gopiya, N.S.** Optimal Allocation of Distributed Generation in Distribution System for Loss Reduction / N.S. Gopiya, D.K. Khatod, M.P. Sharma // IPCSIT. – 2012. – V. 28. – P. 42–46.
6. **Ivanecký J.** Accelerated Particle Swarm Optimization for Controlling Virtual Power Plant Consisting of Renewable Energy Sources / J. Ivanecký, D. Hropko, M. Kováč // Journal of Energy and Power Engineering. – 2013. – V. 7. – P. 1408–1414.
7. **Hropko D.** Optimal Dispatch of Renewable Energy Sources Included in Virtual Power Plant Using Accelerated Particle Swarm Optimization / D. Hropko, J. Ivanecký, J. Turček // ELEKTRO. – Rajeck Teplice. – 2012. – P. 196–200.
8. **Gong, J.** Multiple Objective Compromised Method for Power Management in Virtual Power Plants / J. Gong, D. Xie, C. Jiang, Y. Zhang // Energies. – 2011. – № 4. – P. 700–716.
9. **Lombardi, P.** Optimal Operation of a Virtual Power Plant / P. Lombardi, M. Powalko, K. Rudion // Power & Energy Society General Meeting. – Calgary (Canada). – 2009. – P. 1–6.
10. **Othman M.M.** Operation of Virtual Power Plant in Unbalanced Distribution Networks / M.M. Othman, Y.G. Hegazy, A.Y. Abdelaziz // Electric Power Components and Systems. – 2016. – V. 44 (14). – P. 1620–1630.
11. **Воропай Н.И.** Теория систем для электроэнергетиков: учеб. пособие / Н.И. Воропай. – Новосибирск: Наука, 2010. – 271 с.
12. **Sosnina, E.,** Optimization of Virtual Power Plant with a Distributed Generation / E. Sosnina, A. Shalukho, A. Kechkin // MATEC Web of Conferences. – 2017. – V. 141. – № 01057. [Электронный ресурс] URL: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201714101057>.
13. **Соснина, Е.Н.** Оптимизация электротехнического комплекса виртуальной электростанции с источниками распределенной генерации / Е.Н. Соснина, А.В. Шалухо, А.Ю. Кечкин // Фёдоровские чтения – 2017: материалы междунар. научно-практич. конф. – М.: Изд. дом МЭИ, 2017. – С. 312–320.
14. **Гудков, П.А.** Методы сравнительного анализа: учеб. пособие / П.А. Гудков. – Пенза, 2008. – 81 с.
15. **Соснина, Е.Н.** Разработка лабораторного стенда для изучения режимов функционирования

- виртуальной электростанции / Е.Н. Соснина [и др.] // Актуальные проблемы электроэнергетики: сб. ст. – Нижний Новгород: НГТУ Р.Е. Алексеева, 2017. – С. 137–143.
16. **Веников, В.А.** Теория подобия и моделирования: учеб. пособие для вузов / В.А. Веников. – М.: Высш. шк., 1976. – 60 с.

*Дата поступления
в редакцию 30.06.2018*

E. N. Sosnina, A.V. Shalukho, I.A. Lipuzhin, A. Yu. Kechkin, A. A. Voroshilov

EFFICIENCY IMPROVEMENT OF DECENTRALIZED ELECTRICAL SUPPLY SYSTEMS

Department of Electric Power Engineering, Power Supply and Power Electronics
(Nizhny Novgorod, Russian Federation),
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

Purpose: The problem of the effectiveness of decentralized power supply systems (DPSS) can be solved by combining them on the basis of virtual power plant technologies. The article is devoted to the choice of the optimal topology of an electrical network linking several DPSS.

Methodology: An approach based on graph theory and structural topological analysis is proposed. A study of the possible topologies of the electric network was made using the example of combining three DPSS and optimal variant of topology was chosen taking into account the proposed criteria. The correctness of the proposed approach is verified on the PSCAD-model of this system.

Novelty / value: The issues of the quality of electricity during the linking of DPSS were considered. Recommendations are formulated for designing the corresponding systems.

Key words: virtual power plant, decentralized power supply system, distributed generation, optimal topology, simulation computer model, laboratory stand.

УДК 631.3

В.А. Тихомиров

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева

Современные электроустановки для питания различных устройств и систем электропривода, как правило, содержат в своем составе преобразовательные устройства. Очень важно иметь инструмент для изучения происходящих в преобразовательных устройствах процессов. Дополнительно к этому необходимо иметь инструмент для получения количественных оценок энергетических показателей электроустановок с преобразовательными устройствами. Предлагается методика расчета энергетических показателей различных преобразовательных устройств с использованием персональных компьютеров и программных средств, работающих на самой распространенной в настоящий момент платформе Windows.

Ключевые слова: преобразовательные устройства, энергетические показатели, методика расчета, компьютерные пакеты моделирования и расчета.

При разработке и эксплуатации преобразовательных устройств необходимо принимать во внимание три аспекта:

- устройство должно удовлетворять требованиям потребителя как по величине выходного напряжения (или тока), так и его качественным показателям, среди которых важнейшими являются гармонический состав напряжений и токов на выходе преобразователя;
- преобразователь не должен оказывать негативного воздействия на питающую сеть и иметь высокие энергетические показатели, среди которых важнейшими являются:
 - гармонический состав тока на входе преобразователя (т.е. тока, потребляемого им из питающей сети);
 - полная мощность, потребляемая из сети, и ее составляющие (активная мощность P , реактивная мощность Q , мощность искажения T);
 - коэффициент мощности K_m , $\cos\varphi$, коэффициент искажения K_i .
- устройство должно обладать максимальным коэффициентом полезного действия η и надежностью.

Активная мощность P обусловлена только первой гармоникой тока. Она идет на создание полезной работы и связана с преобразованием электрической энергии в другие виды энергии (механическую, тепловую, световую и др.). Реактивная мощность Q также определяется первой гармоникой сетевого тока, но в отличие от активной мощности, полезно используемой в работе, реактивная мощность Q не выполняет полезной работы, она служит лишь для создания магнитных полей в индуктивных приемниках (в электродвигателях, трансформаторах и т. п.), циркулируя все время между источником электроэнергии и приемниками. В совокупности мощности P и Q определяют полную мощность первой гармоники тока $S_{(1)}$.

Мощность искажения T обусловлена нелинейностью преобразовательного устройства и потреблением им из сети высших гармоник тока. Мощности P , Q и T являются составляющими полной мощности S .

Мощности Q и T , протекая по элементам электрической сети, вызывают в них дополнительные потери мощности ΔP , что ухудшает коэффициент полезного действия электроустановки. Мощность T может также вызвать искажение напряжения сети. Кроме того, перепады этих мощностей снижают пропускную способность линий электропередач и трансформаторов, вынуждают увеличивать сечение кабельных линий и выполнять замену трансформаторов на большую номинальную мощность.

Современные персональные компьютеры предоставляют широкие возможности как

для изучения рабочих процессов в электроустановках, так и расчета энергетических показателей электрооборудования. Для изучения рабочих процессов нами была выбрана распространенная программа моделирования электронных устройств MicroCap фирмы SpectrumSoftware [5, 6], а в качестве инструмента для расчета энергетических показателей применен офисный пакет MicrosoftExcel, который является мощным математическим инструментом работы с электронными таблицами. Excel входит в состав пакета MicrosoftOffice и работает на самой распространенной в настоящий момент платформе Windows.

Программа MicroCap фирмы SpectrumSoftware позволяет создавать на основе моделей электронных компонентов разнообразные схемы преобразовательных устройств и получать в виде графиков анализ ее основных характеристик. Программа MicroCap относится к системам имитационного моделирования. В системе MicroCap используется стандартный для операционной системы Windows многооконный интерфейс с разворачивающимися окнами и меню. В отличие от известных программ, в MicroCap после создания или редактирования схемы не нужно загружать специальные программы для выполнения моделирования. Выбором соответствующих команд можно проводить моделирование устройства во временной или частотной области, по переменному или постоянному току непосредственно после создания схемы в редакторе. Для этих целей в программе MicroCap используется внутренний SPICE вычислитель.

Интерфейс программы практически не изменяется в зависимости от режима анализа, что заметно облегчает ее освоение. При этом результаты могут выводиться как графически, так и численно. Существует возможность оперативно редактировать схемы и повторно проводить их моделирование. Наглядное графическое представление результатов и возможность многократного повторения анализа при различных условиях позволяют детально исследовать особенности работы моделируемой схемы. Графический редактор предоставляет возможности выделять, копировать, перемещать, масштабировать, вращать, зеркально отражать как отдельные компоненты, так и группы выделенных компонентов. Взаимодействие с областью буфера обмена операционной системы Windows позволяет копировать схемы, графики и числовые результаты в другие офисные пакеты, в частности в Excel. Затем с помощью мощных вычислительных возможностей Excel выполнять расчеты практически любых количественных характеристик электроустановок.

Целью настоящей статьи является представление методики проведения моделирования распространенных преобразовательных устройств в программе MicroCap, форматирование результатов моделирования к формату пакета Excel и расчет с его помощью энергетических показателей преобразователей. Здесь не рассматривается определение коэффициента полезного действия η электроустановки, хотя ее рассчитанные параметры без труда позволяют его определить.

Методические особенности расчета энергетических показателей

При расчете энергетических показателей предполагается, что напряжение питающей сети является синусоидальным, а ток сети может быть несинусоидальным, т.е. в общем случае может содержать высшие гармоники.

В этом случае активная мощность периодического тока произвольной формы определяется как средняя мощность за период $[1, 2]$:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt .$$

При синусоидальном напряжении имеем важнейшее соотношение для активной мощности

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt = U * I_{(1)} \cos \varphi ,$$

где $I_{(1)}$ – действующее значение первой гармоники сетевого тока.

То есть при синусоидальном напряжении и несинусоидальном токе сети активная мощность определяется только первой гармоникой тока питающей сети и сдвигом фазы

между напряжением и первой гармоникой тока.

Реактивная мощность Q при синусоидальном напряжении равна [1, 2] $Q = U \cdot I_{(1)} \sin \varphi$, т.е. реактивная мощность тоже определяется только первой гармоникой тока питающей сети.

Полная мощности S равна произведению действующих значений тока и напряжения: $S = UI$.

Активная P и реактивная Q мощности определяют полную мощность первой гармоники тока $S_{(1)}$: $S_{(1)} = (P^2 + Q^2)^{1/2}$.

Если напряжение имеет синусоидальную форму, а ток является несинусоидальным, то $S > S_{(1)}$. Причина такого соотношения – наличие в полной мощности S третьей составляющей, называемой мощностью искажения T .

О мощности искажения T

Наличие высших гармоник означает, что в сети имеется мощность искажения T , которая, как и реактивная мощность Q , не выполняет полезной работы, а нагружает сеть высшими гармониками тока. Рассмотрим понятие мощности искажения подробнее. Из электротехники известно [1], что несинусоидальный ток можно представить в виде разложения в ряд Фурье на первую гармонику и гармоники с более высокими частотами, кратными первой. Тогда действующее значение несинусоидального тока

$$I = \sqrt{I_{(1)}^2 + \sum_{k=2} I_{(k)}^2},$$

где $I_{(1)}$ – действующее значение первой гармоники тока; $I_{(k)}$ – действующее значение k -й гармоники, начиная со второй.

При условии синусоидального напряжения, если умножить левую и правую часть последнего уравнения на напряжение U , получим выражение для полной мощности S при наличии высших гармоник в токе:

$$S = UI = \sqrt{S_{(1)}^2 + T^2} = \sqrt{P^2 + Q^2 + T^2}.$$

Здесь $T = U \sqrt{\sum_{k=2} I_{(k)}^2}$ – мощность искажения, которая является составляющей полной

мощности S при несинусоидальной форме тока; $\sqrt{\sum_{k=2} I_{(k)}^2} = I_{\Gamma}$ – действующее значение тока высших гармоник.

Под мощностью гармоники тока понимается произведение действующего значения силы тока данной гармоники на действующее значение напряжения.

Гармоники тока, создаваемые нелинейными нагрузками, могут представлять собой серьезные проблемы для систем электроснабжения. Гармонические составляющие представляют собой токи с частотами, кратными основной частоте источника питания, и обуславливают появление мощности искажения. Увеличение общего действующего значения тока при наличии высших гармоник в системе приводит к увеличению потерь и перегреву всего оборудования распределенной сети электропитания, снижению коэффициента мощности, ухудшению характеристик защитных автоматов и завышению требуемой мощности электроэнергетических установок. В свою очередь высшие гармоники тока влияют на форму напряжения в системе электропитания, вызывая его несинусоидальность, которая отрицательно воздействует на изоляцию кабельных линий электропередач. Гармоники нарушают работу многих устройств, но особенно чувствительны к ним конденсаторы, так как их сопротивление снижается пропорционально порядку (номеру) присутствующих высших гармоник. В определенных условиях могут возникать резонансные явления, приводящие к перегрузке конденсаторов и значительным искажениям кривой напряжения.

Основные энергетические показатели

Основным энергетическим показателем для различных типов преобразователей электрической энергии является коэффициент мощности K_m [2], который определяется отношением активной мощности, потребляемой из сети (определяется только первыми гармониками тока и напряжения), к полной мощности, т.е.:

$$K_m = P_{(1)} / S = P_{(1)} S_{(1)} / S_{(1)} S = \cos \varphi K_{\text{и}},$$

где $P_{(1)}$ – активная мощность первой гармоники; S – полная мощность; $S_{(1)}$ – полная мощность первой гармоники.

В выражении для коэффициента мощности имеются две составляющие $\cos \varphi$ и $K_{\text{и}}$, которые называются соответственно *коэффициентами сдвига и искажения*. При допущении о синусоидальной неискаженной форме напряжения они характеризуют одновременно фазовый сдвиг $\cos \varphi$ первой гармоники сетевого тока относительно напряжения и коэффициент искажения формы сетевого тока $K_{\text{и}} = I_{\Phi(1)} / I_{\Phi}$, где $I_{\Phi(1)}$ – действующее значение первой гармоники сетевого тока; I_{Φ} – действующее значение полного тока сети. Подробный анализ коэффициента сдвига в регулируемых приводах постоянного и переменного тока дан в [3, 4].

Коэффициенты искажения для управляемых выпрямителей при допущении о прямоугольной форме потребляемого из сети тока (при идеальном сглаживании выпрямленного тока) равны: $K_{\text{и}} = 0,9$ – для однофазной мостовой схемы, $K_{\text{и}} = 0,955$ – для трехфазной мостовой схемы.

В зарубежной литературе вместо коэффициента искажения $K_{\text{и}}$ принято использовать понятие **THD%** – **Total Harmonic Distortion** – суммарное гармоническое искажение, которое определяется выражением:

$$\text{THD}\% = \frac{\sqrt{\sum_{k=2} I_{(k)}^2}}{I_{(1)}} \cdot 100,$$

где $I_{(k)}$ и $I_{(1)}$ – амплитудные или действующие значения k -й и первой гармоник тока.

Связь между $K_{\text{и}}$ и THD определяется соотношениями [4]:

$$K_{\text{и}} = \frac{I_{(1)}}{I} = \frac{1}{\sqrt{1 + \text{THD}^2}}, \quad \text{THD} = \frac{\sqrt{1 - K_{\text{и}}^2}}{K_{\text{и}}}.$$

Для трехфазной мостовой схемы при $K_{\text{и}} = 0,955$ будем иметь $\text{THD} = 31\% \sim 0,31$.

Найдем связь мощности искажения T с коэффициентом искажения $K_{\text{и}}$. Действующее значение всех высших гармоник тока равно:

$$\sqrt{\sum_{k=2} I_{(k)}^2} = \sqrt{I^2 - I_{(1)}^2} = I \sqrt{1 - k_{\text{и}}^2}.$$

Тогда мощность искажения

$$T = U \cdot I \sqrt{1 - k_{\text{и}}^2} = U \cdot I \frac{I_{(1)}}{I_{(1)}} \sqrt{1 - k_{\text{и}}^2} = S_{(1)} \frac{1}{k_{\text{и}}} \sqrt{1 - k_{\text{и}}^2} = S_{(1)} \sqrt{\frac{1}{k_{\text{и}}^2} - 1},$$

где $S_{(1)} = (P_{(1)}^2 + Q_{(1)}^2)^{0,5}$, $Q_{(1)}$ – реактивная мощность первой гармоники.

Учитывая, что $\frac{1}{k_{\text{и}}^2} = 1 + \text{THD}^2$, получим

$$T = S_{(1)} * \text{THD},$$

т.е. чем больше THD, тем больше мощность искажения T . При этом $K_{\text{и}}$ получается низким, так как в токе сети I_{Φ} слишком много высших гармоник.

Заметим, что мощность искажения T находится в квадратуре по отношению к $S_{(1)}$, поэтому полная мощность $S = (S_{(1)}^2 + T^2)^{0,5}$ возрастает из-за THD в меньшей степени.

Далее приведены результаты оценки гармонического состава, THD и $K_{\text{и}}$ с помощью пакета моделирования MicroCAP для двух классов полупроводниковых преобразователей, наиболее широко применяемых в настоящее время для регулируемых электроприводов по-

стоянного (система «Управляемый выпрямитель–Д») и переменного тока (система «ПЧ–АД»).

Применение пакета моделирования MicroCap и офисного пакета Excel для анализа энергетических показателей

В данном разделе поясняется, как выполняется приведение результатов моделирования в программе MicroCap к формату, используемому в программе Excel.

Особенности моделирования в программе MicroCap

Рассмотрим моделирование в программе MicroCap схемы ПЧ с трёхфазным выпрямителем на входе [3, 4].

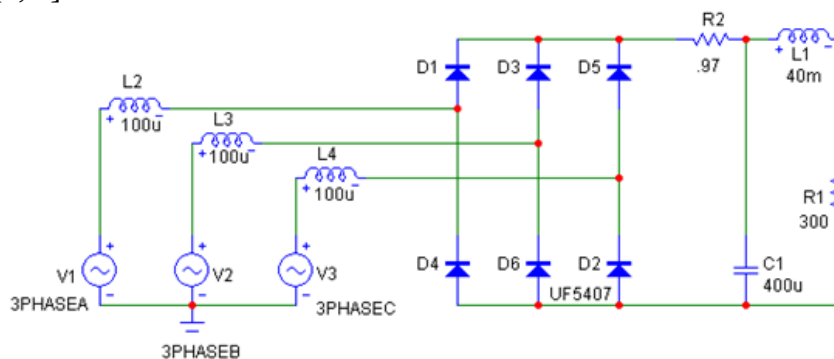


Рис. 1

Переходим в режим анализа переходных процессов:

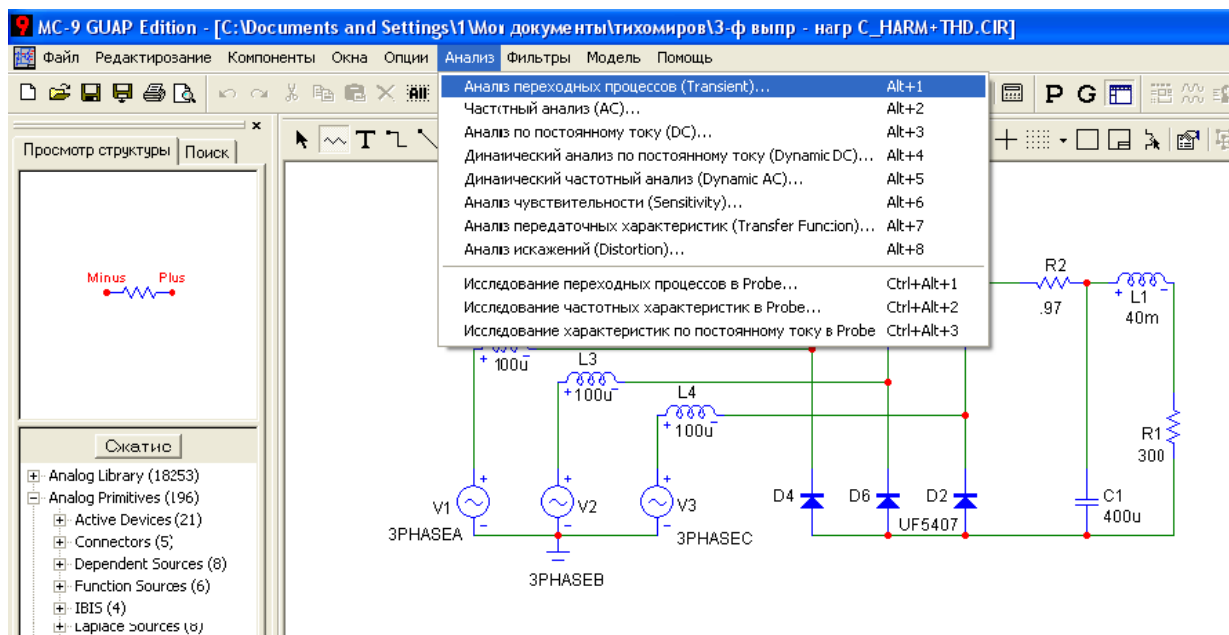


Рис. 2

В открывающемся окне задаём параметры расчёта переходных процессов. В строке, соответствующей графику, числовые значения которого нам нужны, нажимаем кнопку с изображением таблицы.

Запускаем анализ переходных процессов. Далее для создания необходимого числового формата в таблице значений нажимаем кнопку  «Свойства» (F10). В появившемся окне нажимаем на вкладку «Масштабы и форматы» и изменяем формат шкалы и значений

на «децимальный».

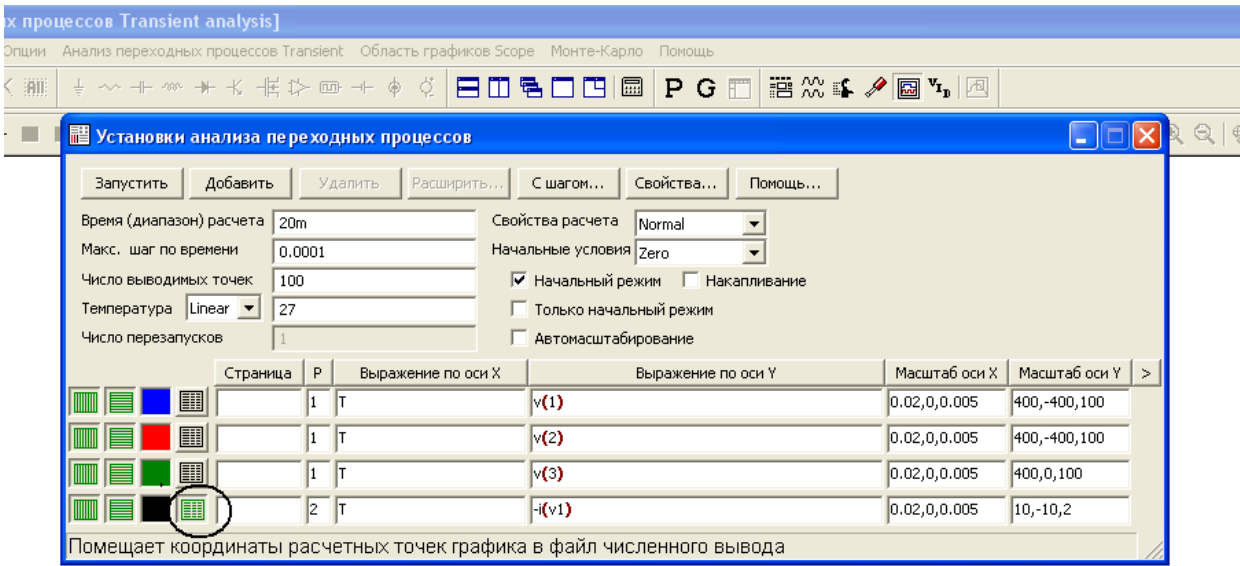


Рис.3

В полученном окне с анализом переходных процессов нажимаем на кнопку с изображением таблицы и в результате получаем числовые данные для сетевого тока в виде таблицы – рис. 4.

Waveform Values

T (Secs)	-i(v1) (A)
0	0.000
0.000202	0.000
0.000404	0.000
0.000606	0.000
0.000808	0.000
0.00101	0.000
0.00121	0.000
0.00141	0.000
0.00162	0.000
0.00182	0.000
0.00202	0.000
0.00222	0.000
0.00242	0.000
0.00263	0.000
0.00283	2.145
0.00303	5.641
0.00323	7.492
0.00343	6.994
0.00364	4.417
0.00384	0.975
0.00404	0.000
0.00424	0.000
0.00444	0.000
0.00465	0.000

Рис. 4

Microsoft Excel - Книга1

	A	B	C
1	T	(-i(v1))	
2	(Secs)	(A)	
3		U	U
4	0,000202	0	
5	0,000404	0	
6	0,000606	0	
7	0,000808	0	
8	0,00101	0	
9	0,00121	0	
10	0,00141	0	
11	0,00162	0	
12	0,00182	0	
13	0,00202	0	
14	0,00222	0	
15	0,00242	0	
16	0,00263	0	
17	0,00283	2,145	
18	0,00303	5,641	
19	0,00323	7,492	
20	0,00343	6,994	
21	0,00364	4,417	
22	0,00384	0,975	
23	0,00404	0	
24	0,00424	0	
25	0,00444	0	
26	0,00465	0	

Рис. 5

Приведение результатов моделирования в программе MicroCap к формату программы Excel

Копируем полученные в MicroCap числовые значения (рис. 4) в программу Excel (здесь приводится только фрагмент таблицы для сетевого тока). Так как программа Excel не воспринимает точку как разделитель целой и дробной частей, то приводим числовые значения MicroCap к формату Excel, для чего вызываем в Excel команду замены «Главная->Найти и выделить->Заменить...» (CtrlH) и заменяем точки на запятые, нажав кнопку «Заменить все».

Далее разделяем данные на два столбца. Для этого используем во вкладке «Данные» команду «Текст по столбцам». Устанавливаем формат данных «фиксированной ширины», нажимаем Далее, проверяем ширину столбцов, нажимаем Далее и Готово. В результате получаем требуемый вид таблицы – рис. 5:

Методика расчета энергетических показателей преобразовательных устройств при синусоидальном напряжении с помощью компьютерных пакетов MicroCap и Excel

Определение активной мощности первой гармоники

Аналогично графику тока переносим из программы MicroCap в программу Excel и форматируем значения графика напряжения фазы сети (для той же фазы, что и ток). Активная мощность равна среднему значению от мгновенной мощности. Находим мгновенную мощность, перемножив столбцы тока и напряжения.

Для определения активной мощности ставим курсор в ячейку, расположенную под столбцом значений мгновенной, и используем функцию «СРЗНАЧ».

Расчет полной мощности первой гармоники $S_{(1)}$

Полная мощность первой гармоники определяется соотношением:

$$S_{(1)} = U * I_{(1)}.$$

Для определения полной мощности первой гармоники находим в MicroCap амплитудное значение первой гармоники тока $I_{M(1)}$ с помощью функции **harm** [5], амплитудное значение первой гармоники фазного напряжения известно $U_m = 310$ В. Тогда полная мощность первой гармоники может быть рассчитана в Excel по соотношению:

$$S_{(1)} = U * I_{(1)} = U_m * I_{M(1)} / 2.$$

Расчет мощности искажения T

Мощность искажения T определяется по выражению:

$$T = S_{(1)} * THD.$$

Здесь THD берется из результатов моделирования в MicroCap, где имеется стандартная расчетная функция **thd** [5].

Расчет $\cos\varphi$

Значение $\cos\varphi$ может быть определено в программе Excel по формуле:

$$\cos\varphi = P / S_{(1)}.$$

Здесь же можно определить и угол $\varphi = \arccos(\cos\varphi)$ и $\sin\varphi$.

Расчет реактивной мощности Q

Реактивная мощность Q рассчитывается в программе Excel по выражению:

$$Q = S_{(1)} * \sin\varphi.$$

После расчета составляющих полной мощности P , T и Q может быть рассчитана общая полная мощность с учетом высших гармоник по соотношению:

$$S = U * I = (S_{(1)}^2 + T^2)^{0,5} = (P_{(1)}^2 + Q_{(1)}^2 + T^2)^{0,5}.$$

Расчет коэффициента искажения K_i

Коэффициент искажения K_i при рассчитанном значении THD определяется по формуле:

$$K_{\text{И}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \text{THD}^2}}$$

Расчет коэффициента мощности

$$K_{\text{М}} = \cos\varphi * K_{\text{И}}$$

Примеры расчета энергетических показателей и их анализ

1. Трехфазный управляемый выпрямитель в режиме прерывистого тока

В [4] был выполнен анализ гармонического состава для этой схемы, но не были рассчитаны все энергетические показатели [3]. Схема моделирования в MicroCap показана на рис. 6.

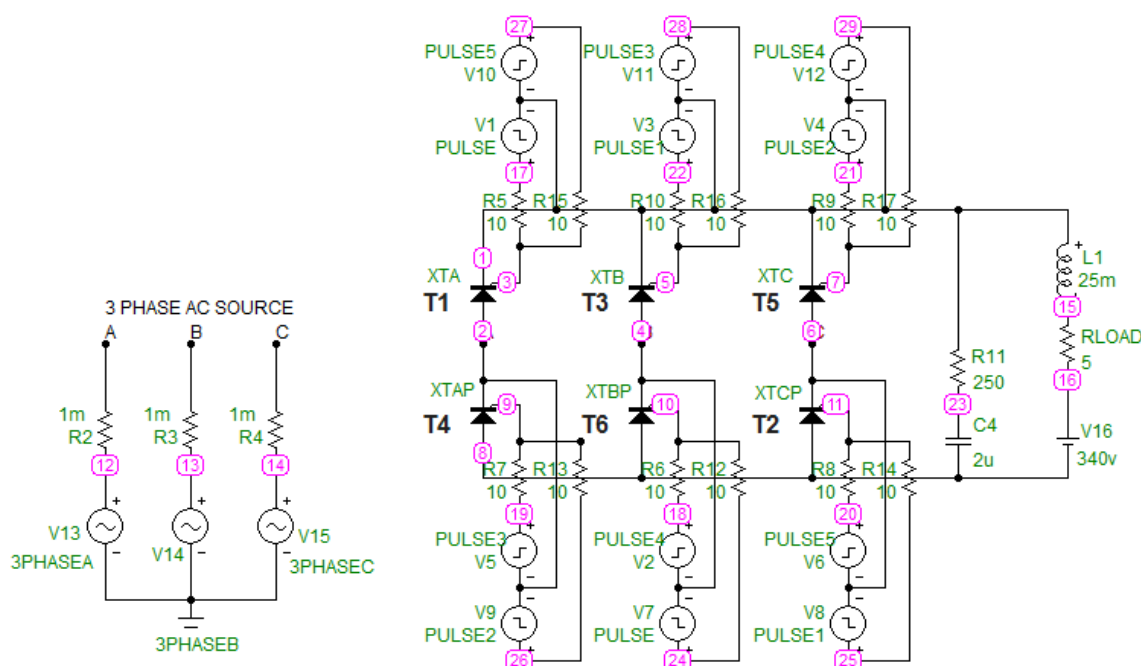


Рис. 6

Диаграммы моделирования в MicroCap (рис. 7).

С использованием изложенной ранее методики получены следующие результаты расчета энергетических показателей.

f harm(i(V13))	Амплит 1-й гармI _{m(1)}
(Hz)	(A)
50	4,783

thd,%	thd,o.e.
76,959	0,7696

Активная мощность равна среднему значению от мгновенной мощности, которая находится с помощью Excel путем перемножения числовых мгновенных значений тока и напряжения сети. По мгновенной мощности с помощью Excel находится среднее значение:

$$P = 595,817 \text{ Вт.}$$

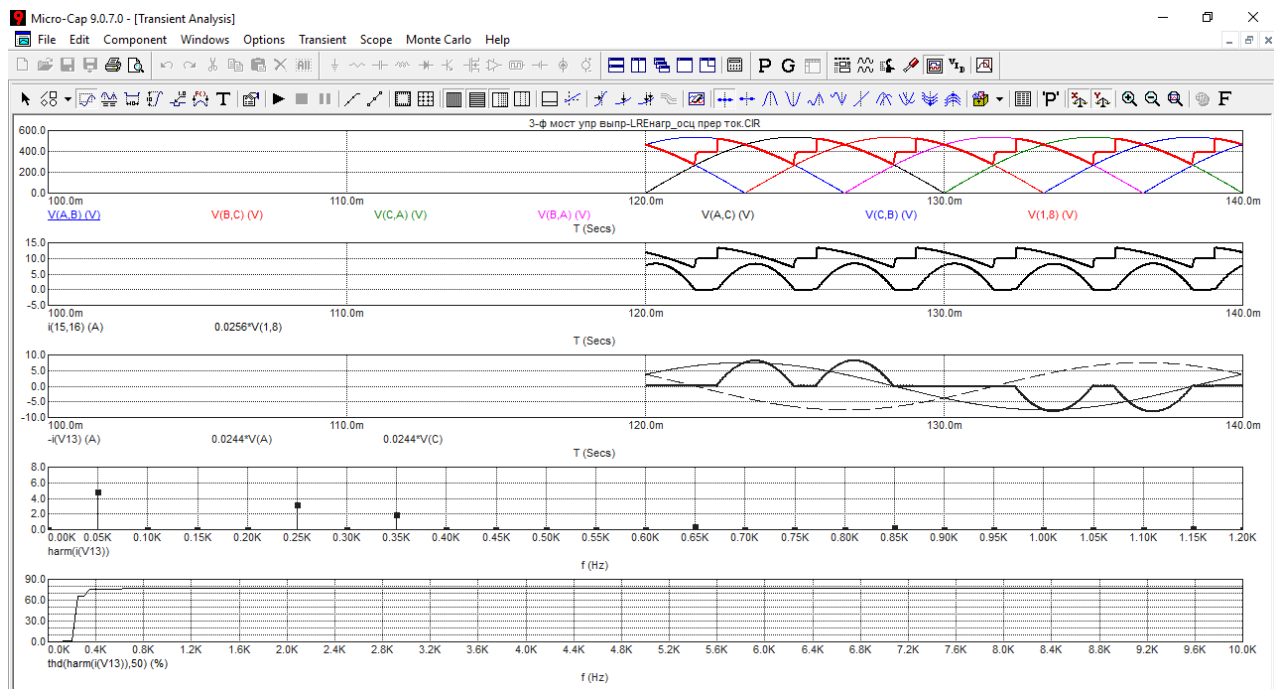


Рис. 7

Напоминаем, что активная мощность определяется только первой гармоникой тока, т.е. равна активной мощности первой гармоники $P_{(1)}$.

Определим полную мощность первой гармоники $S_{(1)}$ через найденное ранее амплитудное значение $I_{m(1)}$ первой гармоники тока:

$$S_{(1)} = U \cdot I_{(1)} = U_m \cdot I_{m(1)} / 2 = 310 \cdot 4,783 = 741,365 \text{ ВА.}$$

Мощность искажения T :

$$T = S_{(1)} \cdot \text{THD} = 570,547 \text{ ВА.}$$

Найдем $\cos\varphi$ по соотношению $\cos\varphi = P / S_{(1)}$:

$$\cos\varphi = 0,804; \quad \varphi = 0,637 \text{ рад} = 36,52 \text{ град}; \quad \sin\varphi = 0,595.$$

Тогда значение реактивной мощности Q равно:

$$Q = S_{(1)} \cdot \sin\varphi = 441,16 \text{ ВАР.}$$

Коэффициент искажения рассчитывается через THD: $K_{\text{и}} = 0,792$.

Коэффициент мощности: $K_{\text{м}} = \cos\varphi \cdot K_{\text{и}} = 0,637$.

Из полученных результатов видно, что трехфазный управляемый выпрямитель, работающий в режиме прерывистого тока, имеет сравнительно низкий коэффициент искажения $K_{\text{и}}$, существенно ниже единицы, что свидетельствует о высоком содержании высших гармоник, т.е. режим прерывистого тока неблагоприятно сказывается на гармоническом составе сетевого тока и его желательно избегать. При этом выпрямленный ток (ток электродвигателя постоянного тока) имеет существенные пульсации, что вызывает дополнительный нагрев электродвигателя и ухудшает коммутацию в коллекторно-щеточном устройстве. Кроме того, из-за фазового способа регулирования выпрямленного напряжения такой преобразователь потребляет реактивную мощность Q , зависящую от угла управления α , который примерно равен фазовому углу сдвига тока φ . Поэтому коэффициент мощности $K_{\text{м}}$ получается тем ниже, чем меньше выпрямленное напряжение, т.е. чем больше угол управления α .

2. ПЧ с трехфазным выпрямителем на входе [4]

Схема моделирования в MicroCap показана на рис. 8.

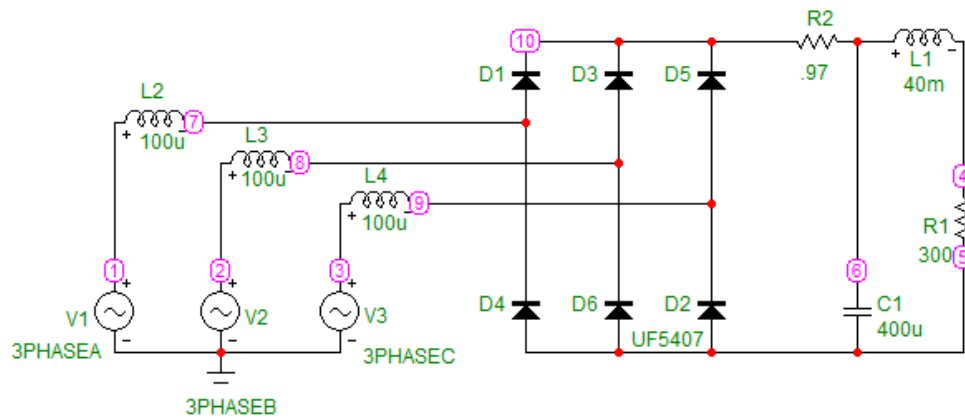


Рис. 8

Диаграммы моделирования в MicroCap (рис. 9).

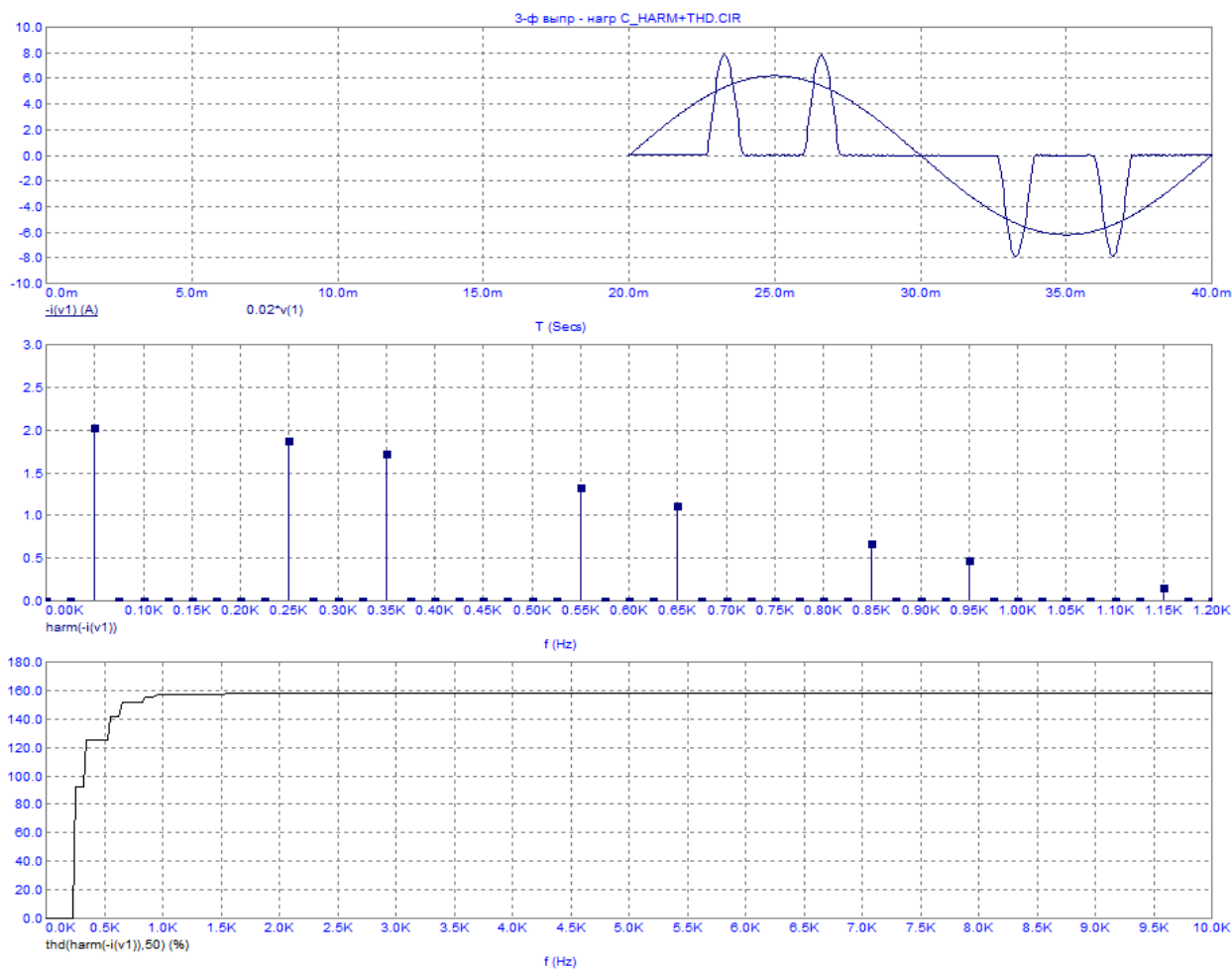


Рис. 9

Результаты расчета энергетических показателей.

f harm(-i(v1))	Амплит 1-й гарм $I_{m(1)}$
(Hz)	(A)
50	2,022
thd,%	thd,o.e.
158,535	1,5854

По мгновенной мощности с помощью Excel находится активная мощность:

$$P=312,929 \text{ Вт.}$$

Напоминаем, что активная мощность определяется только первой гармоникой тока, т.е. равна активной мощности первой гармоники $P_{(1)}$.

