

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ 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

№ 4 (119)

Нижний Новгород 2017

УДК 050(06)
ББК 9я54
Т 78

Т 78 Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2017. №4(119).
– 189 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 группам специальностей: 05.05.00 – транспортное, горное и строительное машиностроение; 05.13.00 – информатика, вычислительная техника и управление; 05.14.00 – энергетика

Главный редактор С.М. Дмитриев

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

Члены редколлегии: В.Г. Баранов, Г.Я. Вагин, В.Д. Вавилов, В.М. Галкин,
А.М. Грошев, А.А. Куркин, А.Б. Лоскутов, А.Ю. Панов, А.Е. Хробостов

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

**И.О. председателя,
заместитель председателя
Ответственный секретарь**

Сергей Михайлович Дмитриев
(д. т. н., проф., ректор НГТУ им. Р.Е. Алексеева)
Владимир Викторович Беляков
(д. т. н., проф., начальник УНИИИР)

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

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОГО СОВЕТА

Гуляев Юрий Васильевич	член Президиума РАН, академик, д. физ.-мат. н., проф., научный руководитель ИРЭ РАН им. В.А. Котельникова
Гринберг Руслан Семенович	член-корр. РАН, д. эк. н., проф., научный руководитель Института экономики РАН
Митяков Сергей Николаевич	Академик РАЕН, член президиума РАЕН, действительный член АИН им. А.М. Прохорова, д. физ.-мат. н., проф., директор ИНЭУ НГТУ
Куркин Андрей Александрович	д. физ.-мат. н., проф., зав. кафедрой ПМ
Кондратьев Вячеслав Васильевич	член-корр. РАН, д. т. н., проф., зав. кафедрой ВСТ НГТУ
Рындык Александр Георгиевич	д. т. н., проф., зав. кафедрой ИР НГТУ
Раевский Сергей Борисович	д. т. н., проф.
Кошелев Олег Сергеевич	д. т. н., проф., зав. кафедрой МТКОДСП НГТУ
Хранилов Валерий Павлович	д. т. н., проф., заместитель директора ИРИТ НГТУ

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, 2017

**MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE 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

№ 4 (119)

Nizhny Novgorod 2017

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: 05.05.00 - transport, mining and construction engineering; 05.13.00 - computer science, computer engineering and management; 05.14.00 - energy

Editor-in-Chief S.M. Dmitriev

EDITORIAL BOARD

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

Members of Editorial Board: V.G. Baranov, G.Ya. Vagin, V.D. Vavilov, V.M. Galkin,
A.M. Groshev, A.A. Kurkin, A.B. Loskutov, A.Yu. Panov, A.Ye. Khrobostov

EDITORIAL COUNCIL

**Acting Chairman,
Vice-chairman
Executive Secretary**

Sergei Mikhailovich Dmitriev
Doctor of Technical Science, Professor, NNSTU Rector (Nizhny Novgorod, Russia)
Vladimir Viktorovich Belyakov
Doctor of Technical Science, Professor, Head of NNSTU Research and Innovative Work
Office (Nizhny Novgorod, Russia)

Pelenovski Dmitri Efimovich

Foreign members of Editorial Council
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)

Members of Editorial Council

Guliaev Yuri Vasilevich

Member of Russian Academy of Sciences
Doctor of Physical and Mathematical Science, Professor
Institute of Radio Engineering and Electronics (IREE) n.a. Academician V.A. Kotelnikov
(Moscow, Russia)

Grinberg Ruslan Semenovich

Associate member of the Russian Academy of Sciences
Doctor of Physical and Mathematical Science, Professor
Director of Institute for International Economic and Political Studies at the Russian Academy of
Sciences
(Moscow, Russia)

Mitiakov Sergei Nikolaevich

Doctor of Physical and Mathematical Science, Professor
NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)

Kurkin Andrey Aleksandrovich

Doctor of Physical and Mathematical Science, Professor
NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)

Kondratev

Associate member of the Russian Academy of Sciences,

Viacheslav Vasilevich

Doctor of Technical Science, Professor
NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)

Ryndyk Alexander Georgievich

Doctor of Technical Science, Professor
NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)

Raevski Sergei Borisovich

Doctor of Technical Science, Professor
NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)

Koshelev Oleg Sergeevich

Doctor of Technical Science, Professor
NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)

Hranilov Valeriy Pavlovich

Doctor of Technical Science, Professor
NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)

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

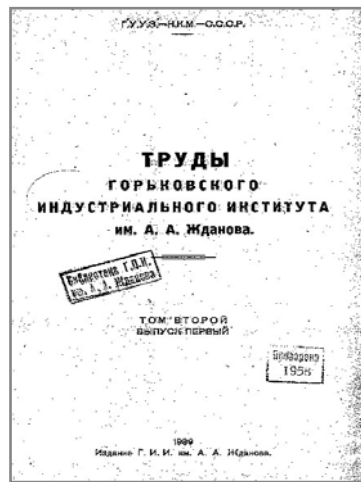
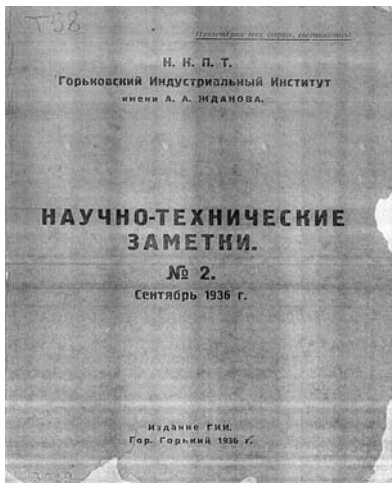


ВЫСШАЯ АТТЕСТАЦИОННАЯ КОМИССИЯ (ВАК)

при Министерстве образования и науки
Российской Федерации



Решением президиума ВАК РФ от 29.05.2017 научный журнал «Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева» включен в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по отраслям науки: 05.05.00 «Транспортное, горное и строительное машиностроение»; 05.14.00 «Энергетика»; 05.13.00 «Информатика, вычислительная техника и управление».



Научный журнал ведет свою историю с 1936 г., когда в Горьковском индустриальном институте впервые было принято решение об организации периодического издания «Научно–технические заметки», вскоре переименованного в «Труды Горьковского индустриального института им. А.А. Жданова». На протяжении всей истории развития вуза журнал способствовал совершенствованию научно-исследовательской базы подготовки выпускников в соответствии с приоритетными направлениями советской и российской инженерной науки, формировал академическую среду для развития научного потенциала.

В 2010 г. было учреждено ежеквартальное рецензируемое научно-техническое издание «Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева», основной задачей которого ставилось содействие повышению качества подготовки специалистов в соответствии со стратегическими направлениями по обеспечению единой государственной политики в области государственной аттестации научных и научно-педагогических кадров.

В настоящее время журнал «Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева» выступает важнейшей составляющей стратегии развития НГТУ как образовательно-научного инновационного центра техники и технологий промышленного комплекса Нижегородского региона.

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ.....	11
Волжанкин Н.В., Злобина Н.В., Пособилов Н.Е. Разработка и выбор средств и методик для тестирования коммерческих систем, построенных на машинном обучении.....	11
Злобина Н.В., Волжанкин Н.В., Пособилов Н.Е. Обеспечение централизованного мониторинга для систем сложной архитектуры с большим объёмом данных.....	18
Ермилов А.Э., Мисевич П.В. Интеллектуализация систем мониторинга с использованием ситуационного подхода и нечёткой логики.....	24
Лещева С.В., Лухманова Т.В., Волохин А.В. Замечание о теореме Э. Нётер.....	31
Манцеров С.А., Ильичев К.В., Бремзен А.М. Система сбора и подготовки диагностической информации для удаленного использования.....	37
Мохнина Н.В., Юрова Н.В. Коммутирующие элементы в классах сопряженности в группе Сузуки ${}^2B_2(q)$	45
Шамин Р.В., Козырев О.Р., Логвинова К.В., Обыденнова С.Ю., Гиниятуллин А.Р., Шмелева А.Г. Экономико-математическая модель негладкой оптимизации в задачах оценки конкурентоспособности наукоемких предприятий.....	50
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ.....	55
Байков А.И., Жеребцов А.Л., Захаров А.Г., Ковалев Д.В. Применение математического моделирования для анализа эффективности управления возбудителем синхронного двигателя газперекачивающего агрегата.....	55
Безносов А.В., Боков П.А., Волков Н.С., Журавлева О.Р. Контроль концентрации кислорода в свинцовом теплоносителе за счёт падающих струй и капель на его свободную поверхность.....	66
Бокова Т.А., Боков П.А., Безносов А.В., Львов А.В., Рябов Д.С. Характеристики системы регулирования содержания примесей в свинцовом теплоносителе на стенде ФТ-4 в НГТУ.....	72
Дмитриев С.М., Доронков Д.В., Легчанов М.А., Сорокин В.Д., Хробостов А.Е. Особенности конвективных турбулентных течений за перемешивающими дистанционирующими решетками ТВС-квадрат реактора PWR.....	78
Егоров А.Н., Семёнов А.С., Федоров О.В. Практический опыт применения преобразователей частоты POWER FLEX 7000 в горнодобывающей промышленности.....	86
Коробко Г.И., Ахлестин П.В. Анализ вариантов компенсации нелинейных искажений напряжения в судовой сети.....	94
Мальцев А.Н., Хватов О.С. Определение энергоэффективных режимов работы насосных агрегатов с частотно-регулируемым электроприводом на канализационных станциях.....	100
Новожилова О.О., Мелузов А.Г., Иванова Н.Л. Анализ применения ядерных реакторов в медицинской практике.....	108
Раевский А.С., Раевский С.Б., Рыжакова Т.С. Колебания и волны неоднородных электродинамических структур, присоединенные к источнику.....	114
Шилов М.П., Коробко Г.И. Разработка и моделирование систем управления генераторным агрегатом в автономных сетях.....	119

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО	126
Вашурин А.С., Трусов Ю.П., Орлов Л.Н., Шурыгин В. Ю., Разработка конструкции аутригера для предотвращения опрокидывания автомобиля при испытаниях.....	126
Зиновьев Ю.А., Колпаков А.А., Кузнецов С.В., Швецов В.Д., Белявский Г.И., Шнейберг А.М. Совершенствование изготовления литых распределительных валов	134
Куркин А.А., Васильев С.А., Ребрушкин М.Н. Судовой электронный упаравляющий комплекс грузовых судов внутреннего плавания.....	140
Панов А.Ю., Святлов Е.Е. Применение методов idef-моделирования при описании технологических процессов машиностроительного производства.....	149
Папунин А.В., Беляков В.В., Зезюлин Д.В., Макаров В.С., Колотилин В.Е., Порубов Д.М., Филатов В.И., Береснев П.О. Экспериментально-теоретические исследования преодоления рва многоосными колесными машинами.....	155
Песков В.И., Песков Д.В. Уточнение расчетного определения высоты эскарпа, преодолеваемого колесной машиной.....	163
Торопов Е.И., Трусов Ю.П., Мошков П.С., Аникин А.А., Вашурин А.С. Палутин Ю.И. Проведение натурных испытаний для отладки программно-аппаратного комплекса для оценки управляемости легких коммерческих автомобилей, оснащенных системами электронными контроля устойчивости. Особенности выполнения маневров на сухом и влажном асфальте.....	172
Шурыгин В.Ю., Тумасов А.В., Орлов Л.Н., Аникин А.А., Палутин Ю.И. Компьютерное моделирование испытаний по оценке энергопоглощающих свойств задней части спинки сиденья.....	178

CONTENTS

INFORMATICS AND MANAGEMENT IN TECHNICAL AND SOCIAL SYSTEMS....	11
Volzhankin N.V., Zlobina N.V., Posobilov N.E. Development and the choice of means and techniques for testing of the commercial systems constructed on machine training.....	11
Zlobina N.V., Volzhankin N.V., Posobilov N.E. The implementation of centralized monitoring for systems with complex architecture, with a large amount of data.....	18
Ermilov A.E., Misevich P.V. Intellectualization of monitoring systems using situational approach and fuzzy logic.....	24
Leshcheva S.V., LUHMANOVA T.V. VOLOHIN A.V. A note on E. Noeter theorem.....	31
Mancerov S.A., Ilichev K.V., Bremzen A.M. System of collection and standardization of diagnostic information for remote use.....	37
Mokhnina N.V., Yurova N.V. Commuting elements in conjugacy classes in the group Suzuki.....	45
Shamin R.V., Kozyrev O.R., Logvinova K.V., Obydenнова S.Yu., Giniyatullin A.R., Shmeleva A.G. Economic-mathematical model of nonlinear optimization in scientific enterprises competitiveness estimation problems.....	50
ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES.....	55
Baikov A.I., Gherebtsov A.L., Zaharov A.G., Kovalev D.V. The application of mathematical modeling for analysis of effectiveness of control of the exciter of the synchronous motor gaz pumping unit.....	55
Beznosov A.V., Bokov P.A., Volkov N.S., Zhuravleva O.R. Control of oxygen concentration in a lead coolant due to falling jets and drops on its free surface.....	66
Bokova T.A., Bokov P.A., Beznosov A.V., Lvov A.V., Ryabov D.S. Characteristics of system of regulation of content of impurity in the lead heat CARRIER at the FT-4 STAND IN NGTU.....	72
Dmitriev S.M., Doronkov D.V., Legchanov M.A., Sorokin V.D., Khrobostov A.E. Regularities of formation of flow of coolant behind mixing spacing grid of TVS-kvadrat of the PWR-TYPE reactor.....	78
Egorov A.N., Semenov A.S., Fedorov O.V. The practical experience of the application of the frequency converter POWER FLEX 7000 in the mining industry.....	86
Korobko G.I., Akhlestin P.V. Analysis of the variants of compensation of nonlinear distortion of voltage in the shipboard network.....	94
Maltsev A.N., Khvatov O.S. The definition of energy efficient modes in pumping units operation with variable frequency drives at the sewer stations.....	100
Novozhilova O.O., Meluzov A.G., Ivanova N.L. Analysis of application of nuclear reactors in medical practice.....	108
Raevskii A.S., Ryzhakova T.S., Raevskii S.B. Oscillations and waves of inhomogeneous electrodynamic structures connected to source.....	114
Korobko G.I., Shilov M.P. Development and modeling of control systems of generator set in autonomous mains.....	119

MECHANICAL AND TRANSPORT: THEORY, TECHNOLOGY, PRODUCTION.....	126
Vashurin A.S., Trusov Y.P., Orlov L.N., Shurigin V.Y. Development of an outrigger design used to prevent vehicle tipping during testing.....	126
Zinoviev Yr., Kolpakov A., Kuznetsov S., Shvetsov V., Belyavsky G., Schneiberg A. Improving the production of cast distributing shafts.....	134
Kurkin A.A., Vasiliev S.A., Rebrushkin M.N. Shipboard electronic control system of freight vessels of inland navigation.....	140
Panov A.Y., Svyatov E.E. The use of ideo modeling methods for description of technological processes of engineering production.....	149
Papunin A.V., Belyakov V.V., Zeziulin D.V., Makarov V.S., Kolotilin V.E., Porubov D.M., Filatov V.I., Beresnev P.O. Experimental-theoretical researches of moving across the ditch by multi-wheeled vehicles.....	155
Peskov V.I., Peskov D.V. Elaboration on calculate determination of height of the escarpe, overcoming by the wheeld car.....	163
Toropov E.I., Vashurin A.S., Trusov Y.P., Moshkov P.S., Anikin A.A., Palutin Y.I. Field tests for debugging of a software and hardware complex for the needs of evaluation of controllability of light commercial vehicles (LCV) equipped with electronic stability control (ESC) systems. Particularities of maneuvers on dry and wet asphalt.....	172
Shurygin V. Y., Tumasov A. V., Orlov L. N., Anikin A. A., Palutin Y. I. Computer simulation of tests for the assessment of the energy-absorbing properties of the back of the seat back.....	178

ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

УДК 004.054, 004.85

Н. В. Волжанкин, Н. В. Злобина, Н. Е. Пособилов

РАЗРАБОТКА И ВЫБОР СРЕДСТВ И МЕТОДИК ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ КОММЕРЧЕСКИХ СИСТЕМ, ПОСТРОЕННЫХ НА МАШИННОМ ОБУЧЕНИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева

Анализируются современные алгоритмы машинного обучения и их применение в практических задачах и проектах. Выделяется стадия прототипирования систем с машинным обучением, разработка модели, подходы к тестированию и выявлению ошибок и слабостей проектируемой системы. Рассматриваются современные технологии, позволяющие организовать тестирование на ранних этапах проектирования. Результатом является методика, позволяющая избежать ошибок в системе на самом раннем этапе разработки, что дает возможность минимизировать издержки на исправление дефектов на более поздних этапах.

Ключевые слова: машинное обучение, алгоритмы, тестирование, методики, проектирование систем, коммерческие системы.

Все больше и больше компаний, особенно крупных, развивают и внедряют программное обеспечение на основе машинного обучения. Современные технологии и вычислительные мощности позволяют обрабатывать огромные объемы данных, в современном языке был введен такой термин, как Big Data, что позволит крупным компаниям проводить более глубокую аналитику на основе имеющихся баз данных, сформированных за многие годы.

Машинное обучение – это использование некоторого алгоритма обработки и анализа данных для дальнейшего принятия решения или предсказания поведения. Такой подход позволяет решить главную проблем создания таких систем программистами – установить множественные связи между исходными данными и конечным выводом. Представим, что у нас есть база данных, где каждому клиенту соответствует некий набор параметров. Этих параметров может, быть много, более тысячи, характеризующие клиента со всех сторон. Это личная информация, количество обращений, время обращения, география обращения клиента, информация для связи и т.д. Чтобы программист смог сделать программу, учитывающую все эти параметры и делать некий вывод, потребовалось бы несколько лет и необязательно, что все пройдет гладко и мы правильно интерпретируем начальные данные. Поэтому формирование этих связей необходимо переложить на машину. На основе некой обучающей выборки машина постепенно подстраивает связи между вводом и выводом, которые мы заранее определили без участия программы. Когда мы полностью обучаем машину на имеющихся у нас данных – она сможет предсказывать вывод на новых данных от будущих клиентов.

Машинное обучение придумали создатели искусственного интеллекта, и сейчас алгоритмические подходы включают обучение дереву принятия решений, индуктивное логическое программирование, кластеризацию, обучение с подкреплением, Байесовы сети и т.д.

Нет никаких сомнений в том, что машинное обучение находится на вершине кривой

зрелости технологий, что вызывает очень важные изменения в бизнес-процессах многих компаний.

Речь идет не столь о крупных гигантах, которые вкладывают огромные бюджеты в исследовательские проекты, вроде Google и Microsoft. В реальном мире все из списка Fortune 500 увеличивают свою капитализацию с помощью систем, построенных на машинном обучении. Это позволяет:

1. **Сделать пользовательский контент ценным ресурсом.** Если взять контент пять лет назад и современный из некоторых источников – он совершенно низкого качества. Опечатки, ложная информация и прочие факторы, превращающие в совершенно нечитабельной для клиента. Благодаря же машинному обучению мы сможем отфильтровать его, проранжировать самый ценный для нас и отбросить ненужный. Самый простой пример – определение спама, что уже сейчас применяется во многих сервисах.

2. **Найти продукт быстрее.** Активно эту тенденцию подхватили все поисковые компании. Даже компания Google поставила во главу поискового подразделения специалиста по машинному обучению. Машинное обучение позволяет более глубоко анализировать запрос, который указал пользователь, в купе с его историей поиска, интересов и потребностей, и способен учитывать все факторы, что повышает релевантность конечно результата для пользователя.

3. **Привлечь интерес покупателей.** Сейчас многие обратили внимание, что все реже в интернет-магазинах мы можем встретить форму «свяжитесь с нами». Компании тратят большие издержки на маршрутизацию пользователя, машинное обучение, благодаря обучающемуся алгоритму можно проанализировать суть запроса и направить пользователя в нужное место.

4. **Понять поведение клиента.** Огромная область, особенно с точки зрения маркетинга. Например, работа с эмоциональным окрасом высказываний, многие решения принимались во многом, благодаря подобному поведению. Можно в режиме реального времени отслеживать пожелания пользователей, чтобы предугадать изменения, которые нужно внести для охвата большей аудитории. Каналом для отслеживания мнений сейчас достаточно, в том числе и социальные сети.

На основе всего изложенного можно с уверенностью заявить, что систем, основанных на машинном обучении, будет появляться все больше и больше. Однако построение таких систем – задача, которая таит под собой множество подводных камней. На проектирование и построение подобных программы могут тратиться огромные бюджеты и ошибки, допущенные на всех этапах производства, могут свести выгоду от введения в эксплуатацию подобных решений к нулю, если не обернутся убытками для компаний. Именно поэтому важной частью жизненного цикла таких систем является тестирования на всех этапах.

Области знаний, необходимые для успешной разработки систем с машинным обучением, представлены на рис. 1.



Рис. 1. Области знаний, необходимых для работы с машинным обучением

Тестирование информационных систем является ключевым аспектом по снижению затрат на издержки при вводе ПО в промышленную эксплуатацию. Для эффективного тестирования необходимо разработать общую модель процесса, используя самые современные средства и подходы, чтобы обеспечить максимальную эффективность.

Для реализации автоматического тестирования алгоритма необходима реализация экспериментов, выявляющих его характеристики. Для того, чтобы алгоритм был востребован, его эффективность должна быть подтверждена экспериментами на реальных данных. Эксперименты должны быть легко воспроизводимыми, чтобы любой ранее полученный результат можно было перепроверить, и стандартизованными, чтобы результаты, полученные разными людьми, были сопоставимы. В машинном обучении точность воспроизводимости достичь довольно сложно, так как это требует соблюдения ряда условий.

1. *Идентичность реализации алгоритма.* Поскольку один и тот же алгоритм можно представить в разном виде, в том числе он может быть реализован на разных языках программирования либо же просто формально описан. К тому же, в случае коммерческих алгоритмов, код реализации недоступен, поскольку несет коммерческую тайну.

2. *Идентичность методики тестирования.* Описания методики кросс-валидации часто поверхностны и не содержат таких важных деталей, как стратификация выборки по классам или признакам. Более того, точное воспроизведение результатов эксперимента невозможно без знания множества разбиений выборки на обучение и контроль, которое, как правило, генерируется случайным образом и не запоминается.

3. *Идентичность исходных данных.* Хотя данные, как правило, берутся из одного источника (чаще всего из репозитория UCI), детали предварительной обработки (нормировка, заполнение пропусков, и т.д.) тоже часто опускаются.

Различия в конечных показателях результатов экспериментов могут существенно зависеть от проблем, описанных ранее. Все это может повлиять на наш конечный выбор, хотя данные показатели совершенно необъективны. Если полученные результаты расходятся, то причиной может быть различие и в реализации алгоритмов, и в методике тестирования, и в данных.

Для решения данных проблем были попытки создания систем для автоматизации экспериментов в машинном обучении. Они наталкивались на технологические и организационные трудности, однако развитие Web-технологий привело к созданию нескольких общедоступных систем: TunedIt, MLComp. Подобные системы в своей основе имеют пополняемый репозиторий задач и алгоритмов. Каждая из них использует для тестирования алгоритмов методику кросс-валидации, которая заключается в множественном разбиении данных, используемых при обучении алгоритма (пары входные данные – результат), на категории «обучение» и «контроль», что позволит вычислять показатели качества решаемой задачи (вычислять среднюю ошибку на контроле). Результаты экспериментов выдаются через веб-интерфейс. Однако каждая из систем имеет свои отличия, например в том, как исполняются алгоритмы, какие типы допускаются, где они хранятся, как происходит тестирование, какие характеристики измеряются и что выдается конечному пользователю.

Система TunedIt. Система состоит из трех блоков – «базы знаний», «репозитория задач и алгоритмов» и «тестирующей» (*TunedTester*). *TunedTester* позволяет запускать алгоритмы и выгружать результаты тестирования на сервер системы. Этот компонент работает локально, поэтому пользователь должен загрузить и установить на свой компьютер программу с сайта www.tunedit.org. Все необходимые для тестирования задачи и алгоритмы загружаются на компьютер пользователями автоматически при запуске тестирования. Алгоритмы, используемые *TunedTester*'ом должны быть написаны на языке JAVA. Компонент работает с алгоритмами из библиотек WEKA, Rselib и DeBellor. Для добавления алгоритма надо встроить его в одну из этих трех библиотек. В системе есть стандартная

процедура тестирования – разбиение задач на обучение и контроль (случайное, 70/30). Качество алгоритма оценивается как доля ошибок на контроле. Пользователь может дополнить систему собственной процедурой тестирования (*evaluation procedure*), использующей произвольные разбиения задачи и выдающей на выходе любую другую скалярную величину. База знаний предоставляет интерфейс для сравнения результатов различных алгоритмов. Сравнение возможно только в контексте одной задачи и одной процедуры тестирования. Для каждого алгоритма указывается количество запусков процедуры тестирования, среднее значение и стандартное отклонение данной оценки качества на данной задаче. Для стандартной процедуры тестирования оценкой является доля ошибок на контроле.

Ограничения:

1. Ограничение на язык программирования (JAVA).
2. Отсутствуют механизмы контроля мета-параметров, влияющих на процедуру обучения. Например, оценка качества работы SVM может вычисляться при различных ядрах.
3. На выходе процедуры тестирования может быть только скалярная величина, что ограничивает возможности детального анализа.
4. Для тестирования алгоритма необходимо иметь его исполняемый код (*java*-класс), что невозможно в случае коммерческих алгоритмов.

Система MLComp. Реализуют другую схему работы с алгоритмами – алгоритмы исполняются не на стороне пользователя, а на сервере системы. Для тестирования алгоритма пользователь загружает свою программу на сайт и запускает её выполнение (*run*) на одной из задач. Программа выполняется в среде Linux. Система не накладывает ограничений на язык программирования. Так как алгоритмы выполняются на одном сервере и имеют одинаковые вычислительные ресурсы, в рамках MLComp можно сравнивать скорости работы алгоритмов. В плане процедур тестирования MLComp значительно уступает TunedIt. Проблема заключается в выбранном подходе к тестированию – формат задачи требует явного указания тестовой и контрольной подвыборок, и эта информация хранится в данных задачи. Все тесты алгоритмов на задаче происходят на одном и том же разбиении, что делает невозможным статистически надежную оценку характеристик качества работы алгоритма.

Ограничения:

1. Только одно разбиение задачи на обучение и контроль, в результате низкая статическая надежность получаемых оценок.
2. Для тестирования алгоритма необходимо передать разработчикам системы его исполняемый код (программу), что невозможно в случае коммерческих алгоритмов.
3. Ограничение на определенную систему (Linux).

Все описанные системы не могут полностью удовлетворить потребности коммерческих организаций для решения задачи выбора алгоритма. Для решения была разработана собственная система, которая лишена недостатков данных решений.

Собственная система Choice. Качественно отличается от прошлых систем. Имеет несколько существенных отличий. Главное отличие – архитектура данной системы. Она является распределенной, что позволяет исполнять работу алгоритма на стороне клиента, а все вычисления происходят на стороне сервера **Choice**. Задачи для алгоритмов формируются из запросов пользователей, либо их можно задать самому. Каждый клиент, производящий тестирование, предоставляет часть своих вычислительных мощностей, что делает систему единой, но при этом коммерческая тайна сохраняется, поскольку исходный код не посылается на сервер. За счет этого программа может быть реализована на любом языке программирования, это не повлияет на конечный результат, единственное ограничение – поддержка web-сервисов, что алгоритм мог взаимодействовать с системой. Благодаря этим архитектурным особенностям к системе можно подключать коммерческие версии алгоритмов.

Во-вторых, в **Choice** существенно глубже проработана методика тестирования. Для каждого тестируемого алгоритма можно задать несколько задач, но для каждой будет

использоваться одно множество разбиений, определенное заранее, что позволяет нам обеспечить полную воспроизводимость результатов тестирования, что обеспечит статическую надежность полученных результатов. Помимо стандартного параметра качества: частоты ошибок на контроле – статистика собирается из множества скалярных и графических характеристик для подробного, детального анализа качества алгоритма. Вся информация после тестирования сохраняется на стороне сервера и может выдаваться пользователю сколько угодно раз, в следствии чего мы можем полностью выгружать все наши результаты и делать конечный выбор, в зависимости от задачи. **Choice** оперирует с четырьмя типами объектов: задача, разбиение, алгоритм и статистика.

Репозиторий задач классификации. Задача классификации задачи Z описывается в **Choice** следующим набором данных:

- матрица $F = (F_{ij}) \in \mathbb{R}^{L \times n}$ значений j -го признака на i -м объекте;
- вектор $y = (y_i)_{i=1}^L \in Y^L$ правильных ответов;
- матрица $C = (C_{uv}) \in \mathbb{R}^{m \times m}$ стоимости потерь при ошибочном соотнесении объекта класса u к классу v ($|Y| = m$);
- вектор информации $I = (I_j)_{j=1}^n$ о типах признаков (номинальный, вещественный).

Задачи могут быть загружены в формате APTF либо во внутреннем формате **Choice** в виде нескольких csv-файлов с данными. Пользователь также может предоставить данные своего тестирования общественности либо сделать все приватным.

Методика тестирования. Для каждой задачи Z формируется набор разбиений по стандартной схеме кросс-валидации «10x5-fold CV» и девять наборов по десять случайных разбиений с одинаковой длиной обучения (от 10 до 90% от длины выборки с шагом в 10%). В контроль и обучение объекты разных классов попадают в такой же пропорции, как и в исходной задаче. Все разбиения сохраняются, без привязки к алгоритму, а в привязке к задаче. Если задача Z однажды тестировалась в **Choice**, то будут использоваться разбиения, что были определены при прошлом тестировании. Этот аспект позволяет нам судить о результатах тестирования в едином контуре. Все алгоритмы тестируются в одинаковых условиях и на одинаковых исходных данных.

Репозиторий алгоритмов классификации. Алгоритм классификации A принимает на входе:

- матрицу обучающей выборки $F = (F_{ij}) \in \mathbb{R}^{l \times n}$,
- вектор $y = (y_i)_{i=1}^l \in Y^l$ правильных ответов на обучающей выборке,
- матрицу $C = (C_{uv}) \in \mathbb{R}^{m \times m}$ стоимости потерь;
- вектор информации I о типах признаков;
- вектор W мета-параметров алгоритма;
- матрицу тестовой выборки $F' = (F'_{ij}) \in \mathbb{R}^{k \times n}$.

И выдает на выходе:

- ответы $y' = (y'_i) \in Y^k$ на тестовом наборе;
- матрицу оценок $P' = (P'_{iv}) \in [0,1]^{k \times m}$ принадлежности i -го объекта тестовой выборки v -му классу задачи.

Мета-параметры W задаются пользователем перед запуском алгоритма на тестирование. Экземпляры алгоритма A с различными значениями мета-параметров W (а также различных версий) считаются различными, и результаты их тестирования сохраняются в отдельных записях. Это позволяет **Choice** лучше обеспечивать воспроизводимость по сравнению с TunedIt. Взаимодействие с алгоритмами происходит при помощи специальной прослойки AlgProху, которую должен реализовать автор алгоритма. AlgProху обеспечивает обмен данными между алгоритмом A и веб-сервисом Полигона. Модель взаимодействия основана на подходе «клиент-сервер», где AlgProху – это клиент, а **Choice** – это сервер. Инициатором взаимодействия выступает AlgProху, который постоянно опрашивает **Choice**, «не появились ли задания для алгоритма A ?». Если ответ положительный, то AlgProху получает задание и начинает выполнение алгоритма A . Задание содержит данные задачи Z ,

параметры алгоритма W и набор разбиений $S = (S_q)$. AlgProху тестирует алгоритм A на разбиениях A , на разбиениях S и передает результаты в системе **Choice**. В упрощенном виде схема работы AlgProху выглядит следующим образом:

- запросить новое задание;
- если задания нет, то через N секунд перейти к первому пункту;
- если задание есть, то запросить данные задачи классификации;
- провести тестирование алгоритма;
- отправить результаты тестирования на сервер Полигона.

Оценки качества алгоритма для задачи. Статистика – это функция, которая принимает на входе: данные задачи классификации Z ; набор разбиений $S = (S_q)$ задачи Z , использованных при тестировании алгоритма; результаты работы алгоритма (y'_q) и (P'_q) на каждом q -м разбиении. На выходе функция выдает: скалярное или векторное значение, описывающее одну из характеристик качества алгоритма. **Choice** рассчитывает следующие статистики:

- частота ошибок на обучении и на контроле, а также средняя переобученность (с доверительным интервалом);
- среднее смещение и средняя вариация (характеристики адекватности и устойчивости модели);
- доля «шумовых» (где алгоритм часто ошибается), «пограничных» и «эталонных» (на которых алгоритм ошибается редко) объектов;
- распределение частоты ошибок и переобученности (показатели устойчивости классификации);
- зависимость переобученности и частоты ошибок от длины обучения;
- карта ошибок – точечный график: по оси X частота ошибок на обучении, по оси Y частота ошибок на контроле, каждая точка на карте соответствует одному разбиению;
- разделение ошибок на смещение и вариацию (анализ качества модели);
- ROC-кривая и площадь под ROC-кривой (анализ соотношения ошибок I и II рода);
- распределение отступов (margin) объектов: по оси X – объекты, по оси Y – средний отступ объекта от границы класса (ещё одно разделение объектов на «шумовые», «пограничные» и «эталонные»).

Большинство статистик вычисляются как по всей выборке, так и отдельно по классам, а также отдельно для обучающей и контрольной выборки (если это осмысленно). Результаты расчетов могут быть выгружены в «сыром» виде, что позволяет пользователю дополнить имеющиеся статистики собственными.

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

Во-первых, для коммерческих проектов реализации систем с машинным обучением крайне важно корректная разработка алгоритма на раннем этапе проекта, а именно его тестирование, поскольку это может привести к огромным издержкам, увеличивающим стоимость проекта в разы.

Во-вторых, тестирование – основа качественной разработки алгоритма машинного обучения. Без него невозможно понять, правильно ли он составлен и решает ли конечную задачу.

В-третьих, для тестирования алгоритма необходимо использовать систему **Choice**. Система не привязана к конкретному языку программирования, система позволяет работать с коммерческими алгоритмами и система предлагает широкий спектр инструментов, позволяющих оттестировать алгоритм по многим параметрам, составить статистики по работоспособности алгоритма и полностью выявить проблемы «обучения» компьютера. Проектирование модели с использованием инструмента **Choice** позволит сократить время разработки 1 этапа и позволит выявить ошибки на самой ранней стадии разработки.

Библиографический список

1. **Воронцов, К.В.** Система эмпирического измерения качества алгоритмов классификации / К.В. Воронцов, А.С. Инякин, С.Ю. Лисица // Всерос. конф. ММРО-13. – М.: МАКС Пресс, 2007. – С. 577-581.
2. **Воронцов, К.В.** «Полигон» - распределённая система для эмпирического анализа задач и алгоритмов классификации / К.В. Воронцов [и др.] // Всерос. конф. ММРО-14 – М.: МАКС Пресс, 2009. – С. 503-506.
3. **Domingos, P.A.** Unified bias-variance decomposition and its applications: LCML'17. – 2000. – Pp. 231-238.
4. **Frank, A.** UCI Machine Learning Repository / A. Frank, A. Asuncion // University of California, Irvine, School of Information and Computer Sciences, 2010. www.ics.uci.edu/~mllearn/MLRepository.html.
5. **Hand, D.** A simple generalization of area under the ROC curve for multiple class classification problems / D. Hand, A. Till // Machine Learning, 45. – 2001. – P. 171-186.

*Дата поступления
в редакцию 15.08.2017*

N.V. Volzhankin, N.V. Zlobina, N.E. Posobilov

METHODS FOR TESTING INFORMATION SYSTEMS BASED ON MACHINE LEARNING

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

Purpose: The goal is to study methods for testing information systems based on machine learning.

Design/methodology/approach: For the first stage of the study, it is necessary to conduct a theoretical analysis and generalization of the scientific literature and documents in order to get acquainted with the basic concepts and characteristics of information systems based on machine learning, as well as their testing.

In the second stage, the results of the theoretical analysis are processed, specific methods are developed to support the testing of these systems.

At the third stage, the development of tools to automate the testing process and make it the most effective in terms of time and resources.

Findings: To conduct economic analysis of the testing process, to study modern algorithms and criteria for selecting an algorithm for a particular task, to formulate the automation of this choice, to study the data handling module, to develop an automated testing system for the DWH module.

Research limitations/implications: The results of the study presented in this paper have limitations in the field of application, since the company is considering companies with powerful infrastructure and a large amount of data. These methods can form the basis for other solutions to solve specific problems.

Originality/value: The development of systems allowing to automate the testing process.

Key words: machine learning, algorithms, testing, techniques, system design, commercial systems.

УДК 004.052.32, 004.052.42, 004.418

Н.В. Злобина, Н.В. Волжанкин, Н.Е. Пособилов

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО МОНИТОРИНГА ДЛЯ СИСТЕМ СЛОЖНОЙ АРХИТЕКТУРЫ С БОЛЬШИМ ОБЪЕМОМ ДАННЫХ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматривается проблема централизованного управления логами процессов. Выдвинуты основные требования к внедряемой системе, обозначена главная цель системы и обозначен список задач, которые должна решать система для улучшения качества и эффективности работы ИТ отдела. Проведен сравнительный анализ существующих решений. Рассмотрены основные особенности и характеристики лучшего решения, которое впоследствии было внедрено на предприятии.

Ключевые слова: мониторинг, логирование, IT-процессы.

На предприятии существует большое количество сложноконтролируемых процессов (приложений), распределенных по серверам локальной сети и персональным рабочим станциям. Эти процессы (приложения) логируют свои активности в текстовые файлы в разных объемах и с разной скоростью (рис. 1).

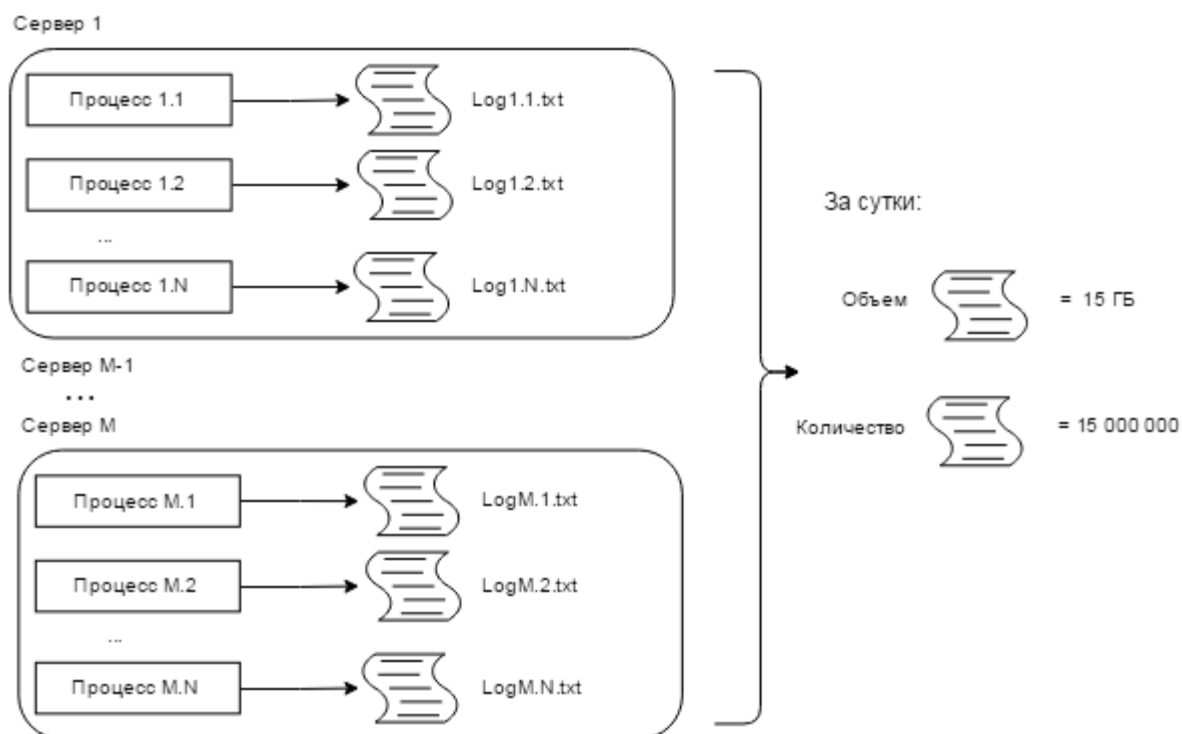


Рис. 1. Схема процессов на предприятии

При такой организации рабочего процесса выявлены следующие проблемы:

- текстовые логи занимают большое количество места на серверах;
- поиск информации о логах процесса занимает крайне много времени;
- узнать о проблеме, ошибке или крахе приложения своевременно с помощью логов практически невозможно.

Чтобы иметь представление о результатах и эффективности работы приложений на

серверах, необходимо заниматься изучением файлов с логами, на что требуется очень много времени. При этом любое нестандартное поведение может повлечь за собой отказ того или иного процесса или их комплекса. В таких условиях обнаружить проблему на одном из многочисленных серверов среди взаимосвязанных процессов сложно и трудоёмко.

Таким образом, выявлены неэффективности по показателю времени работ, которые во всех случаях влекут за собой убытки компании.

Чтобы избежать ситуаций, приводящих к убыткам, когда первыми ошибки в системе замечают пользователи продукта, а не сотрудники предприятия, необходимо:

- контролировать процессы;
- вести статистику работы процессов;
- знать о любых отклонениях от нормы в поведении процессов;
- получать уведомления о нештатных ситуациях;
- узнать слабые стороны процессов и понять, в каком направлении вести доработки и оптимизацию.

Поэтому необходимо проводить исследования по возможности автоматизации контроля и работы с текстовыми логами путем внедрения централизованной системы мониторинга.

Целью является исследование способов решения проблем в работе с текстовыми логами на предприятии и дальнейшая оптимизация работы путем внедрения централизованной системы мониторинга.

Глобальный мониторинг по локальной сети, в состав которой входят серверы, точки доступа, персональные рабочие станции и прочее сетевое оборудование, не требуется – это задача системных администраторов. Текущая проблема ограничивается одним отделом, внутри которого необходимо контролировать лишь выборочные процессы и программы, для этого необходима система централизованного сбора, хранения и анализа информации из лог-файлов.

Для организации системы контроля и слежения за процессами составлен следующий алгоритм действий:

- собрать информацию о процессах логирования, существующих решениях обозначенной проблемы;
- провести сравнительный анализ всех вариантов и выбрать лучший;
- организовать работу программ и приложений так, чтобы их результаты были измеряемыми;
- внедрить систему мониторинга;
- провести анализ нового рабочего процесса и его результатов;
- обучить специалистов тому, как проводить мониторинг и оценку;
- встроить мониторинг и оценку в деятельность организации.

Запись логов необходима по нескольким причинам:

- появляется возможность узнать всё о состоянии системы в настоящий момент без помощи отладчика;
- доступна информация о прошлых состояниях системы, что позволяет узнать причины, по которым система оказалась в определенном состоянии;
- есть возможность проведения анализа потребления ресурсов.

Логи по признаку действующего лица можно разделить на два типа: действия и события с точки зрения пользователя и с точки зрения разработчика.

По области, к которой относятся логи, можно разделить на три типа: системные (SYSTEM), безопасности (SECURITY) и приложения (APPLICATION). Например, таким образом классифицируются системные события в Windows семейства NT.

Процесс логирования необходимо реализовывать, основываясь на следующих правилах:

- максимально короткие сообщения;
- максимально информативные сообщения;
- вывод лога в отдельной строке;
- локализация ошибки только для редких сообщений;
- лучше не использовать преобразования типов;
- разделение по уровням логирования.

Уровни помогают определить критичность сообщения и приемлемое время реакции на него. Далее приведены допустимые уровни журнала (в порядке убывания критичности): Fatal, Error, Warn, Info, Debug, Trace.

Ротация файлов

Со временем количество файлов и их вес могут стать критичным для системы, поэтому необходимо при наступлении определенных условий необходимо подменять активный файл записи.

Процесс ротации:

- архивация старого лога;
- сохранение с другим именем, например: log.txt (текущий файл) сохраняется как log1.txt;
- очистка текущего файла логирования;
- удаление старых логов по определенному признаку;
- возможный перезапуск процесса записи логов.

Чаще всего используемые условия: привязка к дате (регулярная ротация) или размеру файла (ротация по достижению критического размера).

Асинхронная запись логов

Сообщения некоторого типа можно записывать пачками, а более критичные сообщения требуют мгновенной записи, но необходимо, чтобы размер буфера был гибко настраиваемый.

Когда производится асинхронная запись лог, возможны три варианта поведения.

1. Если очередь не заполнена, регистрационное сообщение записывается. В противном случае, если очередь полна (количество сообщений в нем достигается `max_size`), то вызов блокируется до тех пор, пока очередь не закончится.

2. Рабочий поток выталкивает сообщение из очереди и регистрирует сообщение, в зависимости от уровня лога.

3. Если исключение происходит в рабочем потоке (например, не удалось войти в файл) исключение будет повторно сгенерировано, когда пользователь вызовет следующее сообщение журнала. Таким образом, пользователь может получать уведомления об ошибках, происходящих в рабочем потоке.

Конфигурация файлов

Ответа на вопрос, сколько нужно логировать информации, – нет. С точки зрения конечного пользователя – чем меньше, тем лучше. Меньше тратится ресурсов и процессорного времени на запись и хранение и больше времени остается на работу. Но с точки зрения разработчиков, количество логов должно быть максимальным, чтобы в любом случае получать полный отчет о работе приложения. Чтобы определиться с количеством и качеством логов для конкретного случая, необходимо часто менять и настраивать процесс логирования. Для удобства в работе этого процесса необходимо отдельно вынести его настройки. Необходимо, чтобы такая настройка была отделена от приложения, таким образом реализуется возможность изменения конфигураций без изменения программного кода. (например в *NIX - сервис `syslog`, в Windows семейства NT – `NTEventViewer`.) Таким образом, получаем возможность гибкой настройки места логирования или сообщений определенного типа.

Проверка лог-сообщений

Если зарегистрированная информация лога является частью фундаментального бизнес-процесса, то было бы правильно добавить некоторые тесты для проверки. Необязательно проверять каждое лог-сообщение и каждую функцию, но функции, являющиеся основополагающими в бизнес-процессе, выполняющие критически важные задачи, требуют больше внимания и контроля со стороны разработчиков. Например, функция оплаты заказа в интернет-магазине явно имеет высокую критичность. Поэтому при поступлении лог-сообщения об ошибке в процессе оплаты необходимо удостовериться, что такая ошибка действительно существует и может привести к серьезным убыткам. Далее представлен алгоритм тестирования логгеров:

1. Получить ссылку на тестируемый логгер.
2. Сохранить уровень ведения журнала для этого регистратора (для восстановления после запуска теста).
3. Поднять уровень ведения журнала до ожидаемого уровня.
4. Выполнить код, который должен запускать ведение журнала.
5. Проверить правильность сообщения и информации.
6. (После теста - то есть срыва) восстановить уровень ведения журнала до исходного значения.

В результате проведенных исследований было найдено несколько доступных решений, для обозначенной проблемы. Далее описаны особенности каждой из систем.

Logstash. Бесплатное OpenSource приложение отвечает за прием логов по сети, фильтрацию, категоризацию, парсинг и дальнейшую передачу elasticsearch. Система в целом представляет из себя связку:

- elasticsearch – поисковый движок. Обрабатывает логи, что в дальнейшем обеспечивает очень быстрый поиск архивным логам;
- kibana – веб-приложение с удобным интерфейсом для визуализации и фильтрации логов;
- logstash-forwarder – агент на сервера который будет отправлять нужные логи на демон logstash.

Есть возможность использовать фильтры для сбора логов приложений и структурирования данных, благодаря чему данные можно легко запросить и проанализировать.

Недостатки: необходимость Java на всех серверах, высокие требования к памяти, потенциально может влиять на работу других сервисов, сложный в настройке.

Splunk. Входными данными являются произвольные текстовые данные, разбитые на строки. Способы их доставки в Splunk весьма гибкие. Самое простое – установить на сервера агент Splunk, указать ему каталоги или конкретные файлы, которые надо мониторить, и он будет автоматически отсылать обновления на центральный сервер. Можно самостоятельно доставлять логи на сервер Splunk, например, посылая их туда через по HTTP, TCP, UDP. Еще Splunk умеет брать данные из Windows (Logs, Events, Performance Counters).

Недостатки: лицензия Splunk Free предназначена для индивидуального использования, есть ограничение на максимальный объем индексации в 500 МБ/день.

Graylog. Бесплатное OpenSource приложение ставится в связке с elasticsearch, имеет свою систему визуализации, систему сбора логов. Организованный сбор событий, фильтрация, поиск, автоматизация, аналитика и интерфейс. Состоит из следующих компонентов:

- graylog2-webui — web-интерфейс на Rails;
- graylog2-server — Java TCP/UDP лог-коллектор;
- mongodb для хранения и настроек всей системы в целом.

Недостатки: плоская схема базы.

Проведенный сравнительный анализ показал, что большими преимуществами в заданных условиях обладает система GrayLog. Основными преимуществами системы являются:

- агрегация сообщений в streams. Объединение потоков логов с нескольких хостов по ключевому слову;
- на stream можно настроить оповещения и отправлять их на почту;
- агрегация хостов в группы. Можно объединить потоки с разных хостов в одну группу;
- выборки из всего массива по regex, по времени, по важности, по facility;
- блеклисты для логов. По regex можно отфильтровать логи. Возможность настроить запрет на запись в базу для некоторых потоков;
- авторотация логов. Вычищение старых записей на mongodb, которая автоматически работает с помощью механизма «sappedcollections»;
- возможность использования GELF — graylogextendedlogformat, расширяя стандартную длину syslog сообщения в 1024 байта. С помощью GELF можно отслеживать не только системные сообщения, но уже и логику работы кода, посылая развернутые сообщения прямо из приложения;
- проект бесплатный (GPLv3), активно развивается.

Для осуществления централизованного управления и мониторинга были развернуты системы на базе свободно распространяемых продуктов, что обеспечило максимально эффективное решение. Схема внедренной системы представлена на рис. 2.

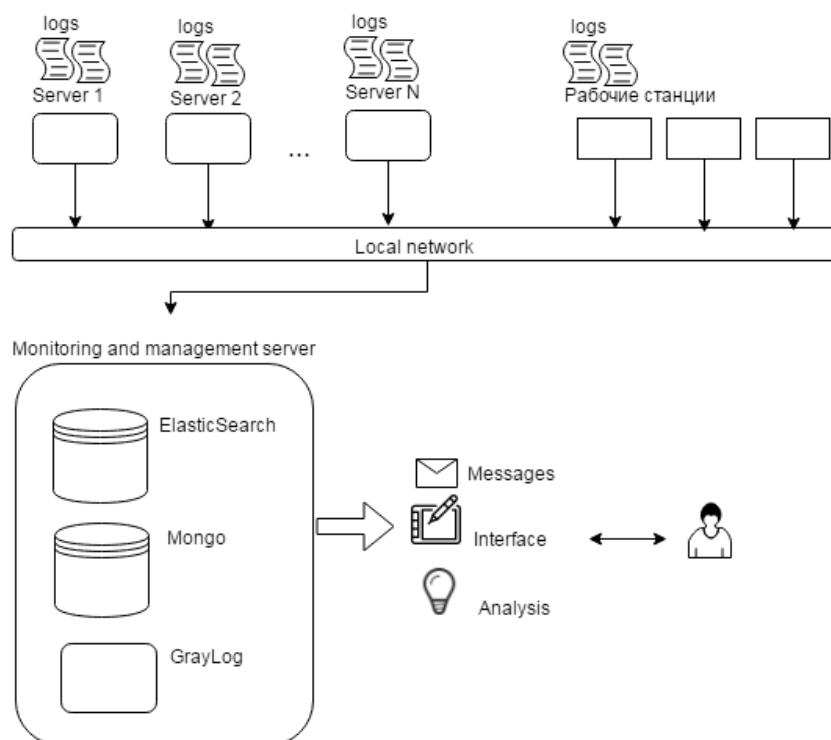


Рис. 2. Схема внедрения системы

Результаты

На одном из ИТ предприятий, внедрив централизованную систему GrayLog для работы с логами, удалось автоматизировать следующие процессы:

- мониторинг работоспособности и производительности процессов в рамках ИТ отдела;
- оповещения о проблемах технических специалистов, ответственных за соответствующие компоненты информационной инфраструктуры до того, как они нанесли существенный ущерб и повлияли на работу пользователей;
- анализ и визуализация статистических данных.

Также в результате внедрения системы удалось повысить эффективность труда сотрудников информационных отделов за счет снижения трудозатрат на поиск проблем и их причин, а также автоматизации ряда рутинных операций;

Библиографический список

1. **Олифер, В.** Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: учебник для вузов / В. Олифер, Нат. Олифер. – 4-е изд. – СПб.: Питер, 2011. – 944 с.
2. Технологии анализа данных: DataMining, VisualMining, TextMining, OLAP : учеб. пособие / А.А. Барсегян [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. — СПб. : БХВ-Петербург, 2007. — 382 с.
3. **Лукас, М.** FreeBSD. Подробное руководство: [пер. с англ.] / М. Лукас. – 2-е изд. – СПб.: Символ Плюс, 2009. – 864 с.
4. Event Logs and Multithreaded Components[Электронный ресурс] // microsoft.com URL: <https://msdn.microsoft.com/en-us/library/0680sfkd.aspx>
5. Application logging principles[Электронный ресурс] // thekua.com, 2008 URL: <https://www.thekua.com/atwork/2008/11/application-logging-principles>
6. **Скрипник, В.М.** Оценка надежности технических систем по цензурированным выборкам / В.М. Скрипник, А.Е. Назин. – Минск: Наука и техника, 1981. – 144 с.
7. Ведение лога приложения[Электронный ресурс] // skipy.ru ,2010 URL: <http://www.skipy.ru/useful/logging.html>
8. .NET Logging tools and libraries [Электронный ресурс] // dotnetlogging.com, URL: <http://www.dotnetlogging.com/comparison/>
9. Анализ логов в реальном времени [Электронный ресурс] // habrahabr.ru, 2012, URL: <https://habrahabr.ru/post/150657/>
10. **Ромашко, Б.** Логирование проекта с помощью NLogFramework[Электронный ресурс] // itvdn.com, itvdn.com URL: <https://itvdn.com/ru/blog/article/logging-project-with-nlog-framework>

*Дата поступления
в редакцию 15.08.2017*

N.V. Zlobina, N.V. Volzhankin, N.E. Posobilov

PROVIDING CENTRALIZED MONITORING OF APPLICATIONS OF DISTRIBUTED INFORMATION SYSTEMS

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

Purpose: The goal is to optimizing the work with text logs, by implementing a centralized management system.

Design/methodology/approach: The scheme for implementing centralized management and monitoring is presented. For implementation, no funds are required, the system can be deployed on the basis of freely distributed products, which provides the most effective solution.

Findings: As a result of this work, information was collected on logging processes, existing solutions to the problem, a comparative analysis of all options was made and the best one was selected. The work of programs and applications is organized in such a way that their results are measurable, and a monitoring system is introduced. The analysis of a new workflow and its results is carried out.

Research limitations/implications: This monitoring system may have problems with the speed of processing and issuing information when the permissible volumes of incoming data increase with the indicated resources.

Originality/value: The analysis showed the most optimal solution to the problem. Having provided automated monitoring, it was possible to achieve an increase in the IT department performance indicators.

Key words: monitoring, logging, IT-processes.

УДК 004.415

А.Э. Ермилов, П.В. Мисевич

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИТУАЦИОННОГО ПОДХОДА И НЕЧЁТКОЙ ЛОГИКИ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматриваются тенденции в вопросах построения современных системах мониторинга и вопросы использования аппарата фреймов для создания программного обеспечения. Выявлены современные тенденции применения теории фреймов. Приводится описание программно-аппаратных систем, использующих фреймы с аппаратом нечёткой логики.

Ключевые слова: тенденции развития систем мониторинга, аппарат фреймов, нечёткая логика, типовые элементы архитектуры программного обеспечения.

Анализ устойчивых тенденций развития автоматизированных систем позволяет сформулировать их в форме принципов построения современных и перспективных систем мониторинга.

Принцип интеллектуализации прослеживается в работах [1-7]. Интеллектуализация, в узком смысле слов, подразумевает активное использование интеллектуальных датчиков, которые не только снимают информацию об объекте мониторинга, но и способны её обрабатывать, способны к анализу внешней/внутренней среды, подстраиваться к изменениям, использовать сложные процедуры самотестирования, юстировки и т.п.

Интеллектуализация, в широком смысле слова, подразумевает активное использование аппарата ИИ для составления моделей предметной области, обработки «поступающей» информации и анализа накопленной статистики: «переход от данных к знаниям» – выявление скрытых зависимостей, прогноз развития ситуации и т.д.

Интеллектуализация является не целью, а средством достижения цели – построения гибких систем мониторинга, которые «подстраиваются» под изменения во внешней-внутренней среде. Интеллектуализация позволяет не только учесть специфику предметной области построения систем мониторинга, но и создать инструментарию отображения ситуации в форме интерактивного образа и элементами эмоциональной окраски ситуации, облегчающими.

Принцип интеграции. Из определения систем мониторинга следует, что функции мониторинга могут быть: как возложены на одну из частей (подсистем) какой-либо АСУ, так и выделены в самостоятельную систему. Сегодня, очевидно, что система мониторинга может являться объектом как «горизонтальной», так и «вертикальной» интеграции.

В работах [8-10] отмечается, что функции мониторинга выполняют подсистемы в автоматизированных системах. Наблюдается тенденция разработки систем мониторинга, которые ориентированы на интеграцию с другими системами мониторинга и управления. Таким образом, при разработке систем мониторинга целесообразно ориентироваться на уже существующие стандарты ГОСТ-24, -34 взаимодействия между элементами АСУ.

Хорошей основой процесса интеграции является единая теоретическая основа объединения различных систем. Например, использование ситуационного подхода к вопросам построения систем мониторинга и систем управления в форме центров ситуационного управления. Видится перспективным создание технологии построения на базе ситуационного подхода программно-аппаратных комплексов мониторинга с использованием инструментариев в форме скелетной оболочки, которая «настраивается» на конкретную предметную область и снижает затраты на построение рассматриваемого класса систем.

Теоретический анализ

Отметим, что системы мониторинга решают в каждой предметной области ряд типовых подзадач, которые регулярно воспроизводятся:

- проверка работоспособности системы, тестирование подсистем;
- параметрическая настройка (юстировка, калибровка и т.п.);
- мониторинг работы подсистем (проверка работоспособности в процессе мониторинга и др.);
- подстройка системы под изменения во внешней/внутренней среде системы мониторинга;
- выявление проблем и аварийных ситуаций.

Под ситуацией будем понимать объект или процесс, которые воспроизводятся в предметной области работы системы мониторинга. Ситуация описывается при помощи системы взаимосвязанных параметров. В классической теории фреймов М. Минский предложил использовать для описания системы взаимосвязанных ситуаций сети фреймов.

В [11] показано, что сеть фреймов, которая описывает последовательность событий сценариев работы интерактивной системы состоит из трёх классов фреймов:

- фреймы-директивное сообщение;
- фреймы-диалоговое ветвление;
- фреймы-преобразование информации по алгоритмам реализации вычислительных процедур.

Дальнейшее развитие этого направления привело к описанию процесса функционирования дистанционных систем мониторинга при помощи сети фреймов, в составе которой введены новые классы [12-13]. В данной работе был рассмотрен расширенный фреймовый аппарат, в классификацию которого вошёл мультимедийный фрейм как основа для построения этих сред мониторинга (рис. 1) [13].

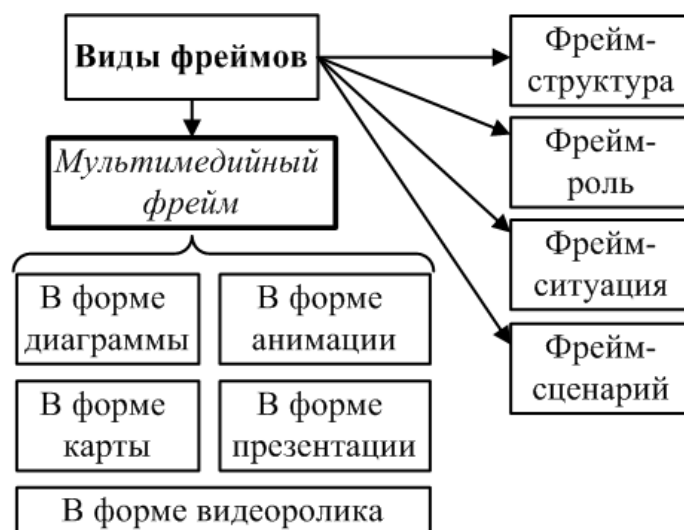


Рис. 1. Расширение классификации фреймов

В результате проведенных Д.А. Беловым исследований были выявлены перспективы развития фреймов в части создания дополнительных классов (фреймов, инструментариев их построения) в форме класса «Мультимедийный фрейм» (МФ). Подклассами являются: МФ – электронная карта, МФ – презентация, МФ – диаграмма с эмоциональной окраской ситуации, МФ – видеоролик, МФ – анимация.

Концептуальное представление предметной области функционирования систем мониторинга позволило автоматизировать создание программного обеспечения через создание для каждого типа фреймов инструментариев, которые автоматизируют их программную реализацию.

Инструментарии объединяются в форме базы шаблонов программного кода (или объектов-инструментариев технологии визуального построения программного обеспечения). Библиотеки оснащаются инструментариями, которые облегчают их сопровождение в течение ЖЦ, облегчают «трансформацию» шаблона в программную модель и т.д.

Таким образом, создаются инструментарии, которые позволяют получать «гарантированный результат» – работоспособный программный код программного обеспечения машинной обработки ситуации в предметной области построения системы мониторинга.

Методика

В рамках описанной тенденции предлагается создание специализированных инструментариев, которые облегчают генерацию систем мониторинга с «мягкими» вычислениями.

Для решения этой задачи предлагается использовать в качестве процедур, прикрепленных к фрейму специализированные программные модули, позволяющие создавать различные сценарии, в которых события поддерживают обработку информации с участием процедур нечёткой логики [15] (рис. 2). Это позволяет дополнить известные классы фреймов отдельным классом концептуального описания предметной области работы систем мониторинга – фреймами с процедурами нечёткой логики.

Как было указано ранее, в качестве прикрепленных процедур демонов используются функции нечёткой логики, для определения численных выражений оценки ситуации – показателя приоритета ситуации.

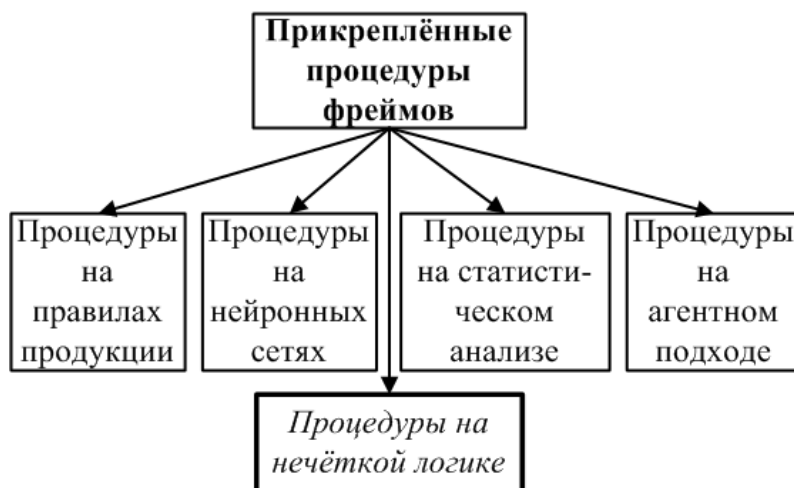


Рис. 2. Расширенная классификация прикрепленных процедур фреймов

Рассмотрим работу процедур нечёткой логики на примере алгоритма Мамдани [16] (рис. 3).

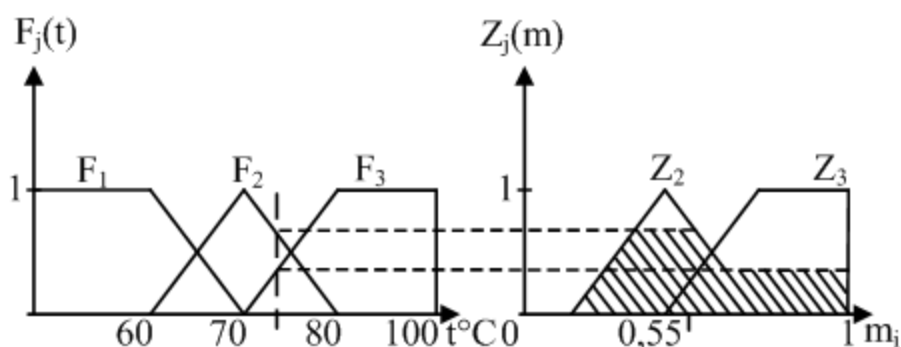


Рис. 3. Пример использования нечёткого вывода

Он состоит из следующих этапов – это:

- 1) формирование базы правил продукции;
- 2) фаззификация;
- 3) агрегирование подусловий;
- 4) активизация подзаключений;
- 5) аккумулялирование заключений;
- 6) дефаззификация.

Определяющим в работе нечёткого вывода Мамдани является способ вычисления центра массы для фигуры, получающейся в результате обработки правил продукции (1) для нечётких переменных (2). Сначала (3) вычисляется верхняя граница отсечения для правила $Z_j(m)$, значение функции $F_j(t)$ при заданном значении горизонтальной оси t на левом графике (в данном случае множества температуры) [16].

Таким образом, из заключений (4) $Z_j(m)$ получается фигура, относящаяся к данной нечёткой переменной с усечением по верхней границе (значению по оси $F_j(t)$ в данной точке оси t). После обработки всех правил (5), которых затронуло данное значение температуры, полученные фигуры объединяются по правилу максимума, и образуется суммарная фигура Z_s (заштрихована). Процесс дефаззификации (6) происходит по формуле центра тяжести.

Экспериментальная часть

В качестве примера реализации этих идей в современных системах рассмотрим систему мониторинга ЭВМ-сервера, архитектура которой изображена на рис.4.

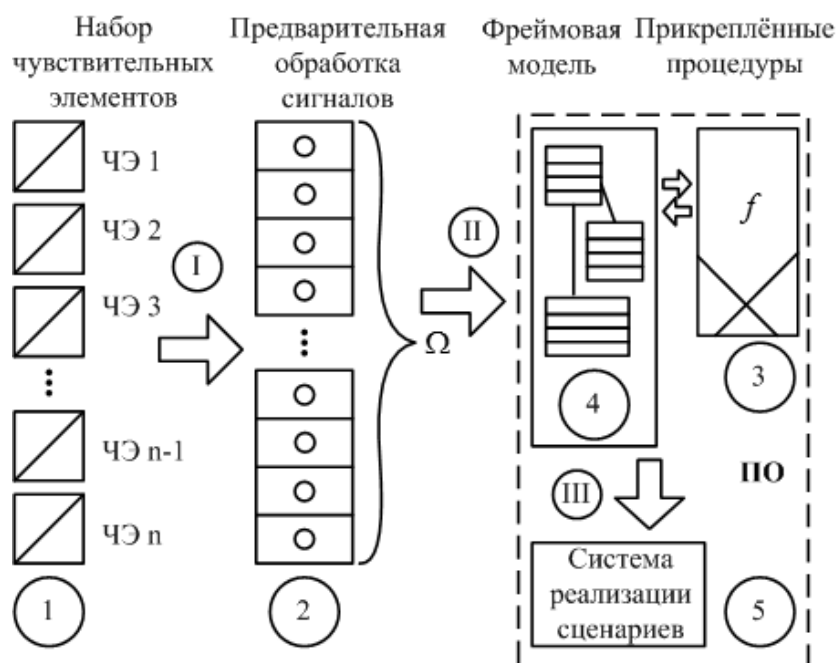


Рис. 4. Архитектура системы мониторинга на базе фреймовой модели и нечёткой логики

Значения параметров мониторинга из чувствительных элементов – датчиков (1) после предварительной обработки (2) (оцифровка, проверка на валидность, фильтрация) программное обеспечение переносит последовательно в сеть фреймов (4). Фреймовая модель обрабатывает полученные значения при помощи (3) прикреплённых процедур (в т.ч. нечёткой логики).

Главным исполнительным алгоритмическим элементом является аналитическая машина (5), обрабатывающая дерево фреймов (иерархическую фреймовую сеть), и на основе выполненного анализа осуществляющая изменение своего поведения (генерация сценария соответствующего ситуации). Римскими цифрами обозначены этапы передачи информации (I) – между датчиками и системой оцифровки показаний (физический канал), (II) – считыва-

ние оцифрованных показаний программным обеспечением, (III) – обработка аппарата фреймов аналитической машиной.

Аппарат нечёткой логики использовался во фреймовой модели в качестве процедур – демонов, что позволило в данной конфигурации реализовать механизм генерации сценария из набора базовых, за счёт их отбора по условию (приоритету). За основу был выбран алгоритм Мамдани [16], как хорошо зарекомендовавший себя в области нечёткого управления.

Рассмотрим пример вычислений (рис. 5). В данном примере описана зависимость показателя уровня тревоги (показателя приоритета) для ЭВМ-сервера от температуры процессора, в совокупности с зависимостью от нагрузки на сервер и скорости вращения вентилятора охлаждения. В базе правил присутствуют следующие высказывания:

- если температура процессора «средняя», нагрузка на сервер «маленькая» и скорость вентилятора «высокая», то показатель уровня тревоги «высокий»;
- если температура процессора «высокая», то показатель уровня тревоги «высокий»;
- если температура процессора «низкая», то показатель уровня тревоги «низкий»;
- если температура процессора «средняя», нагрузка на сервер «маленькая» и скорость вентилятора «низкая», то показатель уровня тревоги «низкий».

С помощью нечётких продукционных правил по алгоритму Мамдани вычислялось значение показателя приоритета для конечных субфреймов в дереве фреймовой модели, по которому определяется порядок вывода информации с данных субфреймов, а также выбор-выполнения связанных с этими субфреймами сценариев по условию (например рассылка оповещений). Динамическое формирование сценариев более подробно проиллюстрировано на рис. 6.

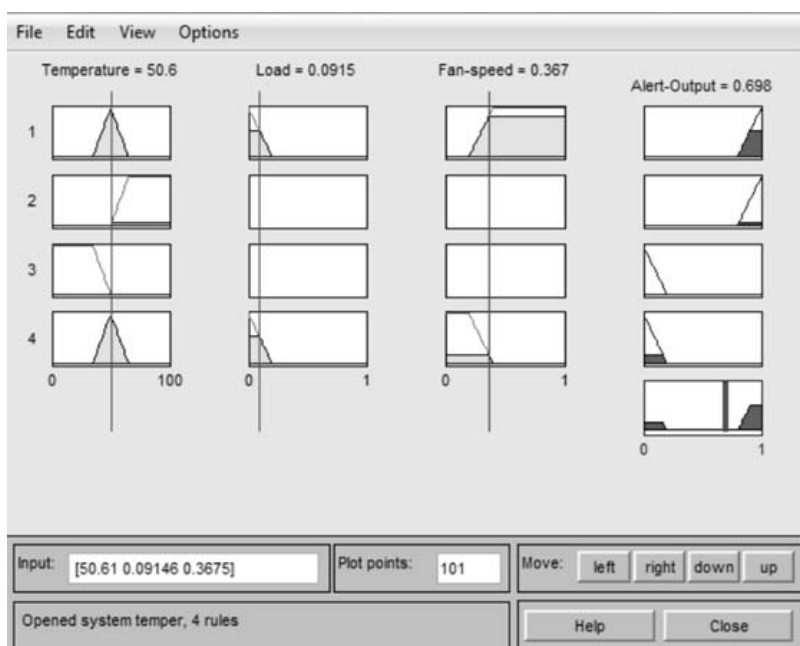


Рис. 5. Пример использования нечёткого вывода в среде MATLAB (инструмент FuzzyLogicToolbox)

В данной схеме предложено в сети фреймов прикрепление к слотам субфреймов дескрипторов тех или иных сценариев, которые заносятся в стек сценариев S_F по условию – значению показателя приоритета. Итоговый сценарий S_F формируется и выполняется каждую итерацию при обходе дерева фреймовой модели. Аппарат нечёткой логики позволяет формировать показатель приоритета (как конечного значения вычислений для слота) в зависимости от нескольких факторов (совокупности параметров мониторинга). Например, при подсчёте температуры процессора принимается во внимание ещё и нагрузка на сервер, ско-

рость вращения вентилятора. Это позволяет строить информационную модель АС принимающей решения динамически по приоритетам и согласно текущей ситуации с тонкой настройкой каждого параметра в отдельности. При этом используется человеко-ориентированный интерфейс – вербальные правила-высказывания для формирования условий срабатывания сценариев.

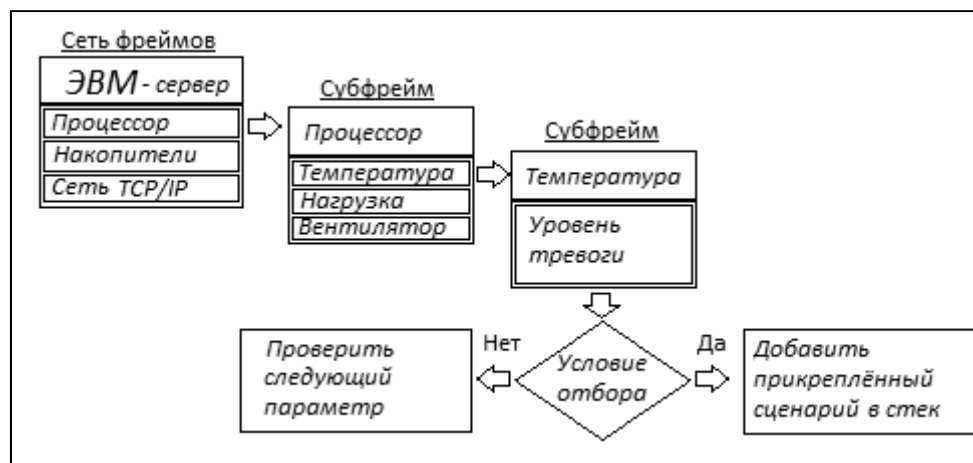


Рис. 6. Схема формирования сценария на каждой итерации обхода дерева фреймов

Выводы

В статье описаны инструментарии реализации ситуационного подхода к вопросам построения систем мониторинга. Представлен процесс описания предметной области функционирования систем мониторинга при помощи модифицированной фреймовой модели. Выполнено позиционирование предлагаемого подхода относительно современных тенденций развития систем мониторинга. Описаны элементы типовых архитектурных решений систем мониторинга, построенных на базе ситуационного подхода, что создаёт предпосылки реализации инструментального комплекса автоматизации построения систем данного класса.

Библиографический список

1. **Колосок, И.Н.** Прогнозирование параметров режима при мониторинге и управлении электроэнергетической системой / И.Н. Колосок, Л.А. Гурина // *Электричество*. – 2014. – № 1. – С. 21-27.
2. **Шерешевский, Л.А.** Методика контроля точности и достоверности расчетных данных в распределенных системах мониторинга и автоматизированного управления / Л.А. Шерешевский, А.А.Сидоров // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – 2002. – Т. 4. – № 1. – С. 169-177.
3. **Васютин, С.В.** Принятие обобщенных решений в системах обнаружения вторжений, использующих несколько методов анализа данных мониторинга / С.В.Васютин, В.В. Корнеев, В.В. Райх, И.Н. Сеница / *Информационное противодействие угрозам терроризма*. – 2005. – № 4. – С. 54-65.
4. **Плюснин, И.И.** Мобильная система диагностического обслуживания и мониторинга газопроводных систем. / И.И. Плюснин, К.И. Бушмелева, П.Е. Бушмелев // *Фундаментальные исследования*. – 2006. – № 1. – С. 65.
5. **Четырбоцкий А.И.** Мониторинг состояний многокомпонентных объектов в геоинформационных системах // *Тихоокеанская геология*. – 2006. – Т. 25. – № 5. – С. 81-87.
6. **Загвоздкин, В.К.** Информационные технологии подготовки управляющих решений в автоматизированных системах экологического мониторинга предприятий химической промышленности / В.К. Загвоздкин [и др.] // *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе*. – 2008. – № 10. – С. 3-6.
7. **Мещерякова, Е.М.** Мониторинг социальной напряженности и реализация функций управления социальными системами // *Вестник Чувашского университета*. – 2007. – № 3. – С. 340-346.