Определим полную мощность первой гармоники $S_{(1)}$ через найденное ранее амплитудное значение $I_{m(1)}$ первой гармоники тока:

$$S_{(1)}=U \cdot I_{(1)}=U_m \cdot I_{m(1)}/2=313,410 \text{ ВА.}$$

Мощность искажения T :

$$T = S_{(1)} \cdot \text{THD} = 496,865 \text{ ВА.}$$

Найдем $\cos\varphi$ по соотношению $\cos\varphi=P/S_{(1)}$:

$$\cos\varphi=0,998; \quad \varphi=0,055 \text{ рад}=3,172 \text{ град}; \quad \sin\varphi=0,055.$$

Тогда значение реактивной мощности Q равно:

$$Q = S_{(1)} \cdot \sin\varphi = 17,34 \text{ ВАР.}$$

Коэффициент искажения рассчитывается через THD: $K_{\text{и}}=0,534$.

Коэффициент мощности: $K_{\text{м}}=\cos\varphi \cdot K_{\text{и}}=0,533$.

Из полученных результатов видно, что преобразователь частоты с трехфазным выпрямителем на входе (основная масса применяемых ПЧ) имеет $\cos\varphi$, близкий к единице, т.е. не потребляет реактивной мощности. Но из-за большого содержания высших гармоник в сетевом токе очень велика мощность искажения T (она даже больше потребляемой активной мощности P), коэффициент искажения $K_{\text{и}}$ очень мал и поэтому коэффициент мощности $K_{\text{м}}$ является очень низкой величиной. Причем даже несколько ниже, чем при однофазном подключении ПЧ к сети [3, 4].

3. ПЧ с трехфазным выпрямителем на входе при применении резонансного LC-фильтра [4]

Применение фильтра на входе ПЧ позволяет значительно улучшить гармонический состав сетевого тока, уменьшить мощность искажения T и повысить коэффициент мощности $K_{\text{м}}$. Схема моделирования в MicroCap (рис. 10).

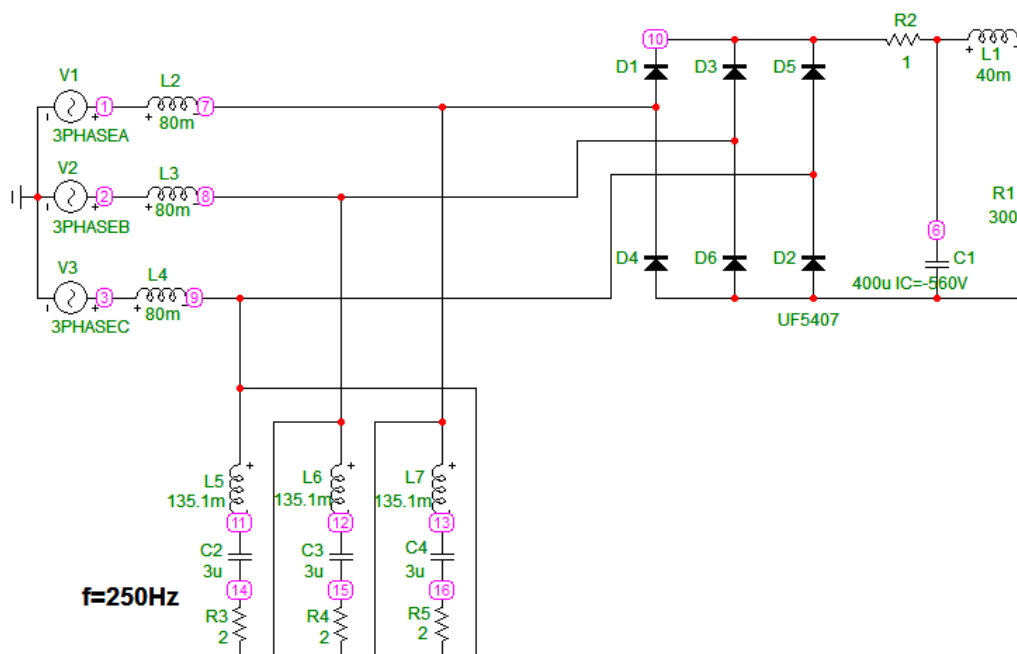


Рис. 10

Диаграммы моделирования в MicroCap (рис. 11).

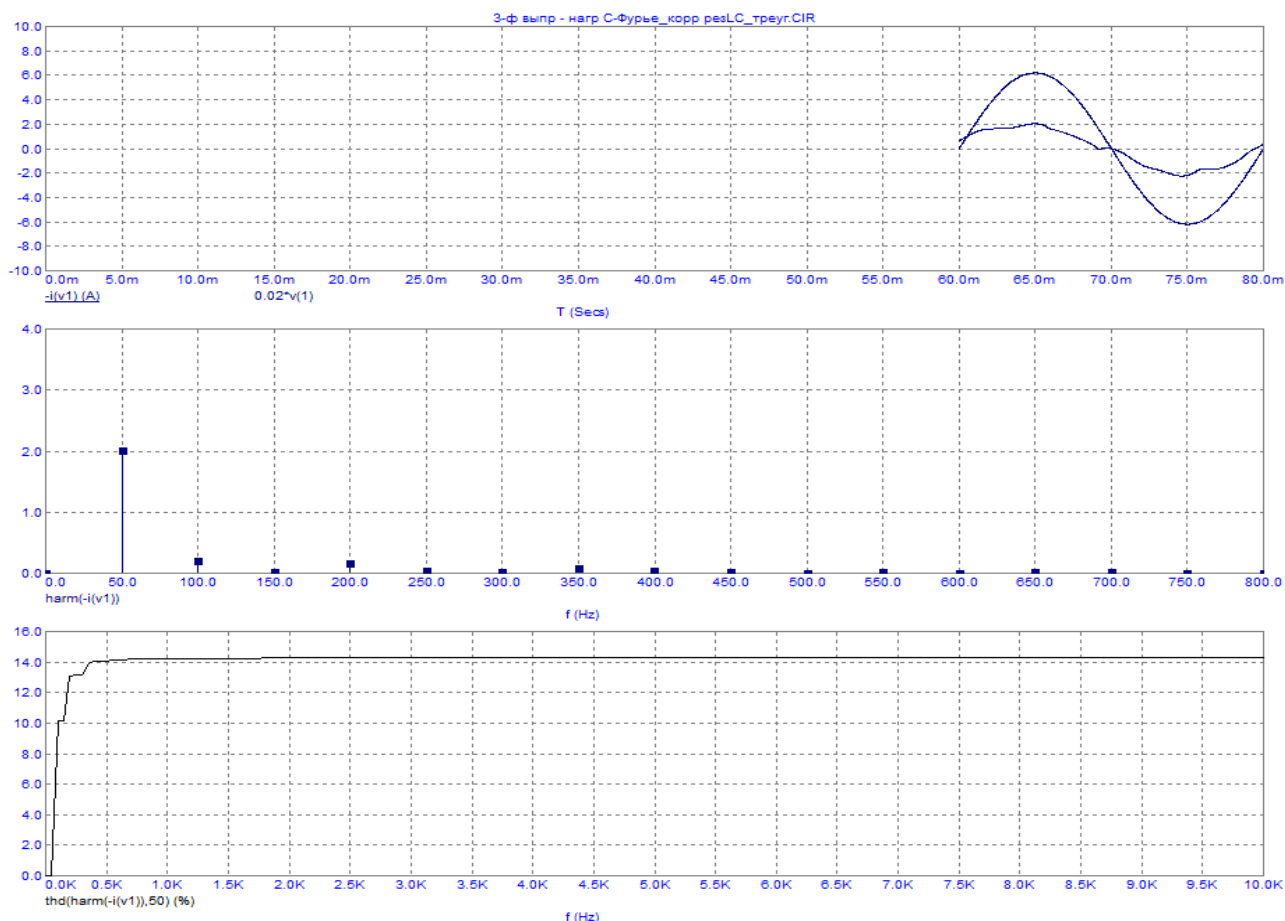


Рис. 11

Результаты расчета энергетических показателей.

f	Амплит 1-й гарм $I_{m(1)}$
harm($i(V13)$)	
(Hz)	(A)
50	2,025

thd,%	thd,o.e.
13,925	0,1393

По мгновенной мощности с помощью Excel находится активная мощность:

$$P=310,3948 \text{ Вт.}$$

Напоминаем, что активная мощность определяется только первой гармоникой тока, т.е. равна активной мощности первой гармоники $P_{(1)}$.

Определим полную мощность первой гармоники $S_{(1)}$ через найденное ранее амплитудное значение $I_{m(1)}$ первой гармоники тока:

$$S_{(1)}=U \cdot I_{(1)}=U_m \cdot I_{m(1)}/2=313,875 \text{ ВА.}$$

Мощность искажения T :

$$T = S_{(1)} \cdot \text{THD}=43,707 \text{ ВА.}$$

Найдем $\cos\varphi$ по соотношению $\cos\varphi = P / S_{(1)}$:

$$\cos\varphi = 0,989; \quad \varphi = 0,149 \text{ рад} = 8,54 \text{ град}; \quad \sin\varphi = 0,0149.$$

Тогда значение реактивной мощности Q равно:

$$Q = S_{(1)} * \sin\varphi = 46,61 \text{ ВАР}.$$

Коэффициент искажения рассчитывается через THD: $K_{\text{и}} = 0,990$.

Коэффициент мощности: $K_{\text{м}} = \cos\varphi * K_{\text{и}} = 0,979$.

Из полученных результатов видно, что применение резонансного фильтра обеспечивает наилучшие энергетические показатели, которые удовлетворяют всем российским требованиям к качеству электроэнергии.

Если увеличить емкость конденсатора резонансного фильтра с 3мкФ до 5мкФ, а другие его параметры оставить без изменений, то фильтр становится фильтро-компенсирующим устройством.

Диаграммы моделирования в MicroCap (рис. 12).

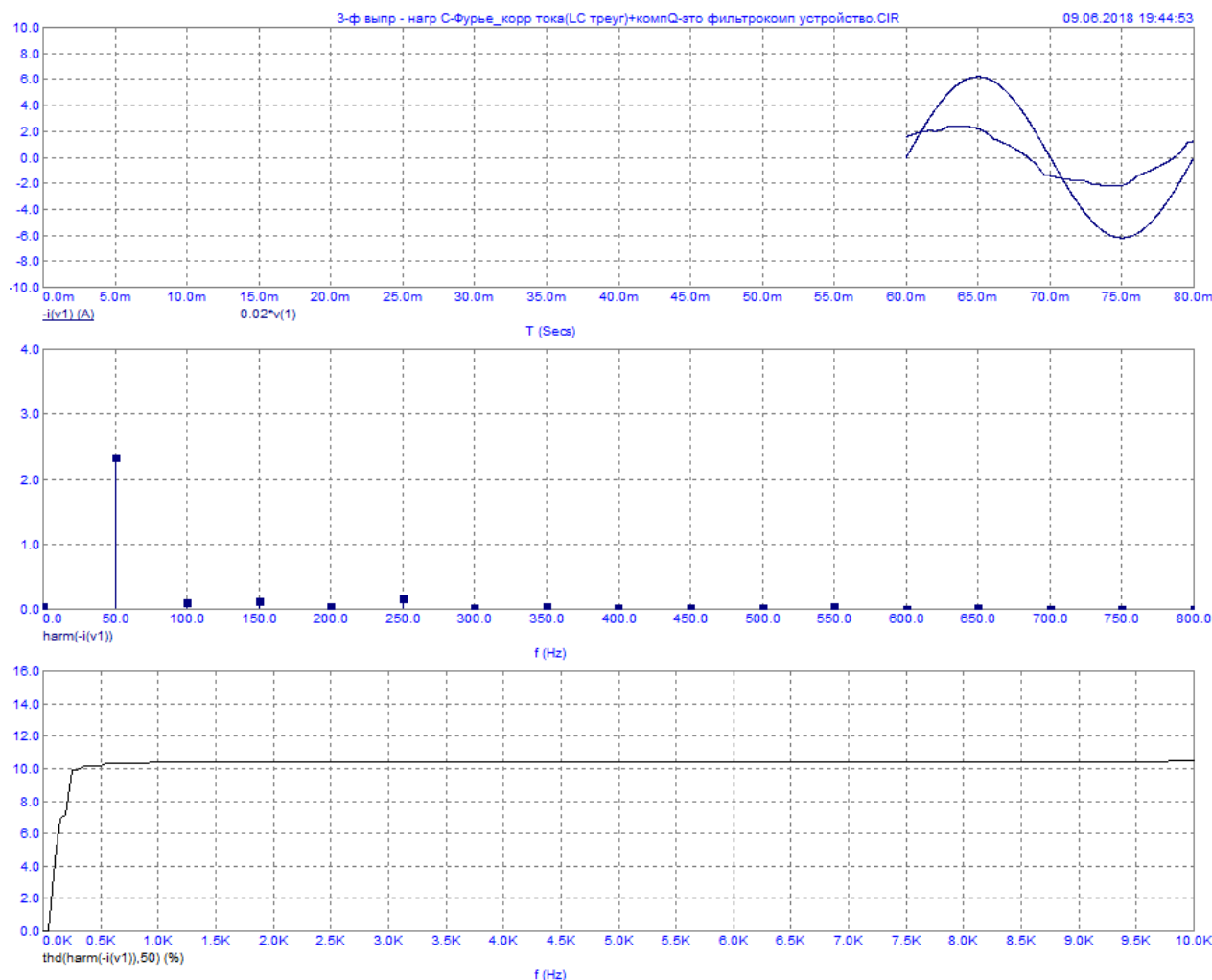


Рис. 12

Видно, что ток сдвинулся в сторону опережения, т.е. схема генерирует реактивную мощность, которая может быть использована, например, для компенсации реактивной мощности нерегулируемых асинхронных короткозамкнутых двигателей. С помощью Excel по приведенной ранее методике можно подобрать емкость конденсатора резонансного фильтра, чтобы величина генерируемой реактивной была равна требуемой величине.

Заключение

Компьютерные программы предоставляют богатые возможности как для изучения рабочих процессов в электроустановках, так и для расчета энергетических показателей электрооборудования. Для изучения рабочих процессов нами была выбрана широко распространенная программа моделирования электронных устройств MicroCap [5, 6], а в качестве инструмента для расчета энергетических показателей был применен офисный пакет MicrosoftExcel.

С помощью указанных программ были проанализированы все энергетические показатели наиболее распространенных преобразовательных устройств [3, 4]. Этот анализ позволил выявить достоинства и недостатки этих устройств в различных рабочих режимах, дать рекомендации по улучшению их режимов.

При использовании тиристорных управляемых выпрямителей в составе электроприводов постоянного тока не следует допускать режим прерывистого тока в широком диапазоне нагрузок, так как это приводит к существенному ухудшению гармонического состава сетевого тока. Самым простым способом не допустить этого является применение сглаживающего дросселя в цепи выпрямленного тока, от установки которого в настоящее время часто отказываются.

Доказано, что преобразователи частоты, работающие в составе электроприводов переменного тока и постепенно вытесняющие тиристорные управляемые выпрямители в составе электроприводов постоянного тока, не обладают высокими энергетическими показателями. Это противоречит широко распространенному мнению об их высокой энергетической эффективности.

Преобразователи частоты имеют $\cos\varphi$, близкий к единице, т.е. не потребляют из питающей сети реактивной мощности. Но гармонический состав потребляемого из сети тока можно назвать просто отвратительным, а бороться с широким спектром высших гармоник гораздо сложнее, чем с реактивной мощностью, которая потребляется только по первой гармонике.

При применении мощных преобразовательных устройств необходимо уделять пристальное внимание анализу их энергетических показателей, чтобы иметь возможность бороться с негативным влиянием преобразователей на питающую сеть.

В данной работе предлагается универсальная методика и инструментарий для расчета энергетических показателей преобразовательных устройств, которые обеспечивают высокую достоверность результатов.

Библиографический список

1. <http://www.toehelp.ru/theory/toe/lecture07/lecture07.html> – интернет-учебник по ТОО.
2. **Руденко, В.С.** Преобразовательная техника / В.С. Руденко, В.И. Сенько, И.М. Чиженко. – Киев: Вища школа, 1983. – 431 с.
3. **Тихомиров, В.А.** Технические и экономические аспекты применения регулируемых приводов постоянного и переменного тока / В.А. Тихомиров, В.Г. Титов, С.В. Хватов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород. – 2010. – №4 (83). – С. 190–204.
4. **Тихомиров, В.А.** Сравнительный анализ гармонического состава сетевого тока управляемых выпрямителей и преобразователей частоты / В.А. Тихомиров, С.В. Хватов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород. – 2011. – №3 (90). – С. 204–214.
5. **Разевиг, В.Д.** Схемотехническое моделирование с помощью Micro-CAP 7. – Горячая линия-Телеком, 368 с. 621.38 Р-17 /2003 – 9 аб, 2 чз
6. **Коротков, А.С.** Основы компьютерного проектирования и моделирования РЭС: учеб. пособие и лабораторный практикум / А.С. Коротков, Д.В. Морозов. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004. – 68 с.

*Дата поступления
в редакцию 12.06.2018*

V.A. Tikhomirov

METHOD OF CALCULATION OF ENERGY INDICATORS OF CONVERSION DEVICES

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

Purpose: Modern electrical installations for powering various devices and electric drive systems, as a rule, contain converter devices. It is very important to have a tool for studying the processes occurring in converter systems.

Methodology: In addition to this, it is necessary to have a tool for obtaining quantitative estimates of the energy indicators of electrical installations that have transformers in their composition.

Results: A technique is proposed for calculating the energy performance of various converter devices using personal computers and software tools running on the most common Windows platform at the moment.

Key words: converter devices, energy indicators, calculation technique, computer simulation and calculation packages.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

УДК 629.33

Д.А. Бутин¹, А.В. Тумасов¹, А.С. Вашурин¹, А.А. Аникин¹, Ю.И. Палутин²

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ КАЧЕНИЯ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ ШИНЫ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ УПРАВЛЯЕМОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева¹,
Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия²

Современные сертификационные испытания управляемости автомобилей разработаны для оценивания управляемости автомобилей, оборудованных электронной системой курсовой устойчивости (ЭКУ). Общая оценка учитывает параметры управляемости автомобиля и работы системы ЭКУ. Современные методы основываются на реакциях автомобиля на стандартизованные управляющие воздействия.

Анализ результатов испытаний автомобиля современными методиками выявил продолжительный процесс качения колес с большими углами увода, что практически не наблюдалось при стандартных испытаниях. Факт влияния параметров сцепления шин при тяжелом скольжении был подтвержден исследованиями. Степень влияния характеристики шины на результаты испытания определялась для испытания «Усеченная синусоида».

Ключевые слова: угол бокового увода, управляемость, коэффициент сцепления шины, тяжелое скольжение шины, управляемость автомобиля.

Управляемость – это способность автомобиля сохранять или изменять направление движения. Эта способность влияет на безопасность автомобиля предупреждая ДТП. Поэтому управляемость оценивают и контролируют на уровне других систем безопасности. Для исследования управляемости автомобилей используются различные методики, которые основаны на выполнении автомобилем определенного маневра. Продолжительное время на территории РФ действует стандарт управляемости и устойчивости для автомобилей. Стандартные испытания, такие как «Вход в поворот» и «Переставка», выполняются водителем-испытателем, главным оценочным параметром является критическая скорость выполнения маневра. Внедрение электронных систем курсовой устойчивости привело к внедрению современных методик исследования. Современные методы основаны на единообразии управляющих воздействий и анализе реакций автомобиля по определенным параметрам.

Анализ результатов натурных испытаний, выполняемый водителем-испытателем, показал, что движение автомобиля при стандартных испытаниях происходит в зоне устойчивого движения. Исследование работы пневматических шин при проведении испытания происходило с помощью моделирования. Верифицированная имитационная модель автомобиля позволяет моделировать его движение и вычислять параметры качения шин. Для наглядности на рис. 1 представлены графики углов увода шин передней и задней оси при выполнении испытания «Вход в поворот» на критической скорости. Исследование было выполнено при помощи верифицированной модели легкого коммерческого автомобиля. На автомобиле используются шины, обладающие максимальным коэффициентом сцепления на сухом асфальтированном основании при угле увода от 9 до 14 градусов.

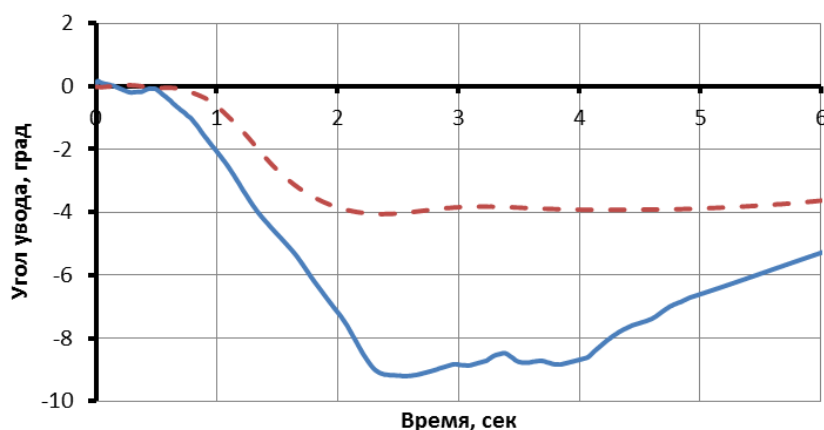


Рис. 1. Угол увода при испытании «Вход в поворот»:

— ось передняя; — — — ось задняя

Из графиков видно, что во время испытания угол увода шин передней оси достигает 9 градусов. Этот угол не превышает угол максимального сцепления шин. Для шин, используемых на исследуемом автомобиле, этот угол увода близок к углу с максимальным коэффициентом сцепления. Данный факт показывает, что автомобиль движется в повороте с полным использованием сцепных сил шин с дорогой.

При исследовании управляемости и устойчивости наибольшее значение имеет реакция шины в боковом направлении. Теория качения пневматической шины установила связь между углом увода и боковой реакцией шины [2, 3]. Эту зависимость принято разделять на две зоны. Зона линейной зависимости с максимальным коэффициентом сцепления называется зоной «трения скольжения». После пика, коэффициент сцепления уменьшается и остается почти постоянным при больших углах увода, это режим «тяжелого скольжения» [2].

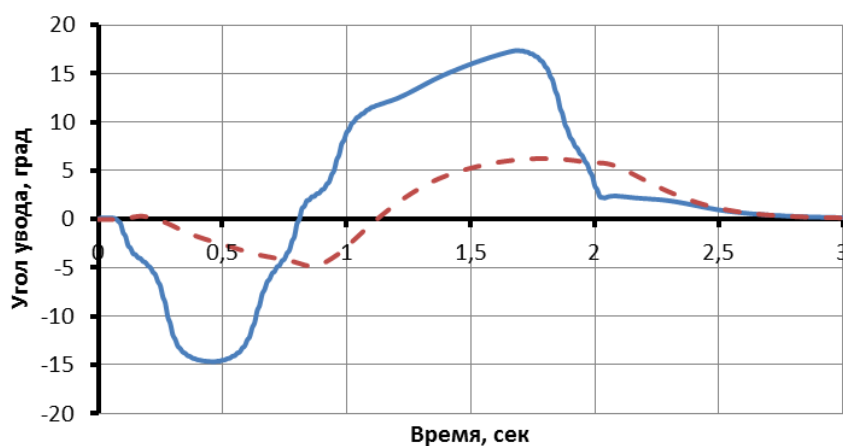


Рис. 2. Угол увода при испытании «Усеченная синусоида»:

— ось передняя, — — — ось задняя

Современные методы исследования управляемости автомобилей, оснащенных ЭКУ, проводятся с использованием устройства автоматического управления. Современные испытания, такие как *Усеченная синусоида*, *Рыболовный крючок*, выполняются со скоростью вращения рулевого колеса, достигающей 1200 град/с, что значительно превышает способности водителя-испытателя. Амплитуда поворота рулевого колеса подбирается для каждого автомобиля индивидуально и может достигать 300 градусов [4, 5]. Такие скорости поворота рулевого колеса и амплитуды способны вызвать качение шин с большими углами увода. Разница в углах увода шин передней и задней оси означает снос или занос автомобиля. При вы-

полнении современного маневра без системы ЭКУ установлено, что, даже без полной потери управляемости, углы увода колес значительно превышают углы увода при выполнении маневров водителем-испытателем (Вход в поворот, Переставка). На рис. 2 представлены графики углов увода колес передней и задней оси при испытании «Усеченная синусоида» на автомобиле без электронной системы курсовой устойчивости.

Во время испытания максимальный угол увода на передней оси достигал 17,3 градуса. При этом максимальный увод задней оси достигал 6,3 градуса. Из-за резкого поворота управляемых колес происходит качение колес с большим углом увода. Из графиков видно, что за время испытания, качение с углами увода, превышающими 10 градусов, составило 1,2 с, т.е. при 3-секундном маневре качение колес передней оси в режиме качения с большим углом увода составило 60%.

На основании изложенного было сделано предположение, что на показатели управляемости в современных методиках испытаний оказывает влияние коэффициент сцепления при тяжелом скольжении. Для проверки этого предположения были проведены исследования влияния коэффициента сцепления шины с опорной поверхностью при больших углах увода на результаты испытаний. Исследования были выполнены методом имитационного моделирования в программном пакете MSC ADAMS Car. Для этого были разработаны две модели с различными характеристиками сцепления шин при скольжении шин в боковом направлении, которые представлены на рис. 3 (модель №1 – коэффициент сцепления 0,8, модель №2 – коэффициент сцепления 0,6 при больших углах увода).

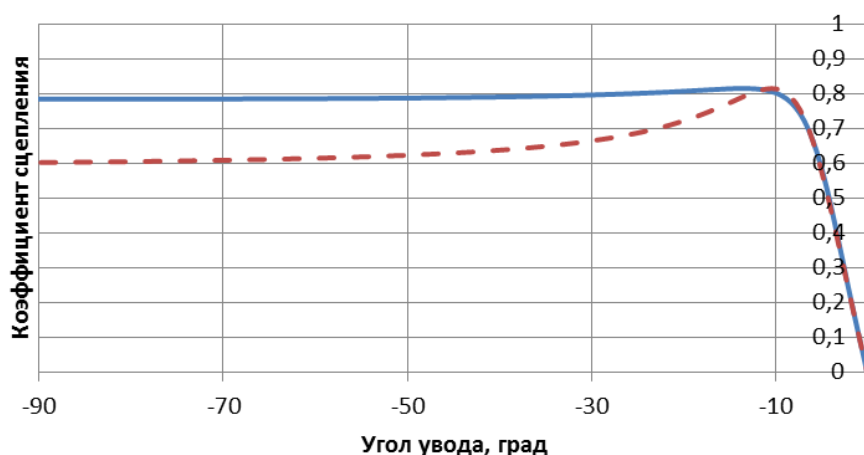


Рис. 3. Характеристики сцепления шины при поперечном скольжении:

— модель шины №1; — — — модель шины №2

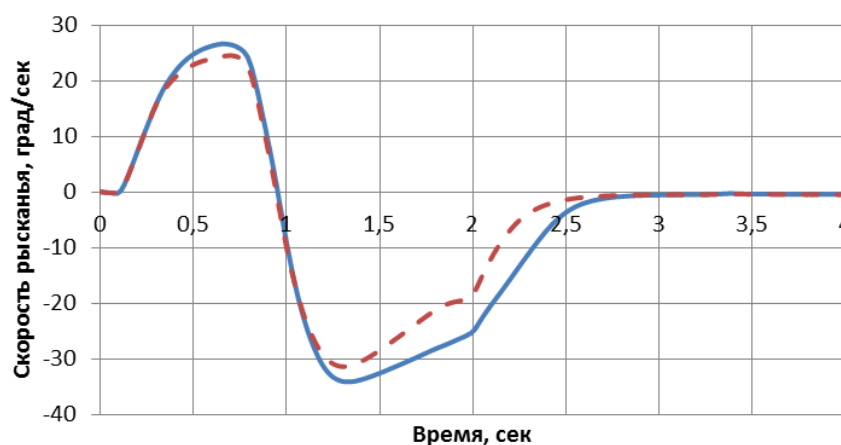


Рис. 4. Скорость рысканья при испытании «Усеченная синусоида»:

— модель автомобиля с шиной №1; — — — модель автомобиля с шиной №2

Исследования проводились по современной методике испытания «Усечённая синусоида». Результаты испытаний оценивались по скорости рысканья автомобиля, как это предписано в нормативном документе. Результаты испытаний представлены в виде графиков на рис. 4.

Угловая скорость автомобиля с шинами №2 в сравнении с шинами №1 в первом периоде увеличилась с 24 до 26 град/с, а во втором периоде угловая скорость увеличилась с 31 до 34 град/с. Время установления стационарного движения у модели с шинами №2 на 0,16 с меньше, чем у модели на шинах №1.

Выводы

В результате исследования была выявлена и установлена зависимость влияния характеристик сцепления шин в боковом направлении на показатели управляемости автомобиля при испытании «Усечённая синусоида» для автомобиля без ЭКУ. Выявлена положительная связь между коэффициентом сцепления в режиме тяжелого скольжения и максимальной угловой скоростью. Уменьшение коэффициента сцепления шины в боковом направлении на 25% в зоне качения с большими углами увода привело к уменьшению пиков угловой скорости автомобиля в среднем на 8% при выполнении маневра «Усечённая синусоида». Так же уменьшение коэффициента сцепления привело к сокращению времени переходного процесса на 5,8%.

Исследования выполнены в рамках исследований, реализуемых при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ по договору № 02.G25.31.0193 от 27.04.2016 г. (постановление Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 года №218).

Библиографический список

1. ГОСТ 52302-2012
2. **Кгрозза, В.И.** Работа автомобильной шины / В.И. Кгрозза. – М.: Транспорт, 1976. – 238 с.
3. Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотрибологии до динамики землетрясений [Электронный ресурс] / Попов В.Л. - М. : ФИЗМАТЛИТ, 2013. - <http://www.medcollegelib.ru/book/ISBN9785922114431.html>
4. Правила ЕЭК ООН N 13 Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения транспортных средств категорий М, N и O в отношении торможения"(с изменениями и дополнениями) (Докипедия: Правила ЕЭК ООН N 13"Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения транспортных средств категорий М, N и O в отношении торможения (с изменениями и дополнениями)).
5. Правила ЕЭК №13-N Предложение по новым правилам, касающимся электронного контроля устойчивости (ЭКУ).

*Дата поступления
в редакцию 15.06.2018*

D. A. Butin¹, A. V. Tumasov¹, A. S. Vashurin¹, A.A. Anikin¹, Y.I. Palutin²

STUDY OF ROLLING OF A PNEUMATIC TIRE DURING TESTS OF CONTROLLABILITY AND STABILITY

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R. E. Alekseeva¹,
Nizhny Novgorod state agricultural academy²

Purpose: Demonstration of the influence of the characteristics of tire coupling in new tests of car handling

Design/methodology/approach: The research was carried out by the method of simulation of the vehicle movement.

Findings: As a result of the study confirmed the impact on the performance of the vehicle handling characteristics of the tire clutch when rolling with large angles of withdrawal

Originality/value: The main significance of the research results can be for car testers. The characteristic of the tire grip that influences the test results can provide information on how to improve the vehicle's handling performance.

Key words: the angle of the slip, handling, traction tires, heavy tires slide, the car's handling, Sine with Dwell maneuver.

УДК 629.3

У.Ш. Вахидов¹, Ю.И. Молев¹, М.Г. Черевастов,² А.В.Согин¹, А.С. Слюсарев³**ПРЯМЫЕ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА РЕАКЦИИ ДВИЖЕНИЯ АВТОМОБИЛЯ
НА СТУПЕНЧАТОЕ УПРАВЛЯЮЩЕЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
Нижегородский государственный педагогический университет им. К. Минина²,
Волжский государственный университет водного транспорта (Нижний Новгород)³

Рассмотрена переходная реакция автомобиля модели ГАЗ 3302 при ступенчатом управляющем воздействии на рулевое управление. Автомобиль представлен одномассовой плоской расчетной моделью. Уравнения движения машины записаны в форме производных устойчивости. Исследованы условия наступления различных законов протекания переходной реакции. Произведен расчет прямых оценок качества переходного процесса по угловой скорости автомобиля при скачкообразном (ступенчатом) управляющем воздействии. В заключение работы сделаны выводы о влиянии различных конструктивных параметров автомобиля на показатели качества переходной реакции.

Ключевые слова: управляемость автомобиля, показатели качества переходного процесса.

В работе [3] был приведен теоретический расчет переходной реакции движения автомобиля при заданной функции возмущения. Автомобиль же при этом был представлен одномассовой плоской расчетной моделью, обладающей своими преимуществами и недостатками, а в качестве функции возмущения применялась удобная в математическом плане скачкообразная функция, уравнения движения колесной машины были записаны в форме производных устойчивости. Теперь, на следующем шаге, зная аналитическую зависимость переходной реакции движения автомобиля, на примере конкретной модели транспортного средства, произведем прямые оценки качества данной реакции (переходного процесса) по угловой скорости поворота машины. Так же, как и ранее, нами будут учитываться только возмущения от управления, аэродинамическими возмущениями и воздействиями дороги мы пренебрегаем. Поступательная скорость автомобиля считается постоянной. На основании прямых оценок качества переходного процесса, при различных условиях, будут сделаны теоретические выводы о влиянии на качество переходной реакции автомобиля по угловой скорости поворота, положения его центра тяжести, величины поступательной скорости и угла поворота управляемых колес.

В настоящей статье приняты следующие обозначения:

a – расстояние от центра тяжести автомобиля до передней оси [м];

b – расстояние от центра тяжести автомобиля до задней оси [м];

θ – угол поворота управляемых колес [рад];

ω – угловая скорость поворота автомобиля [1/с];

s – оператор Лапласа;

C_1 – коэффициент сопротивления уводу шин передних колес [Н/рад];

C_2 – коэффициент сопротивления уводу шин задних колес [Н/рад];

J_z – момент инерции автомобиля, относительно вертикальной оси, проходящей через его центр тяжести [кг·м²];

M – масса автомобиля [кг];

V – поступательная скорость автомобиля [м/с].

Производные устойчивости:

$Y_\beta = C_1 + C_2$ – коэффициент боковой силы, вызванной наличием увода колес автомобиля [Н/рад];

$Y_{\omega} = \frac{1}{V}(aC_1 - bC_2)$ - коэффициент боковой силы, вызванной поворотом автомобиля,

относительно вертикальной оси, проходящей через его центр тяжести [Н·с];

$Y_{\theta} = -C_1$ - коэффициент боковой силы, вызванной поворотом управляемых колес [Н/рад];

$N_{\beta} = aC_1 - bC_2$ - коэффициент поворачивающего момента, вызванного наличием увода колес автомобиля [(Н·м)/рад];

$N_{\omega} = \frac{1}{V}(a^2C_1 + b^2C_2)$ - коэффициент поворачивающего момента, вызванного поворотом автомобиля, относительно вертикальной оси, проходящей через его центр тяжести [Н·м·с];

$N_{\theta} = -aC_1$ - коэффициент поворачивающего момента, вызванного поворотом управляемых колес [(Н·м)/рад].

На подготовительном этапе, вначале, определимся с моделью автомобиля и сформируем начальные условия для дальнейшего исследования. Нами, в дальнейшем, будут использованы технические характеристики ГАЗ 3302 [4], как широко применяемого в нашей стране коммерческого автомобиля, с передними управляемыми и задними ведущими колесами. Основные характеристики сведем в табл. 1.

Таблица 1

Общие технические характеристики модели ГАЗ 3302

Колесная база	2,9 метра
Шины	Пневматические, радиальные, размером 175R16C
Полная масса/Снаряженная масса	3500 кг/1850 кг
Распределение снаряженной массы (передняя ось $[M_1]$ /задняя ось $[M_2]$)	1050 кг/800 кг
Распределение полной массы (передняя ось $[M_1]$ /задняя ось $[M_2]$)	1200 кг/ 2300 кг

На рис. 1 схематически изображен ГАЗ 3302 с отмеченными основными геометрическими конструктивными размерами машины.

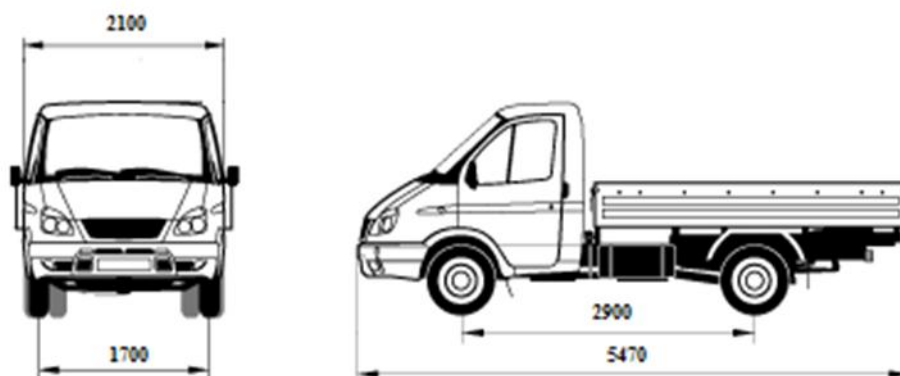


Рис. 1. Схематический внешний вид ГАЗ 3302

Далее подсчитаем величину коэффициента сопротивления уводу одной шины, используя уже известную формулу, применяемую в [2], за тем лишь исключением, что полученное значение нужно взять с противоположным знаком, из-за особенности выбора координатных осей, о чем отмечено в публикации [3]:

$$C = -780B_k(d + 2B_k)(p_{ш} + 98). \quad (1)$$

Для нашего случая $B_k=0,178$ м, $d=0,4$ м и $p_{ш}=280$ кПа [4]. После подстановки величин в выражение (1), получим:

$$C \approx -40 \left[\frac{\kappa H}{\text{рад}} \right].$$

Имея величину коэффициента сопротивления уводу одной шины, принимая во внимание, что все колеса снабжены одинаковыми шинами с идентичными параметрами, получим для осей:

$$C_1 = 2C = -80 \left[\frac{\kappa H}{\text{рад}} \right]; C_2 = 4C = -160 \left[\frac{\kappa H}{\text{рад}} \right].$$

Диапазон изменения массы автомобиля, с учетом технической документации, для нашей работы составляет от 1 850 (снаряженная масса) до 3 500 кг (полная масса). При этом необходимые подсчеты будут произведены на краях диапазона и для массы автомашины 2 500 кг и 3 000 кг. Неизменная поступательная скорость автомобиля должна варьироваться в интервале от 0 до 32 м/с, а угол поворота управляемых колес составит $0...15^\circ$. Соответствующие значения положения центра тяжести и момента инерции автомобиля при его определенной массе сведены в табл. 2. Расчет величин a и b здесь не приводится, но для их получения был применен способ, описанный в работе [2]. Также следует отметить, что значения J_z были рассчитаны на основании данных о массе отдельных элементов ГАЗ 3302 с учетом массы груза и их удаления от положения центра тяжести машины.