8. **Сазонов, Д.Ю.** Система экологического мониторинга как подсистемы интеллектуальной транспортной системы / Д.Ю. Сазонов, В.В. Васильева // Организация дорожного движения и безопасность на дорогах европейских городов: мат. Международной молодежной научно-практической конференции. ФГБОУ ВПО «Госуниверситет - УНПК». – 2014. – С. 46-49.
9. **Рыжков, В.А.** Разработка универсальной системы мониторинга API функций программных систем на основе объектной модели компонентов// Информатика: проблемы, методология, технологии: мат. XV международной научно-методической конференции. – 2015. – С. 367-370.
10. **Митрофанов, Е.П.** Информатизация мониторинга изменений в региональных экономических системах // Вестник Чувашияского университета. – 2007. – № 3. – С. 442-445.
11. **Семенов, В.В.** Принципы формирования и фрагменты базы знаний теории управления. Общее математическое обеспечение систем автоматизированного проектирования / В.В. Семенов. – М.: МАИ, 1981. – 158 с.
12. **Минский, М.** Фреймы для представления знаний / М. Минский. – М: Энергия, 1979. – 51 с.
13. **Белов, Д.А.** Проблемно-ориентированная автоматизированная система мониторинга движения железнодорожного состава / Д.А. Белов, П.В. Мисевич, В.П. Хранилов // Автоматизация в промышленности. – 2009. – №2. – С. 49-51.
14. **Леоненков, А.** Самоучитель UML /А. Леоненков. – 2-е изд. – СПб: БХВ-Петербург, 2004. – 432 с.
15. **Ермилов, А.Э.** Применение фреймовой модели и нечёткой логики в основе построения инструментариев автоматизированных систем мониторинга / А.Э. Ермилов, П.В. Мисевич // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2015. – №1(108). – Н.Новгород, – С. 71-76.
16. **Леоненков, А.В.** Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А.В. Леоненков. – СПб.: БХВ Петербург, 2005. – 736 с.
17. **Мисевич, П.В.** Прогнозы развития центров ситуационного управления и научно-практические вопросы построения мобильной интеллектуальной среды управления организацией / П.В. Мисевич, Д.А. Белов // Управление персоналом. – 2008. – №22. – С. 46-50.

*Дата поступления
в редакцию* 15.08.2017

A.E. Ermilov, P.V. Misevich

INTELLECTUALIZATION OF MONITORING SYSTEMS USING SITUATIONAL APPROACH AND FUZZY LOGIC

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

Purpose: The article describes trends of the designing modern monitoring systems: intellectualization and integration with other systems.

Design/methodology/approach: Monitoring systems is proposed based on scenario and contingent approaches. The authors propose to use the frame model to represent operation the systems. The frame model supports the using of fuzzy logic.

Findings: It is possible to design tooling system for programming and supporting during the life cycle the systems of monitoring.

Research limitations/implications: The present study provides a starting-point for further research the monitoring systems which are based on the scenario and contingent approaches.

Originality/value: The frame model supports the using of fuzzy logic for representing processes in the fields of operating the monitoring systems. The approach supports the new technology of configuration and supporting the monitoring systems.

Key words: frame machine, trends of using frame model, fuzzy logic, scenario and contingent approach.

УДК 501

С.В. Лещева, Т.В. Лухманова, А.В. Волохин

ЗАМЕЧАНИЕ О ТЕОРЕМЕ Э. НЕТЕР

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Предлагается один из вариантов изложения материала, связанного с теоремой Э. Нётер, в курсе дополнительных глав математики, изучаемых в технических вузах. До настоящего времени соответствующий круг идей во вузах не обсуждался, хотя его трудно переоценить.

Ключевые слова: законы сохранения, лагранжевы уравнения поля, симметрии, пространственно-временные симметрии.

Исследование взаимосвязи «симметрия – закон сохранения» имеет долгую историю, итогом которой нужно считать теорему Эмми Нётер, установленную ею в 1918 году [(1)]. Эта теорема хорошо известна физикам-теоретикам и, является одним из их рабочих инструментов. Прикладники обычно не знакомы с соответствующей тематикой. Можно указать две причины этой ситуации. Во-первых профессиональные обязанности оставляют прикладникам мало времени для занятий теоретическими вопросами. Во-вторых, в технических вузах при изучении соответствующих дисциплин в лучшем случае теорема Нётер лишь упоминается. Играет роль также и сложность математического аппарата, применяемого в доказательствах. К примеру, в технических вузах не знакомят с понятием «группы» и «группы Ли», без чего излагать теорему Нётер считается неприличным.

Однако значение законов сохранения в жизни людей достаточно велико. Так, закон сохранения энергии не позволяет построить вечный двигатель, химические реакции не могут изменить индивидуальность атомов, делая недостижимой цель алхимиков. Интерес подогревают и интригующие заявления типа: закон сохранения энергии есть следствие однородности времени. Поэтому оправдано ознакомление студентов с тем, какова природа законов сохранения. Предпосылки к этому имеются, поскольку учебные планы предусматривают изучение уравнений в частных производных и вариационное исчисление. Далее предлагается вариант изложения вопроса, служащий указанной цели.

Начнем с изучения интуитивно ясного понятия сохраняющей величины, т.е. величины, значение которой не меняется со временем.

В классической механике это понятие формализуется следующим образом. Исходной является система обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих эволюцию механической системы. Без ограничения общности ее можно записать в виде системы уравнений первого порядка:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= f_1(t, x_1, \dots, x_n) \\ &\dots \dots \dots \\ \dot{x}_n &= f_n(t, x_1, \dots, x_n)\end{aligned}\tag{1}$$

где $x_i = x_i(t)$, а точка означает дифференцирование по времени. Под сохраняющейся величиной (или законом сохранения) понимают любую функцию $F(t, x_1, \dots, x_n)$, принимающую постоянное значение на решении из (1).

Если не интересоваться пока вопросом нахождения законов сохранения, то в остальном ситуация совершенно прозрачна. Именно, справедливо следующее утверждение.

Предложение. Система (1) имеет n законов сохранения F_1, \dots, F_n таких, что произвольный закон сохранения есть функция от F_1, \dots, F_n .

Доказательство использует тот факт, что общее решение системы (1) содержит n произвольных постоянных C_1, C_2, \dots, C_n :

$$\begin{aligned} x_1 &= q_1(t, C_1, \dots, C_n) \\ &\dots\dots\dots \\ x_n &= q_n(t, C_1, \dots, C_n) \end{aligned} \quad (2)$$

Решив эту систему относительно постоянных C_1, \dots, C_n , получаем n законов сохранения

$$C_1 = F_1(t, x_1, \dots, x_n), \dots, C_n = F_n(t, x_1, \dots, x_n) \quad (3)$$

В произвольном законе сохранения $F(t, x_1, \dots, x_n)$ величины x_1, \dots, x_n можно выразить через C_1, \dots, C_n с помощью (2), а последние – через F_1, \dots, F_n с помощью (3), что и завершает доказательство.

В качестве примера рассмотрим уравнение гармонического осциллятора $\ddot{x} + x = 0$. Если положить $y = \dot{x}$, то это уравнение сводится к системе $\begin{cases} \dot{x} = y, \\ \dot{y} = -x \end{cases}$ с общим решением

$$\begin{cases} x = C_1 \cos t + C_2 \sin t \\ y = -C_1 \sin t + C_2 \cos t \end{cases}$$

Отсюда следуют равенства

$$\begin{aligned} C_1 &= x \cos t - y \sin t \\ C_2 &= x \sin t + y \cos t, \end{aligned}$$

правые части которых и дают законы сохранения.

Произвольный закон есть $F(x \cos t - y \sin t, x \sin t + y \cos t)$.

При исследовании распределенных систем, описываемых одной или несколькими полевыми функциями $u_1(x_1, \dots, x_n), \dots, u_k(x_1, \dots, x_n)$ под законом сохранения понимают нечто иное. Именно, законом сохранения называют систему $T = (T_1, \dots, T_n)$, компоненты которой зависят от полевых функций и для которой выполняется равенство

$$\text{Div} T \equiv \frac{\partial T_1}{\partial x_1} + \frac{\partial T_2}{\partial x_2} + \dots + \frac{\partial T_n}{\partial x_n} = 0. \quad (4)$$

Чтобы понять происхождение этого определения, обратимся к примеру скалярного поля $u = u(x, y, z, t)$, в котором аргументами служат декартовы координаты и время. Равенство (4) в этом случае переписывается в виде

$$\text{div} \bar{S} + \frac{\partial T_4}{\partial t} = 0, \quad (5)$$

где векторное поле \bar{S} имеет компоненты T_1, T_2, T_3 . Если \bar{S} достаточно быстро убывает на бесконечности, то интегрирование (6) по всему пространству с использованием теоремы Гаусса-Остроградского дает

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint T_4 dx dy dz = 0,$$

т.е. соответствующий тройной интеграл есть сохраняющаяся со временем величина. Компоненту же T_4 интерпретируют как плотность этой величины. Проиллюстрируем изложенное

на примере уравнения колебаний струны $\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0$. Уже само уравнение можно записать в виде (4)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(u_x \right) + \frac{\partial}{\partial t} \left(-\frac{1}{c^2} u_t \right) = 0, \quad u_x \equiv \frac{\partial u}{\partial x}, \quad u_t \equiv \frac{\partial u}{\partial t}. \quad (6)$$

Еще одно равенство такого же типа:

$$\left(-2u_x u_t \right)_x + \left(u_x^2 + \frac{1}{c^2} u_t^2 \right)_t = 0. \quad (7)$$

Плотности сохраняющихся величин в (6) и (7) это $-\frac{1}{c^2} u_t$ и $u_x^2 + \frac{1}{c^2} u_t^2$. Для первой из них общеупотребительного названия нет, а вторую физики интерпретируют как плотность энергии струны.

Обратимся теперь к фундаментальному понятию, фигурирующему в теореме Э. Нётер, – понятию симметрии. Термин «симметрия» в математике и физике связывается с понятием преобразования и означает сохранение какого-либо свойства объекта при этом преобразовании. Например, симметрией является преобразование поворота окружности вокруг ее центра, при котором окружность переходит в себя. Теорема Э. Нётер имеет дело с объектами, описываемыми дифференциальными уравнениями, получающимися из так называемого принципа наименьшего действия Гамильтона. Отвлекаясь от ненужных деталей, традиционно присутствующих при изложении принципа Гамильтона в литературе, исходим из наличия так называемой функции Лагранжа (или лагранжиана) $L = L\left(x, u, \frac{\partial u}{\partial x}\right)$, зависящей от аргументов x_1, \dots, x_n полевых функций u_1, u_2, \dots, u_k и первых производных $\frac{\partial u_i}{\partial x_k} (\equiv u_{i,k})$. Уравнениями поля служат

$$\frac{\partial L}{\partial u_i} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial L}{\partial u_{i,j}} \right) = 0; \quad i = 1 \dots n, \quad j = 1 \dots k \quad (8)$$

Так, уравнение колебаний струны получается при $L = \frac{1}{2} \left(u_x^2 - \frac{1}{c^2} u_t^2 \right)$.

Как известно, описание полей (и механических систем) неоднозначно в том смысле, что полевые функции и их аргументы можно выбирать различными способами. Достаточно вспомнить широкое использование различных систем координат в курсе анализа. Поэтому мы приходим к понятию преобразования $u(x) \rightarrow u^*(x^*)$ от «старых» полевых функций и их аргументов к «новым». Отбор нужных в дальнейшем преобразований производится в несколько этапов. Сначала мы оставляем преобразования, не меняющие вид уравнений поля. Таким преобразованием для уравнения колебаний струны служит, например, $x^* = x, t^* = t, u^*(x^*, t^*) = \lambda u(x, t)$ с константой $\lambda \neq 0$.

Несколько искусственный пример

$x^* = x, t^* = t, u^*(x^*, t^*) = x^{*2} u(x, t)$ нужного преобразования не дает. Однако оставшийся класс преобразований еще достаточно широк для применения теоремы Э. Нётер. Мы сужаем его, ограничиваясь симметриями.

Определение. Симметрией называется преобразование $x \rightarrow x^*, u \rightarrow u^*$, не изменяющее форму $L dx_1 \dots dx_n$, т.е. при котором $L\left(x^*, u^*, \frac{\partial u^*}{\partial x^*}\right) dx_1^* \dots dx_n^* = L\left(x, u, \frac{\partial u}{\partial x}\right) dx_1 \dots dx_n$. Техническая

проверка последнего равенства не представляет особых трудностей, если вспомнить о процедуре преобразования координат в двойном и тройном интегралах.

Указанное преобразование $x \rightarrow x, t \rightarrow t, u \rightarrow \lambda u$, хотя и сохраняет вид уравнения струны, но

симметрией не является поскольку $Ldxdt$ при этом переходит в $\lambda^2 Ldxdt$. Однако преобразование $x \rightarrow \lambda x, t \rightarrow \lambda t, u \rightarrow u$ уже симметрией является.

Наконец, из симметрий выделяется подмножество «непрерывных симметрий». Под такими понимаются симметрии, зависящие от параметра, от которого непрерывно зависят функции, определяющие преобразования. Предполагается также, что тождественное преобразование получается при некотором значении параметра. Без ограничения общности можно считать это значение нулевым.

Пусть ε – такой параметр. Тогда с точностью до слагаемых более высокого порядка чем ε (при $\varepsilon \rightarrow 0$) можно записать симметрию в виде

$$\begin{aligned} x^* &= x + \varepsilon X \\ u^* &= u + \varepsilon U \end{aligned} \quad (9)$$

Именно для таких (бесконечно малых или инфинитезимальных) симметрий имеет место теорема Э.Нётер. Мы приводим ее формулировку для скалярного поля $u = u(x_1, \dots, x_n)$.

Теорема. Пусть $x_i^* = x_i + \varepsilon X_i, u^* = u + \varepsilon U$ – инфинитезимальная симметрия для лагранжиана $L = L\left(x, u, \frac{\partial u}{\partial x}\right)$. Тогда уравнения Лагранжа (8) допускают закон сохранения

$$T = (T_1, \dots, T_n), \text{ где } T_i = LX_i + \left(U - \sum_j x_j \frac{\partial u}{\partial x_j} \right) \frac{\partial L}{\partial u_i}.$$

Здесь

$$u_i \equiv \frac{\partial u}{\partial x_i}. \quad (10)$$

Мы не будем давать доказательство, которое можно найти в литературе, чтобы не повторять громоздких выкладок, неизбежных в общем случае. Однако отметим ряд «подводных камней» при приведении этих выкладок. Один из них – это необходимость различать так называемые полные производные от просто частных производных. По замечанию В.И. Арнольда, [2] аппарат частных производных «удручающе» неинвариантен. Так, в производной $\frac{\partial}{\partial x_i} L\left(x, u, \frac{\partial u}{\partial x}\right)$ двусмысленность заключается в символе $\frac{\partial}{\partial x_i}$. Если считать аргументы в L независимыми переменными, то при вычислении производной получаем один результат. Если же аргументы u и $\frac{\partial u}{\partial x}$ нужно учитывать как функции от x , то получаем «полную» производную и она дает другой результат. В формуле (4) для закона сохранения производные являются «полными». Можно было бы «полную» производную отличать символом $\frac{d}{dx_i}$, но обычно этого не делают.

Другой «подводный камень»: в условии симметрии фигурирует $L\left(x^*, u^*, \frac{\partial u^*}{\partial x^*}\right)$. Бесконечно малая симметрия, согласно (9), дает выражение для первых аргументов, но проблемой является нахождение аналогичного выражения для $\frac{\partial u^*}{\partial x^*}$, не фигурирующего в законе сохранения (10), но необходимого при проведении доказательства. Эта задача так называемого «продолжения преобразования», и она не является тривиальной.

Для поля, имеющего несколько компонент – $u = (u_1, u_2, \dots, u_k)$, закон сохранения незначи-

тельно изменяется: в правой части добавляются слагаемые типа второго из них для каждой компоненты поля. Если к тому же $n=1$, т.е. остается один аргумент $x=t$ (время!), то этим охватывается и случай классической механики.

Проиллюстрируем алгоритмическую сторону теоремы Нётер примерами.

1. Гармонический осциллятор, $\ddot{x} + x = 0$.

Здесь $L = \frac{1}{2}(\dot{x}^2 - x^2)$ и симметрией является сдвиг по времени $t^* = t + \varepsilon$, $x^* = x$. Инвариантность формы Ldt очевидна. В (10) надо положить $X=1$ и $U=0$ и тогда получаем $L \cdot 1 - \dot{x} \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} = \frac{1}{2}(x^2 + \dot{x}^2)$, что является энергией. Вот здесь и иллюстрируется утверждение, по которому сохранение энергии следует из однородности времени.

2. Волновое уравнение $u_{xx} + u_{yy} + u_{zz} - \frac{1}{c^2}u_{tt} = 0$ получается исходя из лагранжиана

$L = \frac{1}{2}\left(u_x^2 + u_y^2 + u_z^2 - \frac{1}{c^2}u_t^2\right)$. Сдвиги по координатам x, y, z и по времени являются симмет-

риями. Инфинитизимальная симметрия $x^* = x + \varepsilon$, $y^* = y$, $z^* = z$, $t^* = t$, $u^* = u$, т.е. при $X=1, U=0$ дает

$$T_1 = L - u_x \frac{\partial L}{\partial u_x} = \frac{1}{2}\left(-u_x^2 + u_y^2 + u_z^2 - \frac{1}{c^2}u_t^2\right)$$

$$T_2 = -u_x \frac{\partial L}{\partial u_y} = -u_x u_y$$

$$T_3 = -u_x \frac{\partial L}{\partial u_z} = -u_x u_z$$

$$T_4 = -u_x \frac{\partial L}{\partial u_t} = \frac{1}{c^2}u_x u_t$$

Плотность сохраняющейся величины $T_4 = \frac{1}{c^2}u_x u_t$ вместе с полученными таким образом при

сдвигах по y и z физики объединяют в вектор $\vec{p} = \left\{ \frac{1}{c^2}u_x u_t, \frac{1}{c^2}u_y u_t, \frac{1}{c^2}u_z u_t \right\}$, который они

интерпретируют как плотность импульса поля. Сдвиг по времени приводит к плотности

$W = \frac{1}{2}\left(u_x^2 + u_y^2 + u_z^2 + \frac{1}{c^2}u_t^2\right)$ интерпретируемой как плотность энергии поля.

Редукцией получаются аналогичные результаты для двумерного уравнения $u_{xx} + u_{yy} - \frac{1}{c^2}u_{tt} = 0$ и для одномерного (уравнения колебаний струны) $u_{xx} - \frac{1}{c^2}u_{tt} = 0$.

В механике с понятием импульса тесно связано понятие момента импульса. В простейшем случае движения одной частицы момент определяется формулой $\vec{M} = [\vec{r}, \vec{p}]$, где \vec{r} – радиус вектор частицы, а \vec{p} – ее импульс. Можно также поступить и с введенной ранее плотностью импульса и получить плотность момента импульса для волнового уравнения. Для нее имеет место закон сохранения.

Теорема Нётер допускает обращение, т.е. закону сохранения соответствует некоторая симметрия. Таким образом, отыскание всех законов сохранения сводится к отысканию симметрий. Не вдаваясь в подробности, отметим, что эта задача, так называемого группового анализа [3], где приходится решать системы уравнений в частных производных. Общая ситуация аналогична таковой в классической механике: Существует набор законов сохранения,

из которых можно получить остальные. Обычно этот набор конечен, но есть исключения, к числу которых относится уравнение колебаний струны. Так, можно проверить, что $T = (T_1, T_2)$ – закон сохранения, если положить $T_1 = F_1(x+t, u_x + u_t) + F_2(x+t, u_x - u_t)$, $T_2 = -F_1(x+t, u_x + u_t) + F_2(x+t, u_x - u_t)$, где F_1 и F_2 – произвольные функции.

Библиографический список

1. E. Noether Invariante Variationsprobleme. (русский перевод: Нётер Э. Инвариантные вариационные задачи // Вариационные принципы механики. – М.: Физматгиздат, 1959.
2. **Арнольд, В.И.** Математические методы классической механики / В.И. Арнольд. – М.: Наука, 1979
3. **Олвер, П.** Приложения групп Ли к дифференциальным уравнениям / П. Олвер. – М.: Мир, 1989.
4. **Визгин, В.П.** Развитие взаимосвязи принципов инвариантности с законами сохранения в классической физике / В.П. Визгин. – М.: Наука, 1972.

*Дата поступления
в редакцию 22.11.2017*

S.V. Leshcheva, T.V. LUHMANOVA, A.V.VOLOHIN,

A NOTE ON E. NOETER THEOREM

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

Purpose: A variant of the presentation of information on the Noether theorem and its applications suitable for students of technical universities is suggested.

Design/methodology/approach: The computations associated with partial differential equations are used.

Findings: The formulation of the theorem do not use multi dimensional integrals.

Research limitations/implications: This article should be consider as an initial introduction to de course of mathematics the ideas associated with the theorem.

Originality/value: This is first experience in the teaching this subject in the course mathematics in NNSU.

Key words: conversation laws, Lagrange, field equations, symmetries, time space symmetries.

УДК 681.518.3

С.А. Манцеров, К.В. Ильичев, А.М. Бремзен

**СИСТЕМА СБОРА И ПОДГОТОВКИ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ
ДЛЯ УДАЛЕННОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрена проблема построения подсистемы сбора и подготовки информации для удаленного использования. Приведена структурная схема измерительного канала, а также определены необходимые технические средства для ее физической реализации. Рассмотрены современные технологии обеспечения удаленного доступа к системе сбора и подготовки информации.

Ключевые слова: автоматизированная система управления технологическим процессом (АСУ ТП), supervisory control and data acquisition (SCADA), сбор данных, open platform communications (OPC), мультиплатформенность, удаленный доступ, автоматизация, производство.

В настоящее время, характеризующееся жесткой конкуренцией, а также динамическим состоянием рынка, большое количество предприятий испытывает потребность в автоматизации. Даже самые консервативные и небогатые компании ощущают выгоду от использования компьютерных технологий. При этом за довольно небольшой период времени программное обеспечение претерпело колоссальные изменения, пройдя путь от простейших арифметических программ до комплексных информационных систем, функционирующих на больших предприятиях. Применение подобных современных информационных технологий позволяет качественно улучшить производственные показатели. Сегодня отрасль информационных технологий обладает тенденцией к всеобщей информатизации, виртуализации, а также интеграции знаний. Осуществляется последовательный переход к информационному обществу, электронному бизнесу, государству [1].

В связи с этим нельзя не отметить важность развития технических и программных средств, разрабатываемых для автоматизированных систем управления технологическим процессом на промышленных предприятиях. Чтобы обладать достоверной и своевременной информацией об управляемом объекте в полном объеме, следует решить проблему выбора характера и степени управляющих воздействий на этот самый объект. Поэтому неотъемлемой частью любой АСУ ТП является подсистема сбора и подготовки информации, которая служит для получения необходимых данных из внешней среды, а также приведения ее к определенному стандартизованному виду [2].

В результате проведенной работы была разработана концепция создания современной подсистемы сбора и подготовки информации для удаленного использования в рамках общей системы диспетчерского контроля и сбора данных SCADA-системы. В соответствии со структурной схемой распределенной архитектуры подсистемы сбора и подготовки информации, изображенной на рис. 1, основным элементом является устройство связи с объектом, которое, в свою очередь, и осуществляет сбор данных и управление объектом или процессом. Исходя из выбранной архитектуры, был применен стандарт Object Linking and Embedding (OLE) for Process Control (OPC), согласно которому программная связь с нижним уровнем в иерархической структуре АСУ ТП (различными датчиками, исполнительными устройствами) осуществляется через специальные драйверы, при этом межпрограммные связи реализуются через интерфейсы OLE. Передача информации между устройствами связи с объектом и клиентскими компьютерами производится при помощи промышленной сети, которая позволяет объединить каждый контроллер в единую систему, реализуя возможность обмениваться данными между собой, а также использовать вычислительные ресурсы центрального сервера.

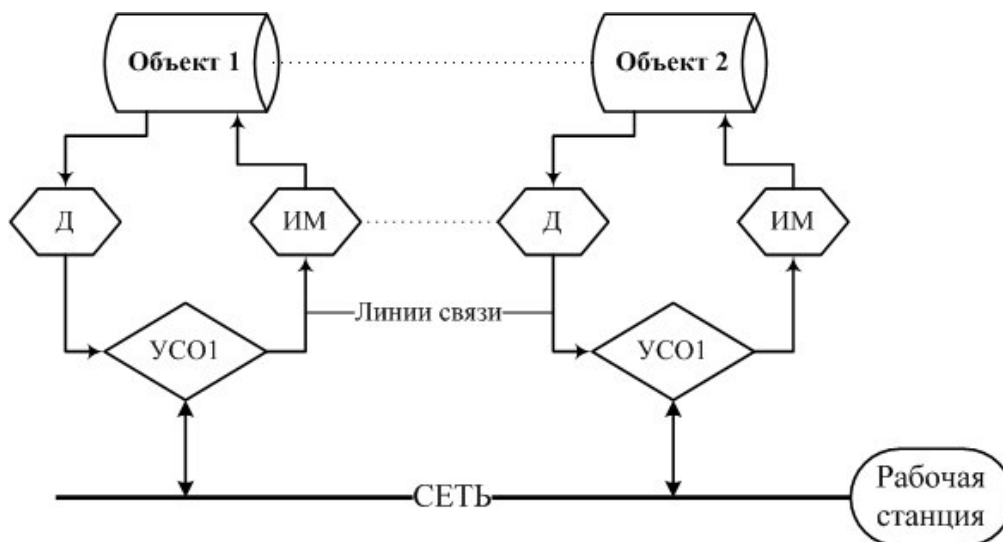


Рис. 1. Архитектура подсистемы сбора и подготовки информации распределенного типа

При этом следует отметить, что обмен данными между контроллерами практически отсутствует лишь при автономной работе каждого устройства. Именно в таком режиме работы и реализуются максимальные преимущества данной архитектуры [5]. К ним можно отнести:

- высокую скорость работы;
- высокую надёжность (прекращение работы любого контроллера не оказывает действие на дееспособность остальных);
- повышенную сопротивляемость отказам;
- упрощенное улучшение или перенастройку системы;
- более простой процесс усовершенствования;
- низкую сложность разработки, наладки, диагностики и сервиса в результате схожести строения системы строению объекта управления и сравнительной простоте любого из модулей системы;
- повышенную сопротивляемость помехам и высокую точность вследствие сокращения расстояния передачи аналоговых сигналов между датчиком и устройством ввода;
- уменьшение нужного количества кабельной продукции, низкие требования к ней и её не высокую стоимость;
- меньшие расходы на монтаж и обслуживание кабельного хозяйства.

Была решена задача определения рациональной структуры измерительного канала и необходимых технических средств для её реализации. Схема структуры информационного канала в обобщенном виде для проведения измерений приведена на рис. 2 [3].

В соответствии с данной схемой, в узлах $0...4$ происходит процесс преобразования информации. В узле под номером 0 формируется информация A аналогового типа о состоянии объекта исследования или управления. Далее информация в узле под номером 1 трансформируется в более удобный вид для дальнейших преобразований A_n . Под данной трансформацией подразумевается преобразование неэлектрического сигнала в электрический, различное масштабирование, усиление и т.д. Далее преобразованный сигнал модулируется в целях передачи по линии связи и представляется в виде аналогового сигнала A_m , либо в виде дискретного D_m сигнала. Данные процессы происходят в узле 2. Узел 3_1 служит для демодуляции аналогового сигнала A_d . Аналогично узел 3_2 служит для демодуляции цифровых данных. Эта информация может преобразовываться в аналоговую A_d , либо в дискретную D . При этом аналоговая информация поступает в узел 4_1 , а дискретная – в узел 4_2 . Соответственно, эти узлы служат для проведения измерений и отображения соответствующего вида данных.

Следует отметить, что в определенных случаях носитель данных может из узла под

номером 1 поступать напрямую в узел под номером 4. Аналогично возможны варианты, когда информация в аналоговом представлении исключая этап нормирования поступает в узел под номером 2 [4].

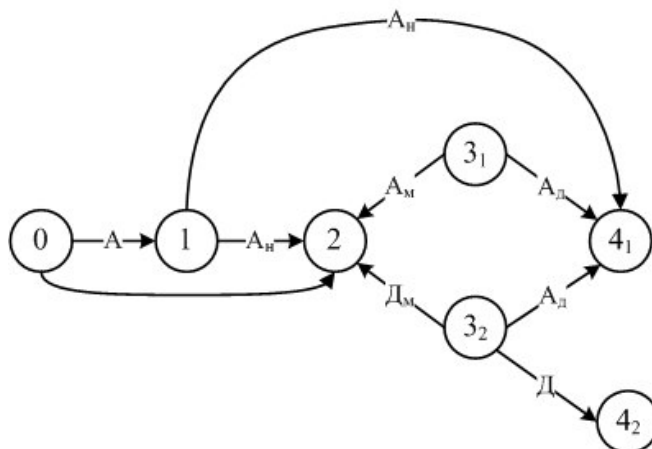


Рис. 2. Схема измерительного канала в обобщенном виде

Учитывая тот факт, что рассматриваемая система является многоканальной, а также большую удаленность объектов друг от друга, данная схема информационной модели подходит наилучшим образом. В соответствии с этим были использованы следующие технические средства для узла под номером 1:

- первичные измерительные преобразователи,
- унифицирующие измерительные преобразователи.

Узел под номером 2:

аналого-цифровые преобразователи:

- коммутаторы для соединения соответствующих источников данных к измерительному каналу,
- модуляторы,
- каналы связи.

Узел под номером 3₂:

- преобразователь кодов,
- цифроаналоговые преобразователи,
- линии задержки.

В соответствии с выбранной технической составляющей на рис. 3 приведена структурная схема измерительной системы.

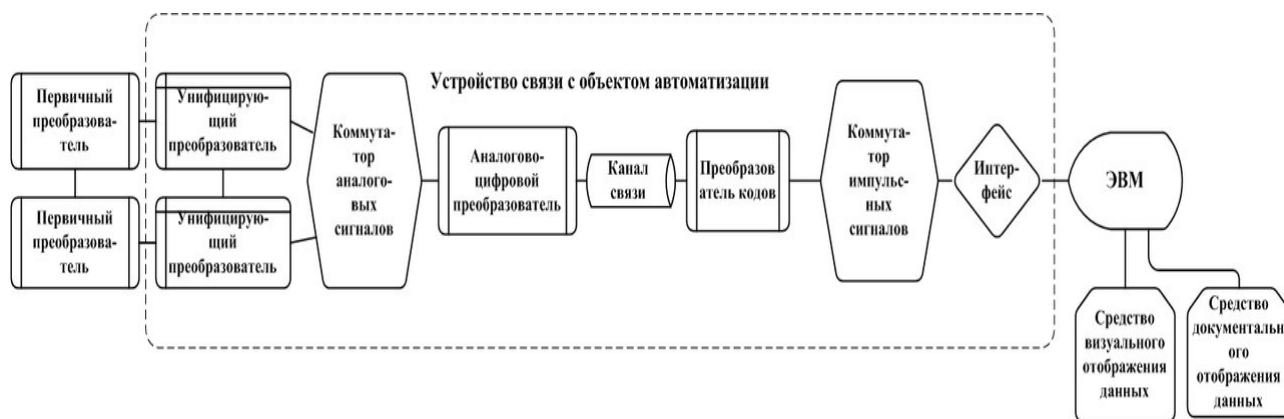


Рис. 3. Структурная схема измерительной системы

Рассмотрим SCADA-систему как совокупность трех основных структурных компонентов, изображенных на рис. 4 [5]. В целях обеспечения возможности совместной работы различных средств автоматизации, относящихся к различным аппаратным платформам, а также находящихся в разных промышленных сетях, был применен промышленный коммуникационный стандарт OPC.

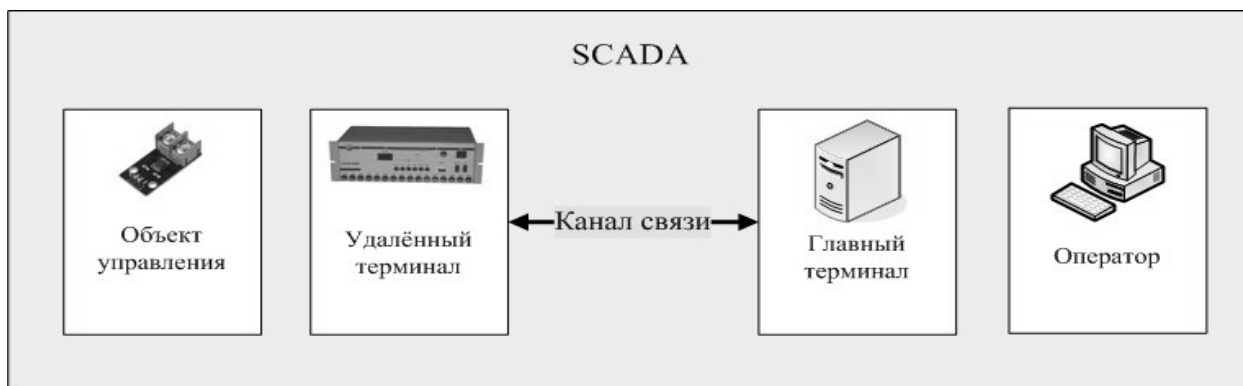


Рис. 4. Структурный состав SCADA-системы

Данный стандарт описывает интерфейс обмена данными между устройствами управления технологическими процессами [6]. При этом отпадает необходимость индивидуальной настройки драйверов под каждое аппаратное средство. На верхнем уровне располагается подсистема SCADA, функционирующая как OPC-клиент, а на нижнем уровне - контроллеры, модули ввода-вывода, датчики и исполнительные устройства со стандартным OPC-сервером. Схема данного взаимодействия изображена на рис. 5.

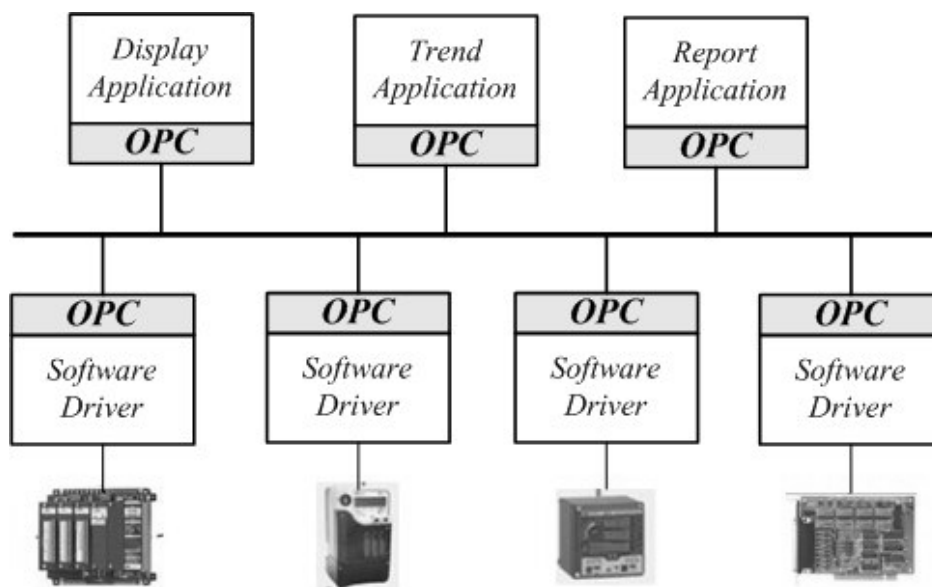


Рис. 5. Схема взаимодействия уровня приложений с аппаратной частью при помощи стандартизованного драйвера OPC

Кроме того, данный стандарт OPC используется и для реализации процесса обмена информацией с любым источником данных: базой данных, GPS-приемником и т.д. Для осуществления обмена данными с аппаратной частью и OPC-клиентом был использован сервер OPC DataAccess (OPC DA).

Передающаяся информация включает в себя три поля: значение, качество и временную метку. При этом параметр качества может включать в себя данные о выходе измеряемой ве-

личины за границы динамического диапазона, об отсутствии данных, ошибке связи и других. Для каждого подключенного тега установлена своя частота обновления прочтения данных в целях оптимальной загрузки процессора. Данные при этом читаются из кэш-буфера OPC-сервера. Имеется возможность установить статус определенных тегов в пассивный режим, при котором процессы обновления данных с физических устройств деактивируются. Процессы записи в физическое устройство выполняются сразу в устройство, либо синхронным методом, либо асинхронным, исключая промежуточную буферизацию. Особенность синхронного способа в том, что процессы записи выполняются до тех пор, пока из физического устройства не поступит подтверждение, что запись выполнена. При этом в течение этого времени клиент находится в режиме ожидания и не имеет возможности продолжать свою работу. В случае асинхронного режима клиент отправляет данные серверу и сразу продолжает свою работу. После окончания записи сервер отправляет клиенту соответствующее уведомление.

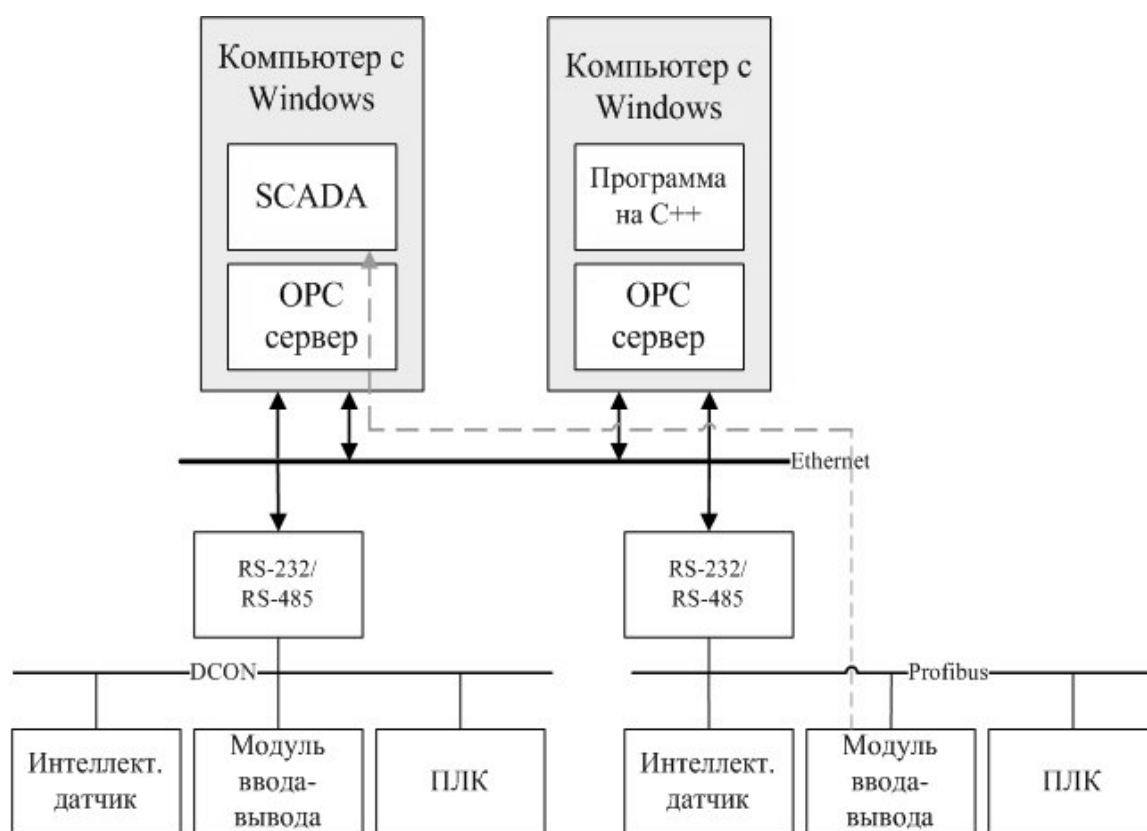


Рис. 6. Архитектура подсистемы сетевого доступа к данным в системах автоматизации на основе OPC-технологии

Схематическое изображение архитектуры системы, состоящей из OPC-серверов и OPC-клиентов, приведено на рис. 6. OPC-клиент выступает в качестве программы, поддерживающей внедрение COM-объектов, написанной на языке программирования C++. Данная программа осуществляет взаимодействие посредством интерфейса OPC Custom. OPC-сервер и OPC-клиенты реализуют свой функционал на операционных системах, поддерживающих технологию сетевого Distributed Component Object Model (DCOM) протокола. OPC-клиент и OPC-сервер установлены на разных компьютерах сети Ethernet. Каждый компьютер содержит OPC-сервер и подключенные к нему физические устройства.

При подобном устройстве каждый OPC-клиент с любого компьютера может обращаться к любому OPC-серверу, в том числе и к другому компьютеру сети. Это возможно благодаря сетевому DCOM протоколу, использующему удаленный вызов процедур (RPC). Так, на схеме указана штриховая линия, по которой SCADA может обратиться за данными к

модулю ввода-вывода шины Process Field Bus (Profibus). Также следует отметить, что при использовании оборудования разных производителей на компьютере или контроллере может быть установлено несколько OPC-серверов разных производителей, однако OPC-сервер монополюно занимает COM-порт компьютера (поскольку непрерывно выполняет обновление данных), поэтому количество портов должно быть равно количеству OPC-серверов. К разным портам компьютера могут быть подключены разные промышленные сети. В этом случае OPC-серверы используются в качестве межсетевых шлюзов [4].

В настоящее время реализация удаленного доступа к производственной и технологической информации различного промышленного оборудования, а также наличие возможности дистанционного управления ими стало стандартным требованием, предъявляемым к SCADA-системам. Также следует отметить, что наиболее перспективным направлением сейчас является использование планшетных ПК и смартфонов в целях обеспечения мобильного доступа к данным техпроцесса, а также для мониторинга и контроля состояния объекта.

Для удалённого управления системой через интернет SCADA-пакет был разделён на серверную и клиентскую части. Клиентская часть может быть представлена в виде страницы в веб-браузере, находящейся на веб-сервере, а также в виде клиентского приложения имеющего доступ к веб-серверу.

На веб-странице имеется специальный пользовательский интерфейс с графикой и анимацией. Анимация выполнена с использованием JScript, VBScript, Flash и GIF-файлов. Такая страница воспринимает действия пользователя (например, нажатие кнопок, заполнение форм и т.д.) и отправляет их на веб-сервер. В ответ формируется другая веб-страница, изменённая в соответствии с действиями пользователя. Для проверки правильности заполнения форм пользователем до передачи данных на сервер, а также для решения пользователем задач, не требующих обращения к серверу, применяются JavaScript и VBScript.

Для выполнения этих действий в среде Windows используется технология Active Server Pages (ASP.NET), позволяющая создавать веб-страницы, которые находятся на сервере и имеющие коды сценариев VBScript или C++. Результаты их выполнения отправляются с сервера клиенту. Данная технология используется на серверах Internet Information Server (IIS), управляемых Microsoft Windows Server.

Так как большая часть визуальной составляющей интерфейса выполняется на клиентском компьютере, а с сервера принимаются лишь данные об объекте автоматизации, требования к пропускной способности интернет-канала невысоки.

Передача данных между клиентом и сервером осуществляется в виде Simple Object Access Protocol (SOAP) сообщений, использующие протокол Hyper Text Transfer Protocol Secure (HTTPS). Процессы, находящиеся на разных компьютерах и взаимодействующие между собой независимо от платформы, на которой они реализованы, могут быть активизированы SOAP.

Для получения данных с контроллера через интернет пользователю достаточно нажать специальную командную кнопку в окне браузера. Таким образом, серверу через интернет будет отправлен запрос в виде SOAP-сообщения. После его получения через TCP-порт 443, этот запрос будет отправлен на обработку ASP.NET, расположенному на веб-сервере. Сервис создаёт запрашиваемые данные либо передаёт управление специальной программе, взаимодействующей с контроллером с помощью OPC-сервера. В результате, полученные данные отправляются на страницу в веб-браузере пользователя.

В целях повышения безопасности используется разграничение доступа к системе между различными категориями пользователей. Во время захода пользователя на сервер операционной системой производится идентификация, после чего пользователю предоставляется информация, соответствующая его правам. Аутентификация пользователя использует удостоверение личности и пароль для проверки идентичности. Кроме того, для безопасности передачи информации применяется метод шифрования данных Secure Sockets Layer (SSL). Используя SSL-протокол, данные передаются в закодированном виде по HTTPS и расшифровать их можно только с помощью специального ключа. Для работы данного протокола на

сервере был установлен SSL-сертификат, благодаря которому осуществляется уникальная цифровая подпись веб-сайта.

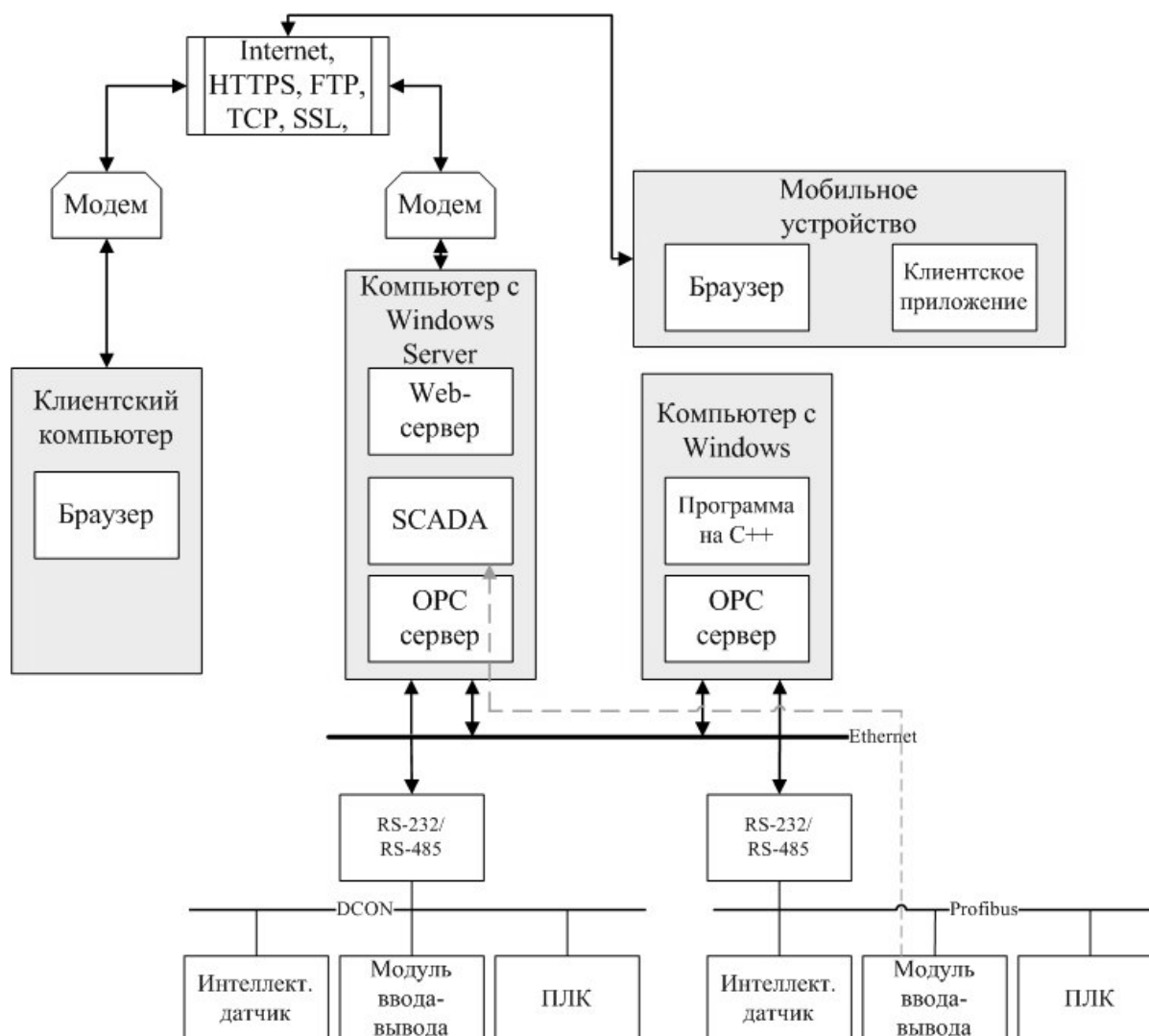


Рис. 7. Архитектура системы сбора и подготовки диагностической информации для удаленного использования

В целях обеспечения большего удобства управления системой SCADA с мобильных устройств, имеется возможность осуществлять мониторинг и контроль за технологическими объектами посредством приложения на базе операционных систем Android. Данное приложение содержит ряд predetermined экранных форм и функций, аналогичных веб-сайту. На рис. 7 изображена общая схема архитектуры системы сбора и подготовки диагностической информации для удаленного использования.

Разработанная концепция системы сбора и подготовки диагностической информации, используя новейшие стандарты и инструменты удаленного доступа, основанные на веб-технологиях, а также технологиях мобильной связи, отвечает современным требованиям к SCADA-системам.

Библиографический список

1. История информатики и философия информационной реальности: учеб. пособие / под ред. Р.М. Юсупова, В.П. Котенко. – М.: Академический проспект, 2007.
2. Энциклопедия АСУТП [Электронный ресурс] // BookASUTP.ru: [сайт]. – URL: http://www.bookasutp.ru/Chapter1_1_3.aspx (дата обращения 10.10.2017).

3. Куликовский, К. Л. Методы и средства измерений : учеб. пособие для вузов / К. Л. Куликовский, В. Я. Купер. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 448 с.
4. Системы сбора информации: учеб. пособие / Е. А. Русакова. – Екатеринбург: УрГУПС, 2016. – 259 с.
5. Кунцевич, Н. SCADA-системы, или муки выбора // Средства и системы компьютерной автоматизации: [сайт]. – URL: <http://asutp.ru/?p=600055> (дата обращения 15.10.2017).
6. Энциклопедия АСУТП [Электронный ресурс] // BookASUTP.ru: [сайт]. – URL: http://www.bookasutp.ru/Chapter9_2.aspx (дата обращения 10.10.2017).

*Дата поступления
в редакцию 10.11.2017*

S.A. Mancеров, K.V. Ilichev, A.M. Bremzen

SYSTEM OF COLLECTION AND STANDARDIZATION OF DIAGNOSTIC INFORMATION FOR REMOTE USE

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

Purpose: Development of a subsystem for collecting and preparing information for remote use.

Design/methodology/approach: In this project, when developing the system, we used the industry standard OPC for the exchange of technological data.

Findings: The structure of the measuring channel is determined, as well as the necessary technical means for its physical realization.

Research limitations/implications: The development of this subsystem of information gathering provides the widest opportunities for the exchange of technological data, thereby enabling the integration of many diverse technologies into a single complex.

Originality/value: This article discusses the problem of creating a modern subsystem for collecting and preparing information for remote use within the overall system of dispatch control and data collection. The architecture of a subsystem of network access to data in automation systems based on OPC-technology is presented. A detailed description of the methods of building communication channels of the hardware and the upper level of applications is provided.

Key words: APCS, SCADA, data collection, OPC, multiplatform, remote access automation, industry.

УДК 512

Н. В. Мохнина, Н. В. Юрова

КОММУТИРУЮЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ В КЛАССАХ СОПРЯЖЕННОСТИ В ГРУППЕ СУЗУКИ ${}^2B_2(q)$

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Статья продолжает ряд работ по проверке гипотезы о том, что в конечной простой группе неединичный класс сопряженности содержит коммутирующие элементы. В работе [1] гипотеза проверена для спорадических групп, проективных групп $L_n(q)$ и знакопеременных групп A_n . В работе [2] она проверена для простой группы $\text{P}\Omega_3(2)$.

Ключевые слова: группа Сузуки, класс сопряженности, конечная группа, коммутирующие элементы, центральный элемент.

В предлагаемой статье проведем проверку гипотезы для простой группы Сузуки ${}^2B_2(q)$, где $q = 2^{2k+1}$, $k \geq 1$. Описание группы ${}^2B_2(q)$ рассматривается в [3], [4].

Нам понадобятся следующие сведения.

1. Силовская 2 – подгруппа состоит из матриц вида

$$(\alpha, \beta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \alpha & 1 & 0 & 0 \\ \alpha^{\theta+1} + \beta & \alpha^\theta & 1 & 0 \\ \alpha^{\theta+2} + \alpha\beta + \beta & \beta & \alpha & 1 \end{pmatrix},$$

элементы которых лежат в конечном поле F_q .

2. Так называемая картановская подгруппа состоит из матриц вида

$$\hat{k} = \begin{pmatrix} k^{1+\theta^{-1}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k^{\theta^{-1}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k^{-\theta^{-1}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k^{-1-\theta^{-1}} \end{pmatrix},$$

где $k \in F_q$.

Под θ подразумевается автоморфизм поля F_q такой, что

$$\theta: \alpha \rightarrow \alpha^{\sqrt{2q}}.$$

3. Имеют место следующие формулы:

$$(\alpha, \beta)(\gamma, \delta) = (\alpha + \gamma, \alpha\gamma^\theta + \beta + \delta) \tag{1}$$

$$\hat{k}^{-1}(\alpha, \beta)\hat{k} = (\alpha k, \beta k^{1+\theta}). \tag{2}$$

4. Группу ${}^2B_2(q)$, можно рассматривать как скрученный вариант группы Шевале $B_2(q)$.

Восстановим классы сопряженности элементов и соответствующие централизаторы из таблицы характеров, размещенной в [4].

Таблица 1

Классы сопряженности группы ${}^2B_2(q)$

Класс	Порядок элементов класса	Порядок централизатора	Число классов
1	1	$q^2(q-1)(q^2+1)$	1
$2A$	2	q^2	1
$4A$	4	$2q$	1
$4B^{**}$	4	$2q$	1
$\kappa-A$	делит $q-1$	$q-1$	$\frac{q-2}{2}$
$\kappa-B$	делит $q+\sqrt{2q}+1$	$q+\sqrt{2q}+1$	$\frac{q+\sqrt{2q}}{4}$
$\kappa-C$	делит $q-\sqrt{2q}+1$	$q-\sqrt{2q}+1$	$\frac{q-\sqrt{2q}}{4}$

Порядок элементов в классе сопряженности делит порядок централизатора. Например, $\kappa-A$ – это класс элементов, порядок которых делит $q-1$.

Следует заметить, что классы

$$\kappa-A, \kappa-B, \kappa-C$$

– это классы полупростых элементов, т.е. элементов, чьи порядки взаимно просты с характеристикой поля q .

Классы

$$2A, 4A, 4B^{**}$$

– это классы унитарных элементов, т.е. элементов, чьи порядки являются степенью 2.

Смешанных элементов, порядки которых имеют в качестве делителя не только 2, в группе ${}^2B_2(q)$, нет.

Группу ${}^2B_2(q)$, можно рассматривать как скрученный вариант группы Шевалле $B_2(q)$, что позволяет использовать соответствующую терминологию и результаты из [5].

При проверке гипотезы необходима следующая лемма.

Лемма. Отражение, являющееся композицией отражений относительно двух ортогональных корней, переводит каждый корень, компланарный с ним, в противоположный.

Доказательство. Пусть α и β – два взаимно ортогональных корня. Без ограничения общности, можно считать их единичными.

Рассмотрим отражение ω , действующее на корень γ , следующим образом [5]:

$$\omega_{\delta}(\gamma) = \gamma - 2(\delta, \gamma)\delta.$$

$$\omega_\alpha \omega_\beta (\gamma) = \omega_\alpha (\gamma - 2(\beta, \gamma)\beta) = \gamma - 2(\beta, \gamma)\beta - 2(\alpha, \gamma - 2(\beta, \gamma)\beta)\alpha = \gamma - 2((\beta, \gamma)\beta - (\alpha, \gamma)\alpha).$$

Учитывая, что

$$(\beta, \gamma)\beta + (\alpha, \gamma)\alpha = \gamma,$$

так как левая часть последнего равенства является разложением γ по взаимно ортогональным векторам, получаем

$$\omega_\alpha \omega_\beta (\gamma) = \gamma - 2\gamma = -\gamma,$$

что и требовалось доказать.

Обратимся к проверке гипотезы. Проверим ее для полупростых элементов. Наличие в полупростых классах коммутирующих элементов следует из предложения.

Теорема 1. В группе ${}^2B_2(q)$, полупростой элемент сопряжен со своим обратным.

Доказательство. От группы $B_2(q)$ перейдем в алгебраическую группу B_2 над алгебраическим замыканием F_q , и покажем, что в ней полупростой элемент сопряжен со своим обратным.

Из [5] известно, что полупростой элемент сопряжен с картановским элементом

$$h = \prod_{\alpha} h_{\alpha}(t_{\alpha}).$$

В диаграмме Дынкина ([8], с. 296) имеется пара ортогональных корней (α, γ) .

Отражение с помощью

$$\omega = \omega_{\alpha} \omega_{\gamma},$$

где $\alpha \perp \gamma$,

ω – представитель элемента из группы Вейля, переводит элемент вида $h_{\alpha}(t_{\alpha})$ в $h_{\omega(\alpha)}(t_{\alpha})$ такой, что

$$\omega h_{\alpha}(t_{\alpha}) \omega^{-1} = h_{\omega(\alpha)}(t_{\alpha}).$$

Это следует из соотношения

$$\omega_{\alpha} h_{\beta}(t) \omega_{\alpha}^{-1} = h_{\omega_{\alpha}(\beta)}(t)$$

в формулировке леммы 20 ([5], с. 31).

Отражение, являющееся композицией отражений относительно двух ортогональных корней

$$\omega = \omega_{\alpha} \omega_{\gamma},$$

переводит каждый корень в противоположный (лемма):

$$h_{\omega(\alpha)}(t_{\alpha}) = h_{-\alpha}(t_{\alpha}).$$

Но из соотношения (8) определения 1 ([5], с. 32) имеем

$$h_{\alpha}(t) x_{\beta}(u) h_{\alpha}(t^{-1}) = x_{\beta}(t^{(\beta, \alpha)} u).$$

Откуда следует, что

$$h_{-\alpha}(t_\alpha) = h_\alpha(t_\alpha^{-1}),$$

по крайней мере, с точностью до множителя из центра группы.

Таким образом, сопряжение картановского элемента элементом ω переводит каждый множитель в h в обратный:

$$\omega h_\alpha(t) \omega^{-1} = h_{\omega(\alpha)}(t) = h_{-\alpha}(t) = h_\alpha^{-1}(t).$$

Но так как множители коммутируют, значит, и h переходит в обратный:

$$\omega h \omega^{-1} = \prod_\alpha h_{\omega(\alpha)}(t_\alpha) = \prod_\alpha h_{-\alpha}(t_\alpha) = \prod_\alpha h_\alpha(t_\alpha^{-1}) = h^{-1}.$$

Следовательно, полупростой элемент сопряжен со своим обратным в алгебраической группе – некотором максимальном торе.

Далее, мультипликатор Шура группы $B_2(q)$ равен 1 [9]. Теперь воспользуемся результатом статьи Т. А. Спрингера и Р. Штейнберга ([6], с. 200), по которому и в группе ${}^2B_2(q)$ полупростой элемент сопряжен со своим обратным.

Наши рассуждения проходят при $t \neq t^{-1}$, то есть когда h не является инволюцией. Но по теореме 2.1 из работы [1]: в любой конечной простой группе класс инволюций содержит коммутирующие элементы. Следовательно, это верно и для группы ${}^2B_2(q)$. Полупростые классы разобраны.

Перейдем к рассмотрению унипотентных элементов. Централлизаторы любого элемента и его обратного имеют один и тот же порядок.

В $B_2(q)$ имеются классы с одинаковым порядком централизатора. Это $4A$ и $4B^{**}$ (4 – элементы). Элемент из класса $4A$ имеет обратный.

$$\text{Если } x \in 4A, \text{ то } x^{-1} \in 4B^{**}.$$

Теорема 2. В классе $4A$, а также $4B^{**}$ имеются коммутирующие элементы.

Доказательство. Пусть (α, β) – 4 элемент.

Пользуясь равенствами (1) и (2) замечаем, что

$$\alpha \neq 0 \text{ и } \hat{k}^{-1}(\alpha, \beta) \hat{k} = (\alpha k, \beta k^2).$$

Если взять $k^0 = 1$, то из (1) устанавливаем, что оба элемента коммутируют.

Что и требовалось доказать.

Библиографический список

1. **Галкин, В.М.** Коммутирующие элементы в классе сопряженности / В.М. Галкин, Л.Н. Ерофеева, С.В. Лещева // Изв. вузов. Математика. – 2016. – № 8. – С. 12-20.
2. **Ерофеева, Л.Н.** О простой группе Ри ${}^2G_2(q)$ / Л. Н. Ерофеева, С. В. Лещева, Н. В. Мохнина, Н. В. Юрова // Труды НГТУ. – 2017. – № 3(118). – С. 24-27.
3. **Бусаркин, В. М.** Конечные расщепляемые группы / В. М. Бусаркин, Ю. М. Гончаров. – М.: Мир, 1985. – 111 с.
4. **Abdullah, A.** / The solvable subgroups of large order of $Suz(q)$ / A. Abdullah, Abduh and Gaitha M. Alzabeedy // Global Journal of Mathematics. Vol. 4. – No. 2. – October 06. – 2015.

5. **Стейнберг, Р.** Лекции о группах Шевалле / Р. Стейнберг. – М.: Мир, 1975. – 263 с.
6. Семинар по алгебраическим группам. – М.: Мир, 1973. – 315 с.
7. **Серр, Ж.-П.** Алгебры Ли и группы Ли / Ж.-П. Серр. – М.: Мир, 1969. – 375 с.
8. **Горенштейн, Д.** Конечные простые группы. Введение в их классификацию / Д. Горенштейн. – М.: Мир, 1985. – 352 с.

*Дата поступления
в редакцию 02.11.2017*

N.V. Mokhnina, N.V. Yurova

Commuting elements in conjugacy classes in the group Suzuki

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

Purpose: There is the conjecture that every conjugacy class of fin noabelian group contains the commuting elements. The conjecture for Ree group ${}^2B_2(q)$ is verified.

Design/methodology/approach: The formation on the structure of the exclusive groups of the Lie type is using.

Findings: This result is an stage of the testing of the general conjecture.

Research limitations/implications: Methods of this paper may be used for the investigation the other groups.

Originality/value: The result is new.

Key words: group Suzuki, conjugacy class, simple group, switching elements, centralizer.

УДК 330.4

Р.В. Шамин^{1,3}, О.Р. Козырев², К.В. Логвинова²,
С.Ю. Обыденнова², А.Р. Гиниятуллин², А.Г. Шмелева^{3,1}

ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НЕГЛАДКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ В ЗАДАЧАХ ОЦЕНКИ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ НАУКОЕМКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Российский университет дружбы народов (РУДН)¹,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²,
Московский технологический университет (МИРЭА)³

Рассматриваются вопросы количественной оценки конкурентоспособности наукоемких предприятий. Основная сложность состоит в том, что для проведения количественной оценки необходимо учитывать множество определяющих параметров, среди которых присутствуют не только объективные показатели продукции и ее стоимость, но и факторы, связанные с уровнем компетенции предприятия, а также прогнозом состояния наукоемкого предприятия в будущем. Актуальные задачи экономической оптимизации представляют собой многофакторную модель, где результирующая функция зависит от большого числа оптимизируемых переменных. Кроме того, во многих задачах возникают негладкие функции, что делает проблему нахождения оптимальных решений очень сложной.

Рассмотрены подходы к оценке конкурентоспособности и ее связи с оптимизационными задачами. Показано, что возникающие оптимизационные задачи не всегда могут быть эффективно решены с помощью классических процедур. Экономико-математическая оптимизация, как правило, сопряжена с нахождением глобальных экстремумов в ситуациях, когда оптимизируемая функция имеет большое количество локальных экстремумов. Представлен метод имитации отжига, который позволяет находить решения указанных задач в условиях наличия локальных минимумов и отсутствия нужной гладкости. Рассмотрено применение метода имитации отжига для решения оптимизационных задач оценки конкурентоспособности наукоемких предприятий.

Ключевые слова: имитационная модель, конкурентоспособность, оптимизация, многофакторная модель, компетенции, метод отжига.

Задачи оптимизации играют определяющую роль во многих экономико-математических моделях, поскольку задачами экономики является рациональное (оптимальное) распределение ресурсов. При этом многие задачи экономической оптимизации представляют собой многофакторную оптимизацию, когда результирующая функция зависит от большого числа факторов (оптимизируемых переменных) [1]. Кроме того, во многих экономических задачах оптимизации возникают негладкие функции, что делает проблему нахождения оптимальных решений очень сложной. Более того, экономико-математическая оптимизация, как правило, сопряжена с нахождением глобальных экстремумов в ситуациях, когда оптимизируемая функция имеет большое количество локальных экстремумов.

В настоящей работе рассматривается метод имитации отжига для нахождения экстремумов в задачах оценки конкурентоспособности наукоемких предприятий.

Существуют различные методы для оценки конкурентоспособности наукоемких предприятий. Основная сложность состоит в том, что для проведения такой количественной оценки необходимо учитывать большое количество различных факторов. Поскольку рассматриваются наукоемкие предприятия, то нужно учитывать не только объективные показатели продукции и ее стоимость, но и различные факторы, связанные с уровнем компетенции предприятия, а также прогнозом состояния наукоемкого предприятия в будущем [2-3].

В настоящей работе рассматривается известный метод ТОС Time-Object-Compare, с помощью которого можно получать количественные оценки конкурентоспособности наукоемких предприятий в условиях анализа большого количества факторов.

Метод ТОС был разработан для количественной оценки конкурентоспособности продукции наукоемких производств. В рассматриваемой экономико-математической модели этот метод

позволяет проводить оценку изменения конкурентоспособности продукции в зависимости от изменения характеристик продукции, производимой наукоемкими предприятиями.

Параметры для проведения расчетов по этому методу приведены в табл. 1. Полнота и точность этих данных определяют точность расчетов показателей конкурентоспособности продукции.

Таблица 1

Показатели конкурентоспособности продукции

	Название	Обозначение	Единицы измерения
	Вектор статистических характеристик	x	Безразмерный
2	Вектор средних значений статистических характеристик	\bar{x}	Безразмерный
3	Вектор нормированных времен статистических характеристик	τ	Безразмерный
4	Матрица неравновесности статистических характеристик	A	Безразмерный
5	Вектор прогнозных характеристик	y	Безразмерный
6	Вектор средних значений прогнозных характеристик	\bar{y}	Безразмерный
7	Вектор нормированных времен прогнозных характеристик	τ	Безразмерный
8	Вектор доверия прогнозных характеристик	p	Безразмерный
9	Матрица неравновесности прогнозных характеристик	A	Безразмерный
10	Вектор объективных характеристик	z	Безразмерный
11	Матрица неравновесности объективных характеристик	A	Безразмерный
12	Вектор сравнительных характеристик	q	Безразмерный
13	Матрица неравновесности сравнительных характеристик	A	Безразмерный
14	Матрица описания конкурирующих объектов	Q	Безразмерный

В результате применения метода получим четыре числовых параметра, которые описывают конкурентоспособность продукции. Эти параметры приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры оценки конкурентоспособности продукции

Название	Обозначение	Единицы измерения
Статистический показатель конкурентоспособности продукции	T_p	Безразмерный
Прогнозный показатель конкурентоспособности продукции	T_F	Безразмерный
Объективный показатель конкурентоспособности продукции	T_O	Безразмерный
Сравнительный показатель конкурентоспособности продукции	T_C	Безразмерный

Таким образом, мы получаем следующий четырехмерный вектор

$$T = \begin{pmatrix} T_p \\ T_F \\ T_O \\ T_C \end{pmatrix},$$

рассчитываемый по методу ТОС. Этот вектор представляет собой комплексный показатель конкурентоспособности наукоемких предприятий.

Как отмечалось ранее, при применении метода оценки конкурентоспособности науко-

емких предприятий, возникает задача многомерной оптимизации. При этом возникающие функции для оптимизации имеют различные особенности:

- оптимизируемые функции негладкие;
- оптимизируемые функции имеют большое количество локальных минимумов.

Рассмотрим метод имитации отжига, который можно использовать для проведения численной оптимизации в указанных случаях.

Общая постановка задачи следующая. Пусть мы рассматриваем числовую функцию f на некотором непустом множестве U :

$$f : U \rightarrow R.$$

Будем предполагать, что функция f является неотрицательной на этом множестве. В задачу оптимизации входит нахождение такого элемента $u^* \in U$, что

$$f(u^*) = \min_{u \in U} f(u).$$

Разумеется, что в общей постановке эта задача может и не иметь решения, поскольку указанный минимум может не существовать. Кроме того, возможно, что данная задача имеет более одного решения [4].

Будем рассматривать задачу построения некоторой минимизирующей последовательности для оптимальной задачи. Это означает нахождение следующей последовательности:

$$\{u_k\} \subset U, \lim_{k \rightarrow \infty} f(u_k) = \inf_{u \in U} f(u).$$

Обычно для построения этой последовательности используют вариант градиентных методов, но как уже отмечалось, в задачах оценки конкурентоспособности наукоемких предприятий, эти методы будут неэффективны.

Рассмотрим вариант метода имитации отжига, который позволяет эффективно находить глобальные экстремумы (минимумы) в задачах оптимизации.

1-й шаг. Положим $T=100$.

2-й шаг. Положим $k = 0$.

3-й шаг. Выбираем $u_k \in U$ произвольно.

4-й шаг. Модифицируем u_k и получаем некоторое $v \in U$.

5-й шаг. Если $f(v) < f(u_k)$, то положить $u_{k+1} = v$ и перейти к шагу 9.

6-й шаг. Выбираем случайное значение $\xi \in (0,1)$, используя равномерное распределение.

7-й шаг. Если $\xi < \exp(-(f(v) - f(u_k))/T)$, то положить $u_{k+1} = v$ и перейти к шагу 9.

8-й шаг. Положить $u_{k+1} = u_k$.

9-й шаг. Положить $k = k + 1$.

10-й шаг. Положить $T = 0.95 T$.

11-й шаг. Перейти к шагу 4.

Приведем пример использования этого метода для негладкой функции, которая имеет много локальных минимумов.

Рассмотрим функцию

$$f(u) = 0.1u^2(2 + |\sin(8u)|).$$

Для простоты выбрана одномерная функция, но метод имитации отжига хорошо работает и в многомерном случае. Тем не менее, эта функция имеет большое количество нарушения гладкости: в точках, в которых синус меняет знак. Более того, эта функция имеет бесконечно большое количество локальных минимумов, что делает эту задачу для нахождения минимума очень сложной для традиционных методов. Приведем график этой функции (рис. 1).

Метод имитации отжига отлично справляется с нахождением минимума такой функции с заданной точностью.

Рассмотрим модельный пример наукоемкого предприятия, для которого оценка конкурентоспособности требует решения экстремальной задачи. Пусть для оценки конкурентоспособности этого предприятия по методу ГОС необходимо оценить характеристики выпускаемой продукции с учетом распределения финансирования мероприятий по наращиванию ключевых компетенций, необходимых для разработки рассматриваемой продукции.

Введем вектор

$$X = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix},$$

который обозначает уровень финансирования каждого из n мероприятий по повышению ключевых компетенций

$$C_i = C_i(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

Здесь через C_i обозначены уровни ключевых компетенций, необходимые для создания инновационного продукта, который позволит повысить конкурентоспособность рассматриваемого наукоемкого предприятия.

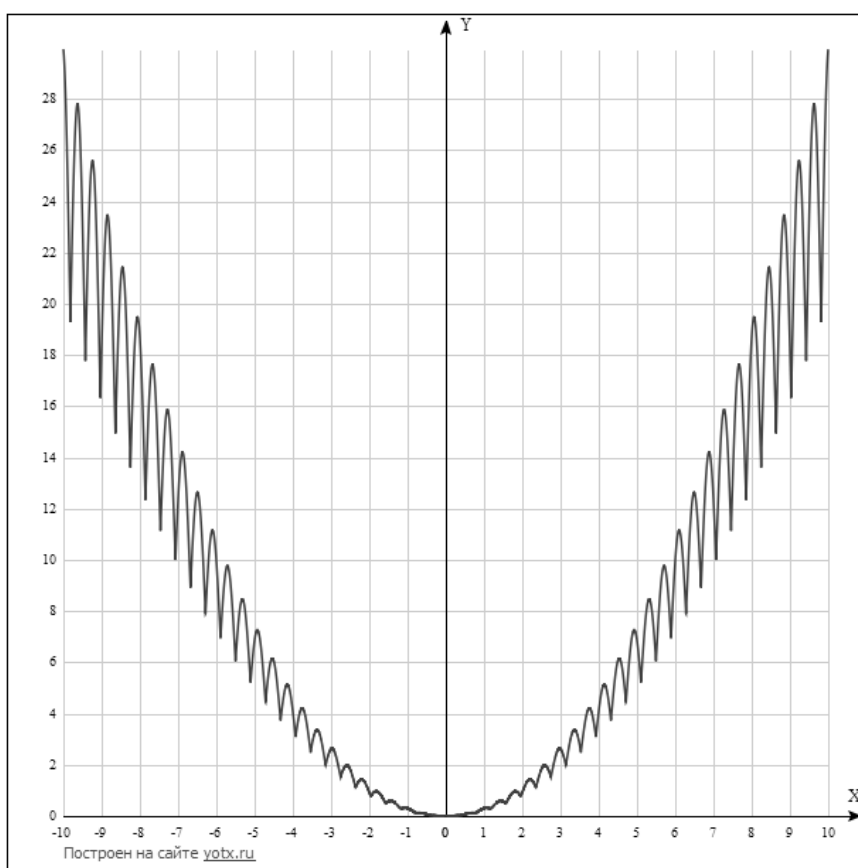


Рис. 1. График оптимизируемой функции

Зависимость характеристик инновационного продукта от ключевых компетенций оценивается с помощью следующей целевой функции:

$$f = f(C_1, C_2, \dots, C_n).$$

Таким образом, возникает следующая оптимизационная задача:

$$f(C_1(x_1, \dots, x_n), C_2(x_1, \dots, x_n), \dots, C_n(x_1, \dots, x_n)) \rightarrow \max.$$

Одна из основных трудностей состоит в том, что целевая функция $f(C)$, а также функции компетенций C_i , как правило, неизвестны аналитически, а могут быть оценены лишь эмпирически с использованием эконометрики и иных статистических инструментов. При этом оптимизационная задача становится негладкой и содержащей большое количество локальных экстремумов. Поэтому предполагаем, что использование метода имитации отжига для нахождения минимума является наиболее эффективной в этой ситуации.

В работе рассмотрены экономико-математические модели для оценки конкурентоспособности наукоемких предприятий. Показано, что в этих задачах часто возникают оптимизационные задачи, которые могут иметь различные особенности: негладкость, наличие локальных экстремумов. Следовательно, применение традиционных методов оптимизации оказывается неэффективным.

Для решения оптимизационных задач предлагаем использовать вариант метода имитации отжига, который позволяет находить решения оптимальных задач в условиях наличия локальных минимумов и отсутствия нужной гладкости.

Для количественной оценки конкурентоспособности наукоемких предприятий предлагается использовать комплексный метод ТОС. Этот метод учитывает самые различные факторы для количественной оценки конкурентоспособности.

Приведена общая схема оценки конкурентоспособности наукоемких предприятий с использованием уровня ключевых компетенций. В этой схеме возникает сложная оптимизационная задача, которая может быть решена с помощью метода имитации отжига.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-06-00300-а.

Библиографический список

1. **Шамин, Р.В.** Подходы к созданию методики оценки влияния инновационных технологий на повышение конкурентоспособности предприятий РКП / Р.В. Шамин, М. Анфимова, П. Мякишева // Риск: ресурсы, информация, снабжение, конкуренция. – 2015. – № 2. – С. 72-75.
2. **Шамин, Р.В.** Подходы по оценке влияния внешних и внутренних факторов на конкурентоспособность продукции ракетно-космической промышленности / Р.В. Шамин, Д.В. Ковков, А.А. Чурсин // Бизнес в законе. – 2013. – № 1. – С. 127-130.
3. **Чурсин, А.А.** Инвестиции и инновации и их роль в повышении конкурентоспособности организаций / А.А. Чурсин, Р.В. Шамин // Оборонный комплекс - научно-техническому прогрессу России. – 2011. – Вып. 2. – С. 83-87.
4. **Gurevich, P.L.** Reaction-diffusion equations with spatially distributed hysteresis / P.L. Gurevich, R.V. Shamin, S.B. Tikhomirov // SIAM J. Math. Anal. – V. 45. – №. 3 (2013). – P. 1328-1355.