Таблица 2

Отдельные значения параметров ГАЗ 3302

Масса автомобиля (М), кг	Положение центра тяжести автомобиля		Момент инерции автомобиля (J_z), кг·м ²
	a , м	b , м	
1850	1,256	1,644	4012
2500	1,659	1,241	5140
3000	1,85	1,05	5895
3500	1,91	0,99	6533

Кратко напомним, что в качестве возмущения от управления, как и в предыдущей работе, мы применяем скачкообразную функцию, заданную следующим образом:

$$\theta(t) = \begin{cases} 0, & t < 0, \\ \theta_{yc}, & t > 0, \end{cases} \quad (2)$$

т.е. значение угла поворота управляемых колес в момент времени $t = 0$ мгновенно изменяется с нулевого значения до нового, установившегося θ_{yc} .

Графическое изображение функции возмущения (2) представлено на рис. 2.



Рис. 2. Скачкообразная (ступенчатая) возмущающая функция

Прежде чем переходить к непосредственному изучению переходной реакции автомобиля, исследуем его характеристическое уравнение.

Составим характеристическое уравнение автомобиля ГАЗ 3302 и найдем его корни. Используя материалы работы [3], имеем:

$$s^2 + B_1 s + B_2 = 0, \quad (3)$$

$$\text{где } B_1 = -\left(\frac{N_\omega}{J_z} + \frac{Y_\beta}{MV}\right); \quad B_2 = \frac{N_\beta}{J_z} - \frac{N_\beta Y_\omega}{MVJ_z} + \frac{Y_\beta N_\omega}{MVJ_z}.$$

В зависимости от соотношения величин B_1 и B_2 корни уравнения (3) s_1 и s_2 могут иметь как действительные значения, так и мнимые. При этом переходная реакция по угловой скорости поворота автомобиля будет изменяться либо по экспоненциальному закону, либо иметь колебательный характер. Граничной точкой перехода от одного вида к другому, очевидно, будет равенство $B_1^2 - 4B_2 = 0$. Далее раскроем это равенство с учетом определения производных устойчивости и разрешим его относительно поступательной скорости автомобиля V_0 , при условии, что положение его центра тяжести, а также масса и момент инерции остаются постоянными. Получим:

$$V_0 = \sqrt{\frac{R_1^2 - 4R_3}{4R_2}}, \quad (4)$$

$$\text{где } R_1 = -\frac{(a^2 C_1 + b^2 C_2)M + (C_1 + C_2)J_z}{MJ_z}; \quad R_2 = \frac{aC_1 - bC_2}{J_z}; \quad R_3 = \frac{(a+b)^2 C_1 C_2}{MJ_z}.$$

На основе формулы (4), можно сделать вывод о том, что если выполняется условие $V > V_0$, то переходная реакция будет протекать по гармоническому закону, если наоборот, то по экспоненциальному. Также, обращая внимание на выражения, описывающие B_1 и B_2 , необходимо отметить, что данные коэффициенты не зависят от величины угла поворота управляемых колес и, следовательно, сам по себе этот угол не оказывает влияние на закон протекания переходной реакции автомобиля.

Рассмотрим случай, когда выполняется условие, что $0 < V < V_0$, т.е. переходная реакция имеет аperiодический монотонный характер и протекает по экспоненциальному закону, тогда выполняется равенство:

$$\omega(t) = E_1 + E_2 e^{s_1 t} + E_3 e^{s_2 t}, \quad (5)$$

$$\text{где } A_1 = \frac{N_\theta \theta_{yc}}{J_z}; \quad A_2 = \frac{\theta_{yc}(Y_\theta N_\beta - N_\theta Y_\beta)}{MVJ_z};$$

$$s_{1,2} = \frac{-B_1 \pm \sqrt{B_1^2 - 4B_2}}{2};$$

$$E_1 = \frac{A_2}{s_1 s_2}; \quad E_2 = \frac{-(E_1 s_2 + A_1)}{s_2 - s_1}; \quad E_3 = -(E_1 + E_2).$$

Для данного случая качество переходного процесса будем оценивать только временем регулирования [1]. При этом время регулирования ($t_{\text{рег}}$), или время переходного процесса, определяется промежутком времени от момента приложения воздействия до момента, когда

величина $|\omega(t) - \omega_{yc}|$ становится во все последующие моменты времени меньше некоторого значения Δ . Анализ выражения (5) показывает, что если корни характеристического уравнения автомобиля действительные и отрицательные, то с увеличением времени значение угловой скорости поворота машины будет стремиться к величине E_1 , равной по смыслу величине установившейся угловой скорости (ω_{yc}) после завершения переходного процесса.

На рис. 3 в качестве примера изображены графики изменения угловой скорости поворота ГАЗ 3302 (снаряженная масса) при мгновенном изменении угла поворота управляемых колес с 0 до 0.17 радиан на различных скоростях, меньших V_0 .

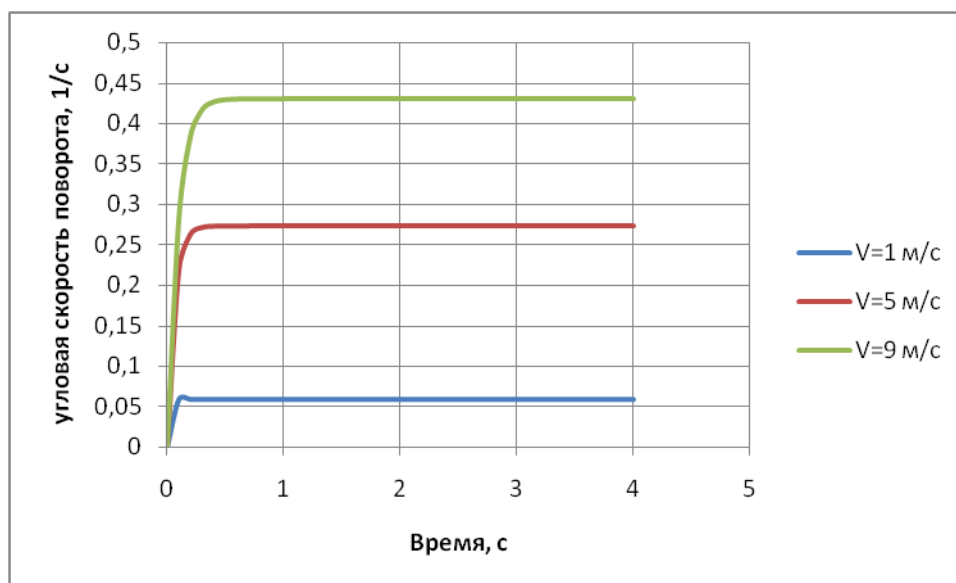


Рис. 3. Аперiodический характер протекания переходного процесса

Теперь разберем ситуацию, когда выполняется условие $V_0 < V \leq 32$ м/с. В данном случае переходная реакция автомобиля имеет колебательный характер и определяется:

$$\omega(t) = T_1 + Ze^{-\frac{B_1}{2}t} \sin(\omega_k t) + T_2 e^{-\frac{B_1}{2}t} \cos(\omega_k t), \quad (6)$$

где $\omega_k^2 = B_2 - \left(\frac{B_1}{2}\right)^2$; $T_1 = \frac{A_2}{B_2}$; $T_2 = -T_1$; $T_3 = A_1 - B_1 T_1$; $Z = -\frac{T_2}{\omega_k} \left(\frac{B_1}{2} - \frac{T_3}{T_2}\right)$.

На рис. 4 в качестве примера изображены графики изменения угловой скорости поворота ГАЗ 3302 (снаряженная масса) при мгновенном изменении угла поворота управляемых колес с 0 до 0.17 радиан на различных скоростях, больших V_0 .

Для исследования переходной реакции автомобиля удобно представить выражение (6) в следующем виде:

$$\omega(t) = T_1 + T_4 e^{-\frac{B_1}{2}t} \sin(\omega_k t + \varphi_k). \quad (7)$$

При этом необходимо исследовать два варианта, а именно:

$Z < 0$, тогда будем иметь: $T_4 = -\sqrt{T_2^2 + Z^2}$; $\varphi_k = -\arcsin\left(\frac{T_2}{\sqrt{T_2^2 + Z^2}}\right)$;

$$Z > 0, \text{ тогда получим: } T_4 = \sqrt{T_2^2 + Z^2}; \quad \varphi_k = \arcsin\left(\frac{T_2}{\sqrt{T_2^2 + Z^2}}\right).$$

Так же, как и для V_0 , формула (8) определяет значение поступательной скорости V_1 , при которой величина Z обращается в нуль, учитывая, что положение центра тяжести автомобиля, его масса и момент инерции остаются постоянными. Имеем:

$$V_1 = \sqrt{\frac{R_1 - 2R_5}{2R_4}}, \quad (8)$$

$$\text{где } R_4 = \frac{-aC_1(aC_1 - bC_2)M}{J_z(a+b)C_1C_2}; \quad R_5 = \frac{-aC_1(a+b)}{J_z}.$$

Зная величину V_1 , необходимо для соответствующего интервала скоростей применять нужные выражения для T_4 и φ_k .

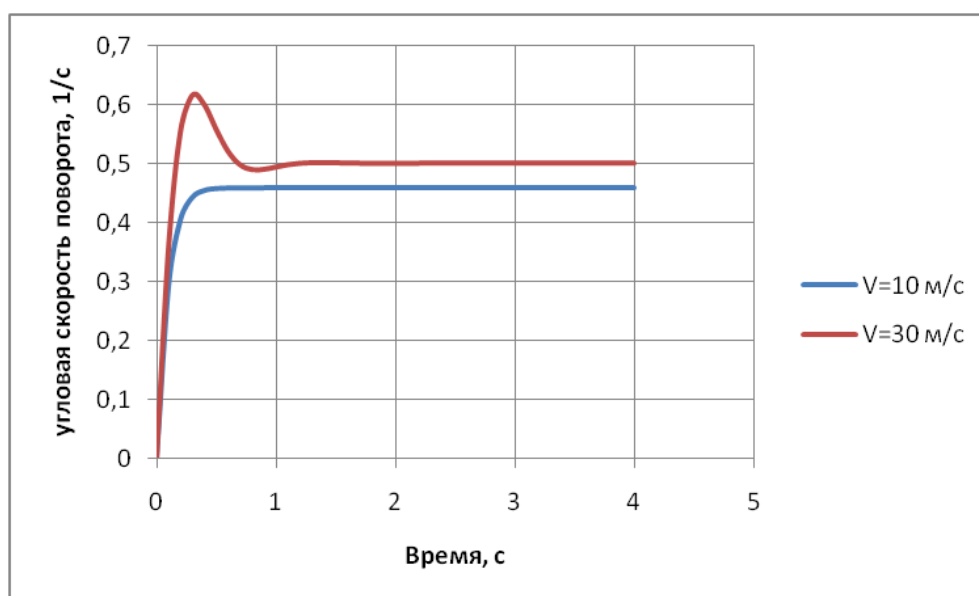


Рис. 4. Гармонический характер протекания переходного процесса

Теперь перейдем к проведению прямых оценок качества переходной реакции угловой скорости поворота автомобиля. При протекании переходного процесса по гармоническому закону большой практический интерес представляют следующие прямые оценки качества [1], такие как: время переходного процесса или время регулирования ($t_{\text{пер}}$); перерегулирование σ , численно равное в процентном отношении $\sigma = \frac{\omega_{\text{max}} - \omega_{\text{yc}}}{\omega_{\text{yc}}} \cdot 100\%$; число колебаний за время переходного процесса n .

Для определения времени переходного процесса необходимо учесть, что при $t > t_{\text{пер}}$ выполнялось условие $|\omega(t) - \omega_{\text{yc}}| < \Delta$. В нашей работе за величину Δ принимается значение, составляющее 10% от установившейся угловой скорости поворота автомобиля, равное $\Delta = \frac{1}{10} \omega_{\text{yc}} = \frac{1}{10} T_1$, либо равное $\frac{1}{10} E_1$, в зависимости от характера процесса. С учетом данных уточнений, нами были произведены подсчеты величины времени переходного процесса

при различных значениях V и фиксированных M и θ_{yc} . На рис. 5 и рис. 6 изображены графики изменения времени переходного процесса в зависимости от постоянной поступательной скорости автомобиля для случаев, когда $M=1850$ г, $M=2500$ кг, $M=3000$ кг и $M=3500$ кг при $\theta_{yc}=0.17$ рад.

На рис. 5 видно, что на начальном участке графиков время переходного периода практически линейно зависит от скорости V и увеличивается с ростом скорости. Затем в интервале скоростей примерно от 10 до 23.8 м/с время регулирования практически не изменяется, после чего скачком возрастает более чем в два раза. На рис. 6 также на начальном этапе отмечается практически линейная зависимость времени регулирования от скорости V , затем без скачка, но более не линейно возрастает при увеличении скорости.

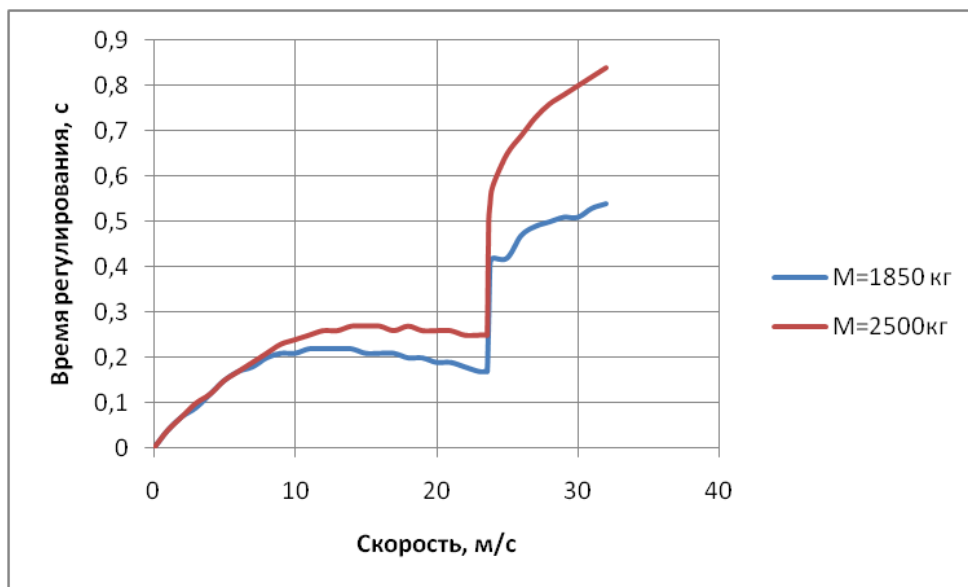


Рис. 5. Зависимость времени регулирования от скорости

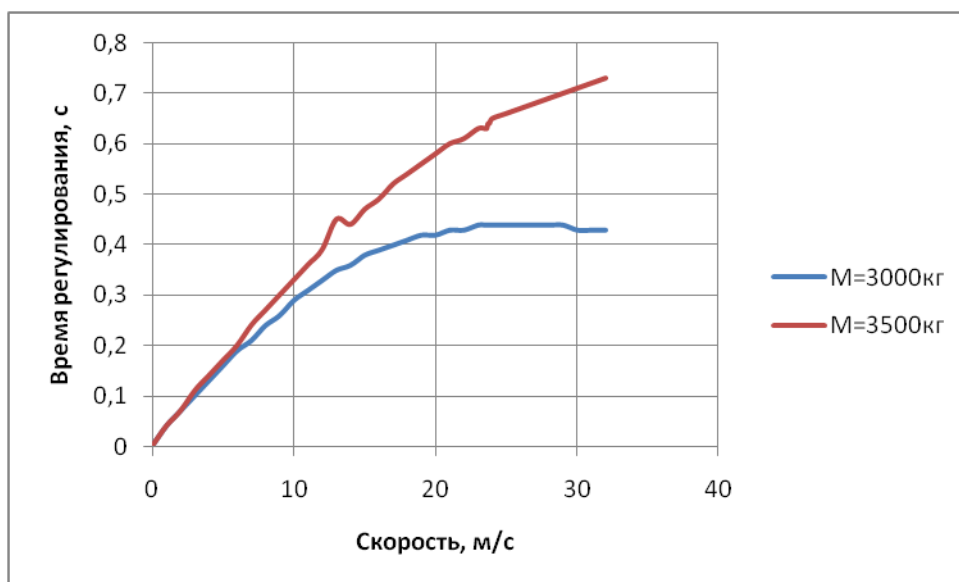


Рис. 6. Зависимость времени регулирования от скорости

Сравнивая рис. 5 и рис. 6, можно констатировать, что максимальные величины времени переходного процесса автомобиля при ступенчатом управляющем воздействии отмечаются на скорости 32 м/с. Их значения составляют 0,54 с ($M=1850$ кг), 0,84 с ($M=2500$ кг), 0,43 с ($M=3000$ кг) и 0,73 с ($M=3500$ кг). На основании этих данных можно предположить,

что максимальная величина времени регулирования будет наступать при массе ГАЗ 3302 (равномерное нагружение), находящейся в интервале от 2500 до 3000 кг и иметь значение больше 0.84 с.

При подсчетах значений времени переходного процесса изменение угла поворота управляемых колес не влияет на их величину, т.е. время регулирования не зависит от выше-названного угла.

Далее определим величину перерегулирования в процентном отношении, используя формулу:

$$\sigma = \frac{\omega_{\max} - \omega_{yc}}{\omega_{yc}} \cdot 100\%, \quad (9)$$

где $\omega_{yc} = T_1$; $\omega_{\max} = \omega(t_1)$, величина t_1 подставляется в выражение (7);

$$t_1 = \frac{\arctg\left(\frac{2\omega_k}{B_1}\right) + \pi - \varphi_k}{\omega_k}, \text{ при } Z < 0;$$

$$t_1 = \frac{\arctg\left(\frac{2\omega_k}{B_1}\right) - \varphi_k}{\omega_k}, \text{ при } Z > 0.$$

Строим графики зависимости величины перерегулирования для тех же условий, что и при исследовании времени переходного процесса.

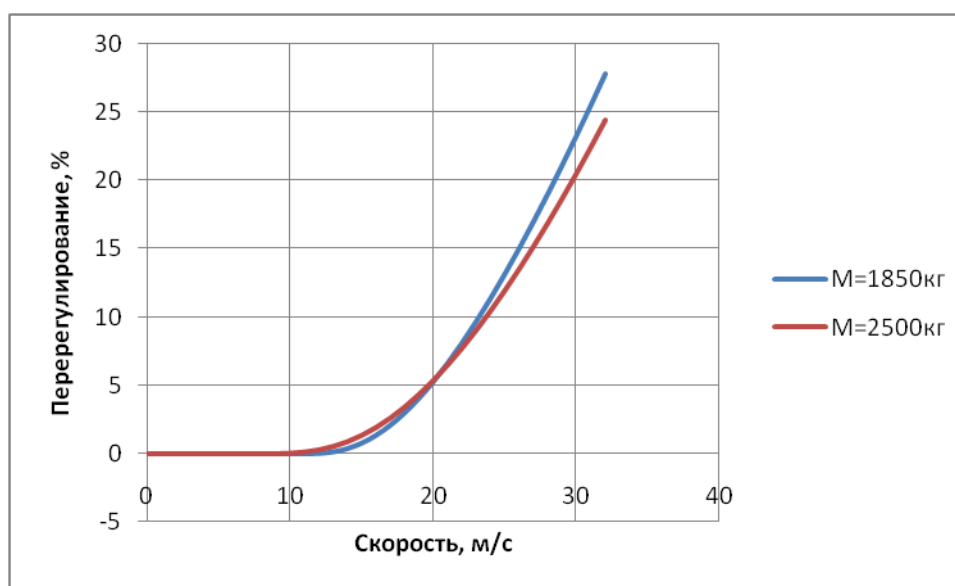


Рис. 7. Зависимость перерегулирования от скорости

Анализируя график, изображенный на рис. 7, можно сделать вывод, что при скоростях, на которых переходная реакция движения автомобиля протекает по колебательному закону, значения перерегулирования возрастают с увеличением скорости и достигают существенных значений, равных 28% и 25% при массах 1 850 кг и 2 500 кг соответственно. С другой стороны, при изменении массы от 1 850 до 2500 кг величина перерегулирования (заброса) на максимальной поступательной скорости, предусмотренной для ГАЗ 3302, существенно не изменяется.

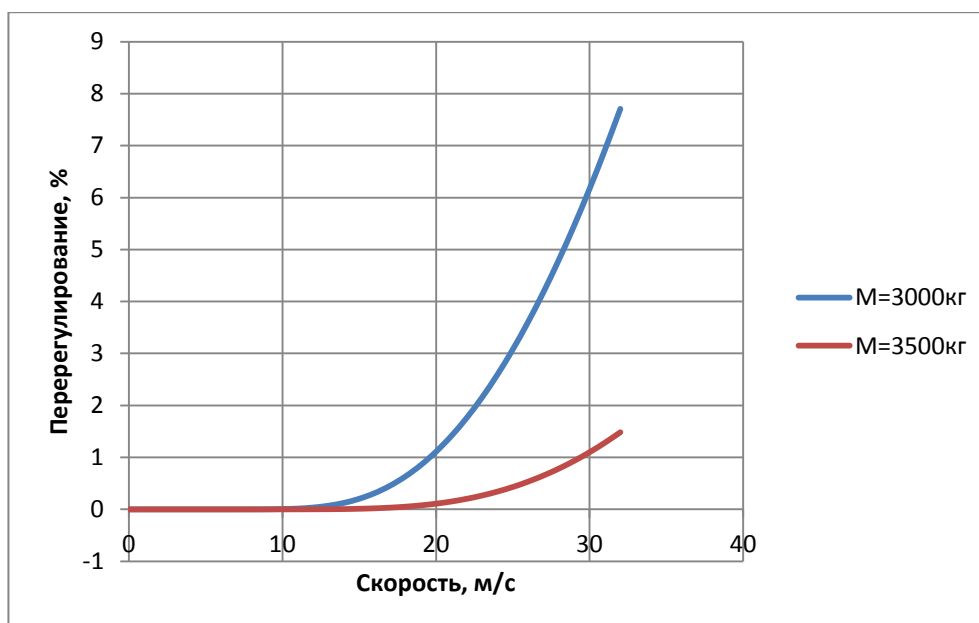


Рис. 8. Зависимость перерегулирования от скорости

Ход графиков, изображенных на рис. 8, аналогичный с предыдущими, показанными на рис. 7, за исключением небольших величин перерегулирования. При полной массе данное значение на скорости, равной 32 м/с, составляет небольшую величину, равную 1.5%.

Что же касается числа колебаний за время переходного процесса, то в нашем случае при изменении параметров внутри указанных диапазонов масс автомобиля, его поступательной скорости и угла поворота управляемых колес, эта величина не превышает значения 0.5.

В конце работы необходимо отметить, *во-первых*, что величина угла поворота управляемых колес не влияет на закон изменения угловой скорости поворота автомобиля при переходном процессе, возникающем из-за приложенного скачкообразного управляющего воздействия, а также, принимая во внимание формулы для определения коэффициентов, входящих в выражения (5) и (6), не влияет на время регулирования и величину заброса; *во-вторых*, что по совокупности показателей качества переходного процесса, можно отметить диапазон масс автомобиля ГАЗ 3302, в котором наблюдается значительное время регулирования (переходного процесса) при достаточно больших значениях перерегулирования (забросов). Данный диапазон составляет значения от 2500 до 3000 кг, при условии равномерного распределения груза в кузове машины. Причем, по нашему мнению, должна существовать оптимальная величина массы из этого диапазона, при которой существует максимальное значение времени регулирования и имеется значительный заброс угловой скорости поворота автомобиля при наложении ступенчатого управляющего воздействия. Другими словами, та масса, при которой наблюдается наиболее худшая управляемость ГАЗ 3302, как чисто механической системы, так как с позиций управляемости необходимо стремиться к минимальному времени регулирования и минимальным значениям забросов.

Библиографический список

1. **Воронов, А.А.** Основы теории автоматического регулирования и управления: учеб. пособие для вузов / А.А. Воронов, В.К. Титов, Б.Н. Новогранов. – М.: Высш. шк., 1977. – 519 с.
2. **Молев, Ю.И.** Теоретическая оценка влияния установки газобаллонного оборудования на управляемость автобуса ПАЗ 32054 [Электронный ресурс] / Ю.И. Молев, М.Г. Черевастов // Режим доступа: http://transport-systems.ru/1_2017.html (Дата обращения: 19.03.2018).
3. **Молев, Ю.И.** Теоретический расчет переходной реакции движения автомобиля при заданной функции возмущения / Ю.И. Молев, М.Г. Черевастов // Организация и безопасность дорожно-

- го движения: материалы XI международной научно-практической конференции (15 марта 2018 г.): в 2 т. / отв. ред. Д. А. Захаров. – Тюмень: ТИУ, 2018. – Т. 2. – С. 89–95.
4. Руководство по эксплуатации 3302 – 3902010 – 20 РЭ. – 2-е изд. – М., 1996.

*Дата поступления
в редакцию 01.06.2018*

U.Sh. Vakhidov¹, Y.I. Molev¹, M.G.Cherevastov², A.V.Sogin¹, A.S., Slyusarev³

DIRECT ASSESSMENTS OF THE QUALITY OF THE MOTOR VEHICLE REACTION ON STEP-MANAGED IMPACT

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev¹,
Nizhny Novgorod state pedagogical university of a name of Kozma Minin²,
Volga state university of water transport (N. Novgorod)³

Purpose: The formation of new approaches to the assessment of vehicle safety, at the stage of operation, after changes in their design.

Design/methodology/approach: The transient response of the car model GAZ 3302 with a step control action on the steering is studied. The car is represented by a one-mass flat design model. The equations of motion of the machine are written in the form of derivatives of stability. Conditions are investigated for the occurrence of various laws of flow transient response. Calculation is made of direct estimates of the quality of the transition process on the angular velocity of the car at a stepwise (step) control action. In conclusion, the conclusions are obtained about the influence of different design parameters of the car on the quality of the transient response.

Findings: The obtained calculations allow us to estimate the degree of influence of the vehicle's design change on parameters road safety, in terms of changes in its steering.

Research limitations/implications: This study is a starting point for further research in the field of improving the safety of vehicles, the design of which has been modified during the operation phase.

Originality/value: The value of this study is that the calculations of the quality of control of the car GAZ 3302, with various changes in its design (the simulated change in the weight of the car on the axes) are published for the first time.

Key words: vehicle controllability, transient process quality indicators.

УДК 629.33-52

В.В. Гаевский, А.М. Иванов

ПРОБЛЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ ПОМОЩИ ВОДИТЕЛЮ НА ОДНОКОЛЕЙНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВАХ

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)

Рассмотрены проблемы и особенности применения современных систем помощи водителю на одноколейных транспортных средствах (ОТС). Приведена классификация интеллектуальных систем помощи водителю и конструктивные особенности ОТС, требующие доработки этих систем для успешного использования на таком транспорте. Представлены перспективы развития систем помощи водителю для ОТС и перспективные типы ОТС повышенной безопасности.

Ключевые слова: одноколейные транспортные средства (ОТС), кузовной одноколейный транспорт (КОТ), мотоцикл, ДТП, водитель, тормозная система, интеллектуальные системы помощи водителю.

Введение

На очередной конференции Европейской ассоциации производителей мотоциклов (АСЕМ - European Association of Motorcycle Manufacturers), прошедшей в январе 2018 года, были рассмотрены вопросы комплексного повышения безопасности мототранспорта в Европе. В частности, освещены проблемы: повышения экологической безопасности, активной и пассивной безопасности мототранспорта, развития **интеллектуальных систем помощи водителю (ИСПВ)**, адаптированных для установки на **одноколейных транспортных средствах (ОТС)**, взаимодействия ОТС с другими участниками движения по дорогам общего пользования, развития и усовершенствования систем обучения водителей мототранспорта и другие вопросы, связанные с безопасностью ОТС.

В резолюции конференции АСЕМ в качестве одного из выводов сделано заявление о необходимости интенсивного развития ИСПВ для ОТС, так как они существенно снижают риски возникновения дорожно-транспортных происшествий с участием мототранспорта, а в случае попадания ОТС в ДТП - позволяют снизить тяжесть последствий.

Динамика ДТП и числа ОТС на дорогах ЕС и России

Согласно последним данным IRTAD (International Road Traffic and Accident Database - международной базы данных о дорожном движении и авариях), несчастные случаи с участием пользователей двухколесных транспортных средств уменьшились на 44 % с 2000 до 2014 год. В период с 2010 по 2014 год количество погибших среди мотоциклистов снизилось с 4304 до 3561 человек, т.е. на **17,3%**. В тот же период количество погибших среди водителей мопедов снизилось с 975 до 622 человек, т.е. на **36,2%**. При этом количество ОТС в ЕС с 2000 по 2014 год увеличилось на 5,9% и на конец 2014 года составляло 36,1 млн.

Исследования показывают, что снижение числа ДТП и тяжесть последствий с участием ОТС обусловлены увеличением числа ОТС, оборудованных системами помощи водителю (антиблокировочные системы и др.), начало массовой установки которых как раз приходится на 2008–2010 годы.

Согласно данным ГИБДД, в России за период с 2012 по 2015 год количество погибших среди всех категорий L снизилось с 2033 до 1534 человек, т.е. на **24,6%**. Но при этом количество ОТС в России каждый год уменьшается примерно на 0,5–1 % и на конец 2015 года составляло 2,25 млн официально зарегистрированных мототранспортных средств категорий $L_3 - L_5, L_7$.

Если посмотреть на цифры снижения числа погибших в ЕС и в России, то может сложиться впечатление, что у нас ситуация даже лучше, чем в Европе, но это не так. Для корректного сравнения уровня безопасности ОТС в России и ЕС нужно учитывать не абсолютные цифры, а относительные. Посчитаем количество погибших на 10.000 ОТС. В ЕС - 1,2 человека на 10.000 ОТС, в России - 6,8 человек, т.е. езда на мототранспорте у нас в 5,6 раз более опасна, чем в Евросоюзе.

Еще хуже складывается ситуация в России, если сравнивать число погибших мотоциклистов с погибшими автомобилистами.

Удельное количество смертельных случаев на один зарегистрированный мотоцикл более чем **в два раза превышает** удельное количество смертей при ДТП с участием автомобилей (3,2 на 10 тыс. автомобилей категории М₁).

Если сравнивать количество смертей мотоциклистов на один пройденный километр с количеством смертельных случаев водителей и пассажиров автомобилей, получится, что **мотоциклисты погибают в 10 раз чаще!!!**

ОТС – самые опасные транспортные средства в мире и в России, в частности!

Конструктивные особенности одноколейных транспортных средств

Расширенные системы помощи водителю (ADAS): адаптивный круиз-контроль (ACC), автономные аварийные тормозные системы (AEBS) и другие, которые в первую очередь были спроектированы для использования в автомобилях, не могут быть установлены на мотоцикл без необходимой дополнительной адаптации к его конструктивным особенностям. Интеллектуальные системы помощи водителю требуют специального подхода и конкретных технических решений для оптимизации их потенциала работы на ОТС для повышения безопасности дорожного движения [1, 2].

Важно также отметить, что эти системы потребуют разработки соответствующих человеко-машинных интерфейсов (HMI). HMI должен минимизировать отвлечение водителя и должен быть специально разработан для ОТС. Например, сообщения должны быть приоритетными, чтобы предупреждения о безопасности заменяли более общие уведомления.

К основным конструктивным особенностям ОТС можно отнести:

- недостаточную устойчивость при движении на низких скоростях и неустойчивое равновесие на месте (рис. 1.);

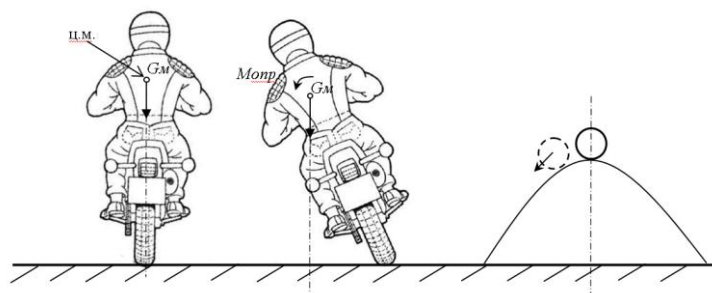


Рис. 1. Неустойчивое равновесие ОТС на месте и на низких скоростях

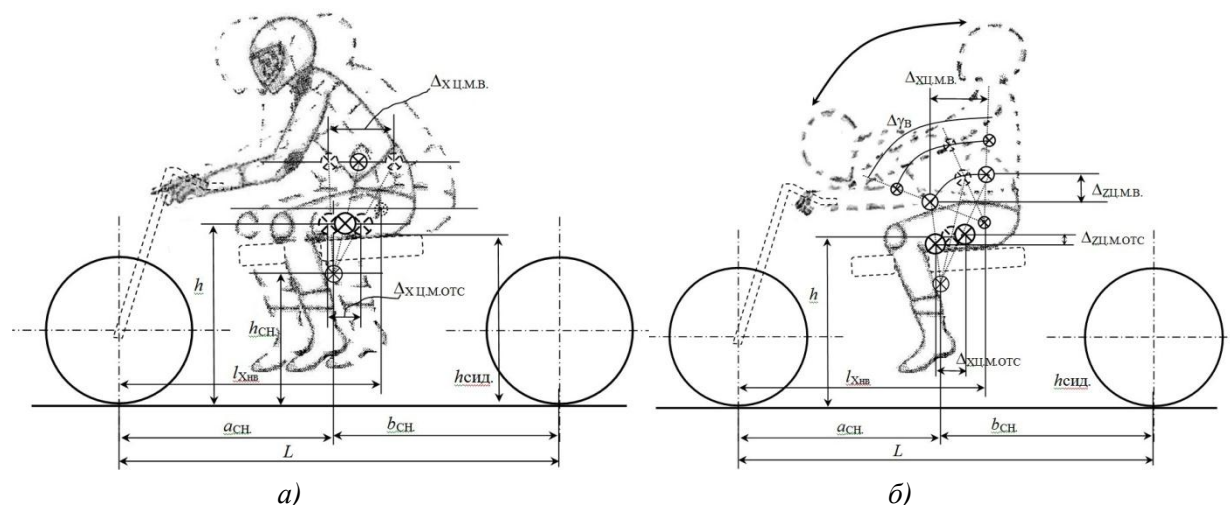


Рис. 2. Варианты перемещения водителя на ОТС и смещение общего центра тяжести:
а - продольное; б - наклон

- мотоциклетную посадку: смещение водителя и наклон влияют на управляемость, устойчивость и утомляемость водителя при движении (рис. 2);
- вследствие открытости водителя и пассажира ОТС, подверженность негативным внешним воздействиям: снегу, дождю, ветру, пыли и т.д.;
- открытость ОТС, которая требует по законам всех стран обязательного использования защитных устройств: шлем - как минимум; "панцири"; комбинезоны; краги и т.д.;
- особенность движения ОТС в повороте - с большим креном, со смещением пятна контакта (рис. 3) [3];

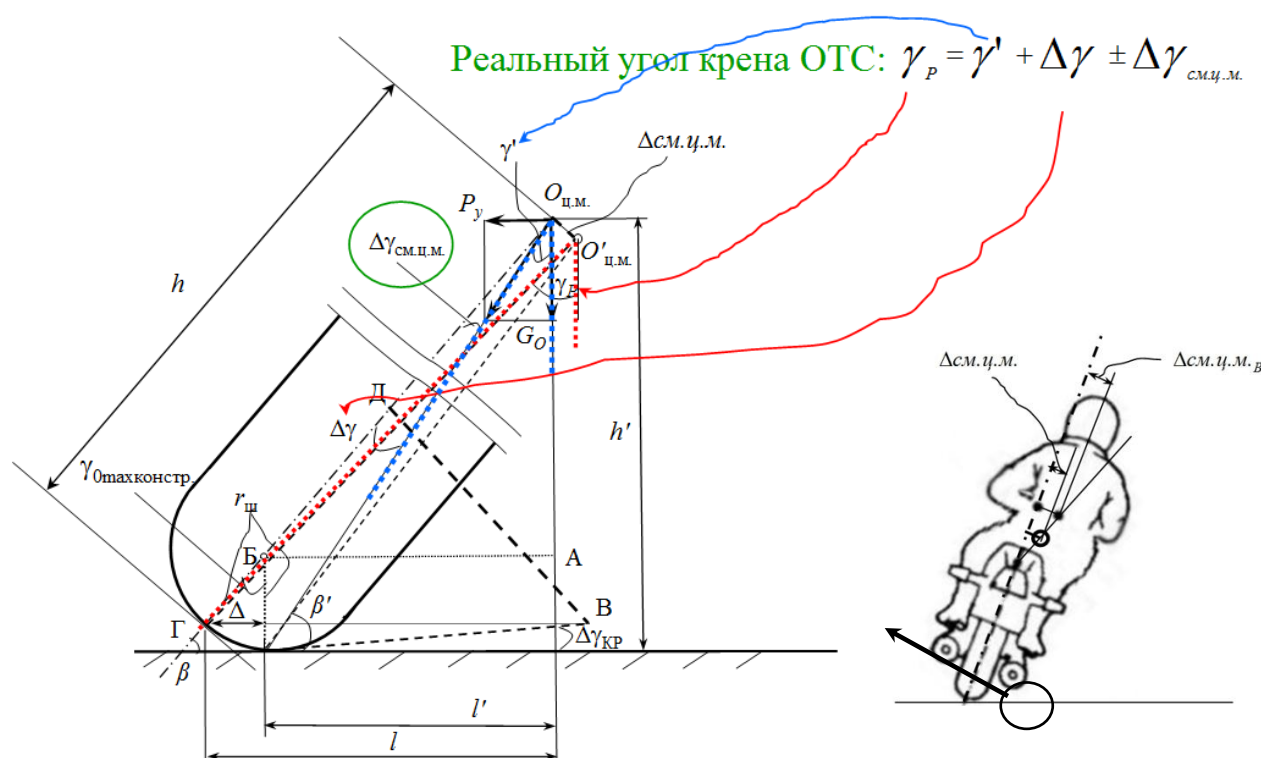


Рис. 3. Движение в повороте на широких шинах с учётом смещения водителя

- специфические органы управления и системы управления ОТС;
- бескузовные транспортные средства, которые имеют наихудшую пассивную безопасность при ДТП.
- Для дальнейшего рассмотрения перспектив и проблем установки ИСПВ на ОТС приведём их упрощённую классификацию.

По степени влияния на процесс движения транспортного средства (ТС):

- информационные, например: распознавание разметки, навигатор, информация о "мертвых зонах", адаптивное освещение и т.д. [4, 5, 6].

Данные системы только информируют водителя, не вмешиваясь в процесс движения транспортного средства;

- информационно-исполнительные, например: AEBS;

Вначале такие системы предупреждают водителя о возникновении опасной ситуации и о необходимости принятия мер, если водитель (по какой-либо причине) не реагирует на предупреждения, система сама вмешивается в процесс движения (в данном случае затормаживает) ТС;

- автоматически срабатывающие, например: ABS, ESP, датчик дождя и др.