*Дата поступления
в редакцию 31.10.2017*

**R.V. Shamin^{1,3}, O.R. Kozyrev², K.V. Logvinova, S.Yu. Obydenova²,
A.R. Giniyatullin², A.G. Shmeleva^{3,1}**

ECONOMIC-MATHEMATICAL MODEL OF NONLINEAR OPTIMIZATION IN SCIENTIFIC ENTERPRISES COMPETITIVENESS ESTIMATION PROBLEMS

Russian University of Peoples' Friendship¹
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev²
Moscow technological university (MIREA)³

Purpose: Competitiveness assessment optimization problem solution for knowledge-based enterprises.

Design/methodology/approach: Annealing simulation method application for knowledge-based enterprises' competitiveness assessment optimization problems.

Findings: Imitation model for knowledge-based enterprises' competitiveness assessment optimization problems.

Research limitations/implications: Proposed imitation model can be implicated in various companies and enterprises of strategic value.

Originality/value: The following method allows to analyze numerous factors, influencing companies' competitiveness index.

Key words: simulation model, competitiveness, optimization, multifactor model, competencies, annealing method.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

УДК 621.313.323

А.И. Байков¹, А.Л. Жеребцов², А.Г. Захаров³, Д.В. Ковалев³

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗБУДИТЕЛЕМ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ГАЗПЕРЕКАЧИВАЮЩЕГО АГРЕГАТА

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева¹,
ООО «Газпром трансгаз Сургут»²,
ЦТЭ НТЦ РУ и ЭЭО компании «НИПОМ»³

Предмет работы: совершенствование системы управления возбуждением на основе математического моделирования участка газоперекачивающей станции в среде Matlab Simulink.

Методы: получено математическое описание синхронного двигателя для разных режимов работы на основе координатного преобразования Парка-Горева, разработана схема замещения высоковольтного трансформатора, идентифицируемая по данным опыта короткого замыкания, введены искусственные цепи связи, обеспечивающие разрешение преобразованных и не преобразованных величин через токи общих узлов подсхем статоров и питания.

Результаты: воспроизведены согласующиеся с экспериментальными осциллограммами просадки напряжений питания, которые приводят к выпадению из синхронизма работающих двигателей, если не предпринимать необходимых действий по форсировке их токов возбуждения.

Применение: обоснованы практические рекомендации по совершенствованию алгоритмов цифрового управления существующими возбудителями и намечены пути их дальнейшего развития.

Ключевые слова: математическое моделирование, синхронный двигатель, газоперекачивающий агрегат, управление возбуждением, Matlab, Simulink

Электроприводы газоперекачивающих агрегатов (ГПА) магистральных газопроводов относятся к наиболее мощным и ответственным электроустановкам [1]. В условиях электроснабжения с первой категорией надежности применение эффективных систем управления возбуждением обеспечивает высокие функциональные показатели энергосбережения и безотказности компрессорных станций [2]. Сокращение числа опасных ситуаций, возникающих в конкретных условиях работы, способствует выполнению высоких требований, предъявляемых к этим объектам.

Математическое моделирование позволяет выполнять необходимый количественный анализ технических решений при условии достаточно высокой точности и достоверности, предусматривающей учет нескольких параллельно работающих электрических машин, схемы электроснабжения и микропроцессорных систем управления возбудителями. Ввиду возрастания размерности и сложности предмета анализа требуется применение обоснованных упрощений и идеализаций при представлении отдельных элементов и узлов, т.е. корректная идентификация применяемых математических моделей. Предложения по совершенствованию существующих систем возбуждения могут иметь практическое значение только при условии детального анализа и обобщения опыта эксплуатации данных установок в Западной Сибири и на европейской части Российской Федерации.

Расчетная схема участка компрессорного цеха включает сетевой трехфазный трансформатор с расщепленной обмоткой со схемой соединения обмоток "звезда/треугольник-

треугольник" и присоединенные к его вторичным обмоткам статоры синхронных двигателей (рис. 1).

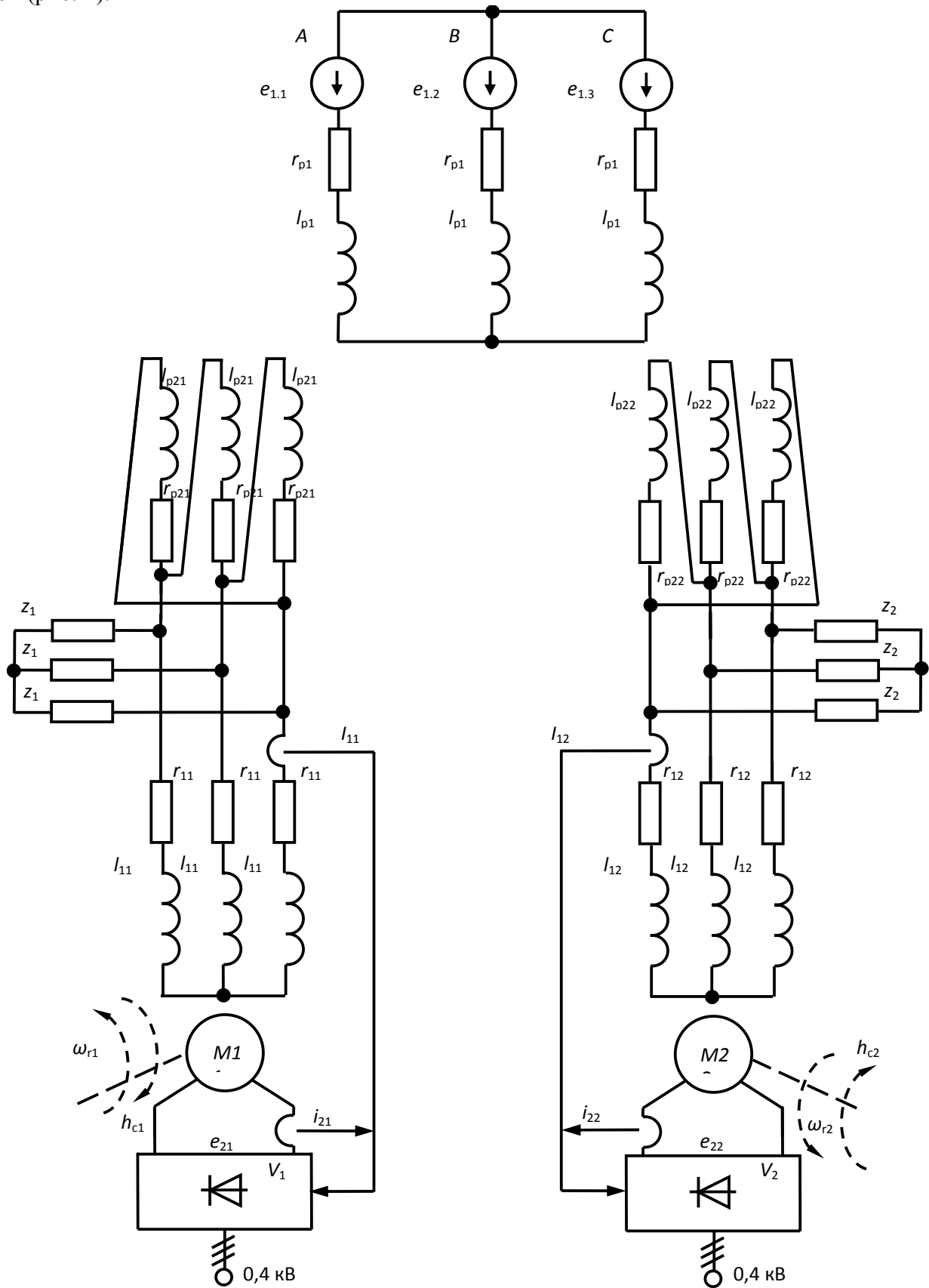


Рис. 1. Расчетная схема участка компрессорного цеха с двумя параллельно работающими двигателями

Исходные уравнения электрического равновесия трансформатора могут быть представлены относительно вектора напряжений трехфазных обмоток высокого напряжения U_{p1} и двух секций вторичной обмотки U_{p21} U_{p22} как суммы ЭДС индукций фаз по контурам намагничивания стержней и рассеяния обмоток и падений напряжений на активных сопротивлениях

$$U_{p1} = W_{p1} \frac{d}{dt} B_p + L_{p1\sigma} \frac{d}{dt} I_{p1} + L_{p1.21\sigma} \frac{d}{dt} I_{p21} + L_{p1.22\sigma} \frac{d}{dt} I_{p22} + R_{p1} I_{p1}, \quad (1)$$

$$U_{p21} = W_{p21} \frac{d}{dt} B_p + L_{p1.21\sigma} \frac{d}{dt} I_{p1} + L_{p21\sigma} \frac{d}{dt} I_{p21} + L_{p21.22\sigma} \frac{d}{dt} I_{p22} + R_{p21} I_{p21}, \quad (2)$$

$$U_{p22} = W_{p22} \frac{d}{dt} B_p + L_{p1.22\sigma} \frac{d}{dt} I_{p1} + L_{p21.22\sigma} \frac{d}{dt} I_{p21} + L_{p22\sigma} \frac{d}{dt} I_{p22} + R_{p22} I_{p22}, \quad (3)$$

где B_p – вектор индукций стержней, I_{p1} , I_{p21} , I_{p22} , – вектора индукций стержней и фазных токов обмоток, W_{p1} , W_{p21} , W_{p22} , – диагональные матрицы чисел витков, собственных $L_{p1\sigma}$, $L_{p21\sigma}$, $L_{p22\sigma}$ и взаимных $L_{p1.21\sigma}$, $L_{p1.22\sigma}$, $L_{p21.22\sigma}$ индуктивностей рассеяния обмоток. Важно, что исходные уравнения предусматривают возможность учета пофазной асимметрии параметров обмоток.

Равновесие намагничивающих сил стержней с осевыми размерами l_{ps} выражается по закону полного тока:

$$l_{ps} H_p = W_{p1} I_{p1} + W_{p21} I_{p21} + W_{p22} I_{p22}, \quad (4)$$

где H_p – вектор напряженностей стержней при условии отсутствия насыщения в рассматриваемых процессах можно считать нулевым. Отсюда получается выражение для вектора токов первичной обмотки через токи секций вторичной обмотки:

$$I_{p1} = -W_{p1}^{-1} W_{p21} I_{p21} - W_{p1}^{-1} W_{p22} I_{p22}. \quad (5)$$

Вычитанием соотношения (1) из соотношений (2) и (3) с соответствующим приведением по числам витков исключаются ЭДС индукций стержней и выводятся выражения напряжений фаз секций вторичной обмотки:

$$U_{p21} = k_{pT} U_{p1} + l_{kp2.1} \frac{d}{dt} I_{p21} + l_{kp2.12} \frac{d}{dt} I_{p22} + r_{kp2.1} I_{p21} + r_{kp2.12} I_{p22}, \quad (6)$$

$$U_{p22} = k_{pT} U_{p1} + l_{kp2.12} \frac{d}{dt} I_{p21} + l_{kp2.1} \frac{d}{dt} I_{p22} + r_{kp2.12} I_{p21} + r_{kp2.1} I_{p22},$$

где для случая пофазной симметрии обмоток индуктивности и активные сопротивления выражаются через паспортные данные опытов коротких замыканий обмоток трансформатора:

$$l_{kp21.1} = l_{p21\sigma} - 2k_{pT} l_{p1.21\sigma} + k_{pT}^2 l_{p1\sigma}, \quad l_{kp22.1} = l_{p22\sigma} - 2k_{pT} l_{p1.22\sigma} + k_{pT}^2 l_{p1\sigma}, \quad (7)$$

$$l_{kp21.22} = l_{p21\sigma} - 2l_{p21.22\sigma} + l_{p22\sigma} \approx \frac{2}{3} l_{kp21.1},$$

где через числа витков обмоток w_{p1} , w_{p21} , w_{p22} определено выражение коэффициента трансформации $k_{pT} = \frac{w_{p21}}{w_{p1}} = \frac{w_{p22}}{w_{p1}}$.

Фазные напряжения первичной обмотки, ввиду большой мощности сети 220 - 110 кВ, могут считаться идеальными синусоидальными, так, что при значении угла первой фазы Δ_1 принимается

$$k_{pT} U_{p1} = E_{p1} = E_{p\max} \begin{bmatrix} \sin(\omega_1 t + \Delta_1) \\ \sin(\omega_1 t + \Delta_1 - \Delta) \\ \sin(\omega_1 t + \Delta_1 + \Delta) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где $\Delta = 2\pi/3$, $\omega_1 = 2\pi f_1$ – угловая частота; f_1 – частота питающей сети. В табл. 1 приведены пас-

портные данные широко используемого трансформатора ТРДЦН - 630000/220/10 [3]. В таблице также рассчитаны по упрощенной методике параметры схемы замещения в абсолютных единицах.

Таблица 1

Исходные паспортные и расчётные данные трансформатора ТРДЦН - 630000/220/10

Обозначение	Формула	Значение	Наименование
S_{Tnom}		63	Номинальная мощность трансформатора, МВА
U_H		220	Линейное напряжение обмотки высокого напряжения, кВ
U_L		10,5	Линейное напряжение обмотки низкого напряжения, кВ
I_L		1732	Ток вторичной обмотки номинальный, А
U_{kHLL}		11,5	Напряжение короткого замыкания для обмоток Н-LL, %
U_{kHL}		21	Напряжение короткого замыкания для обмоток Н-L, %
ΔP_k		265	Потери короткого замыкания, кВт
k_{pT}	U_L / U_H	0,048	Коэффициент трансформации L/H
R''_H	$\Delta P_k U_L^2 / (2 S_{Tnom}^2)$	0,0037	Активное сопротивление обмотки высокого напряжения, приведенное к L, Ом
R''_L	$2R_H$	0,0070	Активное сопротивление обмотки низкого напряжения, приведенное к L, Ом
R''_k	$1,5R_H$	0,0055	Активное сопротивление опыта короткого замыкания L/H, Ом
Z''_k	$U_{kHLL} / (100 U_L / I_L)$	0,4025	Полное сопротивление короткого замыкания, приведенное к L, Ом
X_{kLH}	$\sqrt{Z_k^2 - R_k^2}$	0,402	Индуктивное сопротивление короткого замыкания обмоток L/H, приведенное к L, Ом
$L_{kp2.1}$	X_{kLH} / ω_1	0,00130	Собственная индуктивность секций вторичной обмотки в схеме замещения, Гн
$L_{kp2.12}$	$2X_{kLH} / (3\omega_1)$	0,00085	Взаимная индуктивность секций вторичной обмотки в схеме замещения, Гн
$R_{kp2.1}$	$R_L + R_H$	0,0107	Собственное активное сопротивление секций вторичной обмотки в схеме замещения, Ом
$R_{kp2.12}$	R_H	0,0037	Взаимное активное сопротивление секций вторичной обмотки в схеме замещения, Ом

Полученные соотношения позволяют применить подсхему замещения трансформатора без первичной стороны. Тогда для участка, включающего два синхронных двигателя, питаемых от разных секций вторичной обмотки, предлагается схема замещения (рис. 2). Взаимные индуктивные и активные элементы отражают влияние разных частей обмоток друг на друга. При этом цепи секций вторичной обмотки гальванически развязаны, что имеет место в реальной схеме участка компрессорного цеха. В схему включены активно-индуктивные сопротивления z_{b1} , z_{b2} , учитывающие подсадки напряжений и потери в шинпроводах.

Также в схему введены дополнительные цепи z_{21} , z_{22} , обеспечивающие возможность воспроизведения работы подсхем питания и статоров двигателей при различных методах математического представления двигателей. Известно [4], что использование координатных преобразований превращает цепи статоров их трехфазных в двухфазные и потребляемые токи I_{21} , I_{22} становятся зависимыми переменными, которые не могут быть включены непосредственно в уравнения электрических цепей, внешних для статоров двигателей. Введение цепей из емкостей и резисторов добавляет в схему узлы, разрешение баланса токов которых

позволяет учесть совместное функционирование подсхем с разнородными математическими описаниями. Таким образом, эти искусственно введенные цепочки играют роль подсхем связи. Чтобы уменьшить влияние токов связи на рабочие токи, величины сопротивлений этих цепей принимаются достаточно большими. Можно отметить, что включение параллельно с активными сопротивлениями емкостей, на первый взгляд, функционально избыточных, оправдано улучшением сходимости методов интегрирования уравнений состояния, приводящим к сокращению затрат машинного времени.

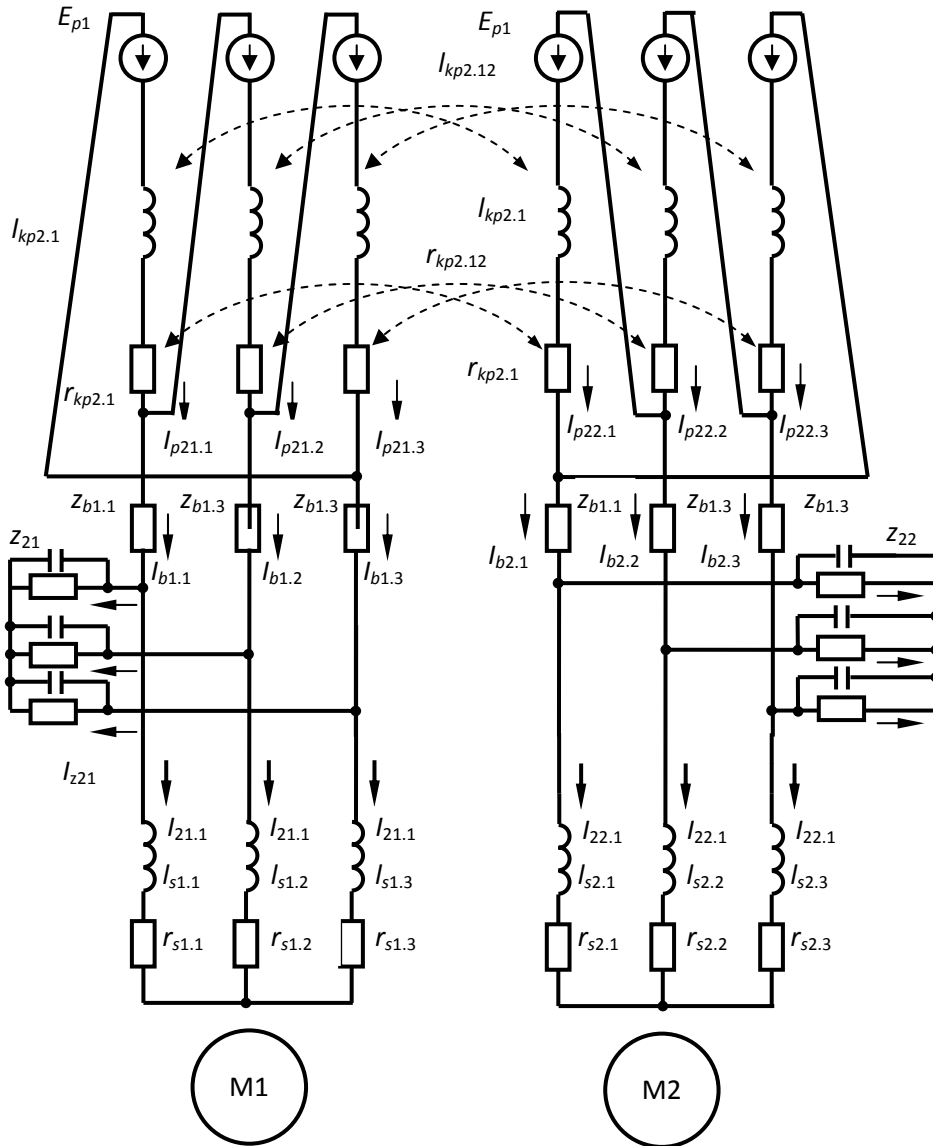


Рис. 2. Схема замещения силовых цепей участка турбокомпрессорного цеха

Предлагаемая схема замещения имеет общий характер для различных случаев анализа функционирования ГПА. В частности, возможно добавление схем замещения параллельно работающим двигателям в подсхемы секций, учет пофазной асимметрии параметров цепей и имитация других ситуаций, интересующих разработчиков электроприводов и специалистов по их эксплуатации.

Известно, что при анализе сложных объектов с большим количеством исходных параметров целесообразно использование относительных единиц. В данной работе эти единицы вводятся на основе применения основных базисных величин (табл. 2), определяемых паспортными данными двигателей СТД2 12500 мощностью 12,5 МВт с линейным напряжением

статора 10 кВ [5]. Производные базисные величины рассчитываются по известным физическим формулам через основные базисные величины, так, что все абсолютные значения параметров табл. 1, приведенные в схеме рис. 2, а также параметры двигателей переведены в относительные единицы и их исходные значения представлены в табл. 3.

Таблица 2

Базисные величины синхронного двигателя СТД2 12500

Базисная величина	Обозначение	Значение	Ед. изм	Примечание
Базисное напряжение цепей статора	U_B	8165	В	$\sqrt{2} \cdot U / \sqrt{3}$
Базисный ток цепей статора	I_B	1160	А	$\sqrt{2} \cdot I_{ном}$
Базисная частота	ω_B	314,1593	1/с	$2 \cdot \pi \cdot f_1$
Базисный угол поворота	θ_B	1	рад	1
Базисный электромагнитный момент	H_B	47599	Нм	С уточнением по результатам воспроизведения номинального режима
Базисное напряжение цепей ротора	U_{Bf}	19273	В	
Базисный ток цепей ротора	I_{Bf}	215	А	

Таблица 3

Параметры схем замещения синхронного двигателя и трансформатора в относительных единицах

Параметр	$l_d = l_q$	l_2	l_4	l_m	$l_{kp2.1}$	$l_{kp2.12}$	r_1	r_2	r_4	$r_{kp2.1}$	$r_{kp2.12}$
Значение	2,185	2,70	2,208	2,09	0,057	0,038	0,0049	0,0082	0,0065	0,0015	0,0005

На интервала одиночной работы М1 функционирует только одна левая секция вторичной обмотки (рис.2). При использовании преобразования Парка-Горева [4] для двухфазного представления синхронного двигателя уравнения состояния имеют вид

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dt} I_{p21} &= L_{hpLE1}^{-1} (E_{hLE1} - U_{chLE1} - R_{hLE1} I_{p21}), \\
 \frac{d}{dt} U_{c1} &= c_1^{-1} I_{c1}, \\
 \frac{d}{dt} \Psi_{dq1} &= E_{dq1} - \omega_{r1} B \Psi_{dq1} - r_1 I_{dq1}, \\
 \frac{d}{dt} \Psi_{f1} &= e_{f1} - r_{f1} i_{f1}, \\
 \frac{d}{dt} \omega_{r1} &= j_{pr1}^{-1} (h_{em1} - h_{c1}), \\
 \frac{d}{dt} \theta_{r1} &= \omega_1,
 \end{aligned} \tag{9}$$

где токи внешних цепей двигателя состоят из независимых токов первой секции вторичной обмотки и зависимых токов шин b_1 , связанных топологическим соотношением

$$I_{LE1} = \begin{bmatrix} I_{p21} \\ I_{b1} \end{bmatrix} = H'_{LE1} I_{p21}, \text{ где } H_{LE1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \tag{10}$$

ЭДС вращения двухфазной машины M_1 рассчитываются с использованием веществ-

венной матрицы B , ее преобразованные токи статора I_{dq1} и возбуждения i_{f1} вычисляются через потокосцепления Ψ_{dqf1}

$$B = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, I_{dqf1} = \begin{bmatrix} I_{dq1} \\ i_{f1} \end{bmatrix} = L_{dqf1}^{-1} \Psi_{dqf1}, L_{dqf1} = \begin{bmatrix} l_{m1} + l_{\sigma s1} & 0 & l_{m1} \\ 0 & l_{m1} + l_{\sigma s1} & 0 \\ l_{m1} & 0 & l_{m1} + l_{\sigma f1} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

где l_{m1} , $l_{\sigma s1}$, $l_{\sigma s1}$, $l_{\sigma f1}$, - индуктивности главного контура намагничивания М1 и контуров обмоток двухфазного статора и возбуждения, не относящихся к главному контуру.

Следует отметить, что при сложной взаимозависимости между индуктивностями контуров статора и ротора должно выполняться соотношение, определяющее наличие в них полей рассеяния согласно формулам (10.9) и (10.11) из [4]:

$$\mu_1 = \frac{3}{2} \frac{l_{m1}^2}{(l_{m1} + l_{\sigma s1})(l_{m1} + l_{\sigma f1})} < 1, \quad \sigma_1 = 1 - \mu_1, \quad (12)$$

где μ_1 – продольный коэффициент магнитной связи, а σ_1 – продольный коэффициент рассеяния системы контуров двигателя М1.

Непреобразованные токи фаз статора рассчитываются через токи двухфазной машины с использованием матрицы преобразования A_{dq1}

$$I_{s1} = H'_s A_{dq1}^{-1} I_{dq1}, \text{ где } H_s = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}, A_{dq1} = 2/\sqrt{3} \begin{bmatrix} \sin(\theta_{r1} + \pi/3) & \sin(\theta_{r1}) \\ \cos(\theta_{r1} + \pi/3) & \cos(\theta_{r1}) \end{bmatrix}, \quad (13)$$

Токи цепей связи и остальные зависимые переменные и матрицы, необходимые для определения правых частей уравнений состояния (9) вычисляются согласно топологии схемы по соотношениям

$$\begin{aligned} I_{x1} &= I_{b1} - I_{s1} - r_{x1}^{-1} U_{c1}, U_{chLE1} = H_{LE1} U_{c1}, E_{dq1} = A_{dq1} \begin{bmatrix} U_{c1.1} \\ U_{c1.2} \end{bmatrix}, \\ L_{hLE1} &= H_{LE1} L_{LE1} H'_{LE1}, R_{hLE1} = H_{LE1} R_{LE1} H'_{LE1}, \\ L_{LE1} &= \text{diag}[l_{kp} \ l_{kp} \ l_{kp} \ l_{b1} \ l_{b1} \ l_{b1}], R_{LE1} = \text{diag}[r_{kp} \ r_{kp} \ r_{kp} \ r_{b1} \ r_{b1} \ r_{b1}]. \end{aligned} \quad (14)$$

Электромагнитный момент двигателя рассчитывается по формуле

$$h_{em1} = l_{m1} i_{q1} i_{f1}, \quad (15)$$

j_{pr1} - момент инерции на валу ротора.

Наиболее актуальным случаем функционирования рассматриваемой схемы является параллельное функционирование двух двигателей, когда первый (M_1) работает в статическом нагрузочном режиме и в это время подается напряжение на статор второго двигателя (M_2), включенного в ту же либо в другую секцию вторичной обмотки трансформатора. Так возникает переходный процесс пуска M_2 , в котором из-за больших пусковых токов в схеме происходит подсадка напряжения на шинах двигателя M_1 .

На этом интервале происходит питание цепей обоих статоров, в связи с чем изменяется первое уравнение системы (9), а также добавляются уравнения, отображающие асинхронный пуск двигателя М2 с двумя контурами статора, двумя контурами ротора и уравнениями движения. Новая система уравнений состояния оказывается расширенной. Первое уравнение отображает наличие шести контуров, конфигурация которых зависит от типа схемы питания: от разных секций вторичной обмотки трансформатора, или от одной секции. Также дополнительно учитываются индуктивности l_{42} и сопротивления r_{42} пусковой обмотки, которые определяют соотношения между потокосцеплениями и токами двигателя M_2 , работающего в режиме асинхронного пуска, получается система уравнений

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} I_{hLE} &= L_{hLE}^{-1} (E_{hLE} - U_{chLE} - R_{hLE} I_{hLE}) , \\
\frac{d}{dt} U_{c1} &= c_1^{-1} I_{c1} , \\
\frac{d}{dt} U_{c2} &= c_2^{-1} I_{c2} , \\
\frac{d}{dt} \Psi_{dq1} &= E_{dq1} - \omega_{r1} B \Psi_{dq1} - r_1 I_{dq1} \\
\frac{d}{dt} \Psi_{f1} &= e_{f1} - r_{f1} i_{f1} , \\
\frac{d}{dt} \omega_{r1} &= j_{pr1}^{-1} (h_{em1} - h_{c1}) , \\
\frac{d}{dt} \theta_{r1} &= \omega_1 \\
\frac{d}{dt} \Psi_{dq2} &= E_{dq2} - \omega_1 B \Psi_{dq4.2} - r_{s2} I_{dq2} \\
\frac{d}{dt} \Psi_{42} &= -\beta_{r2} B \Psi_{4.2} - r_{42} I_{42} \\
\frac{d}{dt} \omega_{r2} &= j_{pr2}^{-1} (h_{em2} - h_{c2}) , \\
\frac{d}{dt} \theta_{r2} &= \omega_2 ,
\end{aligned} \tag{16}$$

где

$$I_{dqf42} = \begin{bmatrix} I_{dq2} \\ I_{dq4} \end{bmatrix} = L_{dq42}^{-1} \Psi_{dq42} , L_{dq42} = \begin{bmatrix} l_{m2} + l_{\sigma s2} & 0 & l_{m2} & 0 \\ 0 & l_{m2} + l_{\sigma s2} & 0 & l_{m2} \\ l_{m2} & 0 & l_{m2} + l_{\sigma 42} & 0 \\ 0 & l_{m2} & 0 & l_{m2} + l_{\sigma 42} \end{bmatrix} , \tag{17}$$

Электромагнитный момент второго двигателя М2, развиваемый под действием токов пусковой обмотки, вычисляется по формуле

$$h_{em2} = l_{m2} (i_{q2} i_{d42} - i_{d2} i_{q42}) . \tag{18}$$

На рис. 3 приведена расчетная диаграмма токов и напряжений статора двигателя М1 в статическом режиме при номинальном моменте сопротивления и коэффициенте мощности 0,99, полученная в среде МАТЛАБ-СИМУЛИНК [6]. Воспроизведение на основе (16) ряда режимов пуска двигателя М2 с разными вариантами параметров силовых элементов, возбуждения и управления возбуждением М1 показали, что уровень напряжения на статоре М1 спадает от 10,5 кВ ($E_p=1,05$) до 9 кВ ($E_p=0,9$), т.е. ниже границы статической устойчивости.

Это можно наблюдать и на экспериментальной осциллограмме (рис. 4). Тем самым подтверждается полученный на практике вывод о необходимости включения форсировки тока возбуждения, как только напряжение снизится до уровня 9,4 кВ ($E_p=0,94$). Вычислительные эксперименты показали, что нарастание напряжения питания возбуждения e_{r2} до уровня 1,6 E_p обеспечивает статическую устойчивость двигателя М1, работающего в режиме номинальной нагрузки.

Опыт эксплуатации возбудителей ВТЦ РЭ, разработанных ОАО НИПОМ, показал, что критической ситуацией в процессе запуска двигателей ГПА является процесс отключения форсировки при восстановлении уровня напряжения статора до 9600 В ($E_p=0,96$). Простое переключение уставки ЭДС возбуждения с максимальной до значения, вычисленного,

исходя из обеспечения заданного рабочего значения коэффициента мощности, может приводить при неблагоприятном сочетании факторов к нарушению статического режима.

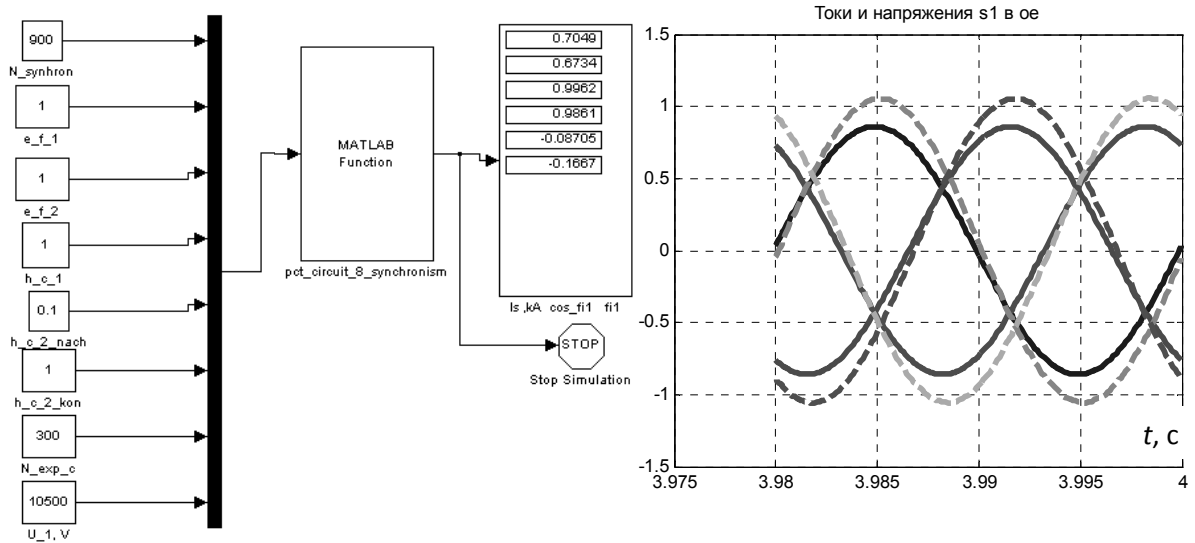


Рис. 3. Модель в среде МАТЛАБ-СИМУЛИНК и расчетная диаграмма мгновенных значений токов (—) и напряжений (- -) статора М1 в отн.ед. в рабочем статическом режиме

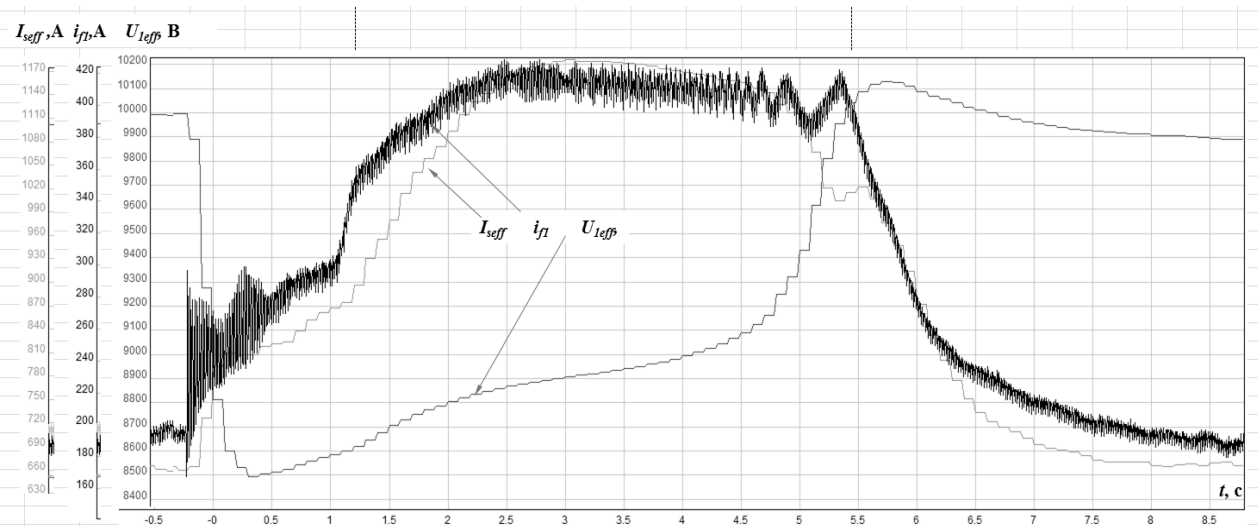


Рис. 4. Осциллограмма (021014 152817.nxg ГПА31) ОАО НИПОМ процесса запуска двигателя М₂ в одной секции с работающим двигателем М₁

На рис. 5 показаны расчетные осциллограммы процесса неудачного запуска двигателя М₂ параллельно с работающим двигателем М₁. Имитируется провал ЭДС возбуждения из-за перерегулирования системы автоматического регулирования. Детальное рассмотрение процесса показало, что энергия, передаваемая по каналу возбуждения, оказывается недостаточной для поддержания баланса мощности передаваемой статору, механической мощности на валу и мощности потерь. Недостаток начинает восполняться за счет кинетической энергии вращающегося ротора. Происходит замедление скорости вращения ротора двигателя М₁, и он выпадает из синхронизма.

При измененном алгоритме выхода из форсировки обеспечивается задержка на несколько секунд включения автоматического регулятора возбуждения, в результате чего ЭДС возбуждения спадает от форсировочного до рабочего значения с определенной интенсивностью и двигатель М₁ остается в синхронном режиме (рис. 6).

Вычислительные эксперименты с имитацией различных вариантов изменения момен-

тов сопротивления, напряжения питания, времени перехода двигателя M_2 в режим синхронизации показали высокую статическую устойчивость двигателя M_1 .

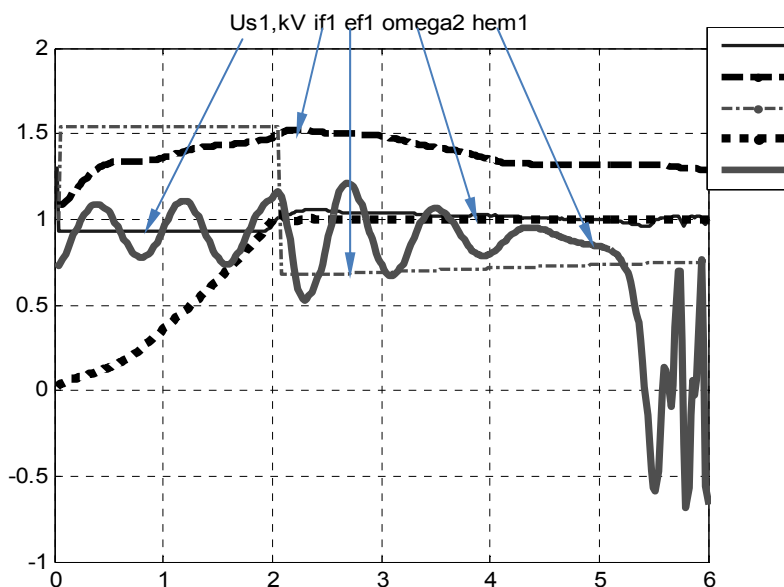


Рис. 5. Расчетная диаграмма процесса пуска двигателя M_2 , сопровождающегося опрокидыванием параллельно работающего двигателя M_1 при замедленном восстановлении ЭДС возбуждения после провала в процессе выхода из форсировки

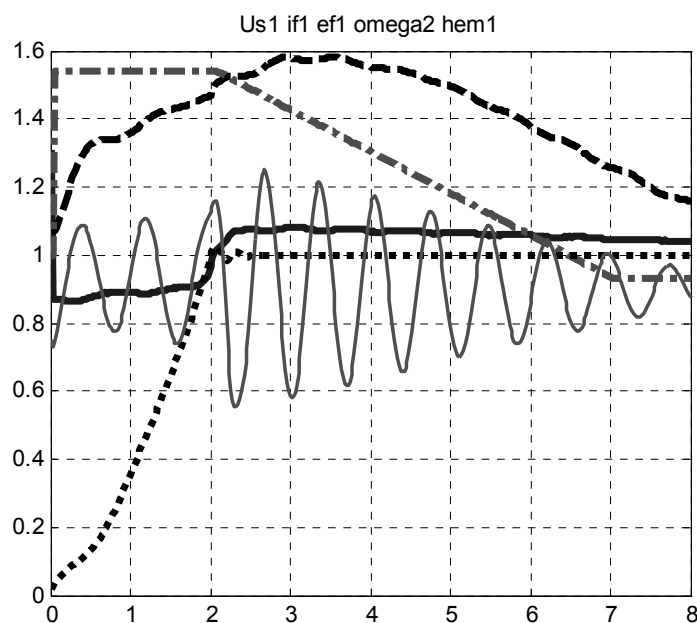


Рис. 6. Временная диаграмма моделирования процесса пуска двигателя M_2 , включенного в одну секцию вторичной обмотки трансформатора с двигателем M_1 при использовании измененного алгоритма отключения форсировки возбуждения

Выводы

Выполнен количественный анализ характерных статических и переходных режимов функционирования СТД2 12500 с тиристорным возбудителем ВТЦ-СД-Щ. Результаты согласуются с имеющимися паспортными данными и данными эксплуатации. Показана возможность применения разработанных моделей для исследования показателей работы привода в статических и пере-

ходных процессах. В том числе получены результаты исследования устойчивости электропривода компрессора при воздействии токов параллельно запускаемого двигателя. В частности:

1. Показано, что в схеме включения двигателей в разные секции вторичной обмотки трансформатора проявляется несущественное взаимовлияние двигателей.

2. Установлено, что при включении двигателей в одну секцию вторичной обмотки трансформатора при пуске двигателя М2 во многих случаях происходит выпадение из синхронизма двигателя М1, работающего в статическом режиме.

3. Доказано, что применение форсировки является эффективным средством обеспечения статической устойчивости двигателя М1. Однако, при резком выключении форсировки в отдельных случаях происходит выход из синхронизма двигателя М1.

4. Подтверждено, что применение измененного алгоритма форсировки, когда спадающие напряжения, подаваемого на обмотку возбуждения, от значения форсировки до значения, обеспечивающего требуемый коэффициент мощности, происходит с заданным темпом, в большинстве практических ситуаций предотвращает потерю статической устойчивости М1.

5. Сформировано представление о возможности включения математической модели в цифровую систему управления возбудителем с целью вычисления оптимального времени гашения и включения возбуждения с учетом параметров функционирования группы двигателей цеха.

Библиографический список

1. Типовые технические требования к газотурбинным ГПА и их системам. – М.: ВНИИГАЗ, 1997. – 68 с.
2. Справочник по газоснабжению и использованию газа / Н.Л. Стаскевич [и др.]. – Л.: Недра. 1990. – 762 с.
3. Трансформаторы трехфазные двухобмоточные масляные класса напряжением 220 и 330 кВ. ОАО «ЭЛЕКТРОЗАВОД». Документ завода-изготовителя: 107023, Москва, ул. Электrozаводская, 21. – 6 с.
4. Горев, А. А. Переходные процессы синхронной машины / А. А. Горев: – Л.-М.: ГЭИ, 1950. – 552 с.
5. Двигатели трехфазные асинхронные СТД. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Документ завода-изготовителя: Лысьва, ОВЖ. 412.041 ТО. – 70 с.
6. Дьяконов, В. П. MATLAB и SIMULINK для радиоинженеров / В.П. Дьяконов. – М: «ДМК-Пресс», 2011.

Дата поступления
в редакцию 31.10.2017

A.I. Baikov¹, A.L. Gherebtsov², A.G. Zaharov³, D.V. Kovalev³

THE APPLICATION OF MATHEMATICAL MODELING FOR ANALYSIS OF EFFECTIVENESS OF CONTROL OF THE EXCITER OF THE SYNCHRONOUS MOTOR GAS PUMPING UNIT

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev¹,
Limited Liability Company “Gazprom Transgaz Surgut”²,
Scientific and Technical Center NIPOM JSC³

Purpose: improvement of the system excitation control based on mathematical modelling of a part of the gas pumping station in Matlab Simulink.

Methods: mathematical description of the synchronous motor for different modes of operation based on a coordinate transformation of the Park-Gorev is obtained. An equivalent circuit of the high voltage transformer, which is identified according to the experience of the short circuit is developed. Artificial communication circuits, providing the resolution of the transformed and untransformed values of the currents through the common nodes of the subcircuits of stators and power supply are introduced.

Results: the drawdown of the supply voltage consistent with the experimental waveform is reproduced, resulting in the loss of synchronism of the engine, if necessary measures to boost their excitation currents are not taken.

Application: practical recommendations for the improvement of algorithms for digital control of the existing exciter-sare offered and the ways of their further development are validated.

Key words: mathematical modeling, synchronous motor, gas pumping, control of the excitation, Matlab, Simulink.

УДК 621.039

А.В. Безносков, П.А. Боков, Н.С. Волков, О.Р. Журавлева

КОНТРОЛЬ КОНЦЕНТРАЦИИ КИСЛОРОДА В СВИНЦОВОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ ЗА СЧЁТ ПАДАЮЩИХ СТРУЙ И КАПЕЛЬ НА ЕГО СВОБОДНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Предмет, тема, цель работы: В НГТУ проводятся теоретические и экспериментальные исследования, направленные на создание устройств контроля концентрации кислорода в свинцовом теплоносителе за счёт падающих струй и капель на его свободную поверхность.

Метод или методологию проведения работы: В целях создания экспериментального исследования макетного образца массообменного аппарата была разработана программа испытаний, направленная на определение разряжения, создаваемого газовым массообменным аппаратом, расхода эжектируемого газа, динамики раскисления теплоносителя в циркуляционном контуре с использованием массообменного аппарата и характеристик динамики увеличения содержания кислорода в свинцовом теплоносителе в циркуляционном контуре.

Результаты и область их применения: Рассматриваемый метод формирования двухкомпонентных газовых смесей в объеме свинец-висмутового теплоносителя использовался и используется на всех стендах с ТЖМТ, в которых имеются элементы, создающие струи ТЖМТ, падающие на его свободную поверхность.

Выводы: Метод показал себя достаточно эффективным и простым в эксплуатации и может рекомендоваться в комплексе с устройствами в ТЖМТ, реализующими другие методы, а также в виде единых комплексных систем обработки контуров с ТЖМТ двухкомпонентными потоками ТЖМТ – окислительная или восстановительная газовая смесь.

Ключевые слова: ТЖМТ, массообменник, эжекция, восстановительная газовая смесь, падающие струи, окислительная газовая смесь.

При создании установок и стендов со свинец-висмутовым теплоносителем, а также стендов и проектируемых реакторных установок со свинцовым теплоносителем в части технологии ТЖМТ всегда приходится решать две взаимно дополняющих задачи:

- 1 – очистка контуров и теплоносителя от его оксидов;
- 2 – контролирование регулирования содержания термодинамически активного кислорода в ТЖМТ для формирования и доформирования оксидных защитных покрытий на поверхностях конструкционных материалов контура, контактирующих с ТЖМТ.

Предлагалась и отработывалась значительное количество методов и устройств, направленных на решение указанной проблемы.

Специалистами НГТУ им. Р.Е. Алексеева было предложено использовать для ее решения энергию струй ТЖМТ, падающих на свободную поверхность теплоносителя. Сущность варианта устройства для очистки и регулирования содержания кислорода путем ввода водородосодержащих или кислородосодержащих газовых смесей в объем ТЖМТ за счет энергии падающих струй заключается в следующем.

В НГТУ проводились исследования по регулированию окислительного потенциала ТЖМТ с подачей в трассу эжектируемого газа смеси инертного газа с кислородом, водородом и их смесью, генерируемыми электролизом. При вводе кислородосодержащей смеси и смеси инертного газа с продуктами электролиза (кислородом и водородом) из полостей электролизера фиксировалось более эффективное увеличение термодинамической активности кислорода в эвтектике свинец-висмут, чем при подаче газа того же состава из баллона, вероятно, вследствие того, что кислород в смеси находился в ионизированном состоянии. Наличие водорода (продукта электролиза) в газовой смеси от электролизера практически не сказывалось на характере увеличения содержания кислорода в свинец-висмутовом теплоносителе.

В НГТУ им. Р.Е. Алексеева были предложены и исследовались метод и устройство ввода кислородосодержащих газовых смесей в так называемом газовом массообменнике.

Конструктивная схема газового массообменника представлена на рис. 1. В верхней части массообменника расположена цилиндрическая напорная камера со штуцером подвода ТЖМТ от главного циркуляционного или вспомогательного насоса. Нижняя часть напорной камеры ограничена перфорированной решеткой, отверстия в которой сообщают напорную камеру с камерой разрежения. Струи ТЖМТ, поступающие через отверстия в камеру разрежения, дробятся на отдельные капли и падают на свободный уровень ТЖМТ в камере разрежения устройства.

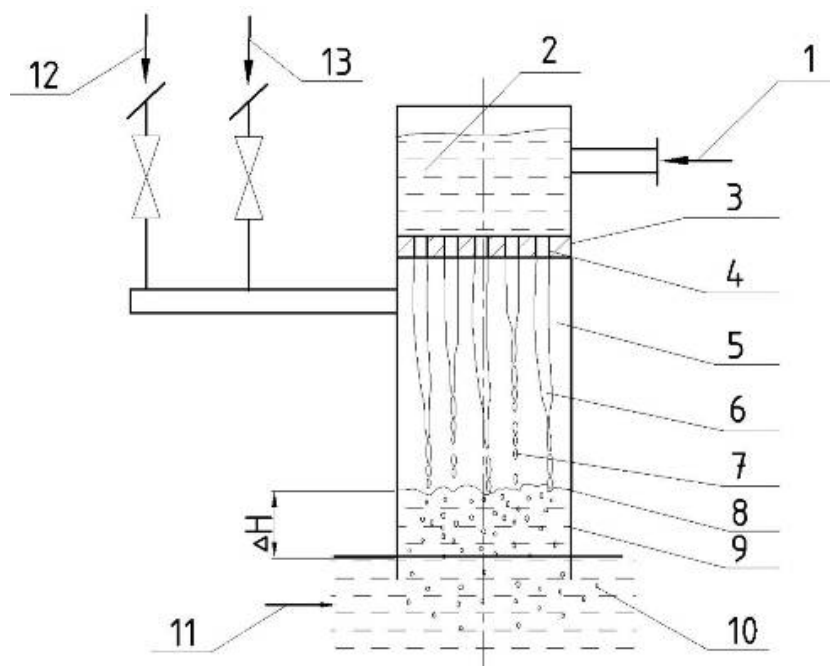


Рис. 1. Конструктивная схема газового массообменника:

1 – подача ТЖМТ; 2 – напорная камера; 3 – перфорированная решетка; 4 – отверстие истечения; 5 – камера разрежения; 6 – струя ТЖМТ; 7 – капли ТЖМТ; 8 – возможные положения свободного уровня ТЖМТ; 9 – цилиндрический корпус; 10 – газ, эжектируемый падающими каплями воды; 11 – поток ТЖМТ в контуре; 12 – газ из газового объема реакторного блока; 13 – газовые смеси из системы газа

При падении капли ТЖМТ захватывают газовые пузыри, размер которых определяется размерами падающих капель и их энергией (высотой падения). Расход эжектируемого газа зависит от указанных параметров и количества струй (расхода ТЖМТ через устройство). Образовавшийся двухкомпонентный поток ТЖМТ-газ захватывается потоком в том участке контура, в котором устанавливается газовый массообменник. При изменении свободного уровня ТЖМТ в контуре в месте установки устройства (ΔH), его характеристики изменяются незначительно. Преимуществами газового массообменника являются:

- возможность ввода и диспергизации как окислительной, так и восстановительной газовой фазы;
- возможность формировать поток с размерами пузырей малых размеров (сотни и десятки микрометров);
- возможность подачи газа в массообменник как из объема реакторного блока, так и из газовой системы;
- отсутствие вращающихся частей;
- возможность контроля и проверки работы устройства; простота конструкции.

Газовый массообменник не требует проходок через крышку и другие конструкции реакторного блока, кроме трубопровода газа, конструктивно прост, дешев, имеет малые массогабаритные показатели (в осушенном состоянии).

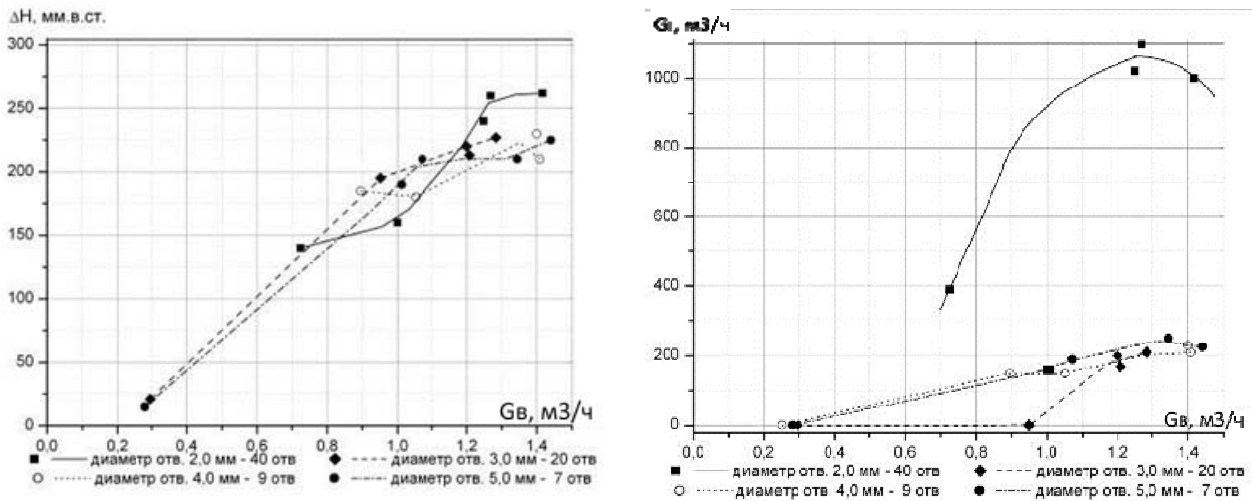


Рис. 2. Зависимости разрежения в газовой камере и расхода эжектируемого газа (воздуха) от расхода эжектирующей жидкости (воды) в макетном образце газового массообменника

На рис. 2 представлены экспериментально определенные зависимости расхода эжектируемого газа от расхода эжектирующей жидкости в макетном образце газового массообменника. Исследования проводились при сменных перфорированных решетках с отверстиями $\varnothing 2,0$ мм (40 отверстий), $\varnothing 3,0$ мм (20 отверстий), $\varnothing 4,0$ мм (9 отверстий), и $\varnothing 5,0$ мм (7 отверстий). Испытания показали, что при расходе эжектирующей среды ок. $1,0$ м³/ч расход эжектируемого газа составлял ок. $0,2$ м³/ч. Размер формируемых пузырей составлял 1–2 мм и менее. При этом же расходе жидкости в безрасходном по газу режиме разрежение в газовой камере массообменника составляло около 200 мм.в.ст.

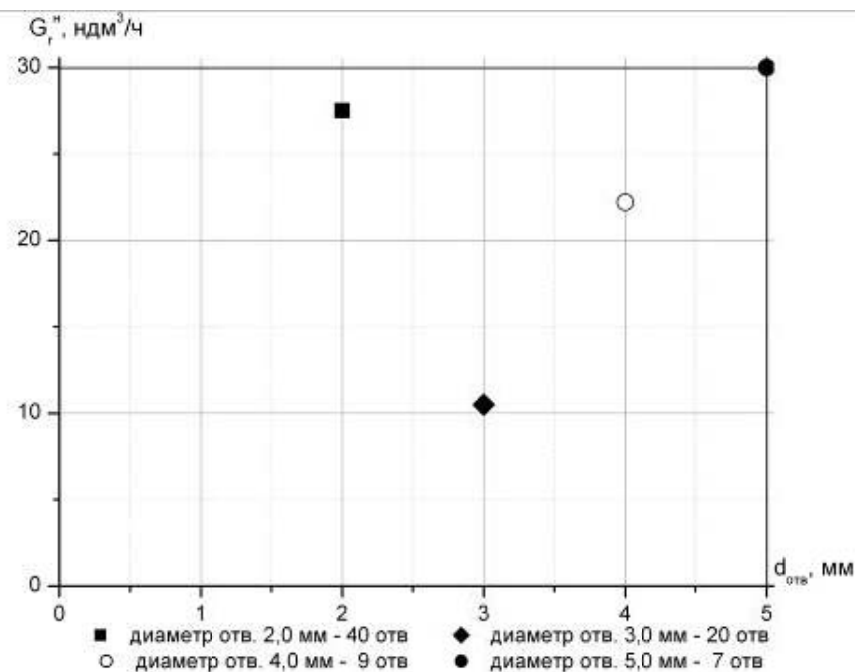


Рис. 3. Зависимость расхода эжектируемого газа (воздуха) одной струей от диаметра отверстий истечения при общем расходе воды ок. $1,3$ м³/ч

На рис. 3 представлена зависимость расхода эжектируемого газа в пересчете на одну струю ($G_{газ} \cdot n_{струи}$) от величины диаметра отверстий истечения при средней скорости жидкости в отверстии около 2,3 м/с.

Экспериментальные исследования макетного образца массообменного аппарата на стенде ФТ-3

Макетный образец газового массообменника на стенде ФТ-3 предназначен для регулирования содержания примеси кислорода в свинцовом (свинец-висмутовом) теплоносителе, циркулирующем в составе соответствующего высокотемпературного жидкометаллического контура.

Газовый массообменник (рис. 4) содержит электрообогреваемый стальной цилиндрический корпус внутренним диаметром 59 мм, высотой 665 мм с жидкометаллическим теплоносителем и вакуумной камерой в объеме которой падают струи жидкого металла, истекающие из сменной пластины с разным количеством отверстий и разными диаметрами отверстий, а так же приемная емкость внутренним диаметром 153 мм, высотой 350 мм, в которую стекает жидкий металл. Сменные пластины имеют отверстия истечения $\varnothing 2, 3, 4, 5$ мм (рис. 5).

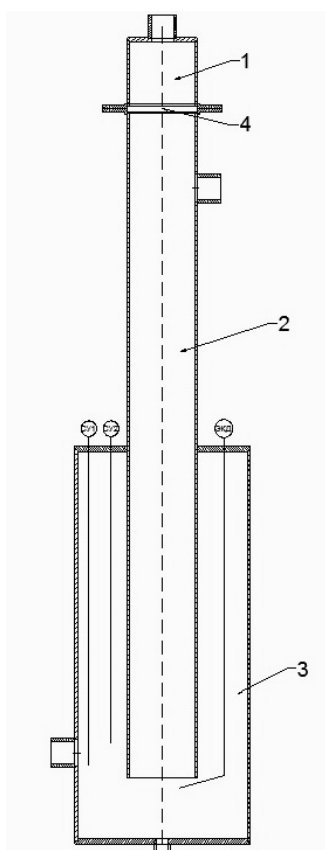


Рис. 4. Модель газового массообменника:

1 – напорная камера; 2 – вакуумная камера; 3 – приемная емкость; 4 – сменные пластины

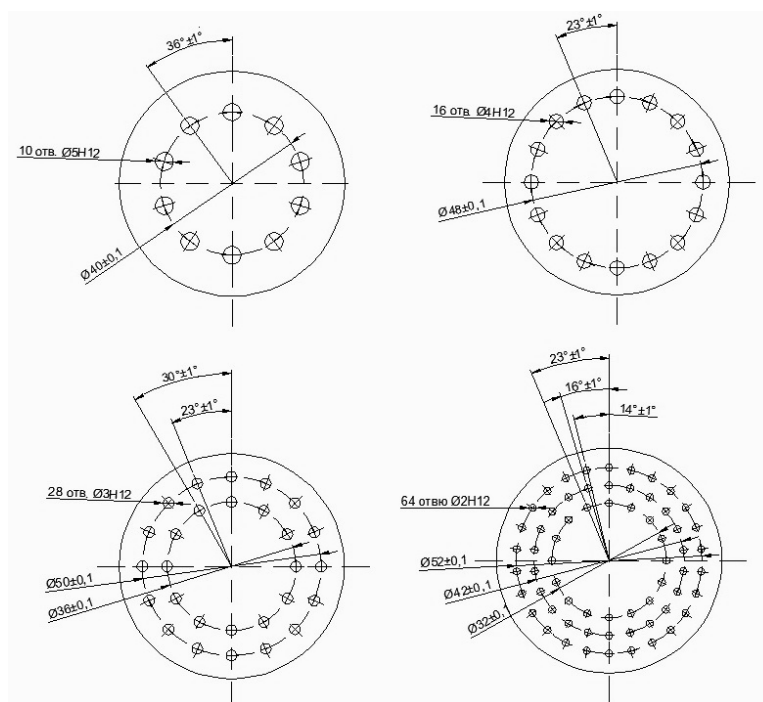


Рис. 5. Сменные пластины

С боку напорной камеры расположен штуцер с трубой $\varnothing 23,0$ мм для подвода газа в вакуумную камеру. В приемной емкости установлены электроконтактные сигнализаторы уровня с подвижным центральным электродом. К напорной камере подключен трубопровод подвода теплоносителя от напора циркуляционного насоса. К приемной емкости подключен трубопровод отвода теплоносителя от газового массообменника к емкости насоса (рис. 6).

Программа испытаний состояла в следующем.

Определение разряжения, создаваемого газовым массообменным аппаратом.

Целью испытаний является определение скорости изменения величины разряжения в газовой полости макетного образца массообменника в зависимости от расхода жидкого металла через массообменным аппаратом при варьируемой высоте падения струй жидкого металла на его свободную поверхность.

Сущность данного этапа испытания заключается в последовательном измерении давления в газовой полости макетного образца в базрасходном по газу режиме при последовательно варьируемых расходах и высотах падения его струй.

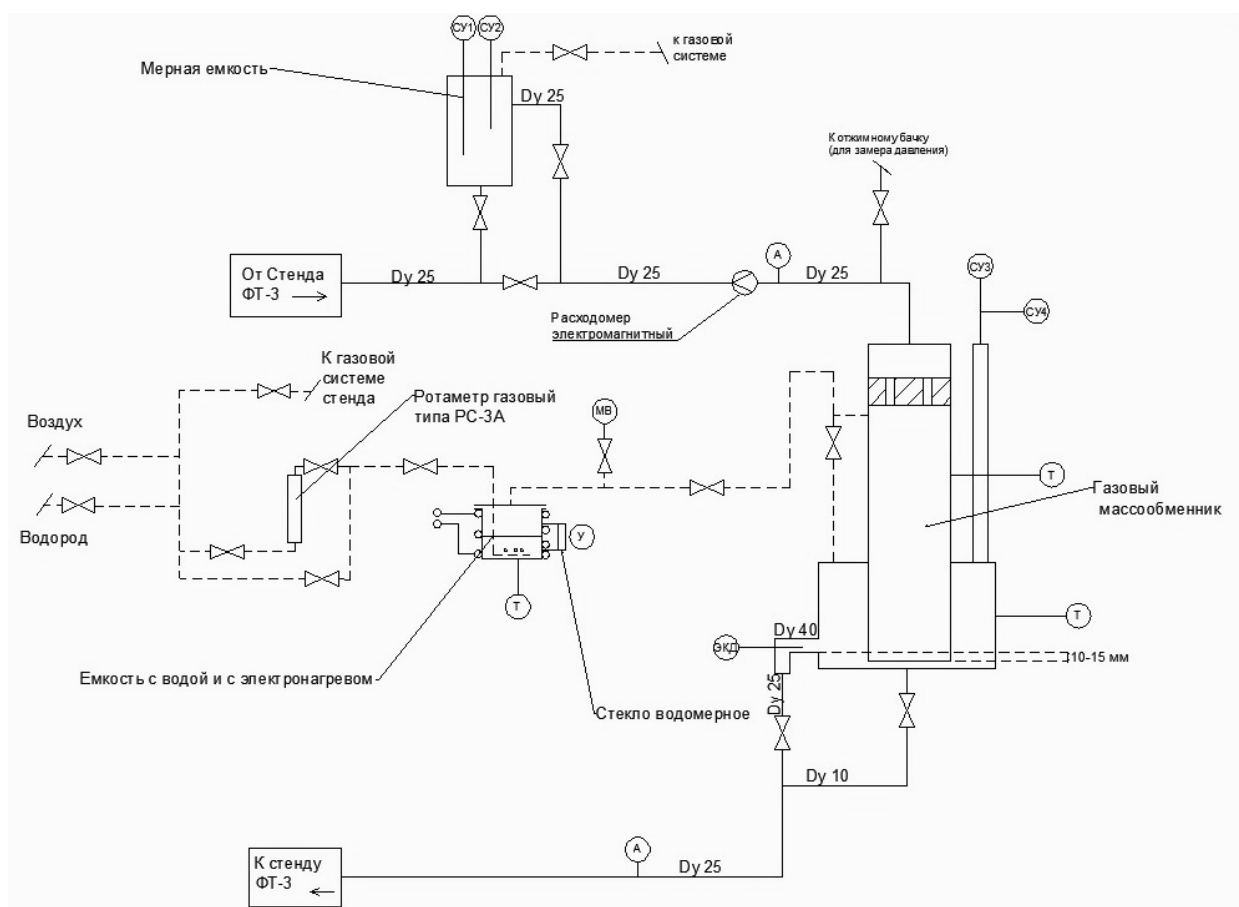


Рис. 6. Петля с экспериментальной моделью газового массообменника

Определение расхода эжектируемого газа

Целью испытаний, согласно настоящему этапу, является определение расхода газа (аргона, водорода) эжектируемого падающими струями жидкого металла в его макетном образце.

Сущность данного этапа испытаний заключается в последовательном измерении расхода аргона и водорода по газовому ротаметру при варьируемом измерении расхода теплоносителя через массообменный аппарат.

Определение динамики раскисления теплоносителя в циркуляционном контуре с использованием массообменного аппарата

При вводе восстановительной газовой смеси (аргон + водород) в объем теплоносителя происходит его раскисление – уменьшение содержания кислорода, в том числе и находящегося в виде шлаков – оксидов теплоносителя за счет химической реакции $PbO + H_2 \rightarrow Pb + H_2O$ с образованием водяного пара.

Сущность данного этапа испытаний заключается в вводе водородосодержащей газовой смеси в объем теплоносителя за счет ее эжекции падающими струями жидкого металла. Продуктом реакции является водяной пар, в последующем транспортируемый потоком газопаровой смеси в конденсатор пара, откуда конденсат периодически сливается в мерную емкость. Контроль за ходом процесса осуществляется по показаниям датчика содержания кислорода в жидком металле и количеству конденсата сливаемого из конденсатора пара, при варьируемом расходе теплоносителя через массообменный аппарат.

Определение характеристик динамики увеличения содержания кислорода в свинцовом теплоносителе в циркуляционном контуре

При вводе кислорода (в составе воздуха) в газовую систему далее в смеси с инертным газом в газовый объем макетного массообменника жидкий металл будет окисляться, в том числе, образуя оксиды теплоносителя. Реакция будет происходить на поверхности падающих струй и свободной поверхности жидкого металла и, возможно, в его объеме при эжекции пузырей кислородосодержащей газопаровой смеси в объем жидкого металла.

Сущность данного этапа испытаний заключается во вводе кислородосодержащей газовой смеси в газовый объем макетного образца массообменника при варьируемом расходе теплоносителя. Контроль за ходом процесса осуществляется по показаниям датчика содержания кислорода в жидком металле.

Этот метод отработывался и использовался в процессе испытаний и отработки макетов проточной части ГЦН РУ БРЕСТ-ОД-300 на стенде ФТ-4 НГТУ.

Следует отметить, что рассматриваемый метод формирования двухкомпонентных газовых смесей в объеме свинец-висмутового теплоносителя использовался и используется на всех стендах с ТЖМТ, в которых имеются элементы содержащие струи ТЖМТ, падающие на его свободную поверхность. Этот метод в неявном виде использовался в реакторных установках АПЛ пр.705 и стенде КМ-1.

Выводы

Метод показал себя достаточно эффективным и простым в эксплуатации и может рекомендоваться в комплексе с устройствами в ТЖМТ, реализующими другие методы, а также в виде единых комплексных систем обработки контуров с ТЖМТ двухкомпонентными потоками ТЖМТ – окислительная или восстановительная газовая смесь.

1. **Тошинский, Г.И.** А.И. Лейпунский и ядерные энергетические установки с жидкометаллическим теплоносителем свинец-висмут для атомных подводных лодок // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2003. – №4. – С. 13-18.

*Дата поступления
в редакцию 31.10.2017*

A.V. Beznosov, P. A. Bokov, N.S.Volkov, O.R. Zhuravleva

CONTROL OF OXYGEN CONCENTRATION IN A LEAD COOLANT DUE TO FALLING JETS AND DROPS ON ITS FREE SURFACE

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

Purpose: NNSTU conducts experimental and theoretical studies on the regulation of the oxidation potential of the HMLC with the injection of an inert gas mixture with oxygen, hydrogen and their mixture generated by electrolysis.

Design/methodology/approach: Specialists of the NNSTU offer gas mass transfer for the introduction of oxidizing or reducing gas mixtures into the lead or lead-bismuth coolant. The principle of the gas mass exchanger is based on the capture of gas jets on the surface of the liquid.

Findings: The method is efficient and easy to operate and can be recommended in conjunction with devices in HMLC that implement other methods, and also in the form of unified complex systems for processing contours with HMLC two-component streams HMLC - oxidizing or reducing gas mixture.

Research limitations/implications: The use of a mass exchanger will allow maintaining the quality of the coolant and does not require penetration through the lid and other structures of the reactor unit, except for the gas pipeline, which is structurally simple, cheap, and has small weight and size indicators (in drained state).

Originality/value: The proposed method for the formation of two-component gas mixtures in the volume of lead and lead-bismuth coolants can be used both at research facilities and at reactor facilities with HMLC.

Key words: HMLC, mass-exchange equipment, ejection, falling jet, oxidizing gas mixture, restoration gas mixture.

УДК 621.039

Т.А. Бокова, П.А. Боков, А.В. Безносков, А.В. Львов, Д.С. Рябов, А.С. Пегасина

**ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ПРИМЕСЕЙ
В СВИНЦОВОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ НА СТЕНДЕ ФТ-4 В НГТУ**

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева

Предмет, тема, цель работы: В НГТУ проводятся исследования, направленные на создание и отработку методов и средств поддержания качества теплоносителя для реакторных установок с ТЖМТ.

Метод или методологию проведения работы: Установка ФТ-4 имеет следующие подсистемы поддержания чистоты контура и регулирования содержания кислорода:

- с подключением к контуру теплоносителя газового массообменника;
- подсистема подачи водородо- и кислородосодержащих газовых смесей в поток теплоносителя в насосе через трубки Пито-Прандтля;
- подсистема подачи в газовый объем электронасоса вблизи трубы постоянного напора с использованием энергии изливающихся струй теплоносителя из трубы постоянного напора насоса стенда;
- подсистема «промывки» контура водородосодержащей смесью при сдренированном теплоносителе;
- штатная газовая система контура ТЖМТ с подачей водородосодержащей газовой смеси над уровень теплоносителя в циркуляционном контуре.

Результаты и область их применения: 1. Проведенные экспериментальные исследования по очистке циркуляционного контура с высокотемпературным свинцовым теплоносителем, позволили сделать вывод об эффективности применяемого метода регулирования термодинамической активности кислорода.

2. Особенность физико-химических характеристик ТЖМТ создают необходимость для поддержания нормального эксплуатационного состояния циркуляционного контура и теплоносителя производить операции по восстановлению оксидных покрытий.

Выводы: В результате выполнения программы экспериментальных исследований показана высокая эффективность описанной в данной статье системы очистки контура с ТЖМТ и регулирования содержания кислорода в свинцовом теплоносителе.

Ключевые слова: тяжелый жидкометаллический теплоноситель, экспериментальный контур, экспериментальные исследования, система регулирования, ввод в тяжёлый жидкометаллический теплоноситель, экспериментальная установка, водородосодержащая газовая смесь, кислородосодержащая газовая смесь/

В объеме контура РУ с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем (Pb, Pb-Bi), расположенного под его свободным уровнем, всегда имеются поверхности конструкционных материалов, как правило, сталей, находящихся в контакте с теплоносителем, на поверхности которых могут высаживаться примеси [1, 2]. В контуре всегда имеются примеси - элементы и соединения. Основными местами образования скопления примесей в РУ являются: свободные поверхности теплоносителя; объем теплоносителя; поверхности твэл активной зоны; поверхности трубок и стенок парогенератора. Дисперсные частицы примесей размерами от миллиметров до микрон и менее находятся в потоке циркулирующего ТЖМТ и в объеме застойных участков контура. В результате процессов сепарации частиц примесей, имеющих плотность меньше, чем плотность ТЖМТ примеси концентрируются на свободных поверхностях теплоносителя и в верхних застойных участках контура.

В результате процессов массообмена и массопереноса значительная часть дисперсных примесей выходит в пристенную область: конструкционный материал – теплоноситель. Теоретически и экспериментально доказано, что пристенный слой циркуляционного контура является фильтром - естественным стоком примесей, при несмачивании поверхности ТЖМТ. При изменении режимов работы контура (скоростей и температур потоков и др.) происходит массообмен дисперсными примесями между всеми участками контура.

Газовая система является неотъемлемой частью контура ТЖМТ. Из газового объема системы, содержащиеся в ней реагенты, поступают к границе раздела сред, взаимодействуя

как с теплоносителем, так и с находящимися на его поверхности примесями [3, 4]. В свою очередь, дисперсные частицы могут поступать в газовый объем системы при барботаже.

В процессе нормальной эксплуатации контура, при аварийных ситуациях, технологических обработках, ремонтах происходит непрерывный массообмен между этими группами [5]. Возможно также изменение физико-химического состояния примесей внутри каждой группы, вследствие химических реакций (окисления, восстановления и др.) процессов перекристаллизации примесей в отложениях на стенках контура, на свободных поверхностях (рис. 1).

Существенным отличием эксплуатации циркуляционных контуров с высокотемпературным свинцовым теплоносителем стендов (установок) от реакторных контуров является тот факт, что вследствие частых разгерметизации оборудования стендов согласно программам испытаний, операций ремонтных и профилактических работ, частой подпитки аргоном, содержащим примесь кислорода и др. в контурах стендов, как правило, накапливаются оксиды свинца в виде отложений шлаков на свободных уровнях, на стенках, в застойных зонах. Для поддержания нормального эксплуатационного состояния контура и теплоносителя в контурах стендов необходимо достаточно часто производить операции по восстановлению оксидов свинца аргоноводородной смесью или водородом.

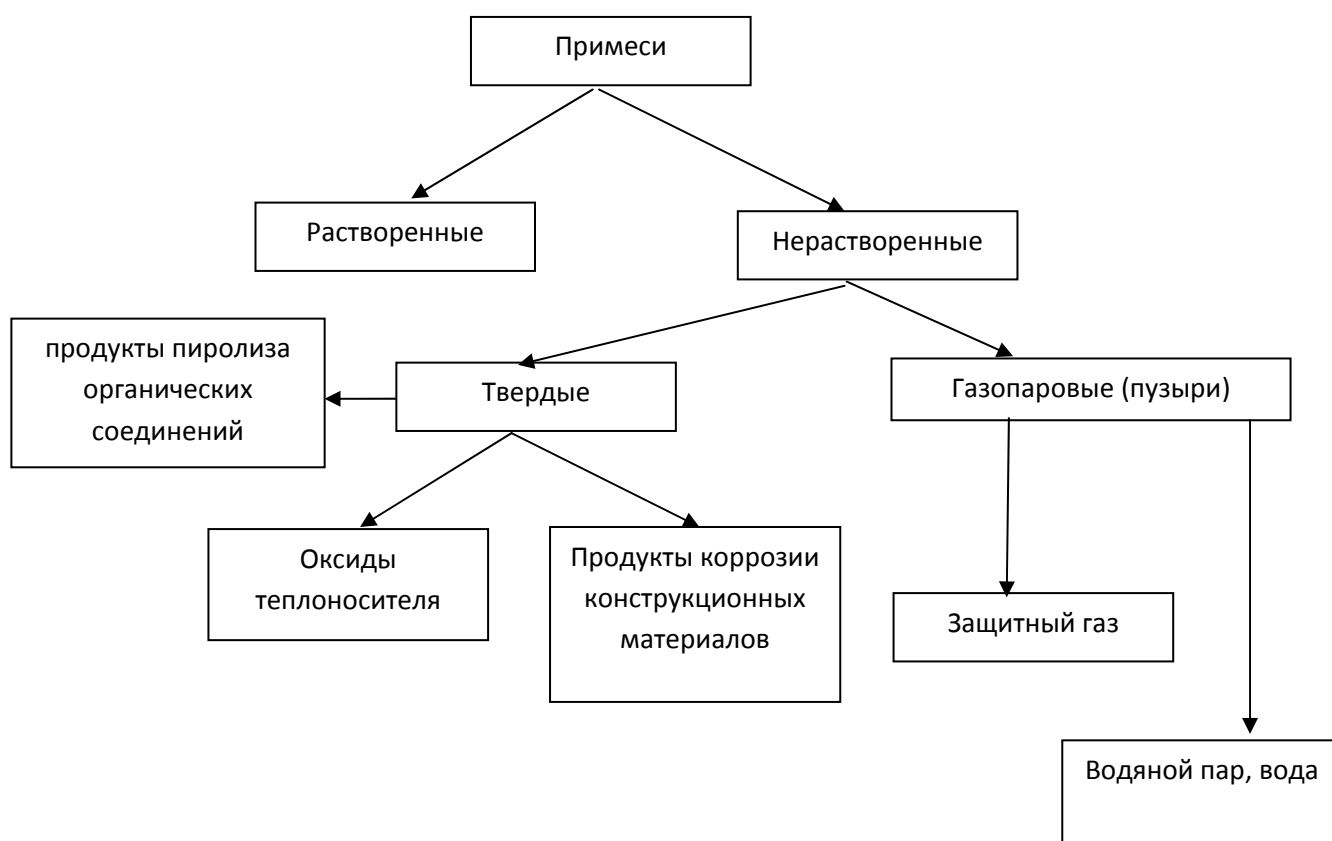


Рис. 1. Схема состояния примесей в контуре ТЖМТ

В реакторном контуре при отсутствии аварийного состояния «межконтурная неплотность ПГ» и отсутствии вскрытий объемов контура при ремонтах накопление оксидов свинца не прогнозируется. Наоборот, прогнозируется необходимость введения в теплоноситель и контур кислорода путем растворения твердой фазы оксидов свинца, введения газообразного кислорода в составе газовых смесей или др.

В процессе эксплуатации стенд ФТ-4 (рис. 2) имеет несколько мест, накапливающих большое количество оксидов теплоносителя или шлаков, требующих меры по восстановлению. При проведении эндоскопических осмотров было выявлено, что теплообменник является одним из таких «накопителей» шлаков.

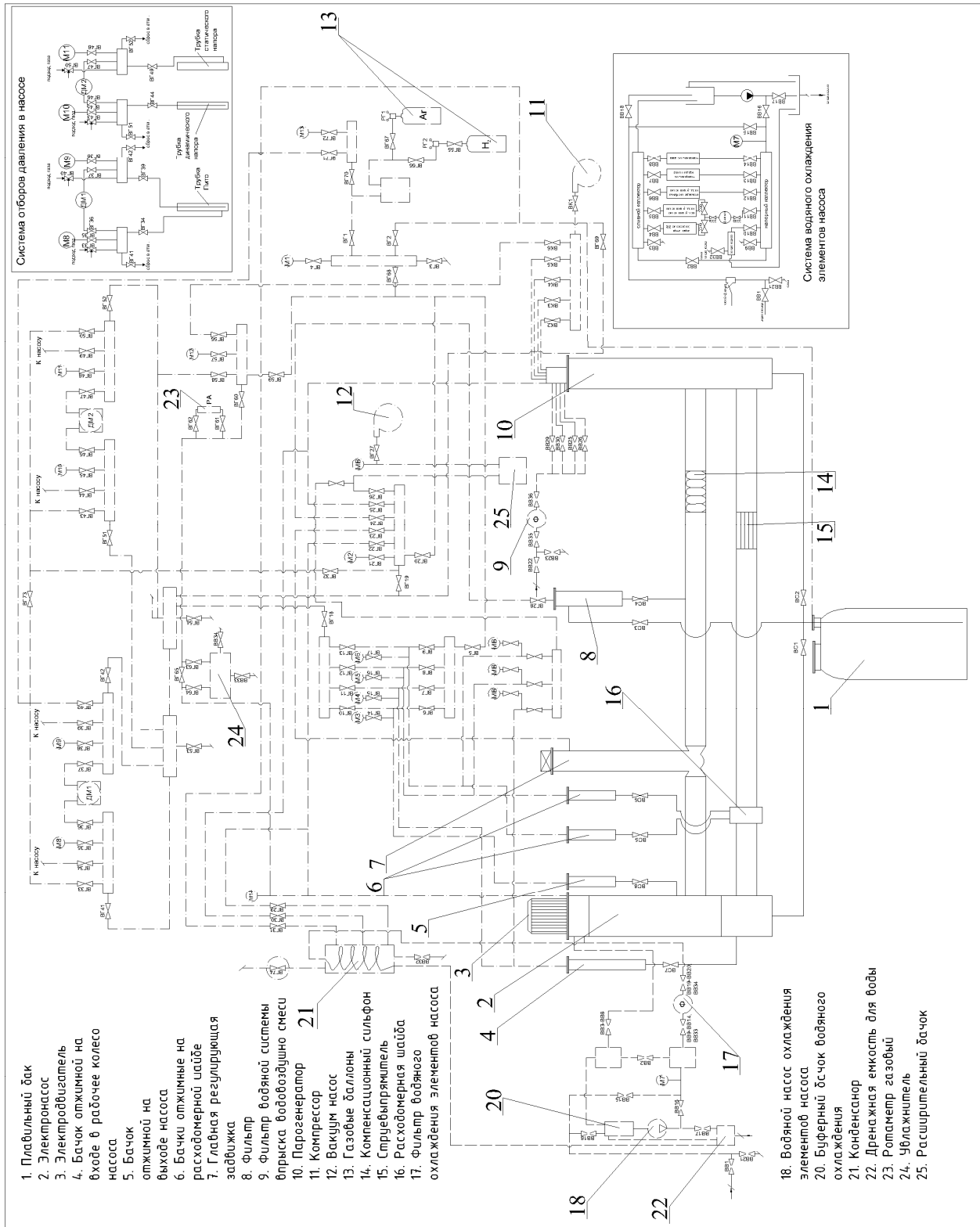


Рис. 2. Принципиальная схема стенда ФТ-4 НГТУ

Проведение процесса очистки теплоносителя и контура от шлаков путем введения в теплоноситель газообразного водорода, избавляет от присутствия таких отложений. Для определения количества кислорода в контуре ФТ-4 при его эксплуатации, проводится постоянный контроль его содержания в теплоносителе путём измерения термодинамической активности кислорода датчиками термодинамической активности кислорода.

В циркуляционном контуре стенда ФТ-4 в НГТУ предусматривается установка не менее двух датчиков термодинамической активности кислорода в свинцовом теплоносителе (поставки ГНЦ РФ ФЭИ), на линии от электронасоса до теплообменника.

В стенде ФТ-4 НГТУ применен газофазный метод регулирования термодинамически активного кислорода в ТЖМТ, рекомендованный ОКБМ, ОКБ ГП и ФЭИ для обеспечения эксплуатации всех реакторных установок серийных АПЛ проектов 705, 705К и стенда КМ-1.

В том случае, если в теплоносителе и в контуре содержание кислорода увеличивается сверх установленных норм, то в контур подается газообразная водородосодержащая смесь (или водород) до тех пор, пока кислород в теплоносителе не вернется в установленную норму, после чего подача газа-восстановителя прекращается.

В том случае, если в теплоносителе содержание кислорода уменьшается ниже установленных норм, то в контур подается газообразная кислородосодержащая смесь до тех пор, пока кислород в теплоносителе не вернется в установленную норму, после чего подача газа – окислителя прекращается.

Установка ФТ-4 имеет следующие подсистемы поддержания чистоты контура и регулирования содержания кислорода в нем:

- с подключением к контуру теплоносителя т.н. газового массообменника – устройства насыщающего газообразным водородом или кислородосодержащими смесями циркулирующий через него свинцовый теплоноситель за счет энергии струй, падающих из трубы постоянного напора в насосе на свободный уровень свинца и захватывающих газовые пузырьки в мелкодисперсной фазе (десятки и сотни микрометров) в объем теплоносителя;
- подсистема подачи водородо- и кислородосодержащих газовых смесей в поток теплоносителя в насосе через трубки Пито-Прандтля;
- подсистема подачи в газовый объем электронасоса вблизи трубы постоянного напора кислородосодержащих или водородосодержащих газовых смесей для регулирования содержания вводимого кислорода в свинец и очистки контура водородом от оксидов с использованием энергии изливающихся струй теплоносителя из трубы постоянного напора насоса стенда;
- подсистема «промывки» контура водородосодержащей смесью при сдrenированном теплоносителе;
- штатная газовая система контура ТЖМТ с подачей водородосодержащей газовой смеси над уровень теплоносителя в циркуляционном контуре.

Возможны другие способы регулирования содержания кислорода в теплоносителе на стенде ФТ-4 (установка твердотельного массообменника и др.).

Для условий рассматриваемого стенда вариант с подачей в газовый объем электронасоса вблизи трубы постоянного напора соответствующих газовых смесей является наиболее предпочтительным (рис. 3).

Эффективность «срабатывания» водорода из газовой смеси представлена на рис. 4. Работы по очистке контура от примесей оксидов теплоносителя заполнением контура водородосодержащей смесью газа при сдrenированном теплоносителе проводились в течении трех суток при температуре контура 450°С. В контур было подано около 200 г водорода и получено примерно 200 мл воды в конденсаторах.

Эффективность срабатывания водорода путём подачи водородосодержащей газовой смеси над уровнем теплоносителя в циркуляционном контуре представлена на рис. 5. Работы проводились в течении трех суток при температуре контура 430±10°С, скорость вращения вала насоса 800 об/мин, давление в контуре поддерживалось 0,1-0,3 кгс/см²(ати). В контур было подано примерно 250 г. водорода и получено около 800 мл воды в конденсаторах.

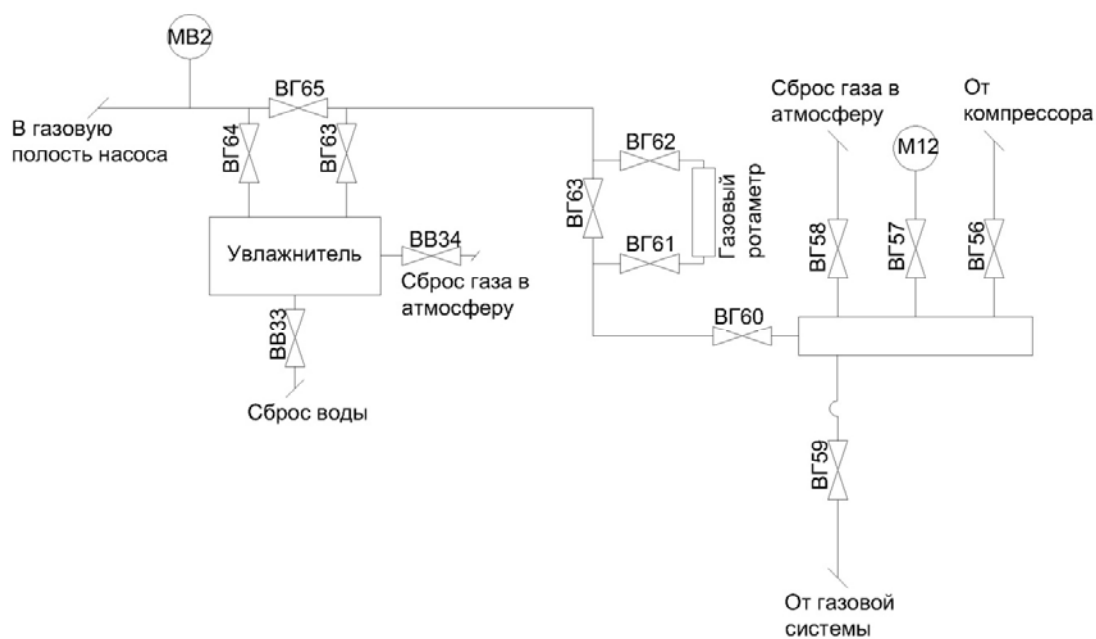


Рис. 3. Участок схемы газовой системы для подачи газа с увлажнителем

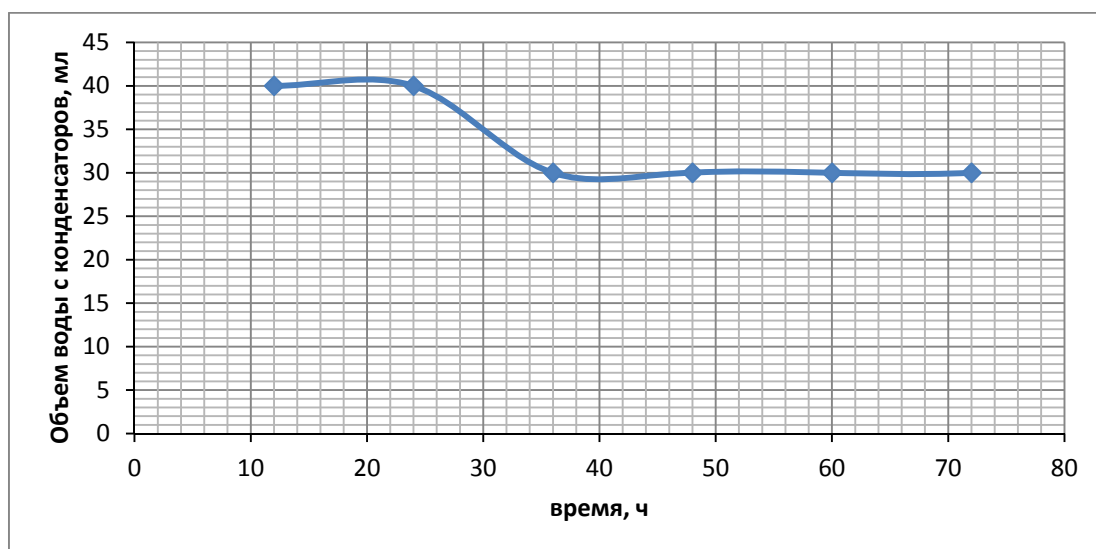


Рис. 4 Эффективность срабатывания водорода в течении «сухой» водородной регенерации

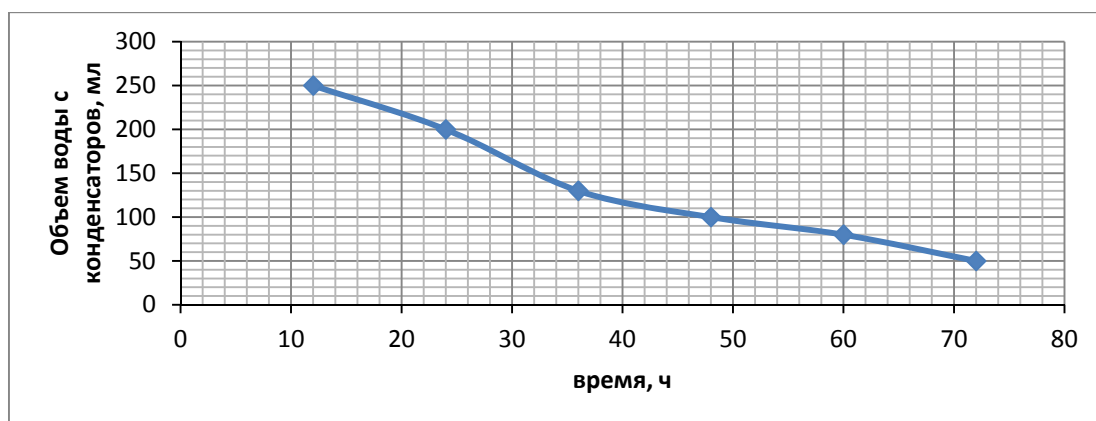


Рис. 5 Эффективность срабатывания водорода в течении водородной регенерации с циркуляцией теплоносителя

Продолжительный (более трех лет) опыт эксплуатации стенда ФТ-4 НГТУ в режимах испытаний и отработки моделей рабочих колес и выправляющих аппаратов конструкции и поставки ЦКБМ, а также других режимов, показал высокую эффективность имеющейся на стенде штатной системы очистки контура ТЖМТ от оксидов теплоносителя и регулирования содержания кислорода в свинцовом теплоносителе, необходимом для формирования и доформирования оксидных покрытий на поверхностях конструкционных материалов контура с ТЖМТ.

Библиографический список

1. Опыт эксплуатации ЯЭУ с жидкометаллическим теплоносителем на стенде КМ-1 / Б.В. Филатов [и др.] // Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях. ТЖМТ-98: тез. докл. конф. - ГНЦ РФ ФЭИ. Обнинск, 1998.
2. Исследование процессов массопереноса свинца в газовом контуре применительно к реакторному контуру БРЕСТ-ОД-300 : отчет по НИР (промежуточный) : Нижегород. гос. техн. ун-т (НГТУ) ; рук. Безносков А.В.; исполн.: В.А. Кирьянов [и др.]. – Н.Новгород, 1999. – 132 с. – № ГР 0194002164– Инв.№. 02.20.00.04123.
3. **Безносков, А.В.** К вопросу о массопереносе паров свинцового теплоносителя в реакторе БРЕСТ-ОД-300 / А.В. Безносков, В.А.Кирьянов, Н.Е. Фисейский // Атомная энергия ». – 2001. – Т. 90. – Вып. 1. – С. 12-17.
4. Исследование процессов массопереноса примесей-продуктов коррозии конструкционных материалов в реакторном контуре БРЕСТ-ОД-300. Регламент применения устройств очистки : отчет по НИР (промежуточный) : Нижегород. гос. техн. ун-т (НГТУ) ; рук. Безносков А.В.; исполн.: В.А. Кирьянов [и др.]. – Н.Новгород, 1999. – 68 с. - № ГР 0194002164, Инв.№ 02.20.00.04459.
5. Проблема технологии тяжелых жидкометаллических теплоносителей (свинец-висмут, свинец) / Б.Ф.Громов, Ю.И.Орлов, П.Н.Мартынов, В.А. Гулевский // Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях. ТЖМТ-98: тез. докл. конф. - ГНЦ РФ ФЭИ Обнинск, 1998.

*Дата поступления
в редакцию 22.11.2017*

T.A. Bokova, P.A. Bokov, A.V. Beznosov, A.V. Lvov, D.S. Ryabov, A.S. Pegasina

CHARACTERISTICS OF SYSTEM OF REGULATION OF CONTENT OF IMPURITY IN THE LEAD HEAT CARRIER AT THE FT-4 STAND IN NGTU

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

Purpose: NSTU conducts experimental studies to create a technique for the formation and shaping of oxide coatings on the surfaces of structural materials of the experimental plant circuit and a reactor plant with a heavy liquid-metal coolant.

Design/methodology/approach: Specialists of NSTU have created systems and subsystems for maintaining the purity of the circuit and regulating the oxygen content for the experimental installation of FT-4:

- with connection to the coolant circuit of the gas mass exchanger;
- subsystem of supplying hydrogen and oxygen-containing gas mixtures to the coolant flow in the pump through Pitot-Prandtl tubes;
- subsystem of the electric pump supply to the gas volume with the use of the energy of the incident coolant jets from the pump pipe of the experimental installation;
- subsystem of contour processing with a hydrogen-containing mixture in the absence of a coolant;
- a regular gas system of the HLMS circuit with the supply of a hydrogen-containing gas mixture above the coolant level in the circulation circuit.

Findings: As a result of experimental studies, the high efficiency of the described system for cleaning the circuit and regulating the oxygen content in the lead coolant is shown.

Research limitations/implications: The presented systems and subsystems for maintaining the purity of the circuit and controlling the oxygen content are recommended for installation in research circuits and reactor facilities with HLMS.

Originality/value: NSTU specialists for the first time proposed systems and subsystems for maintaining the purity of the circuit and regulating the oxygen content for a unique experimental installation of FT-4.

Key words: heavy liquid-metal coolants, experimental contour, experimental study, system of regulation, impurities in a heavy liquid-metal coolant, experimental installation, hydrogen containing gas mixture, oxygen-containing gas mixture.

УДК 621.039

С.М. Дмитриев, Д.В. Доронков, М.А. Легчанов, В.Д. Сорокин, А.Е. Хробостов

**ОСОБЕННОСТИ КОНВЕКТИВНЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ
ЗА ПЕРЕМЕШИВАЮЩИМИ ДИСТАНЦИОНИРУЮЩИМИ РЕШЕТКАМИ
ТВС-КВАДРАТ РЕАКТОРА PWR**

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния перемешивающих дистанционирующих решеток с различными типами дефлекторов на течение теплоносителя в ТВС–Квадрат реактора PWR. Исследования проводились на аэродинамическом стенде с применением многоканального пневмометрического зонда. Анализ пространственного распределения проекций абсолютной скорости потока позволил детализировать картину течения теплоносителя за перемешивающей дистанционирующей решеткой с различными типами дефлекторов перемешивающих решеток. Полученные результаты работы используются для верификации трехмерных CFD-программ и в прикладных поячейковых кодах, а также являются базой данных при расчетах теплотехнической надежности активных зон реакторов PWR с ТВС-Квадрат.

Ключевые слова: ядерный реактор, активная зона, тепловыделяющая сборка, перемешивающая дистанционирующая решетка, гидродинамика теплоносителя.

В АО «ОКБМ Африкантов» разработана конструкция ТВС–КВАДРАТ для активной зоны реакторов PWR, конкурентоспособная с зарубежными аналогами по надежности, безопасности, экономичности и технологичности. В частности, в ТВС-КВАДРАТ использованы апробированные и зарекомендовавшие себя в ТВС для реакторов ВВЭР конструкторские решения [1].

Одним из таких решений является применение оригинальных перемешивающих дистанционирующих решеток (ПДР), предназначенных для интенсификации процессов тепло- и массопереноса в активной зоне реактора PWR. Особое внимание следует уделить конструкции ПДР: геометрии и расположению дефлекторов, а также выбору угла отгиба их относительно осевого направления движения потока теплоносителя. Следовательно, варианты исполнения перемешивающих решеток для ТВС-КВАДРАТ требуют поиска оптимального конструктивного решения с точки зрения таких показателей, как эффективность перемешивания потока, гидравлические потери и запас до кризиса теплоотдачи.

Обоснование теплотехнической надежности активной зоны ядерного реактора во многом базируется на теплогидравлическом расчете, что в свою очередь обязывает к большой информативности и высокой достоверности значений локальных гидродинамических характеристик потока теплоносителя [2]. Для решения данной научно-технической задачи необходимо исследовать условия течения теплоносителя и выявить закономерности формирования потока в характерных ячейках ТВС. Поэтому исследования распределения гидродинамических характеристик потока в характерных областях ТВС-КВАДРАТ за различными типами перемешивающих дистанционирующих решеток является актуальной задачей, решение которой необходимо при обосновании теплотехническую надежность активной зоны реактора PWR.

Экспериментальный стенд

Для изучения особенностей течения потока теплоносителя в ЯЭУ в НГТУ им. П. Е. Алексеева функционирует аэродинамический экспериментальный стенд, представляющий собой разомкнутый контур, через который прокачивается воздух. В состав стенда входят: вентилятор высокого давления, ресиверная емкость, экспериментальная модель (ЭМ), расходомерное устройство, измерительный комплекс [3].

Принцип работы стенда заключается в том, что воздух посредством вентилятора высокого давления нагнетается в ресиверную емкость, далее проходит успокоительный участок, ЭМ и выбрасывается в атмосферу. Таким образом, на стенде моделируются гидродинамические условия течения потока теплоносителя.

Исследования локальной гидродинамики в ТВС-Квадрат реактора PWR проводились на 49-стержневой модели фрагмента ТВС-КВАДРАТ, выполненной в полном подобии натурной ТВС-КВАДРАТ с коэффициентом геометрического подобия $K_g=4,2$. Модель имеет длину 3 м и состоит из квадратного чехла, цилиндрических твэл-имитаторов с описанным диаметром $d=40$ мм и исследуемых поясов ПДР.

Пояса ПДР состоят из взаимно перпендикулярных рядов пластин и восьмигранных ячеек, выполняющих функцию дистанционирования твэлов. Верхние кромки пластин в местах их пересечения снабжены дефлекторами различного конструктивного исполнения. Рассматривались четыре варианта дефлекторов:

1) дефлектор типа «прямой гиб» (рис. 1, *а*). Первоначальный вариант дефлектора с углом отгиба 25° и параллельной линиейгиба относительно верхней кромки пластины;

2) дефлектор типа «косой гиб» (рис. 1, *б*). Усовершенствованный дефлектор типа «прямой гиб» увеличенной площадью на 8% по отношению к первоначальному варианту и профилем, повернутым к центру ячейки согласно линиигиба в 15° относительно верхней кромки пластины;

3) дефлектор типа «обратный гиб» (рис. 1, *в*). Усовершенствованный дефлектор типа «прямой гиб» увеличенной площадью на 21% по отношению к первоначальному варианту и профилем, повернутым к твэлу согласно линиигиба в 15° относительно верхней кромки пластины;

4) дефлектор «увеличенной площади» (рис. 1, *г*). Усовершенствованный дефлектор типа «прямой гиб» увеличенной площадью на 28% по отношению к первоначальному варианту и профилем, повернутым к центру ячейки согласно линиигиба в 15° относительно верхней кромки пластины.

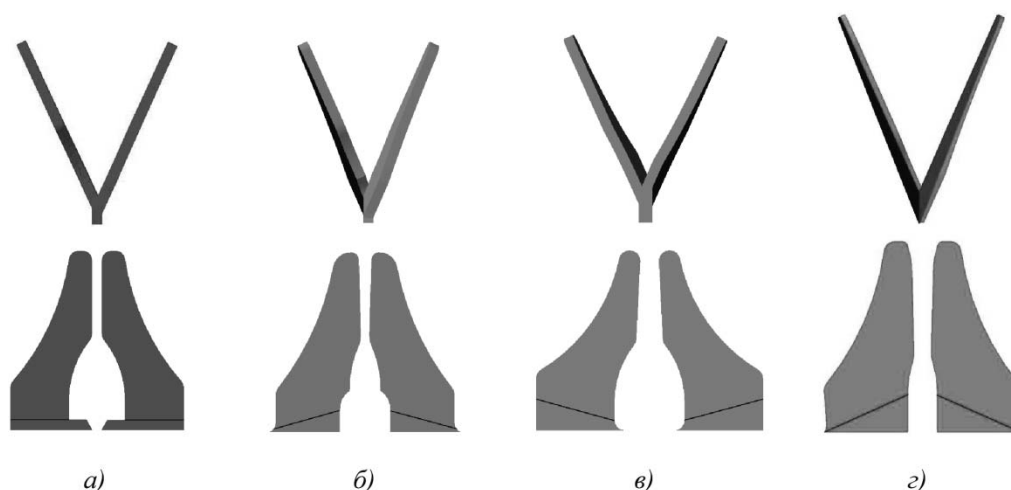


Рис. 1. Исследуемые типы дефлекторов на ПДР ТВС-КВАДРАТ:

а – дефлектор типа «прямой гиб»; *б* – дефлектор типа «косой гиб»;
в – дефлектор типа «обратный гиб»; *г* – дефлектор «увеличенной площади»

Измерительный комплекс

В состав измерительного комплекса входят пятиканальный пневмометрический зонд, блок аналоговых преобразователей давления, координатное устройство, базовый блок коммутации/измерения, ЭВМ с соответствующим программным обеспечением [4].

Измерение направления и величины скорости, а также давления в пространственном потоке осуществлялось пневмометрическим зондом, представляющий собой пять стальных

капилляров, расположенных в двух перпендикулярных друг к другу диаметральных плоскостях, срезанные под углом 30° . Пневмометрический зонд сконструирован таким образом, что он практически не вносит возмущения в поток и не искажает направление течения теплоносителя. Это условие обеспечивается за счет того, что поперечное сечение зонда не затесняет проходное сечение ячейки ЭМ более чем 5%. Предельные отклонения проекций абсолютной скорости на оси X , Y , Z не превышают 7,5% от абсолютной скорости. Снятие показаний с зонда осуществлялось с помощью блока аналоговых преобразователей давления. Предел допускаемой основной погрешности данных приборов составляет $\pm 0,25\%$.

Обоснование представительности экспериментальных исследований

Важным этапом проведения любого экспериментального исследования является подтверждение его представительности. В активной зоне реактора PWR число Рейнольдса соответствует $Re = 4,5 \cdot 10^5$, что труднодостижимо в лабораторных условиях. Но поскольку течение воды высокого давления моделируется воздухом, то на основе теории гидродинамического подобия можно утверждать, что в области автомодельности профиль относительной скорости остается неизменным. Поэтому при изучении гидродинамики потока на моделях ТВС-КВАДРАТ в зоне автомодельности полученные результаты экспериментов могут быть перенесены на штатные условия течения теплоносителя в активной зоне реакторов PWR. Таким образом, для обоснования представительности исследований на стенде проведены эксперименты по определению участка нижней границы зоны автомодельного течения [5, 6].

С целью нахождения нижней границе зоны автомодельности на стенде проведены исследования в диапазоне чисел $Re = 2 \cdot 10^4 \div 1 \cdot 10^5$, которые заключались в построении эмпирической зависимости коэффициента сопротивления трения исследованного участка от числа Рейнольдса. Полученный массив точек аппроксимировался двумя линейными зависимостями: в переходной области турбулентного течения и в области автомодельного течения. Точка пересечения этих прямых является нижней границей области автомодельного течения по числу Рейнольдса. Согласно полученным результатам область автомодельного течения в ЭМ начинается с чисел $Re = 7 \cdot 10^4$.

Также необходимым условием обоснования представительности исследований является равенство коэффициентов гидравлического сопротивления (КГС) штатных ПДР и ПДР модели. Анализ результатов показал, что КГС перемешивающих дистанционирующих решеток экспериментальной модели в области автомодельного течения соответствуют КГС штатных перемешивающих дистанционирующих решеток. Результаты исследований КГС перемешивающих дистанционирующих решеток модели сведены в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты гидравлического сопротивления поясов ПДР ТВС-КВАДРАТ

Тип решетки и дефлектора	КГС решетки
ПДР с дефлектором типа «прямой гиб»	0,95
ПДР с дефлектором типа «косой гиб»	1,01
ПДР с дефлектором типа «обратный гиб»	1,03
ПДР с дефлектором «увеличенной площади»	1,07

Методика проведения исследований

Экспериментальные исследования локальных гидродинамических характеристик потока теплоносителя за ПДР заключались в измерении модуля и направления вектора скорости в исследуемой точке пучка стержней модели. В качестве характерных ячеек для определения влияния различных типов дефлекторов ПДР на течение потока теплоносителя была выбрана одна регулярная ячейка (рис. 2). Для получения полной пространственной картины течения теплоносителя за дефлекторами ПДР ячейки были разделены на зоны измерения, в каждой из которых вектор скорости определялся для 11 сечений по длине модели.

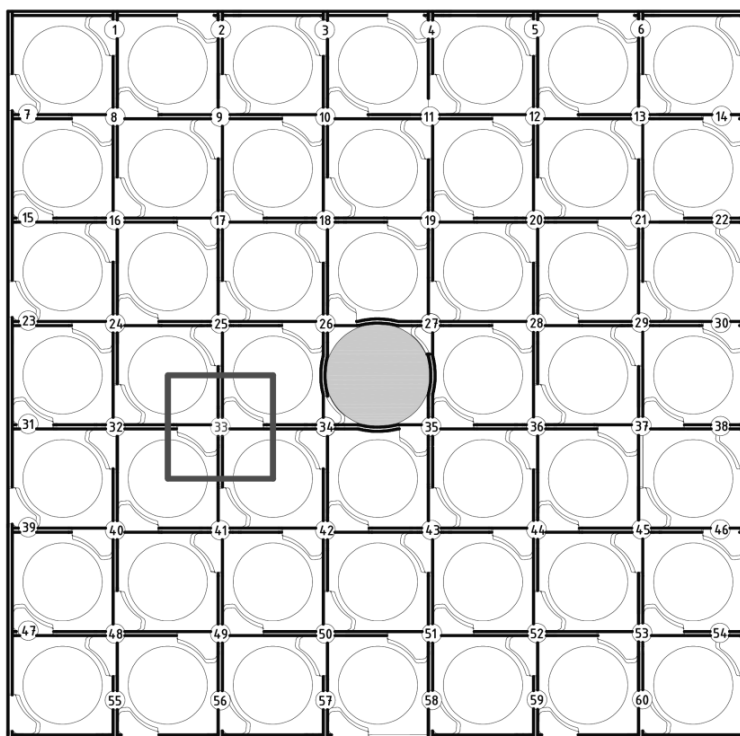


Рис. 2. Поперечное сечение ЭМ

Результаты исследований гидродинамики теплоносителя в регулярных ячейках за перемешивающей дистанционирующей решеткой ТВС-КВАДРАТ

По результатам экспериментальных исследований локальной гидродинамики потока за различными перемешивающими дистанционирующими решетками в регулярной ячейке выявлены следующие особенности течения теплоносителя в ТВС-КВАДРАТ:

1. За любым из исследуемых типов дефлекторов ПДР возникают локальные вихри в пределах ячеек и направленные турбулентные течения между ячейками кассеты согласно ориентации дефлекторов (рис. 3).

2. Форма вихревой структуры, образовавшейся за ПДР, зависит от угла линиигиба дефлектора относительно верхней кромки пластины ПДР. При угле линиигиба дефлектора равной 0° (дефлектор типа «прямой гиб») образуются два вихря, расположенных около твэлов (рис. 3 а), а при угле равном 15° (дефлектора типа «косой гиб», «обратный гиб» и «увеличенной площади») образуется один вихрь в центре ячейки (рис. 3 б, в, г).

3. Длина жизни вихря и интенсивность направленных турбулентных течений между соседними ячейками за различными дефлекторами ПДР при одинаковом угле их наклона относительно осевого направления движения теплоносителя зависит от профиля дефлекторов и площади перекрытия дефлекторами проходного сечения ячеек ТВС-КВАДРАТ. По графикам, представленным на рис. 4, видно, что увеличение площади перекрытия дефлекторами проходного сечения ячеек ТВС-КВАДРАТ приводит к уменьшению длины жизни вихря и росту интенсивности турбулентных течений между соседними ячейками.

4. Затухание поперечных скоростей за ПДР с дефлекторами типа «косой гиб» и «прямой гиб» происходит на расстоянии $l/d_2 \approx 15$, для ПДР с дефлекторами типа «обратный гиб» на расстоянии $l/d_2 \approx 24$. За дефлекторами «Увеличенной площади» на расстоянии за ПДР $l/d_2 = 25$ значения поперечной скорости $W_{xy}/W = 0,16$. Данный факт свидетельствует о том, что увеличение площади перекрытия дефлекторами проходного сечения ячеек приводит к росту длины затухания поперечных скоростей потока теплоносителя (рис. 5).

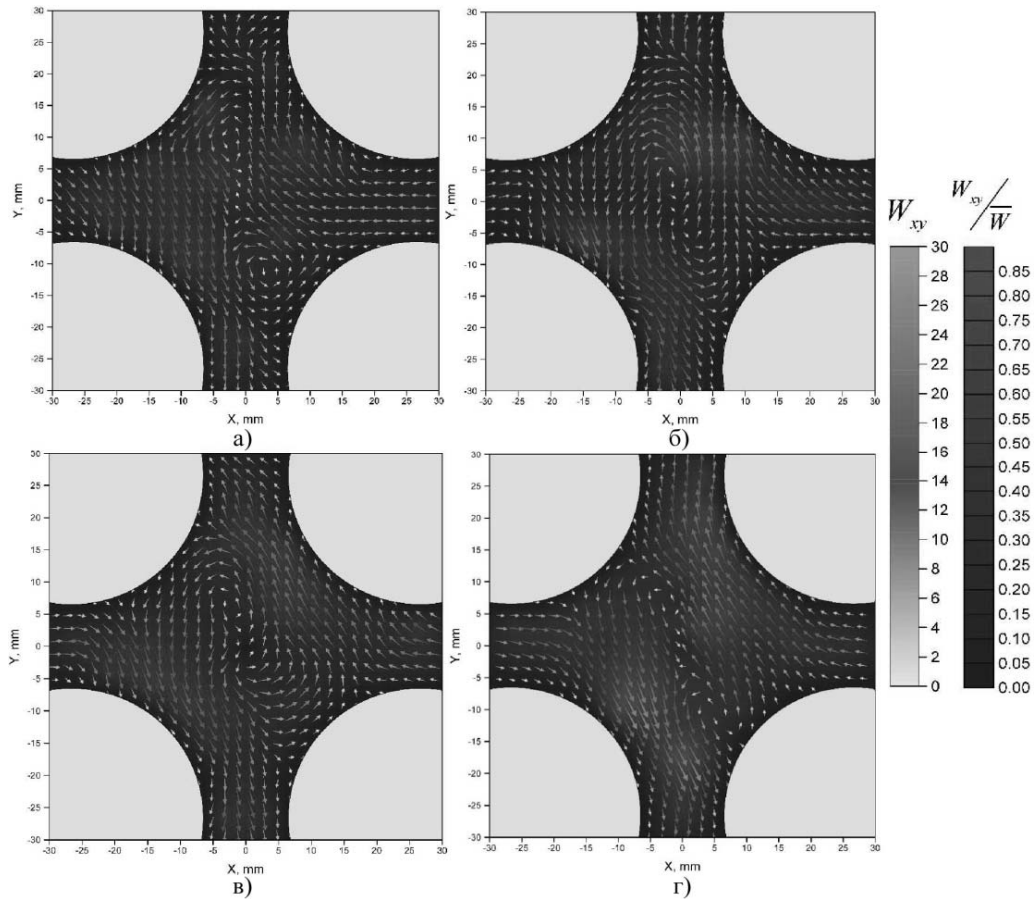


Рис. 3. Векторное поле в регулярной ячейке за исследуемыми дефлекторами ПДР модели на расстоянии $l/d_z=1,3$ от решетки:

а – векторное поле за дефлекторами типа «прямой гиб»; *б* – векторное поле за дефлекторами типа «косой гиб»; *в* – векторное поле за дефлекторами типа «обратный гиб»; *г* – векторное поле за дефлекторами «увеличенной площади»



Рис. 4. Зависимость длины жизни вихревых структур и интенсивности турбулентных течений между соседними регулярными ячейками ТВС-КВАДРАТ от площади дефлектора

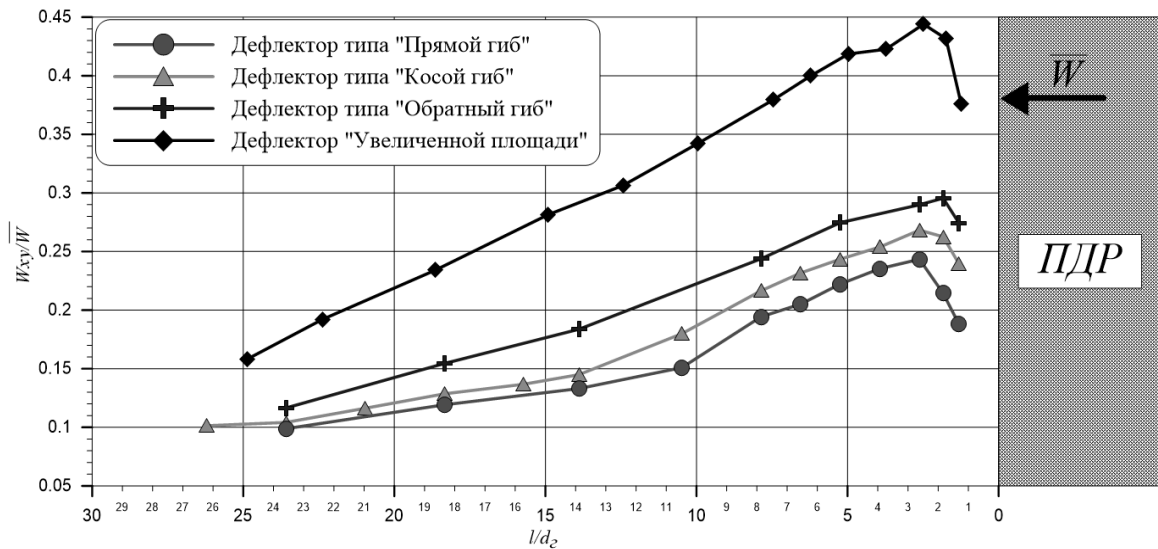


Рис. 5. Распределение относительной поперечной скорости W_{xy}/W в межтвэльных зазорах регулярной ячейки ТВС-КВАДРАТ

Оценка эффективности перемешивающей дистанционирующей решетки ТВС-КВАДРАТ с различными типами дефлекторов

Для сравнения различных типов дефлекторов ПДР ТВС-КВАДРАТ целесообразно использовать следующие параметры [7]:

1. Параметр межъячейкового обмена F_{mix} :

$$F_{mix} = \frac{1}{S} \int \frac{|V_{cross}|}{U} dy, \tag{1}$$

где S – зазор между твэлами, V_{cross} - компонента скорости теплоносителя через границу между ячейками, U – средняя скорость теплоносителя по сечению ячейки в направлении потока.

2. Параметр завихренности потока: F_{vortex}

$$F_{vortex} = \frac{\int r^2 V_{lateral} U_{local} dr}{R_s \int r U_{local}^2 dr}, \tag{2}$$

где $V_{lateral}$ – тангенциальная составляющая скорости теплоносителя, U_{local} – локальная аксиальная компонента скорости теплоносителя, r – радиальное расстояние от центра до точки, в которой измеряются скорости теплоносителя, R_s – минимальное расстояние от центра ячейки до поверхности стержня.

По результатам расчета параметра завихренности потока F_{vortex} , определяющего интенсивность воздействия дефлекторов в регулярной ячейке модели, определено, что при фиксированной координате l/d_2 за любым из исследуемых дефлекторов данный коэффициент меняет знак (рис. 6), что свидетельствует об изменении направления движения поперечного потока теплоносителя. Для ПДР с дефлектором типа «косой гиб» поток начинает движение в противоположную сторону при $l/d_2 \approx 5$, для ПДР с дефлектором типа «обратный гиб» и дефлектором «увеличенной площади» при $l/d_2 \approx 3$, для ПДР с дефлектором типа «прямой гиб» при $l/d_2 = 23$.

Расчеты параметра межъячейкового обмена между регулярными ячейками показали, что наибольшие значения параметра по всей длине за ПДР наблюдаются при установке на ПДР дефлекторов «Увеличенной площади» (рис. 7).

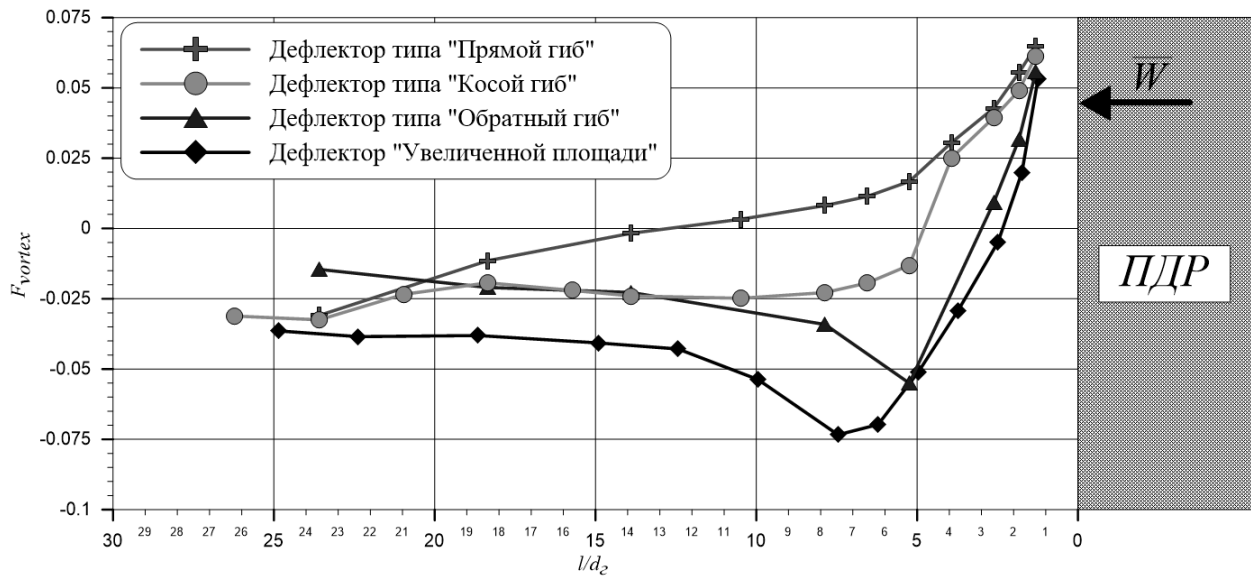


Рис. 6. Значения параметра завихренности потока F_{vortex} в регулярной ячейке ТВС-КВАДРАТ

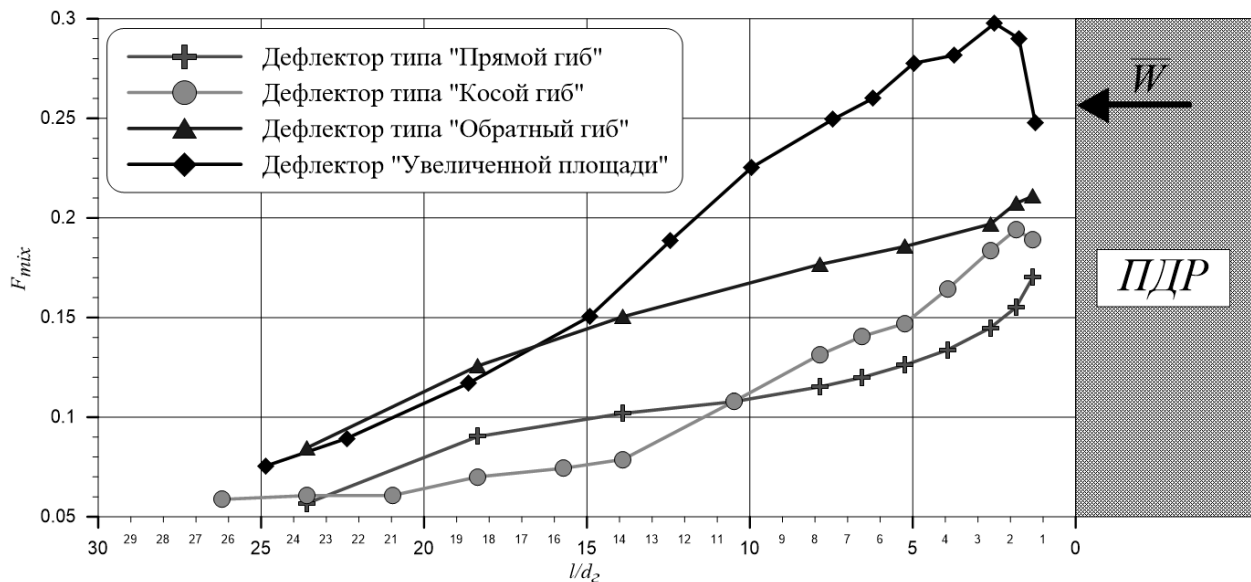


Рис. 7. Значения параметра межъячейкового обмена F_{mix} в регулярной ячейке ТВС-КВАДРАТ

Выводы

На основе комплексного анализа результатов исследований локальной гидродинамики потока теплоносителя за ПДР ТВС-КВАДРАТ с дефлекторами различных конструкций сделаны следующие выводы.

1. За любым из исследуемых типов дефлекторов ПДР возникают локальные вихри в пределах ячеек и направленные турбулентные течения между ячейками кассеты согласно ориентации дефлекторов.

2. Форма вихревой структуры, образовавшейся за ПДР, зависит от угла линиигиба дефлектора относительно верхней кромки пластины ПДР.

3. Длина жизни вихря и интенсивность направленных турбулентных течений между соседними ячейками за различными дефлекторами ПДР при одинаковом угле их наклона относительно осевого направления движения теплоносителя зависит от профиля дефлекторов и площади перекрытия дефлекторами проходного сечения ячеек ТВС-Квадрат.

4. Увеличение площади перекрытия дефлекторами проходного сечения регулярных ячеек приводит к росту длины затухания поперечных скоростей потока теплоносителя.

5. При фиксированной координате l/d_z за любым из исследуемых типов дефлекторов коэффициент, определяющий интенсивность воздействия дефлекторов, меняет знак, что свидетельствует об изменении направления движения поперечного потока теплоносителя.

6. Наибольшие значения параметра межъячейкового обмена по всей длине наблюдаются при установке на ПДР дефлекторов «увеличенной площади».

Полученные результаты могут быть использованы в качестве базы данных для верификации CFD-кодов и программ детального поячеечного расчета активных зон водо-водяных ядерных реакторов с целью уменьшения консерватизма при обосновании теплотехнической надежности активных зон.

Данная работа выполнена в рамках выполнения базовой части государственного задания №12/17-01.10.

Библиографический список

1. **Дмитриев, С.М.** Основное оборудование АЭС с корпусными реакторами на тепловых нейтронах / С.М. Дмитриев [и др.]. – М.: Машиностроение. – 2013.
2. Методы обоснования теплотехнической надежности активной зоны тепловых водо-водяных реакторов / А.А. Баринов [и др.] // Атомная энергия. – 2016. - Т. 120. – Вып. 5. - С. 270–275.
3. Расчетно-экспериментальные исследования локальной гидродинамики и массообмена потока теплоносителя в ТВС-Квадрат реакторов PWR с перемешивающими решетками / А.В. Варенцов [и др.] // Теплоэнергетика. – 2014. – №8. – С. 20-27.
4. Особенности локальной гидродинамики и массообмена теплоносителя в ТВС реакторов ВВЭР и PWR с перемешивающими решетками / С.С. Бородин [и др.] // Тепловые процессы в технике. – 2014. – Т. 5. – Вып 3. – С. 98–107.
5. **Жуков, А.В.** Межканальный обмен в ТВС быстрых реакторов: Теоретические основы и физика процесса / А.В. Жуков [и др.]. – М.: Энергоатомиздат. – 1989.
6. **Гухман, А.А.** Введение в теорию подобия / А.А. Гухман [и др.]. – М.: Высшая школа. - 1973.
7. **Митрофанова, О.В.** Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерно-энергетических установок / О.В. Митрофанова [и др.] – М.: ФИЗМАТЛИТ. – 2010.

*Дата поступления
в редакцию 31.10.2017*

S.M. Dmitriev, D.V. Doronkov, M.A. Legchanov, V.D. Sorokin, A.E. Khrobostov

FEATURE OF CONVECTIVE TURBULENT FLOW BEHIND THE MIXING SPACER GRID OF THE TVS-KVADRAT OF THE PWR-TYPE REACTOR

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

Purpose: The main objective of the research was to experimental investigations of the influence of mixing spacer grids with different types of deflectors on the coolant flow in the TVS-Kvadrat fuel assembly of the PWR-type reactor.

Design/methodology/approach: Investigations were conducted on an aerodynamic stand with the use of a multichannel pneumometric probe.

Results: Analysis of the spatial distribution of projections of the absolute flow velocity permitted detailing the coolant flow pattern behind the mixing spacer grid with various types of deflectors of mixing grids. The results obtained in the present paper are used to verify three-dimensional CFD programs, and in applied cell by cell codes they also serve as a database in calculations of thermotechnical reliability of the cores of PWR-type reactors with the TVS-Kvadrat.

Key words: nuclear reactor, core, fuel assembly, mixing spacer grid, coolant hydrodynamics.

УДК 621.316.71

А.Н. Егоров¹, А.С. Семёнов², О.В. Федоров³**ПРАКТИЧЕСКИЙ ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ
POWER FLEX 7000 В ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

АК «АЛРОСА» (ПАО), СТ «Алмазавтоматика», г. Мирный, Республика Саха (Якутия)¹,
Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова,
Политехнический институт (филиал) в г. Мирном, г. Мирный, Республика Саха (Якутия)²,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева³

Данная статья посвящена вопросам особенности применения высоковольтных преобразователей частоты в системах электроприводов горных предприятий. Произведен обзор современной преобразовательной техники, выявлены лидеры в производстве высоковольтных преобразователей. Выполнен анализ влияния высоковольтных преобразователей частоты на качество электрической энергии питающей сети. Детально рассмотрены режимы работы высоковольтного преобразователя PowerFlex 7000. Представлены схемы его силовой части. Произведен контроль параметров электрической энергии вентилятора главного проветривания, в системе электропривода которого установлен преобразователь. Представлены результаты и сделаны выводы о соответствии контролируемых параметров нормам.

Ключевые слова: горнодобывающее предприятие, электрический привод, преобразователь частоты, электрическая энергия, питающая сеть, контроль качества электроэнергии, напряжение, ток, гармоники.

Высоковольтные системы электропривода на горнодобывающих предприятиях находят применение на главных вентиляторных установках (ГВУ), шахтных подъемных установках (ШПУ) и насосных установках. При этом капитальные и эксплуатационные затраты при использовании высоковольтного электрооборудования значительно выше по сравнению с вариантом применения низковольтного электрооборудования. Кроме того, эксплуатация высоковольтного электрооборудования связана с повышенной опасностью. Вследствие необходимости применения проводников большого сечения для передачи большой мощности на низком напряжении высоковольтные системы электропривода находят применение в промышленных установках мощностью более 1 МВт [1].

Наряду с необходимостью обеспечения требуемых параметров работы приводимой в движение установки, ключевой задачей является оптимизация энергопотребления, поэтому предпочтение отдается частотно-регулируемому электроприводу. Следует отметить что, прямой пуск высоковольтных электродвигателей переменного тока сопровождается бросками пускового тока, достигающими 8-кратного значения по отношению к номинальному току двигателя, которые вызывают большие электромагнитные и механические ударные нагрузки на двигатели и на приводимые ими исполнительные механизмы [2, 3].

Развитие силовой полупроводниковой электроники привело к разработке нескольких видов высоковольтных преобразователей частоты, которые позволили значительно повысить эффективность систем высоковольтного электропривода. Сегодня на рынке высоковольтных преобразователей ряд отечественных и зарубежных предприятий заняты разработкой и производством преобразователей частоты. К лидерам рынка по праву можно отнести ABB, Siemens и Rockwell Automation, так как они производят несколько линеек преобразователей, которые имеют принципиальные отличия в схемотехнике.

Кроме того, следует отметить уникальные преобразователи этих производителей, такие как ACS2000, ACS5000, PowerFlex 7000, Sinamics SM120CM и др., которые выполнены на мощных высоковольтных полупроводниках. Большинство остальных предприятий производят каскадные преобразователи частоты, которые строятся на базе H-мостовых низковольтных ячеек с применением специального многообмоточного входного трансформатора [4, 5].

В зависимости от конструктивных особенностей и функциональных возможностей суммарные затраты на внедрение и эксплуатацию в течение жизненного цикла преобразователя частоты могут различаться в несколько раз, а иногда и на порядок, поэтому при выборе преобразователя частоты следует учитывать множество факторов. Нередки случаи, когда на предприятии внедряется оборудование с избыточными свойствами для данной конкретной установки и затраты на внедрение и эксплуатацию сводят на нет все усилия по обеспечению энергоэффективности. Так, на простейших насосных установках не имеет смысла применение преобразователя с векторным управлением, будет достаточным, если преобразователь обеспечивает скалярное управление. Кроме того, следует учитывать, что высоковольтные полупроводники на сегодняшний день очень дорого стоят, поэтому запасные части к преобразователям прямого и многоуровневого преобразования будут стоить гораздо дороже, чем к каскадным преобразователям.

В то же время всегда нужно помнить, что одни преобразователи будут обладать преимуществом особой надежности, другие – широкой функциональной возможности, а третьи – низкой стоимости и выбор преобразователя должен основываться на ключевых технологических особенностях промышленной установки, для которой разрабатывается система электропривода. Например, основной особенностью главных вентиляторных установок подземных горнодобывающих предприятий следует обозначить очень высокие требования к надежности, так как они являются основой системы подачи свежей струи воздуха, иными словами от работы этих вентиляторов зависит надежность системы жизнеобеспечения.

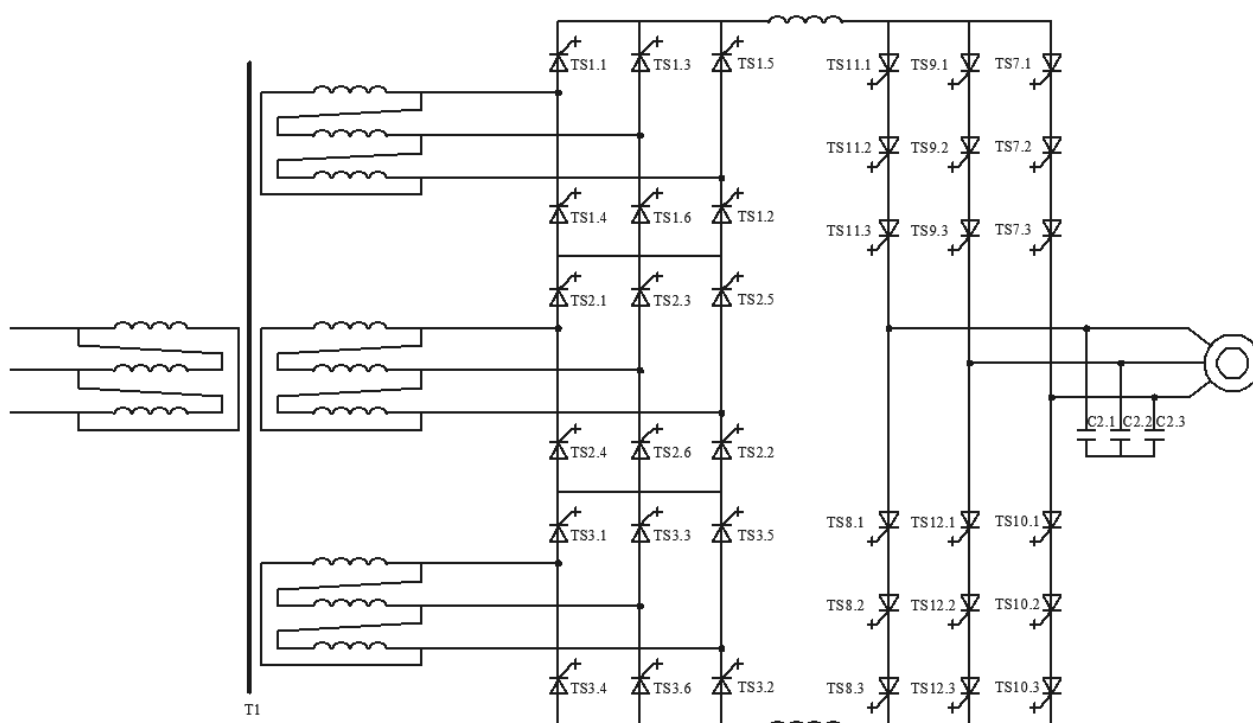


Рис. 1. Схема силовой части преобразователя частоты

В системах электроприводов вентиляторов главного проветривания рудников АК «АЛРОСА» (ПАО) применяется преобразователь частоты PowerFlex 7000 с 18-пульсным выпрямителем (рис. 1), так как он зарекомендовал себя как весьма надежный продукт. Этот преобразователь, построенный на высоковольтных SGCT-тиристорах, относится к преобразователям прямого преобразования и отличается высокой надежностью элементов силовой части. Последнее подтверждается тем, что за время эксплуатации на вентиляторах главного проветривания рудника «Мир» Мирнинского ГОКа АК «АЛРОСА» (ПАО) с 2007 года не зафиксировано не единого случая выхода из строя элементов силовой цепи. Высокая надеж-

ность силовой части обеспечивается за счет применения SGCT (SymmetricalGate Commutate Thyristor) тиристоры с заявленной производителем частотой отказов 100 на 1 миллиард часов. Данная разновидность силовых полупроводниковых ключей представляет собой симметричный коммутационный тиристор с интегрированным управлением и является расширением серии тиристоры IGCT с более высокой частотой модуляции. Так, тиристоры IGCT обладают частотой модуляции лежащей в пределах до 200 Гц, а тиристоры SGCT обладают частотой модуляции лежащей в пределах от 400 до 1000 Гц [6]. SGCT-тиристоры рассчитаны на номинальное напряжение 6500 вольт, что значительно снижает количество полупроводников силовой части, а это, в свою очередь, положительно влияет на надежность преобразователя частоты.

Преобразователи PowerFlex 7000 в зависимости от типа выпрямителя выпускаются в трех конфигурациях: с активным выпрямителем непосредственного подключения к сети; с активным выпрямителем, подключенным к сети через отдельный изолирующий трансформатор; с 18-пульсным выпрямителем. Для обеспечения запаса пикового обратного напряжения в зависимости от уровня питающего напряжения в каждом плече выпрямителя и инвертора изменяется количество, подключенных последовательно тиристоры, так для напряжения 6 кВ последовательно включены три SGCT-тиристора.

Преобразователь частоты PowerFlex 7000 построен на основе автономного инвертора тока, то есть входная цепь инвертора тока обеспечивает режим источника тока. Этот режим достигается за счет установки в промежуточном звене большой индуктивности применения контура стабилизации тока. При этом функция тиристоры инвертора сводится к периодическому переключению направления этого тока в выходной цепи инвертора и тем самым на выходе инвертора формируется переменный ток.

Следует отметить что, нагрузкой инвертора тока должна быть цепь со свойствами, близкими к источнику напряжения, то есть с близким к нулевому внутренним динамическим сопротивлением, допускающим протекание через него скачкообразно меняющегося тока. Практически это обеспечивается включением на выход вентиляционного коммутатора конденсатора, что позволит уже подключить после него любую реальную нагрузку с индуктивностью, не допускающей скачков тока [7].

Подробный анализ работы инверторов представлен в [8], приведем лишь основные свойства автономных инверторов тока:

- сильная зависимость величины и формы выходного напряжения от величины и характера нагрузки в классическом варианте инвертора. Ограничение на минимум нагрузки диктуется допустимой степенью возрастания напряжения на выходе инвертора. Ограничения на максимум нагрузки обусловлены требованием восстановления управляющих свойств тиристоры. Влияние изменения частоты выходного напряжения на его величину такое же, как влияние изменения нагрузки;
- большая величина индуктивности реактора в звене постоянного тока для реализации режима источника тока, что ухудшает массогабаритные показатели преобразователя;
- большая инерционность регулирования из-за большой электромагнитной постоянной времени реактора в звене постоянного тока;
- возможность уменьшения пределов изменения напряжения на внешней характеристике инвертора модифицированной схемы инвертора путем применения или выпрямителя обратного тока, или тиристорно-индуктивного регулятора; возможность снижения величины (а значит, и массогабаритных показателей) коммутирующей емкости за счет применения отсекающих вентилялей;
- возможность улучшения гармонического состава выходного напряжения инвертора, особенно при низких частотах, методом широтно-импульсного формирования токов вентилялей;
- благоприятный с позиций электромагнитной совместимости режим нагрузки источника входного напряжения постоянным током со входа инвертора тока.

Улучшение формы выходного тока инвертора в преобразователе частоты PowerFlex 7000 достигается за счет применения метода широтно-импульсного формирования токов вентиляей, то есть каждый полупериод тока формируется в виде последовательности импульсов тока, длительность которых изменяется по трапецеидальному закону.

Результат применения этого метода представлен на рис. 2. На верхней части рисунка представлены осциллограммы тока по фазам А и С, а на нижней – осциллограммы напряжений по трем фазам, которые снимались с контрольных точек платы нормализации аналоговых сигналов преобразователя частоты PowerFlex 7000 главной вентиляторной установки рудника «Интернациональный» АК «АЛРОСА» (ПАО). Как видно из осциллограмм формы кривых входных токов и напряжений, преобразователь частоты PowerFlex 7000 формирует на выходе ток и напряжение, близкие к идеальной синусоиде. Последнее способствует повышению надежности электродвигателя за счет снижения интенсивности старения изоляции от действия высших гармоник. Кроме того, при обеспечении синусоидальности кривых тока и напряжения снижаются дополнительные потери от действия высших гармоник.

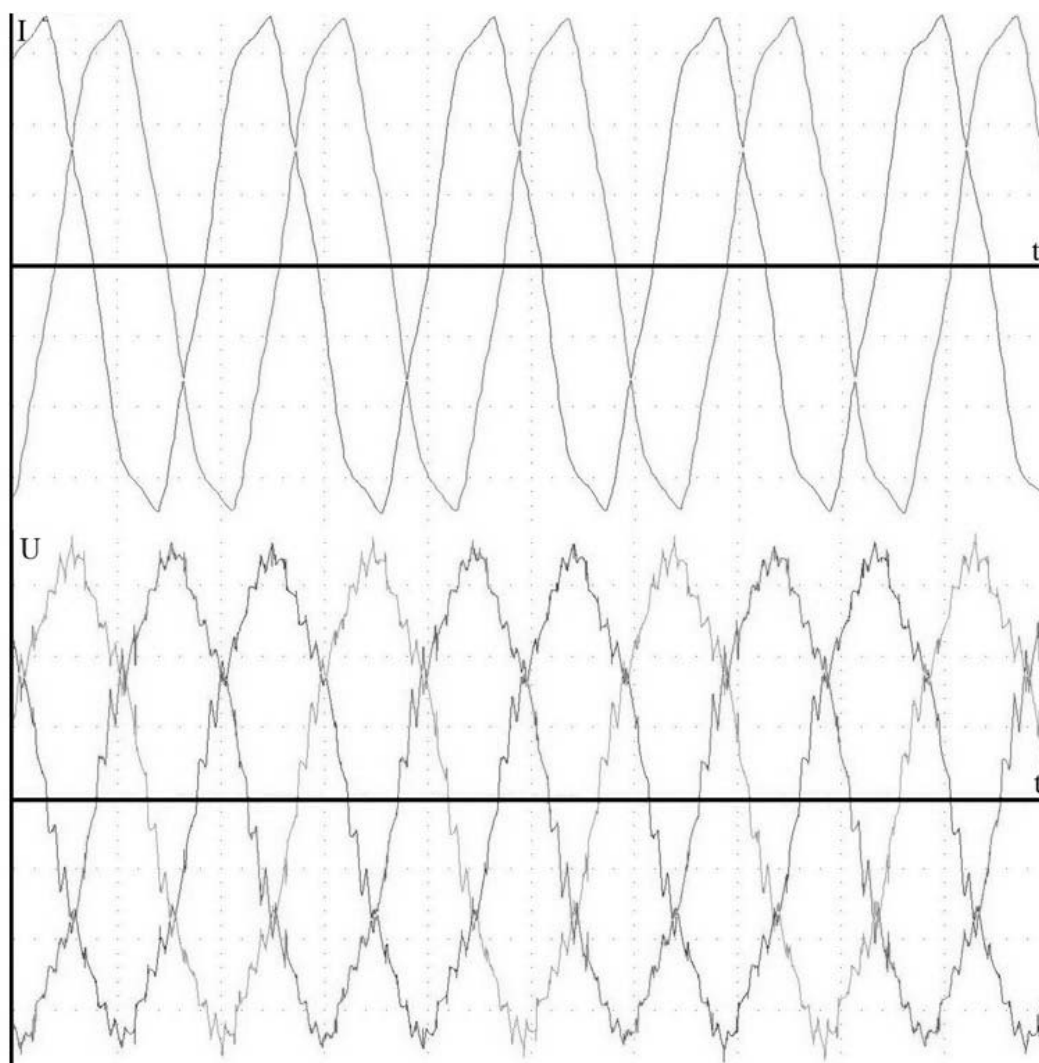


Рис. 2. Осциллограммы выходных токов и напряжений

Искажения напряжения являются следствием коммутации вентиляльных преобразователей. Преобразователь во время коммутации вентиляей производит подключение нагрузки к соответствующим фазам без разрыва тока, поступающего из предыдущей фазы, что приводит к периодическим междуфазным коротким замыканиям в питающей сети. В кривой на-

пряжения в процессе коммутации появляются коммутационные искажения, форма, величина и количество которых зависят от схемы выпрямления, количества фаз выпрямления, мощности преобразователей, параметров питающей сети, угла управления вентилями преобразователя. На рис. 3 представлены формы кривых входных токов и напряжений преобразователя частоты PowerFlex 7000 главной вентиляторной установки рудника «Интернациональный». Измерения проводились на вводном высоковольтном выключателе анализатором качества электрической энергии типа PowerQ4 MI2592 в режиме снимка формы сигналов.

На осциллограммах входных и выходных токов и напряжений видно, что формы кривых очень близки к идеальной синусоиде, но все же искажения имеются. Разумеется, эти искажения не сопоставимы с искажениями формы кривых напряжений и токов от коммутации тиристоров в простейших 6-пульсных выпрямителях с системой импульсно-фазового управления, которые применялись в первых высоковольтных преобразователях частоты отечественного производства, но, тем не менее, эти искажения свидетельствуют о генерации высших гармонических составляющих тока и напряжения.

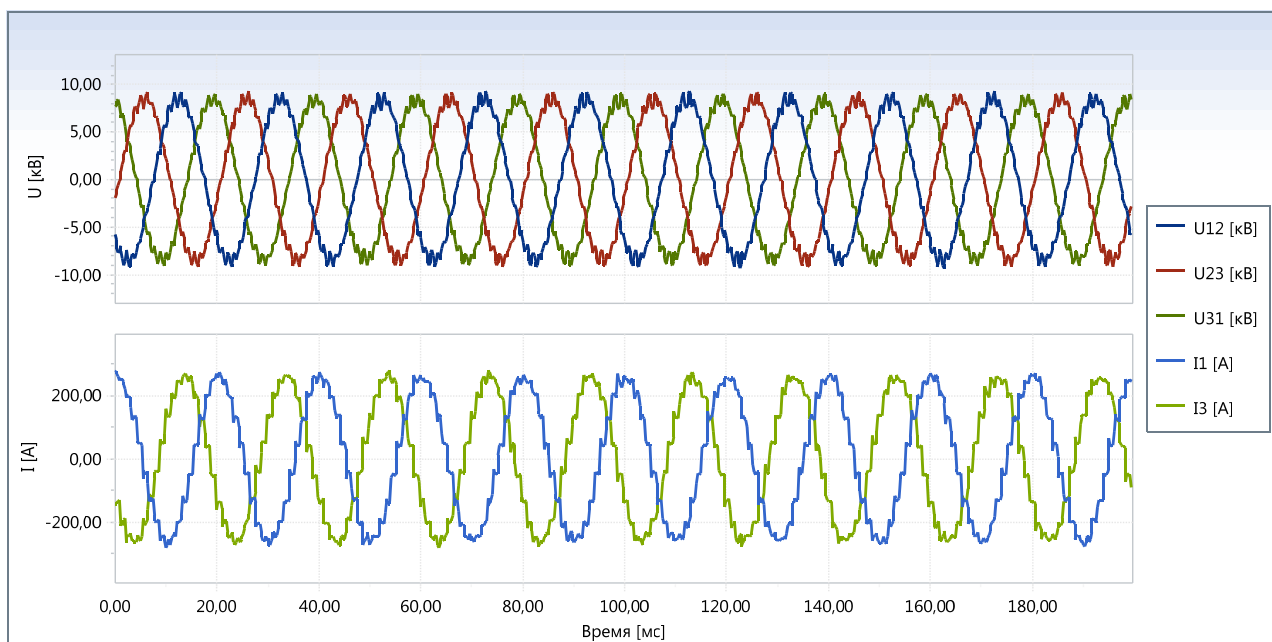


Рис. 3. Осциллограммы входных напряжений и токов

С целью получения данных для оценки влияния преобразователей частоты PowerFlex 7000 на качество электроэнергии питающей сети был проведен инструментальный контроль параметров электрической энергии [9, 10]. Контроль параметров электрической энергии производился в соответствии с ГОСТ-32144 [11] в течение 7 суток с 10-минутным интервалом. Результаты инструментального контроля представлены на рис. 4, из которых видно, что коэффициент искажения кривой напряжения достигает значения 42 %, что не соответствует требованиям ГОСТ-32144, в то же время коэффициент искажения кривой тока не превышает 5 %, что соответствует техническим характеристикам заявляемым производителем.

На рис. 5 представлен график изменения тока фазы А при запуске главной вентиляторной установки, одновременно с этим велся контроль коэффициентов искажения кривых напряжения и тока. Графики показывают, что напряжение начинает искажаться в момент запуска главной вентиляторной установки, что свидетельствует о влиянии преобразователя PowerFlex 7000 на качество электроэнергии питающей сети.

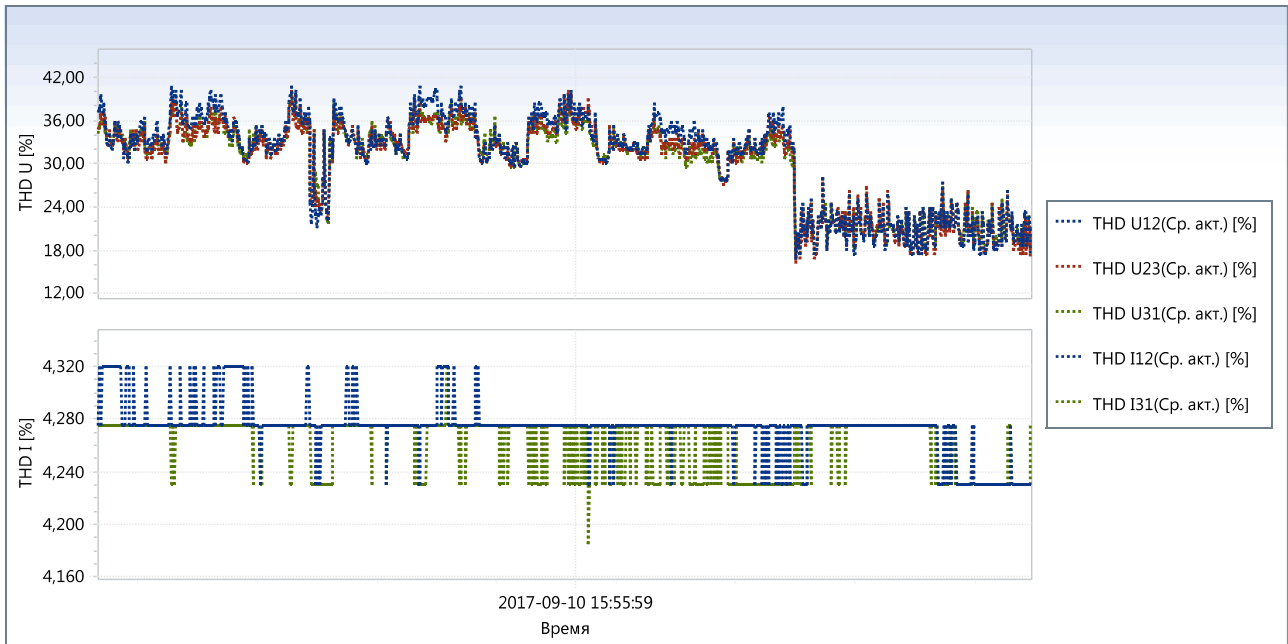


Рис. 4. Графики суммарных коэффициентов искажения кривых напряжения и токов на входе преобразователя частоты PowerFlex 7000

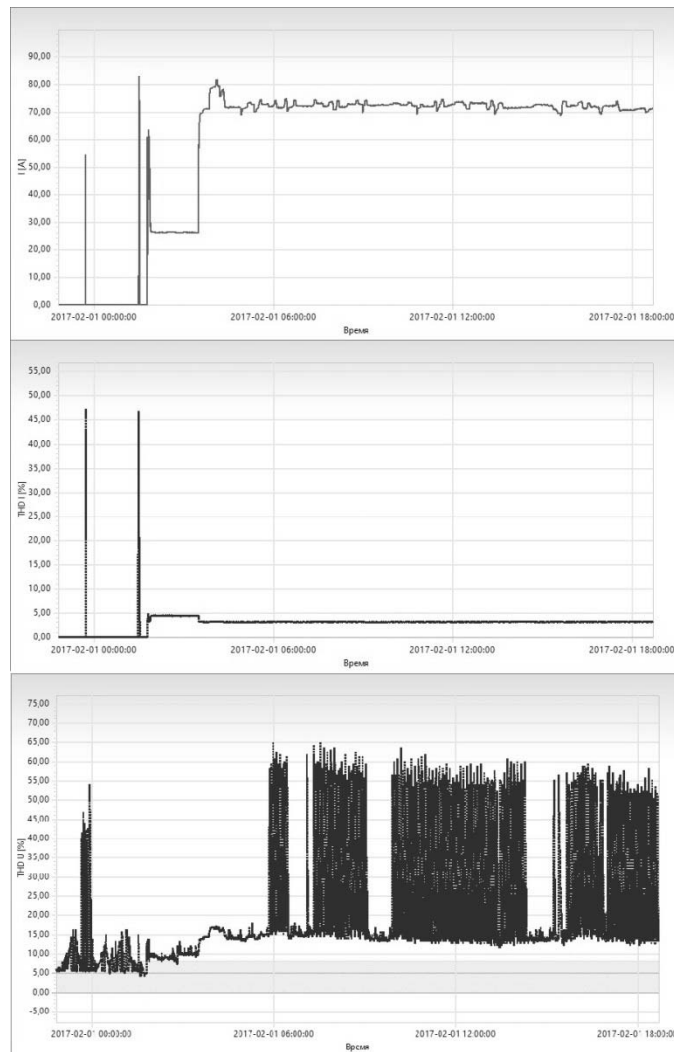


Рис. 5. Результаты измерений показателей качества электроэнергии при запуске главной вентиляторной установки

Следует отметить, что при малых значениях выходной частоты преобразователя коэффициент искажения кривой напряжения увеличивается. При этом анализ гармонических составляющих напряжения показал, что генерируются нечетные гармоники, некратные трем. Так, 17-я гармоническая составляющая превышает 30 % (рис. 6), что не соответствует требованиям ГОСТ-32144.