Эти системы работают всегда в автоматическом режиме без участия водителя, но начинают активно влиять на процесс движения ТС только после возникновения опасной (ABS) или сложной (датчик дождя) ситуации.

- автономно - роботизированные, включаемые водителем (частичная или полная замена водителя), например: адаптивный круиз контроль, система поддержания полосы движения, робот.

Задача этих систем частично (адаптивный круиз контроль) или полностью (робот водитель) брать на себя функции водителя при движении транспортного средства.

По назначению (области применения):

- при торможении: ABS, DSC, ASC, HDC, EBD, CBC, EBA, BAS, PBA, EPB, AEBS; Системы этой группы помогают ТС безопасно тормозить в различных ситуациях;
- в повороте: ESP, DAS, AFS;

Данная группа ИСПВ воздействует на рулевое управление ТС для поддержания безопасной траектории движения;

- при разгоне: ETS, ASR, EDS;

Они обеспечивают надежный и безопасный разгон транспортного средства;

- универсальные: LKSS, SA, ACC, PDS, IPAS и др.;

Эти ИСПВ воздействуют на несколько органов управления и могут влиять на все режимы движения ТС: разгон, торможение, изменение траектории движения и т.д.;

- при парковке: PTS, AVM, TPMS;

Узкоспециализированные системы помощи водителю при парковке ТС в ограниченном пространстве, полностью или частично замещая функции водителя;

- повышение комфорта: датчик дождя, климат контроль и др.;

Данные системы, повышая комфортабельность управления ТС, повышают безопасность движения, так как исследования показали, что при накоплении усталости водителя вероятность попасть в ДТП резко возрастает;

- после ДТП: eCall (система аварийного оповещения), ремни безопасности, активные подголовники, подушки безопасности.

Очень важные системы помощи. Они способствуют повышению шансов на выживание человека после ДТП.

Из-за конструктивных особенностей ОТС практически ни одна перечисленная система не может быть применена на них без предварительной адаптации, а некоторые системы вообще не используются на ОТС до сих пор.

**Интеллектуальные системы помощи водителю для автомобилей,
не используемые на ОТС**

Часть систем не может быть установлена в ОТС потому, что просто некуда устанавливать, часть систем не используются потому, что в них нет надобности, а часть систем пока просто не могут использовать в ОТС из-за проблем с воздействием на органы управления. Например, что произойдет с мотоциклом если система предотвращения наезда на пешехода вдруг резко рванет руль для объезда пешехода при невозможности затормозить? Он с большой долей вероятности упадет на бок, а при резком торможении - опрокинется.

Перечень систем, до сих пор неиспользуемых серийно на ОТС, приведен далее:

- система оповещения "мертвых зон";
- системы помощи при парковке (PTS, AVM, TPMS);
- автономно – роботизированные (частичная или полная замена водителя) - адаптивный круиз контроль (ACC), система удержания полосы движения (LKSS), робот водитель и др.;
- системы помощи после ДТП: eCall (система аварийного оповещения), ремни безопасности, активные подголовники, подушки безопасности;
- активные системы рулевого управления: (DAS, AFS);
- внутрикузовные системы комфорта (датчик дождя, климат контроль и др.).

Интеллектуальные системы помощи водителю, серийно устанавливаемые на ОТС

Самой массовой ИСПВ на сегодняшний день, устанавливаемой на ОТС, является ABS (Anti-lock braking system) Антиблокировочная система. Дело в том, что для одноколейного транспорта блокирование колес при торможении является самым опасным вариантом движения. Так как на большой скорости устойчивость ОТС обеспечивается гироскопическими стабилизирующими моментами его колес, то при их блокировании, т.е. при мгновенном прекращении действия стабилизирующих моментов, устойчивость ОТС становится аналогичной неподвижному состоянию (см. рис. 1), как следствие ОТС мгновенно падает. Однако из-за особенностей конструкции ОТС просто так перенести ABS с автомобиля не удалось, пришлось её существенно дорабатывать (рис. 4). У мотоцикла отдельный тормозной привод на переднее и заднее колесо и два органа управления торможением, поэтому у него не один главный тормозной цилиндр, а два.

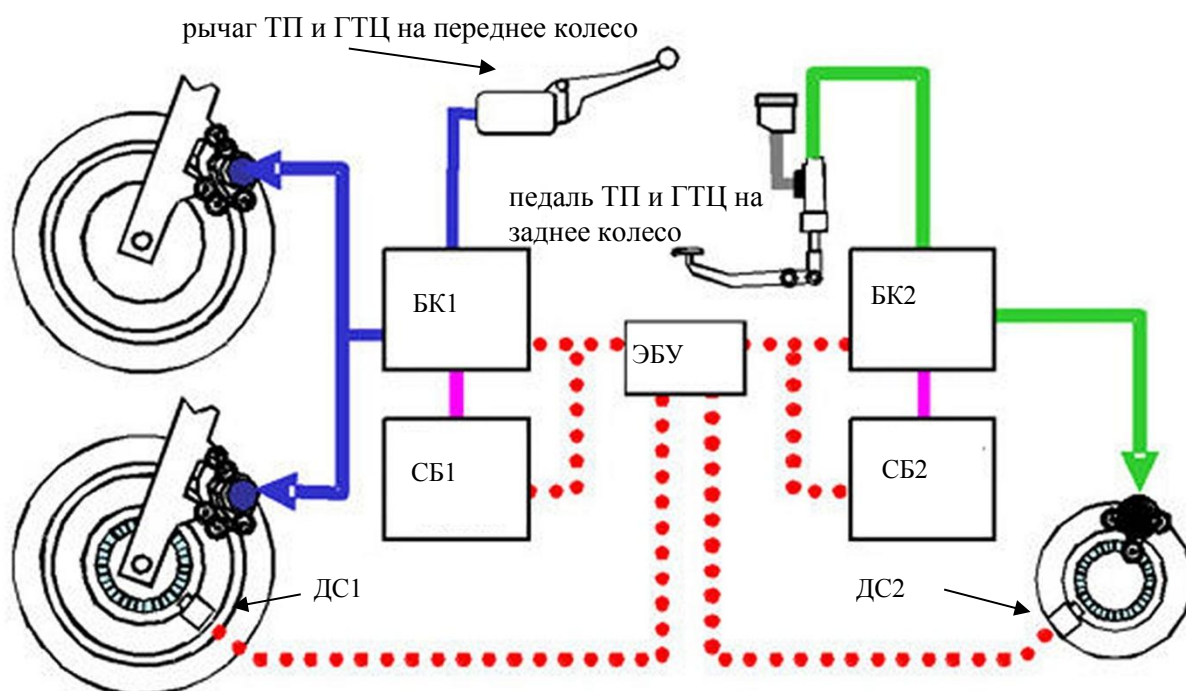


Рис. 4 Принципиальная схема ABS для ОТС:

ТП - тормозной привод; ГТЦ - главный тормозной цилиндр; ЭБУ - электронный блок управления ABS; БК - блок клапанов; СБ - силовой блок; ДС - датчик скорости; 1 - контур переднего колеса; 2 - контур заднего колеса

Раздельный тормозной привод на переднее и заднее колесо и два органа управления сами по себе ухудшают процесс торможения ОТС. Исследования показали, что при использовании одного органа управления торможением, точность и эффективность торможения повышаются. Сейчас многие производители стали устанавливать на свои мотоциклы специальные системы, помогающие водителю при торможении. К ним относятся: CBS (Combined braking systems) – комбинированная тормозная система и UBS (Unified brake system) – унифицированная тормозная система. В задачу данных систем входит функция замещения второго органа управления торможением частично (CBS) или полностью (UBS). При воздействии водителя на один орган управления торможением (например, на рычаг), система сама начинает дополнительно подтормаживать второе колесо. Главная трудность работы таких систем заключается в том, что при торможении ОТС масса, приходящаяся на переднее и заднее колеса, перераспределяется по сложному закону (рис. 5).

Дополнительной особенностью торможения ОТС является высокая вероятность полного перераспределения массы на переднее колесо (т.е. возможность опрокидывания вперёд

при торможении), причем, чем легче ОТС, тем выше вероятность такого развития процесса торможения.

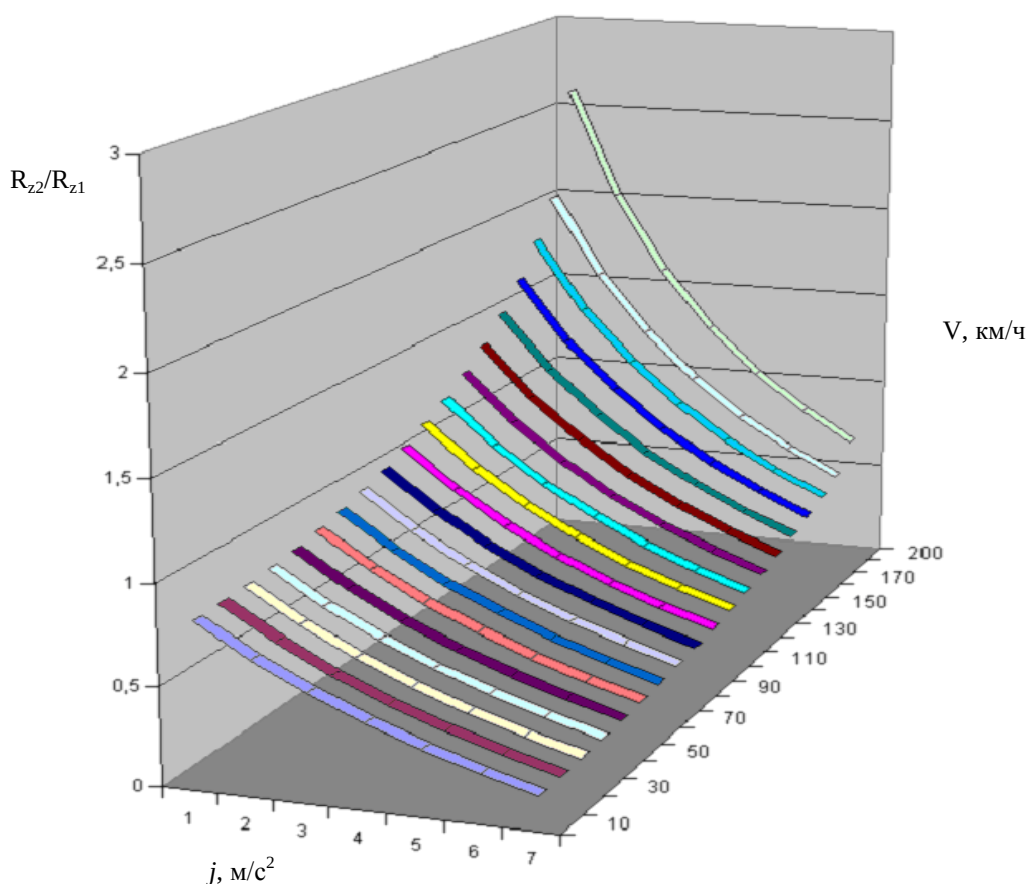


Рис. 5. Обобщённая диаграмма зависимости изменения вертикальных реакций на колёсах ОТС от скорости и замедления

При движении на мотоцикле переключать передачи, в отличие от автомобиля, водителю приходится с помощью ноги, так как в большинстве случаев на ОТС с механической коробкой передач используется переключение передач ножное, из-за особенностей конструкции. Некоторые производители мотоциклов для повышения комфорта водителя стали устанавливать систему QSS (Quick shift system) - система быстрого переключения передач. Это аналог роботизированного переключения передач на автомобиле. Водитель управляет только педалью переключения передачи, а система сама определяет момент переключения, выжимает сцепление и изменяет подачу топлива для плавного включения пониженной или повышенной передачи.

Ещё одним критическим и очень опасным для ОТС режимом движения является скольжение в повороте. В отличие от автомобиля, для которого опаснее начало опрокидывания в повороте, для ОТС самым опасным является начало скольжения. Дело в том, что в повороте ОТС движется устойчиво только когда проекция результирующей силы от сил тяжести и центробежной проходит через пятно контакта колеса с дорогой (см. рис. 3). В случае начала бокового скольжения ОТС в повороте реальный радиус поворота резко увеличивается, как следствие уменьшается центробежная сила и ОТС падает. Для предотвращения такой ситуации используют SCS (Slide control system) - систему управления скольжением в повороте, которая, с помощью датчиков, фиксирует начало скольжения и частично притормаживает колеса, дополнительно снижая величину подачи топлива в цилиндры двигателя [7].

Всё чаще на современных мотоциклах устанавливают ИСПВ, контролирующие процесс разгона и, в частности, предотвращающие возникновение опрокидывания, т.е. отрыв переднего колеса при разгоне. В отличие от обычного автомобиля ОТС может легко опроки-

нута назад при резком разгоне, что является очень опасной ситуацией. В задачу таких систем (LIF (Lift control system) входят: система контроля подъема переднего колеса; LCS (Launch control system); система контроля трогания; TCS (Traction control systems) - система контроля тяги, в которую входит определение момента начала опрокидывания и снижение крутящего момента на ведущем колесе, для предотвращения этого процесса. Дополнительно система TCS определяет начало проскальзывания ведущего колеса мотоцикла, снижает крутящий момент и обеспечивает его разгон с максимальной эффективностью и безопасностью.

Ещё одной из проблем, которая может возникать при движении мотоцикла на скоростях от 40 до 80 км/ч - это автоколебания передней управляемой вилки, так называемый "воблинг" передней части мотоцикла. Система EVD (Electronic vibration damper) - электронный демпфер крутильных колебаний руля, она предназначена для ликвидации таких автоколебаний. На многих мотоциклах устанавливают более простую систему - обычный демпфер колебаний (поперечный амортизатор) на рулевую вилку.

Недавно фирма BMW заявила о готовности установки на свои мотоциклы как дополнительную опцию систему eCall.

Перспективные типы ОТС и интеллектуальные системы помощи водителю для них

В настоящее время всё большее применение получают электровелосипеды и малые электроскутеры, как экологически чистый транспорт. Появление ОТС с электроприводом сделало возможным применять на компактных и лёгких транспортных средствах ИПСВ, которые ранее на них не могли быть установлены, такие как ABS и CBS.

В Европе также всё чаще появляются более устойчивые ОТС с тремя колёсами, они более безопасны и комфортны в эксплуатации, но при этом сохраняют преимущества одноколейников: компактные размеры и хорошая управляемость (рис. 6). Также можно повысить устойчивость ОТС на малых скоростях и на месте, используя выдвигающиеся шасси [8].



Рис. 6. Пример трёхколесного устойчивого и компактного скутера

Однако мы считаем, что наиболее перспективным и безопасным ОТС должен стать новый тип компактных транспортных средств - Кузовной одноколейный транспорт (КОТ) (рис. 7). Наличие кузова переводит его в класс более безопасных ТС, сравнимых с автомобилем [9, 10]. Пассивная безопасность КОТа становится аналогична автомобильной, появляется возможность установки внутрикузовных систем помощи водителю, таких как ремни безопасности, подушки безопасности, навигатор и др. Защита от внешних неблагоприятных факторов повышает комфорт и безопасность эксплуатации, и делает возможной эксплуатацию КОТа круглый год вне зависимости от погоды.

На КОТа можно установить абсолютно все те же ИСПВ, что и на обычный автомобиль, при этом КОТ более компактный, экономичный и экологичный по сравнению с обычным автомобилем, а следовательно, и более перспективный в качестве городского разъездного транспортного средства.



Рис. 7. Примеры КОТов

Выводы

Одноколейные транспортные средства, являясь самыми опасными в мире, менее всего оснащены интеллектуальными системами помощи водителю. Из-за особенностей конструкции и движения для того чтобы установить ИСПВ на ОТС необходима существенная адаптация каждой системы, а некоторые системы вообще невозможно установить на одноколейный транспорт. На компактные виды ОТС, такие как велосипед и скутер, вообще не устанавливаются системы помощи водителю.

Дальнейшее повышение безопасности движения ОТС возможно только с внедрением новых типов безопасных ОТС и новых систем помощи водителю, а также расширение сфер применения уже имеющихся ИСПВ на большем количестве ОТС.

Библиографический список

1. **Иванов, А.М.** Основы конструкции современного автомобиля: учебник для вузов / А.М. Иванов, А.Н. Солнцев, В.В. Гаевский; П.Н. Клюкин, В.И. Осипов, А.И. Попов. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Инжиниринговый научно-образовательный центр «СМАРТ», 2017. – 348 с.
2. **Иванов, А.М.** Автомобили: Теория эксплуатационных свойств: учебник для студ. учреждений высш. проф. образования / А.М. Иванов [и др.]; под ред. А.М. Иванова. – 2-е изд. – М.: Издательский центр "Академия", 2014. – 176 с.
3. **Гаевский, В.В.** Устойчивость движения одноколейного транспортного средства на широких шинах в повороте // Автотранспортное предприятие. – 2015. – № 4. – С. 26-28.
4. **Shadrin, S. S.** Algorithm of Autonomous Vehicle Steering System Control Law Estimation while the Desired Trajectory Driving / S. S. Shadrin, A. M. Ivanov // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2016. – V. 11. – № 15. – P. 9312–9316.
5. **Шадрин, С.С.** Автономное колесное транспортное средство в составе интеллектуальных транспортных систем / С.С. Шадрин, А.М. Иванов, Д.В. Невзоров // Естественные и технические науки. – 2015. – Вып. 6(84). – С. 309–311.

6. **Иванов, А.М.** Разработка системы межобъектного взаимодействия интеллектуальных транспортных средств / А.М. Иванов, С.С. Шадрин // Известия ВолгГТУ. Сер. «Наземные транспортные системы». Вып. 7: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – № 21 (124). – С. 74–77.
7. **Гаевский, В.В.** Перспективные способы повышения безопасности одноколейных транспортных средств / В.В. Гаевский, М.С. Подольский // Журнал автомобильных инженеров. – 2015. – № 1 (90). – С. 36–39.
8. **Гаевский, В.В.** Выдвигающееся шасси для мотоцикла / В.В. Гаевский, Е.Р. Султанова // Авто-транспортное предприятие. – 2016. – № 11. – С. 37–39.
9. Пат. на полезную модель / Гаевский В.В. Одноколейное транспортное средство с постоянно-вертикальными колёсами. № 133498; зарег. в Государственном реестре полезных моделей РФ от 20.10.2013.
10. **Гаевский, В.В.** Кузовной одноколейный транспорт (КОТ) - перспективный вид городского компактного одноколейного транспортного средства // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2014. – № 4 (106). – С. 219–223.

*Дата поступления
в редакцию 30.05.2018*

V.V. Gaevskiy, A.M. Ivanov

THE PROBLEMS OF USING INTELLIGENT DRIVER ASSISTANCE SYSTEMS ON SINGLE-TRACK VEHICLES

Moscow automobile and road construction state technical university (MADI)

Purpose: The article considers the problems and singularity of the application of modern driver assistance systems on single-track vehicles.

Design / methodology / approach: The classification of intelligent driver assistance systems and design features of single-track vehicles is given, requiring the completion of these systems for successful use on such vehicles.

Findings: Prospects of development of assistance systems for driver and prospective types of single-track vehicles for increased safety are considered.

Key words: single-track vehicles, cover one-track transport, motorcycle, Road accidents, brake system, intelligent driver assistance systems.

УДК 629.113

Р.Б. Гончаров, В.Н. Зузов

ПРОБЛЕМЫ ПОИСКА ОПТИМАЛЬНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ БАМПЕРА АВТОМОБИЛЯ ПРИ УДАРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ С ПОЗИЦИЙ ПАССИВНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Параметрическая оптимизация элементов конструкции автомобиля помогает снизить его массу при сохранении прочностных и жесткостных характеристик, следовательно, применение оптимизации в процессе проектирования является важной и актуальной задачей. В данной работе рассматривается параметрическая оптимизация бампера автомобиля с позиций пассивной безопасности. Обоснован выбор типа и размера конечного элемента (КЭ) для решения задачи ударного взаимодействия бампера и ударника на примере трех моделей разной степени структурированности. П

Представлены разработанные рациональные конечно-элементные модели (КЭМ) бампера и ударника для проведения параметрической оптимизации, описана схема нагружения, получены результаты с приемлемой точностью и минимальным временем решения при использовании решателя LS-DYNA и модуля LS-OPT. Рассмотрены варианты применения пеноалюминия для заполнения стоек бампера, исследовано влияние плотности наполнителя и толщины стенок на общую жесткость бампера.

Представлен вариант конструкции бампера и его КЭМ после доработки по итогам оптимизации, проведена проверка того, что доработанная модель удовлетворяет исходным требованиям. В результате масса доработанной на 5% меньше, чем исходной конструкции при сохранении ключевых параметров.

Ключевые слова: пассивная безопасность, топологическая оптимизация, LS-DYNA, LS-OPT, бампер, конечно-элементная модель, ударопрочность.

Введение

Требования обеспечения как активной, так и пассивной безопасности людей в автомобиле являются важнейшими в настоящий момент. Конструкции автомобиля, воспринимающие внешнее воздействие при аварии, в том числе ударное, должны быть легкими, прочными и способными поглощать энергию так, чтобы сохранялось жизненное пространство вокруг людей, эти конструкции должны удовлетворять определенным критериям и при этом быть оптимальными. Однако создание оптимальных конструкций автомобиля с точки зрения пассивной безопасности – одна из самых сложных проблем, которые сегодня решаются в сфере оптимизации [1, 2]. Проблема связана со сложным поведением конструкции, которое должно быть смоделировано для точного представления процесса удара, например, нелинейное поведение материала, геометрические нелинейности, контакт между элементами и другие эффекты, зависящие от скорости деформации. Эти задачи решаются методом конечных элементов (МКЭ) в нелинейной постановке, причем продолжительность их решения достаточно велика.

Процесс оптимизация является итерационным, что увеличивает время решения задачи в десятки раз. Следовательно, одной из важнейших задач является обоснованный выбор рациональных КЭМ объекта, которые обеспечивают получение требуемой точности решения при минимальных затратах машинного времени.

Цель работы

Целью данной работы является снижение массы базовой конструкции бампера автомобиля при сохранении аналогичных параметров по перемещению ударника, как у исходной конструкции, путем применения параметрической оптимизации.

Постановка задачи ударного воздействия

Конструкция автомобильного бампера состоит из тонкостенного бруса и двух стоек, которые крепятся к бамперу с обеих сторон. Согласно проведенным исследованиям, при ударе бампер испытывает сложный нелинейный характер поведения, стойки деформируются

с образованием складок, при этом происходит поглощение энергии ударника за счет образования пластических деформаций [3-5].

Внешний вид испытательного стенда с установленным бампером показан на рис. 1. На рис. 2 приведена твердотельная модель конструкции бампера, а на рис. 3 основные сечения и геометрические размеры [6].

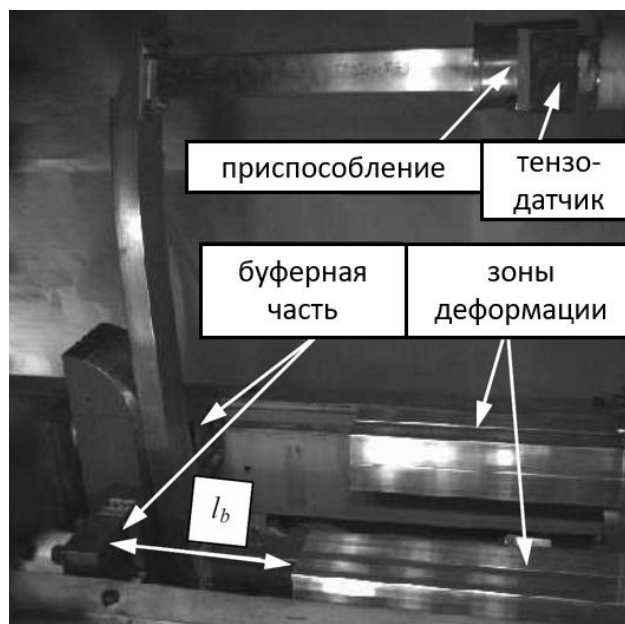


Рис. 1. Внешний вид стенда с установленным бампером

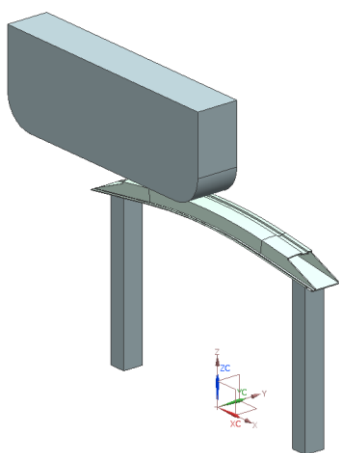


Рис. 2. Твердотельная модель бампера

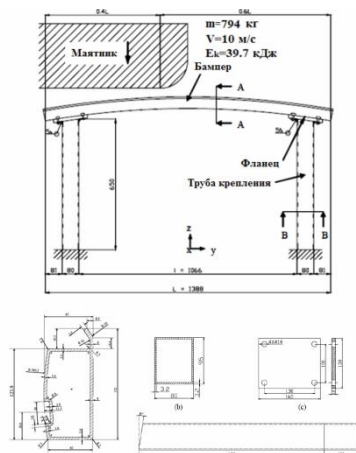


Рис. 3. Основные сечения и размеры бампера

Бампер состоит из силового элемента и двух стоек, материал – алюминий АА7003-Т79 с кинематическим упрочнением. В работе моделировался фронтальный удар с частичным перекрытием (косо-фронтальный удар) в соответствии с требованиями ЕЭК ООН, начальная скорость ударника составляет 10 м/с, масса ударника 794 кг (кинетическая энергия ударника 39,7 кДж). Общая масса бампера 10,3 кг.

Тип конечного элемента бампера и стоек – оболочечный Belytschko-Tsay. Для оценки соотношения точности получаемых результатов к затраченному времени были созданы модели с разной степенью структурированности с учетом ранее проведенных исследований [7]. На рис. 4 показаны оболочечные модели бампера.

КЭМ бампера низшего уровня (число узлов 7524, число конечных элементов 6240, размер элементов 20 мм) обеспечивают получение результатов с погрешностями 34% по перемещению ударника; КЭМ бампера среднего уровня (число узлов 13893, число КЭ 12728, размер

элементов 10 мм) – получение результатов с погрешностями 21%; КЭМ бампера высшего уровня (число узлов 47248, число КЭ 44663, размер элементов 5 мм) – получение результатов с погрешностями 3,7 %, что соизмеримо с погрешностями экспериментальных исследований.

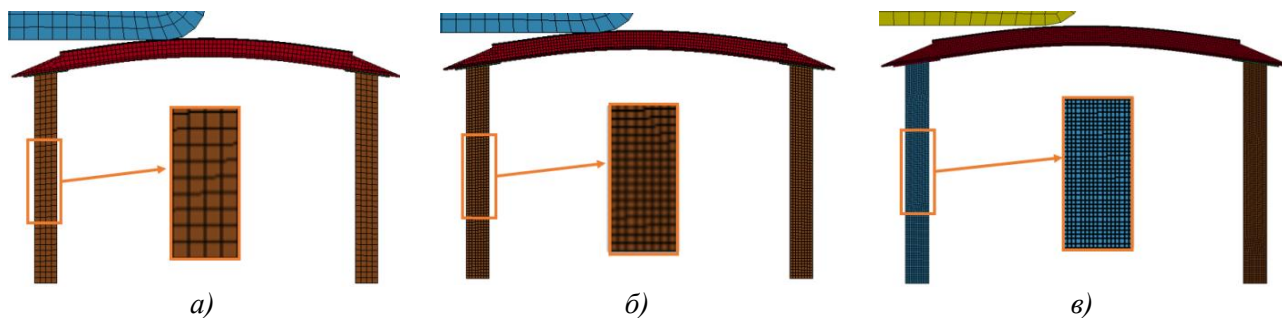


Рис. 4. Оболочочные КЭМ бампера:

а - низший уровень; *б* - средний уровень; *в* - высший уровень

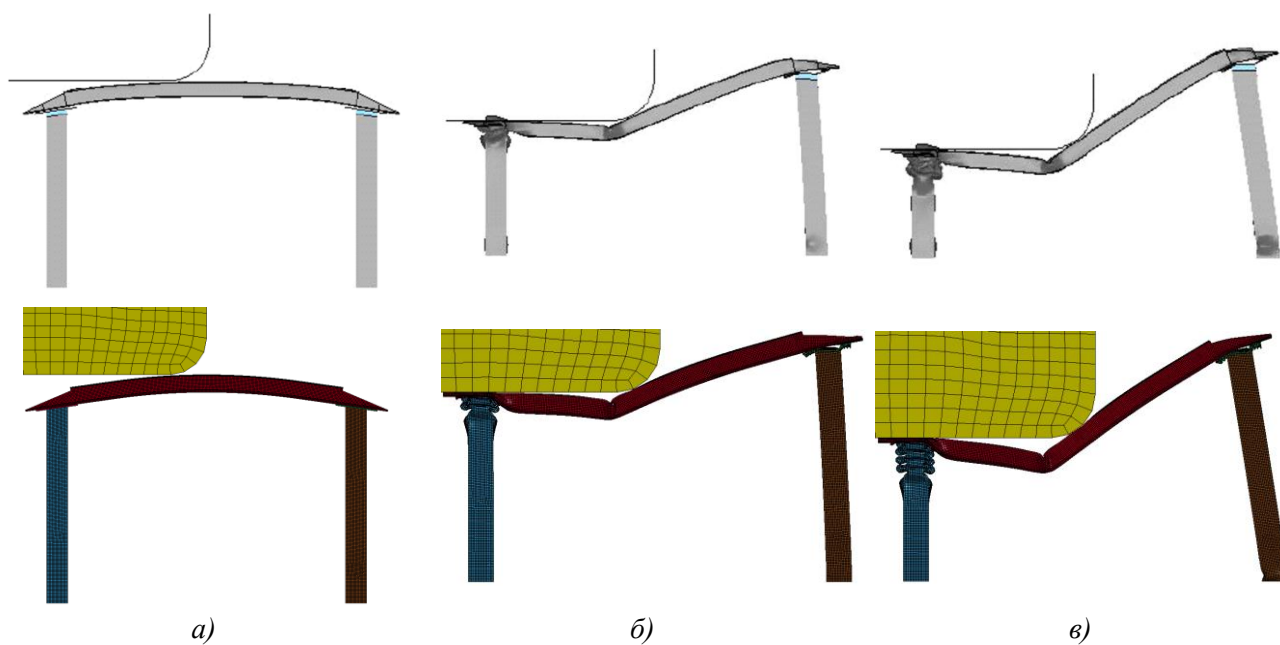
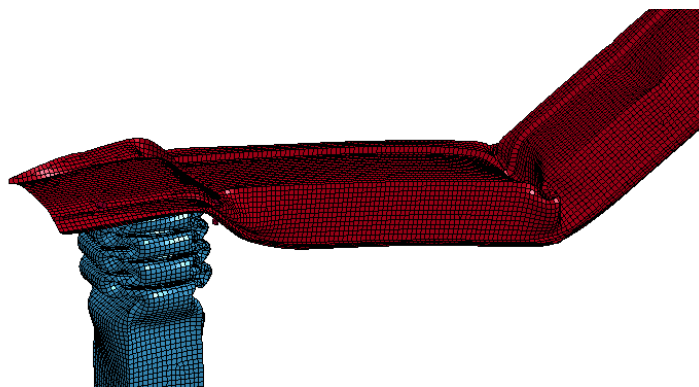


Рис. 5. Результаты расчета бампера в зависимости от времени:

а - время 0 с; *б* - время 0,035 с; *в* - 0,075 с



а)



б)

Рис. 6. Результаты расчета бампера:

а - эксперимент; *б* - расчет

Погрешности решений, время расчета и основные характеристики сетки КЭМ представлены в табл. 1. Картины деформированного состояния, полученные экспериментально и расчетным путем, показаны на рис. 5 и рис. 6.

Таблица 1

**Результаты решения задачи взаимодействия бампера с ударником
с использованием КЭМ различного уровня**

Модель	Число узлов	Число элементов	Размер элемента, мм	Перемещение, мм		Относительная погрешность, %	Машинное время счета, мин
				эксперимент	расчет МКЭ		
Низший уровень	7524	6240	20	431	285	34	24
Средний уровень	13893	12728	10	431	340	21	40
Высший уровень	47248	44663	5	431	415	3,7	182

Из анализа результатов следует, что при использовании КЭ с размером 5 мм, КЭМ можно считать наилучшей с точки зрения точности результатов (погрешность 3,7%), но по соотношению точность расчета – затраченное машинное время, КЭМ среднего уровня является рациональной применительно к задачам оптимизации с учетом того, что характер деформаций при использовании КЭМ среднего уровня идентичен экспериментальным.

Основываясь на проведенном анализе, были сформулированы этапы для получения оптимальной конструкции:

1. Исследовать влияние конструктивных параметров на свойства бампера с целью выявления факторов, наиболее существенно влияющих на поведение конструкции, на базе КЭМ среднего уровня;
2. Провести поиск оптимального решения для КЭМ высшего уровня (на основе выводов, сделанных на первом этапе - предварительные расчеты).

Максимальное перемещение ударника не должно превышать значений, полученных в результате эксперимента.

Постановка задачи оптимизации

С целью доработки бампера, были рассмотрены два варианта конструкции: стойка полностью заполнена пеноалюминием, стойка частично заполнена пеноалюминием (стойка с двойными стенками), как показано на рис. 7.

Материал *пеноалюминий* в программе LS-DYNA описывается моделью, предложенной Дешпендом и Флеком [8]. В данной модели параметры материала зависят от плотности наполнителя, что позволяет использовать данный материал для решения оптимизационных задач, выбирая в качестве варьируемого параметра плотность. Примеры использования этой модели материала применительно к задачам оптимизации бампера легкового автомобиля описаны в работе [9].

На первом этапе для предварительных многовариантных расчетов с целью повышения их эффективности использовались КЭМ среднего уровня. В качестве основного ограничения выступало максимальное перемещение ударника (оно не должно превышать значения, полученного в результате эксперимента). Переменными параметрами выступали: плотность пеноалюминия и толщины стенок стойки бампера. Для второго случая переменной толщиной об-

ладали обе стенки – внешняя и внутренняя. Основываясь на результатах работы [10], плотность варьировалась от 50 до 800 кг/м³, толщина стенки изменялась от 1 до 4 мм дискретно.

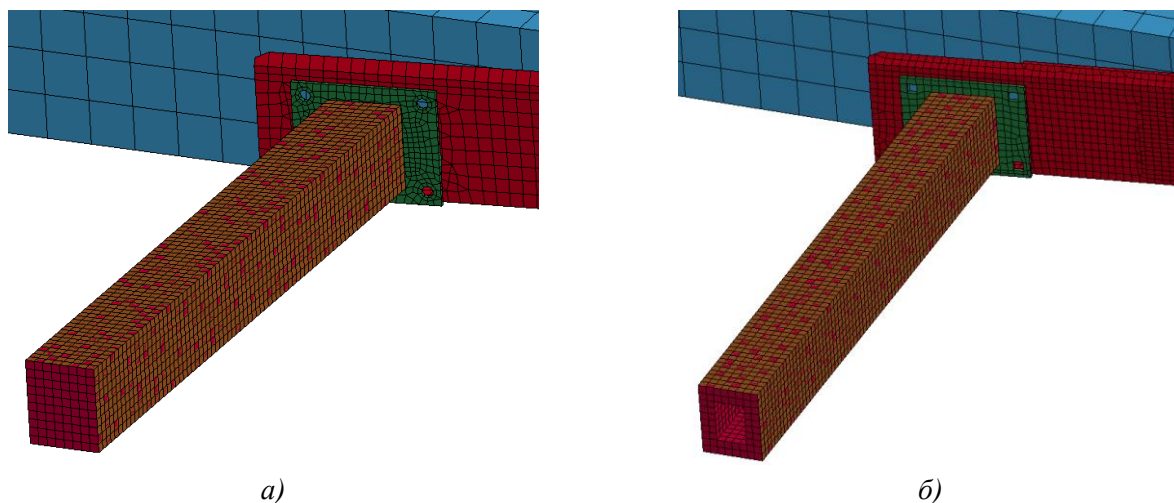


Рис. 7. Варианты доработки стойки бампера с помощью пеноалюминия:
а - полностью заполнена; *б* - частично заполнена (с двойными стенками)

Результаты оптимизации сведены в табл. 2. Зависимость перемещения ударника от плотности пеноалюминия показана на рис. 8. Затраченное машинное время счета 18 ч.

Таблица 2

Результаты оптимизации для КЭМ среднего уровня

Толщина стенки, мм	Плотность пеноалюминия, кг/м ³	Перемещение ударника, мм	Масса, кг	Тип наполнения
3,2	-	340	10,3	Пустая
1	360	346	11,4	Полностью
1	330	331	10,7	Частично

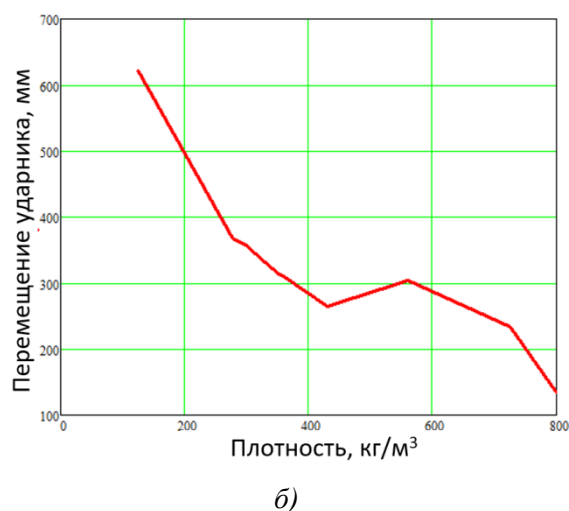
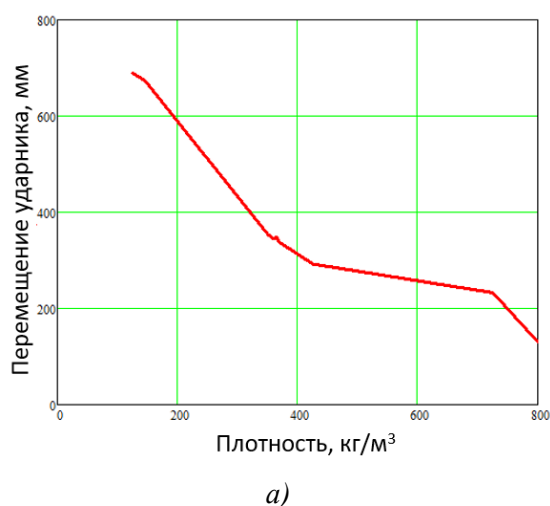


Рис. 8. Зависимости перемещения ударника от плотности пеноалюминия:
а - полностью заполнена; *б* - частично заполнена (с двойными стенками)

Анализируя результаты оптимизации модели среднего уровня, можно сделать вывод, что:

1. Использование частичного заполнения дает при аналогичном перемещении ударника меньшую массу, чем в случае полностью заполненной стойки;

2. Толщина стенки в меньшей степени влияет на свойства и поведение конструкции, чем плотность пеноалюминия;

3. Оптимальными параметрами являются: толщина стенки 1 мм, плотность 330 кг/м³.

Как следует из графиков, зависимость перемещения ударника от плотности пеноалюминия нелинейная для обоих рассматриваемых случаев, что накладывает дополнительные требования к параметрам оптимизации.

На втором этапе проводился поиск оптимальных параметров для КЭМ высшего уровня с частичным заполнением (с двойными стенками). В данном случае варьировалась только плотность пеноалюминия в пределах от 200 до 400 кг/м³, толщины внешней и внутренней стенок равны 1 мм. Максимальное перемещение ударника также не должно превышать значения, полученного в эксперименте.

Полученные результаты решения задачи оптимизации сведены в табл. 3 и показаны на рис. 9. Затраченное машинное время 45 ч.

Таблица 3

Результаты оптимизации для КЭМ высшего уровня

Толщина стенки, мм	Плотность пеноалюминия, кг/м ³	Перемещение ударника, мм	Масса, кг
3,2	-	415	10,3
1	258	415	9,8

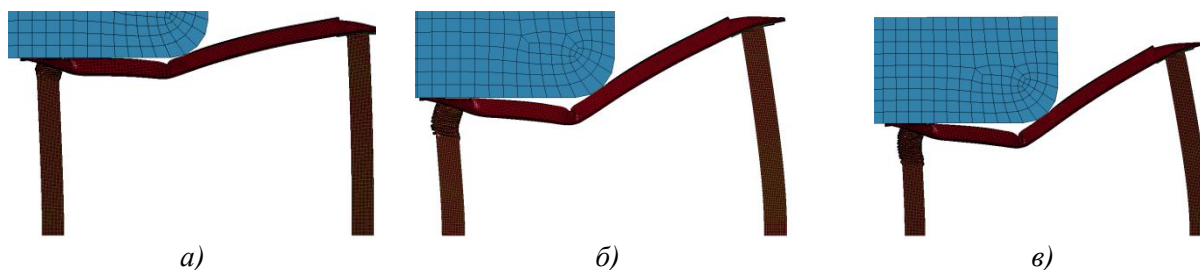


Рис. 9. Результаты расчета бампера в зависимости от времени:

а - 0,02 с; б - 0,05 с; в - 0,08 с

По результатам моделирования можно сделать следующие выводы:

1. Оптимальным параметром плотности пеноалюминия является значение 258 кг/м³;
2. Максимальное перемещение ударника 415 мм, что соответствует экспериментальным исследованиям;

3. Масса бампера 9,8 кг, что меньше массы первоначальной конструкции 10,3 кг на 5%, при этом максимальное перемещение ударника и поведение конструкции идентичны.

Заключение

На основе проведенных исследований можно сделать следующее заключение:

1. Для расчётов тонкостенных конструкций типа бамперов автомобилей рекомендуется использовать КЭ типа shell Belytschko–Tsay с размерами КЭ до 5 мм (при этом средняя погрешность составляет 3,7% по сравнению с экспериментом). По значениям трудозатрат на ее создание и решение задачи и по погрешностям результатов такие модели можем считать рациональными;

2. Для предварительных многовариантных расчетов можно использовать КЭМ среднего уровня с размерами КЭ 10 мм, так как поведение такой модели идентично поведению реальной конструкции (при этом затраты машинного времени значительно меньше, чем для КЭМ высшего уровня);

3. Для уточняющих оптимизационных расчетов следует использовать КЭМ высшего уровня, однако в этом случае необходимо тщательно подбирать количество варьируемых па-

раметров и диапазон их изменения, поскольку это влияет на машинное время расчета и точность результатов;

4. Полученная в результате параметрической оптимизации модель имеет массу на 5% меньше, чем исходная конструкция.

Библиографический список

1. **Hamza, K.** Design optimization of vehicle structures for crashworthiness using equivalent mechanism approximations / K. Hamza, K. Saitou // ASME J. Mech. Des. 2005. – №127-3. – P. 485–492.
2. **Шаболин, М.** Снижение требований к прочности материала подрамника грузового автомобиля с независимой подвеской путем параметрической оптимизации конструктивно-силовой схемы / М. Л. Шаболин, Д. С. Вдовин // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. – 2016. – № 4 (30). – С. 90–96.
3. **Шабан, Б.А.** Особенности моделирования каркасных элементов кузовов и кабин автомобилей при исследовании пассивной безопасности / Б.А. Шабан, В.Н. Зузов // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 11. DOI: 10.7463/1112.0486675
4. **Зузов, И.В.** Моделирование продольного смятия передних лонжеронов кузова легкового автомобиля с учетом инициаторов деформаций // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2011. – № 1. – С. 34–37.
5. **Зузов, И.В.** Моделирование продольного смятия передних лонжеронов кузова легкового автомобиля с учетом наполнителей и инициаторов деформаций / И.В. Зузов, В.Н. Зузов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2012. – № 2. – С. 42–45.
6. Satyanarayana Kokkula, Bumper beam-longitudinal system subjected to offset impact loading an experimental and numerical study // PhD Thesis Trondheim Norwegian University of Science and Technology; 2005. –P. 288.
7. **Шабан, Б.А.** Особенности построения конечно-элементных моделей кабин для исследования пассивной безопасности при ударе в соответствии с правилами ЕЭК ООН №29 / Б.А. Шабан, В.Н. Зузов // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. № 03. DOI: 10.7463/0313.0542301.
8. **Deshpande, V.S.** Isotropic models for metallic foams / V.S. Deshpande, N.A. Fleck // J. Mech. Phys. Solids. – 2000. – №48. – P. 1253–1283.
9. **Zhaokai, Li.** Crashworthiness and lightweight optimization to applied multiple materials and foam-filled front end structure of auto-body / Li Zhaokai [et al.] // Adv. Mech. Eng. 2017. № 9(8). P. 1-21. DOI: 10.1177/1687814017702806
10. **Zhi, Xiao.** Crashworthiness design for functionally graded foam-filled bumper beam / Xiao Zhi [et al.] // Int. J. Advances in engineering software. – 2015. – №85. – P. 81–95.

*Дата поступления
в редакцию 30.05.2018*

R. B. Goncharov, V. N. Zuzov

CRASHWORTHINESS DESIGN FOR FOAM-FILLED BUMPER BEAM

Bauman Moscow state technical university

Purpose: crashworthiness design for foam-filled bumper beam using a parametric optimization.

Design/methodology/approach: the design parameters for crashworthiness optimization are foam density and thickness of a crash box, the purpose is to minimize the total mass. There are two variants for optimization: full filled crash box and partially filled. The foam model that is used in this article is Deshpande and Fleck foam. The program for optimization is LS-DYNA and LS-OPT.

Findings: the total mass of optimization construction is less than original bumper beam (5%). It is expediently to use medium finite element model (10 mm – element size) for preliminary optimization and high-level finite element model (5 mm – element size) for base one.

Research limitations/implications: the present study provides a starting-point for further research in the improvement of the crashworthiness design for automobile's bumper beam.

Key words: passive safety, topological optimization, LS-DYNA, LS-OPT, bumper, finite element model, impact resistance.

УДК 629.113

В.Г. Дыгало, Е.С. Ларин, В.В. Котов, Л.В. Дыгало, А.Е. Смorchков, Д.С. Деянов

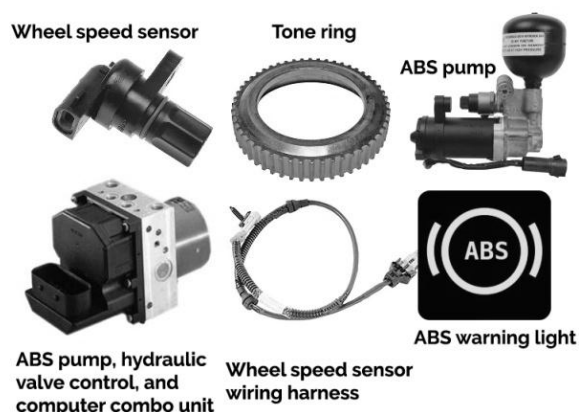
ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ПРИВодОВ СИСТЕМ АКТИВНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ АВТОМОБИЛЯ

Волгоградский государственный технический университет

Рассматривается создание комплекса средств диагностики приводов систем активной безопасности автомобиля. Проводится анализ особенностей диагностирования систем электронного контроля устойчивости, разбираются основные недостатки и методы диагностики, характеристики, общие понятия. Приводится описание системы, позволяющей проводить диагностику систем активной безопасности.

Ключевые слова: антиблокировочная система тормозов, диагностика, системы активной безопасности автомобиля.

Современные ABS относятся к сложным системам электропривода (рис. 1). Данная система электропривода является неотъемлемой частью тормозной системы современного автомобиля. Однако эффективное использование любых систем с электрическим приводом в эксплуатации возможно лишь при успешной реализации методов контроля за их техническим состоянием. В противном случае (особенно это касается использования автоматических систем) можно получить гораздо более опасную ситуацию (вызываемую некорректной работой исполнительных электроприводов). Вместе с тем, с представлениями о контроле за техническим состоянием тормозной системы автомобиля с ABS еще многое не ясно. Следует так же учесть, что система электропривода тормозов является составной и неотъемлемой частью тормозной системы автомобиля. В таком случае, по отклонению рабочих процессов тормозной системы автомобиля, можно определять неисправность системы электропривода на ранних стадиях. Попробуем разобраться в существующей проблеме.

**Рис. 1. Компоненты привода ABS**

Для проверки эффективности применяются два основных метода – дорожный и стендовый. При *дорожном методе* главными критериями оценки являются: тормозной путь, установившееся замедление, линейное отклонение и уклон дороги, на котором неподвижно удерживается АТС при проверке стояночного тормоза, а при *стендовом* оценивается общая удельная тормозная сила, время срабатывания тормозной системы и коэффициент неравномерности тормозных сил колес оси. Общим диагностическим параметром рассматриваемых методов является усилие на рабочем органе привода автоматизированной тормозной системы. Очевидно, что данные методы в большей мере нацелены на проверку механических элементов тормозной системы и не пригодны для проверки системы электропривода.

Для контроля исправности ABS производители используют систему самоконтроля, которая нацелена на проверку исправности электрических цепей и уровня сигнала. Обрыв цепи питания модулятора или датчика немедленно приведет к отключению ABS и подаче предупреждающего сигнала водителю. Очевидно, что данная система не исчерпывает все возможные неисправности ее элементов. К принятым во внимание можно добавить такие, как – изменение сечения каналов модулятора вследствие их засорения, заклинивание клапанов модулятора, задержка при срабатывании клапанов, угловая податливость статора датчика ABS, повышенное контактное сопротивление, неисправности элементов платы блока управления, ошибки в логике управления блока ABS и т.п. Так же система не учитывает состояние рабочей тормозной системы автомобиля. Необратимые изменения, происходящие с приводом тормозной системы, такие как – износ фрикционных накладок тормозных колодок, износ тормозного диска/барабана, старение тормозной жидкости (обусловленное накоплением микрочастиц резины от износа манжет поршней рабочих и главного тормозных цилиндров, частиц ржавчины, поглощение влаги из воздуха) и т.п. – неизбежно влияют на эффективность работы тормозной системы автомобиля. В таком случае корректная работа ABS сохраняется, но эффективность торможения падает, вплоть до отказа системы. Важно, что при таких неисправностях система самодиагностики ABS сигнала об отказе не подает.

Если проанализировать самодиагностику блока ABS, то можно сделать вывод, что в настоящее время доступен лишь небольшой перечень дефектов системы. Перечень кодов отказов блока ABS автомобиля можно разбить на несколько групп:

1. Контроль электрических сетей;
2. Контроль связи с блоками по шине CAN;
3. Верификация данных входящих сигналов и контроль блока управления;
4. Контроль тормозной системы.

Рассмотрим данные группы подробно. Коды отказов первой группы – контроль электрических цепей. Коды возникают в момент, когда блок управления ABS отмечает изменения напряжения сигналов, поступающих от каждого датчика скорости колеса. При выявлении обрыва или короткого замыкания в цепи, блок управления ABS сохраняет код диагностики. Возможная причина: повреждён жгут электропроводки или разъёма, шумовые помехи, неисправность датчика скорости колеса, неисправность ABS-ECU.

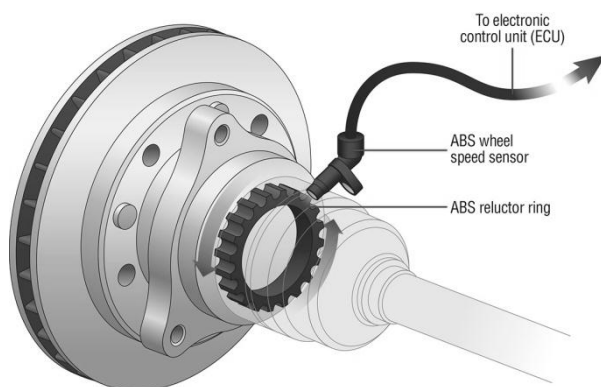


Рис. 2. Датчик скорости ABS

Так же есть коды отказов, отвечающие за свои клапана гидравлического блока ABS. Причина возникновения кодов отказов – это неисправность ABS-ECU. Эти коды диагностики будут выданы, если на электромагнитный клапан не поступает питание, даже если электронный блок ABS включил транзистор или после того, как ЭБУ ABS выключает транзистор, на электромагнитный клапан все ещё поступает питание, а также при выявлении неисправности электромагнитного клапана.

Остальные коды группы контроля электрических цепей так же направлены на выявление дефектов в электрических цепях элементов антиблокировочной системы и соединяющих

проводах, а также контроль слишком высокого или низкого напряжения в бортовой сети автомобиля.

Во второй группе (контроль связи с блоками по шине CAN) все коды отвечают за коммуникацию между блоками. Проверки заключаются в процедуре поиска электрических неисправностей проводов шины CAN, измерению сопротивления оконечных резисторов и оценке загруженности сообщениями компьютерной сети по среднему напряжению.

Третья группа кодов даёт возможность контролировать достоверность получаемых данных с датчиков и состояние энергонезависимой памяти. Во время движения автомобиля блок управления ABS отслеживает сигналы от каждого датчика скорости колеса. Если в сигналах от этих датчиков выявлено беспорядочное изменение сигнала или значение сигнала все время очень высоко, записывается соответствующий код диагностики и загорается контрольная лампа на панели приборов.

Во время движения транспортного средства блок управления ABS отслеживает сигналы от каждого датчика скорости колеса. При отсутствии сигнала или если показания постоянно ниже сигналов от датчиков скорости других колёс, сохраняется соответствующий код диагностики. Причины неисправности следующие: слишком большое расстояние между датчиком скорости колеса и задающим диском, неисправность подшипника колеса, деформация задающего диска, налипание инородных материалов на датчик скорости колеса и/или задающий диск, неисправность датчика скорости колеса, ненадлежащая установка датчика скорости колеса, неисправность ABS-ECU, нарушение рисунка намагниченности задающего диска, изменилось количество полюсов (северных и южных) магнитного задающего диска.

Если в сигналах датчиков скорости вращения колеса выявлены какие-либо периодические спады, блок управления ABS выдаёт соответствующие *коды диагностики*. Причины не сильно отличаются от описанных ранее: неисправность подшипника колеса, деформация задающего диска, выкрашивание зубьев задающего диска, налипание инородных материалов на задающий диск, неисправность ABS-ECU, нарушение рисунка намагниченности задающего диска. Диагностика по данным кодам состоит лишь из проверки подшипника и задающего сектора. Из чего можно сделать вывод, что периодические спады в сигнале датчика скорости колеса вызываются циклическим вращением неисправного элемента – подшипника с нанесённым на него задающим сектором.

Код неисправности выключателя стоп-сигнала. Он выдаётся, если транспортное средство прошло достаточно большое расстояние с включённым выключателем стоп-сигнала или когда выключенное положение датчика выключателя стоп-сигнала не соответствует положению транспортного средства. Диагностика по данному коду состоит из проверки шины CAN, как обязательная, проверка правильности установки датчика в посадочном месте и его регулировки, проверка самого датчика стоп-сигналов и поиск неисправности в электропроводке.

Код «неправдоподобные диагностические данные» возникает в случае ненадёжности информации, хранящейся в EEPROM (Электрическое ПЗУ с возможностью стирания информации и программирования). Данные о неисправностях, хранившиеся в прошлом, никуда не выводятся, и выдаётся лишь этот код диагностики, так же данный код диагностики может возникнуть, когда отключилось питание блока управления ABS или упало напряжение в момент записи данных в электрическое ПЗУ с возможностью стирания информации и программирования. Причины возникновения неисправности *следующие*: при включённом зажигании разъем блока ABS или клемма аккумуляторной батареи отключены, плохо закреплённая клемма аккумуляторной батареи, ненормальная работа аккумуляторной батареи, повреждённые электропроводки или разъёмы, неисправность ABS-ECU. Диагностика сводится к проверке бортового напряжения сети автомобиля и питающих проводов блока ABS. Если по результатам проверки неисправность не выявлена, руководство рекомендует заменить блок ABS в сборе.

Во время работы системы ABS-ECU постоянно контролирует свои эксплуатационные параметры. При обнаружении каких-либо отклонений выдаётся код C2200. Единственная возможная причина – это отказ блока управления ABS. Диагностика сводится к проверке

шины CAN. Если там не обнаружено неисправностей, блок ABS должен быть заменён. Из практики по диагностике известно, что данный код возникает при не правильном или при прерванном перепрограммировании блока управления ABS. Из чего можно сделать вывод, что в данном случае блок контролирует контрольные суммы своего программного обеспечения.

К четвертой группе относятся коды, являющиеся одним и тем же кодом, но для разных колёс. Причины возникновения *следующие*: повреждён жгут электропроводки или разъёмы, внешние шумовые помехи, неисправность датчика скорости колеса, неисправность ABS-ECU, слишком большое расстояние между датчиком скорости колеса и задающим диском, налипание инородных материалов на датчик скорости колеса и/или задающий диск, неисправность подшипника колеса, ненадлежащая установка датчика скорости колеса, деформация задающего диска, нарушение рисунка намагниченности задающего диска, выкрашивание зубьев задающего диска. Вероятная причина возникновения кода неисправности: давление тормозной жидкости, которое остаётся продолжительное время высоким или низким. Поскольку автоматизированная тормозная система не имеет необходимого набора датчиков давления, оно рассчитывается по датчикам скорости вращения колёс. Соответственно диагностика будет заключаться в проверке датчиков скорости колёс. Проверка по этой группе кодов мало чем отличается от проверки по другим неисправностям датчиков скорости вращения. Проверки тормозной системы или исправности гидравлического блока нет ни на одном из этапов.

Код, отвечающий за поступление тормозной жидкости в узел гидросистемы ABS. Причины возникновения кода отказа – это ненадлежащий узел гидросистемы (для поставки на завод) и неисправность блока управления ABS. Процедура проверки по данному коду включает в себя только два пункта – проверка шины CAN (как обязательную для всех кодов) и сброс кода неисправности. Если ошибка появляется вновь, необходимо заменить блок ABS в сборе. Из этого следует, что если произошла утечка тормозной жидкости, необходимо заменить блок ABS. Не опытный механик вполне может последовать данной процедуре и выполнить предписание.

Проведенный анализ перечня кодов отказов системы бортовой диагностики показывает, что возможные причины неисправности, такие как шумовые помехи, никак не проверяются. То есть электронный блок управления может зафиксировать помехи, но процедура проверки отсутствует. Это приводит к тому, что поиск неисправного элемента закончится неудачей, либо укажет на исправный узел, чётко следуя процедуре диагностики. Проверки тормозной системы или исправности гидравлического блока нет ни на одном из этапов.

Очевидно, что бортовая диагностика электропривода ABS не охватывает весь перечень возможных неисправностей.

Из-за этого возникают ложные замены и ошибочные ремонты. Так же выпадает из поля зрения системы ряд неисправностей, таких как налипание ферромагнитной пыли на датчик или задающий ротор, засорение тормозных трубок, изменение сечения каналов, зависание клапанов гидроблока ABS, постоянно действующие помехи (например, из за установленного дополнительного оборудования), ошибочные данные и команды в сети CAN, внутренние отказы блока управления ABS, повреждение печатной платы блока управления ABS и т.д. Так же не покрываются и комплексные неисправности, т.е. когда есть совместное действие двух и более неисправностей. Данные случаи являются одними из самых сложных, потому что их совместное действие может ввести в заблуждение систему самодиагностики.

Анализ существующих методов диагностики показывает, что подавляющее большинство направлено на контроль датчиков скорости колёс и компьютерную шину CAN. Даже не смотря на то, что система может отследить отклонения по давлению, отсутствие тормозной жидкости, контролировать достоверность поступающих параметров и целостность электрических цепей, диагностика является достаточно примитивной и сводится к проверке электрических цепей.

Следует так же учесть, что система электропривода тормозов является составной и неотъемлемой частью тормозной системы автомобиля. В таком случае, по отклонению рабочих процессов тормозной системы автомобиля, можно определять неисправность системы электропривода на ранних стадиях.

Испытания автоматизированной тормозной системы автомобиля проводятся по мере необходимости. Малейшие изменения в работе системы остаются без внимания и приводят к отказу системы в будущем.

В таком случае становится очевидным, что необходимо бортовое оборудование, следящее за состоянием тормозной системы и ABS в режиме реального времени. Как было описано ранее, существующее бортовое диагностическое оборудование необходимую информацию в полной мере не предоставляет.

Выходом из данной ситуации является внедрение дополнительного диагностического комплекса. Он состоит:

- 1) из массива диагностических датчиков;
- 2) блока анализа данных

Массив датчиков позволяет фиксировать параметры движения автомобиля в режиме торможения, такие как – начальная скорость, замедление, вращение автомобиля относительно вертикальной оси, вращение автомобиля относительно поперечной и продольной оси, тормозной путь, наличие блокировки колеса. Очевидно, что режим торможения автомобиля зависит от физических параметров водителя и реализуемого режима торможения и управления траекторией движения – усилие на педали тормоза, интенсивность торможения, положение рулевого колеса при торможении (угол поворота), время торможения, положение рычага КПП (для механической КПП), положение педали сцепления. Так же режим торможения зависит от параметров среды – температуры, типа покрытия, погодных условий, времени суток.

Дополнительный диагностический блок получает данные о рабочих процессах элементов тормозной системы автомобиля и ABS в режиме реального времени.



Рис. 3. Схема диагностического комплекса

Данные, полученные диагностическими датчиками, анализируются микрокомпьютером (диагностическим блоком). Для того чтобы диагностическая система была воспроизводимой,

роль диагностического блока выполнена микрокомпьютером Raspberry Pi 3.

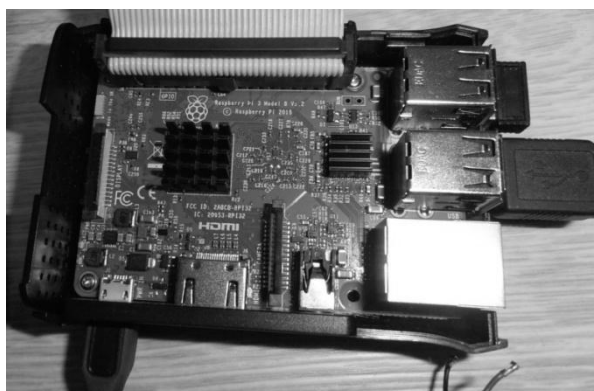


Рис. 4. Диагностический блок (микрокомпьютер)

Датчики подключаются через встроенный интерфейс PLD-40 (GPIO, UART, I2C, SPI). Этот интерфейс допускает подключение различных датчиков состояния. Операционная система Raspberry Pi 3 имеет необходимое программное обеспечение для обработки и анализа сигналов, поступающих на PLD-40, а также для организации алгоритма анализа сигналов в программный продукт с пользовательской графической оболочкой.

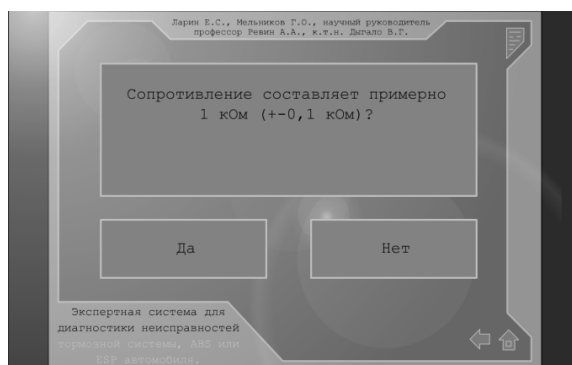


Рис. 5. Графический интерфейс

Для апробации и отладки диагностического комплекса, а также изучения закономерностей рабочих процессов в приводе автоматизированной тормозной системы автомобиля используется полноразмерная модель автоматизированной тормозной системы автомобиля.

Модель дает возможность симулировать рабочие процессы привода автоматизированной тормозной системы автомобиля.

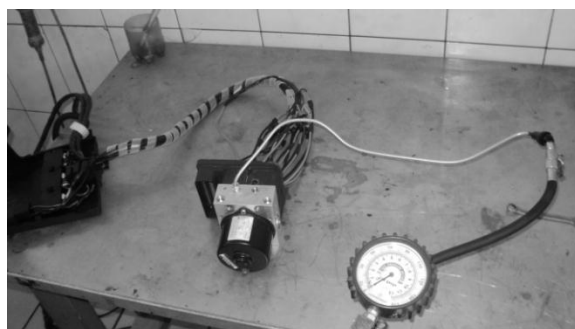


Рис. 6. Подключение к соленоидам блока ABS

Блок сопряжен с компьютером через кабель для передачи сигналов управления реле, с устройством ABS с помощью электрических проводов, припаянных к выводам соленоидов и

электродвигателя. Для работы соленоида компьютер посылает управляющий сигнал на реле, которое активирует внутренний диод и позволяет подать питание на управляемый соленоид.

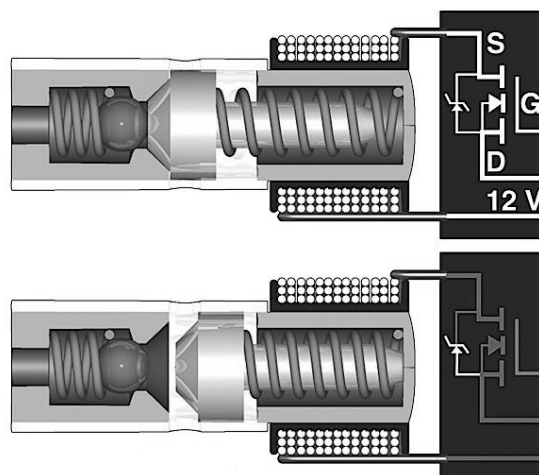


Рис. 6. Соленоид ABS

Прямое управление соленоидами и эмуляция сигналов датчиков скорости колеса позволяют симулировать любые режимы работы тормозной системы.

Использование полноразмерной модели, а не автомобиля, позволяет симулировать различные неисправности автоматизированной тормозной системы и изучать соответствующие отклонения рабочих процессов без какого-либо риска для безопасности водителя/оператора.

Так, например, рассмотрим влияние увеличения времени запаздывания срабатывания клапанов модулятора на рабочий процесс затормаживания колеса. Исследования проводились в диапазоне изменения времени запаздывания 0,03 - 0,09 с. Они показали, что проявление данной неисправности более явно выражено при торможении на поверхности со средними значениями коэффициента сцепления, например, мокрый асфальтобетон, с высоких начальных скоростей при снаряженном состоянии ТС. Это обстоятельство обусловлено тем, что при данных условиях за время торможения совершается наибольшее число циклов регулирования работы ABS, что позволяет четче проследить характер проявления указанной ранее неисправности.

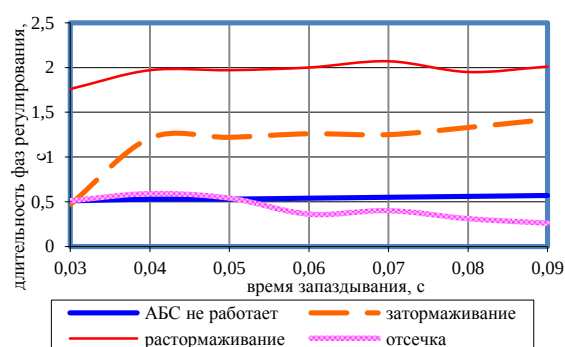


Рис. 7. Изменение продолжительности фаз работы ABS при торможении на мокром асфальтобетоне в результате увеличения времени запаздывания срабатывания клапана модулятора

Как следует из сопоставления физических картин динамических процессов затормаживания колеса автомобиля на мокром асфальтобетоне при увеличении времени запаздывания срабатывания клапана модулятора до 0,05 с и 0,09 с, соответственно, с начальной скоростью торможения $V_0 = 19,4$ м/с (70 км/ч), с увеличением времени запаздывания срабатывания кла-

пана модулятора увеличивается время пребывания колеса в состоянии юза, причем нестабильно, особенно в средней части процесса торможения, в период времени от 1,5 до 3 с. Это явление негативно сказывается на устойчивости ТС. Кроме того, при незначительном увеличении времени запаздывания срабатывания клапана наблюдается переход ABS в некоторых циклах на двухфазное регулирование, так как дальнейшее увеличение времени запаздывания срабатывания клапана приводит к нестабильности отработки фазы «отсечки». Вместе с тем, при оценке продолжительности основных фаз работы ABS отмечено, что снижение эффективности регулирования является также следствием значительного (от 0,47 до 1,42 с) увеличения фазы затормаживания и менее значительного, но явно выраженного роста времени до вступления ABS в работу.

Для выработки рекомендаций по выбору диагностических признаков увеличения времени запаздывания срабатывания клапана модулятора рассмотрим изменение среднереализованных значений основных параметров при торможении на мокром асфальтобетоне (рис 9). Как видно из графиков, во всем рассматриваемом диапазоне увеличения времени запаздывания срабатывания клапана модулятора происходит снижение (до 4,9 %) среднереализованного коэффициента сцепления колеса с дорожным покрытием.

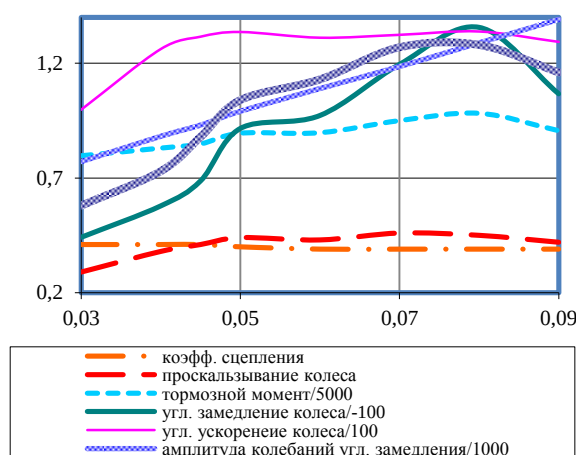


Рис. 8. Изменение среднереализованных значений основных параметров при торможении на мокром асфальтобетоне в результате увеличения времени запаздывания срабатывания клапана модулятора

Это подтверждает отрицательное воздействие анализируемой неисправности на эффективность работы ABS. Следует отметить, что значения остальных среднереализованных параметров во всем рассматриваемом диапазоне превышают свою начальную величину, соответствующую кондиции модулятора. Однако в качестве диагностического признака увеличения времени запаздывания срабатывания клапана модулятора, следует использовать увеличение амплитуды колебаний углового замедления колеса, так как ее изменение во всем диапазоне происходит практически по линейной зависимости, что будет положительно влиять на точность постановки диагноза. Кроме того, данный параметр отвечает требованиям как информативности, так и чувствительности, поскольку его приращение достигает 44,5 %.

В зависимости от заданных начальных условий торможения при помощи микрокомпьютера можно различать режимы торможения (экстренное торможение, служебное торможение, частичное торможение, полное торможение, торможение двигателем, торможение запасной тормозной системой) и запоминать рабочие параметры тормозной системы и ABS автомобиля. Указанные данные сортируются и сохраняются в ПЗУ микрокомпьютера, с учетом моделируемого режима торможения. Пример данных о давлении в тормозном приводе, зафиксированных по четырем колесам, приведен на рисунке далее.

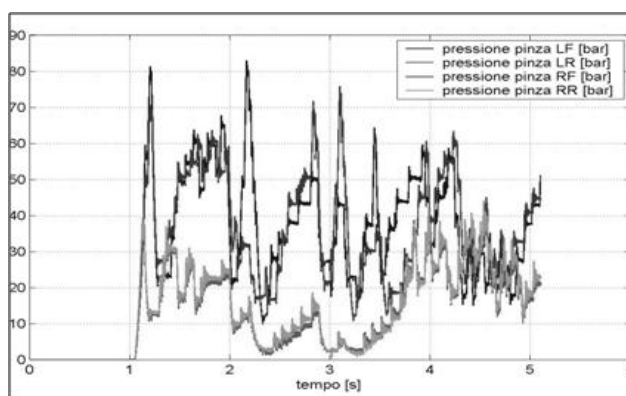


Рис. 9. Давление в тормозном приводе

Данные, получаемые в процессе торможения, записываются и сравниваются с данными, полученными при аналогичных условиях и записанными в ПЗУ ранее. При значительном отклонении микрокомпьютер подает оператору информацию о том, что система электропривода неисправна. При этом, основываясь на полученных данных, система делает заключение о возможных неисправностях.

В случае обнаружения микрокомпьютером неисправности, собранные данные о параметрах работы тормозной системы и ABS могут быть полезны при проведении ремонта и позволят на начальном этапе отследить отклонение рабочих параметров и предупредить отказ какого-либо элемента.

Диагностический комплекс по малейшим отклонениям рабочих процессов автоматизированной тормозной системы автомобиля позволяет определить неисправность на этапе ее зарождения.

Важным отличием от существующих систем диагностики является возможность установления точной неисправности элемента автоматизированной тормозной системы автомобиля, а также установление причины возникновения неисправности. Эффективность процесса диагностики повышается, что приводит к сокращению возможности повторного возникновения неисправности.

Использование диагностической системы в комплексе со стендовой моделью шасси позволяет проводить адаптацию системы, в случае внесения изменений в конструкцию автоматизированной тормозной системы автомобиля производителем.

Библиографический список

1. ГОСТ Р 41.13–99 (Правила ЕЭК ООН №13). Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения механических транспортных средств категорий М, N и O в отношении торможения. – Введен впервые ; введ. 01.07.00. – М. : Стандартинформ, 2006. – 113 с.
2. ГОСТ Р 51709–2001. Автотранспортные средства. Требования безопасности к техническому состоянию и методы проверки. – Введен впервые ; введ. 01.01.02. – М. : Стандартинформ, 2008. – 39 с.
3. Mitsubishi Lancer X Service Manual & Body Repair Manual, MY 2011-2015 [Электронный ресурс]. – 2015. – Режим доступа : http://mmc-manuals.ru/manuals/lancer_x/online/Service_Manual_2008-2012/2015/index_M1.htm
4. **Revin, A.** [t al.] 2018 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 315 012020
5. **Dygalo, V.** [et al.] 2018 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 315 012007
6. **Ревин, А.А.** Комплексное моделирование в цикле проектирования автомобилей и их систем / А.А. Ревин, В.Г. Дыгало // Автомобильная промышленность. – 2002. – №11. – С. 29–30.
7. **Дыгало, В.Г.** Средства виртуальных испытаний автоматизированных тормозных систем / В.Г. Дыгало, А.А. Ревин // Известия Волгоградского государственного технического университета: межвуз. сб. науч. ст.// ВолгГТУ. – Волгоград, 2004. – С. 67–73.

8. **Ревин, А.А.** Виртуальные испытания в цикле проектирования автоматизированных тормозных систем / А.А. Ревин, В.Г. Дыгало // Наука – производству. – 2005. – №1. – С. 43–47.
9. **Дыгало, В.Г.** Стенд для комплексных лабораторных испытаний ЭГТС / В.Г. Дыгало [и др.] // Автомобильная промышленность. – 2006. – № 3. – С. 34–35.
10. **Дыгало, В.Г.** Виртуально-физическая технология лабораторных испытаний систем активной безопасности автотранспортных средств: монография / В.Г. Дыгало, А.А. Ревин; ВолгГТУ. – Волгоград, 2006. – 316 с.
11. **Дыгало, В.Г.** Виртуально-физическая технология моделирования в цикле проектирования автоматизированных тормозных систем / В.Г. Дыгало, А.А. Ревин // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2007. – Т. 8. – № 2. – С. 13–15.
12. **Ревин, А.А.** Комплексная технология моделирования тормозной динамики автомобиля: монография / А.А. Ревин; Волгоград. гос. техн. ун-т. – Волгоград, 2000. – 92 с.
13. **Ревин, А.А.** Исследование тормозной динамики автомобиля методами комплексной технологии моделирования: учеб. пособие / А.А. Ревин, В.Г. Дыгало; Волгоград. гос. техн. ун-т. – Волгоград, 2001. – 122 с.
14. Martin Maier and Klaus Müller, Robert Bosch GmbH, ABS 5.3: The New and Compact ABS5 Unit for Passenger Cars, SAE Technical Paper Series 950757, 1995.
15. Reiner Emig, H. Goebels, and H. J. Schramm, Robert Bosch GmbH, Antilock Braking Systems (ABS) for Commercial Vehicles – Status 1990 and Future Prospects, SAE Technical Paper Series 901177, 1990.
16. Bosch, Automotive Braking Systems, Robert Bosch GmbH, 1995.
17. **Дыгало, В.Г.** Применение электронных компонентов для диагностики тормозных систем автомобиля / В.Г. Дыгало, Е.С. Ларин, Ю.М. Никитин // International Science Project (Финляндия). – 2017. – № 9. – Р. 9–10.

*Дата поступления
в редакцию 30.05.2018*

V.G. Dygalo, E.S. Larin, V.V. Kotov, L.V. Dygalo, A.E. Smochkov, D.S. Dejanov

DIAGNOSTIC COMPLEX OF ACTIVE SYSTEM ACTIVE SAFETY ACTUATORS

Volgograd state technical university

Purpose: The presented approach to the complex diagnostics of the drive of an automated brake system of a car with ABS.

Methodology: We propose to introduce a system that allows to diagnose the drives of active safety systems in the complex.

Research implications: The study was the basis for creating a diagnostic complex, which makes it possible to establish the presence of a malfunction in the early stages.

Conclusions: Modern automated brake control systems with inadequate on-board performance monitoring tools. The created diagnostic complex is designed to solve this problem.

Key words: anti-lock brakes, diagnostics, active safety systems.

УДК 629.113.001

И.С. Жуков, В.Г. Дыгало

**ОЦЕНКА ТЕПЛОВОЙ НАГРУЖЕННОСТИ ПАР ТРЕНИЯ
АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ТОРМОЗНОЙ СИСТЕМЫ АВТОМОБИЛЯ**

Волгоградский государственный технический университет

Изложен подход к оценке тепловой нагруженности элементов тормозного механизма у автомобилей с АБС.

Ключевые слова: автомобиль, антиблокировочная система, тормозной механизм, термическая нагруженность.

Все более широкое оснащение автомобилей автоматизированными тормозными системами, такими как – антиблокировочные системы (АБС), помимо очевидных преимуществ в части активной безопасности, порождает и ряд проблем, обусловленных изменением рабочего процесса. В частности, это относится к получившим популярность в последние годы скоростным автомобилям J-класса – кроссоверам и внедорожникам, которые, как правило, при сохранении скоростного режима обладают повышенной массой по сравнению с обычными легковыми автомобилями. При этом возрастает величина кинетической энергии, которую необходимо погасить в процессе торможения.

Вместе с тем, в отличие от традиционного способа торможения юзом, основная часть кинетической энергии автомобиля с АБС гасится за счет работы трения в тормозном механизме, что неизбежно приводит к увеличению их тепловой нагруженности, особенно при использовании производителями тормозных систем автомобилей, традиционных элементов базовых моделей.

При этом из литературных источников известно, что перегрев пар трения тормозов способствует возникновению критического фединга, сопровождающегося резким снижением (до 50%) коэффициента трения тормозных накладок, а также повышенным изнашиванием контртел, с образованием макросколов [1]. Поэтому необходима оценка тепловой нагруженности пар трения тормозных механизмов автомобилей, оснащенных автоматизированными системами.

Проведенный анализ влияния принципиального изменения рабочего процесса затормаживания колеса автомобиля с АБС на распределение работы, необходимой для гашения кинетической энергии автомобиля, в качестве примера представлен на рис. 1. На графике обозначено: изменение кинетической энергии автомобиля с АБС при торможении с начальной скорости 60 км/ч на сухом асфальтобетоне в процессе торможения (W_k), работа, затрачиваемая на трение в контакте шины с дорогой (ATR) и на гистерезисные потери в шине (AFF), а также поглощаемую в тормозном механизме (ATM).