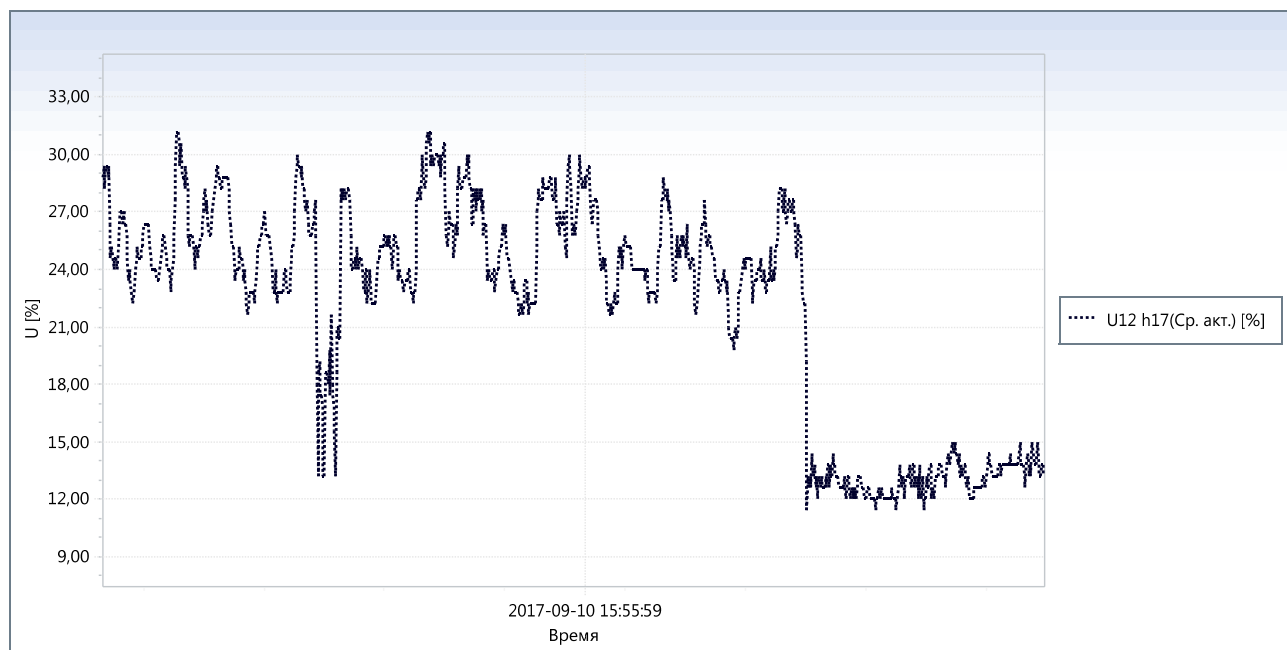


Рис. 6. График изменения семнадцатой гармонической составляющей напряжения

В заключении следует отметить, что преобразователи частоты PowerFlex 7000 отличаются очень высоким запасом прочности элементов силовой цепи, что позволяет их применение в установках требующих развития высокого пускового электромагнитного момента на валу электродвигателя. Однако при этом данные преобразователи оказывают влияние на качество электроэнергии питающей сети, которое выходит за рамки допустимых значений ГОСТ-32144.

Библиографический список

1. **Кузнецов Н.М.** Рациональное электропотребление на горных предприятиях // Труды Кольского научного центра РАН. – 2011. – № 4. – С. 128-135.
2. **Ляхомский, А.В.** Концептуальное проектирование и инжиниринг повышения энергоэффективности / А.В. Ляхомский, А.Б. Петроченков, Е.Н. Перфильева // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2015. – № 9. – С. 360-364.
3. **Кузнецов, Н.М.** Особенности электропотребления и пути его оптимизации при подземной разработке кимберлитов / Н.М. Кузнецов, А.Н. Егоров, Н.В. Егоров // Горный журнал, 2010. – № 7. – С. 87-89.
4. Power electronics handbook / ed. by M.H. Rashid. San Diego: Academic Press, 2001. – 895 p.
5. The power electronics handbook / ed. by T.L. Skvarenina. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2002. – 664 p.
6. **Решетняк, С.Н.** Особенности применения высоковольтных преобразователей частоты для питания синхронных двигателей используемых в качестве приводов подъемных установок // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2006. – № 10. – С. 66-71.
7. **Гельман, М.В.** Преобразовательная техника: учеб. пособие / М.В. Гельман, М.М. Дудкин, К.А. Преображенский. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – 425 с.

8. **Зиновьев, Г.С.** Основы силовой электроники: учебник / Г.С. Зиновьев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. – Ч. 2. – 197 с.
9. **Кузнецов, Н.М.** Результаты мониторинга показателей качества электрической энергии потребителей подземного рудника / Н.М. Кузнецов, А.С. Семенов, Ю.В. Бебихов, А.В. Рыбников // Горный журнал. – 2014. – № 1. – С. 23-26.
10. **Семенов, А.С.** Анализ результатов мониторинга показателей качества электрической энергии в подземном руднике / А.С. Семенов, Н.М. Кузнецов // Измерительная техника. – 2014. – № 4. – С. 31-34.
11. ГОСТ 32144-2013 (EN 50160:2010, NEQ) Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: ФГУП «Стандартинформ», 2014. – 16 с.

*Дата поступления
в редакцию 31.10.2017*

A.N. Egorov¹, A.S. Semenov², O.V. Fedorov³

THE PRACTICAL EXPERIENCE OF THE APPLICATION OF THE FREQUENCY CONVERTER POWER FLEX 7000 IN THE MINING INDUSTRY

ST «Almazavtomatika» PJSC «ALROSA», Mirny, Republic of Sakha (Yakutia)¹,
Polytechnic institute (branch) of North-Eastern Federal University n. a.r M.K. Ammosov in Mirny,
Mirny, Republic of Sakha (Yakutia)²,
The Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev³

Purpose: The purpose of this study is to study high-voltage frequency converters of the Power Flex 7000 series to assess the impact of their operation on the quality of the electricity supply network of the mining enterprise.

Methodology: The methods of analysis include theoretical studies of technical documentation of frequency converters and instrumental monitoring of the parameters of the quality of electrical energy for compliance with the requirements of GOST 32144-2013 (EN 50160: 2010, NEQ).

Results: As a result of the study, distortions of the shape of the curves of input and output currents and voltages were revealed. Although these curves are very close to an ideal sinusoid, the presence of distortions indicates the generation of higher harmonic current and voltage components. Also, when carrying out instrumental monitoring of the electrical energy parameters, it was found that the distortion factor of the voltage curve reaches 42%, which does not meet the requirements of GOST-32144, while the distortion of the current curve does not exceed 5%, which corresponds to the specifications of the manufacturer. At the same time, the analysis of the harmonic voltage components showed that odd harmonics are generated that are not divisible by three. So, for example, the seventeenth harmonic component exceeds 30%, which also does not meet the requirements of GOST. These data can help in justifying the choice of the frequency converters of the Power Flex 7000 series for the electrical drive systems of particular equipment in mining plants.

Conclusions: The Power Flex 7000 frequency inverters have a negative impact on the quality of the electricity supply network, which is beyond the permitted values of GOST-32144. However, it should be noted that these converters are characterized by a very high margin of strength of the power circuit elements, which makes their use in installations requiring a high starting electromagnetic moment on the motor shaft to be very reasonable.

Key words: mining enterprise, electric drive, frequency converter, electric power, supply network, power quality control, voltage, current, harmonics.

УДК 621.317.629.12

Г.И. Коробко, П.В. Ахлестин

**АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ КОМПЕНСАЦИИ НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ
НАПРЯЖЕНИЯ В СУДОВОЙ СЕТИ**

ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта»

Применение в судовой электроэнергетической системе мощных нелинейных потребителей, соизмеримых с мощностью источников, ведёт к увеличению нелинейных искажений напряжения. Это негативно влияет на работу многих элементов электростанции и, в первую очередь, на систему автоматики и радионавигацию. Решение проблемы для качественного питания наиболее ответственных потребителей обеспечивается, как правило, через пассивные или активные специальные устройства. Аналитическое сравнение вариантов компенсации нелинейных искажений напряжения показало целесообразность применения в сети дизель – электрохода преобразователя частоты или активного компенсатора. Эти оба способа обеспечивают низкий коэффициент нелинейных искажений напряжения (<2,0%), малые массогабаритные показатели и низкую стоимость. Увеличение мощности нелинейных потребителей на судах с гребными электрическими установками приводит к увеличению коэффициента нелинейных искажений напряжения в сетях единой электроэнергетической системе более 10%. В связи с этим актуальным направлением является разработка, создание и внедрение активных устройств компенсации искажений напряжения как в судовых, так и автономных сетях.

Ключевые слова: судовая электроэнергетическая система, высшие гармоники, наиболее ответственные потребители, активный компенсатор, преобразователь частоты, пассивный фильтр.

В настоящее время всё больше электрических потребителей на судах используют полупроводниковые преобразователи. Это мощные насосы (пожарные, балластные - осушительные, грузовые), для которых требуются системы плавного пуска и устройства регулирования частоты вращения, осуществляющиеся с помощью преобразователей частоты. Увеличение мощности и количества полупроводниковых преобразователей в судовой единой электроэнергетической системе (ЕЭС), приводит к увеличению коэффициента нелинейных искажений - $K_{ни}$, который регламентирован Российским Морским Регистром Судоходства - РМРС [1] и Российским Речным Регистром – РРР [2]. Предельно допустимое значение коэффициента нелинейных искажений - $K_{ни}$ составляет 10%.

Рассмотрим однопалубный теплоход "Prospero", построенный для компании Rederi AB Donsötank в 2000 г. [3]. Назначение судна: перевозка сырой нефти, нефтепродуктов и химических продуктов, в том числе продуктов метанольной группы, без ограничения по температуре вспышки, с обеспечением перевозки груза с поддержанием температуры 60°C. Судно имеет единую электроэнергетическую систему с электродвижением. На рис. 1 представлена функциональная схема ЕЭС химовоза "Prospero", в состав которой входят:

- 1) четыре дизель - генератора – ДГ-1 ÷ ДГ-4, мощностью 2100 кВА, предназначенных для обеспечения электроэнергией шин ЕЭС;
- 2) дизель - генератор ДГ- 5, мощностью 560 кВА, предназначенного для обеспечения питания шин ГРЩ;
- 3) гребная электрическая установка – ГЭУ (Main Propulsion), мощностью 5100 кВт, работающей на повышенном напряжении от двух преобразователей частоты UZ1 и UZ2. Наличие двух преобразователей частоты, повышает надёжность питания ГЭУ за счёт резервирования;
- 4) четырнадцать преобразователей частоты – ПЧ (auxiliary freq. convertors) с асинхронными электродвигателями с короткозамкнутым ротором, которые предназначены для насосов грузовой и балластной систем;
- 5) подруливающее устройство (Bow Thr. motor), мощностью 620 кВт с преобразователем частоты UZ3;

б) система электродвигатель – генератор МG-1 и МG-2, которая необходима для обеспечения высоким качеством напряжения наиболее ответственных потребителей - НОП: система автоматики, пожарная и авральная сигнализация, радионавигация и др. Система МG включает в себя синхронный двигатель с возбуждением от постоянных магнитов и синхронный генератор. Наличие двух систем МG повышает надёжность питания НОП за счёт резервирования;

7) пять трансформаторов - Т1÷Т3 при повышении напряжения на ГЭУ, предназначенных для питания преобразователей частоты UZ1÷ UZ3, и Т4÷Т5 – для понижения напряжения на шинах ГРЩ.

Большая мощность потребителей (ГЭУ, ПУ, насосов и др.) с преобразователями частоты приводит к увеличению $K_{\text{НИ}}$ напряжения в сетях ЕЭС более 10%.

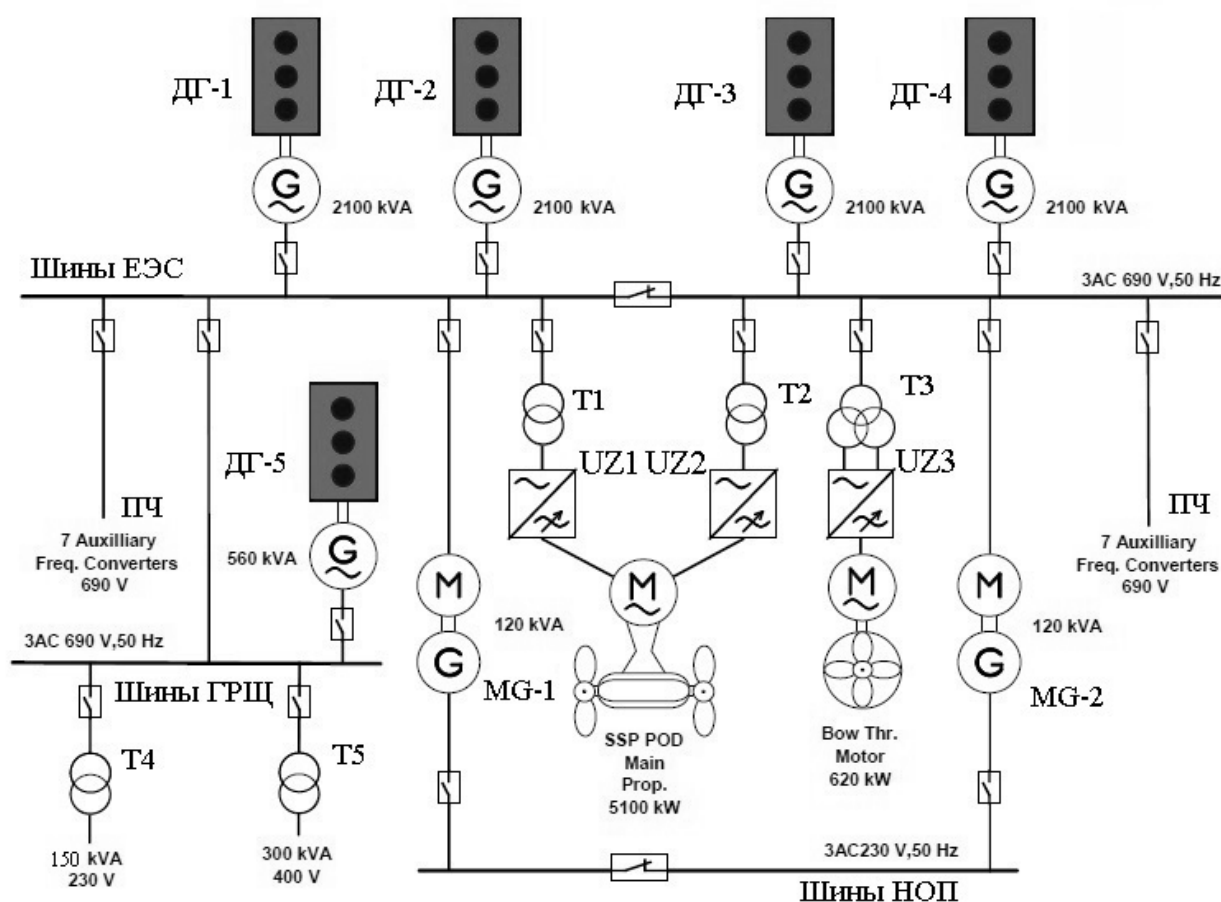


Рис. 1. Функциональная схема ЕЭС химовоза с электродвижением “Prospero”

Поэтому система МG вырабатывает электроэнергию высокого качества и подаёт напряжение на отдельную шину для питания НОП. У данной системы есть недостатки:

- высокие массогабаритные показатели;
- низкий коэффициент полезного действия, $\eta_{\text{общ}} \approx 0,9$;
- сравнительно высокая стоимость.

Пассивные фильтры для питания НОП

На рис. 2, а представлен вариант с общим фильтром. Для увеличения надёжности системы с одиночным фильтром - Ф устанавливают резервный фильтр – РФ такой же мощности. На судах применяется вариант, когда свой фильтр используется на каждый наиболее ответственный потребитель – П, как показано на рис. 2, б. Этот вариант имеет преимущество пе-

ред предыдущем: при выходе из строя одного или нескольких фильтров имеется возможность заменить их, при наличии ЗИПа.

При высоком $K_{ни}$ в сетях ЕЭС необходимо устанавливать фильтры, мощность которых должна быть на 20% больше номинальной мощности приёмников. При этом возрастают их массогабаритные показатели.

Фильтр представляет собой несколько параллельно и последовательно соединенных индуктивностей и ёмкостей [4]. Типы пассивных фильтров показаны на рис. 3. Схема узкополосного резонансного фильтра показана на рис. 3, а. Он позволяет ослабить высшие гармоники, частоты которых близки к частоте 50 Гц. Схема широкополосного фильтра второго порядка показана на рис. 3, б. На заданной частоте, которая устанавливается с помощью R и C, фильтр имеет небольшое сопротивление, благодаря чему происходит ослабление гармоник выше несущей частоты (обычно до 10-й гармоники). Частотную характеристику можно варьировать, у этого фильтра с помощью R. На рис. 3, в показан широкополосный фильтр третьего порядка; его преимущество перед резонансным фильтром второго порядка заключается в том, что потеря энергии на основной частоте и частотах низших гармонических составляющих будет ниже.

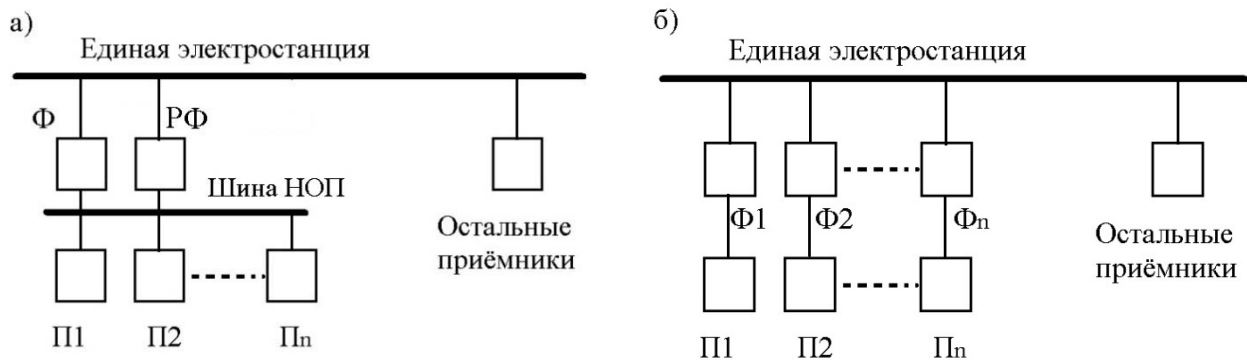


Рис. 2. Блок - схема применения для питания шин НОП с общим фильтром (а); множеством фильтров (б)

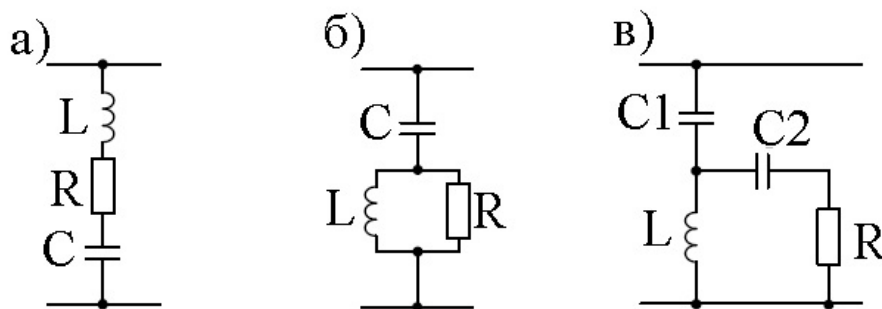


Рис. 3. Типы пассивных фильтров высших гармоник

Дизель - генератор для питания шин наиболее ответственных потребителей

Для питания НОП устанавливается дополнительный дизель - генератор, показанный на рис. 4. У этого варианта, помимо недостатков системы МГ, существуют собственные минусы: необходимость применения переключки между ЕЭС и шиной НОП для бесперебойного питания наиболее ответственных потребителей при выходе из строя дополнительного дизель-генератора; требуется установить пассивный фильтр в переключку.

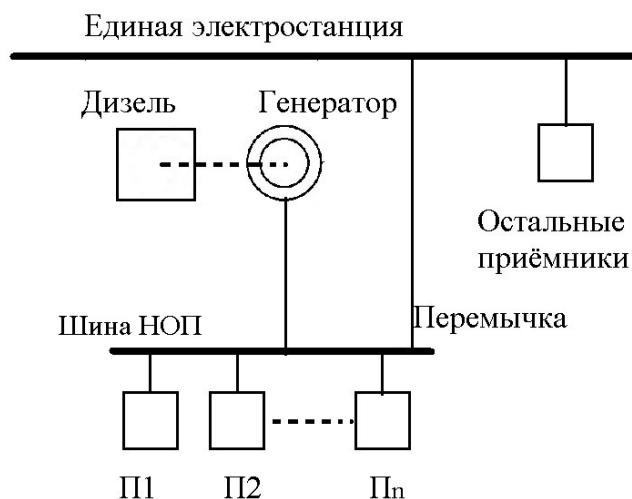


Рис. 4. Блок - схема дополнительного дизель - генератора, работающего на шину НОП

Применение преобразователя частоты для питания шины НОП

Блок - схема преобразователя частоты (ПЧ), работающего на шину НОП, показана на рис. 5 [5]. ПЧ состоит из выпрямителя – В, инвертора – И и фильтра – $L_{\phi}C_{\phi}$.

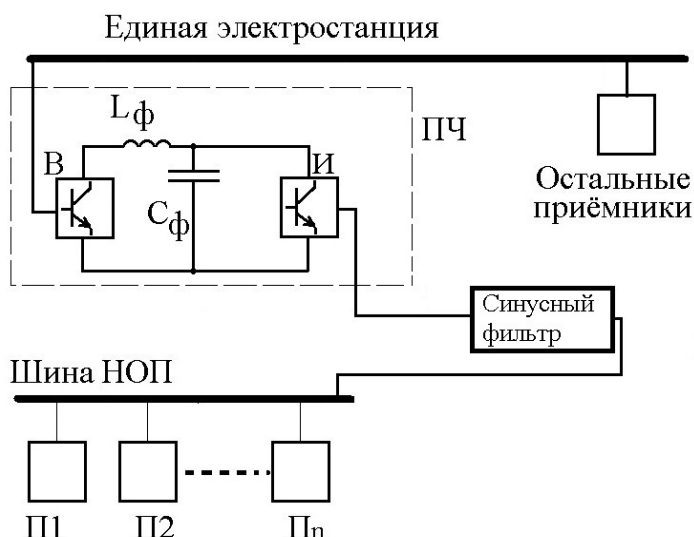


Рис. 5. Блок – схема преобразователя частоты, работающего на шину НОП

Для компенсации нелинейных искажений на выходе ПЧ используется синусный фильтр. Он представляет собой Г-образный фильтр низких частот, состоящий из дросселя и конденсатора малого номинала. Этот вариант позволяет снизить $K_{\text{НИ}} \leq 1\%$ при невысокой стоимости и небольших массогабаритных показателях.

ПЧ сам является источником нелинейных искажений. Однако на судах большой мощности ЭЭС они практически незаметны.

Применение активного компенсатора для питания шин НОП

Блок-схема активного компенсатора - АК[6] в ЭЭС представлена на рис. 6. Принцип действия активного компенсатора, состоит в передаче в сеть высших гармоник напряжения, которые компенсирует высшие гармоники напряжения на шинах единой электростанции в противофазе. АК состоит из блока управления - БУ, блока питания – БП и вольтдобавочных трансформаторов – ВДТ.

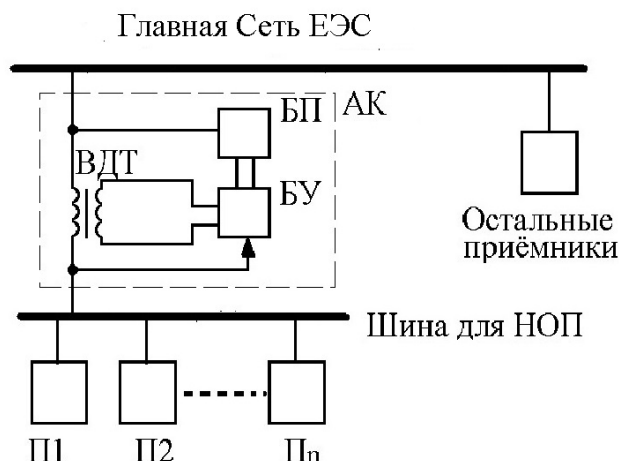


Рис. 6. Блок - схема активного компенсатора в ЭЭС

Блок управления состоит из устройства выделения сигнала суммы высших гармоник напряжения единой электростанции и широтно-импульсного преобразователя, блок питания состоит из трёхфазного мостового выпрямителя.

Активный компенсатор, подключенный к главной сети ЭЭС с $K_{ни}$ 10% и более, снижает коэффициент нелинейных искажений напряжения на шинах НОП до $3 \div 4\%$. АК имеет небольшие массогабаритные показатели и сравнительно низкую стоимость. При установке в активный компенсатор специальный вольтодобавочный гибридный трансформатор тока – напряжения может снизить $K_{ни}$ до $1 \div 2\%$; более чем в два раза уменьшаются массогабаритные показатели трансформаторов.

Недостатками системы с АК являются: низкая надёжность из-за большого количества элементов и ввиду начального этапа внедрения АК в судовые сети, малое применение по сравнению с остальными устройствами.

Два последних метода уменьшения коэффициента нелинейных искажений показывают, что на судах с ЭЭС применение преобразователя частоты для питания НОП практически не оказывает негативного влияния на напряжение судовой электростанции.

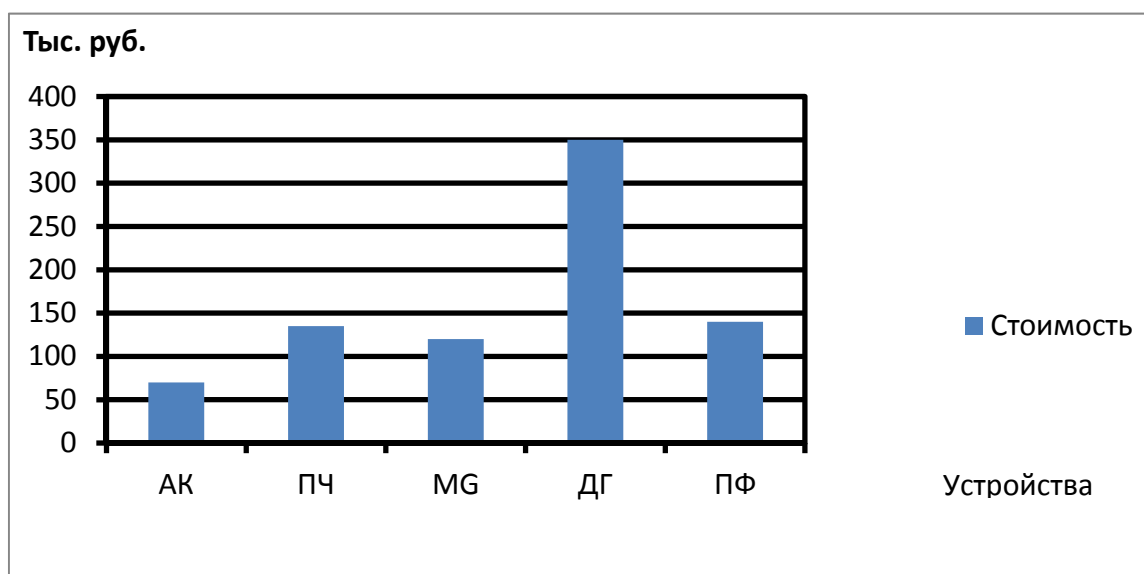


Рис. 7. Стоимость устройств мощностью 30 кВт, для компенсации нелинейных искажений на шинах НОП

При большой мощности наиболее ответственных потребителей применение активного компенсатора позволяет снизить уровень $K_{\text{НИ}}$ до требуемых значений, даже не смотря на то, что мощность источников нелинейных искажений может достигать 85–90 % мощности ЭЭС.

Экономический эффект от применения различных способов компенсации нелинейных искажений представлен на рис. 7. Наиболее выгодный способ - применение активного компенсатора – АК, примерная стоимость не будет превышать 60 000 – 70 000 рублей с учётом применения нового типа вольтодобавочных трансформаторов. Стоимость системы МГ не будет превышать 130 000 рублей. Если применять пассивные фильтры, то стоимость устройства компенсации будет в два раза больше, чем с АК. Применение преобразователя частоты с синусным фильтром не превысит двукратную стоимость АК. Отдельный дизель - генератор для питания шин НОП будет стоить 300 000 – 450 000 рублей, в зависимости от производителя. Данная стоимость была получена для мощности наиболее ответственных потребителей 25 кВА, требуемая мощность устройства активной компенсации, фильтра или дополнительного дизель - генератора составляет 30 кВА.

Библиографический список

1. Российский Морской Регистр Судоходства. Правила классификации и постройки судов (в 4-х томах). Т. 3. – СПб., 2015.
2. Российский Речной Регистр. Правила классификации и постройки судов (в 4-х томах). Т. 3. – М., 2008.
3. Reference list siship cis drive LV Siemens. Каталог электроходов на низком напряжении Siemens, 2014 г.
4. **Боярская, Н. П.** Широкополосные силовые фильтры гармоник / Н.П. Боярская, В. П. Довгун, Е. С. Шевченко, Д. Э. Егоров // Ползуновский вестник. – 2013. – № 4-2. – С. 34-38.
5. **Коробко, И.Г.** Регулирование выходного напряжения преобразователя частоты дизель – генераторного агрегата с изменяемой частотой вращения // Вестник ВГАВТ. – 2016. – №48. – С. 279-285.
6. **Лебедев, В.В.** Активный вольтодобавочный компенсатор нелинейных искажений напряжения судовой сети: дисс. ... канд. техн. наук, 2014. Нижний Новгород.

*Дата поступления
в редакцию 20.10.2017*

G.I. Korobko, P.V. Akhlestin

ANALYSIS OF THE VARIANTS OF COMPENSATION OF NONLINEAR DISTORTION OF VOLTAGE IN THE SHIPBOARD NETWORK

FGBOU VO "Volga State University of Water Transport"

The state of the question: The use of powerful nonlinear consumers in the ship power system commensurate with the power of the sources leads to an increase in the nonlinear voltage distortions. This negatively affects the operation of many elements of the power plant and, first of all, the automation system and radio navigation. The solution of the problem for high-quality nutrition of the most responsible consumers is provided, as a rule, through passive or active special devices.

Methods of research: Analytical comparison.

Results: An analytical comparison of the options for compensating of nonlinear voltage distortions showed the expediency of using a frequency converter or an active compensator in the network of a diesel electric motor. These two methods provide a low coefficient of voltage nonlinear distortion (<2.0%), small weight and dimensions and low cost.

Conclusions: The increase in the power of non-linear consumers on ships with propulsion systems leads to an increase in the coefficient of nonlinear voltage distortion in networks of a single electric power system of more than 10%. In this regard, the current direction is the development, creation and implementation of active voltage distortion compensation devices, both in shipboard and autonomous networks.

Key words: ship electric power system, higher harmonics, the most responsible consumers, active compensator, frequency converter, passive filter.

УДК 621

А.Н. Мальцев, О.С. Хватов

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ
НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ С ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ
НА КАНАЛИЗАЦИОННЫХ СТАНЦИЯХ**

ФГБОУ ВО "Волжский государственный университет водного транспорта"

Предложен комплексный подход для определения энергоэффективных режимов работы насосных агрегатов канализационных насосных станций с частотно-регулируемыми приводами. Рассмотрены основные элементы КНС в отдельности и приведено математическое описание для каждого элемента. Получена система уравнений КНС, учитывающая технологические ограничения работы насосных агрегатов с одной стороны и максимальный КПД с другой. Построена зависимость напора от подачи насосного агрегата для разных скоростей вращения с учетом различного значения КПД при работе на гидравлическую сеть с противодавлением. Предложен вариант системы автоматического регулирования на базе fuzzy-регулятора и приведены результаты его работы. Приведены результаты замеров параметров вибрации при практическом внедрении рассматриваемой системы на одну из действующих КНС Нижегородской области.

Ключевые слова: частотное регулирование, экономическая эффективность, канализационные насосные станции.

Вопросам исследования и разработки насосных установок посвящено большое количество научных публикаций отечественных и зарубежных авторов. Среди российских публикаций, в первую очередь, следует назвать фундаментальные работы профессора Б.С. Лезнова и инженерной конторы "Ягорба" [1, 2, 3], профессоров Г.Б. Онищенко и М.Г. Юнькова [4]. Рассмотренные в них способы повышения энергоэффективности регулируемых электроприводов насосных агрегатов явились основой для их широкого практического внедрения на насосных установках и станциях.

Вопросам математического моделирования гидродинамических систем и созданию "виртуального" насосного агрегата посвящены работы профессора В.Г. Николаева [5, 6]. Профессором М.А. Мустафиным получены зависимости связи гидравлических, механических и электрических переменных силового канала центробежного насоса, а также предложен метод расчета частотно регулируемого электропривода насосного агрегата с учетом несинусоидальной формы токов в обмотках электрической машины [7].

Активная работа по энергосбережению в насосостроении и преобразовательной технике ведется зарубежными компаниями, такими как Xylem, Grundfos, KSB, Schneider Electric, Siemens, АВВ и др. [8, 9, 10].

При этом большинство работ, рассматривающих повышение энергоэффективности насосных установок, направлено на область водоснабжения, которая имеет значительно меньше тонкостей технологического процесса, чем процесс водоотведения. В статье предлагается рассмотрение процесса перекачки сточных вод на канализационной насосной станции (КНС), примерная структурная схема которой представлена на рис. 1. Данный тип КНС имеет место на предприятиях судоремонта и судостроения Нижегородской области (г. Бор), таких как ООО "ВОЛГАКОМФЛОТ", ОАО "Завод Нижегородский Теплоход", судоходная компания "ОКА" и др. Основными элементами оборудования КНС являются приемный резервуар, центробежный насос (ЦН), электропривод насоса на основе асинхронного электродвигателя (АД), преобразователя частоты (ПЧ) и системы автоматического регулирования (САР). Актуальность разработки данного вида модели объясняется ее применением на существующих и вновь проектируемых КНС.

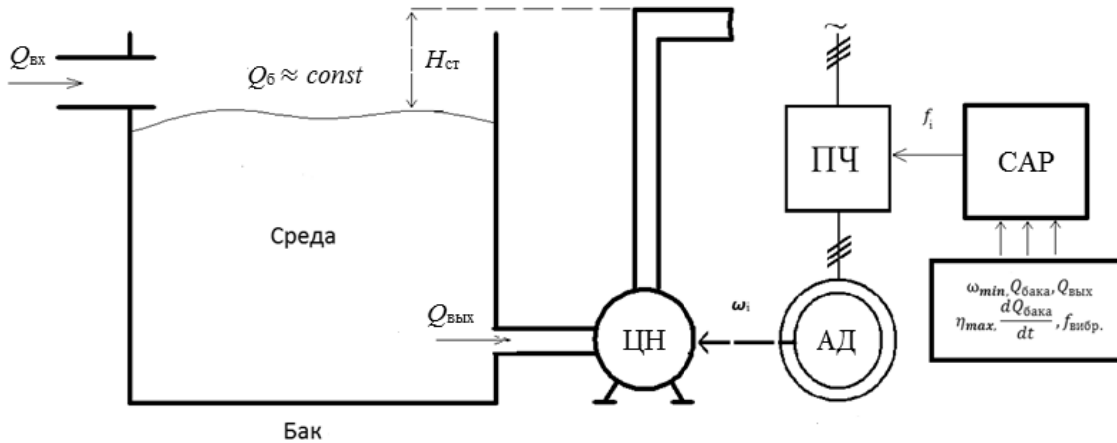


Рис. 1. Структурная схема КНС

Для описания математической модели предложенной системы рассмотрим ее элементы.

1. Приемный резервуар (бак)

Приемный резервуар типовой канализационной станции имеет полукруглую, либо круглую форму с определенной глубиной, которая может отличаться в зависимости от размера самой канализационной станции. Приемный резервуар можно охарактеризовать двумя параметрами: площадью зеркала воды S , m^2 , и высотой h , м. Объем резервуара V , m^3 , соответственно, определяется выражением:

$$V = S \cdot h. \tag{1}$$

В приемное отделение поступает определенное количество стоков $Q_{вх}$, $m^3/ч$, которое может зависеть от множества факторов: день недели, праздничные дни, погодные условия, время года и прочее. Целесообразно пользоваться значением общего коэффициента неравномерности водоотведения $K_{общ}$ или распределением суточного стока по часам суток, если имеются статистические данные о количестве поступаемых стоков на КНС.

Регулятор автоматизированной системы управления станцией будет формировать оптимальную частоту вращения насосного агрегата, которая позволит работать в зоне с максимально возможным КПД и стабилизировать уровень стоков на верхней максимально возможной отметке. Стабилизация уровня в верхнем положении обусловлена минимизацией статической составляющей напора, а значит и увеличением энергоэффективности работы системы [11]. При стабилизации уровня должно обеспечиваться следующее условие:

$$Q_{вх} = Q_{вых} \approx const.$$

Если известно предполагаемое количество поступаемых на КНС стоков, можно прогнозировать потенциал энергосбережения станции еще на стадии проектирования.

2. Центробежный насос

Рассмотрим центробежный насос с точки зрения прикладной аналитической гидромеханики [12], где он представлен как система, состоящая из последовательно соединенных четырех участков $i=1,2,3,4$: подводящий канал ($i=1$), рабочее колесо ($i=2$), отводящий канал ($i=3$), диффузор ($i=4$), обменивающихся в узлах соединения потоками жидкости. Рабочее колесо (участок $i=2$) представлено в виде K одинаковых, соединенных, параллельно вращающихся относительно неподвижной оси каналов. Характеризуемый объемным расходом поток Q , протекающий через участки $i=1,2,3,4$, рассматривается как одно неразрывное целое. Поток в каждом из k каналов рабочего колеса составляет $Q_k = \frac{Q}{K}$ (рис. 2).

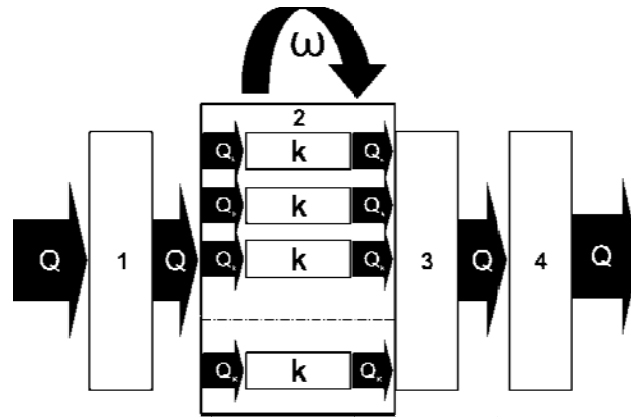


Рис. 2. Предлагаемая структурная схема разбиения центробежного насоса

Ввиду относительно небольшого размера рабочих колес (до $D=525$ мм) насосных агрегатов промышленной серии (СМ, СД), которые обычно устанавливаются на КНС, а также минимального количества лопастей (обычно 2), участок $i=2$ на рис. 2 можно рассматривать упрощенно, в качестве одного канала, вращающегося вокруг неподвижной оси. Данное допущение значительно упростит математические расчеты.

Известна математическая модель нестационарных механических и гидродинамических процессов в ЦН, выразим угловую скорость вращения рабочего колеса для стационарного режима работы при производной скорости вращения рабочего колеса и потоке жидкости, равной нулю [13]:

$$\omega = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^4 [(p_i)_1 - (p_i)_2] + \beta_{Q4} Q^2 - \sum_{i=1,3,4} \Delta p'_i(Q) - \frac{K\rho\zeta'_2(\omega)Q^2}{2(S_2)_1^2} + \sum_{i=1}^4 G_i}{\beta_{Q3}}}; \quad (2)$$

где p_1, p_2 - давление во входном и выходном сечениях канала;

$\sum_{i=1}^4 \Delta p'_i(\omega, Q)$ функция, характеризующая общие потери давления в гидродинамической подсистеме;

$\Delta p'_2(Q, \omega) = \frac{K\rho\zeta'_2 Q^2}{2(S_2)_1^2}$ - функция, описывающая гидравлические потери в рабочем колесе

(участок $i = 2$ гидродинамической подсистемы);

β_{Q3}, β_{Q4} - коэффициент приведения, дифференциальных уравнений к форме Коши (более подробно описано в [13]);

$\sum_{i=1}^4 G_i$ - сила тяжести, действующая на ограничивающий элементарный объем сечения.

Для упрощения расчетов полагаем, что коэффициент сопротивления рабочего колеса ζ'_2 не зависит от частоты его вращения и равен константе.

3. Система ПЧ – АД

Чаще всего на практике в насосных установках используется ПЧ общего назначения (см. рис. 1), которые обеспечивают соотношение параметров питающего напряжения на статоре АД согласно:

$$\frac{U_{1i}}{f_{1i}} = \text{const},$$

где U_{li}, f_{li} - текущие значения напряжения и частоты на обмотке статора АД, соответственно.

Данный закон формирования питающего напряжения на статоре АД обеспечивается средствами широтно-импульсного управления инверторной группы (блока) ПЧ (рис. 3). Зависимость угловой частоты вращения АД от частоты питающего напряжения выражается формулой [14]:

$$\omega = \frac{60 \cdot f_{1j}}{p} \cdot (1 - s), \quad (3)$$

где p – количество пар полюсов АД; s – скольжение ротора АД.

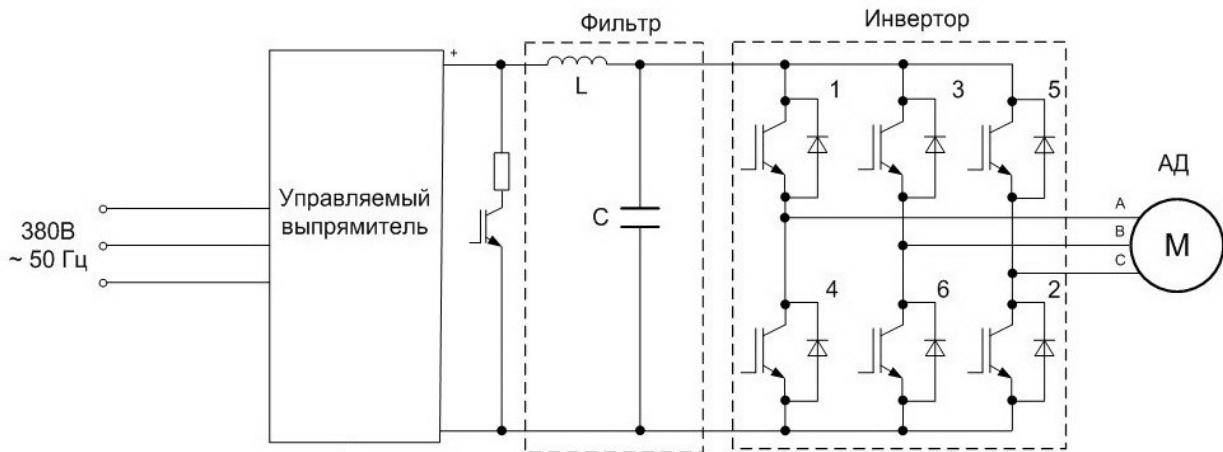


Рис. 3. Схема ПЧ инверторного типа

4. Ограничения системы

Рассмотрим ограничения, накладываемые на систему автоматического регулирования, связанные с особенностями технологического процесса водоотведения. В [2] показано, что при скорости вращения, составляющей 10-15% от номинальной, нарушается однозначная зависимость между напором и подачей насоса. Это объясняется тем, что при уменьшении частоты вращения скорость движения воды в насосе уменьшается и при некотором критическом значении скорости изменится характер движения воды, течение перестанет быть турбулентным и наступит неопределенный переходный режим. Следовательно, для того, чтобы исключить попадание в данный режим, необходимо ограничить минимально допустимую скорость вращения на уровне 10-15% от номинальной скорости.

Заметим, что при работе насосного агрегата с противодавлением, нельзя использовать формулы приведения для определения напорных характеристик. Учитывая, что характеристика гидравлической сети пересекает ось напора в точке с подачей насоса равной нулю, можно вывести минимальную скорость вращения насосного агрегата при равенстве статической составляющей напора и напора, развиваемого насосом. Данное ограничение скорости вращения будет зависеть только от характеристики гидравлической сети, и определяться выражением:

$$\omega_{\min} = \omega_{\text{ном}} \cdot \sqrt{\frac{H_{\text{п}}}{H_{\text{ф}}}}, \quad (4)$$

где $H_{\text{п}}$ – противодействие в системе подачи воды, м; $H_{\text{ф}}$ – фиктивный напор при нулевой подаче, м.

Необходимо также учитывать ограничение, исключающее заиливание гидросооружений. Руководствуясь актуализированной редакцией СНиП 2.04.03-85 «Канализация. Наружные сети и сооружения» от 2012 года [15] следует, что скорость потока канализационных вод при отсутствии измельчителей и песколовков, необходимая для самоочистки должна состав-

лять 0,7 - 1 м/с. Скорость потока может быть снижена до значения 0,5 м/с при применении механической очистки сточных вод: песколовки, измельчители, решетки с механическим дроблением и т.д. Данное ограничение скорости выражается формулой [16]:

$$\omega_{\min} \geq \omega_{\text{ном}} \cdot \sqrt{\left(\frac{A \cdot v}{Q_6}\right) \cdot \left(1 - \frac{H_n}{H_\phi}\right) + \frac{H_n}{H_\phi}}, \quad (5)$$

где Q_6 – наибольшая для данной насосной установки подача за расчетный период, м³/ч; $\omega_{\min}, \omega_{\text{ном}}$ – минимальное и номинальное значение частоты вращения насоса соответственно, с⁻¹; v – скорость потока, м/с, в поперечном сечении гидравлического участка сети A , м².

Фактически все КНС имеют статическую составляющую напора. Методы расчета КПД при наличии статической составляющей напора изложены в [1, 4, 7]. В статье предлагается определять КПД через аппроксимирующую функцию скорости вращения рабочего колеса насосного агрегата [7]:

$$\eta_{\text{ун}}(\omega, H_c) = a_0 + a_1 \sqrt{\omega^2 - \frac{H_c}{H_0}} + a_2 \left(\omega^2 - \frac{H_c}{H_0}\right) \rightarrow \max. \quad (6)$$

Уравнения (1) - (6), объединенные в единую систему, являются основой для определения режимов работы КНС при условии обеспечения максимальной энергоэффективности:

$$\left\{ \begin{array}{l} V = S \cdot h = Q_{\text{ex}} \cdot t, \text{ где } h \rightarrow \max; \\ \omega = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^4 [(p_i)_1 - (p_i)_2] + \beta_{Q4} Q^2 - \sum_{i=1,3,4} \Delta p_i(Q) - \frac{K\rho\zeta'_2 Q^2}{2(S_2)_1^2} + \sum_{i=1}^4 G_i}{\beta_{Q3}}}; \\ \omega = \frac{60 \cdot f_1}{p} \cdot (1 - s); \\ \omega_{\min} \geq 0.1 - 0.15 \cdot \omega_{\text{ном}}; \\ \omega_{\min} = \omega_{\text{ном}} \cdot \sqrt{\frac{H_n}{H_\phi}}; \\ \omega_{\min} \geq \omega_{\text{ном}} \cdot \sqrt{\left(\frac{A \cdot v}{Q_6}\right) \cdot \left(1 - \frac{H_n}{H_\phi}\right) + \frac{H_n}{H_\phi}}; \\ \eta_{\text{ун}}(\omega, H_c) = a_0 + a_1 \sqrt{\omega^2 - \frac{H_c}{H_0}} + a_2 \left(\omega^2 - \frac{H_c}{H_0}\right) \rightarrow \max. \end{array} \right. \quad (7)$$

На рис. 4 представлена зависимость $H=f(Q)$ насосного агрегата КНС при работе с противодействием. Также указаны области работы насоса с различным значением КПД. Данная зависимость удобна для наглядного определения скоростных зон эффективной работы насоса.

Ввиду того, что полученная модель КНС хотя и имеет строгое математическое описание, но нахождение всех переменных уравнений в условиях практического применения является достаточно сложным и емким процессом, а также наличие нелинейностей в (7) и необходимость узких экспертных знаний технологии самого процесса позволяют нам отойти от принципов классической теории автоматического управления и использовать методы нечет-

кой логики (FUZZY-логики). Результат работы виртуальной модели fuzzy-регулятора для канализационной насосной станции представлен на рис. 5, а, б.

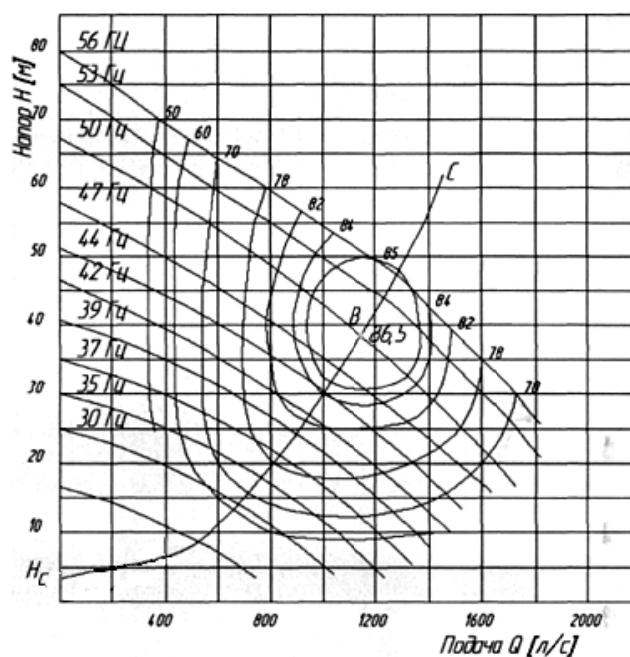
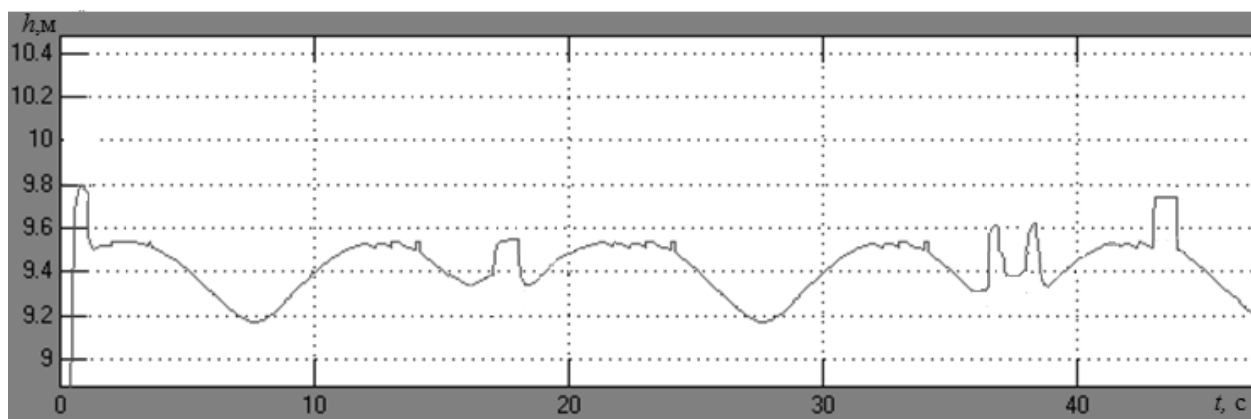
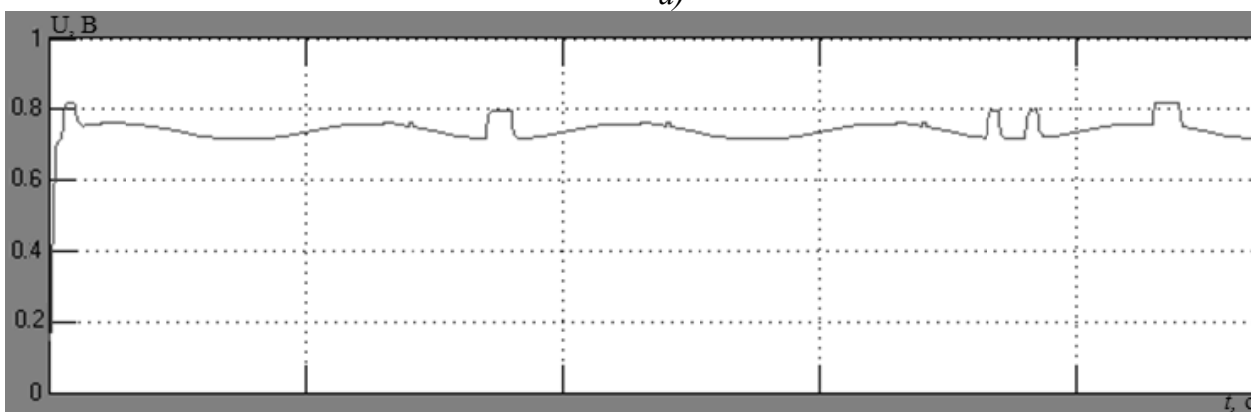


Рис. 4. Зависимость $H=f(Q)$ насосного агрегата КНС для различных скоростей вращения



а)



б)

Рис. 5. Результат работы имитационной модели fuzzy-регулятора:
 а – текущее значение поступающих стоков (уровень резервуара);
 б – реакция регулятора на изменения уровня поступающих стоков

На основе имеющегося практического опыта было выявлено, что при внедрении частотного регулирования на КНС, где гидравлическая сеть имеет большую статическую составляющую напора, могут наблюдаться резонансные колебания на определенных частотах. Результаты практических исследований колебаний с максимальной амплитудой приведены на рис. 6.

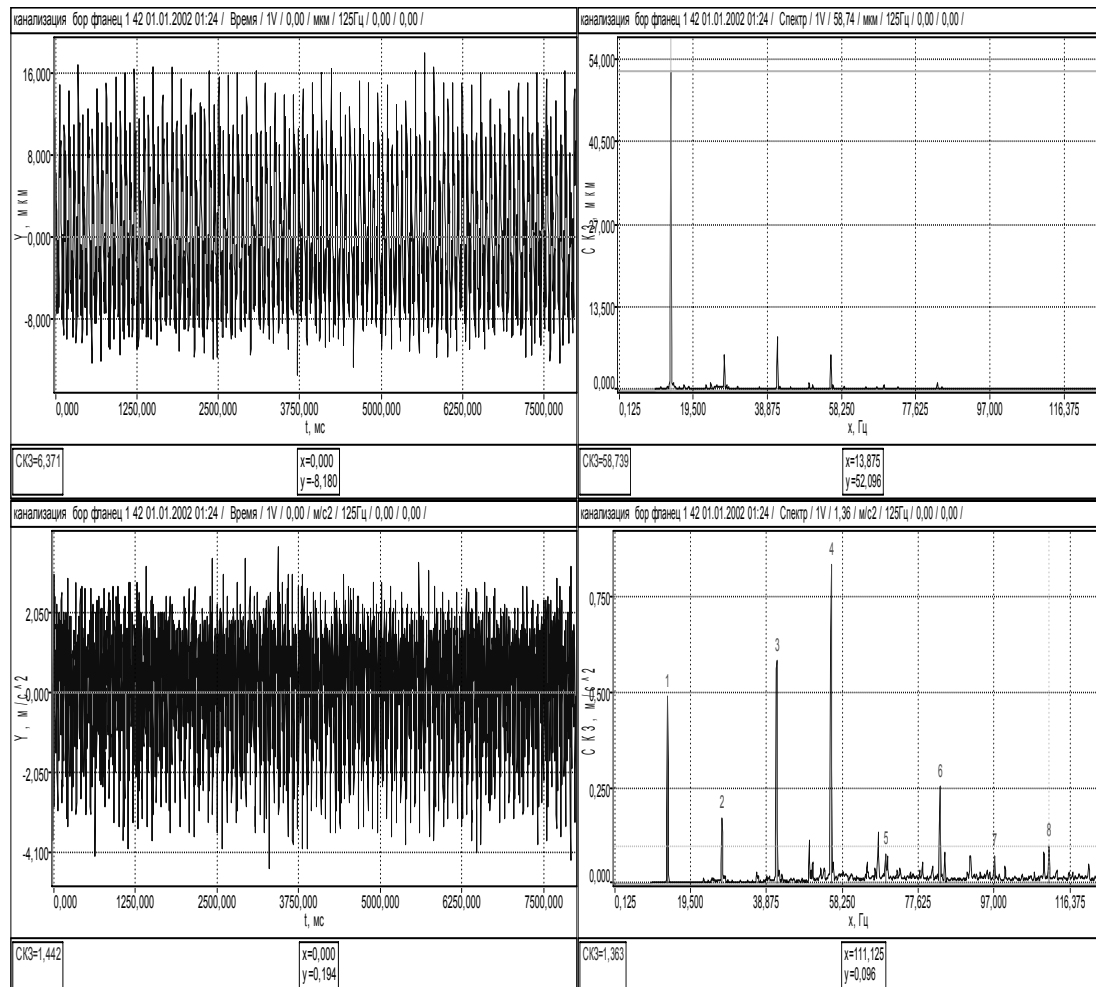


Рис. 6. Исследование резонансных колебаний напорного коллектора КНС

Из графика видно, что максимальная амплитуда колебаний возникает на частоте 42 Гц и составляет 40 мкм, а виброускорение в данном случае составило $0,833 \text{ м/с}^2$. Это обусловлено тем, что частоты пульсаций параметров внутреннего потока жидкости могут оказаться близкими к одной из собственных частот поперечных колебаний трубопровода, в результате чего могут реализоваться резонансные колебания. Очевидно, что работа электропривода при частотах, близких к 42 Гц, в данном практическом примере должна быть исключена.

Выводы

Полученная система уравнений (7) позволяет определять энергоэффективные режимы работы насосов с частотно-регулируемыми электроприводами в составе КНС при учете имеющихся технологических ограничений по скоростным зонам работы.

Библиографический список

1. Лезнов, Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздухоудвнных установках / Б.С. Лезнов. – М.: Энергоатомиздат, 2006. – 360 с.
2. Лезнов, Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных установках / Б.С. Лезнов. – М., 1998. – 180 с.

3. Лезнов, Б.С. Частотно регулируемый электропривод насосных установок / Б.С. Лезнов. – М.: Машиностроение, 2013. – 176 с.
4. Онищенко, Г.Б. Электропривод турбомеханизмов / Г.Б. Онищенко, М.Г. Юньков. – М.: Энергия, 1972. – 240 с.
5. Николаев, В.Г. Энергосберегающие методы управления режимами работы насосных установок систем водоснабжения и водоотведения: дис. ... д-ра тех. наук. – М., 2010. – 375 с.
6. Николаев, В.Г. Энергосберегающие способы управления насосным оборудованием канализационных насосных станций / В.Г. Николаев, И.В. Барсук // Сборник трудов научно-технической конференции. МИКХиС, 2007. – 158 с.
7. Мустафин, М.А. Энергосберегающие системы электроприводов насосных агрегатов: автореф. дис. ... д-ра тех. наук. Алматы, 2007. – 43 с.
8. Antriebsbaueinheit fur eine Kreiselpumpe. GRUNDFOS A/S, Strom Niels Jorgen, Skafsgaard Martin Byskov, Sorenaen Truels (Vottmann, Heiko et al Patenanwalte Wilcken & Vottmann, Bei der Lohmuhle 23 23554 Lubeck), №04015972.5.
9. KSB AG // Pump Industry Analyst. Germany. 2005, Issue 11, November 2005. – P. 5.
10. Economical Aspects of Variable Frequency Drives in Pumping Stations. 1994, ITT Flygt System Engineering.
11. Лезнов, Б.С. Технические основы энергосбережения в насосных установках / Б.С. Лезнов, В.Б. Чебанов // Водоснабжение и санитарная техника. – 2004. – №7.
12. Лурье, А.И. Аналитическая механика / А.И. Лурье. – М.: Гл. ред. физ.-мат. лит., 1961. – 824 с.
13. Русецкая, Г.В. Разработка средств исследований нестационарных механических и гидродинамических процессов в центробежных насосах на стадии проектирования: дис. ... д-ра техн. наук. Н.Новгород, НГТУ им Р.Е.Алексеева, 2010.
14. Булгаков, А.А. Частотное управление асинхронными электродвигателями / А.А. Булгаков. – М.: Энергоиздат, 1982. – 216 с.
15. СНиП 2.04.03-85 «Канализация. Наружные сети и сооружения». – М., 2012. – 141 с.
16. Мальцев, А.Н. Техническая актуальность автоматизации канализационных станций на базе преобразователя частоты и программируемого логического контроллера / А.Н. Мальцев, В.А. Тихомиров, О.С. Хватов // Вестник ВГАВТ. – 2015. – №42.

*Дата поступления
в редакцию 06.10.2017*

A.N. Maltsev, O.S. Khvatov

THE DEFINITION OF ENERGY EFFICIENT MODES IN PUMPING UNITS OPERATION WITH VARIABLE FREQUENCY DRIVES AT THE SEWER STATIONS

Volga State University of Water Transport

Purpose: the definition of a comprehensive approach for defining energy-efficient operation modes of pumping units sewage pumping stations with variable frequency drives.

Design/methodology/approach: Describes the main elements of the SPS separately and the mathematical descriptions for each item.

Findings: The resulting system of equations of the SPS, taking into account the technological constraints of pumping units on the one hand and maximum efficiency on the other.

Research limitations/implications: The dependence of the pressure from the feed pump unit for different speeds of rotation taking into account the different values of efficiency when working on hydraulic network backpressure. The proposed system of automatic control based on fuzzy controller and the results of its work. The results of measurements of vibration parameters in the practical implementation of the system on one of the existing SPS in Nizhny Novgorod region.

Originality/value: the obtained mathematical model in conjunction with the use of the fuzzy-regulator will improve the energy efficiency of sewage pumping stations.

Key words: frequency regulation, economic efficiency, sewage pumping station.

УДК 615.47

О.О. Новожилова, А.Г. Мелузов, Н.Л. Иванова

АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ В МЕДИЦИНСКОЙ ПРАКТИКЕ

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева

Рассмотрены принципиальные возможности использования в медицинской практике ядерного реактора, как специализированного инструмента для проведения лучевой терапии. Приводятся физические характеристики одного из перспективных видов лучевой терапии – нейтронно-захватной. Представлен обзор зарубежных и отечественных ядерных установок и проектов, предназначенных для данной цели. Сформулированы базовые требования к ядерной установке как специализированному медицинскому инструменту.

Ключевые слова: ядерный реактор, лучевая терапия, нейтронно-захватная терапия.

Одной из проблем современной клинической медицины является борьба с онкологическими заболеваниями. Наряду с традиционными способами лечения в настоящее время перспективным направлением представляется нейтронная терапия, обладающая высокой эффективностью за счет более выраженного повреждающего действия раковых клеток по сравнению с электронами, рентгеновским и γ -излучением.

Нейтронная терапия подразделяется на два вида: нейтронно-захватная (НЗТ) и терапия быстрыми нейтронами или нейтронно-соударная (НСТ).

Идея НЗТ была сформулирована в 1936 году после открытия нейтрона. Ее физические основы просты и элегантны. Это бинарная система, использующая два отдельных компонента для создания терапевтического эффекта. Каждый компонент в отдельности не обладает противоопухолевыми свойствами, но их комбинация производит высокий летальный эффект. Первый компонент – нетоксичный, нерадиоактивный изотоп, обладающий большим сечением поглощения нейтронов (сотни тысячи барн), который селективно накапливается или вводится в опухолевые ткани, например, изотопы бор-10, гадолиний-64 и кадмий-113 (в эксперименте). Второй – пучок плотноионизирующего излучения необходимой геометрической формы и спектрального состава (медленные нейтроны). Таким образом, достигается прицельное (таргетное) уничтожение опухолевых и сохранение здоровых клеток.

В результате поглощения нейтрона изотопом бора-10 образуется возбужденное ядро бора-11, которое за 10^{-12} секунды распадается на ядро лития-7 и альфа-частицу, разлетающиеся с большой энергией. В 6 % случаев их суммарная энергия 2,8 МэВ, а в 94 % – 2,3 МэВ, поскольку 0,48 МэВ выносится гамма-квантом. Эти заряженные частицы быстро тормозятся: ядро лития на длине 5 мкм, альфа частица на 7 мкм. Поскольку размер клетки порядка 10–12 мкм, то 80 % энергии ядерной реакции выделяется именно в той клетке, которая содержала ядро бора, которое поглотило нейтрон. Терапевтический эффект при этом достигается в основном за счет разрыва одной или двух спиралей нитей ДНК заряженными продуктами ядерных реакций медленных нейтронов с изотопом бора-10 (рис. 1).

Если оставить проблему доставки дозообразующих ^{10}B -содержащих препаратов к опухоли, то следующим шагом является создание интенсивного источника нейтронов, желательного различных энергий для проведения разных типов терапии. Нейтроны можно получать в результате реакций деления в ядерном реакторе или в теле мишени ускорительно-управляемой системы.

В настоящее время для нейтронной терапии используются медицинские пучки нейтронов, получаемые на многоцелевых исследовательских реакторах. Поэтому представляется целесообразным создание специализированного медицинского реактора с пучком нейтронов заданных параметров как медицинского инструмента, с возможностью расположения его непосредственно в клинике.

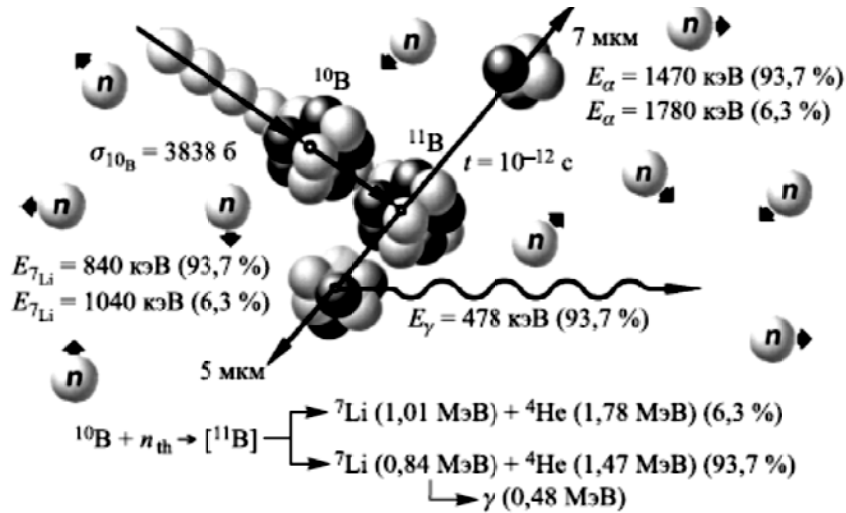


Рис. 1. Схема и характеристики продуктов ядерной реакции

Минимально допустимый набор основных характеристик терапевтических пучков промежуточных нейтронов представлен в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики “in air” пучков нейтронов, предназначенных для НЗТ

	$\Phi_{\text{tot}}/\Phi_{\text{epi}} \times 10^9, \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	«Загрязнение» пучка				$J_{\text{epi}}/\Phi_{\text{epi}}$	Средняя энергия, МэВ
		$\Phi_{\text{fast}}/\Phi_{\text{tot}}, \%$ $\times 100$	$\Phi_{\text{th}}/\Phi_{\text{tot}}, \%$ $\times 100$	$D_{\gamma}/\Phi_{\text{epi}}, \text{ сГр} \cdot \text{см}^2 \times 10^{-11}$	$D_{\text{fast}}/\Phi_{\text{epi}}, \text{ сГр} \cdot \text{см}^2 \times 10^{-11}$		
Парадигма НЗТ	≥ 1	$\rightarrow 0$	$\rightarrow 0$	$< (2 - 5)$	$< (2 - 5)$	$\geq 0,7$	
MITR (США)	4,2/?			1,3	4,3	0,84	
ТАПИРО (Италия)	1,1/0,80	6	20	6,74	4,25	0,81	0,0087
МАРС (Россия)	1,5/1,0	13	6	6,14	11,8	0,75	0,036

Эталонным для проведения НЗТ считается пучок, получаемый на исследовательском реакторе Массачусетского технологического университета (рис. 2). Это реактор бакового типа, мощностью 6 МВт, охлаждаемый легкой водой и использующий в качестве отражателя тяжелую воду. Топливом служит высокообогащенное урановое топливо в виде уран-алюминиевой металлокерамики с алюминиевой оболочкой. Максимальная температура теплоносителя 55 °С.

Следующим является исследовательский реактор ТАПИРО (Италия) (рис. 3). Это быстрый реактор максимальной мощностью 5 кВт, охлаждаемый гелием. Топливом служит гомогенное высокообогащенное уран-молибденовое топливо, выполненное в виде цилиндра радиусом 6 см и высотой 11 см с цилиндрическим медным отражателем (толщиной 30 см) и сферической борированной бетонной защитой (толщиной 170 см). Каналы различных размеров и с различными спектрами нейтронов распределены вокруг сердечника. В большую тепловую колонну (2 м³) могут устанавливаться сменные экспериментальные сборки для проведения различных исследований. При максимальной мощности 5 кВт самый высокий поток $4,0 \cdot 10^{12} \text{ н/см}^2/\text{с}$ ($8,0 \cdot 10^{11} \text{ н/см}^2/\text{с}$ с энергией $E > 1,35 \text{ МэВ}$) доступен в середине сердечника через диаметральный канал.

У него имелся один существенный недостаток: «шибер», дающий поле квадратной формы с размерами 12×12 см и 20×20 см, что существенно превышает размеры любой опухоли. Но на нем предложено и проведено несколько сеансов НЗТ на органах, извлеченных из тела пациента (печень), что также в будущем может оказаться очень перспективным.

НЗТ было основной деятельностью в течение нескольких лет, однако из-за проблем финансирования и разрешений для терапии пациентов эта деятельность была закрыта.