Из графика видно, что при торможении автомобиля с АБС, в отличие от торможения юзом, основная часть кинетической энергии гасится за счет работы трения в парах трения тормозного механизма. Поэтому, несмотря на развитие технологий проектирования и расчета, оценка вероятности возможного отказа тормозов автомобиля в процессе эксплуатации по причине фединга является актуальной задачей. Важно, чтобы при проектировании тормозных механизмов автомобилей с АБС производители имели возможность оценивать эффективность их работы еще на стадии предпроектного расчета. Расчет средней температуры фрикционных элементов в процессе торможения представляет большой интерес при оценке температурного режима работы тормоза и может быть особенно полезен в случаях, когда непосредственный замер температур в реальных точках контакта и поверхности трения в целом затруднен.

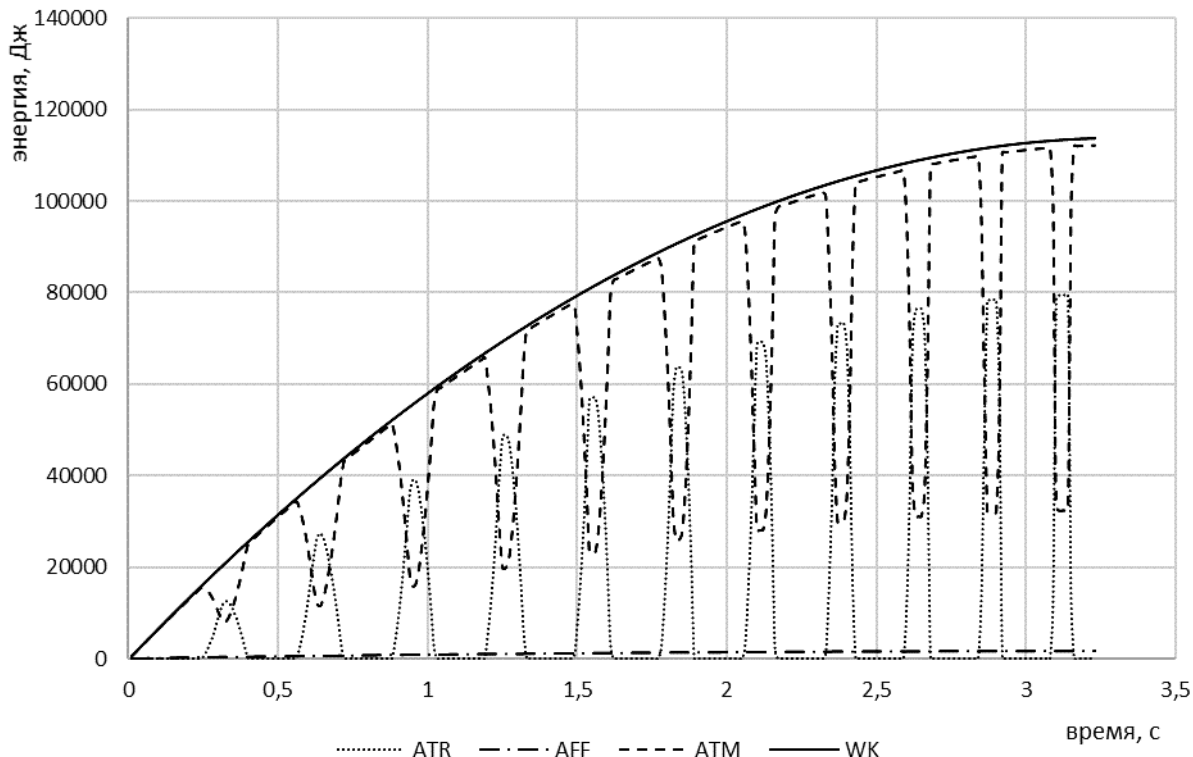


Рис. 1. Распределение работ, затрачиваемых на гашение кинетической энергии автомобиля с АБС в процессе торможения

Для решения этой задачи необходимо иметь расчетные методики, позволяющие анализировать такие рабочие характеристики, как изменение в процессе торможения момента трения, температуры поверхности тормозных дисков, скорости и продолжительности торможения, а также совершаемой работы в зависимости от физико-механических и теплофизических свойств материалов фрикционной пары, а также конструктивных, силовых и кинематических параметров тормоза.

Величину средней температуры пар трения, учитывая кратковременность торможения, без учета теплоотдачи в окружающую среду, можно определить по зависимости, полученной профессором А.В. Чичинадзе [2]

$$g^* = \frac{W_{Т.П.}(1 - \alpha''_{Т.П.})b_1}{\lambda_1 A_{a1} t_T} \left[\frac{1}{3} \tau_N + \tau_w F_{01} \right], \quad (1)$$

где $W_{Т.П.}$ – полная работа торможения; $\alpha''_{Т.П.}$ – коэффициент распределения тепловых потоков; A_{a1} – номинальная площадь трения; t_T – продолжительность торможения; $\lambda_{1,2}$ – коэффициент теплопроводности; τ_N, τ_w – временные характеристики мощности и работы; F_{01} – числа Фурье фрикционных элементов.

В свою очередь, коэффициент распределения тепловых потоков, необходимый для расчета тепловых полей, может быть найден из выражения [2]

$$\alpha''_{Т.П.} = 1 / \left[1 + \frac{b_1 \lambda_2}{b_2 \lambda_1} \left(\frac{\frac{1}{3} \tau_N + F_{02} \tau_w}{\frac{1}{3} \tau_N + F_{01} \tau_w} \right) \right], \quad (2)$$

где $b_{1,2}$ – толщина фрикционных элементов.

Приведенные зависимости позволяют выполнить расчет средней температуры тормоз-

ных дисков с помощью конечно-элементных программных комплексов [6] при известной полной работе торможения. Исходными параметрами в них служат детали и сборка тормозных механизмов, величины тепловых потоков, коэффициентов теплоотдачи. Так, в качестве примера на рис. 2 показана модель распределения температуры тормозного диска автомобиля с АБС при коэффициенте конвективной теплоотдачи $35 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ и температуре окружающей среды 294 К , полученная при использовании конечно-элементного программного комплекса.

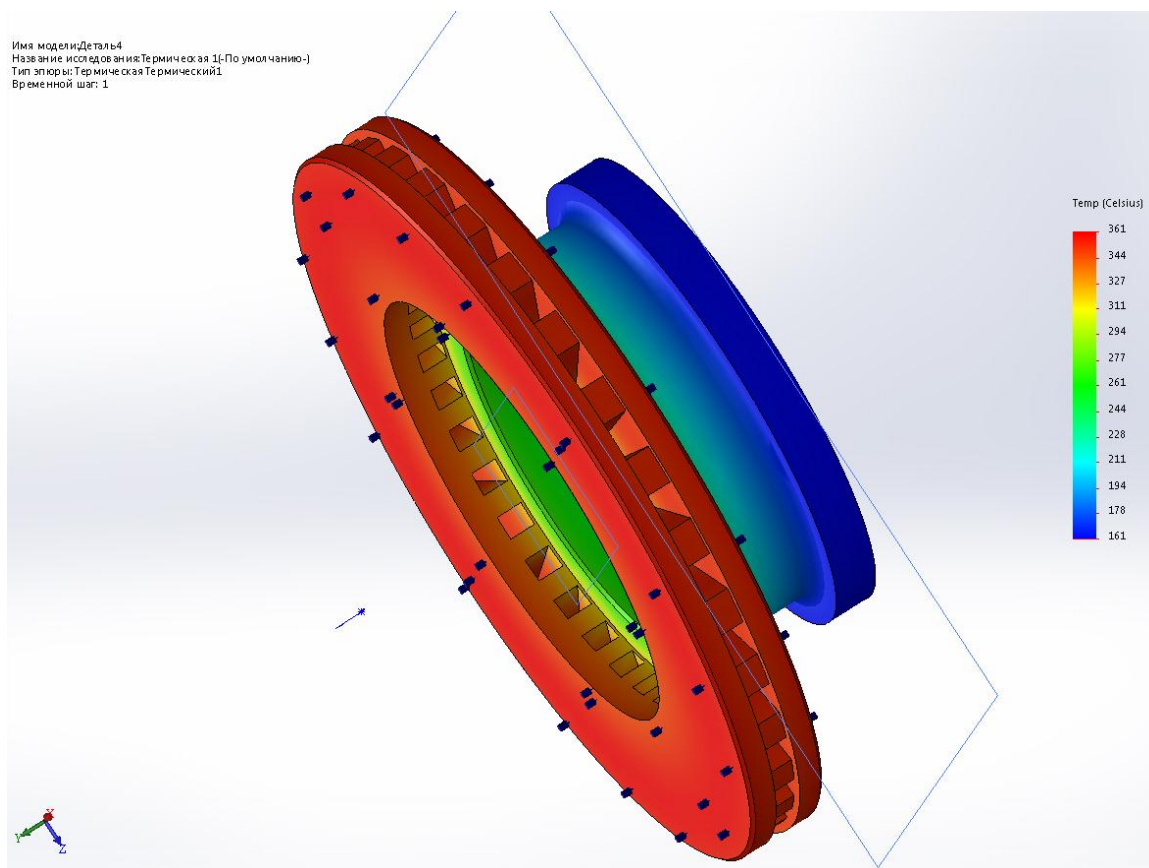


Рис. 2. Модель распределения температуры тормозного диска транспортного средства с АБС

Как было указано ранее, для применения полученных А.В. Чичинадзе [2] зависимостей необходимо нахождение полной работы торможения на основе величины тормозной силы на диске и длины пути трения тормозного диска. На стадии предпроектного анализа для определения тормозной силы возможны несколько подходов. Наиболее перспективным является подход, основанный на определении приведенной к тормозному диску работы торможения, которую с достаточной точностью можно найти через соотношение продольной реакции и тормозного момента. Для этого свяжем их величиной динамического радиуса. Несмотря на условность такого соотношения, этого достаточно для оценки величины необходимой работы. Тормозной момент на колесе определяется по известной зависимости

$$M_{m0} = R_x \cdot r_o. \quad (3)$$

Для определения величины продольной реакции воспользуемся степенью использования максимального коэффициента сцепления ξ_{abc} при функционировании антиблокировочной тормозной системы [3]. Тогда выражение для продольной реакции колеса примет вид

$$R_x = R_z \cdot \varphi_{\max} \cdot \xi_{abc}. \quad (4)$$

Величина ξ_{abc} определится из требований, предъявляемых стандартами к эффективности торможения автомобиля с АБС. Так, для сухого асфальтобетона она должна быть не ниже уровня торможения юзом $\xi_{abc} = 0,9$, для мокрого и укатанного снега $\xi_{abc} = 0,85$. Введение

в расчет данного показателя существенно упрощает процесс расчета и позволяет исключить рассмотрение зависимостей работы алгоритма конкретно взятой антиблокировочной системы, поскольку сам алгоритм и матрица значений блока управления антиблокировочной системы часто являются коммерческой тайной производителей тормозных систем.

Значение тормозной силы по средней окружности тормозного диска найдется из выражения:

$$P_m = 2 \frac{M_{m0}}{r_{duc}}, \quad (5)$$

где r_{duc} – радиус тормозного диска.

С учетом зависимости (4) получим выражение для тормозной силы в виде

$$P_m = 2 \frac{R_z \cdot \varphi_{\max} \cdot \xi_{a6c} \cdot r_d}{r_{duc}}. \quad (6)$$

Для нахождения полной работы трения в тормозном механизме необходимо знать путь трения в паре «тормозной диск – колодка». Теоретические предпосылки для определения пути трения отдельного колеса автомобиля в режиме торможения изложены в работе [5].

Вращение каждого отдельного колеса автомобиля с АБС при торможении характеризуется различным сочетанием скоростных режимов, обусловленных функционированием тормозной системы и контактом шины с дорожным покрытием, что представлено на приведенной на рис. 3 схеме.

При этом можно выделить следующие характерные периоды: затормаживание, растормаживание, блокировка или юз колеса, свободное качение и квазиравномерное движение в области $\dot{\omega}_k \approx 0$.

Каждый период характеризуется различным сочетанием скоростных и нагрузочных показателей. Учитывая кратковременность протекания цикла работы АБС, примем допущение, что каждый период характеризуется установившимся замедлением (ускорением) j_{yct} и средней скоростью.

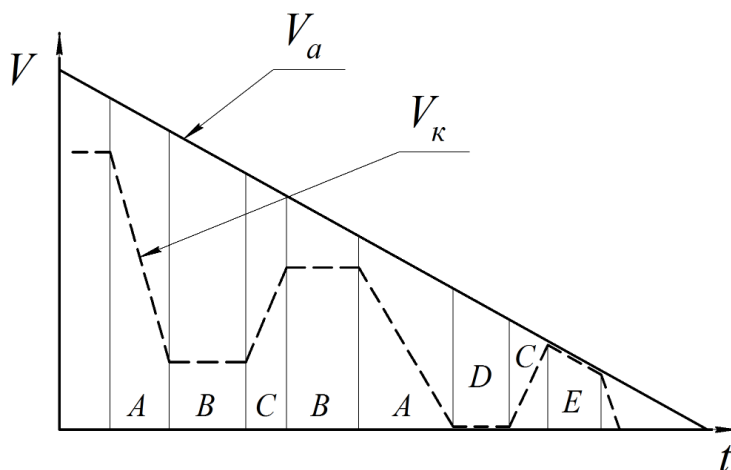


Рис. 3. Варианты периодов при торможении:

A – затормаживание; B – квазиравномерное вращение; C – растормаживание;
D – юз; E – свободное вращение (полное растормаживание);
 V_a – скорость автомобиля; V_k – приведенная радиальная
скорость вращения колеса

При одних и тех же значениях тормозного пути автомобиля с АБС и без неё могут быть реализованы различные характеристики для пар трения «барабан (диск)-накладка» и «шина-дорога». Для расчета пути трения в каждом сопряжении тормозных механизмов «диск-накладка» воспользуемся зависимостью

$$L_{Tp} = (V_{H,K} + V_{K,K})(t_{K,K} - t_{H,K})(r_{\delta} / r_K) / 2, \quad (7)$$

$$\text{или } L_{Tp} = (V_{H,K}^2 - V_{K,K}^2) / 2 j_{уст,K},$$

где $V_{H,K}$, $V_{K,K}$ – радиальная скорость вращения колеса в начале и в конце промежутка времени; $t_{H,K}$, $t_{K,K}$ – моменты времени в начале и в конце промежутка времени; r_{δ} – радиус тормозного барабана; r_K – радиус колеса.

Пути трения для каждого из периодов определяется из приведенных далее зависимостей.

- период затормаживания и растормаживания

$$L_{Tp} = (V_{H,K}^2 - V_{K,K}^2) / 2 j_{уст,K}, \quad (8)$$

где $V_{H,K}$, $V_{K,K}$ – скорость вращения колеса в начале и в конце периода; $j_{уст,K}$ – установившееся ускорение вращения колеса; r_K – радиус колеса; r_{δ} – средний радиус тормозного диска.

- свободное качение колеса $L_{Tp} = 0$;
- блокирование колеса $L_{Tp} = 0$;
- постоянное (квазиравномерное) вращение колеса

$$L_{Tp} = V_{H,K} \cdot t_{\Pi}, \quad (9)$$

где t_{Π} – длительность периода равномерного вращения колеса.

Для нахождения общего пути трения на всех участках просуммируем полученные ранее зависимости

$$L_{Tp,m} = \sum_{i=0}^I L_{TpTi} + \sum_{j=0}^J L_{TpPj} + \sum_{n=0}^N L_{Tp\Pi n}, \quad (10)$$

где $L_{Tp,m}$ – путь трения накладки о барабан; I – количество участков торможения; J – количество участков растормаживания; N – количество участков постоянного качения колеса; L_{TpTi} – путь трения для пары «диск – накладка» на i -м участке торможения; L_{TpPj} – путь

трения для пары «диск – накладка» на j -м участке растормаживания; $L_{Tp\Pi n}$ – путь трения для пары «диск – накладка» на n -м участке торможения постоянного качения колеса.

Окончательно приведенная к тормозному диску работа трения определяется из выражения:

$$W_{T.П.} = L_{Tp} P_m, \quad (11)$$

Вследствие явления несинхронного вращения колес автомобиля в процессе торможения, что обусловлено различными факторами как при наличии АБС, так и без нее, тормозные механизмы даже одной оси автомобиля могут иметь различные показатели работы по пути трения.

Необходимо отметить, что определение полной работы торможения и как следствие определение энергии, погашенной в тормозном механизме, явилось основой для создания компьютерной модели температурного поля тормозного механизма, что в целом дает возможность говорить о системе расчета тепловой нагруженности тормозных механизмов с АБС.

Библиографический список

1. **Безъязычный, В.Ф.** Экспериментальное изучение процессов разрушения поверхностных слоев металла при установившемся процессе фреттинг-изнашивания / В.Ф.Безъязычный, Р.В. Любимов, Тимофеев // Механика и физика фрикционных контактов: сб. научн. трудов Тверского гос. техн. ун-та. – 2000. – Вып. 7. – С. 24–28.
2. **Чичинадзе, А.В.** Тепловая динамика трения / А.В. Чичинадзе. – М.: Наука, 1970. – 171 с.

3. **Ревин, А.А.** Формирование основных эксплуатационных свойств автотранспортных средств в режиме торможения / А.А. Ревин, В.Г. Дыгало // Автомобильная промышленность. – 2014. – № 11. – С. 3–5.
4. **Ревин, А.А.** Влияние рабочего процесса АБС на долговечность элементов шасси автомобиля: монография / А.А. Ревин, М.В. Полуэктов, М.Г. Радченко, Р.В. Заболотный; под ред. А.А. Ревина. – М.: Машиностроение, 2013. – 224 с.
5. **Тумасов, А.В.** Исследование свойств активной безопасности транспортных средств методом имитационного моделирования / А.В. Тумасов [и др.] // Журнал автомобильных инженеров. – 2011. – № 2. – С. 34–37.
6. **Турбин, И.В.** Влияние коэффициента трения на триботехнические характеристики пар трения дискового тормоза / И.В. Турбин, В.Е. Епишкин, Н.С. Соломатин // Перспективные направления развития автотранспортного комплекса: сб. ст. VIII Междунар. научно-производственной конф. – Пенза: Пензенская ГСХА. – 2014. – С. 124–128.
7. **Voloaca, S.** Concerns regarding temperature distribution obtained by experiments and finite element analyses for types of brake discs / S. Voloaca, G. Fratila // U.P.B. Sci, Bull., Series D, Vol. 74, Iss. 3, – 2012. – P. 33.

*Дата поступления
в редакцию 30.05.2018*

I.S. Zhukov, V.G. Dygalo

ESTIMATION OF THERMAL LOADING OF THE FRICTION PAIRS OF THE AUTOMATED BRAKE SYSTEM OF A VEHICLE

Volgograd state technical university

Purpose: Describe the approach for the evaluation of predesign-thermal load of the braking mechanism for vehicles with ABS.

Methodology: A method is proposed for determining the energy quenched in a braking mechanism with ABS using three approaches.

Research implications: The study was the basis for creating a computer model of the temperature field of the braking mechanism, which, on the whole, makes it possible to talk about a system for calculating the thermal loading of braking mechanisms with ABS.

Conclusions: Due to the phenomenon of non-synchronous rotation of the car's wheels during braking, due to various factors, the brake mechanisms of even one axle of the car can have different performance indicators along the friction path.

Key words: car, ABS, brake mechanism, thermal load.

УДК 62-574.5

А.В. Никитин, Д.А. Чистопрудов, С.П. Столяревский

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ПОДДОНЕ КАРТЕРА ДВИГАТЕЛЯ СПЕЦИАЛЬНОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОНЕЧЕТКИХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Фиалиал Военной академии Ракетных войск стратегического назначения
имени Петра Великого, г. Серпухов

Представлена аналитическая модель, описывающая динамику процесса нагрева моторного масла в поддоне картера двигателя внутреннего сгорания специального транспортного средства, гусеничного вездехода гибкими нагревательными элементами, обоснована ключевая роль в ней коэффициента теплоотдачи, приведены результаты его определения в условиях вариации скорости потока масла, температуры окружающей среды, мощности и площади нагревательных элементов, обоснована несостоятельность классических моделей конвективного теплообмена для описания процесса разогрева масла в условиях вариации указанных параметров и описан нейронечеткий математический аппарат, наиболее адекватно решающий данную задачу в условиях минимизации параметрической неопределенности.

Ключевые слова: гусеничный вездеход, специальное транспортное средство, устройство экстренного пуска, моторное масло, процесс прогрева масла в картере ДВС, коэффициент теплоотдачи, нечеткий аппроксиматор по схеме Сугено.

Наиболее актуальной задачей, стоящей перед эксплуатацией гусеничных вездеходов, двухзвенных и других специальных транспортных средств в северных районах страны, является предпусковая подготовка и поддержание температурного режима двигателя внутреннего сгорания (ДВС) в готовности к пуску за минимальное время. В настоящее время комплексно эта задача не решена, т.е. минимизация времени разогрева моторного масла в условиях ограничения по энергетике не проводилась. В [1,2] предложено устанавливать на специальное транспортное средство или гусеничный вездеход устройство, обеспечивающее быстрый разогрев и непрерывное поддержание температуры картерного масла двигателя в прогревом предпусковом состоянии, которое обладает возможностью адаптивного регулирования температуры подогрева масла картера двигателя за счет вариации скорости потока масла w , мощности N и площади F нагревательных элементов. Это позволяет снизить температурную и вязкостную неравномерность разогреваемого масла и повысить эффективность использования нагревательных элементов, выполненных в виде электрически обогреваемых матов, размещенных на внешней стороне поддона картера двигателя. Данное устройство способно обеспечить экстренный пуск двигателя специального транспортного средства или гусеничного вездехода в условиях экстремально низких температур априори в минимальное время.

Однако математический аппарат, описывающий динамику разогрева поддона двигателя транспортного средства данным устройством при изменении w , N , F , на сегодняшний момент отсутствует. Поэтому авторами разработана соответствующая математическая модель, описывающая процесс подогрева моторного масла в поддоне картера двигателя внутреннего сгорания гибкими нагревательными элементами. Основным выражением этой модели является равенство, представленное далее, оно отражает динамические процессы в ходе нагрева моторного масла ДВС транспортного средства. Данная модель представлена в виде дифференциального уравнения, позволяющего определять температуру масла в поддоне двигателя в любой момент времени τ в зависимости от параметров:

$$\frac{dt_m}{d\tau} = \frac{\alpha_{1(w,N,F)}(t_{п(N)} - t_m(\tau))F_{п} - \alpha_2 F_{3м}(t_m(\tau) - t_{окр}) + K_{2(w,N,F)}F_{п}(t_m(\tau) - t_{окр})}{(c_{пп}m_{п} + c_{рм}m_{м} + c_{пу}m_{у} + c_{пи}m_{и})}, \quad (1)$$

где t_m – температура моторного масла, °C; τ – время нагрева, с; α_1 – коэффициент теплоотдачи от поверхности поддона к моторному маслу, Вт/(м²·K); t_n – температура поверхности поддона, °C; F_n – площадь поверхности поддона (утеплителя), м²; K – коэффициент теплопередачи от масла через поверхность поддона (утеплителя) в окружающий воздух, Вт/(м²·°C); $t_{окр}$ – температура окружающей среды, °C; c_{pn} , c_{pm} , c_{py} , c_{pi} – удельная теплоемкость поддона, масла, утеплителя и т.д., Дж/(кг·°C); m_n , m_m , m_y , m_i – масса поддона, масла, утеплителя и т.д., кг.

Коэффициент теплопередачи определяется из выражения

$$K_1 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} \neq \text{const} = f(w, N, F, t_{окр}) \Big|_{\substack{\delta_i = \text{const} \\ \lambda_i = \text{const}}},$$

где $\alpha_{1,2}$ – коэффициент теплоотдачи от масла к поддону и от утеплителя в окружающую среду, Вт/(м²·°C); $\delta_{1,2,...i}$ – толщина стенки поддона, утеплителя и т.д., м; $\lambda_{1,2,...i}$ – коэффициент теплопроводности каждого слоя в рассматриваемой системе, Вт/(м·°C).

Для получения решения (1) необходимо определить коэффициенты теплоотдачи (α), которые являются основной величиной, подлежащей опытному исследованию, в конвективном теплообмене [3].

Значения коэффициента конвективной теплоотдачи могут варьироваться в широких пределах, следовательно, коэффициент теплоотдачи от поддона к моторному маслу существенно влияет на динамику процесса разогрева моторного масла. Ранее не исследовалась зависимость α от w , N , F в условиях экстремально низких температур.

При проведении экспериментальных исследований по определению коэффициента теплоотдачи имелась возможность варьировать только (w , t_m , N , F), непосредственно являющимися управляемыми параметрами устройства экстренного пуска ДВС транспортного средства. Для проведения этого исследования был разработан лабораторный стенд.

Вычисление значений коэффициента теплоотдачи выполнялось по закону Ньютона-Рихмана [5]:

$$\alpha = \frac{N}{dF (t_{n(N)} - t_{m(w,N,F,t_{окр})})}, \quad (2)$$

где N – мощность нагревательных элементов, Вт; dF – площадь поверхности поддона, м².

В рамках исследований было проведено 148 экспериментов в варьируемых интервалах w , t_m , t_n , N и F , результаты которых частично представлены в табл. 1.

Таблица 1

Экспериментальное определение коэффициента теплоотдачи от поддона к моторному маслу при свободно-вынужденной конвекции

№ п/п	w , м/с 0,4... 2	t_m , °C -50...-10	t_n , °C	N , Вт 150... 700	F , м ² 0,2; 0,32; 0,48	$\alpha_{\text{практ}}$, посчитанное по зависимости (2) Вт/(м ² ·°C)
1	0,4	-30	77	700	0,48	21,2
...	...	...	...	...	...	...
148	2	-10	84	150	0,2	40,2

Известно [3, 4], что при свободно-вынужденной конвекции критериальное уравнение имеет вид

$$Nu = c_0 \cdot Re^{c_1} \cdot Pr^{c_2},$$

которое в условиях вариации w , t_m , N , F можно представить как

$$Nu = \frac{\alpha l_0}{\lambda} = c_0(N, F) \cdot Re^{c_1(N, F)}(w, t_m^\circ) \cdot Pr^{c_2(N, F)}(t_m^\circ), \quad (3)$$

где c_0, c_1, c_2 , –коэффициенты, значения которых зависят от конкретных условий конвективного теплообмена [3,4,5]; Nu - критерий Нуссельта; Re - критерий Рейнольдса; Pr - критерий Прандтля; l_0 – характерный линейный размер поддона, м.

Из [4] известно, что критериальные уравнения имеют вид:

$$Pr = \frac{\nu}{a}; \quad Re = \frac{wl_0}{\nu}; \quad Nu = \frac{\alpha l}{\lambda},$$

где λ - коэффициент теплопроводности среды, Вт/м·°C; ν - коэффициент кинематической вязкости среды, м²/с; a - коэффициент температуропроводности среды, м²/с; w - скорость потока масла, м/с.

Целью обработки полученных экспериментальных данных (табл. 1) являлось определение значений коэффициентов c_0, c_1, c_2 , которые, по предположению авторов, зависят от N, F (от w, t_m° зависят Re и Pr), т.е. должно соблюдаться условие

$$\alpha_{\text{инп}}(w, t_m^\circ, N, F) = \alpha_{i_{\text{теор}}}^*(w, t_m^\circ, c_0^*(N, F), c_1^*(N, F), c_2^*(N, F), l_0, \lambda, Re(w, t_m^\circ), Pr(t_m^\circ)).$$

Окончательный вид зависимостей неизвестных коэффициентов (c_0, c_1, c_2) находился с помощью метода наименьших квадратов, т.е. параметрической задачи с целевой функцией

$$W = \sum_{i=1}^k (\alpha_{\text{инп}} - \alpha_{i_{\text{теор}}}^*(w, t_m^\circ, c_0, c_1, c_2, w, N, F, l_0, \lambda, Re, Pr))^2 \rightarrow \min, \quad (4)$$

где k – количество опытов, в нашем случае равно 148.

Необходимым условием экстремума функции W является равенство нулю ее частных производных. Для получения аналитической зависимости $\alpha_{i_{\text{теор}}}^*$, была предпринята попытка решить следующую систему дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \frac{dW}{dc_0} = 0 \\ \frac{dW}{dc_1} = 0 \\ \frac{dW}{dc_2} = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} c_0^* = f_0(N, F) \\ c_1^* = f_1(N, F) \\ c_2^* = f_2(N, F) \end{cases} \Big|_{w, l, \lambda = \text{const.}} \quad (5)$$

В общем виде система (4) не имеет решения, поэтому авторы предложили отказаться от аналитического решения и использовать параметрическую аппроксимацию при условии, что зависимости c_i от N и F представляют собой полиномы второй степени вида

$$c_i = k_0 + k_1 N + k_2 N^2 + k_3 F + k_4 F^2 + k_5 NF.$$

Исследовав возможные виды функционалов, описывающих зависимости c_i от N, F , авторы обнаружили состоятельность следующих выражений (коэффициент детерминации при этом составил 0,96):

$$\begin{cases} c_0(NF) = k_0^{(0)} + \frac{k_1^{(0)} N}{1000} + \frac{k_2^{(0)} N^2}{10^6} + k_3^{(0)} F^2 + \frac{k_3^{(0)} NF}{1000} = f(k_0^{(0)}, k_1^{(0)}, k_3^{(0)}, k_3^{(0)}, N, F); \\ c_1(NF) = k_0^{(1)} + \frac{k_1^{(1)} N}{1000} + \frac{k_2^{(1)} N^2}{10^6} + k_3^{(1)} F^2 + \frac{k_4^{(1)} NF}{1000} = f(k_0^{(1)}, k_1^{(1)}, k_3^{(1)}, k_3^{(1)}, N, F); \\ c_2(NF) = k_0^{(2)} + \frac{k_1^{(2)} N}{1000} + \frac{k_2^{(2)} N^2}{10^6} + k_3^{(2)} F^2 + \frac{k_4^{(2)} NF}{1000} = f(k_0^{(2)}, k_1^{(2)}, k_3^{(2)}, k_3^{(2)}, N, F). \end{cases} \quad (6)$$

Результаты расчета корректировочных коэффициентов для (6) представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Результаты расчета коэффициентов $c_0, c_1, c_2, k_0, k_1, k_2, k_3, k_4$
для определения коэффициента теплоотдачи**

Коэффициенты		k_0	k_1	k_2	k_3	k_4
c_0	2,99	1,64	2,01	0,99	0,56	1,66
c_1	0,33	0,36	0,47	0,63	1,65	1,0
c_2	0,14	0,2	0,09	0,55	0,84	1,0

Используя в качестве невязки выражение (4), удалось при различных начальных условиях (значениях K_i) получить наилучший результат, соответствующий 2,4 (36%), что является неприемлемым.

Поэтому было предложено заменить выражение (4) на следующее:

$$W = \sum_{i=1}^{148} \frac{|\alpha_{\text{теор}} - \alpha_{\text{пр}}|}{\alpha_{\text{пр}}} \rightarrow \min, \quad (7)$$

которое соответствует минимуму средней относительной ошибки аппроксимации.

При, казалось бы, хорошем результате (получилось $\bar{\delta}_\alpha = 10\%$) max ошибка находилась в пределах 32%. Поэтому авторы полученный базисный вариант опять оптимизировали по критерию

$$W = \max \left[\frac{|\alpha - \alpha^*|}{\alpha} \right] \rightarrow \min_{\{K_i\}}. \quad (8)$$

Полученный вариант, тем не менее, также значительно результата не улучшил: $\bar{\delta}_\alpha = 10\%$, $\max \delta_\alpha = 26\%$.

Поэтому авторы предложили решать задачу аппроксимации α от w, t_m, N и F методами нечеткой логики, воспроизводя ее прямым нечетким логическим выводом, реализованным по схеме Сугено. Выбор такой схемы синтеза нечеткого логического вывода обусловлен его простотой реализации и отсутствием необходимости решать задачу кластеризации четырех исходных аргументов в условиях продукции непротиворечивых правил вывода «ЕСЛИ-ТО».

Для вывода по схеме Сугено решается задача по параметрической оптимизации параметров функций принадлежности всех аргументов, и поиска параметров всех уравнений линейных сверток для пространства всех возможных сочетаний этих функций принадлежности.

Поясним. В каждом уравнении линейной свертки участвуют четыре исходных «четких» значения аргументов ($\langle w, t_m, N, F \rangle$), образующих весовую композицию, каждая из которых смещена на некоторое значение. Общий вид i -го уравнения линейной свертки может быть представлен следующим образом:

$$Z^{(i)} = C_0^{(i)} + C_1^{(i)} \cdot w + C_2^{(i)} \cdot t + C_3^{(i)} \cdot N + C_4^{(i)} \cdot F. \quad (9)$$

Количество таких уравнений определяется мощностью декартова произведения, образованного количеством функций принадлежности. Так, например, если у каждого из четырех аргументов будет по две функции принадлежности, то количество правил будет равно:

$$N = 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 = 16. \quad (10)$$

Тогда общее количество неизвестных параметров, вовлеченных в уравнения линейной свертки, равно $5 \cdot 16 = 80$. Если взять в качестве допущения, что функции принадлежности задаются в виде двухпараметрических функций (например, симметричных гауссовских функций), то количество параметров, определяющих особенности их задания, равно $2 \cdot 2 \cdot 4 = 16$ (два параметра по две функции принадлежности на аргумент четыре аргумента всего). Получаемое общее количество подбираемых параметров при этом равно $80 + 16 = 96$, что вполне допустимо при общем объеме в 148 опытов.

Проведя аппроксимацию в условиях двухпараметрической гауссовской функции принадлежности для определенных ранее условий (по 2 функции принадлежности на каждый аргумент), можно получить, что средняя ошибка аппроксимации будет равна 0.32 при максимуме ошибки, равном 1.0646, что составляет 6.3 % от минимального значения α . Качество аппроксимации можно оценить, анализируя формируемые ошибки (рис. 1).

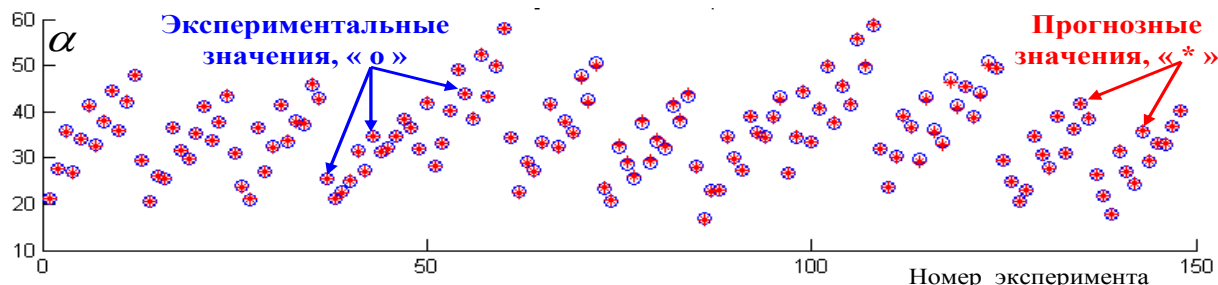


Рис. 1. Ошибки прогнозирования нечеткого логического вывода по схеме 2-2-2-2

Такой результат получается при использовании гибридного алгоритма обучения формируемой нечеткой нейросети, структура которой представлена далее (при использовании алгоритма обратного распространения ошибки результат гораздо хуже: средняя ошибка равна 0,902, а максимальная составляет 12.8 % от минимального значения α).

Если попробовать увеличить параметры функций принадлежности до 3 (например, используя треугольные или гауссовские несимметричные функции принадлежности), то количество подбираемых параметров, характеризующих особенности представления аргументов, в нечетком виде составит $3 \cdot 2 \cdot 4 = 24$, общее количество неизвестных в формируемой параметрической задаче составит $120 + 24 = 144$, что практически равно критическому значению. Использовать такой вариант аппроксимации крайне нежелательно, так как получаемый аппроксиматор будет обладать свойствами переобученной системы. Этого можно избежать, если отказаться от линейных композиций аргументов, заменив их только субъективными для каждого правила свободными от аргументов константами. Размерность задачи при этом составит 40 неизвестных (16 констант + 24 параметра: $3 \cdot 2 \cdot 4$), что вполне приемлемо, а вариации использования различных функций принадлежности приведут к результатам, представленным в табл. 3.

Таблица 3

Вариации использования различных функций принадлежности

Количество функций принадлежности по аргументам	Вид функции принадлежности	Количество параметров функции принадлежности	Средняя ошибка аппроксимации	Максимальная относительная ошибка аппроксимации, %
1	2	3	4	5
Размерность задачи 40 неизвестных (правила в виде констант)				
2-2-2-2	треугольная	3	1.5	22.1
2-2-2-2	симметричная трапецевидная	3	1.75	22.8
Размерность задачи 48=16+4*2*4 неизвестных (правила в виде констант)				
2-2-2-2	треугольная несимметричная	4	1.93	25.5
2-2-2-2	гауссовская несимметричная	4	2.76	40
2-2-2-2	трапецеидальная несимметричная	4	2.35	35.2
2-2-2-2	колокообразная несимметричная	4	2.69	41.2

Окончание табл. 3

1	2	3	4	5
Размерность задачи $51=24+3*2*3+3*3$ неизвестных (правила в виде констант)				
3-2-2-2	треугольная	3	1.46	20.36
2-3-2-2	треугольная	3	1.42	19.06
2-2-3-2	треугольная	3	1.23	20.7
2-2-2-3	треугольная	3	1.44	21.5
3-2-2-2	симметричная трапециевидная	3	1.7	21.1
2-3-2-2	симметричная трапециевидная	3	1.68	20.5
2-2-3-2	симметричная трапециевидная	3	1.67	28.3
2-2-2-3	симметричная трапециевидная	3	1.19	19.8
Размерность задачи $60=24\text{правил}+4*2*3+4*3$, правила в виде констант				
3-2-2-2	треугольная несимметричная	4	1.94	31.4
2-3-2-2	треугольная несимметричная	4	1.92	23.16
2-2-3-2	треугольная несимметричная	4	2.03	30.9
2-2-2-3	треугольная несимметричная	4	1.82	22
3-2-2-2	трапециевидная несимметричная	4	2.31	34.4
2-3-2-2	трапециевидная несимметричная	4	2.4	33.2
2-2-3-2	трапециевидная несимметричная	4	2.19	31.9
2-2-2-3	трапециевидная несимметричная	4	1.64	20.3
Размерность задачи $117=81\text{правило}+3*3*4$ (правила в виде констант)				
3-3-3-3	треугольная	3	0.83	14.13
3-3-3-3	симметричная трапециевидная	3	0.43	8.03
Размерность задачи $129=81\text{правило}+4*3*4$, правила в виде констант				
3-3-3-3	треугольная несимметричная	4	1.78	24.76
3-3-3-3	гауссовская несимметричная	4	1.45	22.12
3-3-3-3	трапециевидная несимметричная	4	1.84	26.6
3-3-3-3	колоколообразная несимметричная	4	1.04	20.75

Из анализа проведенного исследования видно, что использование правил продукции в виде констант – не эффективно (максимальная относительная ошибка прогноза не ниже 8% для 3 параметрической симметричной трапециевидной функции принадлежности аргументов).

В силу этого авторы предложили использовать весовые линейные композиции с двух-параметрическими функциями принадлежности (гауссовская симметричная) по схеме 2-2-2-3, т.е. в 3-х аргументах по 2-е функции принадлежности и в четвертом – 3. Количество правил в такой схеме составит $3*2*2*2=24$, в каждом правиле – по 5 констант (1 свободная и 4 при

аргументах). Количество параметров в уравнениях линейных сверток равно $120=24*5$. Количество подбираемых параметров для функций принадлежности равно $18=2*2*3+3*2$. Размерность параметрической задачи 138 ($120+18$), что вполне приемлемо для исключения эффекта переобучения. Варианты полученных аппроксиматоров представлены в табл. 4.

Таблица 4

Варианты аппроксиматоров

Количество функций принадлежности по аргументам	Вид функции принадлежности	Алгоритм обучения	Средняя ошибка аппроксимации	Максимальная относительная ошибка аппроксимации, %
Размерность задачи 138 неизвестных (правила в виде линейных уравнений)				
3-2-2-2	гауссовская симметричная, 2 параметра	обратного распространения ошибки	0.89	16.3
2-3-2-2			0.92	15.4
2-2-3-2			0.66	6.58
2-2-2-3			0.95	16.15
3-2-2-2	гауссовская симметричная, 2 параметра	гибридный	0.32	5.7
2-3-2-2			0.34	6.54
2-2-3-2			0.065	1.24
2-2-2-3			0.091	2.32

Самый удачный аппроксиматор соответствует гибриднему алгоритму обучения с конфигурацией 2-2-3-2 (при аргументах $\langle w, t_m, N, F \rangle$) с гауссовскими симметричными двухпараметрическими функциями принадлежности [8]:

$$\mu_{\tilde{w}}(w, \bar{w}, \sigma_w) = e^{-\frac{(w-\bar{w})^2}{\sigma_w^2}}. \quad (11)$$

Параметры этого нечеткого логического вывода получены посредством обучения нейронечеткой нейросети, структурная схема которой представлена на рис. 2.

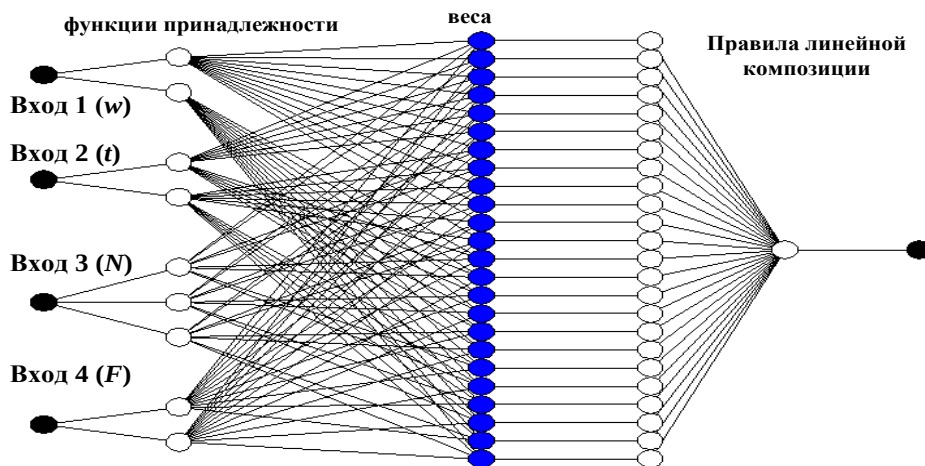


Рис. 2. Структура нейронечеткой нейросети, вес которой соответствует параметрам наилучшего аппроксиматора

Веса комбинаций функций принадлежности получают путем перемножения значений нечетких значений аргументов, полученных на выходе операций приведения к нечеткости в рамках конкретной функции принадлежности. Такая операция называется операцией «логического И». Сочетания вовлеченных в формирование таких весов номеров функций принадлежности формируют пространство из 24 вариантов и, следовательно, 24 правила линейной композиции по форме (9) и представлены в табл. 5.

Таблица 5

Правила линейной композиции

№ п/п	Вход 1 (w)	Вход 2 (t)	Вход 3 (N)	Вход 4 (F)
1	$\mu_{\tilde{w}}(w)_1$	$\mu_{\tilde{t}}(t)_1$	$\mu_{\tilde{N}}(N)_1$	$\mu_{\tilde{F}}(F)_1$
2	$\mu_{\tilde{w}}(w)_1$	$\mu_{\tilde{t}}(t)_1$	$\mu_{\tilde{N}}(N)_1$	$\mu_{\tilde{F}}(F)_2$
3	$\mu_{\tilde{w}}(w)_1$	$\mu_{\tilde{t}}(t)_1$	$\mu_{\tilde{N}}(N)_2$	$\mu_{\tilde{F}}(F)_1$
...	...	...	...	...
24	$\mu_{\tilde{w}}(w)_2$	$\mu_{\tilde{t}}(t)_2$	$\mu_{\tilde{N}}(N)_3$	$\mu_{\tilde{F}}(F)_2$

Значения параметров полученного нечеткого логического вывода представлены в табл. 6.

Таблица 6

Значения параметров полученного нечеткого логического вывода

№ п/п	Аргумент	Параметры функции принадлежности		C_1	C_2	C_3	C_4	C_0	Композиция функций принадлежности
		сигма	среднее						
1	$\mu_{\tilde{w}}(w)_1$	1.009	0.4179	10.09	-0.0119	0.05821	-38.98	8.608	$w_1-t_1-N_1-F_1$
2	$\mu_{\tilde{w}}(w)_2$	0.8703	1.71	17.87	-2.876	0.09677	0.07929	0.1652	$w_1-t_1-N_1-F_2$
3	$\mu_{\tilde{t}}(t)_1$	17.01	-49.97	28.36	0.5368	0.05576	-42.41	34.24	$w_1-t_1-N_2-F_1$
4	$\mu_{\tilde{t}}(t)_2$	16.96	-9.973	-11.42	0.6873	0.1135	-1.604	-3.342	$w_1-t_1-N_2-F_2$
5	$\mu_{\tilde{N}}(N)_1$	116.8	150	24.21	0.8442	0.08855	2.279	3.392	$w_1-t_1-N_3-F_1$
6	$\mu_{\tilde{N}}(N)_2$	116.8	425	12.05	-0.8605	-0.0817	1.785	3.719	$w_1-t_1-N_3-F_2$
7	$\mu_{\tilde{N}}(N)_3$	117	700	21.64	0.1001	0.03226	9.526	16.16	$w_1-t_2-N_1-F_1$
8	$\mu_{\tilde{F}}(F)_1$	0.1505	0.2265	-7.593	2.766	0.1474	-0.5605	-1.168	$w_1-t_2-N_1-F_2$
9	$\mu_{\tilde{F}}(F)_2$	0.026	0.5364	24.08	0.6533	0.06465	-77.87	29.09	$w_1-t_2-N_2-F_1$
10				33.14	0.8021	0.07137	11.37	23.68	$w_1-t_2-N_2-F_2$
11				31.53	1.016	0.09991	-12.04	-20.72	$w_1-t_2-N_3-F_1$
12				-19.42	-0.8248	0.04209	-12.65	-26.35	$w_1-t_2-N_3-F_2$
13				9.978	0.02948	-0.0215	95.83	4.182	$w_2-t_1-N_1-F_1$
14				-19.76	0.1145	-0.1901	0.07093	0.1478	$w_2-t_1-N_1-F_2$
15				18.7	0.2134	0.06479	-113.6	11.09	$w_2-t_1-N_2-F_1$
16				1.991	-2.578	-0.0216	-1.443	-3.007	$w_2-t_1-N_2-F_2$
17				14.53	1.003	0.08865	-0.8748	6.705	$w_2-t_1-N_3-F_1$
18				8.148	2.88	0.1938	1.606	3.346	$w_2-t_1-N_3-F_2$
19				9.989	0.09552	0.02426	51.83	-0.131	$w_2-t_2-N_1-F_1$
20				12.4	0.1784	-0.2127	-0.526	-1.096	$w_2-t_2-N_1-F_2$
21				10.48	0.3314	0.09322	-142	25.69	$w_2-t_2-N_2-F_1$
22				17.63	-2.644	0.03867	10.66	22.2	$w_2-t_2-N_2-F_2$
23				14.65	1.109	0.1244	-29.46	-46.75	$w_2-t_2-N_3-F_1$
24				-11.72	2.951	0.1534	-11.86	-24.7	$w_2-t_2-N_3-F_2$

Общая схема полученного нечеткого логического вывода представлена на рис. 3 и реализует выражение:

$$\alpha^*(w, t, N, F) = \frac{\sum_{i=1}^{24} \left(\text{вес}_i(w, t, N, F) \cdot \left[C_0^{(i)} + C_0^{(i)} \cdot w + C_1^{(i)} \cdot t + C_2^{(i)} \cdot N + C_3^{(i)} \cdot F \right] \right)}{\sum_{i=1}^{24} \text{вес}_i(w, t, N, F)},$$

$$\text{вес}(i, w, t, N, F) = \text{вес}(b, c, d, e, w, t, N, F) = \mu_{\tilde{w}}(w) \cdot b \cdot \mu_{\tilde{t}}(t) \cdot c \cdot \mu_{\tilde{N}}(N) \cdot d \cdot \mu_{\tilde{F}}(F) \cdot e, \quad (12)$$

где b, c, d, e – индексы из последнего столбца предыдущей таблицы, а функции принадлежности – двухпараметрические симметричные гауссовские функции, заданные в форме (11).

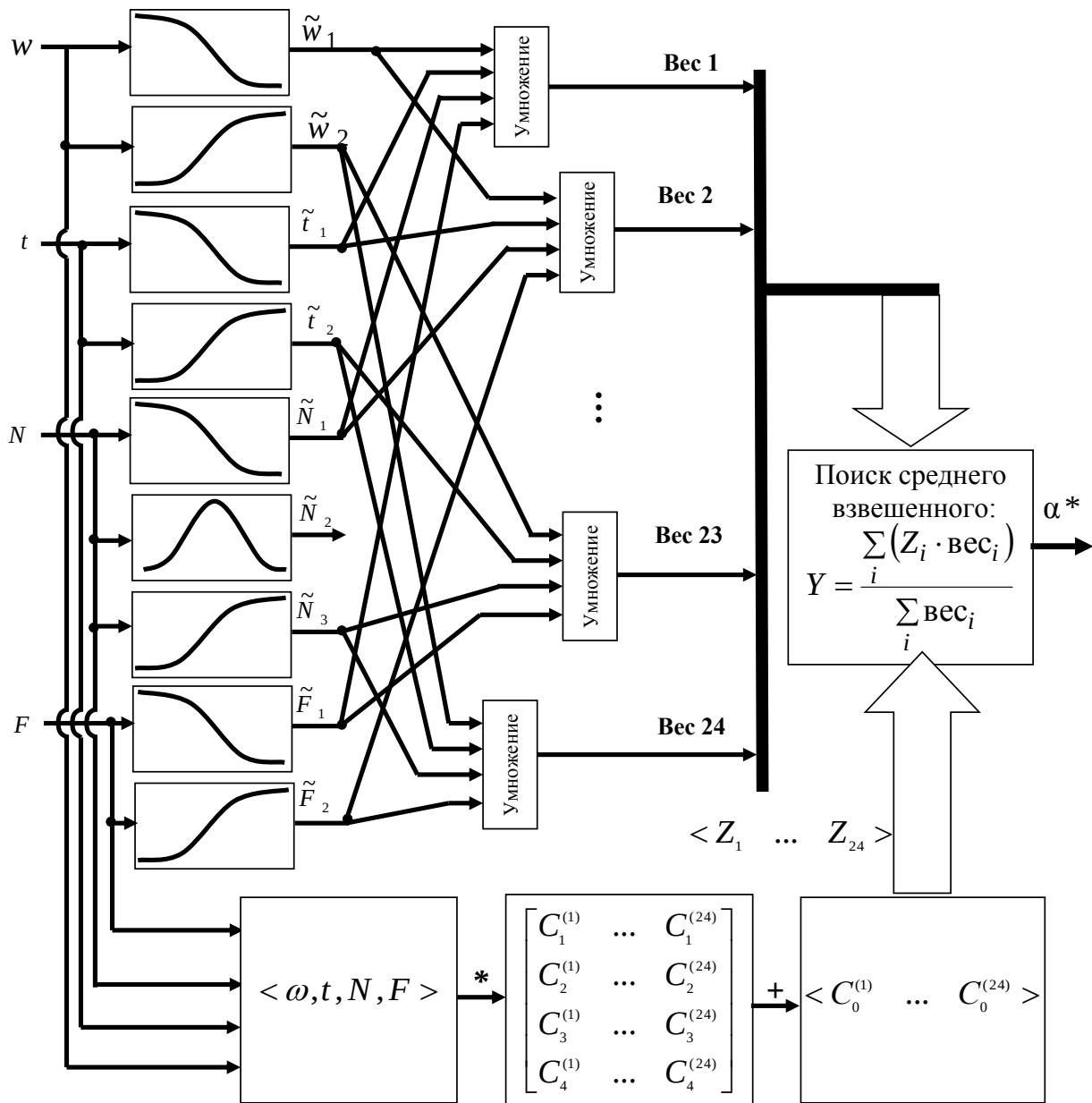


Рис. 3. Структурная схема полученного нечеткого логического вывода, аппроксимирующего исходные данные с наилучшей точностью

Решение поставленной задачи продиктовано необходимостью решить обратную задачу по поиску закона изменения мощности N от параметров $(\langle w, t_m, \alpha, F \rangle)$. Это возможно только при условии, что найденный закон изменения α от $(\langle w, t_m, N, F \rangle)$ не содержит в себе сложных нелинейных составляющих. Для оценивания качественной характеристики полученной зависимости необходимо проанализировать как меняется α в зависимости от изменения пар аргументов при условии, что оставшиеся аргументы заморожены на середине своих возможных значений.

Пусть под первым входом понимается аргумент w , под вторым – t_m , под третьим – N и под четвертым – F . Тогда при наблюдении динамики изменения α от $(\langle w, t_m, N, F \rangle)$ можно получить шесть частных зависимостей (рис. 4).

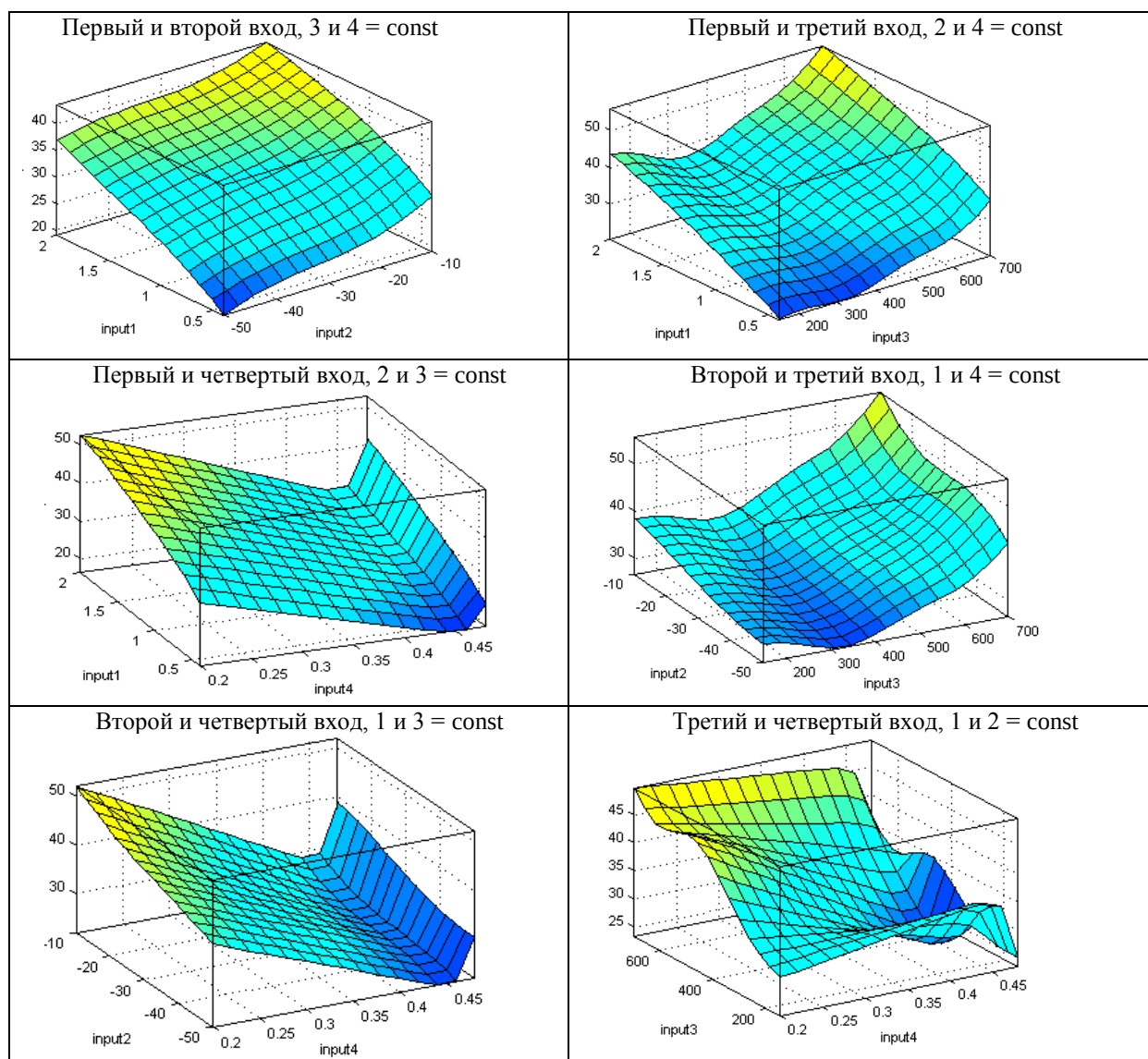


Рис. 4. Динамика изменения α от $\langle w, t_m, N, F \rangle$

Из анализа представленных зависимостей предполагается, что решение обратной задачи по поиску $N \langle w, t_m, \alpha, F \rangle$ - не вызовет трудностей, так как особых нелинейностей нет. Кроме того, очевидно, что из анализа представленных поверхностей можно определиться с границами кластеров аргументов $\langle w, t_m, \alpha, F \rangle$, что позволит решить обратную задачу посредством нечеткого логического вывода по схеме Мамдани.

Выводы

Итак, для решения задачи управления режимом работы устройства для подогрева масла в поддоне двигателя специального транспортного средства или гусеничного вездехода необходимо осуществить поиск зависимости мощности нагревательных элементов от варьируемых факторов, к которым относятся w, t_m, F . Авторы провели экспериментальное исследование, в рамках которого указанные компоненты выступали в роли аргументов. Попытки поиска аналитической зависимости при нахождении выражения, в которое вовлечены эти переменные, дало минимальную среднюю относительную ошибку в 10%, что авторами считается неприемлемо. Тем не менее, указанный результат полностью подтверждает качество проведенных натурных испытаний и актуализирует поиск закона, описывающего изменения коэффициента теплоотдачи от w, t_m, N, F с общей ошибкой менее 5%. Эта задача является классической задачей об аппроксимации, для решения которой обычные методы не дали

удовлетворительного результата, в связи с чем авторы нашли ее решение в области нейронечеткой математики.

В рамках этого подхода для эмпирических данных, описывающих зависимость α от w , t_m , N , F , авторы обосновали структуру нечеткого логического вывода по схеме Сугено, использование которого позволило снизить max ошибку аппроксимации до значения ниже 1,5 % с 26%.

Применение данного устройства и контроллера управления им на специальных транспортных средствах или гусеничных вездеходах, работающих в условиях Крайнего Севера в составе автотранспортного предприятия, позволит существенно снизить затраты на эксплуатацию транспортных средств и увеличить срок службы двигателей, исключив их непрерывную работу в зимний период.

Библиографический список

1. Пат. на полезную модель № 121864. Устройство для предпускового подогрева картерного масла двигателя внутреннего сгорания: опубл. 10.10.2012.
2. Пат. на полезную модель № 133201. Устройство для предпускового подогрева картерного масла двигателя внутреннего сгорания: опубл. 10.10.2013.
3. Брюханов, О.Н. Тепломассообмен / О.Н. Брюханов, С.Н. Шевченко. – М.: ИНФРА-М, 2013. – С. 180–192.
4. Михеев, М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев. – М.: Энергия, 1977. – С. 34–101.
5. Осипова, В.А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена / В.А. Осипова. – М.: Энергия, 1979. – С. 169.
6. Лыков, А. В. Тепломассообмен: справочник / А. В. Лыков. – М.: Энергия, 1972.
7. Тепло-и-массообмен. Теплотехнический эксперимент: справочник / под ред. В. А. Григорьева, В. М. Зорина. – М.: Энергоиздат, 1982.
8. Ковальков, Д.А. Теория поиска и принятия решений / Д.А. Ковальков, Д.А. Чистопрудов. – Серпухов: филиал Военной академии Ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого, 2016. – С. 248–294.

*Дата поступления
в редакцию 15.05.2018*

A.V. Nikitin, D. A. Chistoprudov, S. P. Stolyarevskiy

IDENTIFICATION OF THERMAL PROCESSES IN THE OIL SUMP OF THE ENGINE SPECIAL VEHICLES BY USING NEURO MATHEMATICAL MODELS

Branch of the military Academy of strategic Missile forces
named after Peter the Great, Serpukhov

Purpose: after processing the results of the experiment, to develop a mathematical model that can be used to determine the heat transfer coefficients from the engine crankcase to the engine oil pan to solve the equation of the dynamics of the engine oil heating.

Design/methodology/approach: classical regression analysis methods, such as least squares and polynomial approximation, were used. However, they did not give the expected result when processing experimental data. Therefore, the fuzzy logical inference method based on the Sugeno scheme was applied.

Results: The use of this device and the control controller on special vehicles or tracked vehicles operating in the Far North as part of the motor company will significantly reduce the cost of operation of vehicles and increase the service life of engines, eliminating their continuous operation in the winter.

Key words: tracked vehicle, special vehicle, device, emergency start, engine oil, process heat the oil in the crankcase of the internal combustion engine, the heat transfer coefficient, fuzzy approximator according to the scheme of Sugeno.

УДК 621.113

А.А. Пикулькин¹, Л.А. Бердников¹, М.Г. Корчажкин¹, Л.А. Захаров¹, П.И. Бажан²**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЫШЕНИЯ ТЕРМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ
ИЗОЛЯЦИИ ЦЕНТРАЛЬНОГО КОРПУСА ТУРБОКОМПРЕССОРА
АВТОМОБИЛЬНЫХ ДВС**

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева¹,
Центр разработки Правил в структуре
Верхне-Волжского филиала Российского Речного Регистра²

Рассмотрено применение тепловых экранов для снижения теплопередачи на центральный корпус турбокомпрессора от отработавших газов. Предложены способы повышения термического сопротивления тепловых экранов. Представлен вариант доработки корпуса турбинной части турбокомпрессора для обеспечения эффективности теплового экрана. Представлен перечень основных параметров турбокомпрессора и указаны их допустимые пределы для безотказной работы. Проанализированы наиболее неблагоприятные эксплуатационные режимы работы двигателя и турбокомпрессора, ведущие к отказам.

Ключевые слова: турбокомпрессор, тепловой экран, термическое сопротивление, критический режим, температура масла, узел подшипников, надежность, безотказность, холодный пуск.

Объектом исследования являются турбокомпрессоры радиального типа (ТКР) как для дизельных, так и для искровых ДВС. Обобщение объекта исследования объясняется аналогичной конструкцией рассматриваемых частей турбокомпрессора и одним принципом работы узлов. Поэтому рассматриваемые вопросы, и выработанные в дальнейшем технические меры актуальны для большей части ТКР, несмотря на широкое разнообразие моделей турбокомпрессоров, независимо от размеров или производителя. Наиболее распространенный способ теплового изолирования центрального корпуса – применение тепловых экранов, которые имеют наибольшее значение в снижении теплопередачи на центральный корпус от отработавших газов и сопряженных частей корпуса турбины.

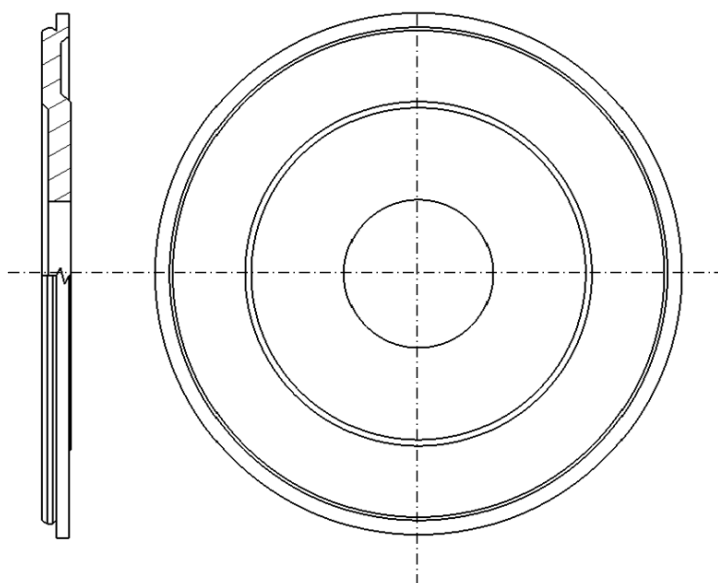


Рис. 1. Тепловой экран турбокомпрессора ТКР 7Н-2А

В данной статье предлагается конструкция теплового экрана со значительно повышенным термическим сопротивлением, применяемая в турбокомпрессорах, изначально пред-

полагающих простую - практически плоскую форму такого экрана, примером могут служить широко применяемые модификации турбокомпрессоров ТКР-7.

За геометрическую основу построения новой конструкции взят тепловой экран турбокомпрессора ТКР 7Н-2А.

Новый экран должен иметь аналогичные размеры, но обладать большим термическим сопротивлением. Исходный экран выполнен из чугуна с коэффициентом теплопроводности λ около 50 Вт/м·К, что свидетельствует о малом термическом сопротивлении слоя, которое равно отношению толщины слоя к коэффициенту теплопроводности материала слоя: $R_C = \frac{s}{\lambda}$.

В конструкции нового экрана использован широко применимый в технике метод – использование газовой (воздушной, $\lambda=0,03...0,05$ при температурах 100...500 °С соответственно) прослойки, причем в предлагаемом варианте внутренняя полость сообщается с окружающим воздухом для обеспечения возможности течения воздуха внутри экрана. Предлагаемая конструкция такого экрана представлена на рис. 2.

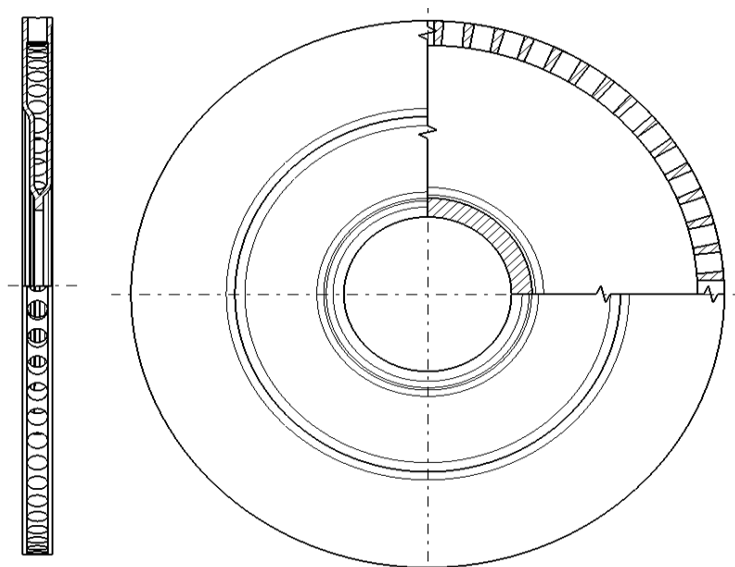


Рис. 2. Пример теплового экрана турбокомпрессора с повышенным термосопротивлением

Тепловой экран вкладывается в проточку в корпусе-улитке турбинной части и прижимается вместе с центральным корпусом шестью болтами со специальными пластинами. Применение данного экрана требует незначительных изменений корпуса турбинной части, а именно: в промежутках между крепежными болтами обеспечивается открытие торцевой части теплового экрана для движения воздуха (рис. 3).

Эксплуатационные методы не предполагают значительного изменения в конструкции эксплуатируемого объекта, а влияние на процессы технического состояния объекта обеспечивается путем применения эксплуатационных материалов с иными характеристиками, изменения периодичности и содержания технического обслуживания, учет конкретных условий эксплуатации, обеспечение необходимых условий стоянки, хранения, исключения неблагоприятных режимов работы.

Таким образом, эксплуатационные меры предполагают оптимизацию внешних воздействий на турбокомпрессор. Точкой отсчета в данном аспекте надежности является ресурс агрегата при идеальных условиях обслуживания и эксплуатации.

Многие применяемые эксплуатационные меры широко известны и не нуждаются в представлении в данной работе (обеспечение работы ДВС без нагрузки перед остановкой, своевременная замена моторного масла и использование масла соответствующего качества, контроль за состоянием воздушного фильтра, воздухопроводов и т.д.)



Рис. 3. Изменения в корпусе турбинной части ТКР 7 для обеспечения эффективности теплового экрана

Любой ТКР работает в строго определенной совокупности диапазонов параметров; выход за допустимые пределы одного или нескольких ведет либо к необратимым негативным изменениям в агрегате, либо сразу к его отказу. Таким образом, путем исключения таких режимов работы возможно значительно продлить ресурс турбокомпрессора.

Можно выделить два основных вида способов исключения критических режимов работы. К первому относится измерение параметров и сигнализирование о выходе за допустимые пределы. В данном случае все непосредственные решения принимаются водителем или другими лицами. Другой случай – автоматизация коррекции параметров путем обработки системой управления полученных данных. Второй способ ввиду развития и широкого распространения электронных систем управления применяется на большинстве современных автомобилей.

Для ТКР, главным образом, имеют значение следующие параметры:

- 1) давление масла на входе в ТКР;
- 2) температура масла на входе в ТКР;
- 3) температура отработавших газов на входе в ТКР;
- 4) давление во входном патрубке (за воздушным фильтром);
- 5) давление воздуха в нагнетательной магистрали.

Параметр 4 изменяется со степенью загрязнения воздушного фильтра, и его своевременная замена обеспечивает поддержание давления в норме. Снижение пропускной способности фильтра, как и уменьшение давления в нагнетательной магистрали (параметр 5), может вызвать значительное увеличение частоты вращения ротора вплоть до величин, вызывающих выход из строя ТКР. Кроме того, данные неисправности ухудшают характеристики ДВС.

Температура отработавших газов на входе в ТКР (параметр 3), кроме режима работы двигателя, зависит от типа ДВС, особенностей конструкции и настройки, степени форсирования. Данные особенности учтены при подборе ТКР к двигателю, но изменение температуры ОГ может быть вызвано также и некачественным топливом, изменением угла опережения впрыска или зажигания, нарушением фаз газораспределения. Как показывают исследования, данный параметр напрямую влияет на температуру, как ротора, так и корпуса подшипников. Поэтому значение температуры выхлопных газов крайне важно с точки зрения надежности турбокомпрессора.

Параметры 1 и 2 также зависят от конструкции и состояния двигателя, а также состояния маслоподающей магистрали. Давлением масла определяется расход масла через

данный турбокомпрессор. Расход непосредственно влияет на интенсивность охлаждения деталей ТКР, а также на повышение температуры масла в связи с передачей тепла. Температура масла на входе также определяет интенсивность теплообмена, непосредственно влияет на температуру масла в подшипниках, таким образом, обуславливая условия трения. Поэтому параметры 1 и 2 имеют большое значение в обеспечении продолжительной работы ТКР. Следует отметить, что в совокупности параметры 1, 2, 3 влияют также на сроки службы масла, ускоряя или замедляя процессы разрушения присадок и окисления масла.

Таким образом, имея информацию о величине параметров 1–6, а также определив их допустимые диапазоны, возможно исключить неблагоприятные для турбокомпрессора режимы работы при эксплуатации. Определение допустимых параметров – отдельная задача, исходными данными в которой являются характеристики ДВС и ТКР, применяемые масла и т.д.

С целью упрощения контроля над тепловым состоянием ТКР, имеется возможность объединить параметры 1 – 3. В данном случае речь идет о температуре масла на стоке из ТКР. На этот параметр влияет как температура масла на входе, давление (расход) масла, так и температура газов в ТКР. Температура масла на сливе - наиболее общий параметр, точно характеризующий тепловое состояние подшипникового узла и турбокомпрессора в целом.

Измерение температуры масла в сливной магистрали турбокомпрессора возможно обеспечить путем внедрения в нее температурного датчика, необходимо учесть, что трубка магистрали не заполнена маслом полностью, поэтому следует предусмотреть специальную нишу для скопления масла, стекающего по стенкам, что обеспечивает необходимые условия для получения верных значений температуры, что показано на рис. 4.

Данные о температуре могут быть использованы для отображения указателем, сигнальной лампой с заданным температурным порогом включения, блоком управления для автоматической корректировки нагрузки на ДВС и т.д.

Таким образом, появляется возможность контроля превышения температуры масла допустимых значений. Это особенно актуально для двигателей грузовых автомобилей и тракторов, так как при их эксплуатации силовой агрегат продолжительное время работает на режимах максимальной мощности. Например, турбодизель трактора или карьерного самосвала может работать на режимах, близких к максимальной мощности в течение долгого времени, необходимого для преодоления расстояния гона на пахоте либо подъема. Этого времени достаточно для полного разогрева как всех деталей силовой установки, так и масла, оказывает при этом негативное влияние на надежность и долговечность ТКР, что подтверждается результатами анализа отказов в эксплуатации.

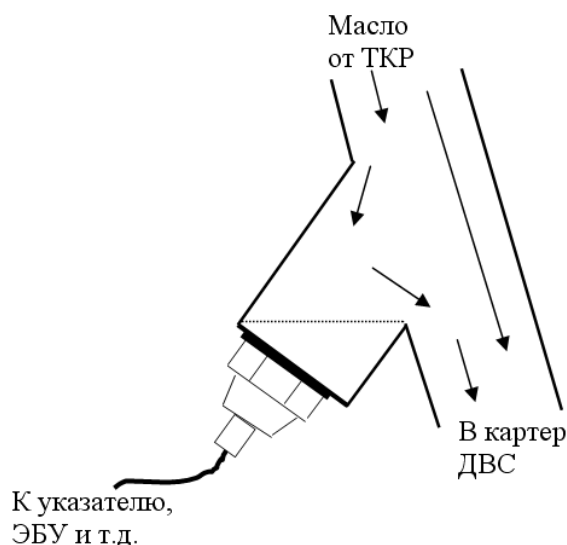


Рис. 4. Схема установки датчика температуры масла в сливную магистраль ТКР

Одним из наиболее неблагоприятных эксплуатационных режимов работы автомобиль-

ного двигателя, оказывающих влияние на надежность и долговечность узла подшипников ТКР, является режим пуска, особенно при отрицательных температурах. В этих условиях имеет место значительная задержка поступления масла к подшипникам турбокомпрессора, обусловленная как гидравлическим сопротивлением трубопроводов как на линии всасывания, так и на линии нагнетания. Недостаточное количество масла приводит к изменению гидродинамических условий работы подшипников ТКР, создавая предпосылки для отказа. Как правило, турбокомпрессор является наиболее удаленной от насоса точкой смазки (рис. 5). Это обстоятельство должно учитываться при организации подачи масла к агрегату.

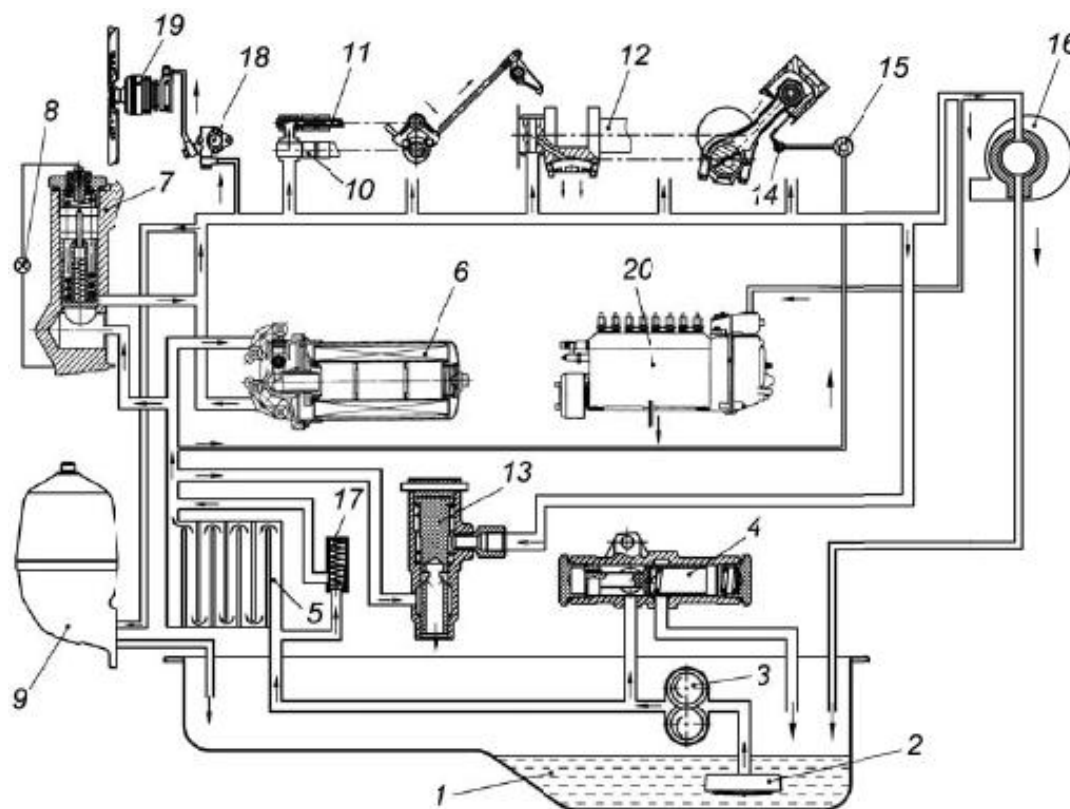


Рис. 5. Схема системы смазки двигателя ЯМЗ с односекционным масляным насосом и жидкостно-масляным теплообменником:

1 – масляный картер; 2 – маслозаборник; 3 – масляный насос; 4 – редукционный клапан; 5 – жидкостно-масляный теплообменник; 6 – фильтр очистки масла; 7 – перепускной клапан; 8 – сигнальная лампа фильтра; 9 – фильтр центробежной очистки масла; 10 – распределительный вал; 11 – ось толкателей; 12 – коленчатый вал; 13 – дифференциальный клапан; 14 – форсунка охлаждения поршней; 15 – клапан системы охлаждения поршней; 16 – турбокомпрессор; 17 – перепускной клапан теплообменника; 18 – включатель привода вентилятора; 19 – привод вентилятора; 20 – ТНВД

Как показывают испытания двигателя ЯМЗ 238 и ТКР, при температуре $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ при пуске и работе на холостом ходу с частотой вращения 1400–1500 об/мин, нарастание давления масла в турбокомпрессоре происходит через 0,5–2 мин после запуска в зависимости от характеристик и состояния масляного фильтра; подача масла в магистраль в место отбора на ТКР происходила в среднем через 16 с с момента пуска. Учитывая повышенную нагрузку на двигатель в таких условиях, по сравнению с работой на холостых оборотах прогретого ДВС, создаются условия для ускоренного износа подшипников ТКР с дальнейшим развитием негативных последствий. При этом увеличение диаметров маслоподводящих каналов уменьшает гидравлическое сопротивление, но увеличивает время на их заполнение.

Недостаточная подача масла при достаточно высокой частоте вращения ротора приводит к потере устойчивости масляного слоя в узле подшипников. Это усугубляется

почти полным отсутствием демпфирования в масляном слое, в результате чего отмечается мгновенное возрастание амплитуды прецессионного движения конца вала ротора и уменьшение частоты его вращения. В этот момент на подшипники ТКР передаются обусловленные значительным уменьшением вязкости масла из-за возрастания температуры дополнительные нагрузки из-за большой амплитуды прецессирования ротора. Эти нагрузки приводят к контактированию поверхностей трения. При осмотре деталей узла подшипников было отмечено засветление участков контакта.

При длительном контактировании поверхностей появляются натир, а в случае наличия в масле абразивных частиц – риски. Последовательное накопление натиров и рисков приводит к качественным изменениям в работе сопряженных поверхностей узла подшипников и, в конечном итоге, к возникновению задиров и последующему отказу подшипников ТКР. Приведенная физическая модель отказа подтверждается материалами эксплуатации и проведенных стендовых испытаний.