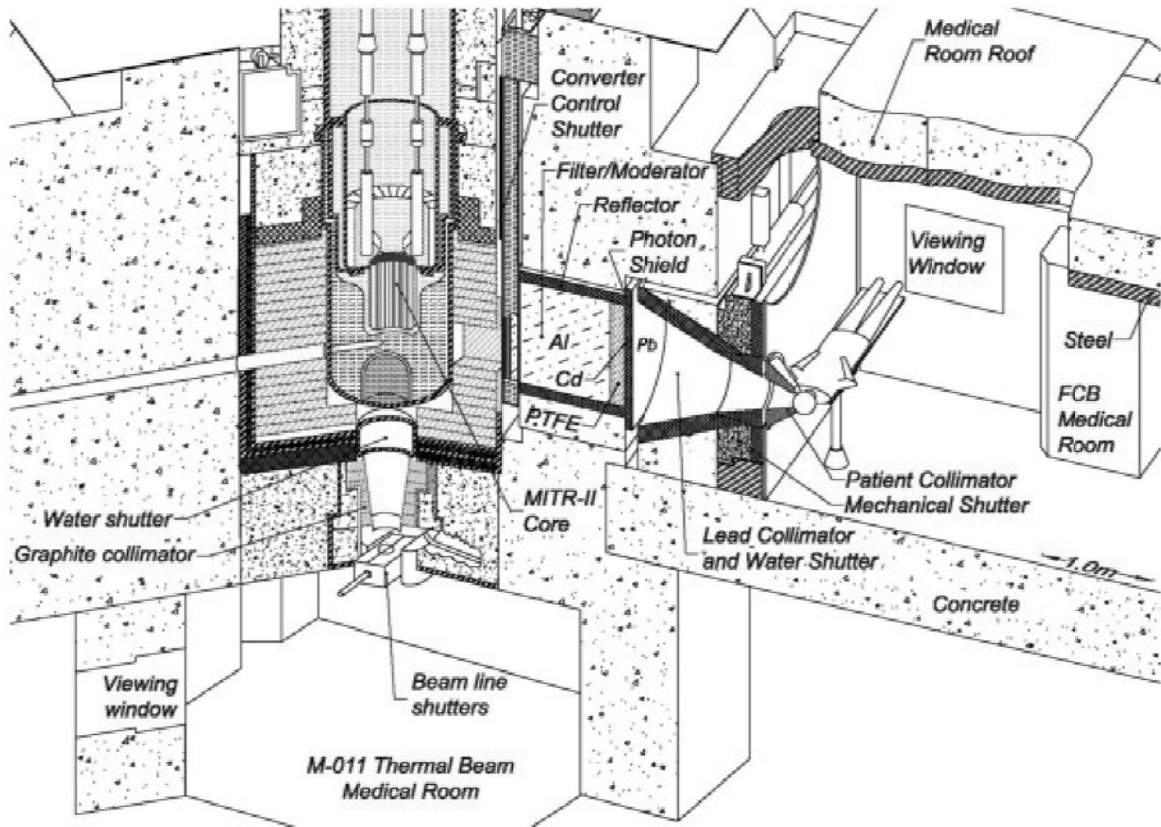


Рис. 2. Принципиальная схема исследовательского реактора Массачусетского технологического института

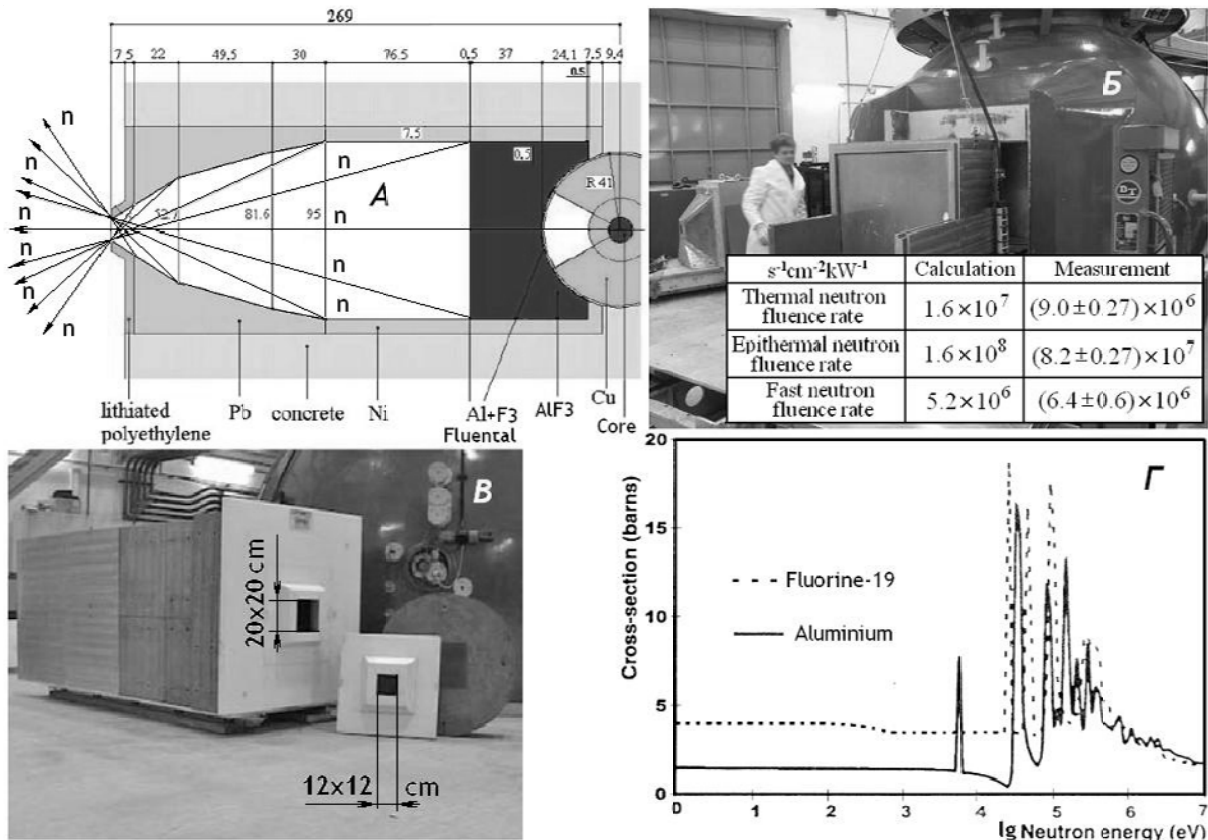
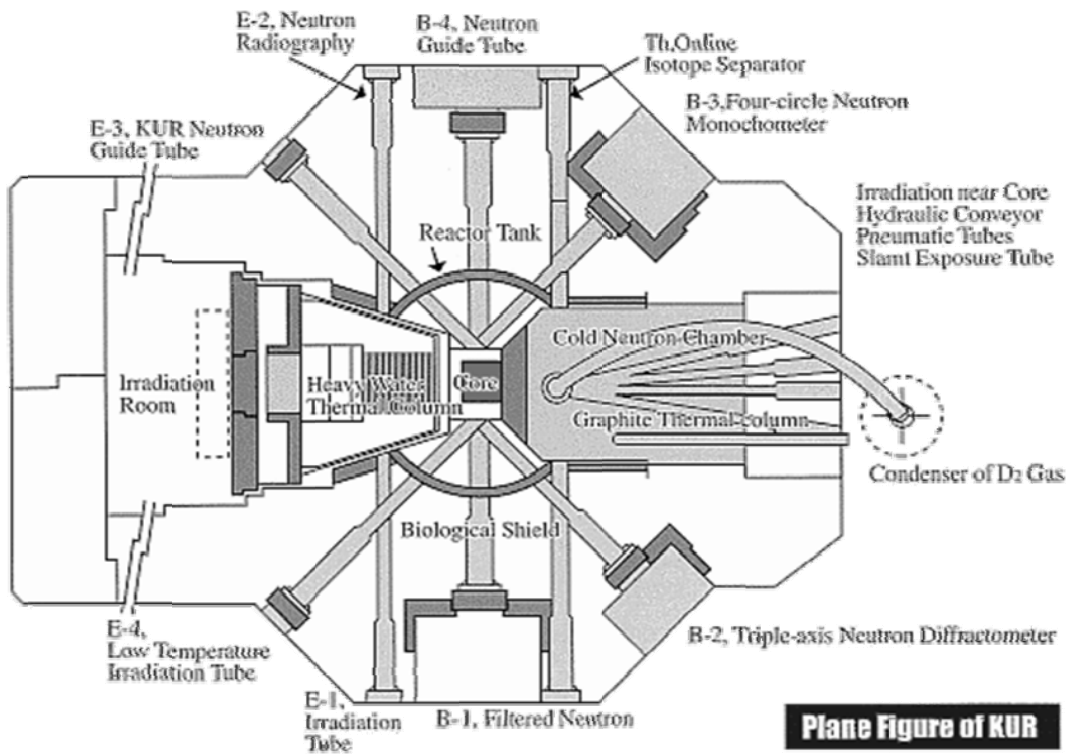
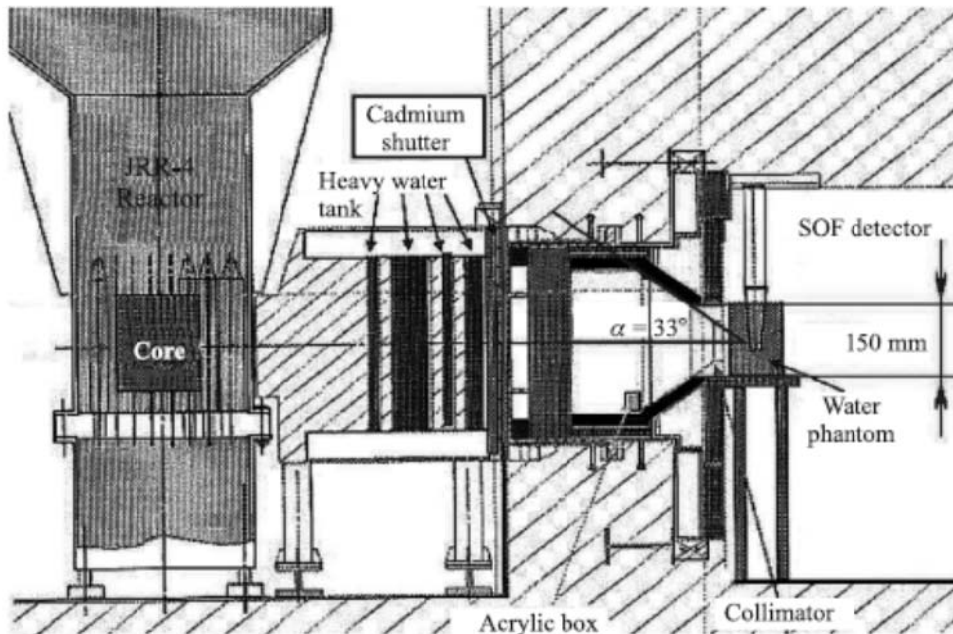


Рис. 3. Исследовательский реактор TAPIRO (Италия)

Самое большое количество пациентов, подвергшихся НЗТ, наблюдается в Японии, где функционировало два исследовательских реактора с терапевтическими пучками для НЗТ, например, реакторы университета Киото и JRR4 (Агентство атомной энергии) (рис. 4).



a)



JRR-4	1999–2006	3.5 MW thermal mode	$1.9 \cdot 10^9$
		Epithermal mode	$2.6 \cdot 10^9$
		Mix mode	$2.9 \cdot 10^9$
		$J_n \text{ epith} / \Phi_n \text{ epith}$	0.71

b)

Рис. 4. Исследовательские реакторы KURRI (a) и JRR4 (b) применявшиеся для целей нейтронно-захватной терапии

В России разрабатывается проект реактора МАРС (медицинский америциевый реактор солевой). Это реактор с топливом на основе $^{242\text{m}}\text{Am}$ для нейтронной терапии. Общие характеристики следующие: тепловая мощность не выше 10 кВт, плотность потока нейтронов в месте расположения пациента не менее $1 \cdot 10^9$ н/см²с, отношение дозовых нагрузок по гамма-излучению и нейтронам не более 0,2. Реактор представляет собой цилиндрический объем, в котором помещено топливо – водный раствор $\text{Am}_2(\text{SO}_4)_3$ и теплоноситель – вода. Топливо и теплоноситель конструктивно разделены между собой. Теплообмен осуществляется путем естественной циркуляции. Система управляющих стержней расположена в бериллиевом отражателе. Масса америция (100% $^{242\text{m}}\text{Am}$) составляет около 19 г, что обеспечивает в холодном состоянии реактора $K_{\text{эфф}} = 1,02$. При выбранной конструкции реактора температура топлива не превышает 80°C, а максимальная температура воды в контуре естественной циркуляции не превышает 60°C. Пучок нейтронов выводится с торца активной зоны реактора. Для формирования и фильтрации пучка нейтронов, для снижения потока гамма-излучения используется фильтр. Плотность потока нейтронов на выходе пучка составляет $3 \cdot 10^9$ н/см²с (рис. 5).

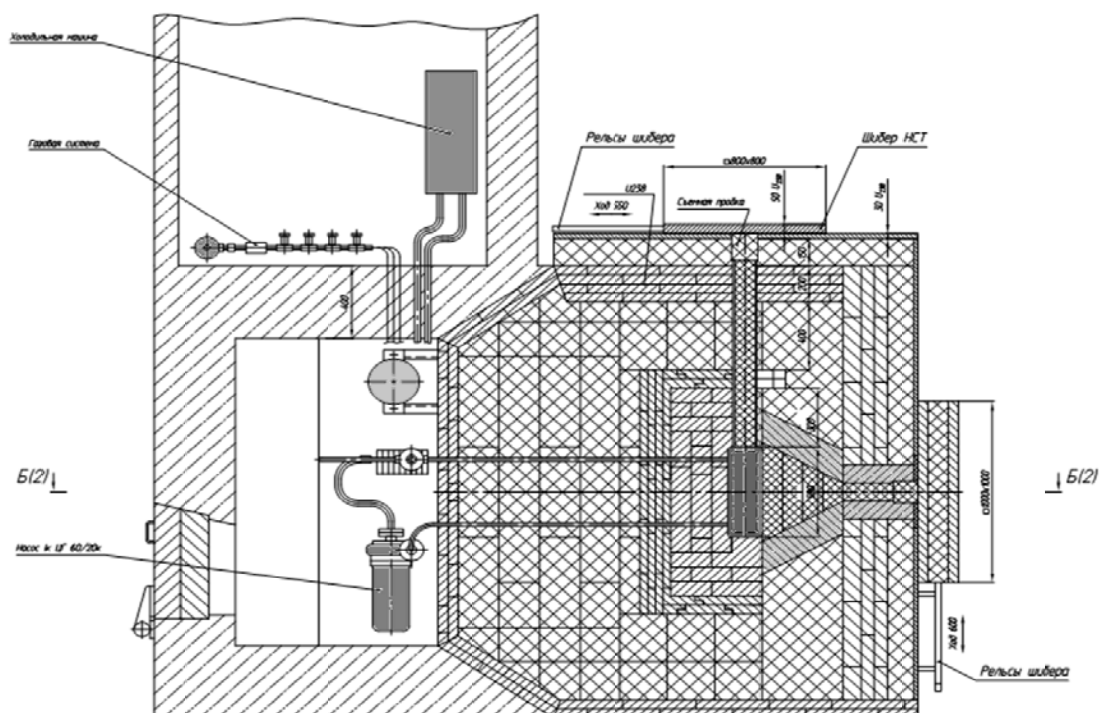


Рис. 5. Конструкция РУ МАРС

Таким образом, стоит задача создания реактора, на котором можно было бы создавать терапевтические пучки нейтронов и проводить лечение по принципу НЗТ. И, как показывает опыт, на данном реакторе должны быть предусмотрены как минимум два канала для терапевтических пучков и плюс каналы диагностического и исследовательского характера.

Если мы будем говорить о специализированном реакторе, то какими характеристиками он должен обладать, если считать, что пучок удовлетворяет всем медицинским требованиям? В первую очередь, реактор должен быть безопасным, поскольку речь идет об установке в медицинском центре, в крупном городе с миллионным населением. Любые запроектные аварии с тяжелыми последствиями должны быть исключены. Реактор должен обладать внутренне присущей безопасностью. Отсюда вытекает и простота в управлении, так как в идеале управлять им должен небольшой штат инженеров, который сможет позволить себе крупный медицинский центр (2-3 человека).

Для обеспечения нераспространения делящего материала, во-первых, в качестве топлива должен применяться низкообогащенный или природный уран, рабочая кампания должна

быть рассчитана на 10-15 лет. Во-вторых, конструкция реактора должна предусматривать возможность смены целиком корпуса реактора со всем технологическим оборудованием первого контура (концепция одноразового блока, который просто меняется). На заводе по переработке ОЯТ этот блок вскрывается и из него извлекается активная зона.

Так как реактор устанавливается непосредственно в медицинском центре, то он должен иметь приемлемые массогабаритные характеристики. И кроме того, они должны обеспечивать возможность его транспортировки железнодорожным, а в идеале – автомобильным транспортом. Для обеспечения данного требования можно рассмотреть концепции энергетических реакторов малой мощности: Гиперион (США), Свеча (Япония), СВБР, КЛТ (Россия).

Медицинский реактор может работать в старт-стопном режиме, и тогда процедура его подготовки и запуска не должна превышать нескольких часов: либо же это круглосуточная работа с «активным» и «спящим» режимами.

Таким образом, можно сформулировать базовые требования к ядерному реактору как специализированному медицинскому инструменту: оптимальная характеристика получаемого нейтронного пучка, несколько каналов вывода нейтронного пучка (с различными характеристиками для разных целей), безопасность и экологичность, удобство и простота эксплуатации, экономическая привлекательность и возможность установки на действующей площадке крупного медицинского центра.

Библиографический список

1. Довбня, А.Н. Нейтроны против рака / А.Н. Довбня, Э.Л. Купленников, С.С. Кандыбей, В.В. Красильников // Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 2014. – Т. 45. – Вып. 5-6.
2. Левченко, В.А. Основные характеристики америциевого реактора для нейтронной терапии. Реактор «МАРС» / В.А. Левченко [и др.] // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2003. – №3.
3. Борисов, Г.И. Теоретические и экспериментальные физические методы нейтронно-захватной терапии // Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 2011. – Т. 42. – Вып. 5.
4. Кураченко Ю.А. МАРС и ТАПИРО: реакторы малой мощности для нейтронозахватной терапии / Ю.А. Кураченко, Д.Н. Моисеенко // Ядерная энергетика. – 2010. – № 1. – С. 153-163.
5. Harling, O.K. Fission reactor based epithermal neutron irradiation facilities for routine clinical application in BNCT – Hatanaka memorial lecture // Applied Radiation and Isotopes. 67 (7–8): S7–11. doi:10.1016/j.apradiso.2009.03.095.
6. Мусабаева, Л.И. Нейтронная терапия на циклотроне У-120. К 30-летию применений нейтронной терапии – обзор результатов научных исследований / Л.И. Мусабаева [и др.] // Медицинская радиология и радиационная безопасность. – 2013. – Т. 58. – №2.
7. Кураченко, Ю.А. Критерии качества нейтронных пучков для лучевой терапии / Ю.А. Кураченко, Ю.А. Казанский, Е.С. Матусевич // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2008. – №1.

Дата поступления
в редакцию 21.04.2017

O.O. Novozhilova, A.G. Meluzov, N.L. Ivanova

ANALYSIS OF APPLICATION OF NUCLEAR REACTORS IN MEDICAL PRACTICE

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

Purpose: analysis of the possibility of using nuclear facilities for medical purposes, in particular for radiation therapy

Design/methodology/approach: analytical review of the use of nuclear facilities for neutron capture therapy.

Results: presented the physical characteristics of neutron capture therapy as one of the advanced methods of radiotherapy. Formulated the basic requirements for a nuclear installation as a specialized medical instrument.

Key words: nuclear reactor, radiation therapy, neutron capture therapy.

УДК 621.396

А.С. Раевский, С.Б. Раевский, Т.С. Рыжакова

КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ НЕОДНОРОДНЫХ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ СТРУКТУР, ПРИСОЕДИНЕННЫЕ К ИСТОЧНИКУ¹Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева

Рассмотрен общий подход к постановке самосогласованных волноводных задач, отмечена общность присоединенных решений краевых задач на уравнении Гельмгольца, описывающих колебания и волны, присоединенные к источнику. Показано, что по своей математической природе комплексный резонанс подобен присоединенным волнам, описываемым решениями несамосопряженных самосогласованных краевых задач. Отмечено, что как решения этих задач и присоединенные волны, и КР существуют только при наличии источников. Присоединенные волны в этом случае выступают как явление, описываемое неоднородной краевой задачей со специфической правой частью в уравнении Гельмгольца. Комплексный резонанс рассматривается как взаимодействие двух комплексно-сопряженных волн, потоки мощности которых замыкаются через источник.

Ключевые слова: круглый двухслойный экранированный волновод, краевая задача, комплексный резонанс, комплексные волны.

На примере круглого двухслойного экранированного волновода рассматриваются колебания и волны в неоднородных электродинамических структурах, описываемые решениями самосогласованных краевых задач, в которых обязательным является присутствие источника, имеющего обратную связь с полем.

Неоднородные электродинамические структуры в общем случае описываются несамосопряженными краевыми задачами [1-4]. Для экранированных структур эти задачи, будучи однородными, являются задачами на собственные функции и собственные значения, описываемыми собственными волнами. Для открытых структур несамосопряженные краевые задачи, являясь полунормированными (однородное уравнение и неоднородные, в общем случае, граничные условия), наряду с собственными волнами могут описывать несобственные волны дискретного спектра [5]. Собственные значения несамосопряженных краевых задач в общем случае являются [1-5, 6-8] комплексными величинами и соответствуют различным видам комплексных волн (КВ), которые, в зависимости от признаков несамосопряженности краевой задачи [1-4, 9-11], могут иметь различную природу и свойства.

Как показано в [2, 12, 13], теоретически и экспериментально, собственные КВ слоистых экранированных волноводов источниками, описываемыми действительными функциями пространственных координат, возбуждаются комплексно-сопряженными парами, приводя к возникновению явления комплексного резонанса (КР), описанного в [2, 12-14]. Феномен КР впервые был обозначен в [15].

КР и присоединенные волны в двухслойном круглом экранированном волноводе

КР, отличающийся от обычного резонанса своим существованием не в точке, а во всем диапазоне существования КВ, имеет место [12-14] только при наличии источника, через который замыкаются прямой и обратный потоки мощности [16]. Таким образом, две взаимодействующие между собой КВ оказываются «привязанными» к источнику, а поле КР – является «присоединенным» к источнику электромагнитным колебанием. Задача о возбуждении КР является самосогласованной – источник создает пару КВ, образующих замкнутые через источник потоки мощности.

Как показано в [2, 15], собственные КВ двухслойного круглого экранированного волновода индивидуально возбуждаются распределенным источником бегущей волны. Следовательно, находясь в синхронизме с этой волной, комплексная волна, «привязанная» к источ-

нику такого типа, удовлетворяет уравнению Гельмгольца с правой частью, соответствующей функции, описывающей бегущую волну. Такое уравнение можно назвать присоединенным к обычному уравнению Гельмгольца. Поля двух КВ с комплексно сопряженными амплитудами образуют «присоединенное» к источнику колебание, которое в силу обязательного требования присутствия источника не следует называть собственным. КР, соответствующий этому колебанию, образуется полем, локализованным вблизи источника. Если источник расположен при $z=0$, правая часть присоединенного уравнения Гельмгольца имеет вид:

$$R(\alpha_{1,2}r) \cos n\varphi \cdot \cos \beta_1 z \cdot e^{-\beta_2 z},$$

где $R(\alpha_{1,2}r)$ – функция, описывающая радиальную зависимость поля в 1-й и 2-й областях направляющей структуры.

Это может быть двухслойный экранированный волновод или круглый открытый диэлектрический волновод (ДВ). Комплексные волны таких волноводов достаточно подробно исследованы [2-4]. Их дискретные спектры в экранированных структурах состоят из собственных КВ, в открытых – включают в себя как собственные, так и несобственные волны.

Обобщая материалы работ [17-19], в которых рассматривались вопросы теории присоединенных волн в двухслойных изотропных направляющих структурах, сформулируем присоединенную краевую задачу для круглого двухслойного экранированного волновода. Она состоит из уравнения:

$$\frac{\partial^2 \Pi_z^{e,m}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Pi_z^{e,m}}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Pi_z^{e,m}}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 \Pi_z^{e,m}}{\partial z^2} + \varepsilon \mu \omega^2 \Pi_z^{e,m} = , \tag{1}$$

$$= A^{e,m} R_n^{e,m}(\alpha r) \cos n\varphi e^{-i\beta z}$$

которое будем называть присоединенным уравнением Гельмгольца, и граничных условий:

$$\Pi_z^e(r=b)=0; \quad \Pi_z^e(r=b)=0; \tag{2a}$$

$$\vec{E}_{1\tau}(r=a)=\vec{E}_{2\tau}(r=a); \quad \vec{H}_{1\tau}(r=a)=\vec{H}_{2\tau}(r=a) \tag{2б}$$

где $\Pi_z^{e,m}$ – продольные компоненты электрического и магнитного векторов Герца; a и b – радиусы внутреннего слоя и экрана.

Функции в правой части уравнения (1) имеют [19] вид:

$$R_n^{e,m}(\alpha_1 r) = J_n(\alpha_1 r) \text{ при } r \in [0 \div a];$$

$$R_n^e(\alpha_2 r) = \frac{J_n(\alpha_2 r) Y_n(\alpha_2 b) - J_n(\alpha_2 b) Y_n(\alpha_2 r)}{J_n(\alpha_2 a) Y_n(\alpha_2 b) - J_n(\alpha_2 b) Y_n(\alpha_2 a)},$$

$$R_n^m(\alpha_2 r) = \frac{J_n(\alpha_2 r) Y_n'(\alpha_2 b) - J_n'(\alpha_2 b) Y_n(\alpha_2 r)}{J_n(\alpha_2 a) Y_n'(\alpha_2 b) - J_n'(\alpha_2 b) Y_n(\alpha_2 a)}, \text{ при } r \in [a \div b]$$

где $J_n(\alpha_{1,2}r)$, $Y_n(\alpha_2 r)$ – цилиндрические функции первого и второго рода.

Функцию в правой части уравнения (1) можно рассматривать как функцию распределенного источника бегущей волны, а присоединенную краевую задачу (1), (2а,б) – как задачу о возбуждении волн «присоединенных» к указанному источнику.

Записываем решение сформулированной краевой задачи в виде:

$$\Pi_{z_{1,2}}^{e,m} = \left[C_{n_{1,2}}^{e,m} R_n^{e,m}(\alpha_{1,2}r) + D_{n_{1,2}}^{e,m} \left(-\frac{iz}{2\beta} \right) R_n^{e,m}(\alpha_{1,2}r) + \rho^{e,m}(\alpha_{1,2}r) \right] \begin{cases} \cos n\varphi \\ \sin n\varphi \end{cases} e^{-i\beta z}, \tag{3}$$

где функции $\rho^{e,m}(\alpha_{1,2}r)$ удовлетворяет уравнениям:

$$\rho''(\alpha_{1,2}r) + \frac{1}{r} \rho'(\alpha_{1,2}r) + \left(\alpha_{1,2}^2 - \frac{n^2}{r^2} \right) \rho(\alpha_{1,2}r) = \bar{D}_{n_{1,2}}^{e,m} R_n^{e,m}(\alpha_{1,2}r), \tag{4}$$

которые можно рассматривать как присоединенные уравнения Бесселя.

Подставляя решения в (3) в уравнения (1), получаем:

$$\begin{aligned}
 & C_{n_{1,2}}^{e,m} \left[R_n^{e,m}{}''(\alpha_{1,2}r) + \frac{1}{r} R_n^{e,m}(\alpha_{1,2}r) + \left(\alpha_{1,2}^2 - \frac{n^2}{r^2} \right) R_n^{e,m}(\alpha_{1,2}r) \right] + \\
 & + D_{n_{1,2}}^{e,m} \left[R_n^{e,m}{}''(\alpha_{1,2}r) + \frac{1}{r} R_n^{e,m}(\alpha_{1,2}r) + \left(\alpha_{1,2}^2 - \frac{n^2}{r^2} \right) R_n^{e,m}(\alpha_{1,2}r) \right] + \\
 & + \left[\rho^{e,m}{}''(\alpha_{1,2}r) + \frac{1}{r} \rho^{e,m}'(\alpha_{1,2}r) + \left(\alpha_{1,2}^2 - \frac{n^2}{r^2} \right) \rho^{e,m}(\alpha_{1,2}r) \right] - \\
 & - D_{n_{1,2}}^{e,m} R_n^{e,m}(\alpha_{1,2}r) = A^{e,m} R_n^{e,m}(\alpha_{1,2}r).
 \end{aligned} \tag{5}$$

Два вида присоединенных волн

Из (5) видно, что решения (3) удовлетворяют с учетом уравнения (4) присоединенным уравнениям Гельмгольца (1) при условии:

$$\bar{D}_{n_{1,2}}^{e,m} - D_{n_{1,2}}^{e,m} = A^{e,m}. \tag{6}$$

В том случае, когда

$$\bar{D}_{n_{1,2}}^{e,m} = D_{n_{1,2}}^{e,m}, \tag{7}$$

решения (3) удовлетворяют обычному (однородному) уравнению Гельмгольца.

Из граничных условий (2б) получаем систему функциональных уравнений, зависящих от продольной координаты. Приравнивая в них члены, имеющие линейную зависимость от координаты z , получаем систему линейных однородных алгебраических уравнений относительно коэффициентов $D_{n_{1,2}}^{e,m}$. Условие нетривиальности решений этой системы дает уравнение, совпадающее с дисперсионным уравнением обычных волн круглого двухслойного экранованного волновода.

Члены в указанных функциональных уравнениях, не имеющие зависимости от координат, при условии (4) дают систему линейных неоднородных алгебраических уравнений относительно коэффициентов: $C_{n_{1,2}}^{e,m}$. Главные определители двух систем (однородной и неоднородной) совпадают. Будучи приравненными нулю, они дают дисперсионные уравнения нормальных волн.

Нетривиальные решения системы линейных однородных алгебраических уравнений (коэффициенты $D_{n_{1,2}}^{e,m}$) подставляются в систему неоднородных уравнений, которая решается относительно коэффициентов $C_{n_{1,2}}^{e,m}$.

Поскольку для волн, описываемых решениями (3) должны выполняться граничные условия (2б), необходимо, чтобы системы однородных и неоднородных линейных алгебраических уравнений имели совместные решения. Система однородных уравнений имеет нетривиальные решения только при равенстве нулю её определителя. Поскольку главный определитель системы неоднородных уравнений совпадает с определителем системы однородных уравнений, система неоднородных уравнений может иметь решения только при равенстве нулю её дополнительных определителей.

Таким образом, собственные значения краевой задачи, определяющие волновые числа волн, описываемых этой задачей, находятся как совместные решения трех трансцендентных уравнений

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} = 0, \quad (8)$$

совпадающего с дисперсионным уравнением нормальных волн, и двух дополнительных:

$$\begin{vmatrix} c_1 & a_{12} \\ c_2 & a_{22} \end{vmatrix} = 0; \quad \begin{vmatrix} a_{11} & c_1 \\ a_{21} & c_2 \end{vmatrix} = 0. \quad (9)$$

Каждое из этих уравнений решается совместно с уравнениями:

$$\varepsilon_{1,2} \mu_{1,2} \omega^2 = \alpha_{1,2}^2 + \beta^2. \quad (10)$$

Волнам, описываемым рассматриваемой краевой задачей, соответствуют решения, удовлетворяющие одновременно всем трем уравнениям (8), (9) совместно с уравнениями (10), связывающими волновые числа. Численный анализ указанных уравнений [17, 18] показало существование их совместных решений, соответствующих волнам, которые можно назвать присоединенными к источнику, поскольку они описываются уравнением (1), в правой части которого стоит функция (описывающая источник), являющаяся решением краевой задачи на однородном уравнении Гельмгольца.

Таким образом, мы наблюдаем единство математической и физической идеологий: с одной стороны решаем краевую задачу на присоединенном уравнении, с другой – получаем волны, существующие только при наличии источника, то есть присоединенные (привязанные) к нему. Пару КВ, образующих КР, можно рассматривать как волны, присоединенные к источнику, описываемые однородным уравнением Гельмгольца. Условия (6), (7) определяют два вида присоединенных волн.

Выводы

Для колебательных и направляющих электродинамических структур могут быть сформулированы краевые задачи, которые описывают колебания и волны, присоединенные к источнику, существующие только при его наличии. Такие задачи следует называть самосогласованными, поскольку в них учитывается обратное влияние поля на источник, поскольку волновые числа и в функциях поля, и в функциях источника одни и те же. Присоединенные волны подразделяются на два вида: описываемые однородным уравнением Гельмгольца и уравнением, в правой части которого стоит функция, являющаяся решением однородной краевой задачи.

Библиографический список

1. **Веселов, Г.И.** Комплексные волны в поперечно-неоднородных направляющих структурах. / Г.И. Веселов, С.Б. Раевский // Радиотехника. – 1987. – Т. 42. – №8. – С. 64-67.
2. **Веселов Г.И.** Слоистые металло-диэлектрические волноводы / Г.И. Веселов, С.Б. Раевский. – М. Радио и связь, 1988. – 248 с.
3. **Раевский, А.С.** Неоднородные направляющие структуры, описываемые несамосопряженными операторами / А.С. Раевский, С.Б. Раевский. – М. Радиотехника, 2004. – 110 с.
4. **Раевский, А.С.** Комплексные волны / А.С. Раевский, С.Б. Раевский. – М. Радиотехника, 2010. – 223 с.
5. **Шевченко, В.В.** Наглядная классификация волн, направляемых регулярными открытыми волноводами / В.В. Шевченко // Радиотехника и электроника, 1969. – Т. 12. – № 10. – С. 1768-1773.
6. **Наймарк, М.А.** Линейные дифференциальные операторы / М.А. Наймарк. – М. Наука. – 1969. – 526 с.
7. **Раевский, С.Б.** Комплексные волны в двухслойном круглом экранированном // Изв. вузов СССР. Радиофизика. – 1972. – Т. 15. – № 1. – С. 112-116.
8. **Раевский, С.Б.** О существовании комплексных волн в некоторых двухслойных изотропных структурах // Изв. вузов СССР. Радиофизика. – 1972. – Т. 15. – № 12. – С. 1926-1931.
9. **Эллис, В.** Волны в анизотропной плазме / В. Эллис, С. Буксбаум, А. Берс. – М. Атомиздат, 1969. – 311 с.

10. **Раевский, А.С.** О комплексных волнах круглого диэлектрического волновода в поглощающей среде / А.С. Раевский, С.Б. Раевский // Радиотехника и электроника. – 1998. – Т. 43. – № 12. – С. 1409-1412.
11. **Виприцкий, Д.Д.** О комплексных волнах в невзаимных направляющих структурах / Д.Д. Виприцкий, А.В. Назаров, С.Б. Раевский // Письма в ЖТФ. – 2007. – Т. 33. – Вып. 5. – С. 1-11.
12. **Веселов, Г.И.** Полосовой фильтр на двухслойном круглом экранированном волноводе в режиме комплексных волн. / Г.И. Веселов, В.А. Калмык, С.Б. Раевский // Изв. вузов СССР. – Радиофизика. – 1983. – Т. 26. – № 8. – С. 900-903.
13. **Иванов, А.Е.** Комплексный резонанс в структуре на основе круглого двухслойного экранированного волновода / А.Е. Иванов, С.Б. Раевский // Радиотехника и электроника. – 1991. – Т. 36. – № 8. – С. 1463-1468.
14. **Раевский, А.С.** Комплексный резонанс в круглом двухслойном экранированном волноводе / А.С. Раевский, С.Б. Раевский, О.Т. Цинин // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2002. – Т. 5. – № 2. – С. 40-45.
15. **Веселов, Г.И.** Исследование комплексных волн двухслойного экранированного волновода / Г.И. Веселов, В.А. Калмык, С.Б. Раевский // Радиотехника. – 1980. – Т. 35. – № 9. – С. 59-61.
16. **Веселов, Г.И.** О встречных потоках мощности в некоторых двухслойных изотропных структурах / Г.И. Веселов, С.Б. Раевский // Изв. вузов СССР. – Радиофизика. – 1983. – Т. 26. – № 9. – С. 1041-1044.
17. **Малахов, В.А.** Присоединенные волны в круглом двухслойном экранированном волноводе / В.А. Малахов, А.С. Раевский, С.Б. Раевский // Письма в ЖТФ. – 2011. – Т. 37. – Вып. 2. – С. 71-79.
18. **Malakhov, V.A.** Added Solutions of boundary Value Problems for Double-Layer Guiding Structures / V.A. Malakhov, A.S. Raevskii, S.B. Raevskii // International Journal of Electromagnetics and Applications. – 2012. – V.2. – № 5. – P. 114-119.
19. **Раевский, А.С.** Присоединенные волны как волны, создаваемые источником типа антенны бегущей волны / А.С. Раевский, С.Б. Раевский // Письма в журнал технической физики. – 2013. – №23. – С. 13-17.

*Дата поступления
в редакцию 28.06.2017*

A.S. Raevskii, S. B. Raevskii, T.S. Ryzhakova

OSCILLATIONS AND WAVES OF INHOMOGENEOUS ELECTRODYNAMIC STRUCTURES CONNECTED TO SOURCE

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

Purpose: consider the oscillations and waves in inhomogeneous electrodynamic structures, described by solutions of self-consistent boundary value problems, in which the presence of a source having an inverse relationship with the field is obligatory, considering the example of a circular two-layer shielded waveguide.

Design/methodology/approach: A general approach to the formulation of self-consistent waveguide problems is considered. The generality of the adjoint solutions of boundary value problems on the Helmholtz equation describing the oscillations and waves connected to the source is noted.

Findings: It is shown that, in its mathematical nature, the complex resonance is similar to the attached waves, described by solutions of non-self-adjoint self-consistent boundary value problems. It is noted that, as solutions to these problems, the associated waves and CD exist only in the presence of sources. The attached waves in this case act as a phenomenon described by an inhomogeneous boundary-value problem with a specific right-hand side in the Helmholtz equation. A complex resonance is regarded as the interaction of two complex conjugate waves whose power fluxes are closed through a source.

Originality/value: For vibrational and directing electrodynamic structures, boundary value problems can be formulated that describe oscillations and waves attached to a source that exist only if it exists. Such problems should be called self-consistent, since they take into account the inverse effect of the field on the source, since the wave numbers in both the field functions and the source functions are the same. Attached waves are divided into two types: described by a homogeneous Helmholtz equation and an equation on the right side of which is a function that is a solution of a homogeneous boundary value problem.

Key words: round two-layer shielded waveguide, boundary-value problem, complex resonance, complex waves.

УДК 621.317.629.12

М.П. Шилов, Г.И. Коробко

РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ГЕНЕРАТОРНЫМ АГРЕГАТОМ В АВТОНОМНЫХ СЕТЯХ

ФГБОУ ВО "Волжский государственный университет водного транспорта"

Состояние вопроса: Исследование процессов в электроэнергетических системах при отсутствии реальной установки, требует разработки виртуальной электроэнергетической системы. Модели, находящиеся в открытом доступе, не дают возможности моделирования синхронизации и распределения нагрузок. Актуальным направлением в данном исследовании является создание модели, оценивающей эффективность автономной электростанции.

Методы исследования: Математический расчет, моделирование автономных электроэнергетических систем в пакете Matlab с использованием библиотек SimPowerSystem и Simulink.

Результаты: Разработана блок-схема и модель, обеспечивающая синхронизацию и распределение активной и реактивной нагрузки между генераторным агрегатом и сетью.

Выводы: Предложенная модель позволила исследовать процессы включения на параллельную работу генераторного агрегата с сетью и распределение между ними активной и реактивной нагрузки. Как показало моделирование, изменение параметров регуляторов мощности влияет на быстродействие и перерегулирование активной и реактивной мощности.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, модель электростанции, синхронизатор, параллельная работа, распределение активной и реактивной нагрузки.

Одной из важнейших характеристик эффективности действия электроэнергетической системы - ЭЭС является качество электроэнергии в установившихся и переходных режимах, сопровождающихся большим количеством процессов. Все автономные потребители электростанций должны бесперебойно получать электроэнергию необходимого качества и количества. При этом амплитуда и частота напряжения на шинах ЭЭС должны поддерживаться номинальными, а мощность работающих источников должна превышать электрическую мощность, потребляемую приемниками.

В процессе разработки автономной ЭЭС необходимо решить ряд задач связанных с расчетом мощности и числа генераторных агрегатов; разработкой структурной схемы электростанции и её схемных решений. Как показывает практика, быстрее и легче решать задачи с использованием моделей элементов и самой электроэнергетической системы в целом.

Современные автономные электростанции, состоящие из нескольких генераторных агрегатов, работают параллельно при переменном графике нагрузки. Очевидно, что включать в работу и отключать генераторные агрегаты целесообразно так, чтобы их нагрузка была близкой к номинальной. При этом КПД генераторов и электростанции в целом будут иметь наибольшую величину. В автономных ЭЭС в качестве приводных двигателей генераторов традиционно применяют дизели и газо-поршневые двигатели.

Как показывает анализ [1], работа дизель-генераторной электростанции зависит от эффективности систем автоматического управления для:

- включения на параллельную работу генераторного агрегата с сетью;
- распределения активной и реактивной мощности между источниками энергии;
- разгрузки активной и реактивной мощности генераторного агрегата после чего он отключается от сети.

На рис. 1 представлена блок-схема системы автоматического управления параллельной работы генераторного агрегата с сетью. Сеть представляет собой совокупность генераторных агрегатов, где используются приводные двигатели генераторов с астатической характеристикой, объединенных для питания, например, судовых приемников электроэнергии [2].

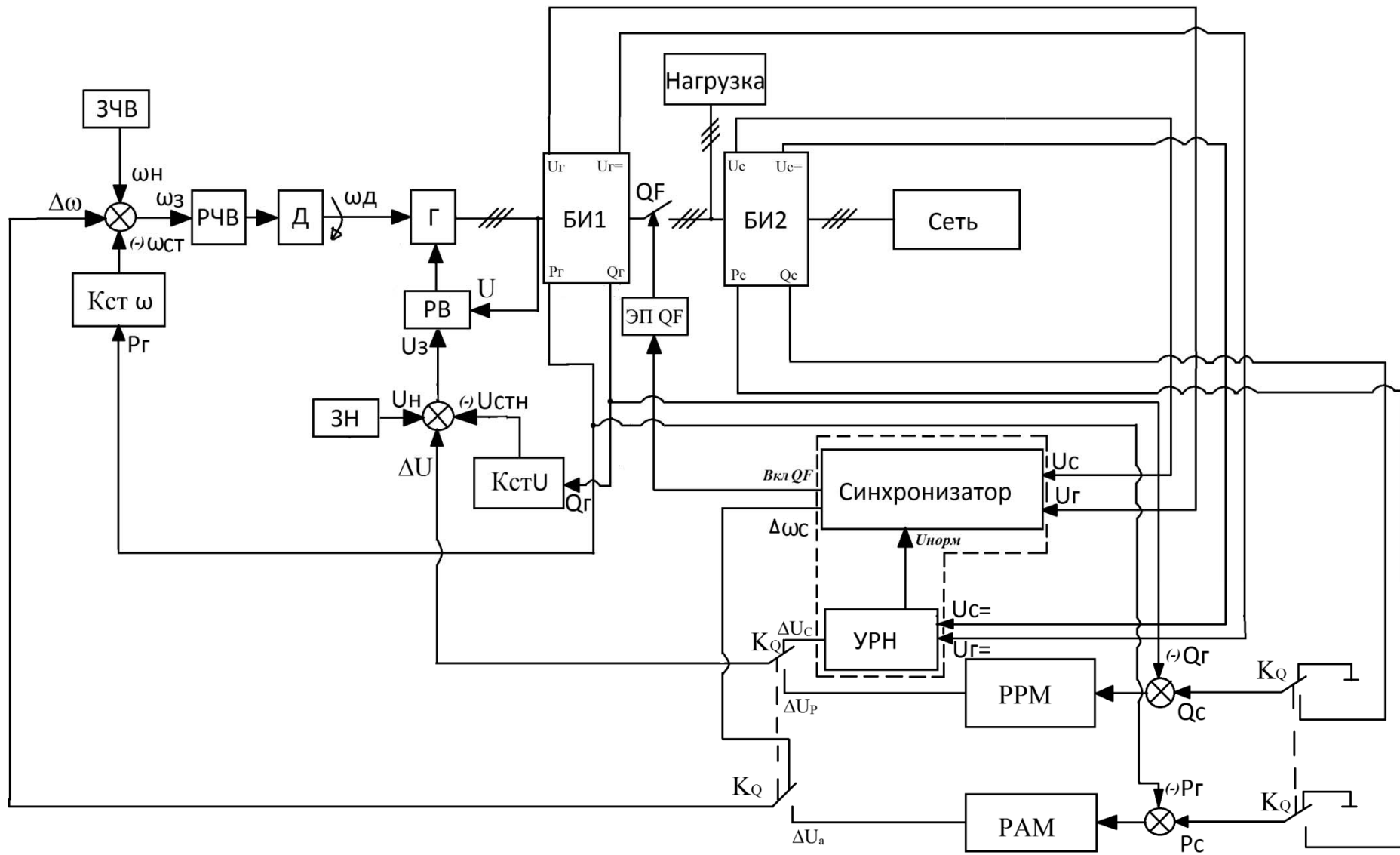


Рис. 1. Блок-схема системы автоматического управления параллельной работой генераторного агрегата с сетью

В состав генераторного агрегата входят синхронный генератор - Г с регулятором возбуждения - РВ. В качестве приводного двигателя используется дизель - Д с регулятором частоты вращения - РЧВ. На вход РВ подается задающее напряжение - U_3 , состоящее из трех сигналов: сигнала соответствующего номинальному значению напряжения - U_n , поступающему от датчика напряжения - ЗН; сигнала статизма - $U_{стн}$, пропорционального реактивной мощности генератора, обеспечивающий наклон внешней характеристики генератора в диапазоне 2% - 5% и сигнала управления - ΔU напряжением генератора при синхронизации - ΔU_C или распределения реактивной мощности генераторного агрегата - ΔU_P . На вход РЧВ подается сигнал задающий частоту вращения дизеля - ω_3 , состоящая из трех сигналов: сигнал датчика частоты вращения - ЗЧВ, формирующий сигнал - ω_n равный номинальному значению частоты сети 50 Гц; сигнал управления - $\Delta \omega$ частотой вращения дизеля, а, следовательно, и частотой напряжения генератора и углом разности фаз напряжений сети и генератора при синхронизации - $\Delta \omega_c$ или сигнал распределения активной мощности генераторного агрегата - ΔU_a ; сигнал статизма - $\omega_{ст}$, пропорциональный активной мощности генератора и обеспечивающий наклон механической характеристики дизеля в диапазоне 2% - 5%.

Система управления включением генераторного агрегата на параллельную работу с сетью состоит из двух блоков: синхронизатора и устройство разности напряжений - УРН. Для управления состоянием генераторного автомата, синхронизатор получив на входы значения переменного напряжения сети и генератора - U_c , U_g , сформированные в блоках измерения - БИ1 и БИ2, выполняет проверку параметров необходимых для метода точной синхронизации. Значения частоты питающей сети - f_c и частоты подключаемого генератора - f_g , а также значение разности углов одноименных векторов фазных напряжений - $\Delta \Psi$ подключаемого генератора и сети должны находиться в требуемых диапазонах.

Поддержание амплитуды выходного напряжения генераторного агрегата до напряжения сети осуществляет УРН, получив на входы значения выпрямленных выходных напряжений генератора - $U_{г=}$ и сети - $U_{с=}$, сформированные в блоках БИ1 и БИ2, формируют два сигнала - ΔU и $U_{норма}$. Сигнал $U_{норма}$ указывает, что задача о выравнивании амплитуды напряжений выполнена и находится в пределах допустимой ошибки ΔU 0.1%. При этом синхронизатор разрешает выполнить включение генераторного автомата - QF, с помощью электропривода - ЭП. Задачи, выполняемые системой управления, обеспечивают вход в синхронизм дизель - генератора с сетью без существенных отклонений по частоте питающей сети и напряжению.

После включения генераторного агрегата на параллельную работу происходит одновременное переключение контактов реле - K_Q на входы регуляторов реактивной - РРМ и активной мощности (РАМ) соответственно. Задающими сигналами регуляторов являются разности между мощностями сети и генератора как по реактивной - Q_c, Q_g , так и по активной - P_c, P_g мощности соответственно. Для получения сигналов пропорциональных мощности формируются в БИ1 и БИ2. Таким образом, на выходе регуляторов будут сформированы сигналы распределения активной и реактивной мощности - ΔU_Q и ΔU_P , соответственно.

Для исследования параллельной работы генераторного агрегата с сетью, разработана модель, которая изображена на рис. 2. Моделирование выполнено в пакете программ Matlab 7.11.0. Модель разрабатывалась с помощью стандартных блоков из библиотек SimPowerSystem и Simulink [3]. В качестве генератора используется явнополюсная синхронная машина - Synchronous Machine pu Fundamental. Параметры машины имеют следующие значения: мощность $S=250$ кВА, номинальное выходное напряжение $U_{ном}=400$ В, частота $f_{ном}=50$ Гц, номинальная частота вращения $n_{ном}=1500$ об/мин. Частота вращения дизеля задается регулятором частоты вращения - РЧВ-Д. Регулятор возбуждения генератора выполнен блоком Excitation System, на вход V_{ref} подается задание величины напряжения в относительных единицах. Блок - Measurement Demux разделяет измеренные на выходе - m параметры генератора. Сеть Three Phase Programmable Voltage Source представляет собой трехфазный источник напряжения со следующими параметрами: напряжение 400 В и частоту 50 Гц.

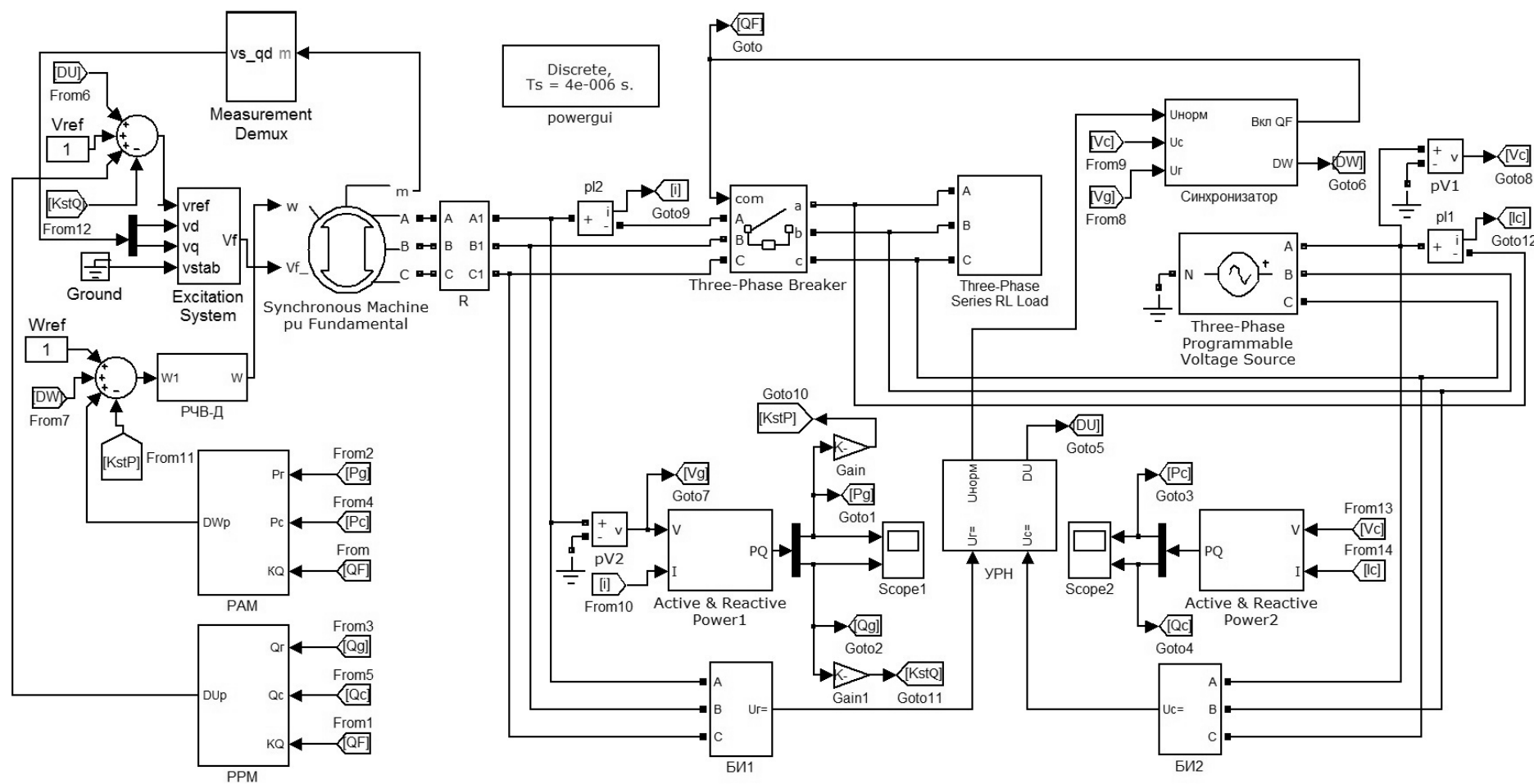


Рис. 2. Модель для параллельной работы генераторного агрегата с сетью

Для измерения активной и реактивной мощностей используются блоки измерений генераторного агрегата Active & Reactive Power1 и сети Active & Reactive Power2, на входы которых поступают измеренные значения тока и напряжения от датчиков pI1, pI2 и pV1, pV2. К выходам измерителей подключены осциллографы Scope1 и Scope2, передатчики сигнала Goto 1-4, а также элементы Gain и Gain1 для создания сигналов статизма по активной - K_{stP} и реактивной - K_{stQ} мощности. Блоки измерений выпрямленных напряжений генератора и сети представлены как БИ1 и БИ2. Они состоят из преобразователей, с которых пониженное, выпрямленное и отфильтрованное напряжение поступает на УРН, дающий сигнал управления - DU при синхронизации и разрешающий сигнал включения на параллельную работу - $U_{норма}$.

Включение на параллельную работу выполняет синхронизатор. Для задания момента включения определены требования точной синхронизации, при выполнении которых поступает команда в виде логической единицы на входы K_Q РАМ и РРМ и на внешний управляемый com-порт автоматического выключателя - Three-Phase Breaker, который подключает синхронный генератор к шинам сети. Таким образом, сеть и генератор работают на общую активно-индуктивную нагрузку с $\cos\varphi=0.8$, которая представлена блоком Three-Phase Series RL Load, соединенная звездой (при необходимости ее характер может изменяться).

Диаграммы работы синхронизатора до и после включения на параллельную работу генератора с сетью представлены на рис. 3. Напряжение генератора в момент времени $t=0.005$ с опережает напряжение сети рис. 3, а. При включении синхронизации, сигнал управления регулятора частоты вращения дизеля Dw изменяет величину угла разности фаз напряжений генератора и сети - $\Delta\Psi$. В момент времени при $t=0.039$ с, который соответствует минимально допустимой величине - $\Delta\Psi$, формируется логическая единица (см. рис. 3, б), для включения генераторного автомата - Three-Phase Breaker. После этого напряжения сети и генератора совпадают.

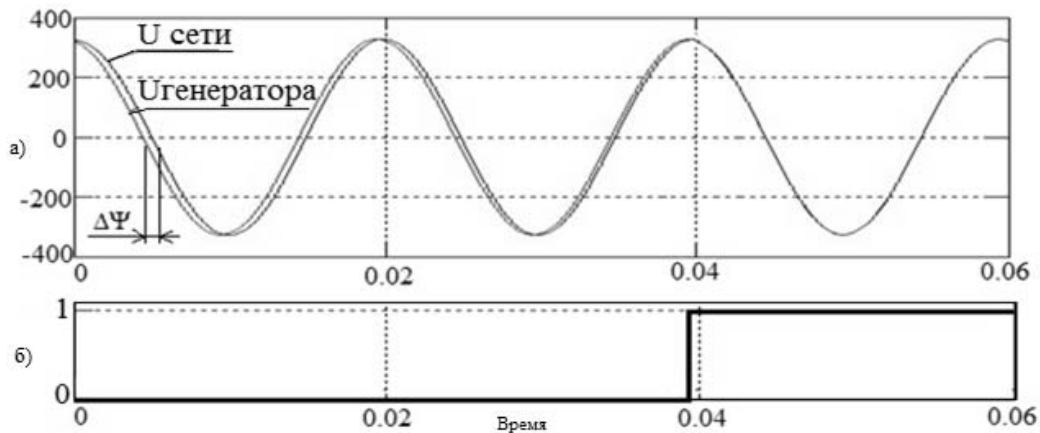


Рис. 3. Диаграммы напряжений сети и генератора (а) и сигнал включения генераторного автомата (б)

Моделирование системы автоматического распределения активной и реактивной нагрузки показано на рис. 4. Изменение полной мощности нагрузки, представленной на рис. 4, а, производилось включением трех блоков нагрузок. В момент времени $t = 0$ с включалась первая нагрузка, составляющая 20% от номинальной мощности генератора. При $t = 1.5$ с и $t = 3.5$ сек. включались вторая и третья нагрузки, равные по 40% соответственно.

Распределение активной и реактивной мощности между сетью и генератором показано на диаграммах (рис. 4, б, в). В момент времени $t = 0.12$ с включается на параллельную работу генератор с сетью, а затем происходит выравнивание активной и реактивной мощности, отдаваемой в нагрузку сетью и генератором. Переходный процесс распределения активной нагрузки заканчивается в момент времени $t = 0.7$ с, а реактивной в момент $t = 0.4$ с, после которого установившийся режим будет соответствовать равной нагрузке сети и генератора. При включении второй и третьей нагрузки в момент времени $t = 1.5$ с и $t = 3.5$ с соответст-

венно, характер изменения активной и реактивной мощности генератора и сети аналогичен предыдущему случаю.

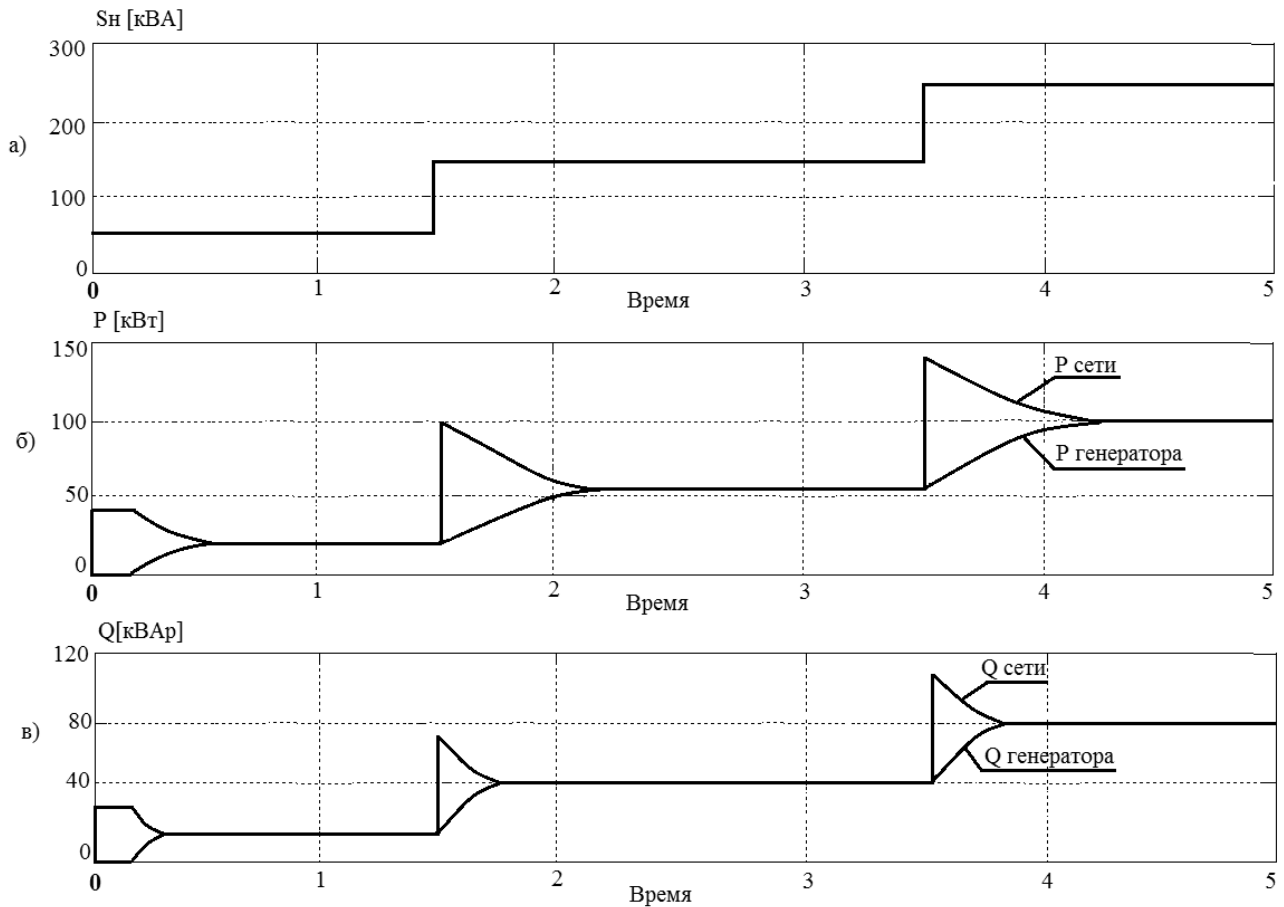


Рис. 4. Диаграммы изменения полной мощности нагрузки (а), распределения активной (б) и реактивной (в) мощности генератора и сети

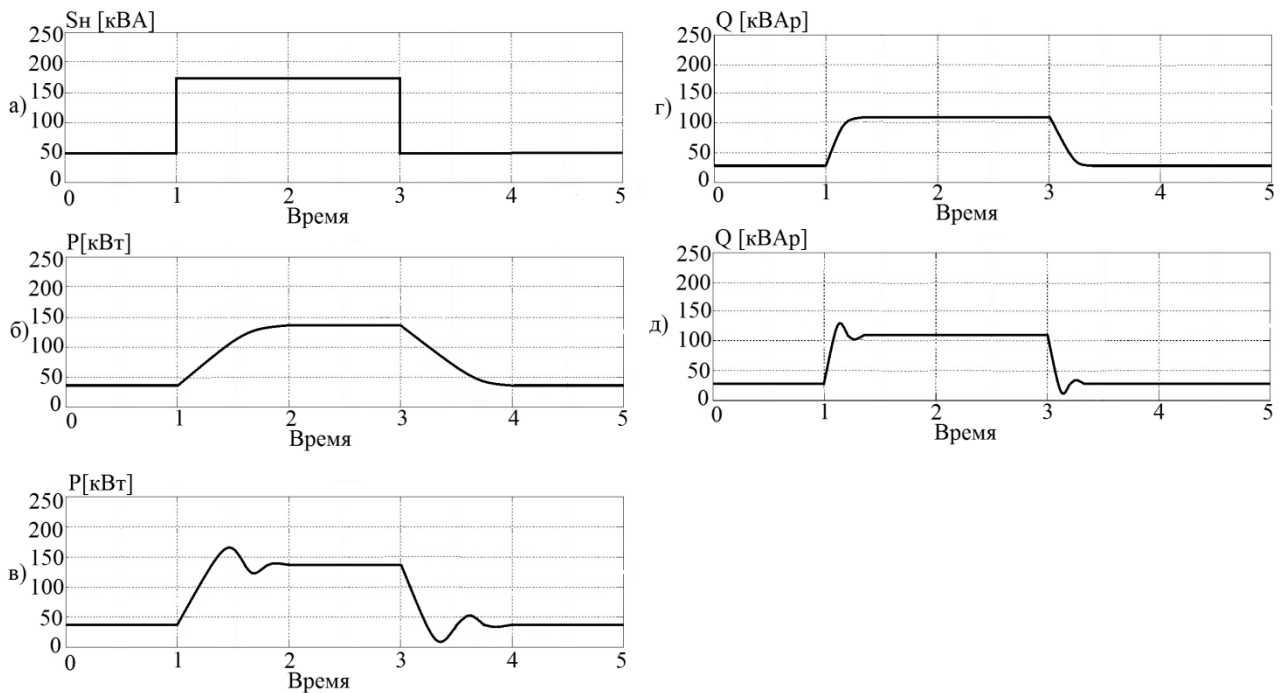


Рис. 5. Диаграмма изменения полной мощности нагрузки (а), активной (б, в) и реактивной (г, д) мощности генератора и сети при разных постоянных времени регулятора

Как видно из диаграмм (рис. 4, б, в), быстродействие системы регулирования активной мощности ниже, чем у системы регулирования реактивной мощности генератора. Это объясняется значительным моментом инерции генераторного агрегата, а постоянная времени возбуждения существенно меньше механической постоянной времени.

На рис. 5, а представлена диаграмма изменения мощности нагрузки при набросе от 20% до 70% в момент времени $t = 1$ с и при сбросе от 70% до 20% в момент времени $t = 3$ с от номинальной мощности генератора. Процесс изменения активной и реактивной мощности генератора при настройке регуляторов на монотонный характер представлен на рис. 5, б, г. При уменьшении постоянной времени интегрирования ПИ - регуляторов в переходной характеристике время нарастания снижается и появляется перерегулирование, как видно на рис. 5, в, д, что соответствует колебательному процессу.

Выводы

Анализ разработанных систем автоматического регулирования дизель-генератора автономной электроэнергетической системы и её модели показал, что работа систем поддержания частоты вращения дизеля и напряжения синхронного генератора, систем синхронизации и распределения активной и реактивной мощности соответствует поставленной задаче. Применение разработанной модели позволит разрабатывать и изготавливать как опытные, так и промышленные элементы и системы для автономных электростанций, что в настоящее время является перспективным и экономически целесообразным.

Библиографический список

1. **Коробко, Г.И.** Исследование параллельной работы автономного генераторного агрегата с сетью / Г.И. Коробко, С.В. Попов, А.В. Бишлетов, А.С. Филатов // Актуальные проблемы электроэнергетики. – Н.Новгород, НГТУ, 2011. – С. 116-120.
2. **Баранов, А.П.** Судовые автоматизированные электроэнергетические системы: учебник для вузов / А.П. Баранов. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Судостроение, 2005. – С. 528.
3. **Черных, И.В.** Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystem и Simulink / И.В. Черных. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – С. 288.

*Дата поступления
в редакцию 20.10.2017*

G.I. Korobko, M.P. Shilov

DEVELOPMENT AND MODELING OF CONTROL SYSTEMS OF GENERATOR SET IN AUTONOMOUS MAINS.

Volga State University of Water Transport,

The state of the issue: Investigation of processes in electric power systems in the absence of a real installation requires the development of a virtual power system. Models that are in the publicly available do not allow modeling of synchronization and distribution of loads. The actual direction in this study is the creation of a model that evaluates the efficiency of an autonomous power plant.

Research methods: Mathematical calculation, modeling of autonomous electric power systems in the Matlab package using the SimPowerSystem and Simulink libraries.

Results: A block diagram and a model of synchronization and distribution of active and reactive load between the generator set and the mains are developed.

Conclusions: The proposed model allowed to study the processes of switching on the parallel operation of the generator set with the mains and the distribution of the active-reactive load between them. As the simulation showed, changing the parameters of the power regulators changed the speed and overshoot of the active and reactive power.

Key words: electric power system, power plant model, synchronizer, parallel operation, distribution of active and reactive power.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

УДК 629.113

А.С. Вашурин, Ю.П. Трусов, Л.Н. Орлов, В. Ю. Шурыгин

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ АУТРИГЕРА ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ОПОКИДЫВАНИЯ АВТОМОБИЛЯ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

При проведении работ по адаптации систем электронной курсовой устойчивости, которые позволяют существенно снизить количество ДТП, на территории специальных закрытых полигонов выполняются различные специальные маневры, нормируемые различными документами. При выполнении этих экстремальных маневров возникает риск опрокидывания транспортного средства. Для снижения вероятности опрокидывания перед испытаниями на автомобилях устанавливаются специальные боковые опоры - аутригеры. В работе проанализированы требования, предъявляемые к данным конструкциям, а также документация по существующим вариантам изделий данного типа. На основании полученной информации была разработана оригинальная конструкция аутригера с использованием современных пакетов прочностного анализа, основанных на методе конечных элементов с возможностью проведения топологической оптимизации модели. На основании полученных результатов с учетом технологических возможностей была разработана конструкторская документация и изготовлен опытный образец. Учитывая назначение изделия, перед установкой на автомобиль все экземпляры необходимо проверять на соответствие заявленным прочностным требованиям, для этого был разработан, изготовлен и аттестован аккредитованной испытательной лабораторией испытательный стенд.

Ключевые слова: аутригер, испытания, электронные системы контроля устойчивости, ЭКУ, метод конечных элементов, МКЭ, LCV, прочность, оптимизация, нагрузка, стенд.

Благодаря техническому прогрессу в мире постоянно снижается количество пострадавших в дорожно-транспортных происшествиях (ДТП), в России с 2007 г. также наблюдается устойчивая тенденция к сокращению числа аварий. Однако потери от ДТП остаются весьма существенными. По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), в результате дорожно-транспортных происшествий на нашей планете ежегодно погибает более 1 млн человек и более 2 млн человек получают ранения, в 2016 в Российской Федерации погибло более 20 000 человек и более 220 000 получили ранения. Многие исследования подтверждают, что электронные системы контроля устойчивости (ЭКУ) позволяют предотвратить значительное число аварий, связанных с потерей устойчивости и управляемости транспортного средства (например, при разгоне на сыром асфальте или крутом повороте) помогают предотвратить занос, опрокидывание и обеспечить движение именно по той траектории, которую задал водитель. Такие требования давно установлены в США и странах Евросоюза, а с 2018 года станут обязательными и для стран Таможенного союза, в том числе для России.

Проведение работ по доводке и адаптации систем ЭКУ на автомобилях, выполняемые на территории специальных закрытых полигонов, требует выполнения специальных упражнений: испытание на маневр по усеченной синусоиде (sine with dwell), J-образный разворот (J-turn NHTSA), испытание типа "рыболовный крючок" ("fish hook") и другие регламентированных различными документами - согласно правил ЕЭК ООН №13Н-00, глобальных технических правил №8 [1], Federal Motor Vehicle Safety Standart (FMVSS) №126 [2]. При вы-

полнении таких экстремальных маневров, особенно на начальных этапах работ, возникает риск опрокидывания транспортного средства и связанная с этим опасность травмирования водителя-испытателя и повреждения испытательного оборудования. Для предотвращения опрокидывания на испытываемые автомобили устанавливаются специальные боковые опоры - аутригеры. При движении автомобиля в штатных режимах, когда все колеса автомобиля имеют контакт с опорной поверхностью, аутригеры не должны взаимодействовать с ней. Касание элементов аутригера с опорной поверхностью должно происходить только после отрыва колес автомобиля от опорной поверхности и возникновения угрозы опрокидывания.

Кроме основных требований к прочности и жесткости конструкции, гарантированному предотвращению переворота автомобиля, также предъявляются требования по минимальной массе, минимизации влияния на характеристики испытываемого автомобиля и возможности монтажа на широкую гамму моделей. В результате исследований, проведенных NHTSA [3], предлагаются три варианта бамперных аутригеров: из алюминиевого сплава, титанового сплава и из композитного материала (карбона). В работах приведены расчетные нагрузки, действующие на аутригер в вертикальном и продольном направлениях, равные соответственно 17400 и 5400 Н. В работах показаны результаты расчета предлагаемой конструкции на прочность с принятыми нагрузками. Приведены чертежи на типоразмерный ряд аутригеров для различных классов автомобилей. Аутригеры представляют собой консольную балку, крепящуюся к несущей системе автомобиля, и опору, выполненную в виде или колеса, или полусферы выполненной из антифрикционного материала. Достоинствами данной конструкции являются низкая масса и соответствие требованиям нормативных документов (так как требования были установлены по результатам выполнения данных НИОКР по созданию аутригеров). Сечение балки аутригеров – тавровое. К недостаткам данной конструкции следует отнести: высокую стоимость и низкую технологичность изготовления - аутригер фрезеруется из целого титанового профиля квадратного сечения; сложность (или невозможность) установки на транспортные средства несъемным бампером и на транспортные средства, у которых «юбка» кузова расположена ниже силовых элементов несущей системы.

В более ранних работах NHTSA по оценке устойчивости и управляемости автомобилей использовались центральные аутригеры «Effects of Outrigger Design on Vehicle Dynamics» [4], в которых продольную нагрузку воспринимает натянутый стальной трос.

Для грузовых автомобилей с прицепами NHTSA предлагает конструкцию складных регулируемых аутригеров «National Highway Traffic Safety Administration's Class 8 Tractor/Trailer Safety Outriggers» [3]. Определенный интерес представляет механизм складывания и конструкция опоры, выполненной в виде колеса из антифрикционного полимерного материала.

В работе «Subjective and objective evaluation of an outrigger construction's effect on rollover» [3] предлагается две схемы центральных аутригеров: с одной опорой на каждой стороне и двумя опорами. Также в работе приведены коэффициенты трения используемых в опорах антифрикционных материалов и методика их определения.

В работе «Stability Control Validation for Customised Utility Vehicles» [5] приведена конструкция аутригеров для легких коммерческих автомобилей и результаты работ по ее доводке. Предлагаемая конструкция устанавливается вблизи центра масс автомобиля. Важными в данной работе являются два момента: первый – неудачный пример применения в качестве опоры колеса с пневматической шиной и переход на конструкцию с опорой, выполненной из антифрикционного материала; второй – нагрузка, используемая для прочностных расчетов, равная 7500Н. Недостатки предлагаемой конструкции: расчет на восприятие только вертикальной (весовой) нагрузки, воздействие продольной (фрикционной) нагрузки, возникающей в точке контакта опоры с дорожным покрытием, не учитывается; значительное превышение возникающих в конструкции напряжений предела текучести, характерного для конструкционных низколегированных сталей.

Определение коэффициента трения слайдеров аутригеров с поверхностью

Для задания режимов нагружения балки аутригера, необходимых для грамотного задания параметров оптимизации, важным вопросом является определения коэффициента трения слайдеров аутригеров с поверхностью дороги. От этого коэффициента во многом зависит продольная нагрузка, которую будет воспринимать аутригер при опоре на него в критической ситуации, возникающей в процессе выполнения упражнения, предписанного нормативными документами. Поэтому перед разработкой непосредственно конструкции аутригера были проведены испытания по оценке коэффициента трения образца опорной площадки аутригера с опорной поверхностью (дорогой) испытательного полигона.

Очевидно, что при касании в зоне контакта слайдера с дорогой, помимо нормальной реакции возникает и поперечное усилие, обусловленное силой трения, определяемое по формуле:

$$F_{\text{поп}} = F_{\text{тр}} = \mu \cdot N, \quad (1)$$

где μ – коэффициент трения скольжения; N – нормальная реакция в пятне контакта.

Оценка коэффициента трения скольжения μ слайдеров производилось опытным путем волочения каркасной конструкции 1 (рис. 1), опорами которой служили элементы, выполненные из материала, из которого предполагалось выполнять опорную площадку аутригера (слайдеры) 2. Каркасная конструкция с балластом 3 волоклаась по опорной поверхности полигона путем буксировки ремнями, соединенными с динамометром 4, позволяющим фиксировать, возникающие в сцепке усилия, равные силам трения.

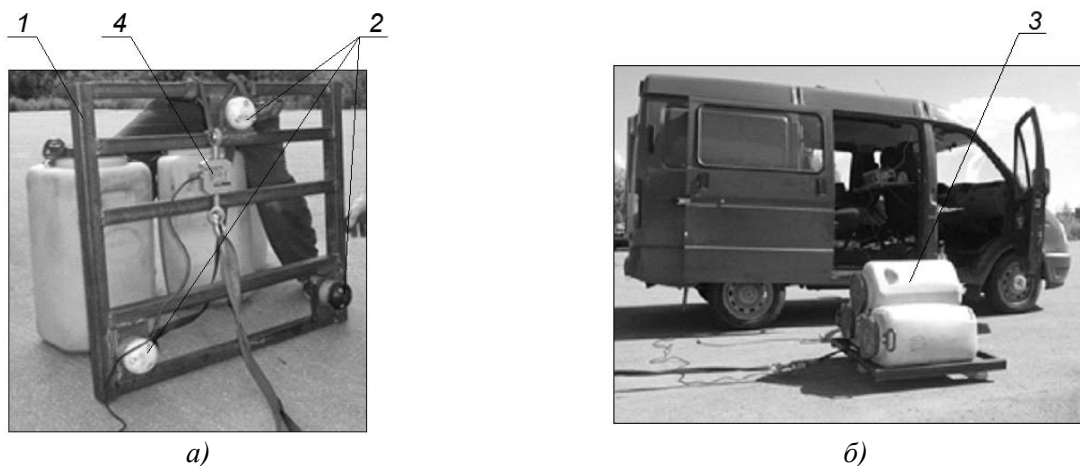


Рис. 1. Установка для определения коэффициента трения скольжения слайдеров аутригеров:
а – в процессе замены модификаций слайдеров; *б* – в рабочем положении

Испытания проводились в с различной массой балласта. Таким образом, используя формулу, обратную формуле (4), определялся коэффициент трения μ :

$$\mu = \frac{F_{\text{сц}}}{N_{\text{сумм}}}, \quad (2)$$

где $F_{\text{сц}}$ – усилия, возникающие в сцепке, $N_{\text{сумм}}$ – суммарная нормальная реакция в пятнах контакта слайдеров.

В результате испытания получены следующие значения покоя $\mu = 0,729$, скольжения $\mu = 0,457$.

Полученные значения показывают, что при выборе схемы аутригера с неподвижной опорной площадкой продольная нагрузка может достигать почти половины значения вертикальной нагрузки. Если на дорожном покрытии испытательного полигона имеются дефекты, то нагрузка может существенно возрасть.

Разработка конструкции и изготовление аутригера

Для работы была выбрана «бамперная» схема аутригеров – две балки, прикрепленные к передней и задней частям автомобиля. Принцип их действия таков: при потере автомобилем устойчивости и стремлении опрокинуться слайдеры входят в контакт с опорной поверхностью, предотвращая дальнейший поворот кузова транспортного средства относительно продольной оси. В этой связи при проектировании аутригеров важно принимать в расчет угол опрокидывания транспортного средства так, чтобы не препятствовать естественным безопасным колебаниям кузова, и в то же время препятствовать опрокидыванию на наиболее ранней стадии. Значение угла опрокидывания автомобиля определяет высоту позиционирования контактных слайдеров аутригера, минимальное значение которой определится по формуле:

$$H = \tan(\alpha) \cdot L, \quad (3)$$

где α – угол опрокидывания, L – расстояние между слайдерами аутригеров и осью крена при опрокидывании транспортного средства (рис. 2).

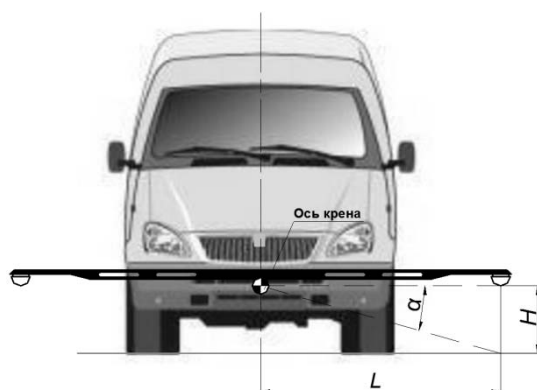


Рис. 2. Схема определения высоты расположения слайдеров аутригеров

На практике определение точного расположения оси, вокруг которой происходит опрокидывание транспортного средства, является весьма трудоемкой задачей по причине того, что ее расположение зависит от конструктивных особенностей подвески, марки шин, положения центра тяжести, которое может меняться в зависимости от величины и способа загрузки автомобиля. Поэтому крепление аутригеров, как правило, делают регулируемым по высоте.

На основании полученных экспериментальных значений коэффициента трения опорной площадки о дорожное полотно испытательного полигона было принято решение, что опора должна быть выполнена в виде колеса из антифрикционного полимерного материала. На основании конструкторской документации объектов испытаний, на которые планируется устанавливать аутригеры, была определена их допустимая область проектирования (рис. 3). Разрабатываемые аутригеры предназначены для установки на легкие коммерческие автомобили (LCV).

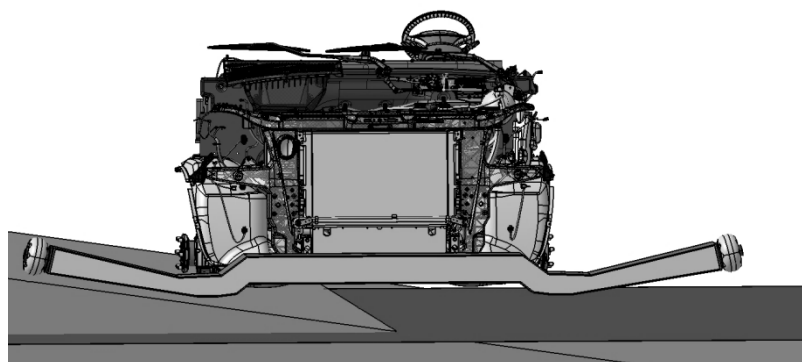


Рис. 3. Предварительная форма аутригера

Используя современные расчетные пакеты, основанные на методе конечных элементов (МКЭ) и позволяющие проводить топологическую оптимизацию конструкции, была разработана конструкция аутригера. Расчетная схема с указанием мест нагружения приведена на рис. 4. Прикладываемые усилия были взяты из отчетов исследований, проводимых NHTSA [3]. Необходимо отметить, что для воспроизведения реального режима нагружения закрепление аутригера производилось через имитатор рамы.