Неблагоприятные обстоятельства, сопутствующие холодному пуску, учтены в рекомендациях для эксплуатации двигателей зарубежных фирм: Каминс, Катерпиллер, Скания и др. Например, на двигателях Скания ограничен верхний предел частоты вращения в течение 30 с после пуска, и составляет 1000 об/мин. Фирмы Каминс и Катерпиллер не допускают резкого повышения частоты вращения коленчатого вала двигателя в период после пуска.

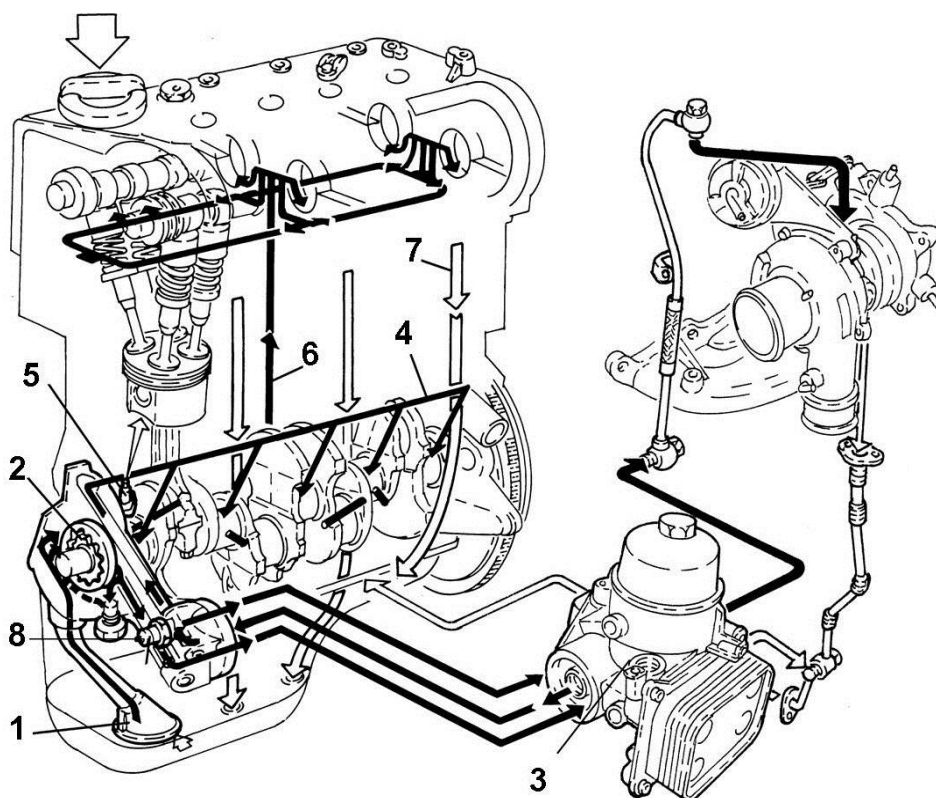


Рис. 6. Система смазки двигателя 1.4 t-jet 16V FIAT Powertrain:

- 1 – маслопровод с сетчатым фильтром; 2 – масляный насос; 3 – интегрированная система фильтрования масла двигателя; 4 – главный масляный канал; 5 – распылители (охлаждение поршня); 6 – вертикальные каналы (смазка подшипников распредвалов); 7 – возврат смазочного масла в картер; 8 – датчик контрольной лампы аварийного давления масла

Пример двигателя легкового автомобиля с организацией подачи масла в турбокомпрессор после фильтра и теплообменника показан на рис. 6. Данная схема обеспечивает стабильность подачи масла в ТКР независимо от состояния двигателя и сокращает задержку подачи масла при пуске.

Приведенная схема системы смазки с отбором масла для турбокомпрессора от модуля масляного фильтра с теплообменником используется в настоящее время на подавляющем большинстве турбированных двигателей легковых автомобилей.

Таким образом, отвод магистрали для смазки турбокомпрессора следует осуществлять после систем охлаждения и фильтрования масла, но как можно ближе к масляному насосу.

В качестве меры по минимизации недостатка масла на режимах пуска при отрицательных температурах возможно использования давно известной системы – системы прокачивания масла перед запуском ДВС. Особым преимуществом этой системы является положительное влияние не только на ТКР, но и на весь двигатель, в котором также существует проблема нарушения условий смазки в условиях холодного пуска.

Система предварительного прокачивания масла может иметь собственный насос с электрическим приводом, но может также использоваться и штатный насос, в случае, если возможна организация его электрического привода, помимо привода от коленчатого вала ДВС.

Изменение геометрической формы части ротора является эффективным способом снижения теплового потока в теле и уменьшения температур в ключевых точках. При этом необходимо контролировать важные прочностные характеристики ротора, по возможности оптимизируя их.

Меры по снижению тепловой нагрузки на турбокомпрессор также способствуют повышению срока службы масла, положительно влияют на процессы изменения технического состояния ДВС.

Библиографический список

1. **Бердников, Л.А.** Исследование возможности тепловой оптимизации ротора турбокомпрессора с проведением конечно – элементных анализов / Л.А. Бердников, И.А. Суворов // Труды НГТУ им Р.Е.Алексеева. – 2013. – № 4. С. 56–65.
2. Пат. № 159068. Россия. Конструкция для предотвращения угара масла в турбокомпрессоре / Л.А. Бердников, И.А. Суворов; заявл. 17.06.2015.
3. **Бердников, Л.А.** Улучшение температурного состояния турбокомпрессоров автомобильных двигателей / Л.А. Бердников, И.А. Суворов // Автотранспортное предприятие. – 2014. – № 4. – С. 40–42.
4. Пат. № 141164. Россия. Экран теплоизолирующий турбокомпрессора / Л.А. Бердников, И.А. Суворов, Н.А. Кузьмин; заявл. 22.04.2014.
5. **Корчажкин, М.Г.** Исследование надежности топливных систем автомобильных дизельных / М.Г. Корчажкин, Е.А. Хоряев // Беспилотные транспортные средства: проблемы и перспективы: сб. мат. 94 международной научно-технической конференции Ассоциации автомобильных инженеров. – 2016. – С. 240–245.
6. **Корчажкин, М.Г.** Повышение эксплуатационной надежности двигателей городских автобусов, работающих на режимах высоких тепловых нагрузок: дисс. ... канд. техн. наук / М.Г. Корчажкин. 2005.
7. **Кустиков, А.Д.** Проблемы надежности трансмиссий городских автобусов / А.Д. Кустиков, Н.А. Кузьмин, М.Г. Корчажкин // Труды НГТУ им Р.Е. Алексеева. – 2013. – № 4 (101). – С. 18–26.
8. **Суворов, И.А.** Улучшение температурного состояния турбокомпрессоров автомобильных двигателей / И.А.Суворов, Л.А. Бердников // Автотранспортное предприятие. – 2014. – № 4. – С. 40–42.

Дата поступления
в редакцию 30.05.2018

A.A. Pikulkin¹, L.A. Berdnikov¹, M.G. Korchazhkin¹, L.A. Zakharov¹, P.P. Bazhan²

**RESEARCH OF INCREASE THERMAL RESISTANCE
OF INSULATION THE CENTRAL BODY OF AN AUTOMOBILE TURBOCHARGER
INTERNAL COMBUSTION ENGINES**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev¹,
Center for Development of Rules in the structure of the
Upper Volga branch of the Russian River Register²

Purpose: Increase of thermal resistance of insulation the central body of an automobile turbocharger internal combustion engines.

Design/methodology/approach: The use of thermal screens to reduce heat transfer to the central body of the turbocharger from exhaust gases.

Findings: A variant of the turbine part of the turbocharger housing improvement to ensure the efficiency of the heat shield.

Research limitations/implications: The list of the main parameters of the turbocharger is presented and their permissible limits for trouble-free operation.

Originality/value: Ways of improving the thermal resistance of the heat shields. The most unfavorable operating conditions of the engine and turbocharger leading to failures.

Key words: turbocharger, heat shield, thermal resistance, critical mode, oil temperature, bearing assembly, reliability, cold start.

УДК 629.33

С.С. Шадрин

ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АВТОНОМНОГО ДВИЖЕНИЯ НАЗЕМНОГО ТРАНСПОРТА

Basetrack technologies limited (Кипр, г. Лимасол)

Раскрываются актуальные проблемы стратегического и тактического уровней управления при организации автономного движения наземного транспорта и предлагаются пути их решения. Освещаются методы создания цифровой модели местности и вводится понятие «эталонного трека», представляющего собой высокоточный пространственный маршрут движения, содержащий дополнительные блоки, обеспечивающие оптимальное управление транспортным средством исходя из поставленной транспортной задачи и условий движения. Раскрывается структура данных «эталонного трека» и приводятся преимущества от использования: предопределенная вариативность действий управления на маршруте в зависимости от задач экономии времени, или повышения энергоэффективности перевозки, или обеспечения безопасности; вместе с повышением надежности, снижением требований к бортовым вычислительным мощностям, повышением скорости быстрогодействия. Постулируется необходимость рассматривать модель движения транспортного средства только с привязкой к геоинформационной среде для обеспечения эффективного управления в автономном режиме.

Ключевые слова: автономное транспортное средство, беспилотный автомобиль, автономное движение, цифровая модель местности, эталонный трек, оптимальное управление.

Введение

К основным направлениям развития автомобилестроения традиционно относятся энергоэффективность и безопасность. В части повышения безопасности автомобилей сдерживающий фактор развития заключается в том, что возможности улучшения конструкций и используемых алгоритмов управления автопроизводителями практически исчерпаны. Европейский анализ причин дорожно-транспортных происшествий (ДТП) с участием грузовых автомобилей (Франция, Германия, Италия, Венгрия, Нидерланды, Словения и Испания) показал, что причиной 85,2% всех аварий является человеческий фактор, в России оценочно порядка 80% дорожно-транспортных происшествий происходят по вине непосредственно водителей [1]. Таким образом, дальнейшее повышение безопасности транспортных средств представляется наиболее эффективным при исключении человека из непосредственного цикла управления автомобилем.

В мире разработкой технологий автономного движения активно занимаются и автопроизводители (Ford, Daimler, Volkswagen, Toyota, Honda, GM, Geely, Tata, Tesla), и крупные инженерные центры (Google, Continental, Delphi, Siemens, Bosch), и военные ведомства (DARPA [2]), и университеты (Stanford University, Carnegie Mellon University, Technical University of Munich, University of Karlsruhe, Fraunhofer Institute, University of Minnesota, Universidad Politécnica de Madrid [3]), и многие другие [4-6]. Таким образом, направление развития технологий автономных транспортных средств в мире на данный момент времени является актуальным.

Постановка проблемы

Процесс управления автомобилем можно разделить на 3 уровня [7, 8]: *стратегический, тактический и исполнительный* (операционный). На стратегическом уровне происходит глобальное планирование маршрута. Тактические действия определяют процесс маневрирования автомобиля в дорожном потоке во время поездки, включая принятие решений о том, где и как обогнать другой автомобиль или сменить полосу движения и стоит ли это делать, какую выбрать скорость движения и т.д. На исполнительном уровне осуществляется траекторное управление путем воздействия на соответствующие органы управления.

Стратегический уровень в значительной степени связан с вопросами логистики, маршрутизации, навигации и описывается в работах [2, 5, 6, 9], а также многих других. Одна из основных прикладных проблем рассматриваемого уровня относится к созданию высокоточных пространственных геоинформационных моделей местности – так называемых HD-карт (High Definition Maps).

Тактический уровень управления связан с вопросами психофизиологии и в большей части зависит от правильности функционирования системы технического восприятия [10] (в частном случае – подсистемы технического зрения [11]). Также на тактическом уровне управления появляется огромный пласт проблем принятия решений, который в большинстве случаев исследователи и разработчики пытаются решить инструментариями систем искусственного интеллекта [12]. Другими словами, к основным проблемам тактического уровня мы бы отнесли неопределенности, возникающие в процессе движения и требующие корректировки маршрута движения.

Управление автомобилем на исполнительном (операционном) уровне можно считать достаточно хорошо изученным [2, 3, 5, 6, 10, 13].

Таким образом, целью настоящей статьи является освещение новых подходов к решению обозначенных проблем стратегического и тактического уровней управления при организации автономного движения наземного транспорта.

Геоинформационное обеспечение как инструмент ускоренного внедрения и распространения автономных транспортных средств

Известные способы автономного движения в большинстве своем построены на использовании данных различных систем навигации в реальном времени с применением электронной карты местности, загруженной в память блока системы управления транспортным средством (ТС). При этом установление режимов движения: направление, скорость и др. по пути следования осуществляется с использованием расчетных алгоритмов, работающих в реальном времени и зачастую зависящих от систем искусственного интеллекта, требующих значительных вычислительных мощностей. То есть в известных системах расчет режимов движения выполняется оперативно на каждом участке вычислительным модулем блока управления ТС (постоянная корректировка маршрута на тактическом уровне управления). Естественно, что такой подход приводит к необходимости использования значимых вычислительных мощностей, запаздыванию передачи команд к органам управления с ростом скорости движения, снижению точности управления на высоких скоростях движения ТС в автономном режиме.

Мы предлагаем, с одной стороны, упрощенный подход к организации автономного движения транспорта, с другой стороны – более надежный и менее затратный. Предлагаем ввести понятие «эталонного трека», представляющего собой высокоточный пространственный маршрут движения, содержащий дополнительные блоки, обеспечивающие оптимальное управление транспортным средством исходя из поставленной транспортной задачи и условий движения. Разработанный «эталонный трек» можно сравнить с виртуальным пространственным рельсом, по которому производится движение ТС так же, как и поезда по железной дороге. Соответственно, при возникновении препятствий или рисков схождения с трека в самом простом случае должна производиться остановка ТС, в более совершенном варианте – запускаться система принятия решения (например, миварная экспертная система [14]) для переключения на другой трек или на другой фрагмент сгенерированного трека объезда.

Существуют различные подходы к созданию HD-карт, но начинается все с создания цифровой модели местности (ЦММ), на которую далее осуществляется добавление «информационных слоев» с соответствующими объектами (дорожная разметка, элементы инфраструктуры и прочее). В свою очередь, геопространственные данные для ЦММ могут быть получены космической съемкой, лазерным сканированием (наземным и воздушным), радиолокационным зондированием и другими способами. Считаем в предлагаемом концептуальном подходе неоправданным использование традиционных HD-карт, вместо которых пред-

лагаем использовать «эталонные треки», являющиеся программным продуктом и получаемые на основе ЦММ и знаниях об условиях движения и особенностях ТС.

На рис. 1 показана принципиальная схема управления ТС при движении по «эталонному треку» в автономном режиме.

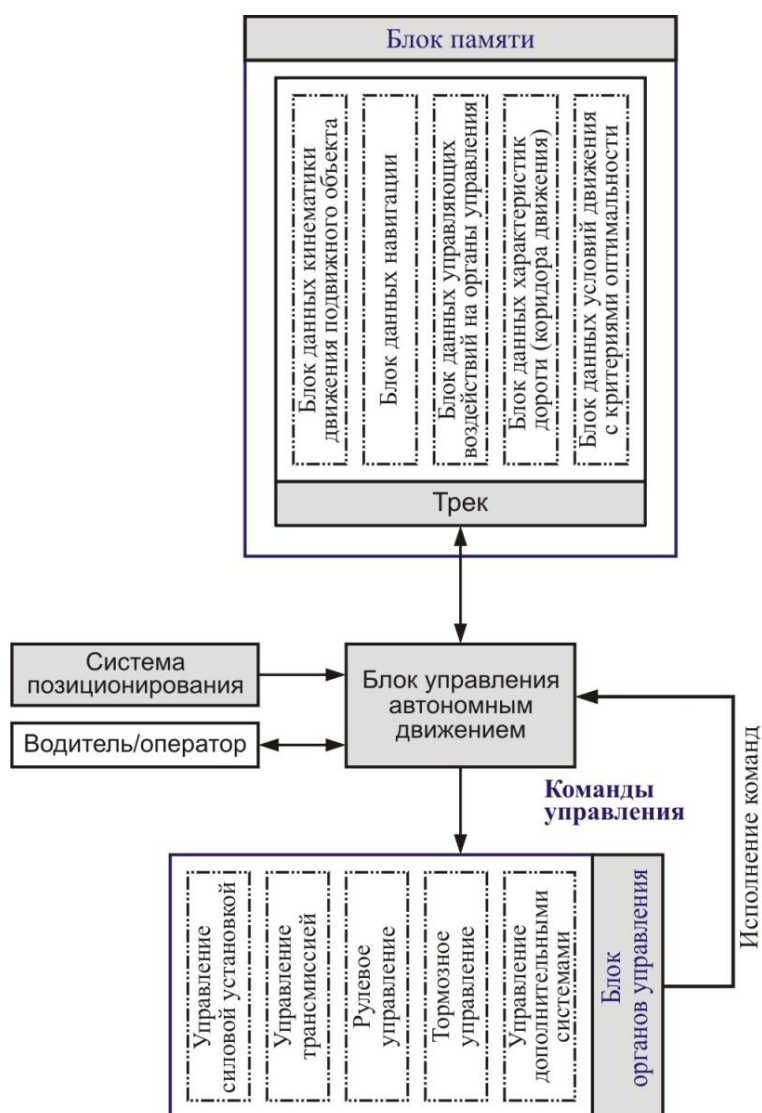


Рис. 1. Схема управления ТС в автономном режиме движения

Структура «эталонного трека» включает в себя блоки данных:

- кинематических параметров движения ТС;
- навигации;
- управляющих воздействий на органы управления;
- характеристик дороги;
- условий движения с критериями оптимальности.

Блок данных кинематических параметров движения ТС содержит расчетные данные, характерные для движения рассматриваемого ТС в снаряженном состоянии и в нормальных погодных условиях (без ветровой нагрузки и с характеристиками сцепления шин с опорной поверхностью, соответствующими сухому асфальтобетонному покрытию).

Блок данных навигации обеспечивает выполнение позиционирования ТС по треку с использованием различных систем навигации и/или локализации положения ТС.

Блок данных управляющих воздействий на органы управления ТС связан с блоком кинематических параметров движения и содержит команды управляющих воздействий для

нормальных условий движения.

Блок данных характеристик дороги содержит информацию о классе (типе) дороги, продольном и боковом уклонах дорожного полотна, усреднённом коэффициенте сцепления с поверхностью дорожного полотна в идеальных (нормальных) погодных условиях, международном индексе ровности дорожного полотна и кривизне дороги в рассматриваемом месте.

Блок данных условий движения содержит информацию, включающую в себя, но не ограничивающуюся следующими параметрами:

- максимальную разрешенную скорость движения $V_{\max}$ в соответствии с ПДД и установленными дорожными знаками;
- коэффициент погодных условий K_w , по которому осуществляется корректировка допустимой скорости движения;
- критическую скорость движения V_{crit} для конкретного ТС с учетом дорожных и погодных условий (максимально возможная и реализуемая транспортным средством скорость, обеспечивающая асимптотическую устойчивость движения);
- комплексный коэффициент K_{eff} корректировки скорости движения, отражающий критерий энергоэффективности;
- коэффициент K_{inf} корректировки скорости движения, учитывающий особенности дорожной инфраструктуры в рассматриваемом месте;
- коэффициент K_{sat} степени достоверности получаемых данных спутниковой навигации в данном месте. Этот коэффициент учитывает инфраструктурные и природные помехи и является индикатором переключения со спутниковой системы на другие системы позиционирования (оптические, инерциальные и др.) при применении гибридных навигационных систем.

Информация блока данных условий движения является интерактивно обновляемой.

Отметим, что с точки зрения применения, некоторые параметры блока данных условий движения являются взаимоисключающими. Соответственно, конкретный набор параметров данных условий движения определяется блоком управления автономным движением в зависимости от поставленной транспортной задачи, например, исходя из таких критериев оптимальности, как минимальное время в пути, экономия топлива, обеспечение безопасности, снижение рисков и т.п. Например, для движения гоночного автомобиля по трассе блоком управления автономным движением будет использоваться скорость $V_{\text{crit}} \cdot K_w$ из блока данных условий движения. В другом примере движения автопоезда только с задачей экономии расхода топлива, скорость движения в автономном режиме будет определяться как $V_{\max} \cdot K_{\text{eff}} \cdot K_w$.

Набор файлов с последовательными треками формирует трек большей протяжённости. Перед началом автономного движения ТС файл или хотя бы первый файл набора файлов продолжительного трека должен быть загружен в блок памяти. Остальные файлы треков, равно как и блок условий движения уже загруженных файлов, могут загружаться и/или обновляться по мере продвижения ТС по пути движения. Также возможна реализация предварительной загрузки в блок памяти всех файлов трека.

Таким образом, в разработанном концепте мы предлагаем на стратегическом уровне управления использовать «эталонные треки», считая информацию HD-карт избыточной. На тактическом уровне управления применение «эталонных треков» исключает и/или минимизирует проблему принятия решений и корректировки маршрута движения, что повышает надежность работы системы автономного вождения, снижает требования к бортовым вычислительным мощностям и повышает скорость быстрогодействия системы, позволяя двигаться с большими эксплуатационными скоростями. Для прототипа автономного колесного транспортного средства, построенного на базе легкового автомобиля, была достигнута скорость 130 км/ч устойчивого движения в коридоре дорожной разметки при движении по «эталонному треку» в автономном режиме и без использования средств распознавания дорожной разметки в соответствии с условиями эксперимента.

Вместе с тем, очевидным технико-экономическим преимуществом разработанного подхода является то, что рассматривая модель движения ТС с привязкой к геоинформацион-

ной среде и решая задачу оптимизации, мы выбираем оптимальные режимы автономного движения ТС, соответствующие поставленной транспортной задаче.

Заключение

В результате проведенного исследования:

1. Введено понятие «эталонного трека», представляющего собой высокоточный пространственный маршрут движения, содержащий дополнительные блоки, обеспечивающие оптимальное управление транспортным средством исходя из поставленной транспортной задачи и условий движения.

2. Предложено использование «эталонных треков» вместо карт высокого разрешения (HD-карт) или в качестве отдельных слоев HD-карт при организации автономного движения ТС на стратегическом и тактическом уровнях управления.

3. Определено, что на тактическом уровне управления автономным транспортом применение «эталонных треков» исключает и/или минимизирует проблему принятия решений и корректировки маршрута движения, что повышает надежность работы системы автономного вождения, снижает требования к бортовым вычислительным мощностям и повышает скорость быстрой реакции системы, позволяя двигаться с большими эксплуатационными скоростями.

4. Для эффективного управления движением автономных ТС с учетом вариации транспортных задач, а также условий движения, весовых состояний и особенностей ТС, необходимо рассматривать модель движения ТС только с привязкой к геоинформационной среде.

Библиографический список

1. **Шадрин, С.С.** Радикальное повышение безопасности дорожного движения интегрированием автономных колесных транспортных средств в интеллектуальную транспортную среду / С.С. Шадрин, А.М. Иванов, К.Е. Карпукhin // Вестник машиностроения. – 2018. – № 1. – С. 85–88.
2. The DARPA Urban Challenge. Autonomous Vehicles in City Traffic / Martin Buehler, Karl Iagnemma, Sanjiv Singh [Eds.] // Springer. – 2009. – 651 p.
3. **Naranjo, J. E.** Anguita Autonomous vehicle for surveillance missions in off-road environment / J. E. Naranjo [et al.] // IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), Gothenburg. – 2016. – P. 98–103.
4. Tendency of Creation of "Driverless" Vehicles Abroad // Saykin A.M., Bakhmutov S.V., Terenchenko A.S., Endachev D.V., Karpukhin K.E., Zarubkin V.V. Biosciences Biotechnology Research Asia. – 2014. – V. 11. (Spl. Edn.) – P. 241–246.
5. **Nonami, K.** Autonomous Control Systems and Vehicles. Intelligent Unmanned Systems / K. Nonami [et al.] // Springer Japan. 2013. – 306 p.
6. **Cheng, H.** Autonomous Intelligent Vehicles. Theory, Algorithms, and Implementation // Springer. 2011. – 163 p.
7. **Michon, J.A.** A CRITICAL VIEW OF DRIVER BEHAVIOR MODELS: WHAT DO WE KNOW, WHAT SHOULD WE DO? // In L. Evans & R. C. Schwing (Eds.). Human behavior and traffic safety. New York: Plenum Press, 1985. – P. 485–520.
8. SAE J3016. Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles. SAE. 2016. – 30 p.
9. **Tahirovic, A.** Passivity-Based Model Predictive Control for Mobile Vehicle Motion Planning / A.Tahirovic, G.Magnani // Springer. 2013. – 64 p.
10. **Shadrin, S.S.** Methodology of autonomous road vehicles, integrated in intellectual transport environment, driving control systems design: dissertation ... doctor of technical science. 05.05.03 [Place of the thesis defense: Bauman State Technical University]. – Moscow, 2017. – 400 p.
11. **Saikin, A.M.** The Analysis of Technical Vision Problems Typical for Driverless Vehicles / A.M. Saikin, S.E. Buznikov, K.E. Karpukhin // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. – 2016. – V. 7. – № 4. – P. 2053–2059.
12. **Shadrin, S.S.** Experimental Autonomous Road Vehicle with Logical Artificial Intelligence / S.S. Shadrin, O.O. Varlamov, A.M. Ivanov // Journal of Advanced Transportation. 2017. Article ID 2492765. 10 pages. doi:10.1155/2017/2492765.

13. **Shadrin, S.S.** Algorithm of Autonomous Vehicle Steering System Control Law Estimation while the Desired Trajectory Driving / S.S. Shadrin, A.M. Ivanov // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2016. – V. 11. – №. 15. – P. 9312–9316.
14. **Варламов, О.О.** Миварные экспертные системы для сопровождения производственных процессов на транспорте / О.О. Варламов [и др.] // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2017. – Т. 11. – № 5. – С. 53–59.

*Дата поступления
в редакцию 15.06.2018*

S.S. Shadrin

GEOINFORMATION SUPPORT OF GROUND VEHICLES' AUTONOMOUS DRIVING

Basetrack technologies limited, Cyprus, Limassol

Purpose: This article describes actual challenges of autonomous driving with respect to strategic and tactical levels of vehicle control, solutions are offered.

Design/methodology/approach: Methods for creating a digital terrain model are described. The notion of an "ideal track" is introduced, which is a high-accuracy spatial route of movement, containing additional blocks providing optimal control of the vehicle based on the requested transport task as well as road and traffic conditions.

Findings: An "ideal track" data structure is presented with the advantages of its implementation: the predetermined variability of the control actions on the route, depending on the tasks of time saving, or energy efficiency increasing, or safety providing; together with increased reliability, reduced requirements for on-board computing power, increased performance.

Originality/value: It is postulated that it is necessary to estimate the vehicle's driving model only with reference to the geoinformation environment to ensure efficient control in an autonomous mode.

Key words: autonomous vehicle, driverless car, autonomous driving, digital terrain map, ideal track, optimal control.

НАШИ АВТОРЫ

ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Антонова Марина Александровна – инженер 1 категории
АО "ОКБМ им. И.И. Африкантова";
antonova_ma@okbm.nnov.ru

Богатырев Дмитрий Вениаминович – инженер 2 категории
АО "ОКБМ им. И.И. Африкантова";
bogatyrev@okbm.nnov.ru

Быстров Михаил Игоревич – начальник отдела АО "ОКБМ им. И.И. Африкантова";
bystrov@okbm.nnov.ru

Виноградов Олег Игоревич – магистрант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
oligvinogradov@gmail.com

Ломакина Любовь Сергеевна – д-р техн. наук, профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
llomakina@list.ru

Макаров Сергей Николаевич – менеджер по СУПД АО "ОКБМ им. И.И. Африкантова"; snmak@okbm.nnov.ru

Нетронин Илья Викторович – заместитель генерального директора по операционной эффективности
АО "ОКБМ им. И.И. Африкантова"; petronin@okbm.nnov.ru

Никулин Евгений Александрович – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
nea@mail.nnov.ru

Сильянов Николай Владимирович – аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
silianov@mail.ru

Шагалова Полина Анатольевна – ассистент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
polli-shagalova@yandex.ru

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

Андреев Вячеслав Викторович – д-р техн. наук, доцент, зав. кафедрой
НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
vyach.andreev@mail.ru

Андреев Николай Геннадьевич – начальник бюро АО «ОКБМ им. И.И. Африкантова»; andrejev@mail.ru

Валеев Ильгиз Миргалимович – д-р техн. наук, доцент, профессор Казанского государственного энергетического университета; ilgizvaleev@yandex.ru

Ворошилов Александр Андреевич – инженер, магистрант
НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
alejandro.voroshilov@yandex.ru

Горбунов Владимир Александрович – д-р техн. наук, зав. кафедрой Ивановского государственного энергетического университета; gorbypov.w@mail.ru

Дмитриев Сергей Михайлович – д-р техн. наук, профессор, ректор НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
rectorat@nntu.nnov.ru

Добров Александр Алексеевич – старший преподаватель НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
a.a.dobrov@yandex.ru

Калинин Евгений Владимирович – ведущий инженер НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
Chernmaza@eandex.ru

Кечкин Александр Юрьевич – аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
kechkin.al@yandex.ru

Кувшинова Анна Алексеевна – студент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
anna.kuvshinova.1995@gmail.ru

Лоншаков Никита Андреевич – аспирант Ивановского государственного энергетического университета;
nik-lon@mail.ru

Липужин Иван Алексеевич – ассистент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
lipuzhin@nntu.ru

Леванов Сергей Львович – студент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
geell@yandex.ru

Легчанов Максим Александрович – канд. техн. наук, доцент, зам. директора Института ядерной энергетики и технической физики НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
legchanov@mail.ru

Мусаев Тимур Абдулаевич – канд. техн. наук, ведущий инженер отдела новой техники и технологии производственно-технического управления

ОАО «Сетевая компания»

(республика Татарстан, г. Казань);

musaevkgeu@rambler.ru

Соснина Елена Николаевна – д-р техн. наук, доцент,

профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

sosnyna@yandex.ru

Тихомиров Владимир Анатольевич – канд. техн. наук,

доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

eos@nntu.ru

Худяков Илья Сергеевич – студент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

ilia.kh@nstuedu.com

Шалухо Андрей Владимирович – канд. техн. наук,

доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

shaluho.andrey@mail.ru

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

Аникин Алексей Александрович – д-р техн. наук,

профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

vladimir.makarov@nntu.ru

Бажан Павел Иванович – д-р техн. наук, профессор, заместитель начальника Центра разработки Правил в структуре Верхне-Волжского филиала Российского Речного Регистра;

kormg@list.ru

Бердников Леонид Анатольевич – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

kormg@list.ru

Бутин Данила Александрович – магистр НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

Butin91@yandex.ru

Вахидов Умар Шахидович – д-р техн. наук, зав. кафедрой "Строительные и дорожные машины" НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

umar-vahidov@mail.ru

Вашурин Андрей Сергеевич – канд. техн. наук, инженер НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

Vashurin@nntu.ru

Гаевский Виталий Валентинович – д-р техн. наук, доцент, профессор МАДИ;

vit-life@rambler.ru

Гончаров Роман Борисович – аспирант МГТУ им. Н.Э. Баумана (г. Москва); goncharov.roman@bmstu.ru

Деянов Даниил Сергеевич – магистр Волгоградского государственного технического университета;

gorge90@mail.ru

Дыгало Владислав Геннадьевич – д-р техн. наук, профессор Волгоградского государственного технического университета;

dygalo@vstu.ru

Дыгало Людмила Викторовна – инженер Волгоградского государственного технического университета; gorge90@mail.ru

Жуков Илья Сергеевич – вед. инженер-конструктор АО «ФНПЦ «Титан-Баррикады», аспирант Волгоградского государственного технического университета;

zhii7@yandex.ru

Захаров Лев Анатольевич – д-р техн.

наук, профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

kormg@list.ru

Зузов Валерий Николаевич – д-р техн. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана (г. Москва);

zuzvalery@rambler.ru

Иванов Андрей Михайлович – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой МАДИ;

ivanov-am@madi.ru

Корчажкин Михаил Георгиевич – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

kormg@list.ru

Котов Владислав Владимирович – канд. техн. наук, доцент Волгоградского государственного технического университета;

gorge90@mail.ru

Ларин Егор Сергеевич – аспирант Волгоградского государственного технического университета;

gorge90@mail.ru

Молев Юрий Игоревич – д-р техн. наук, профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

moleff@yandex.ru

Никитин Александр Викторович – адъютант филиала Военной академии Ракетных войск стратегического назначения им. Петра Великого (г. Серпухов);

nik.al2010@mail.ru.

Палутин Юрий Иванович – д-р техн. наук, профессор Нижегородской государственной сельскохозяйственной академии;
vladimir.makarov@nntu.ru

Пикулькин Александр Александрович - ассистент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
kormg@list.ru

Сморчков Андрей Евгеньевич – магистр Волгоградского государственного технического университета;
gorge90@mail.ru

Согин Александр Васильевич – д-р техн. наук, профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
vladimir.makarov@nntu.ru

Столяревский Семен Павлович – д-р военных наук, профессор филиала Военной академии Ракетных войск стратегического назначения им. Петра Великого (г. Серпухов);
nik.al2010@mail.ru

Слюсарев Анатолий Сидорович – д-р техн. наук, профессор Волжского государственного университета водного транспорта;
vladimir.makarov@nntu.ru

Тумасов Антон Владимирович – канд. техн. наук, доцент,
директор Института транспортных систем НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
anton.tumasov@gmail.com

Чистопрудов Дмитрий Александрович – канд. техн. наук, доцент филиала Военной академии Ракетных войск стратегического назначения им. Петра Великого (г. Серпухов);
umasa76@mail.ru

Черевастов Максим Геннадьевич – аспирант НГПУ им. К. Минина;
chermaxim_1978@mail.ru

Шадрин Сергей Сергеевич – д-р техн. наук, руководитель отдела исследований и разработок Basetrack Technologies Limited (Cyprus, Limassol);
dr.sergey.shadrin@gmail.com

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО НАПИСАНИЮ АВТОРСКИХ РЕЗЮМЕ

(АННОТАЦИЙ, РЕФЕРАТОВ К СТАТЬЯМ)

Авторский реферат на английском языке должен быть понятен без ссылки на саму статью. Это краткое точное изложение содержания документа, включающее основные фактические сведения и выводы описываемой работы. Объем не менее 10 строк (100–250 слов – 850 знаков). Реферат включает: 1) предмет, тему, цель работы; 2) метод или методологию проведения работы; 3) результаты и область их применения; 4) выводы. Таблицы, формулы, рисунки (нумерация в реферате может не совпадать с текстом статьи) включаются, если раскрывают основное содержание документа и позволяют сократить объем реферата.

Реферат можно начать с изложения результатов работы и выводов. Сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте реферата. Следует применять терминологию, характерную для иностранных специальных текстов, избегать терминов, являющихся прямой калькой русскоязычных слов. Текст должен быть связным с использованием слов «следовательно», «более того», «например», «в результате» (consequently, moreover, for example, the benefits of this study, as a result). Необходимо использовать активный, а не пассивный залог, т.е. «The study tested», но не «It was tested in the study».

Авторское резюме из International Journal of Operations & Production Management. V. 22. N 8.

B. Meijboom, M. Houtepens

STRUCTURING INTERNATIONAL SERVICE OPERATIONS: A THEORETICAL FRAMEWORK AND A CASE STUDY IN THE IT-SECTOR

The name of organization

Purpose: The specific challenges with which companies pursuing international manufacturing strategies are faced, if their output also contains a service dimension, are addressed.

Design/methodology/approach: A theoretical framework is proposed based on three virtually complementary perspectives by integrating international production, demand, and contemporary ICT-based theory. Subsequently, an exploratory case study in a pure service environment is described that illustrates the value of the framework.

Findings: It is possible, for example, to apply the theoretical framework to case studies in internationally-operating companies delivering a mix of goods and services.

Research limitations/implications: The present study provides a starting-point for further research in the international manufacturing sector.

Originality/value: Moreover, the framework has proven to be useful in improving the European structure of the case company. This is a notable and promising side-effect of the exploratory study, at least from a managerial point of view.

Key words: multinationals, service operations, location, decision making, case studies.

ПРИНИМАЕМ В ПЕЧАТЬ НАУЧНЫЕ СТАТЬИ В ЖУРНАЛ «ТРУДЫ НГТУ им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»

Адрес редакции: 603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24

Телефон: 8(920)00-37-877

E-mail: rs1@nntu.ru

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ, НАПРАВЛЯЕМЫХ В РЕДАКЦИЮ

- В редакцию направляют **два экземпляра** статьи и комплекта сопроводительной документации: бумажный и электронный.
- Желательно, чтобы объем статьи не превышал 10 страниц текста и 4–6 рисунков. Все страницы должны быть пронумерованы. Минимальное количество страниц – 6.
- **Статью необходимо сопроводить** актом и протоколом экспортного контроля, экспертным опубликованием, выпиской из заседания кафедры, рекомендующей статью к опубликованию, сведениями об авторах и рецензией от внешней организации, подписанной доктором наук и заверенной печатью.
- Статья должна быть подписана всеми авторами.
- Первая страница статьи должна содержать следующую информацию: УДК (код по универсальному десятичному классификатору); инициалы и фамилии авторов (в таком порядке); название статьи; место работы всех авторов (полное название организации, город); аннотацию; ключевые слова (не более 10).
- Изложение материала должно быть ясным, логически выстроенным. Рекомендуется следующая структура статьи: вводная часть с обоснованием необходимости и изложением цели работы, теоретический анализ, методика, экспериментальная часть, результаты и выводы (не более 0,5 страницы), библиографический список.
- Статья должна завершаться **информацией на английском языке**: инициалы и фамилии авторов, тема, названия организаций, в которых работают авторы, реферат и ключевые слова.
- К статье следует **приложить файл с информацией об авторах** на русском языке: ФИО (полностью), место работы, должность, ученая степень и звание, служебный телефон и адрес электронной почты.
- Текст набирают через один интервал 12 кеглем. Сноски и примечания 10 кеглем. Поля: левое, правое и нижнее – 20 мм, верхнее – 25 мм. Переносы не допускаются. Используется формат **Word for Windows** и стандартные шрифты **Times New Roman** и **Symbol**.
- Формульные выражения выполняют строго в редакторе MS Equation 3 – 12 кегль. Размерность физических величин должна соответствовать системе СИ.
- Сокращение слов, кроме общепринятых, не допускается.
- Таблицы (11 кегль жирный) должны иметь названия, их следует располагать по тексту статьи, ссылки на таблицы (табл. 1).
- Диаграммы выполняются в формате Excel.
- Графический материал (только в черно-белом изображении) должен быть четким и не требовать перерисовки. Изображение выполняется в формате **jpg** или **tif** с разрешением 300 **dpi**. Рисунки выполняются по ГОСТ, подрисуночная подпись 11 жирный кегль.

**РУКОПИСИ И СОПРОВОДИТЕЛЬНАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ
ПРИНИМАЮТСЯ ПО СЛЕДУЮЩИМ АДРЕСАМ:**

05.05.03 Колесные и гусеничные машины

Владимир Сергеевич Макаров: vladimir.makarov@nntu.ru

05.14.02 Электрические станции и электроэнергетические системы

Евгений Викторович Бычков: fae_nir@nntu.ru

**05.14.03 Ядерные энергетические установки, включая проектирование,
эксплуатацию и выход из эксплуатации**

Максим Александрович Легчанов: legchanov@nntu.ru

**05.13.01 Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям).
05.13.17 Теоретические основы информатики**

Валерий Павлович Хранилов: hranilov@nntu.ru

ТРУДЫ НГТУ
им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА

№ 3 (122)

Редакторы: **Т.В. Третьякова, Е.В. Комарова**
Технический редактор **Т.П. Новикова**

Редакция:
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24.
rs1@nntu.ru
Свободная цена

Подписано в печать 20.09.2018. Формат 60x84 ¹/₈. Бумага офсетная.

Печать трафаретная. Усл. печ. 23,0 л. Тираж 300 экз. Заказ .

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева.

Типография НГТУ.

Адрес университета и полиграфического предприятия:
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24.

Индекс 44757
Объединенный каталог «Пресса России»

Свидетельство о регистрации
периодического печатного издания
ПИ № ФС 77-56417 от 11 декабря 2013