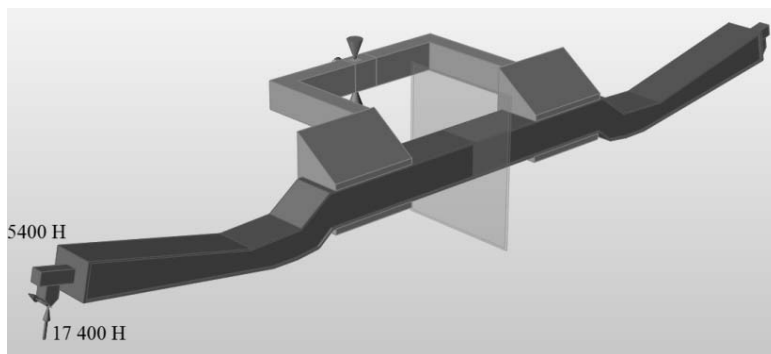


Рис. 4. Расчетная схема аутригера

По результатам работы была получена «идеальная» модель аутригера, приведенная на рис. 5.

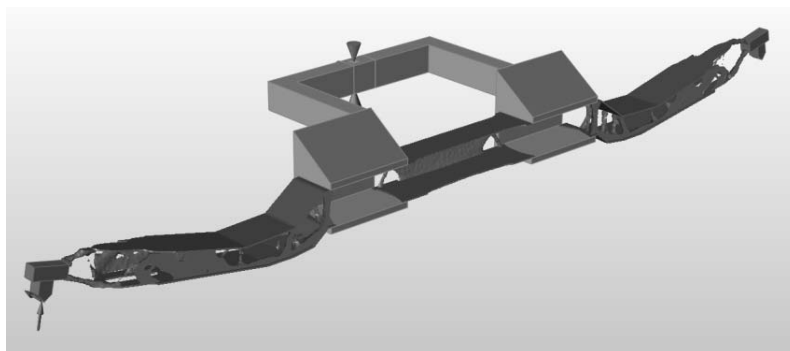


Рис. 5. «Идеальная» модель аутригера

На основании «идеальной» модели была разработана реальная конструкция, учитывающая производственно-технологические возможности, номенклатуру материалов и изменение прочностных параметров материалов в районе сварного шва. Модель аутригера приведена на рис. 6. Конструкция представляет собой сварную балку коробчатого сечения, переменного по длине. Детали аутригера выполнены из листов различной толщины - 2, 4, 5 и 8 мм.

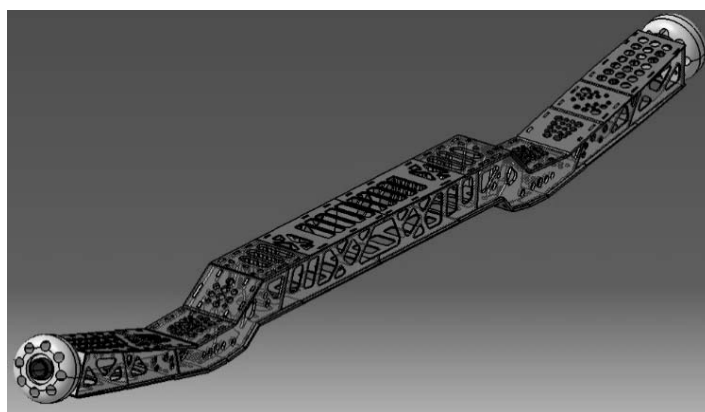


Рис. 6. Модель аутригера

Разработанная конструкция была рассчитана на прочность в современных пакетах программ, основанных на МКЭ с учетом физической и геометрической нелинейности.

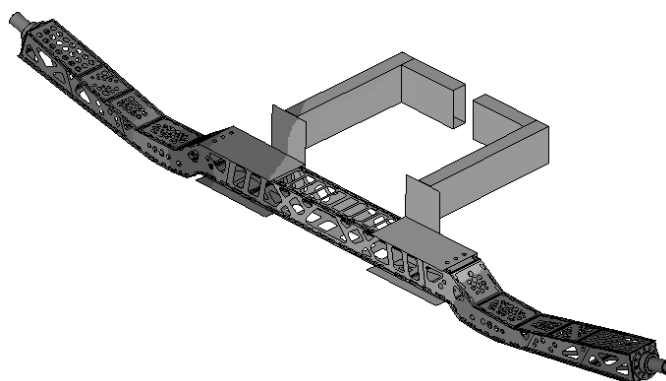


Рис. 7. Деформированное состояние конструкции

Полученные результаты расчетов подтвердили (рис. 7), возможность восприятия данной конструкцией нагрузки приведенной в документах NHTSA [3].

Положительные результаты расчетов позволили реализовать конструкцию аутригера в металле. Для облегчения сборки деталей в единую конструкцию была применена замковая система шип-паз с уникальными для данного положения размерами. Фрагмент изготовления аутригера показан на рис. 8.

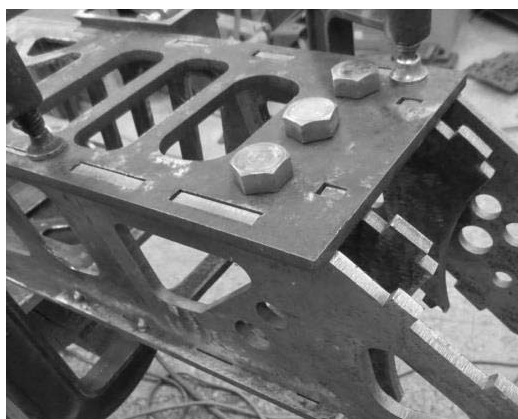


Рис. 8. Изготовление аутригера

Испытание аутригера

Аутригеры устанавливаются на транспортные средства для предотвращения их опрокидывания при выполнении различных экстремальных маневров на территории закрытых полигонов при оценке и доводке управляемости автомобиля и проведении работ по адаптации систем ЭКУ на автомобилях. Аутригеры страхуют автомобиль от опрокидывания и связанных с ним таких негативных последствий, как травмирование людей и повреждение объекта испытаний при потере испытателем контроля над автомобилем. Поэтому для каждого аутригера необходимо провести приемочные испытания перед установкой на транспортное средство.

Для проведения испытаний коллективом авторов был разработан и изготовлен специальный стенд [7]. Данный стенд содержит станину, регулируемое по высоте относительно нее коромысло, на которое специальными зажимами крепится аутригер. Также имеется подвижный контейнер с образцом дорожного покрытия, на который опирается слайдер аутригера. Стенд предусматривает также силоизмерительные устройства для регистрации прикладываемых вертикальных усилий и продольной нагрузки, гидроцилиндры для приложения вертикальной и продольной нагрузок, которые подключаются к гидростанции через гидрораспределитель, позволяющий индивидуально регулировать подачу и давление. Внешний вид стенда и фрагмент испытаний показан на рис. 9.

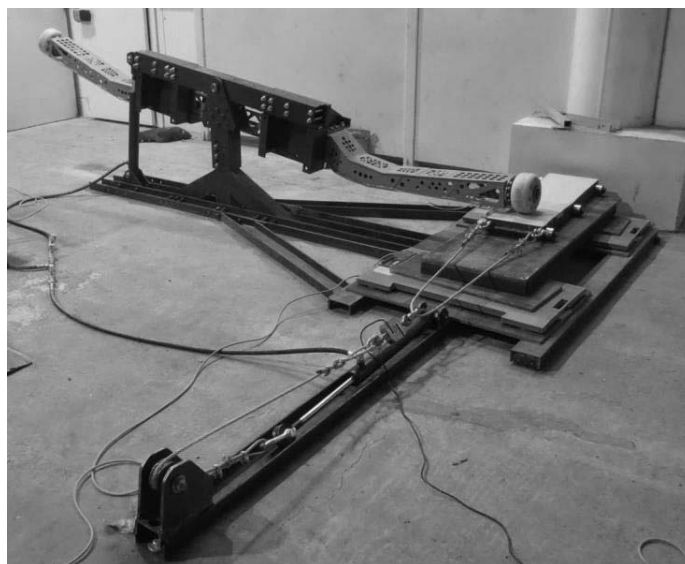


Рис. 9. Стенд для испытаний аутригеров

По результатам испытаний данный образец выдержал более 23000 Н вертикальной нагрузки, при этом регистрируемая продольная нагрузка не превышала 3000 Н.

Выводы

В ходе выполненной работы была разработана конструкция и изготовлен опытный образец аутригера, имеющий необходимые прочностные характеристики. Для проведения приемочных испытаний был разработан и изготовлен специальный стенд.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках проекта по договору № 02.G25.31.0193 от 27.04.2016 г. (постановление Правительства Российской Федерации от 09 апреля 2010 года №218). Экспериментальные исследования выполнены с использованием оборудования Центра коллективного пользования НГТУ «Транспортные системы».

Библиографический список

1. Глобальные технические правила № 8 – ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ УСТОЙЧИВОСТИ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29gen/wp29registry/ECE-TRANS-180a8r.pdf> (дата обращения: 03.06.17);
2. Федеральные стандарты о безопасности моторных транспортных средств [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://icsw.nhtsa.gov/cars/rules/import/FMVSS/> (дата обращения: 03.06.17);
3. Национальное управление безопасностью движения на трассах США [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nhtsa.gov/> (дата обращения: 23.05.17);
4. Сообщество автомобильных инженеров (SAE International) «Effects of Outrigger Design on Vehicle Dynamics» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://papers.sae.org/940226/> (дата обращения: 23.05.17);
5. Технологический университет Luleå (Luleå University of Technology) «Stability Control Validation for Customised Utility Vehicles» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://pure.ltu.se/portal/files/104376062/LTU-EX-2015-104186274.pdf> (дата обращения: 23.05.17);
6. **Крясков, В.Г.** Проектирование аутригеров для испытаний устойчивости транспортных средств / В.Г. Крясков, А.С. Вашурин, А.В. Тумасов, А.А. Васильев // *Фундаментальные исследования*. – 2017. – № 3. – С. 40-47; [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=41392> (дата обращения: 12.06.2017).
7. Заявка 2017106759 Российская Федерация, МПК G01M 17/02; G01M 99/00; G01N 3/20. Стенд для испытаний аутригеров / Вашурин А.С., Трусов Ю.П., Мошков П.С., Торопов Е.И.; заявитель НГТУ; – № 2017106759; заявл. 01.03.2017; опубл. 01.03.2017.

*Дата поступления
в редакцию 22.11.2017*

A.S. Vashurin, Y.P. Trusov, L.N. Orlov, V.Y. Shurigin

**DEVELOPMENT OF AN OUTRIGGER DESIGN USED TO PREVENT
VEHICLE TIPPING DURING TESTING**

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

Electronic stability control systems are developed in order to improve stability of vehicles in critical conditions of motion. Mass introduction of such systems helped to significantly decrease number of road accidents. Since each model of vehicle has its own mass characteristics, it is necessary to provide adaptation operations, which are conducted at special testing sites. The testing program is established by legislation and includes number of special maneuvers fulfilment of which involves risks of vehicle tipping. In order to prevent such dangerous cases the vehicle should be equipped with special supports called outriggers.

This paper contains an analysis of existing types of outriggers as well as legislative requirements on them. The analysis results were taken into account during the development of outrigger design. The design process was implemented with the use of modern computer aided design tools providing strength analysis based on finite element method. The software provided a possibility to conduct topological optimization of the model as well. As a result, a prototype and design documentation were obtained and method of further production was evaluated.

Product functionality assumes that every exemplar shall be accredited in accordance with stated strength characteristics. A special test-bench was designed, manufactured and certified for these purposes.

Key words: outrigger, testing, electronic stability control systems, ESC, finite element method, FEM, LCV, strength, optimization, loads, test-bench.

УДК 621.745

Ю.А. Зиновьев¹, А.А. Колпаков², С.В. Кузнецов¹, В.Д. Швецов¹,
Г.И. Белявский¹, А.М. Шнейберг¹

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛИТЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ВАЛОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
ОАО «Горьковский автомобильный завод»²

Приведен краткий обзор технологий получения литых распределительных валов. Предложен новый способ получения изделий с целью повышения износостойкости введением новых добавок с кальцием и серой.

Ключевые слова: литые распределительные валы, отбеленный чугун, эксплуатационные и технологические показатели.

Задачи повышения эффективности автомобильной техники, увеличения её долговечности, снижения металлоёмкости не могут быть решены без непрерывного совершенствования техники и технологии литейного производства.

Одной из деталей распределительного механизма современного автомобильного двигателя, от которой в значительной степени зависят надежность и долговечность работы самого двигателя, является распределительный (кулачковый) вал.

Изнашивание деталей системы газораспределения связано с протеканием сложных механических и теплофизических процессов, включающих трение при высоких удельных нагрузках в условиях граничной смазки и наличия некоторого количества абразивных частиц в сопряжениях трущихся поверхностей. Именно в таких условиях контактных нагрузок и высоких скоростей относительного перемещения пар трения поверхностей кулачков и толкателей работает распределительный вал.

Отклонение в работе распределительного вала приводит к нарушению процесса воспламенения, снижению мощности оборотов и экономичности двигателя. В связи с этим к детали предъявляется комплекс определенных технических требований:

- высокая износостойкость кулачков;
- способность гасить динамические колебания;
- высокая твердость и хорошая вязкость;
- высокие механические свойства на сжатие, изгиб и срез;
- оптимальные микро- и макроструктуры, обеспечивающие хорошую сопротивляемость износу в различных условиях эксплуатации;
- стабильность структуры и свойств при рабочих температурах;
- высокая теплопроводность, обеспечивающая быстрый отвод тепла из зон местного нагрева;
- хорошая сопротивляемость усталостным разрушениям; отсутствие склонности к схватыванию с материалом толкателя.

Современные тенденции развития производства высокооборотных автомобильных двигателей повышенной мощности выявили необходимость борьбы с преждевременным износом распределительных валов.

Из всего многообразия факторов, влияющих на эксплуатационную стойкость распределительных валов, определяющую роль, по мнению специалистов, должен играть выбор как материала детали, так и средств обеспечения заданных физико-механических свойств и микро-

структуры, характерных для этой детали. Поэтому исследования последних лет в области производства распределительных валов велись в основном в двух направлениях - изыскание рациональных материалов для изготовления ответственных литых заготовок и совершенствование технологии их получения при невысокой себестоимости.

В качестве материалов для автомобильных распределительных валов обычно применялись углеродистые и легированные стали.

Возможность замены стали, как материала распредвалов, на чугун продолжала оставаться в поле зрения автомобилестроителей. Повышенный интерес к чугуну в последние годы вызван тем, что в условиях массового производства автомобильных двигателей наряду со значительной износостойкостью распределительные валы должны быть не только технологичными, но и экономически выгодными [1]. Чугун наиболее полно удовлетворяет этим требованиям.

Служебные характеристики литых деталей из чугунов в сочетании с заданной твердостью рабочих поверхностей позволяют достичь в распределительных валах износостойкости, превышающей этот показатель в аналогичных стальных заготовках, что открывает большие возможности для экономии стального проката, снижает трудоемкость механической обработки за счет получения отливок уменьшенной массы и близких по конфигурации к готовой детали.

Стальные распределительные валы по эксплуатационным и технологическим показателям уступают современным чугунным валам (особенно при использовании их в высокооборотных двигателях). Дело в том, что вследствие меньшего модуля упругости чугуна в сравнении со сталью его применение способствует значительному снижению контактных напряжений. Наличие свободного углерода в виде графитовых включений в чугуне позволяет предотвратить возникновение сухого трения и наиболее тяжелого вида повреждения поверхности - задира в зоне контакта "кулачок-толкатель". Кроме того, в чугуне можно осуществлять регулирование содержания карбидов, которые резко повышают износостойкость, являющуюся одним из важнейших показателей материала распределительных валов и пропорциональную, как известно, поверхностной твердости. Применение отбеленных чугунов позволяет получать необходимую твердость не менее HRC₃ 49 при отсутствии (в отличие от стальных) термообработки. Достаточно хорошая теплопроводность чугуна снижает температурные напряжения в валах.

В то же время в большинстве случаев распределительный вал слабо нагружен, поэтому требования к прочности материала минимальны ($\sigma_B \leq 25 \text{ кг/мм}^2$). В таких условиях применение серого чугуна, способствующего уменьшению динамических знакопеременных нагрузок и колебаний, наиболее выгодно.

Максимальная износостойкость обеспечивается за счет создания на трущихся поверхностях отбеленного слоя. Достигается это применением целого ряда технологических приемов, таких как установка в литейную форму индивидуальных холодильников, изготовление биметаллических деталей (толкателей, рычагов, клапанов), рабочая поверхность которых выполнена наплавкой белого чугуна или применением вставок из такого чугуна.

Получение высококачественной отбеленной зоны кулачка, стабильной по расположению, может быть достигнуто в результате использования различных способов литья. При этом требуется организация специализированных смежных участков по всему циклу производства, в т.ч. для изготовления точных металлических холодильников, предназначенных для формирования качественного отбеленного слоя.

Как правило, распределительные валы из серого чугуна отливают в песчано-смоляных оболочковых формах. При этом заданная твердость кулачков достигается за счет установки в форму холодильников.

Технология изготовления чугунных распределительных валов с доследующей закал-

кой для деталей двигателей быстроходных автомобилей при кажущейся приспособленности к условиям массового производства не обеспечивает стабильной работоспособности этой детали - имеет место ранний задир и износ кулачков [1].

Хотя получение отбеленных отливок при помощи индивидуальных холодильников представляет собой трудоемкий процесс, включающий изготовление, подготовку и сборку в литейной форме большого количества холодильников, этот метод нашел сейчас наибольшее применение в практической деятельности ряда фирм для различных марок серых чугунов. Об этом свидетельствуют публикации зарубежной периодики, а также ряд патентов автомобилестроительных фирм Японии, США и стран Западной Европы [2-4].

Процесс получения распределительных валов, отбеленных при помощи холодильников, не только обеспечивает высокую износостойкость, но и позволяет расширить пределы химического состава чугуна, ликвидировать недостатки, присущие подвергаемым закалке деталям (необходимость рихтовки, образование трещин, отслоение закаленного слоя и т.д. [5].

В оценке эффективности использования отбеленных чугунов в производстве распределительных валов автомобильных двигателей английские и японские производители единодушны. В этом направлении ими проведены серьезные исследования механизма формирования белых чугунов [6, 7]. При высоких скоростях охлаждения наружный слой отливки имеет структуру белого чугуна, в котором углерод находится в связанном состоянии в виде карбидов, сердцевина - серый чугун, а переходный слой представляет собой структуру чугуна половинчатого. Карбидообразующие элементы Cr (до 0,3 %) и Mn способствуют стабилизации карбидов, измельчению перлита, увеличению прочности, твердости, износостойкости материала.

Результаты активных многофакторных исследований влияния химического состава металла на качество распределителей и практический опыт в этой области подвели специалистов-литейщиков к мысли о том, что наиболее рациональным материалом для литых заготовок рассматриваемой детали является серый чугун с заданным содержанием компонентов.

Так, по мнению польских специалистов, чугунный распределитель, отлитый в песчаной форме с холодильниками соответствующей толщины (5-20 мм), не нуждается в индукционной закалке, если химический состав серого чугуна соответствует следующему соотношению элементов, %: C 3,1-3,5, Mn 0,5-0,8, Si 1,8-2,2, Cr 0,7-0,9, Ni 0,15-0,3, Si 0,3-0,7, S \leq 0,15, P \leq 0,2 [21].

Для распределительных валов, требующих более высокого сопротивления точечной коррозии и истиранию фирма Riken Co (Япония) использует отбеленный чугун марки RIK-C3 несколько иного химического состава (вес. %): C 3-3,8; Si 1,6-2,8; Mn 0,5-1,0; P \leq 0,3;

S \leq 0,15; Cr 0,1-1,0; Ni 0,2-1,0; Mo \leq 0,5. Поверхностная твердость на носике кулачка достигает HRC₃ 47 [23]. При этом следует отметить, что в литейных цехах фирмы распределительные валы получают в разовых песчаных формах на автоматических линиях. Одним из предлагаемых способов изготовления подобных литых заготовок является литье в оболочковые формы [8], где оболочку в опоке располагают горизонтально. С целью повышения эффективности отбеливания кулачков в форме устанавливают холодильники, при этом глубина отбела достигает 3,5-4,0 мм. Рекомендуемая температура заливки 1280-1370°C.

При термической обработке кулачков распределителей возникают сложности, связанные с частичным выкрашиванием упрочненного слоя и микротрещинами, отсутствием надежной воспроизводимости получаемых результатов по износостойкости деталей.

Таким образом, несмотря на наличие нескольких новых технологий, применяемых в настоящее время при производстве износостойких распределительных валов (комбинированные валы с кулачками из металлокерамики, либо наплавка на кулачки износостойкого сплава), валы с отбеленными кулачками остаются вне конкуренции. Подобная оценка вытекает из сравнительных данных таких параметров, как износостойкость, технология производства и экономическая целесообразность.

Испытания распредвалов стальных, с закалкой кулачков и чугунных с отбеленными кулачками показали, что если при 150 тыс. км пробега отбеленные кулачки чугунных валов не имеют износа, то для такого же пробега необходимо произвести замену стальных валов до 2-х раз из-за чрезмерно большого износа кулачков. Поэтому было принято решение ставить на новые двигатели только чугунные распределительные валы с искусственным отбелом кулачков с помощью холодильников [9]. Трудность организации производства валов заключалась в том, что для их отливки необходим чугун специального химсостава, отличающийся от стандартных СЧ15 и СЧ25.

Для повышения качества отбела кулачков распредвала применили дополнительное легирование чугуна дробленным феррохромом в раздаточный ковш в количестве 0,2-0,4%. В качестве критерия отбеливающей способности чугуна была принята технологическая проба – клин. По глубине отбела на клине экспериментально устанавливали необходимое количество добавляемого феррохрома. Для большего удобства в работе была разработана номограмма зависимости: глубина отбела по клину – навеска вводимого феррохрома в ковш. Но выявилась проблема: при более «жестком» химсоставе металла, когда на кулачках был отличный отбел, на отливках возникали дефекты в виде «утяжин» и «усадочных раковин» в сопряжениях между шейками и стержнем вала. Для предупреждения указанных дефектов в отливках скорректировали номограмму, ужесточив количество вводимого феррохрома. Но тогда появились случаи неудовлетворительного отбела кулачков распредвала. Установка прибыли со стороны хвостовика уменьшила усадочные дефекты в вале. Для уменьшения колебаний химсостава (в особенности по углероду к кремнию) в течение смены была организована плавка металла отдельно в тигельной индукционной печи, где выдача чугуна из печи производилась после получения требуемого химсостава по данным спектрального анализа из химлаборатории.

После расплавления всей шихты при температуре 1480°C заливали предварительную пробу на химанализ и технологическую пробу – клин на отбел. По результатам химанализа предварительной пробы и глубины отбела клина в печь вводили необходимые присадки. Навеску феррохрома брали по разработанной номограмме. Затем, доведя температуру металла в печи до 1480°C, заливали второй клин на отбел. При недостаточном отбеле на клине в печь вводили дополнительно феррохром. При достижении температуры 1500°C металл из печи выдавали в раздаточный ковш. Заливку валов производили при температуре 1440-1380°C в корковые формы, с вставленными в них холодильниками. Все же и в этой печи (в меньшей степени) оставалась проблема исключения усадочных дефектов или неудовлетворительный отбел на кулачках вала. Эта проблема была решена после внедрения новой добавки [10] – серокальцийсодержащего вещества (окшары), которую стали вводить в печь в количестве 0,4-0,6%.

Отбел на кулачках стал получаться четким, без включений точечного графита с твердостью 49-55 HRC, и на глубину ≥ 7 мм. Микроструктура отбеленного слоя кулачков состояла из столбчатых карбидов и ледебурита с плавным переходом в неотбеленную часть отливки, состоящей из пластинчатого графита и сорбитообразного и мелкопластинчатого перлита. Но поскольку окшара была отходом лесохимии, была замечена нестабильность по химсоставу и количеству влаги, что вынуждало ее прокаливать в печах. Поэтому перешли на новую серокальцийсодержащую присадку – гипс, который выпускается промышленностью прокаленным, со стабильным химсоставом и любой расфасовки [11].

Макроструктура кулачка с добавкой гипса и без добавки показаны на рис. 1 и рис. 2. Новая присадка увеличила стабильность получения отбела на носиках кулачков распредвалов, а в остальных частях вала исключало первичный цементит.

Переход на использование одной и той же индукционной печи для плавки разных по химсоставу чугунов, в частности, с высоким содержанием серы до 0,08-0,12% для распре-

валов и до 0,02% для получения высокопрочного чугуна, привели к смене места ввода гипса с тигля электрической печи в раздаточный ковш, но гипс стали вводить вместе с ферромарганцем для лучшего усвоения серы и кальция из гипса чугуном [12].*

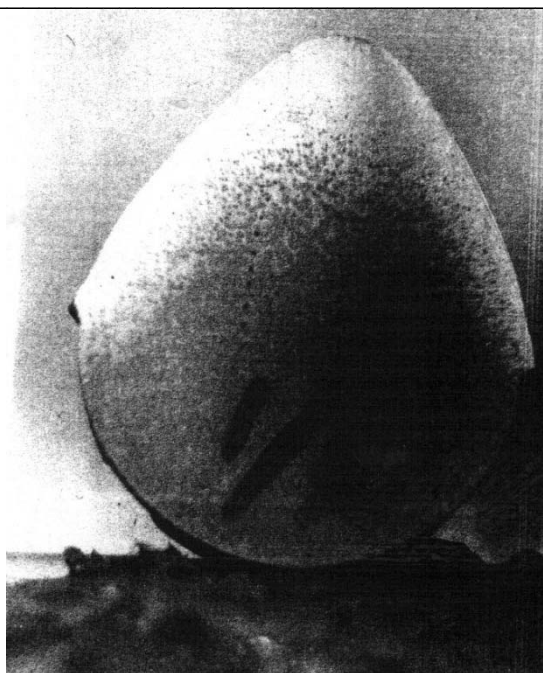


Рис. 1. Макроструктура кулачка распредвала с добавкой гипса

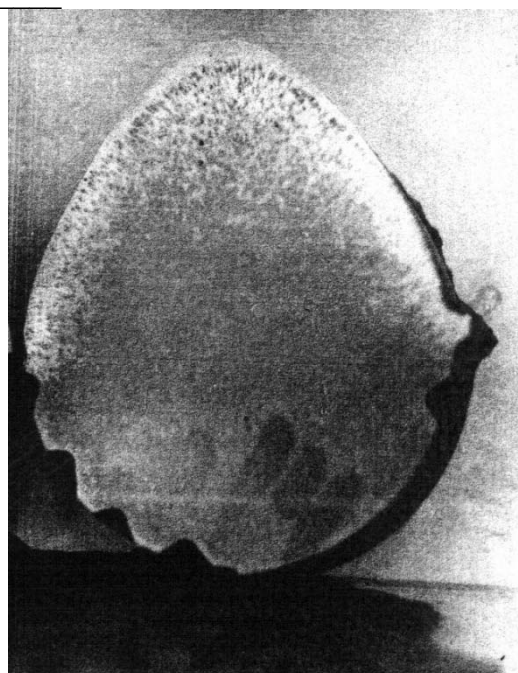


Рис. 2. Макроструктура кулачка распредвала без добавки гипса

Библиографический список

1. **Крючков, О.Н.** Износостойкость литых деталей газораспределительного механизма автомобильных двигателей / О.Н. Крючков, М.М. Левитан // Автомобильная промышленность. – 1996. – № 1. – С. 8-11.
2. Заявка 58-112651, Япония, МКИ В 22 Д 25/50, В 22 Д 18/06. Литье в оболочковые формы распределительных валов (Маэсава Сэй и др. (Япония); № 56-209289; заявлено 25.12.81; опубл. 05.07.83.
3. Заявка 59-39446, Япония, МКИ В 22 С 9/00, В 22 С 9/22. Литье в оболочковые формы кулачковых валов / Киносита Нобуру (Япония); Тоё когё к.к. (Япония).- 57-148258; заявлено 25.08.82; опубл. 03.03.84.
4. Заявка 60-191618, Япония, МКИ В 21 Д 15/00. Литье в металлокерамические формы кулачковых валов (Мидзуно Йосикацу, Гоми Фукуо, Исомура Хироюки (Япония); № 59-46065; заявлено 9.03.84; опубл. 30.09.85.
5. Литейное производство в автомобильной промышленности Японии // Автомобильная промышленность. – 1984. № 6. – С. 37-38.
6. Заявка 60-139968, Япония, МКИ 16 Н 53/02, В 22 7/08. Распределительный вал / Умэба Гэнкити, Хиракава Лсаму; Ниппон писутон рингу к.к. - № 58-245447; заявлено 28.12.83; опубл. 24.07.85.
7. Заявка 61-115660, Япония, МКИ В 22 Д 19/02, В 22 С 9/04. Способ литья кулачковых валов / Катадзумэ Юдзи, Умэгаки Сюдзю; Ниссан дзидося к.к. - № 59-237429; заявлено 13.11.84, опубл. 3.06.86.
8. Проспекты фирмы Рикен Корпорейшен. «Детали двигателя фирмы «Рикен», 2007.
9. Способ получения отливок автомобильных распределительных валов. Б.П. Платонов, А.А. Колпаков. Авторское свидетельство № 980955, 1968.

* В работе участвовали: Эпштейн К.К., Степанов А.В., Гусаров Н.Н.

10. Авторское свидетельство № 1206328, С 22 С35/00 Бюл. № 3, 1986 г. Зиновьев Ю.А., Чураев В.М. [и др.]. Присадка для легирования сплавов кальцием и серой.
11. Патент на изобретение № 2254207, 2005 г. Зиновьев Ю.А., Колпаков А.А., Зуев М.П. [и др.]. Способ получения отбеленных износостойких отливок.
12. Патент на изобретение № 2477195, 2013 г. Зиновьев Ю.А., Колпаков А.А., Куракин С.А., Кривошеев О.С., Селихов В.А., Никитин А.В. Способ получения отбеленных износостойких отливок.

*Дата поступления
в редакцию 20.11.2017*

Yr. Zinoviev¹, A. Kolpakov², S. Kuznetsov¹, V. Shvetsov¹, G. Belyavsky¹, A. Schneiberg¹

IMPROVING THE PRODUCTION OF CAST DISTRIBUTING SHAFTS

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R. E. Alekseev¹,
GAZ Corp.²

Purpose: Design and development of productive technology for cast camshafts for high-speed automobile engines for the purpose of their operational parameters improvement.

Design/methodology/approach: Additional ferrochrome alloying and introduction of sulphur and calcium substance (plaster) into the alloy were used for the purpose of camshaft cams chilling quality improvement.

Findings: The new technology allowed for improvement of durability features of the camshaft cams.

Research limitations/implications: The developed technology is meant to be used in automobile engines production area. Originality/value: The usage of the compound sulphur-calcium additive allowed for maintaining higher contents of carbides in noses of camshaft cams and avoiding the carbides in camshaft body.

Key words: casted camshafts, chilled cast iron, performance and technological criterias.

УДК 629.12

А.А. Куркин, С.А. Васильев, М.Н. Ребрушкин

**СУДОВОЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ УПРАВЛЯЮЩИЙ КОМПЛЕКС ГРУЗОВЫХ СУДОВ
ВНУТРЕННЕГО ПЛАВАНИЯ**

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева

Настоящая статья посвящена вопросу выбора оптимальных, экономически и технически выгодных режимов работы главных двигателей судов внутреннего плавания в зависимости от постоянно изменяющихся сложных путевых, гидрометеорологических и экономических условий эксплуатации. Данная практическая задача решается с использованием теории работы судового пропульсивного комплекса «корпус – движитель – двигатель – средства управления». Комплексная теория позволяет достоверно оценить работу всех перечисленных элементов в их взаимосвязях, учитывать внешние путевые и гидрометеорологические условия, в нее легко могут быть введены планируемые и фактические технико-экономические показатели и условия конкретного рейса. Данная теоретическая модель эксплуатации судна позволяет в любой момент времени поменять исходные и назначить наиболее целесообразные режимы работы судового движительно-рулевого комплекса. Рассматривается метод повышения эффективности работы судовых энергетических установок судов внутреннего плавания за счет использования модернизированного судового электронного управляющего комплекса.

Ключевые слова: режимы работы главных двигателей, суда внутреннего плавания, движение судна, экономичность работы судна, экономия топлива.

Суда внутреннего плавания движутся в постоянно меняющихся путевых и гидрометеорологических условиях. К данным условиям относят различные характеристики фарватера, его ширину и извилистость, течения разных направлений и интенсивности, путевые ограничения, разнообразный по силе и направлению ветер, а также различную загрузку самого судна. Как показывают источники [3, с. 25-28; 5, с. 95] для множества сочетаний этих условий характерны свои целесообразные режимы движения судна, и, следовательно, параметры работы его энергетической установки. При этом целесообразные режимы работы судового комплекса могут значительно отличаться от номинальных. Одновременно наблюдается значительное снижение нагрузки на судовые двигатели, что приводит к существенной экономии топлива [4, с. 57-60].

Изменение условий движения судна происходит постоянно и его очень трудно спрогнозировать, это сильно затрудняет предварительное назначение оптимальных режимов работы судовых комплексов. Естественно, что судоводитель не в состоянии оперативно реагировать на изменение условий движения, так как количество параметров, подлежащих одновременному учёту, достаточно велико. Поэтому реальные режимы движения транспортных судов в настоящее время далеки от оптимальных.

Проблема оптимальных параметров работы главных двигателей транспортных судов внутреннего и смешанного плавания в зависимости от постоянно изменяющихся и трудно прогнозируемых условий является весьма актуальной и серьёзной. Примечательно, что оптимизация режимов работы судового комплекса связана со снижением нагрузок на судовые двигатели, экономией их моторесурса и расхода топлива.

Движение судна по речному фарватеру с номинальными скоростями вращения главных двигателей (движителей) или на полную мощность вовсе не является экономически наиболее выгодным [2, с. 48-50; 5, с. 95-96, 6 с.73-74].

Следует отметить, что вместе с сокращением общего ходового времени в рейсе, повышении производительности работы судна, улучшении использования фонда заработной платы заметно ухудшаются другие эксплуатационные составляющие, такие как расход топ-

лива главным двигателем за рейс, появляется повышенный износ механизмов и, в первую очередь, элементов судовой энергетической установки, снижается безопасность плавания. Наоборот, если судно движется со слишком малыми скоростями, то ухудшение экономических и эксплуатационных показателей будет наблюдаться за счет увеличения доли заработной платы, ходового времени, снижения объема перевозок. Картина еще более ухудшается, если при работе судна появляются незапланированные простои при ожидании разгрузки, шлюзования и т.п.

Определение такой оптимальной скорости движения судна в рейсе, при которой эксплуатационные характеристики работы главных двигателей оказались бы экономически наиболее выгодными, ведется на протяжении многих лет. При этом к понятию «оптимальная скорость» добавилось ограничение в виде некоторой «безопасной» скорости, при которой прохождение мелководных участков происходило бы без сильного увеличения волнообразования, заметной просадки кормовой оконечности судна, недопустимой перегрузки главных двигателей, без опасного увеличения вибрации. Над решением этой задачи работало множество специалистов, однако такие решения оказались лишь приблизительными, не учитывающими полную картину эксплуатации судна.

Необходимо отметить, что в каждый момент рейса судно внутреннего плавания движется в постоянно изменяющихся путевых и гидрометеорологических условиях. К ним, в первую очередь, можно отнести ветроволновые условия, извилистость судового хода, переменную глубину фарватера, ожидание шлюзования и т.д. Эти величины не поддаются точному прогнозированию, могут приниматься лишь как средние за рейс, однако очень сильно влияют на режимы работы главных двигателей, рулевого комплекса судна, на технико-экономические показатели его работы.

Одним из способов решения данной задачи является разделение вероятных основных рейсов судов на отдельные участки, для которых определяют оптимальные скорости и режимы работы силовой установки. Но и в этом способе есть свои недостатки, особенно если принимать во внимание изменение уровня воды в реке на протяжении навигации. Кроме того, такой подход возлагает дополнительную нагрузку на судоводителей, и они, естественно, не принимают его в практику судовождения. Поэтому оптимистические результаты испытаний судов при таком подходе искусственны, наблюдаются только при проведении самих испытаний. Кроме того, оптимальные скорости зависят и от технического состояния судна, количества перевозимого груза (посадки судна), характера груза (провозной платы), других условий рейса, например, возможных премий за срочную доставку или, наоборот, штрафов за опоздание и др. Поэтому потребовалась бы огромная работа по составлению справочников величин оптимальных скоростей для разнообразных условий, пользоваться которыми было бы крайне затруднительно. А если принять во внимание и разное техническое состояние силовых установок конкретных теплоходов, то такой подход к решению задачи оказывается просто неосуществимым.

Напрашивается вывод, что управление режимами главных двигателей в целях наиболее выгоднейшей работы судна, экономии топлива целесообразно поручить автоматизированному комплексу, который в любой момент времени мог бы достоверно обеспечивать наиболее рациональные режимы движения судна с учетом не только внешних условий движения, экономических показателей, но и его конкретных технических параметров. Таким образом, одной из узловых задач автоматизации и компьютеризации судоходства является задача обеспечения оптимальных, экономически и технически выгодных режимов работы движительно-рулевых комплексов судов, особенно главных двигателей в постоянно меняющихся сложных путевых, гидрометеорологических и экономических условиях их эксплуатации.

Данная задача поддержания единственно правильного рационального режима работы судового комплекса в зависимости от многочисленных, постоянно меняющихся факторов не может быть возложена на судоводителей, так как решение данной задачи находится за пределами человеческих возможностей. Если обязать судоводителей поддерживать оптимальные режимы

хотя бы в зависимости от небольшого числа параметров, это приведет к усложнению и без того напряженной их работы, увеличит число ошибок, снизят показатели безопасности плавания.

Вместе с тем, эта задача вполне разрешима на основе современных методов судовождения, базирующихся на достоверной теории работы судового комплекса «корпус судна - средства управления - судовые главные двигатели» [1, с. 42-44].

Такой комплекс должен полностью учитывать, как постоянные (вид груза, загрузку и посадку судна, экономические показатели и т.п.), так и переменные (глубина и извилистость фарватера, течение, скорость и направление ветра и т.д.) в течение рейса параметры работы судна и поддерживать их при условии достижения наибольшей экономической эффективности и безопасности эксплуатации судна.

Таким требованиям отвечают существующий судовой электронный управляющий комплекс (СЭУК) и, в особенности, модернизированный судовой электронный управляющий комплекс (СЭУК-М) [5, с. 97-98]. Они разработаны для определения таких режимов работы главных двигателей реального судна, при которых прибыль за рейс является максимальной при минимизации эксплуатационных затрат, особенно в отношении расхода топлива главными двигателями при постоянно изменяющихся условиях реального рейса. Основной особенностью этих комплексов является то, что их работа не ограничивается только определением подобных режимов, но также одновременно происходит текущее автоматическое управление главными двигателями судна с целью постоянного поддержания расчетных рациональных режимов.

Первоначально разработанный СЭУК состоит из двух основных блоков: вычислительного комплекса (ВК) и электронного регулятора оптимальных режимов работы главных двигателей (ЭРД) (рис. 1).

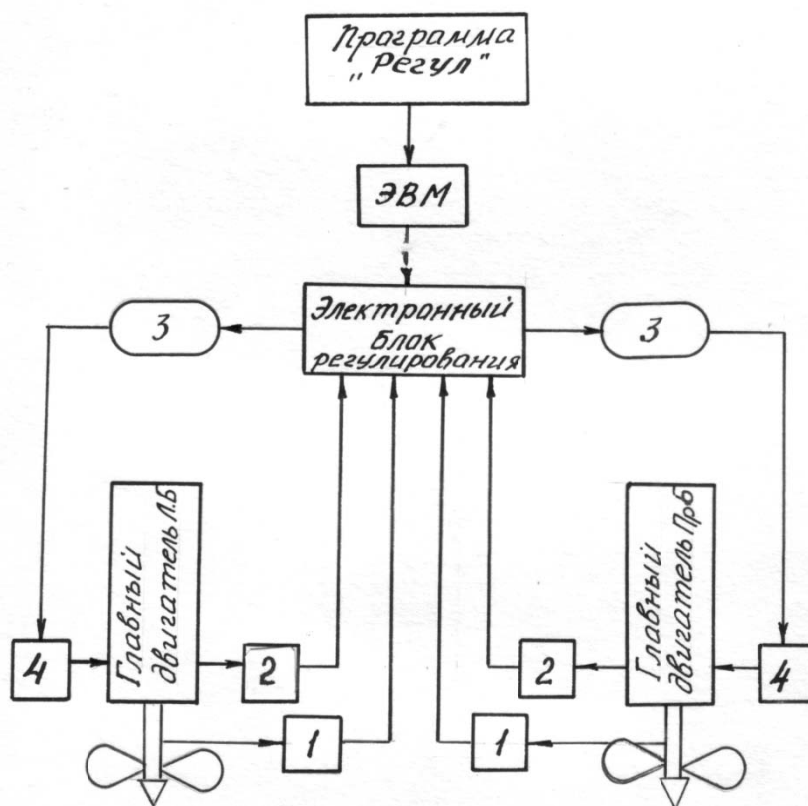


Рис. 1. Структурная схема СЭУК:

1 – тахогенератор; 2 – датчик обратной связи по подаче топлива в ГД;
3 – исполнительный механизм; 4 – штатный регулятор

Ядром ВК является установленный на судне персональный компьютер, для которого на основе комплексной теории переходных процессов судового комплекса специально разработано оригинальное программное обеспечение. ЭРД создан на электронно-механическом принципе [3, 5]. В него включены электронный блок регулирования, датчики положения элементов управления главными двигателями, а также исполнительные механизмы, подключенные к штатной судовой системе дистанционного управления главными двигателями.

ЭРД перед рейсом настраивается по параметрам, рассчитанным вычислительным комплексом, и далее работает автономно, постоянно и автоматически учитывая изменения условий движения судна в реальном рейсе [3, с. 68-70]. Вместе с тем, при необходимости, например, возникновении резерва времени в ожидании шлюзования или подхода к причалам, возможна простая корректировка режимов работы по поправкам, рассчитанным ВК.

Принципиальные решения, положенные в основу работы СЭУК, а также элементы его конструкции прошли проверку и надлежащую доработку на опытном образце в процессе проведения его натурных испытаний, проведенных на грузовых судах в условиях реальных рейсов в течение нескольких навигаций [3, с. 72-73]. Доработанный вариант СЭУК был внедрен на малой серии грузовых судов типа "Волго-Дон" (5 единиц) с целью проведения пробной эксплуатации в течение реальных навигаций [4, с. 88-90]. Пробная эксплуатация и проведенные сравнительные натурные испытания показали достаточную простоту использования и надежность работы СЭУК, а также весьма высокую экономическую эффективность их применения. Показательно, что на сложных участках пути экономия топлива превышала 23%, а средние ориентировочные показатели экономии ГСМ за навигацию оказались не менее 8% [4, с. 74-75].

Был отмечен большой интерес судоводителей-практиков к устройству и применению СЭУК, получены хорошие отзывы о их работе. Однако они еще не в полной мере освоились с проведением вычислений на ЭВМ. Однако при эксплуатации малой серии не был налажен постоянный контроль правильности использования СЭУК. Поэтому хотя и имеются положительные результаты по итогам навигации, но они несколько меньше ожидаемых расчетных величин.

Анализ опыта, полученного при пробной эксплуатации СЭУК на теплоходах типа "Волго-Дон" [4 с., 75-78], показал, что заниженные показатели эффективности применения СЭУК в основном объясняются тем, что его работа оказалась почти незащищенной от влияния человеческого фактора.

Во-первых, конструктивной особенностью СЭУК является разделение работы вычислительного комплекса (ВК) и электронного регулятора движения (ЭРД). При этом настройка электронного регулятора осуществляется непосредственно судоводителем вручную. Естественно, качество настройки зависит непосредственно от квалификации и личной ответственности настраивающего. Выявлены случаи настройки ЭРД не по параметрам, рассчитанным ВК, а по собственным соображениям капитана, что приводило к работе СЭУК на режимах, далеких от оптимальных.

Во-вторых, в конструкции СЭУК не заложен постоянный контроль правильности его применения. Поэтому те судоводители, которые не осознают заинтересованности в экономии эксплуатационных расходов, в частности, экономии топлива, зачастую работают на нерациональных режимах или же вообще отключают СЭУК по субъективным соображениям.

В-третьих, работа ЭРД связана с постоянной оценкой расхода топлива каждым из главных двигателей. Вместе с тем, эта информация содержится в структурной схеме в неявном виде, хотя сведения о мгновенном и суммарном расходе топлива в доступном виде весьма полезны для качественной работы судоводителя и, естественно, для судовладельца.

Дополнительно существенным недостатком СЭУК явилось то, что программа, заложенная в него, предназначена только для грузовых теплоходов типа «Волго-Дон». Она построена по «жесткому» принципу и не может быть без существенных переделок использована на теплоходах с иными пропульсивными комплексами.

Таким образом, пробная эксплуатация СЭУК в реальных навигационных условиях показала необходимость развития его принципиальной структуры и конструктивных решений в направлении:

- осуществления настройки СЭУК на расчетные параметры непосредственно при автоматизированном использовании возможностей вычислительного комплекса;
- реализации постоянной фиксации времени и режимов работы СЭУК с автоматической записью в запоминающем устройстве (ведение электронного журнала работы СЭУК);
- представления информации о мгновенном и суммарном расходе топлива главными двигателями в явном виде на экране персонального компьютера с автоматической регистрацией в электронном журнале;

Внедрение обновленных принципов построения программного обеспечения ВК, позволяющих использовать его для разных судов с различными пропульсивными комплексами.

Эти обстоятельства были учтены в последующей работе, в результате которой был создан новый, более совершенный вариант судового электронного управляющего комплекса – СЭУК-М (СЭУК модернизированный) [5, с. 97] (рис. 2).

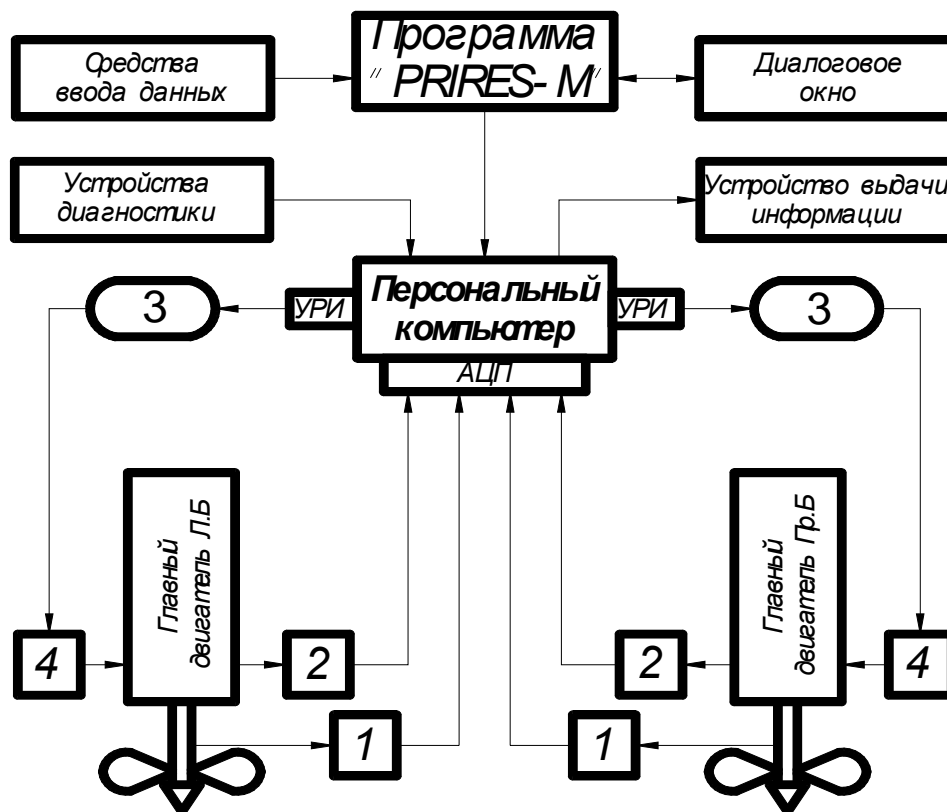


Рис. 2. Структурная схема СЭУК-М

1 – тахогенератор; 2 – датчик обратной связи;
3 – исполнительный механизм; 4 – штатный регулятор

Основной его особенностью явилось объединение в единое взаимосвязанное целое ВК и ЭРД. Вторая существенная особенность – разработка обновленного программного обеспечения, более полно использующего возможности теории переходных процессов судового пропульсивного комплекса. В СЭУК-М в его память перед рейсом вводятся только постоянные данные будущего рейса (рис. 3), а изменяющиеся условия учитываются постоянно работающим в течение движения судна в рейсе вычислительным комплексом.

Изменение режимов работы системы «двигатель – движитель», а также сопровож-

дающие параметры постоянно отражаются на экране дисплея (рис. 4). Вместе с тем реализован диалоговый режим взаимодействия судоводителя с программным обеспечением СЭУК-М, позволяющий в любой момент времени получить информацию о работе комплекса и вводить необходимые корректировки. Данные с датчиков обратной связи и тахогенераторов о работе главных двигателей поступают в вычислительный блок с программным обеспечением PRIRES-M при помощи узла сбора данных (рис. 5).

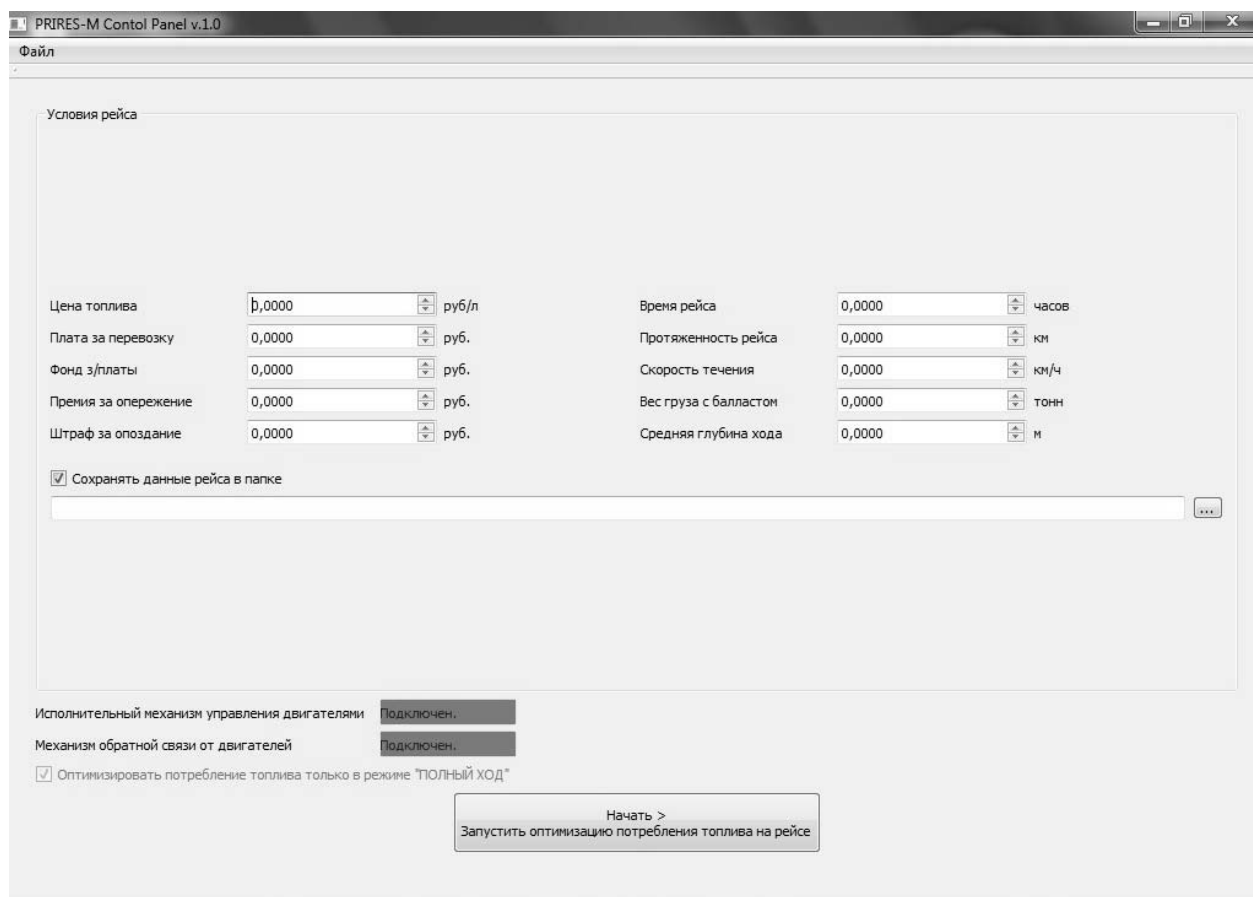


Рис. 3. Окно ввода постоянных условий рейса PRIRES-M

После расчёта рационального режима работы управляющий сигнал от программы PRIRES-M поступает на исполнительные механизмы с помощью узла подготовки и выдачи управляющих сигналов на исполнительные устройства (рис. 6).

Вместе с тем, важная функция учета расходования топлива также поручена ПК и без установки расходомеров, причём этот учёт может проводиться автоматически с постоянным фиксированием фактического расхода топлива главными двигателями непосредственно в памяти ПК. Помимо того может быть осуществлён точный и постоянный учёт и контроль расходования топлива иными механизмами (дизель – генераторами, вспомогательными котлами и т.п.).

Кроме того, серийный СЭУК-М может быть выполнен вполне универсальным, допускающим его применение на грузовых судах различных проектов, т.к. это, в основном, связано с настройкой программного обеспечения комплекса. Одновременно становится возможным постоянный независимый контроль использования СЭУК-М.

В настоящее время работы по созданию СЭУК-М находятся на стадии подготовки натурных испытаний опытного образца. Получено Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015663633 от 25 декабря 2015 г. «Программное обеспечение судового электронного управляющего комплекса PRIRES-M для грузовых судов внутреннего

плавания». Проходит согласование технических условий модернизированных судовых электронных управляющих комплексов на соответствие требованиям Правил РРР и Технического регламента о безопасности объектов внутреннего водного транспорта.

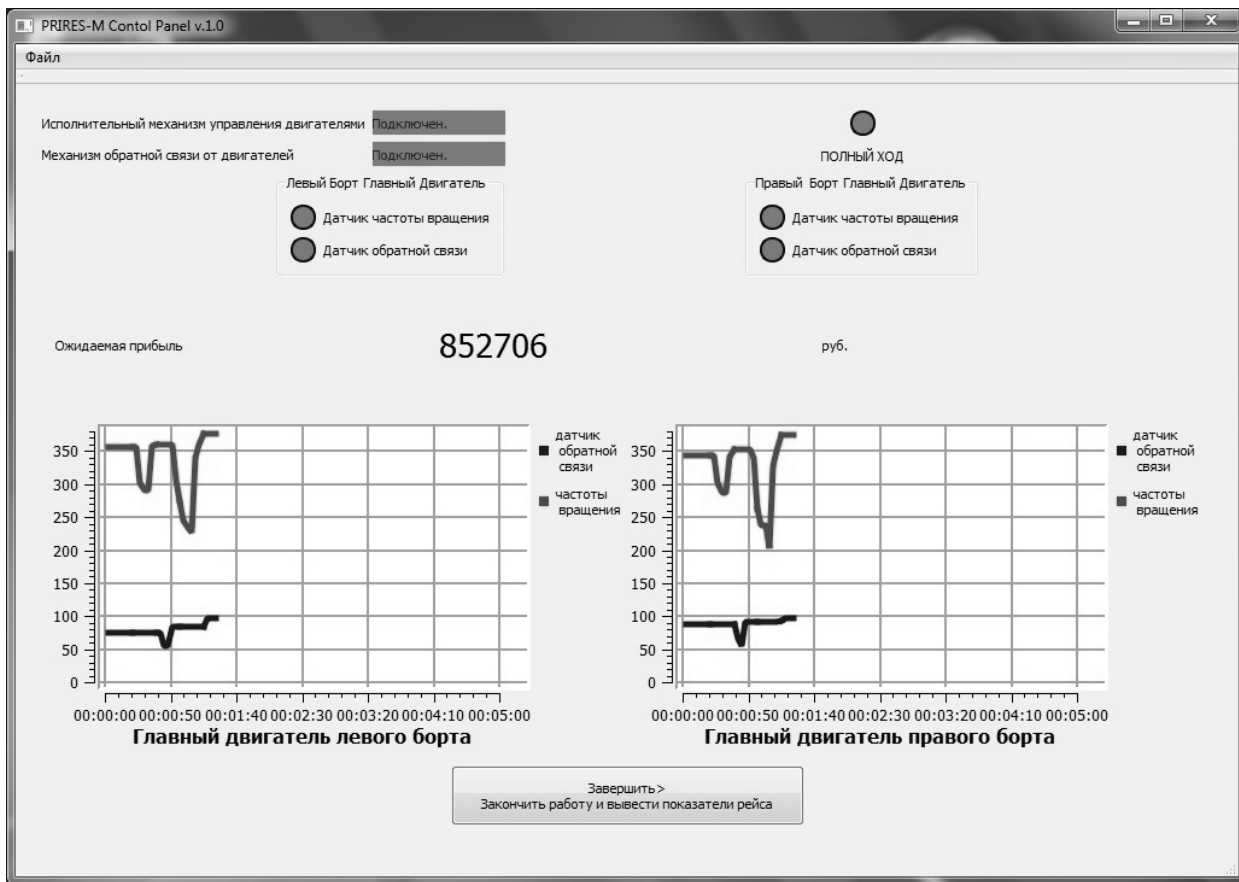


Рис. 4. Программное обеспечение СЭУК-М



Рис. 5. Узел сбора данных от датчиков обратной связи СЭУК-М

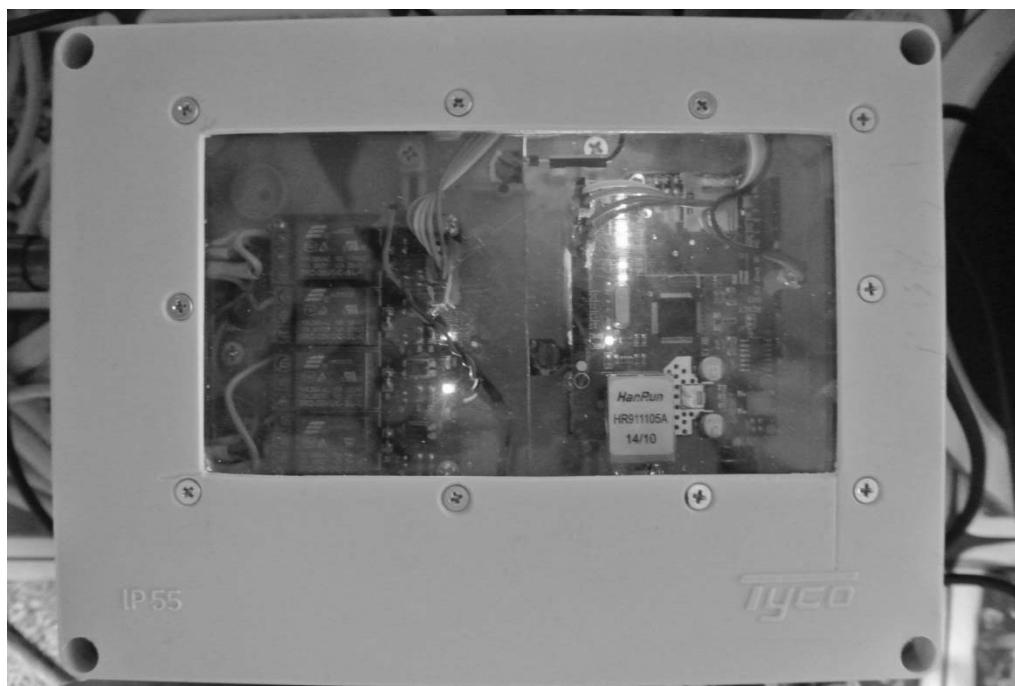


Рис. 6. Узел подготовки и выдачи управляющих сигналов на исполнительные устройства СЭУК-М

Создание судовых управляющих комплексов было направлено, прежде всего, на снижение эксплуатационных затрат на перевозку грузов. Как сказано выше, при определении принципов работы СЭУКов основным являлось достижение максимальной прибыли за рейс и навигацию в целом, за счёт оптимального сочетания производительности судна, платы за перевозку и эксплуатационных затрат. Среди них наиболее важную роль играет сокращение расхода топлива при назначении целесообразных режимов работы ДРК реальных речных грузовых судов, соответственно обеспечивающих такое сочетание.

Вместе с тем, введенные в СЭУК-М принципиальные и конструктивные разработки и предварительные расчеты позволяют надеяться на существенное повышение эффективности работы флота от их внедрения в практику грузовых перевозок.

Представленные результаты получены в рамках выполнения гос. задания в сфере научной деятельности (Задание № 5.4568.2017/6.7) и при финансовой поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки ведущих научных школ РФ НШ-6637.2016.5.

Библиографический список

1. **Васильев, А.В.** Управляемость судов / А.В. Васильев. – Л.: Судостроение, 1989. – 328 с.
2. **Брук, М.А.** Режимы работы судовых дизелей / М.А. Брук, А.А. Рихтер. – Л.: Судпромгиз, 1963. – 484 с.
3. **Васильев, А.В.** Фундаментальные исследования эффективности судового электронного управляющего комплекса. В 3 т. Т.1 / А.В. Васильев, Г.И. Беззубов, А.Б. Ваганов [и др.]. – Н. Новгород: НГТУ, 1994. – 94 с.
4. **Васильев, А.В.** Фундаментальные исследования эффективности судового электронного управляющего комплекса. В 3 т. Т.3 / А.В. Васильев, Г.И. Беззубов, А.Б. Ваганов [и др.]. – Н. Новгород.: Тр. НГТУ, 1995. – 107 с.
5. **Васильев, С.А.** Автоматизированный комплекс оптимизации работы судовых дизелей / С.А. Васильев, С.Н. Зеленов, М.Н. Ребрушкин // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. – 2013. – №1. – С. 95-102.

7. Дрожжев, В.Д. Методы определения оптимального уровня основных параметров эксплуатационной работы местного флота / В.Д. Дрожжев, И.А. Горохова // Речной транспорт (XXI век). – 2013. – № 2 (61). – С. 73.

*Дата поступления
в редакцию 26.11.2017*

A.A. Kurkin, S.A.Vasiliev, M.N. Rebrushkin

SHIPBOARD ELECTRONIC CONTROL SYSTEM OF FREIGHT VESSELS OF INLAND NAVIGATION

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

Purpose: The method of increasing the efficiency of ship power plants of inland navigation vessels is considered.

Design/methodology/approach: In this paper, this problem is solved on the basis of modern methods of navigation, based on sound theory of the ship's complex "hull - management - marine main engines."

Findings: The proposed concept and design of marine electronic control of the complex.

Research limitations/implications: Preliminary calculations of the effectiveness of the ship's electronic control complex show that very high fuel economy can be achieved, as well as a significant increase in profit.

Originality/value: The method of providing optimal, economically and technically advantageous modes of operation of the propulsion and steering systems of ships, especially the main engines in the constantly changing complex track, meteorological and economic conditions of their operation.

Key words: Court of internal and external navigation of cargo ships engines, navigation, cargo ships, the environmental load, fuel economy, main engines.

УДК: 621.9

А.Ю. Панов¹, Е.Е. Святков²**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ IDEF-МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ОПИСАНИИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО
ПРОИЗВОДСТВА**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
АНО «Учебный центр НС Лабс»²

Развитие высокотехнологичного производства изменяет требования к процедуре его описания, что можно учесть, используя концепцию бизнес-процессов.

Ключевые слова: бизнес-процесс, технологический процесс, IDEF, графическая модель.

В действующей системе государственных стандартов существует несколько определений, что такое бизнес-процесс (БП). Наиболее полным является следующее: бизнес-процесс – это совокупность последовательно или/и параллельно выполняемых операций, преобразующая материальный или/и информационный потоки в соответствующие потоки с другими свойствами. БП протекает в соответствии с управляющими директивами, вырабатываемыми на основе целей деятельности. В ходе БП потребляются финансовые, энергетические, трудовые и материальные ресурсы и выполняются ограничения со стороны других БП и внешней среды. Частными случаями являются организационно-деловые, технологические и другие процессы [1].

На предприятиях, связанных с производством, необходимо описывать технологические процессы (ТП): технологический процесс – это часть производственного процесса, содержащая целенаправленные действия по изменению и (или) определению состояния предмета труда [2].

Процесс описания ТП регламентирован системами ГОСТ: ЕСКД – единая система конструкторской документации и ЕСТД – единая система технологической документации. Многие предприятия, особенно относящиеся к малому и среднему бизнесу, разработку технологий производят на основе стандартов предприятия (СТП) и Руководящих технических материалов (РТМ), представляющие собой некоторую версию Государственных стандартов. Поэтому возникает необходимость дальнейшей формализации методов описания ТП на основе бизнес-процессов с применением методологии IDEF. Формализация работ позволит получить предприятию экономический эффект от снижения времени на подготовку производства и сокращения количества ошибок на этапе освоения продукции.

Принимая за основу для описания бизнес-процессов методологию IDEF1, можно получить следующие преимущества:

- - последовательный и строго структурированный процесс анализа информационных потоков в рамках деятельности предприятия;
- - широко развитая модульность, позволяющая эффективно выявлять и корректировать неполноту и неточности существующей структуры информации, на всем протяжении этапа моделирования.

Особенностью рассматриваемого семейства методологий является способность «задавать вопросы» в процессе моделирования при обеспечении неразрывной связи графических средств, методологии и технологии. Поэтому семейство методологий IDEF является единственной системой, которая предоставляет не только средства отображения процессов, но и методологию взаимодействия «аналитик-специалист», и, кроме того, технологию создания проектов, охватывающую все стадии «жизненного цикла» - от первичного анализа до формы

представления окончательного проекта, через поэтапный процесс создания диаграмм и хранения версий.

Применение средств IDEF позволяет:

- сохранить целостность и непротиворечивость модели;
- создавать словари и примечания;
- получить файлы для трансляции с помощью выбранной СУБД в конкретную базу данных;
- получить спецификации на прикладные программные комплексы промышленной компьютерной системы.

Применение стандартов группы IDEF является фактическим условием для получения статуса организацией, удовлетворяющей требованиям ISO 9000, ISO 9001. Программно-методические комплексы на основе CASE-средств IDEF хорошо зарекомендовали себя при анализе производственной деятельности предприятия и синтезе функциональной и информационной структуры будущей системы, особенно при ограниченных сроках создания проекта [3].

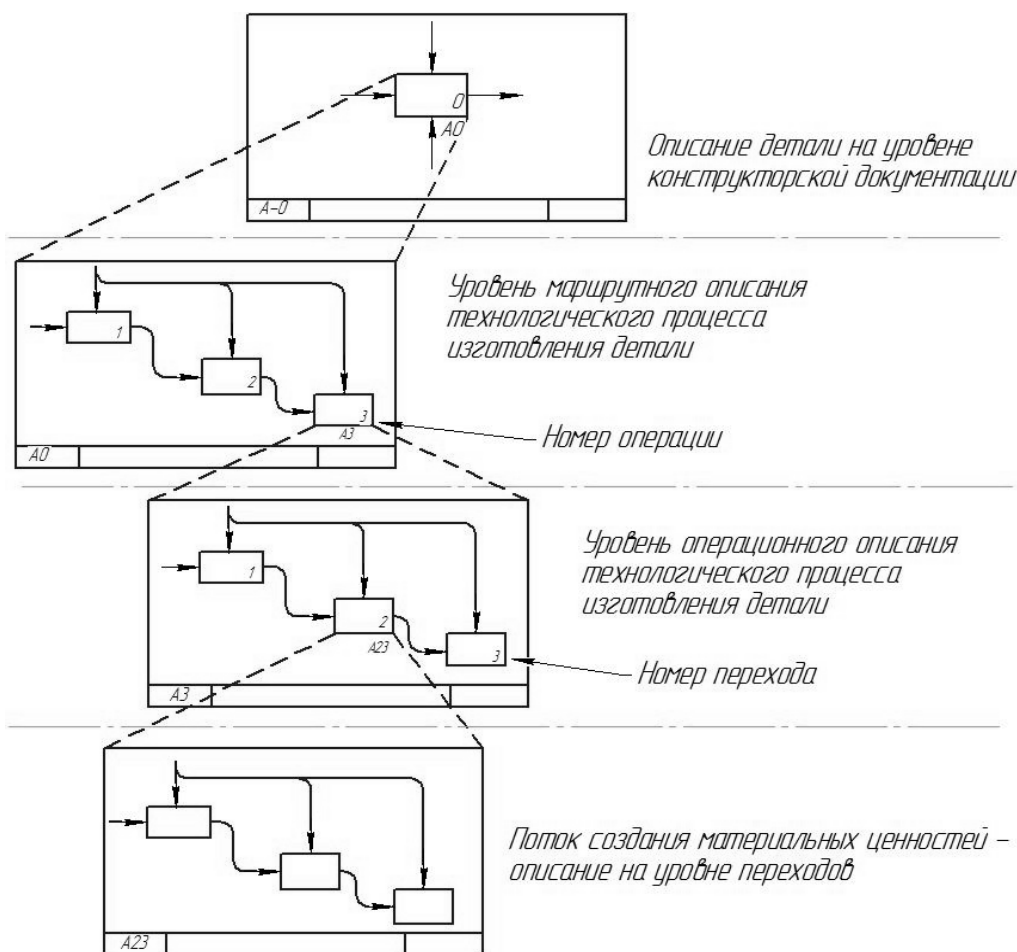


Рис. 1. Пример декомпозиции технологического процесса

Моделирование бизнес-процессов чаще всего ориентировано на описание деятельности в непромышленной сфере (продажи, управление, финансы). Переход от классического описания ТП (маршрутные карты, операционные описания и прочие) к описанию технологий через моделирование бизнес-процессов в стандартах IDEF не вызывает значительных затруднений. Применение декомпозиции, представленное на рис. 1, наглядно показывает связь между конструкторской документацией, маршрутным и операционным описаниям технологических процессов. При необходимости более подробного описания процесса для оптимизации производства, или описания ключевых моментов ТП, легко сделать декомпозицию до

уровня приемов, выполняемых на рабочем месте каждым оператором, то есть сформировать поток создания материальных ценностей [4].

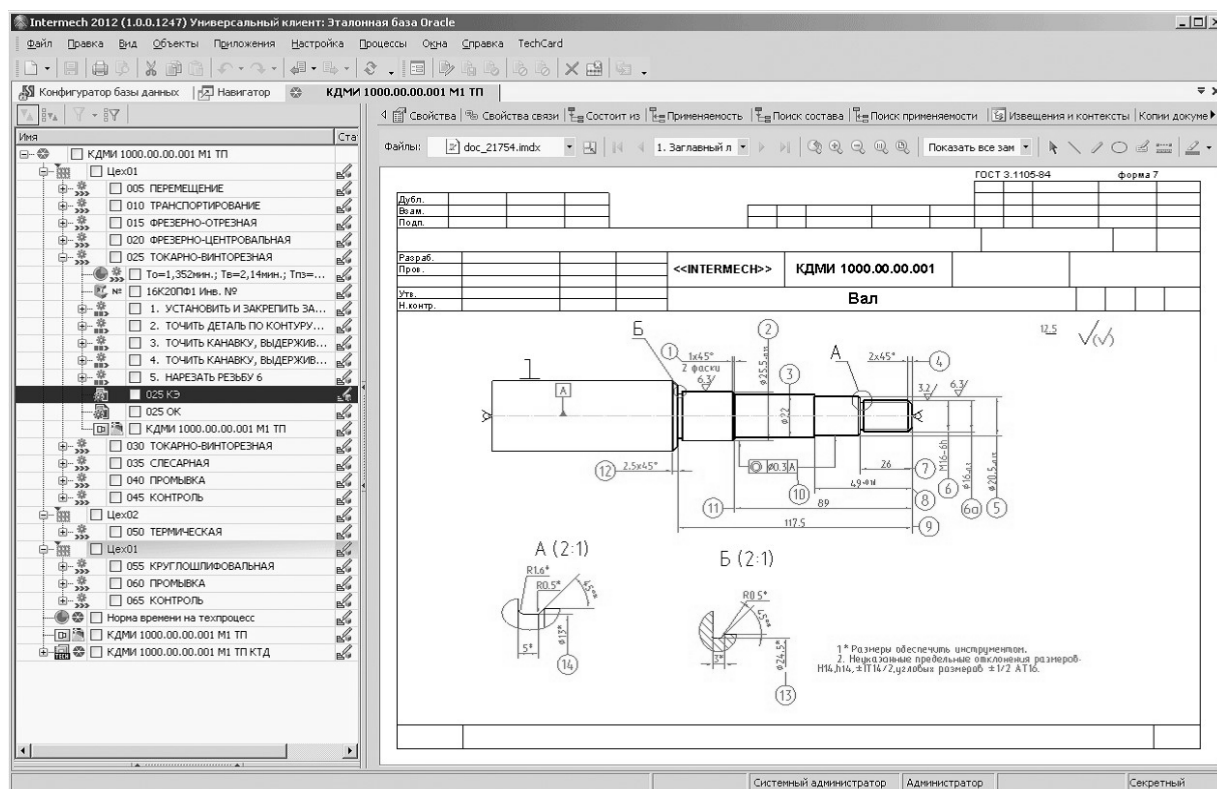


Рис. 2. Вид рабочего окна при разработке ТП в ПО «TechCard»

В зависимости от внутренних потребностей предприятия можно производить частичную декомпозицию только содержательных операций, оставляя содержание типовых операций (например, таких как комплектование, перемещение, транспортирование, маркирование, контроль) нераскрытым в рамках данной технологии. Содержание таких типовых операций чаще всего описывается технологическими инструкциями, что не всегда удобно с точки зрения нормирования материальных затрат. Имеется возможность разрабатывать вместо инструкций отдельные типовые процессы, на которые будет ссылаться целиком или частично конкретные технологические процессы.

Косвенным признаком необходимости изменения идеологии описания технологических процессов является практика применения программных средств при разработке технологических процессов «TechCard» компании «Intermech», «Вертикаль» компании «Аскон» и «Teamcenter Manufacturing» компании «Siemens». При разработке ТП технолог работает напрямую с информацией, описывающей ТП, добавляя или исключая параметры из справочников и корректируя их количественные показатели. Информация по ТП представляется в иерархически древовидной форме: Деталь-Маршрут-Операция-Переход. Заполнение бланков, предусмотренных ЕСТД, производится уже после завершения разработки ТП, являясь лишь разновидностью структурирования информации о ТП. Форму отчета можно заменить на любую другую.

Появление технологических операционных карт напрямую связано с работами Ф. Тейлора, который в начале XX века заложил основы научной организации труда через «создание многочисленных правил, законов и формул, которые заменяют личное суждение работника и которые могут быть применены только после того, как будет произведен систематический учет, намерение их действия» [5]. Он же ввел разделение технологического процесса на отдельные элементы с целью их анализа и наилучшего освоения.

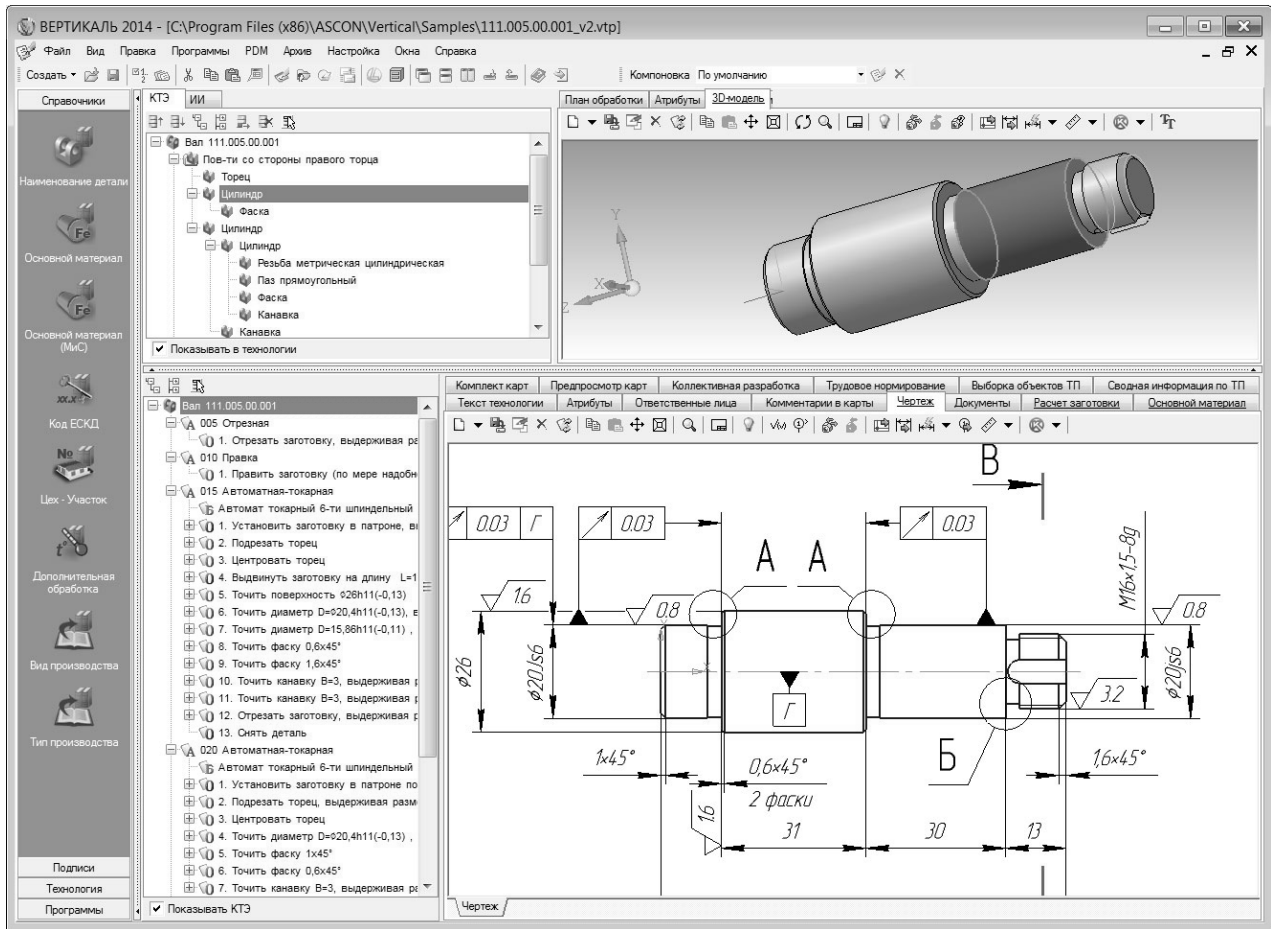


Рис. 3. Вид рабочего окна при разработке ТП в ПО «Вертикаль»

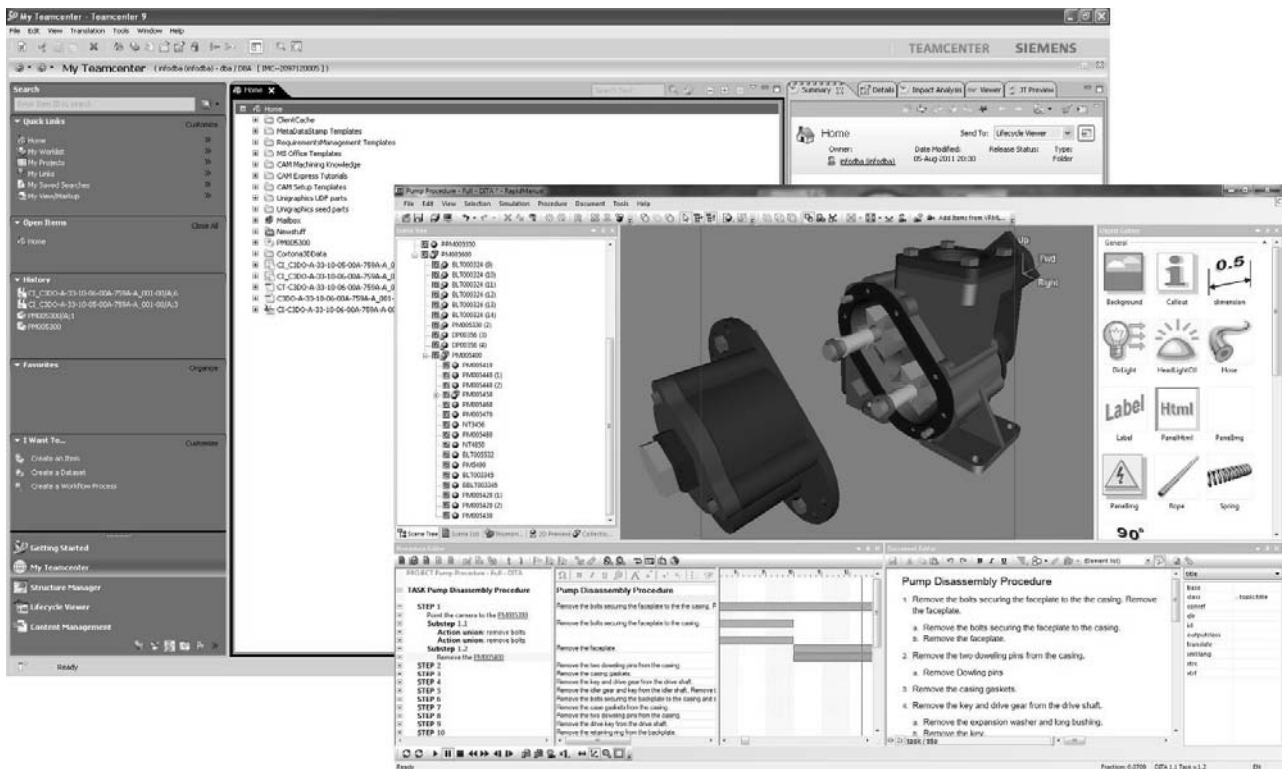


Рис. 4. Вид рабочего окна при разработке ТП в «Teamcenter Manufacturing»

Научный менеджмент определил современное понимание описания технологических процессов. Тейлор внедрил «урочную организацию» [6], при которой каждому рабочему или бригаде задается определенное сменное задание - «урок», за выполнение которого рабочего премируют. «Уроки» постепенно превратились в операции, а действия, записанные в уроке, трансформировались в переходы в составе операции, набор «уроков», необходимых для изготовления детали, стал – операционной картой технологического процесса. В нашей стране разработкой этого вопроса занимался Центральный институт труда (ЦИТ) под руководством А.К. Гастева в рамках научной организации труда (НОТ) [8].

Современное состояние формы описания технологического процесса требует дальнейшего развития их содержательного наполнения, что возможно с применением методологии IDEF-моделирования. При этом проявляются следующие возможности такого подхода:

- наглядность описания ТП, поскольку графическая информация воспринимается лучше, чем таблично-текстовая;
- масштабируемость описания ТП, когда в зависимости от стадии разработки ТП и потребностей каждого предприятия можно регулировать степень развернутости описания бизнес-процесса и глубину декомпозиции;
- открытость описания ТП, при котором возможно описание бизнес-процессов, непосредственно примыкающих к ТП (закупка материалов и компонентов, закупка или изготовление инструмента), а также фиксируются точки пересечения, для которых можно производить корректирующие воздействия;
- отделение «организации» от «функции», что позволяет значительно упростить кооперированные поставки;
- возможность описания нелинейных процессов в производстве, таких как периодические испытания, доработка деталей по результатам измерений других деталей, совместная обработка сопрягаемых деталей;
- возможность интеграции IDEF-методологии с любыми программными платформами.

Современное состояние формы описания технологического процесса требует

Библиографический список

1. ГОСТ Р 50.1.031-2001 «Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Терминологический словарь. Часть 1. Стадии жизненного цикла продукции».
2. ГОСТ 3.1109-82 Единая система технологической документации. Термины и определения основных понятий.
3. ГОСТ Р 50.1.028-2001 Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Методология функционального моделирования .
4. **Черемных, С.В.** Моделирование и анализ систем. IDEF-технологии: практикум / С.В.Черемных, И.О. Семенов, В.С. Ручкин. – М.: Финансы и статистика, 2006.
5. **Тейлор, Ф.У.** Принципы научного менеджмента / Ф.У. Тейлор. – М.: Издательство журнала «Контроллинг», 1992.
6. **Тейлор, Ф.У.** Менеджмент создания многочисленных правил / Ф.У. Тейлор. – М.: Издательство журнала «Контроллинг», 1992.
7. **Верников, Г.** Основы IDEF3. - Управленческое консультирование. [Электронный ресурс] Режим доступа: www.consulting.ru (Дата обращения: 14.04.17).
8. **Гастев, А.К.** Как надо работать. Практическое введение в науку организации труда / под общ. ред. Н.М. Бахраха, Ю.А. Гастева, А.Г. Лосева, Е.А. Петрова. Ленинград. Ордена Трудового Красного Знамени Ленинградская типография № 1 «Печатный Двор» им. Горького Главполиграфпрома Комитета по печати при Совете Министров СССР, 1972.

A.Y. Panov¹, E.E. Svyatov²

THE USE OF IDEF MODELING METHODS FOR DESCRIPTION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF ENGINEERING PRODUCTION

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev¹,
NS Labs²

Purpose: Consideration of specific problems of describing of technological processes faced by companies manufacturing.

Design/methodology/approach: A theoretical framework is proposed based on IDEF methodology for the description of technological operations.

Findings: You can use alternative ways of describing technological operations on the basis of IDEF methodology that will enhance the visibility of processes.

Research limitations/implications: The present study provides a starting-point for further research in the description of technological operations manufacturing sector.

Originality/value: The Proposed approach enables the integration of technological processes are described using IDEF-methodology for any software platform, it simplifies the description of nonlinear processes in manufacturing, such as periodic tests, revision of details on the measurements of other parts, joint processing of interfaced details

Key words: business-process, workflow, IDEF, graphical model.

УДК 629.113

А.В. Папунин, В.В. Беляков, Д.В. Зезюлин, В.С. Макаров,
В.Е. Колотилин, Д.М. Порубов, В.И. Филатов, П.О Береснев

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРЕОДОЛЕНИЯ РВА МНОГООСНЫМИ КОЛЕСНЫМИ МАШИНАМИ

Нижегородский государственный технический университет им Р.Е. Алексеева

Представлены экспериментальные и теоретические исследования многоосных машин по преодолению препятствий типа ров. Испытания были проведены на берегу р. Волга. В качестве опорных оснований были выбраны песок и уплотненная грунтовая поверхность. Была определена теоретическая максимальная ширина преодолеваемого рва на перечисленных опорных основаниях. На песчаном грунте максимальная ширина рва составила 0,84 м. На уплотненной грунтовой поверхности максимальная расчетная ширина преодолеваемого рва составила 1 м. Были проведены исследования физико-механических свойства грунтов с помощью пенетрометра грунтового ПГ-1 и исследовательского комплекса для ускоренных исследований свойств связных и несвязных грунтов «Полевая Лаборатория Литвинова ПЛЛ-9». Было рассмотрено влияние параметров транспортно-технологических машин на ширину преодолеваемого рва. Для этого были произведены расчеты транспортно-технологической машины «Корсак» на гомогенном опорном основании типа песчаный грунт.

Ключевые слова: ров, многоосные машины, исследование препятствий

Необходимость решения транспортно-технологических задач на всей территории нашей страны является одним из ключевых факторов для возможности ведения хозяйственной деятельности. При успешном их решении становится возможным проживание людей в самых суровых условиях: высокогорных районах и в районах крайнего севера. В свою очередь это позволяет решать две важнейшие задачи: функционирование основных секторов экономики и охрану государственной границы.

Большая часть задач по перевозке людей и грузов возложена на наземный транспорт. В сложных условиях эксплуатации важным свойством транспортно-технологических машин (ТТМ) является подвижность. Под подвижностью понимается интегральное эксплуатационное свойство ТТМ, определяющее её способность выполнять поставленную задачу с оптимальной адаптивностью к условиям эксплуатации и техническому состоянию самой машины, т.е. возможность машины противостоять внешним и внутренним факторам, препятствующим выполнению поставленной задачи [1, 2].

Ключевым критерием оценки подвижности является проходимость – эксплуатационное свойство автомобиля, определяющее возможность выполнения транспортных и других функций в ухудшенных дорожных условиях, по бездорожью и при преодолении различных препятствий [3]. Одним из основных препятствий, встречающихся при движении по пересеченной местности, являются рвы. В результате преодоления данного типа препятствия возможна полная потеря подвижности. Для исключения данного явления на начальных этапах проектирования ТТМ проводится расчет максимально возможной преодолеваемой ширины рва.

В настоящее время при проектировании многоосных ТТМ высокой проходимости предельную ширину преодолеваемого рва рассчитывают по формуле [4]:

$$b_p \leq 0,2l_0(n - 1), \quad (1)$$

где l_0 – расстояние от оси передних колес до центра масс [м]; n – число осей ТТМ.

Существенным недостатком данной формулы является не только то, что в ней не учитывается ряд технических параметров ТТМ, таких как масса, диаметр и ширина колесного

двигателя, но и то, что расчет ведется для не разрушаемого рва. Физико-механические свойства грунта существенно влияют на движение ТТМ. При преодолении рва в действительности происходит обрушение его стенок. Данный эффект приводит к уширению рва, существенно повышая вероятность потери подвижности ТТМ на местности. Для определения уширения рва и повышения подвижности ТТМ на этапе проектирования необходимо учитывать связность и угол внутреннего трения грунта. Решение данной проблемы было приведено научным коллективом НГТУ им. П.Е. Алексеева под руководством профессора Белякова В.В. Была предложена математическая модель разрушаемого рва, учитывающая вышеуказанные параметры [5].

$$L_{Y_i} = G_{K_i} [\cos(\gamma + i\varphi) - \sin(\gamma + i\varphi) \operatorname{tg}\varphi] \times [\sin(\gamma + i\varphi) - \cos(\gamma + i\varphi) \operatorname{tg}(\gamma + (i-1)\varphi)] [cB]^{-1}, \quad (2)$$

где G_{K_i} – вес, приходящийся на i -е колесо [Н]; γ – угол естественного уклона стенки рва [°]; i – число осей автомобиля; φ – угол внутреннего трения грунта [°]; c – связность грунта [Па], B – ширина колеса [м].

Для многоосной машины с центром тяжести близким к середине ширина преодолеваемого рва зависит от расстояния между осями и диаметра шин. Основываясь на опытных данных по машинам рассматриваемого типа для не разрушаемого рва может быть найдена по эмпирической зависимости [5]:

$$b_p = L_{1-2(3-4)} + 0,6 D_{ш}, \quad (3)$$

$L_{1-2(3-4)}$ – расстояние между колесами первой и второй (третьей и четвертой) осей машины [м], $D_{ш}$ – диаметр шин [м].

При преодолении разрушаемого рва его предельная ширина может быть выражена следующим выражением [5]:

$$b_{pp} = b_p - \left(\sum_i^{n-1} L1_{Y_i} + \sum_i^n L2_{Y_i} \right), \quad (4)$$

где $L1_{Y_i}$ – расстояние, на которое обрушается первая стенка рва, $L2_{Y_i}$ – расстояние, на которое обрушается вторая стенка рва.



Рис. 1. Общий вид вездехода малого класса «Корсак»

До настоящего времени данная математическая модель разрушаемого рва не была подтверждена экспериментом. Для подтверждения адекватности данной модели были проведены теоретические и экспериментальные исследования по определению максимально возможной ширины преодолеваемого рва транспортно-технологической машиной. В качестве объекта ис-

следований был выбран вездеход малого класса «Корсак» [6]. Данный вездеход (рис. 1) был спроектирован коллективом НГТУ им. Р.Е. Алексеева в период с 2013 по 2014 годы. Технические характеристики объекта исследований представлены в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики объекта исследований

Полная масса, кг	700
Колесная формула	6x6
Габаритные размеры, м	2520x1600x1900
Колея, м	1,35
Межосевое расстояние, м	0,75
Дорожный просвет, м	0,3
Энергетическая установка	Максимальная мощность – 33кВт Максимальный крутящий момент – 44Нм
Тип трансмиссии	Механическая с цепным приводом
Передаточные числа КПП	$i_1=3,7, i_2= 2,06, i_3=1,27, i_4=0,9, i_5= 3,67$
Передаточное число главной передачи	$i_0 = 4,3$
Передаточное число цепного привода	$i_{ц}=2$
Диаметр шины, м	0,6
Ширина шины, м	0,2

Среди особенностей данного ТТМ стоит отметить близкое к равномерному распределение массы вездехода по осям, постоянный полный привод, бортовой способ поворота и симметричное расположение осей относительно центра масс.

В расчете принято допущение касательно глубины рва. При проходе через ров колеса ТТМ не касаются его дна. При проведении эксперимента угол естественного уклона рва должен составлять 0 градусов, т.е. быть перпендикулярен к опорной поверхности, однако на практике значения данного угла будут колебаться в определенных пределах. Ввиду данных особенностей в теоретических расчетах был принят допуск на угол естественного откоса в 5 градусов.

В качестве опорных оснований были выбраны песок и уплотненная грунтовая поверхность. Теоретический расчет проводился исходя из физико-механических параметров грунта, представленных в табл. 2.

Таблица 2

Физико-механические параметры грунтов

Тип опорного основания	Параметр	Значение
Песчаный грунт	Связность грунта, с [Па]	5000
	Угол внутреннего трения, φ [°]	28
Уплотненная грунтовая поверхность	Связность грунта, с [Па]	40000
	Угол внутреннего трения, φ [°]	12

По результатам теоретических исследований максимально возможный преодолеваемый размер рва b_p на песчаном основании составляет 0,84 м. Исходя из данного значения, условием движения ТТМ через ров является:

$$b_{pp} \leq 0,84 \text{ м} \quad (5)$$

Для верификации полученных теоретических данных были проведены экспериментальные исследования преодолеваемого рва ТТМ на песчаном опорном основании.

Местом проведения испытаний был выбран песчаный берег р. Волга (рис. 2).



Рис. 2. Место проведения испытаний

При проведении данных исследований решались следующие задачи: сбор данных о физико-механических свойствах грунта; получение данных по изменению геометрии препятствия при его преодолении; подтверждение модели разрушения деформируемого препятствия.

Для определения физико-механических характеристик грунтов использовались следующие приборы: пенетромтр грунтовой ПГ-1; исследовательский комплекс для ускоренных исследований свойств связных и несвязных грунтов «Полевая Лаборатория Литвинова ПЛЛ-9». Фрагменты замеров характеристик грунта показаны на рис. 3.



Рис. 3. Фрагмент замеров физико-механических свойств грунта

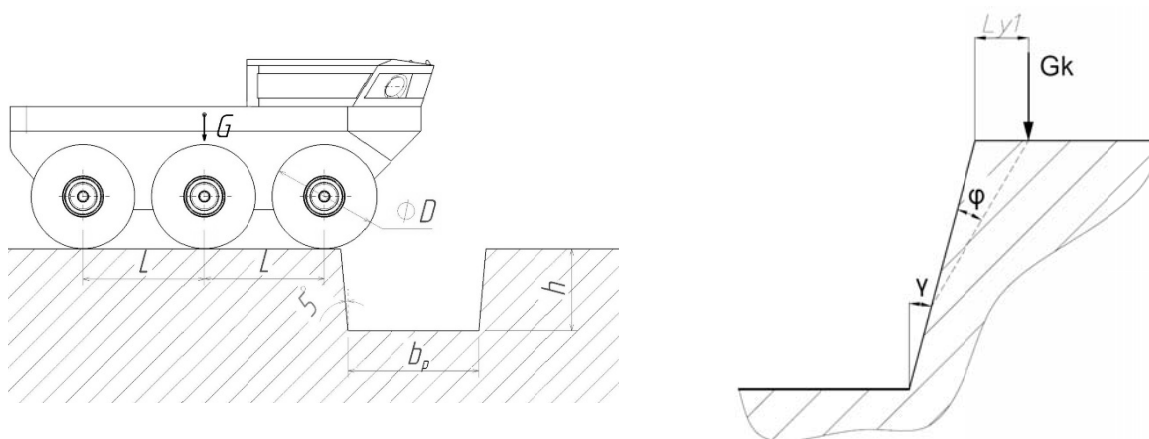


Рис. 4. Схема преодоления препятствия типа «ров»

Пенетромтр грунтовой ПГ-1 предназначен для ускоренного операционного контроля качества уплотнения, а также прочностных характеристик грунтов земляного полотна. Данный прибор использовался для проведения испытаний по измерению сопротивления пенетрации. Зная среднюю величину, можно определить графическим методом модуль упругости, угол внутреннего трения, удельное сцепление и коэффициент уплотнения грунта по прила-

гаемым к прибору номограммам. По результатам анализа экспериментальных данных характеристик грунта и теоретических данных, изложенных в трудах [4] был определен тип песчаного грунта и откорректированы исходные данные для расчетов.

Для проверки теоретического условия движения (5) было разработано несколько препятствий типа ров различной ширины. ТТМ «Корсак», двигаясь с установившейся скоростью движения на первой передаче, поочередно преодолевал рвы, увеличивающиеся по ширине. Схема преодоления препятствия представлена на рис. 4.

По результатам экспериментальных исследований, приведенных в табл. 3, ТТМ «Корсак» преодолела все рвы, шириной до 0,7 м, однако ров шириной 0,9 м преодолеть не удалось. Полученные данные подтверждают правильность теоретических исследований, проведенных на гомогенном (однородном) опорном основании типа песчаный грунт. Расхождение теоретических и экспериментальных исследований на однородном грунте составило 17%. Фрагмент преодоления рва и застревания представлен на рис. 5.

Таблица 3

Результаты проведенных испытаний ТС «Корсак»

бр, м	Теоретический	Экспериментальный					
	0,84	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,9
		Успешно	Успешно	Успешно	Успешно	Успешно	Неуспешно

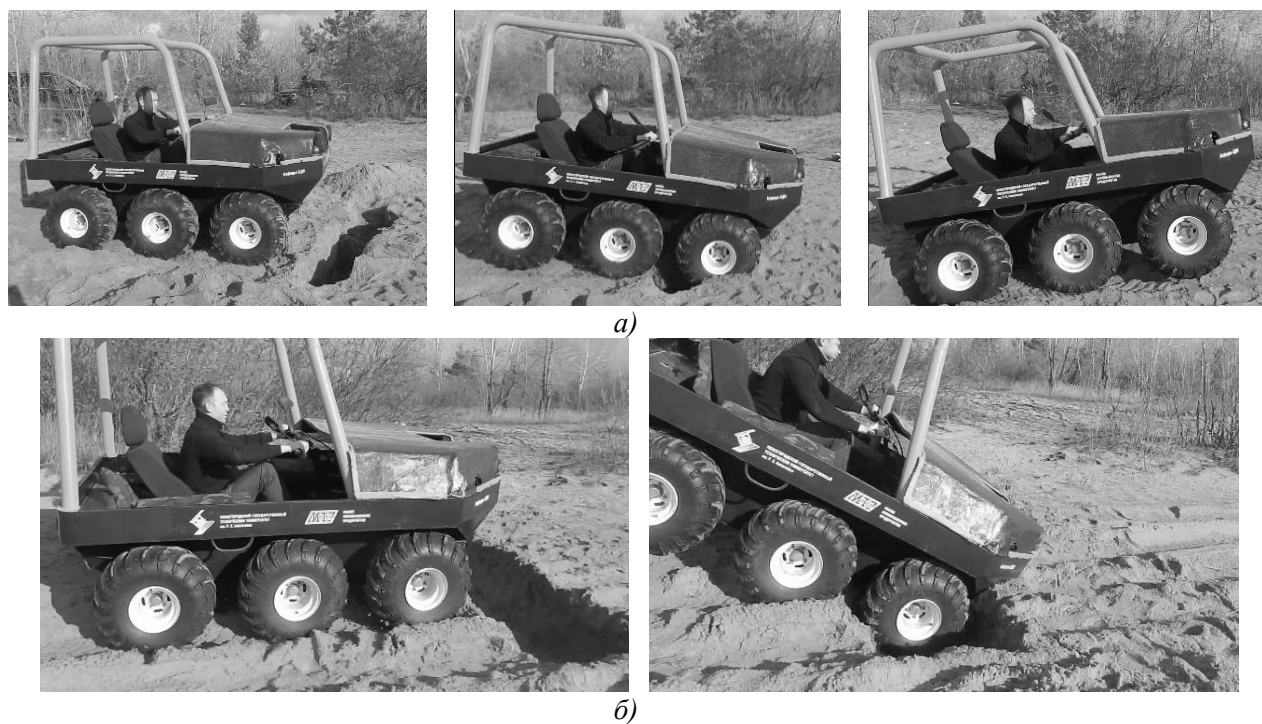


Рис. 5. Фрагмент преодоления препятствия типа «ров» (а) и застревания (б)

Рассмотрим работу данной модели на гетерогенном (неоднородном) грунте типа уплотненная грунтовая поверхность. Для выбранного типа местности также были проведены замеры физико-механических свойств грунта с помощью оборудования, описанного ранее. Порядок проведения эксперимента на гетерогенном опорном основании совпадает с вышеуказанным экспериментом на гомогенном грунте, отличие лишь в количестве преодолеваемых рвов.

В данном случае были разработаны три рва с начальной шириной 0,6 м с шагом в 0,2 м. При рассмотрении теоретической модели (2)–(4) было выявлено, что максимальный преодолеваемый ров равен 0,6 м. Для подтверждения рассмотренной теории был проведен эксперимент. На рисунке 6 представлено место проведения испытаний.

По результатам экспериментальных исследований, приведенных в табл. 4, ТТМ «Кор-

сак» преодолела ров 0,9 м, а ров шириной 1 м преодолеть не удалось. При проверке данной модели на гетерогенном грунтовом основании, Расхождение теоретических и экспериментальных исследований составило 40%.

Таблица 4

Результаты испытаний на гетерогенном грунте

вр, м	Теоретический	Экспериментальный		
	0,6	0,6	0,6	0,8
		Успешно	Успешно	Неуспешно



Рис. 6. Место проведения эксперимента

Для наглядного представления построим гистограмму сравнения теоретических и экспериментальных исследований для песчаного и уплотненного грунтов. Гистограмма сравнения теоретических и экспериментальных исследований представлена на рис. 7.

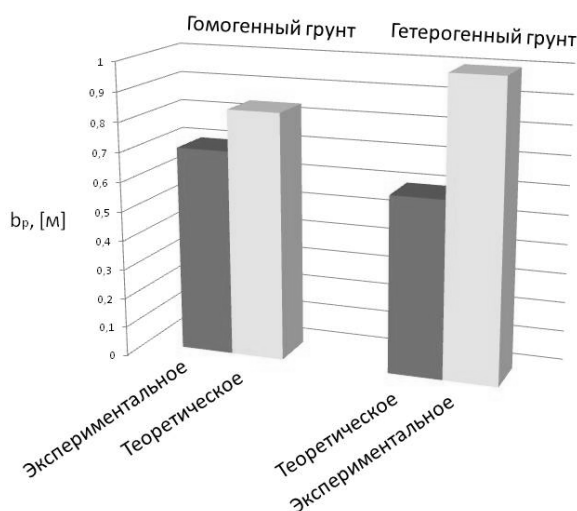


Рис. 7. Гистограмма сравнения теоретических и экспериментальных исследований

Рассмотрим влияние параметров ТТМ на ширину преодолеваемого рва. Основными параметрами ТТМ, существенно влияющими на преодоление рва, являются масса, ширина и диаметр колес, а также межосевое расстояние. Для оценки влияния изменения параметров были произведены расчеты ТТМ «Корсак» на гомогенном опорном основании типа песчаный грунт. Исходные данные для расчета представлены в табл. 5.

Таблица 5

Исходные данные для расчета

Параметры грунта		
Связность грунта, c	5000	Па
Угол внутреннего трения, φ	28	°
Угол естественного уклона, γ	5	°
Параметры транспортного средства малого класса		
Масса ТС, m	700	кг
Ширина колеса, B	0,3	м
Диаметр колеса, D_k	0,6	м
Межосевое расстояние, L	0,7	м

Проведем расчеты по формулам (2)–(4) при изменении параметров ТС по условиям (6)–(9). Результаты расчетов представлены в табл. 5.

$$500 \leq m \leq 900 \text{ кг} \quad (6)$$

$$0,2 \leq B \leq 0,4 \text{ м.} \quad (7)$$

$$0,5 \leq D_k \leq 0,7 \text{ м.} \quad (8)$$

$$0,5 \leq L \leq 0,9 \text{ м.} \quad (9)$$

Таблица 6

Результаты проведенных расчетов

	m , кг	B , м	D , м	L , м	b_p , м
1	500	0,3	0,6	0,7	0,91
	600				0,88
	700				0,85
	800				0,82
	900				0,79
2	700	0,2	0,6	0,7	0,74
		0,25			0,81
		0,3			0,85
		0,35			0,88
		0,4			0,90
3	700	0,3	0,5	0,7	0,79
			0,55		0,82
			0,6		0,85
			0,65		0,88
			0,7		0,91
4	700	0,3	0,6	0,55	0,70
				0,6	0,75
				0,7	0,85
				0,8	0,95
				0,9	1,05

На основе данной таблицы возможно прогнозировать максимально возможную преодолеваемую ширину рва ТТМ при изменении одного из параметра, например, увеличения массы при загрузке технологическим оборудованием. Наибольшее влияние на изменение ширины преодолеваемого рва оказывают такие параметры, как межосевое расстояние и ширина колеса.

По результатам проведенных исследований можно сделать вывод, что модель разрушаемого рва является адекватной для гомогенных песчаных грунтов. Расхождение теоретических и экспериментальных исследований на однородном грунте составило 17%.

Данный подход учитывался при разработке специального шасси робототехнического

комплекса [7] и многофункционального вездеходного транспортного средства [8], что позволило оптимизировать конструкцию данных ТТМ при расчете размеров преодолеваемых препятствий.

При проверке данной модели на гетерогенном грунтовом основании расхождение теоретических и экспериментальных исследований составило 40%. В связи с этим необходимо провести уточнение формул (2)–(4), и ввести дополнительные параметры влияния неоднородности грунта на размеры преодолеваемого препятствия.

Библиографический список

1. **Беляков, В.В.** Концепция подвижности наземных транспортно-технологических машин / В.В. Беляков [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2013. – № 3 (100). – С. 145–174.
2. **Беляков, В.В.** Взаимодействие со снежным покровом эластичных движителей специальных транспортных машин. Автореферат дис. ... докт. техн. наук: 05.05.03 Москва: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1999. – 32 с.
3. Вездеходные транспортно-технологические машины. Основы теории движения. Научно-техническое издание: монография / под общ. ред. В.В. Белякова и А.П. Куляшова. – Н. Новгород: ТАЛАН, 2004. – 961 с
4. **Барахтанов, Л.В.** Проходимость автомобиля / Л.В. Барахтанов, В.В. Беляков, В.Н. Кравец. – Н. Новгород: НГТУ, 1996. – 200 с.
5. **Галкин, А.А.** Математическая модель преодоления разрушаемого рва многоосной колесной машиной/ Д.А. Галкин, А.С. Зайцев, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Журнал автомобильных инженеров. – 2012. – № 6. – С. 40-42.
6. **Зезюлин, Д.В.** Транспортное средство «КОРСАК» для обслуживания линейных объектов / Д.В. Зезюлин [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2014. – №4(106). – С. 336-341.
7. **Kurkin, A.** Unmanned ground vehicles for coastal monitoring / A.Kurkin [et al.] // International Journal of Imaging and Robotics. – 2017. – V. 17. Issue 1. – P. 64-75.
8. **Береснев, П.О.** Оценка энергоэффективности вездеходного транспортного средства с гидрообъемной трансмиссией / П.О. Береснев [и др.] // Известия МГТУ «МАМИ». Научный рецензируемый журнал. – 2016. – № 1 (27). – С. 2-8.

*Дата поступления
в редакцию 20.11.2017*

**A.V. Papunin, V.V. Belyakov, D.V. Zeziulin, V.S. Makarov,
V.E. Kolotilin, D.M. Porubov, V.I. Filatov, P.O. Beresnev**

EXPERIMENTAL-THEORETICAL RESEARCHES OF MOVING ACROSS THE DITCH BY MULTI-WHEELED VEHICLES

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

Purpose: Conducting experimental and theoretical researches of multi-wheeled vehicles to detection the maximum width of the ditch.

Design/methodology/approach: The theoretical maximum width of the ditch was determined on sand and soil support bases. On the sandy surface, the maximum width of the ditch was 0.84 m. On the soil surface, the maximum width of the ditch was 1 m. Investigations of the physical and mechanical properties of soils were carried out by a ground penetrometer "GP-1" and a research complex for accelerated researches of soil properties "Field Litvinov's Laboratory - 9".

Findings: Formulas were experimentally confirmed when moving vehicle on the homogeneous ground, the deviation of calculations was 17%. The analysis of experimental and theoretical data of soil characteristics is carried out. An analysis was made of the effect of a change in one of the main parameters of the transport-technological vehicle "Korsak" to the width of the overcome ditch. For heterogeneous support bases of soil type, it is necessary to refine the formulas and add additional parameters of the effect of the heterogeneity of the soil on the dimensions of the overcome obstacle.

Research limitations/implications: This study is the starting point for further experimental-theoretical tests to overcome obstacles of the type ditch.

Originality/value: These dependencies make it possible to optimize the design of the developed transport-technological vehicles when calculating the width of ditch.

Key words: ditch, multi-wheeled vehicles, obstacles researching.

УДК 629.113

В.И. Песков, Д.В. Песков

УТОЧНЕНИЕ РАСЧЕТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫСОТЫ ЭСКАРПА, ПРЕОДОЛЕВАЕМОГО КОЛЕСНОЙ МАШИНОЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Показана необходимость уточнения ранее выведенных формул для расчетного определения высоты прямоугольного препятствия (эскарпа), преодолеваемого различными типами колесных машин. Эти уточнения определяются действием реактивных моментов от ведущих осей, приводящих к изменению реальной развесовки машин, и наличием инерционных сил в момент динамического движения по препятствию.

Ключевые слова: эскарп, колесная формула, статическое и динамическое преодоление препятствия.

В наших предыдущих работах [1, 2, 3] выведены формулы для расчетного определения высоты прямоугольного уступа (эскарпа), который способны преодолеть четырехколесные машины с различным числом ведущих осей при одновременном въезде на препятствие обоими колесами одной оси (так называемый, фронтальный въезд). Полученные формулы интересны тем, что имеют общую структуру для вариантов оценки способности машин с разными колесными формулами (4x2, 2x4, 4x4) к преодолению указанного препятствия:

$$h_{\text{Э}}^{\max} = r_c [1 - (1 - \Delta_{\text{ш}} / r_c) / \sqrt{K_i^2 + 1}], \quad (1)$$

где $h_{\text{Э}}^{\max}$ – максимальная высота преодолеваемого прямоугольного уступа (эскарпа) в случае оснащения машины эластичными шинами; r_c – свободный радиус колеса; $\Delta_{\text{ш}}$ – величина радиальной деформации шины на ребре уступа; K_i – коэффициент, учитывающий основные обстоятельства ситуации преодоления препятствия и конструктивные особенности колесной машины.

Коэффициент K_i имеет различные значения в зависимости от того, ведущие или ведомые колеса преодолевают препятствие, какое распределение весовой нагрузки по осям и какая колесная формула у рассматриваемой машины. Учитываются также сцепные свойства ведущих колес и сопротивление качению. Исследования показали, что указанный коэффициент определяется из таких выведенных нами выражений.

Для определения высоты эскарпа, преодолеваемого ведомыми колесами (передние колеса заднеприводных машин с колесной формулой 4x2 и задние колеса переднеприводных машин с колесной формулой 2x4),

$$K_1 = (\varphi - f) G_2 / G_1, \quad (2)$$

где φ – коэффициент сцепления ведущих колес с дорожным покрытием; f – коэффициент сопротивления качению ведущих колес; G_2 – вертикальная нагрузка, приходящаяся на ведущие колеса; G_1 – вертикальная нагрузка, приходящаяся на ведомые колеса.

Для определения высоты эскарпа, преодолеваемого ведущими колесами (передние колеса переднеприводных машин с колесной формулой 2x4 и задние колеса заднеприводных машин с колесной формулой 4x2),

$$K_2 = (\varphi_{\text{п}} G_1 - f G_2) / (G_1 + f \varphi_{\text{п}} G_2), \quad (3)$$

где $\varphi_{\text{п}}$ – коэффициент сцепления ведущих колес с ребром эскарпа (обычно считается $\varphi_{\text{п}} = 1,1-1,3\varphi$ [5]).

В случае фронтального движения на препятствие полноприводной машины с колесной формулой 4x4 для ведущих колес всех её осей K_3 определяется выражением

$$K_3 = [\varphi_{\text{п}} G_1 + (\varphi - f) G_2] / [G_1 + (f - \varphi) \varphi_{\text{п}} G_2]. \quad (4)$$

Подстановка выражения (4) в формулу (1) дает в итоге математическую зависимость, которая была опубликована нами в работе [1] в 2009 году. Поэтому представляется необоснованным заявление в статье [4] о том, что её авторы в 2012 году впервые получили возможность теоретического определения максимальной высоты преодолеваемого эскарпа полноприводной машиной с колесной формулой 4x4, поскольку разработали точно такую же формулу. Как видим, они отстали от нас минимум на три года.

Расчеты по приведенным формулам (2)-(4) дают такие конкретные результаты. Для передних колес полностью загруженной легковой заднеприводной машины при статической вертикальной нагрузке на задние ведущие колеса $G_2 = 0,52 G$, их коэффициенте сцепления $\varphi = 0,8$ (чистый асфальт), коэффициенте сопротивления качению $f = 0,01$, свободном радиусе колеса $r_c = 0,3$ м и радиальной деформации шины на ребре эскарпа $\Delta_{ш} = 0,1r_c$:

$$K_1 = (0,8 - 0,01) 0,52G / 0,48G = 0,856;$$

$$h_{\text{Э}}^{\text{max}} = 0,3[1 - (1 - 0,1)/\sqrt{0,856^2 + 1}] = 0,095 \text{ м.}$$

Для передних ведущих колес легковой переднеприводной машины при типичной вертикальной нагрузке на них $G_1 = 0,56 G$, их коэффициенте сцепления на ребре уступа $\varphi_{п} = 1,2\varphi = 0,96$ (бетонный бордюр), коэффициенте сопротивления качению задних колес $f = 0,01$, свободном радиусе колеса $r_c = 0,3$ м и радиальной деформации шины на ребре эскарпа $\Delta_{ш} = 0,1r_c$:

$$K_2 = (0,96 \cdot 0,56 G - 0,01 \cdot 0,44 G) / (0,56G + 0,01 \cdot 0,96 \cdot 0,44 G) = 0,946;$$

$$h_{\text{Э}}^{\text{max}} = 0,3[1 - (1 - 0,1)/\sqrt{0,946^2 + 1}] = 0,102 \text{ м}$$

Для передних ведущих колес полноприводной (4x4) машины при вертикальной нагрузке на них $G_1 = 0,58 G$ (как у ВАЗ-2121 с водителем), их коэффициенте сцепления на ребре уступа $\varphi_{п} = 1,2\varphi = 0,96$ (бетонный бордюр), коэффициенте сцепления задних ведущих колес $\varphi = 0,8$, коэффициенте сопротивления качению задних колес $f = 0,01$, свободном радиусе колеса $r_c = 0,33$ м и радиальной деформации шины на ребре эскарпа $\Delta_{ш} = 0,1r_c$:

$$K_3 = [0,96 \cdot 0,58 G + (0,8 - 0,01)0,42 G] / [0,58G + (0,01 \cdot 0,96 - 0,8 \cdot 0,96)0,42 G] = 3,392;$$

$$h_{\text{Э}}^{\text{max}} = 0,3[1 - (1 - 0,1)/\sqrt{3,392^2 + 1}] = 0,246 \text{ м.}$$

Как и ожидалось, полноприводная машина имеет существенно большие возможности по преодолению больших единичных препятствий. Однако во время проведения экспериментальных исследований были отмечены некоторые дополнительные факторы, влияющие на проходимость машин в указанных условиях.

Дело в том, что формулы (1)-(4) выведены исходя из сугубо статического протекания процесса преодоления препятствия, т.е. при полном отсутствии учета инерционных воздействий на автомобиль и его колеса. Действительно, при попытке во время эксперимента автомобиля ВАЗ-2106 с места преодолеть двумя передними колесами бордюр высотой 125 мм наблюдалось буксование задних ведущих колес, т.е. препятствие преодолено не было, что подтвердило правильность ранее полученного теоретического прогноза. В то же время, это препятствие без особых затруднений было преодолено передними колесами сходу, при движении автомобиля со скоростью 5-8 км/ч, причем отмеченные во время такого заезда перегрузки по величине горизонтального замедления не превысили вполне допустимого для машины значения 0,3 g (для сравнения, во время экстренного торможения на дороге с асфальтовым покрытием горизонтальное замедление автомобиля может достигать величины 0,5-0,7 g).

Кроме того, реактивные крутящие моменты, действующие на кузов (раму) автомобиля со стороны ведущих мостов, влияют на изменение развесовки по его осям, что, как это видно из формул (2)-(4), также должно сказываться на способности колесной машины преодолевать большие препятствия. Для повышения точности расчетного определения макси-

мальной высоты преодолеваемого колесами машины порога необходимо учесть все перечисленные факторы.

Для этого рассмотрим более подробную расчетную схему процесса одновременного преодоления двумя передними ведомыми колесами автомобиля порогового препятствия, причем ввиду симметрии левой и правой сторон автомобиля расчетная схема выполнена плоской (рис. 1). Изображен самый ответственный и самый важный момент движения передних колес машины, когда они только что оторвались от горизонтальной опорной поверхности [5].

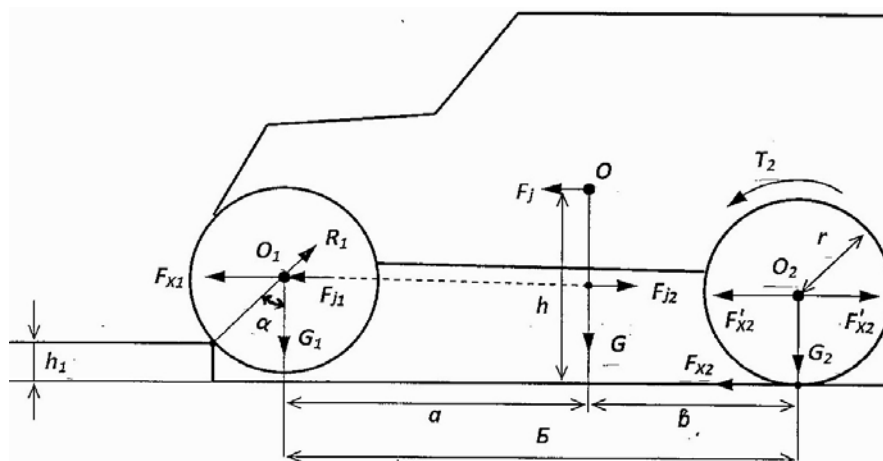


Рис. 1. Расчетная схема движения по эскарпу передних ведомых колес заднеприводной машины

Обозначения на рисунке: O – центр масс автомобиля; O_1 и O_2 – передняя и задняя оси соответственно; G , G_1 и G_2 – вес автомобиля и вес, приходящийся на переднюю и заднюю оси; T_2 – тяговый момент на ведущих колесах; F_{X2} – сила тяги на ведущих колесах; F'_{X2} и F_{X1} – силовые составляющие, необходимые для передачи F_{X2} оси передних колес (видно, что при этой передаче появляется реактивный момент $F_{X2} \cdot r$, опрокидывающий автомобиль); F_j , F_{j1} и F_{j2} – инерционная сила при въезде на препятствие сходу и её составляющие при передаче этого инерционного воздействия оси передних колес (видно появление момента $F_j(h - r)$, заставляющего автомобиль крениться вперед); \rightarrow силовые факторы; \longrightarrow геометрические параметры.

Анализ более подробной схемы процесса показывает, что алгоритм решения задачи может быть сохранен. Необходимо только внести поправки, связанные с появлением новых силовых факторов, помогающих совершать преодоление препятствия (в данном случае это инерционное усилие F_{j1}), и учесть влияние реактивных моментов на изменение развесовки автомобиля (корректировка величин G_1 и G_2 с помощью $\pm \Delta_R$). Соответственно, выражение (2) для определения коэффициента K_1 получает такой вид:

$$K_1 = [(\varphi - f)(G_2 + \Delta_{R1}) + F_{j1}] / (G_1 - \Delta_{R1}), \quad (5)$$

где $\Delta_{R1} = \varphi G_2 r / B - m a_x (h - r) / B = 1/B [\varphi G_2 r - m a_x (h - r)]$; m – масса колесной машины; a_x – максимальное горизонтальное замедление при наезде на препятствие сходу (допустимой величиной может считаться $a_x = 0,5 g$); h – высота положения центра масс машины; r – радиус колеса, $r \approx r_c$.

Апробируем уточненную формулу (5) для проверенной в эксперименте ситуации. Максимальное инерционное усилие $F_{j1} = m a_x$ в том случае ($a_x = 0,3 g$) не превысило $0,3 G$. Для участвовавшего в эксперименте автомобиля $h = 0,55$ м, $B = 2,5$ м. Соответственно $\Delta_R = (0,8 \cdot 0,46 \cdot 0,3 / 2,5 - 0,3 \cdot 0,25 / 2,5)G = 0,0142 G$.

$$K_1 = [(0,8 - 0,01)(0,46 + 0,0142) + 0,3] / (0,54 - 0,0142) = 1,283;$$

$$h_{\Delta}^{\max} = 0,3[1 - (1 - 0,1) / \sqrt{1,283^2 + 1}] = 0,134 \text{ м.}$$

Уточненный расчет показывает, что легкость преодоления эскарпа высотой 125 мм передними колесами автомобиля ВАЗ-2106 во время эксперимента вполне объяснима, поскольку при его реальной развесовке по осям 0,54/0,46 (только водитель за рулем) и динамичном протекании процесса за счет преодоления препятствия сходу возможно преодоление эскарпа высотой 134 мм.

Теперь рассмотрим подробную расчетную схему процесса одновременного преодоления порогового препятствия двумя передними ведущими колесами автомобиля (рис. 2). Ввиду симметрии левой и правой сторон расчетная схема также выполнена плоской. Как и в предыдущем случае, изображен самый ответственный и самый важный момент движения передних колес машины, когда они только что оторвались от горизонтальной опорной поверхности [5].

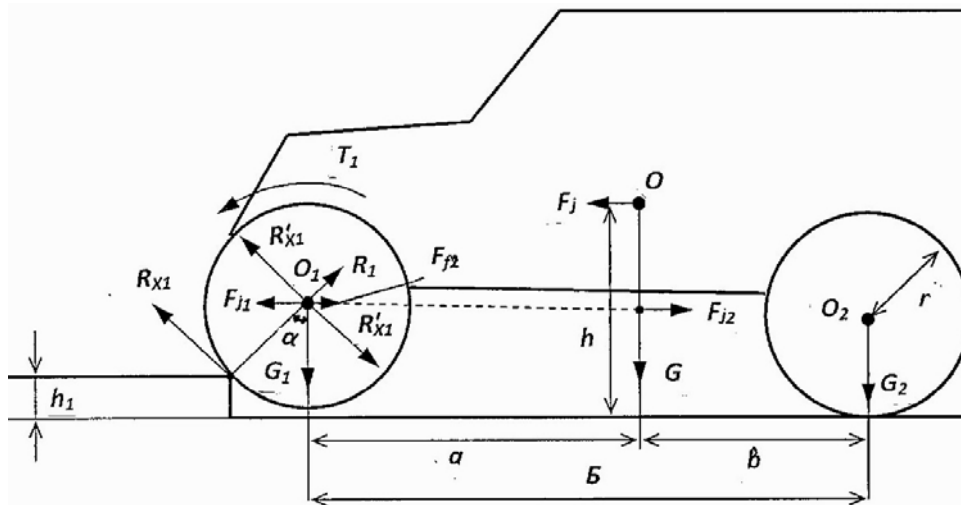


Рис. 2. Расчетная схема движения по эскарпу передних ведущих колес переднеприводной машины

Как уже было сказано, алгоритм решения задачи может быть сохранен. Внесем в формулу (3) поправки, связанные с появлением новых силовых факторов, помогающих совершать преодоление препятствия (в данном случае это усилие F_{j1}), и учесть влияние реактивных моментов на изменение развесовки автомобиля (корректировка величин G_1 и G_2). Соответственно, выражение для определения коэффициента K_2 получает такой вид:

$$K_2 = [\varphi_n (G_1 - \Delta_{R2}) - f(G_2 + \Delta_{R2}) + F_{j1}] / [(G_1 - \Delta_{R2}) + f\varphi_n (G_2 + \Delta_{R2})], \quad (6)$$

где $\Delta_{R2} = \varphi_n R_1 r / B - m a_x (h - r) / B = 1/B [\varphi_n R_1 r - m a_x (h - r)]$; $R_1 = \sqrt{G_1^2 + F_{j1}^2}$.

Апробируем уточненную формулу (6) для реального легкового переднеприводного автомобиля. Максимальное инерционное усилие $F_{j1} = m a_x$ для возможности сравнения также выбираем равным $0,3 G$, $B = 2,5$ м. Соответственно

$$\Delta_{R2} = (0,96\sqrt{0,56^2 + 0,3^2} \cdot 0,3 / 2,5 - 0,3 \cdot 0,25 / 2,5) G = (0,073 - 0,03) G = 0,043 G.$$

$$K_2 = [0,96(0,56 - 0,043) - 0,01(0,44 + 0,043) + 0,3] / [(0,56 - 0,043) + 0,01 \cdot 0,96(0,44 + 0,043)] = = (0,4963 - 0,0048 + 0,3) / (0,517 + 0,0046) = 1,517;$$

$$h_{\text{э}}^{\text{max}} = 0,3[1 - (1 - 0,1) / \sqrt{1,517^2 + 1}] = 0,151 \text{ м.}$$

Расчет по уточненной формуле показывает, что переднеприводный легковой автомобиль при переезде препятствия сходу и при допустимом максимальном замедлении $0,3 g$ преодолеет эскарп высотой 151 мм, что несколько больше, чем среднестатистический заднеприводный легковой автомобиль.

Интересно рассмотреть более подробную расчетную схему процесса одновременного преодоления порогового препятствия двумя передними ведущими колесами полноприводного автомобиля (рис. 3). Ввиду симметрии левой и правой сторон автомобиля расчетная схема также выполнена плоской. Как и в предыдущих случаях, изображен самый ответственный и самый важный момент движения передних колес машины, когда они только что оторвались от горизонтальной опорной поверхности, поэтому горизонтальная реакция опорной поверхности отсутствует. С учетом обеих ведущих осей предусмотрен более высокий эскарп (h_2).

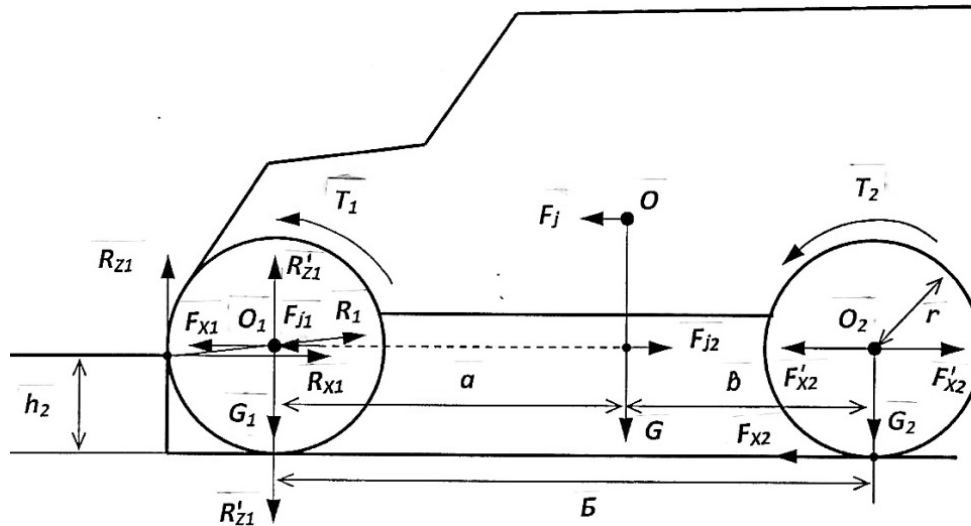


Рис. 3. Расчетная схема движения по эскарпу передних ведущих колес полноприводной машины

Внесем в формулу (4) поправки, связанные с появлением новых силовых факторов, помогающих совершать преодоление препятствия (в данном случае это усилие F_{j1}), и учесть влияние реактивных моментов на изменение развесовки автомобиля (корректировка величин G_1 и G_2). Соответственно, выражение для определения коэффициента K_3 получает такой вид:

$$K_3 = [\varphi_n (G_1 - \Delta_{R3}) + (\varphi - f)(G_2 + \Delta_{R3}) + F_{j1}] / [(G_1 - \Delta_{R3}) + (\varphi_n f - \varphi_n \varphi)(G_2 + \Delta_{R3})], \quad (7)$$

где $\Delta_{R3} = \varphi_n R_1 r / B + \varphi G_2 r / B - m a_x (h - r) / B$; $R_1 \approx R_{x1} = F_{x1} + F_{j1} = \varphi G_2 + F_{j1}$.

Применим уточненную формулу (7) для оценки возможностей по преодолению эскарпа реальным полноприводным автомобилем. Максимальное инерционное усилие $F_{j1} = m a_x$ для возможности сравнения также выбираем равным $0,3 G$. В качестве прототипа взят ВАЗ-2121, поэтому $G_1 = 0,58 G$, $r_c = 0,33$ м, $h = 0,66$ м, $B = 2,2$ м. Соответственно

$$\Delta_{R3} = [0,96(0,8 \cdot 0,42 + 0,3)0,33/2,2 + 0,8 \cdot 0,42 \cdot 0,33/2,2 - 0,3 \cdot 0,33/2,2]G = (0,0916 + 0,0504 - 0,045)G = 0,097G.$$

$$K_3 = [0,96(0,58 - 0,097) + (0,8 - 0,01)(0,42 + 0,097) + 0,3] / [(0,58 - 0,097) + (0,96 \cdot 0,01 - 0,96 \cdot 0,8)(0,42 + 0,097)] = (0,4637 + 0,4084 + 0,3) / (0,483 - 0,3921) = 1,172 / 0,0909 = 12,893.$$

$$h_{\text{э}}^{\text{max}} = 0,33[1 - (1 - 0,1) / \sqrt{12,893^2 + 1}] = 0,307 \text{ м.}$$

Как и ожидалось, динамическое преодоление эскарпа даст возможность увеличить его высоту, но прирост (61 мм) всего около 25%, в то время как у неполноприводных машин за счет динамики прирост был на уровне 40-50%.

Последующее преодоление высокого эскарпа задними колесами полноприводной машины имеет свои нюансы. Рассмотрим схему рис. 4.

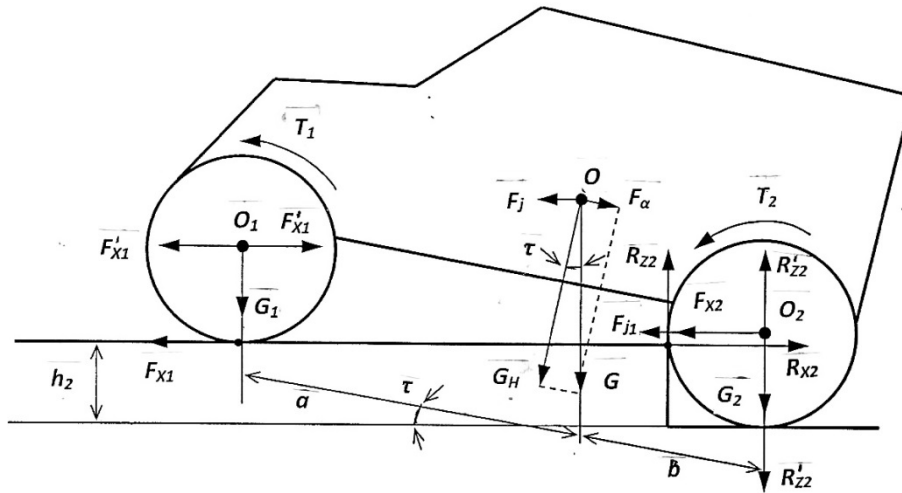


Рис. 4. Расчетная схема движения по эскарпу задних ведущих колес полноприводной машины

Отличием от рассмотренной ситуации движения по эскарпу передних ведущих колес в данном случае является продольный крен автомобиля, который создает дополнительное противодействие F_α движению задних ведущих колес. Поэтому выражение для определения коэффициента K_3' получает такой вид:

$$K_3' = [\varphi_n (G_2 + \Delta_{R3}) + (\varphi - f)(G_1 - \Delta_{R3}) + F_{j1} - F_\alpha] / [(G_2 + \Delta_{R3}) + (\varphi_n f - \varphi_n \varphi)(G_1 - \Delta_{R3})], \quad (8)$$

где $\Delta_{R3} = \varphi G_1 r / B + \varphi_n (F_{x2} + F_{j1}) r / B - (m a_x - G \sin \tau)(h - r) / B$; $\sin \tau = h_2 / B$.

Применительно к ВАЗ-2121 при $F_{j1} = 0,3G$ и $\sin \tau = 0,13$ получим:

$$\Delta_{R3} = [0,8 \cdot 0,58 \cdot 0,33 / 2,2 + 0,96(0,8 \cdot 0,58 + 0,3)0,33 / 2,2 - (0,3 - 0,13)0,33 / 2,2]G = (0,0696 + 0,11 - 0,0255)G = 0,1541G$$

$$K_3' = [0,96(0,42 + 0,1541) + 0,79(0,58 - 0,1541) + 0,17] / [(0,42 + 0,1541) + (0,0096 - 0,96 \cdot 0,8) \cdot (0,58 - 0,1541)] = (0,5511 + 0,3365 + 0,17) / (0,5741 - 0,3238) = 1,0576 / 0,2503 = 4,2253.$$

$$h_3^{\max} = 0,33[1 - (1 - 0,1) / \sqrt{4,2253^2 + 1}] = 0,262 \text{ м.}$$

Таким образом, продольный крен в пределах $6-8^\circ$ на 15% уменьшает способность задних колес машины к преодолению препятствия. Меньшая нагрузка заднего моста в статическом состоянии в этом случае нивелируется дополнительной его нагрузкой от реактивных моментов ведущих мостов и горизонтальной составляющей веса машины, получившей заметный продольный крен.

Эксперименты подтвердили высокие качества полноприводной машины с колесной формулой 4x4 с точки зрения способности к преодолению прямоугольного препятствия и результаты его теоретического прогноза по уточненным зависимостям (7)–(8). Автомобиль ВАЗ-2121 сумел преодолеть пороговый уступ высотой 265 мм, последовательно переехав его сходу колесами передней и задней ведущих осей при продольных перегрузках, не превосходящих 0,3 g. Колесами передней ведущей оси сходу преодолено было также пороговое препятствие высотой 285 мм при максимальной продольной перегрузке не более 0,2 g.

Интерес представляет изучение зависимости максимальной высоты преодолеваемого колесами прямоугольного уступа от величины замедления, вызванного одновременным наездом на препятствие пары колес движущегося автомобиля. В таблице приведены полученные расчетные результаты, на рис. 5 и рис. 6 они проиллюстрированы соответствующими графическими зависимостями. Следует сказать, что если для неполноприводных машин полученные уточненные формулы (5) и (6) дали результаты, вполне согласующиеся с экспериментами и сформированными авторами работы предварительными ожиданиями (рис. 5), то расчеты по формулам (7) и (8) для полноприводных машин привели к очевидным парадоксам. В частности, для передних колес полноприводного ВАЗ-2121 сначала была получена зависимость максимальной высоты преодолеваемого эскарпа, говорящая о том, что максимальная высота достигается при статическом процессе преодоления препятствия. Но во время экспериментов на автомобиле ВАЗ-2121

было четко зафиксировано, что прямоугольный уступ высотой 285 мм не преодолевался в статике, въезд на него передних колес был обеспечен только при динамическом протекании процесса, т.е. при движении сходу, хотя и на невысокой скорости.

Тщательный анализ процесса взаимодействия колес с препятствием привел к выводу, что увеличенная деформация беговой дорожки шины с внедрением протектора в ребро уступа и возникающее при этом повышение в 1,1-1,3 раза коэффициента сцепления [5] происходит при высоте препятствия, соизмеримой с $0,5 r_c$ (такие величины высоты преодолеваемого уступа имеют место при движении неполноприводных автомобилей). При высоте препятствия, соизмеримой с радиусом колеса r_c , контактирующая с вертикальной поверхностью препятствия шина деформируется гораздо меньше, и коэффициент сцепления повышается только с увеличением горизонтальной нагрузки на колесо, т.е. пропорционально замедлению автомобиля в процессе въезда на препятствие. Представленные в таблице и на рис. 6 результаты для полноприводного автомобиля 4x4 (ВАЗ-2121) получены после соответствующей корректировки в формулах (7) и (8) коэффициента φ_n и величины деформации шины $\Delta_{ш}$. Этим объясняется и некоторое несовпадение данных таблицы с приведенными выше расчетами для полноприводного автомобиля ВАЗ-2121 (это различие не превосходит 3,5%).

Максимальная высота эскарпа, преодолеваемого четырехколесным автомобилем, мм ($h,^{max}/r_c$)

Характеристика автомобиля и условий переезда	Переезд статический	Замедление $a_x = 0,1 g$	Замедление $a_x = 0,2 g$	Замедление $a_x = 0,3 g$	Замедление $a_x = 0,4 g$	Замедление $a_x = 0,5 g$
Передние колеса заднеприводного автомобиля 4x2, $G_1/G_2 = 0,54/0,46$	90 (0,300)	106 (0,353)	121 (403)	134 (0,447)	145 (0,483)	155 (0,517)
Задние колеса заднеприводного автомобиля 4x2, $G_1/G_2 = 0,54/0,46$	103 (0,343)	122 (0,407)	138 (0,460)	152 (0,507)	165 (0,550)	177 (0,590)
Передние колеса переднеприводного автомобиля, $G_1/G_2 = 0,57/0,43$	102 (0,340)	121 (0,403)	137 (0,457)	151 (503)	162 (0,540)	171 (0,570)
Задние колеса переднеприводного автомобиля, $G_1/G_2 = 0,57/0,43$	93 (0,310)	117 (0,390)	138 (0,460)	157 (523)	173 (577)	187 (0,623)
Передние колеса автомобиля 4x4, $G_1/G_2 = 0,58/0,42$, база 2,2 м	266 (0,806)	278 (0,842)	288 (0,873)	297 (0,900)	304 (0,921)	309 (0,936)
Задние колеса автомобиля 4x4, $G_1/G_2 = 0,58/0,42$, база 2,2 м	216 (0,655)	237 (0,718)	253 (0,767)	265 (0,803)	273 (0,827)	280 (0,848)
Передние колеса автомобиля 4x4, $G_1/G_2 = 0,58/0,42$, база 2,7 м	256 (0,776)	269 (0,815)	280 (0,848)	289 (0,876)	297 (0,900)	303 (0,918)
Задние колеса автомобиля 4x4, $G_1/G_2 = 0,58/0,42$, база 2,7 м	235 (0,712)	253 (0,767)	266 (0,806)	277 (0,839)	285 (0,864)	291 (0,882)

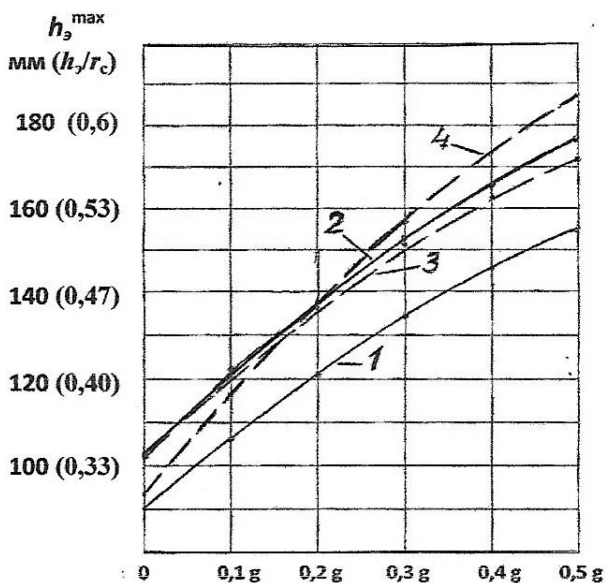


Рис. 5. Изменение высоты эскарпа, преодолеваемого неполноприводными автомобилями, в зависимости от замедления:

— заднеприводный автомобиль;
 - - переднеприводный автомобиль;
 1, 3 – передние колеса; 2, 4 – задние колеса

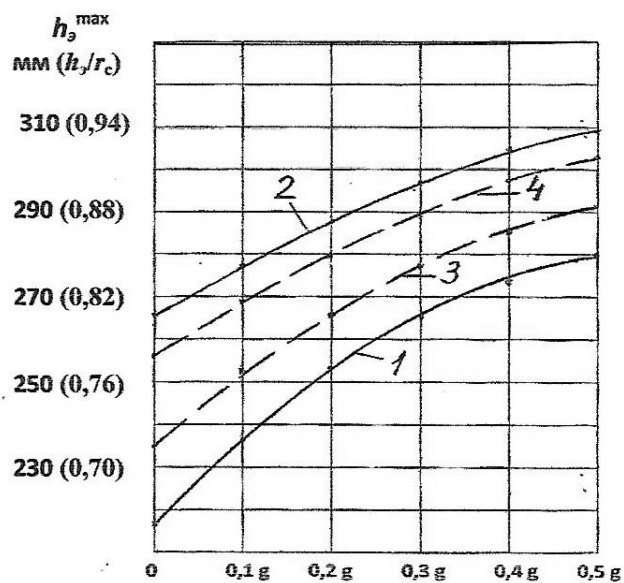


Рис. 6. Зависимость от замедления высоты эскарпа, преодолеваемого полноприводными автомобилями:

— колесная база 2,2 м;
 - - колесная база 2,7 м;
 1, 3 – задние колеса; 2, 4 – передние колеса

Анализ полученных результатов расчетов и экспериментов позволяет сделать важные для эксплуатации колесных машин выводы. Для всех типов машин с ростом скорости преодоления препятствия преодолеваемая его колесами высота увеличивается. Здесь только нужно помнить, что при этом растут динамические нагрузки на ходовую часть и кузов автомобиля. Поэтому не следует превышать допустимый уровень замедления, который соответствует 0,5-0,6 g.

Важнейшим параметром, влияющим на способность колес неполноприводного автомобиля преодолевать эскарп или подобное препятствие, является развесовка по его осям. Колеса, имеющие меньшую вертикальную нагрузку, в большинстве случаев преодолевают более высокое препятствие.

Для полноприводных автомобилей важным является минимизация изменений развесовки из-за реактивных моментов, действующих на кузов (раму) со стороны ведущих мостов. Так, увеличение базы автомобиля 4x4 с 2,2 м до 2,7 м (см. табл.) способствовало этому и позволило улучшить показатели проходимости для колес задней оси, что, в свою очередь, положительно скажется на проходимости самого автомобиля, поскольку именно колеса задней оси ограничивали этот показатель.

Оптимальной с позиций обеспечения преодоления крупного препятствия колесами обеих ведущих осей является развесовка машины в пропорциях 0,55÷0,6/0,45÷0,4. Этот вывод подчеркивает ошибочность заявлений об оптимальности развесовки 0,4/0,6 для полноприводного автомобиля, приведенных в работе [4] и в ряде других работ этих авторов.

Библиографический список

1. **Песков, В.И.** Совершенствование эксплуатационных качеств автомобиля : монография / В.И. Песков, В.И. Сердюк, А.Е. Сердюк; НГТУ. – Н. Новгород, 2009. – 135 с.
2. **Кузьмин, Н.А.** Теория эксплуатационных свойств автомобиля / Н.А. Кузьмин, В.И. Песков. – М.: «ФОРУМ», 2013. – 256 с.
3. **Песков, В.І.** Розрахункове визначення експлуатаційних характеристик автомобіля: монографія (на українск. мові) / В.І. Песков, Г.В. Шкарівський.– Київ, Изд.«Аграр медіа груп», 2017.– 274 с.

4. **Мамити, Г.И.** О высоте вертикального препятствия, преодолеваемого полноприводным автомобилем / Г.И. Мамити [и др.] // Автомобильная промышленность, 2014. – №1. – С. 17-18.
5. **Агейкин, Я.С.** Проходимость автомобиля / Я.С. Агейкин, Н.С. Вольская, И.В. Чичекин. – М.: МГИУ, 2000. – 141 с.

*Дата поступления
в редакцию 29.11.2017*

V.I. Peskov, D.V. Peskov

**ELABORATION ON CALCULATE DETERMINATION OF HEIGHT OF THE ESCARPE,
OVERCOMING BY THE WHEELD CAR**

Need of elaboration on the existing formulas for calculation of height of a rectangular obstacle (french – "escarpe") overcome by different types of wheel cars is proved. These elaborations are defined by action of the reactive moments from the driving axles, that changes distribution of masses on car axles, and availability of inertial forces at the time of overcoming an obstacle. In the article are analyzing the influence of all this factors on real process of cars with different schemes of transmissions movement over escarpe and gives some conclusions.

Key words: escarpe, wheel arrangement, static and dynamic overcoming obstacle.

УДК 629.113

Е.И. Торопов, Ю.П. Трусов, П.С. Мошков, А.А. Аникин, А.С. Вашурин, Ю.И. Палутин

**ПРОВЕДЕНИЕ НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ДЛЯ ОТЛАДКИ
ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ОЦЕНКИ УПРАВЛЯЕМОСТИ
ЛЕГКИХ КОММЕРЧЕСКИХ АВТОМОБИЛЕЙ, ОСНАЩЕННЫХ СИСТЕМАМИ
ЭЛЕКТРОННЫМИ КОНТРОЛЯ УСТОЙЧИВОСТИ. ОСОБЕННОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ
МАНЕВРОВ НА СУХОМ И ВЛАЖНОМ АСФАЛЬТЕ**

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева

Одним из способов решения проблемы снижения количества дорожно-транспортных происшествий является установка на автомобили электронных систем помощи водителю, в частности, системы электронного контроля устойчивости (ЭКУ). Для сокращения объема натурных испытаний в настоящее время активно развиваются технологии компьютерного моделирования движения транспортных средств с использованием систем виртуально-физического моделирования (Hardware-in-the-loop (HIL)) в режиме реального времени. Для отладки работы такого оборудования необходимо наличие большой выборки данных с натурных испытаний. Испытания проводятся в различных условиях, на дорогах с низким коэффициентом покрытия (сырой асфальт, снег, лед, микст), при выполнении различных маневров. В работе приводятся результаты выполнения маневра «Переставка» на дорогах с различным коэффициентом сцепления.

Ключевые слова: система электронного контроля устойчивости (ЭКУ), легкий коммерческий автомобиль, системы виртуально-физического моделирования, Hardware-in-the-loop, HIL, Правила ЕЭК ООН № 13-11, управляемость, переставка, CAN.

Повышение уровня активной безопасности невозможно без применения электронных систем курсовой устойчивости (ЭКУ). В Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 018/2011 «О безопасности колесных транспортных средств» требования в отношении оснащения автомобилей функцией обеспечения устойчивости для вновь выпускаемых ТС категории M₁ и N₁ планируется ввести с 2018 года.

Для сокращения объема натурных испытаний, проведение которых не всегда возможно или целесообразно, например, на начальном этапе проектных работ, когда еще нет действующего прототипа или при создании на базовом шасси единичных или малосерийных модификаций, в настоящее время применяются технологии компьютерного моделирования движения транспортных средств в реальном времени. Оценка динамики движения автомобилей по результатам моделирования является сложной задачей, поскольку необходимо моделировать не только конструкцию транспортного средства (тормозную систему, рулевое управление, подвеску, несущую систему и др.), но и управляющие воздействия. Для учета поведения реальных агрегатов автомобилей при компьютерной оценке динамики движения ТС, используются системы виртуально-физического моделирования (Hardware-in-the-loop (HIL)) в режиме реального времени. Общая схема стенда для оценки динамики движения автомобиля оснащенного ЭКУ приведена на рис. 1 [1-3].

Требования к квалификации водителя при управлении автомобилем на дороге с низким коэффициентом покрытия (сырой асфальт, снег, лед) значительно выше, чем при управлении на сухом ровном асфальте. Электронная система контроля курсовой устойчивости может помочь сохранить контроль над автомобилем на различных дорогах водителю любой квалификации. Для отладки работы стенда виртуально-физического моделирования был выполнен большой объем испытаний, включающий в себя выполнение различных маневров, таких как «вход в поворот радиусом 35 м», «переставка 20 м» (по ГОСТ 31507-2012), «двойная переставка» по ISO 3888-2 и др. На автомобиле было установлено измерительное оборудование ЦКП «Транспортные системы» НГТУ для получения массива экспериментальных

данных. Испытания проводились на покрытиях с разным коэффициентом сцепления (сухой/мокрый асфальт). Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках проекта по договору № 02.G25.31.0193 от 27.04.2016 г. (постановление Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 года №218). Рассмотрим поведение машины и работу системы ЭКУ на примере выполнения маневра «Переставка» на дорогах с различным коэффициентом сцепления.

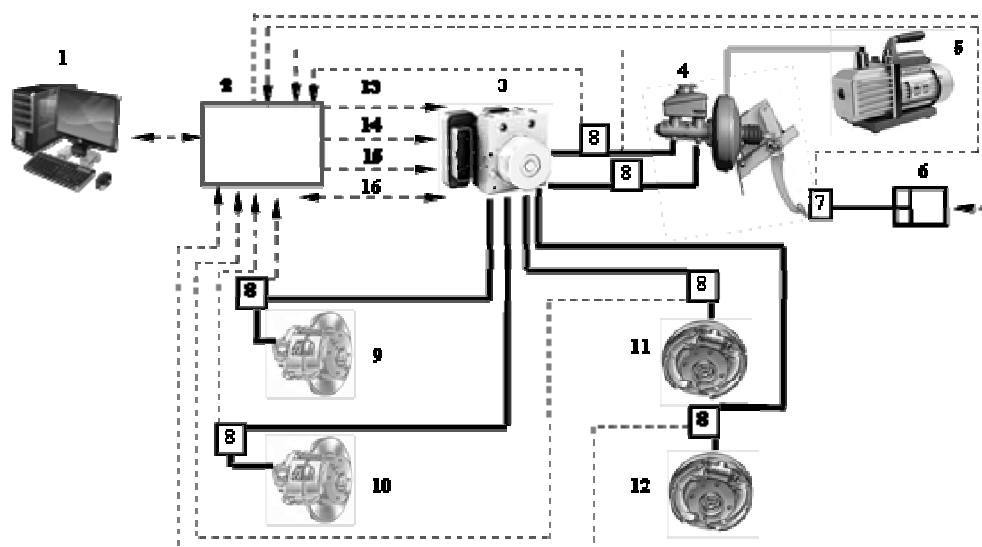


Рис. 1. Принципиальная схема ПАК для испытаний тормозных гидравлических систем с ЭКУ:

1 – п.к с установленным п.о.; 2 – согласующее устройство; 3 – ЭБУ+ГБУ системы ЭКУ; 4 – ГТЦ+ВУТ+педаль тормоза; 5 – вакуумный насос; 6 – исполнительное устройство (например: робот педали тормоза); 7 – датчик силы нажатия на педаль; 8 – датчики давления, врезанные в тормозную гидравлическую систему (сплошные линии – условное обозначение тормозных гидравлических трубок; пунктир – сигнальные провода от датчиков или устройств); 9 – передний правый тормозной механизм; 10 – передний левый тормозной механизм; 11 – задний правый тормозной механизм; 12 – задний левый тормозной механизм; 13 – генерируемый согласующим устройством сигнал датчика угла поворота рулевого колеса (CAN-шина), 14 – генерируемые сигналы датчиков скорости вращения колес (4 цифровых канала); 15 – генерируемые сигналы датчика продольных и поперечных ускорений (CAN-шина); 16 – управление работой электронной системы управления двигателем (CAN-шина)



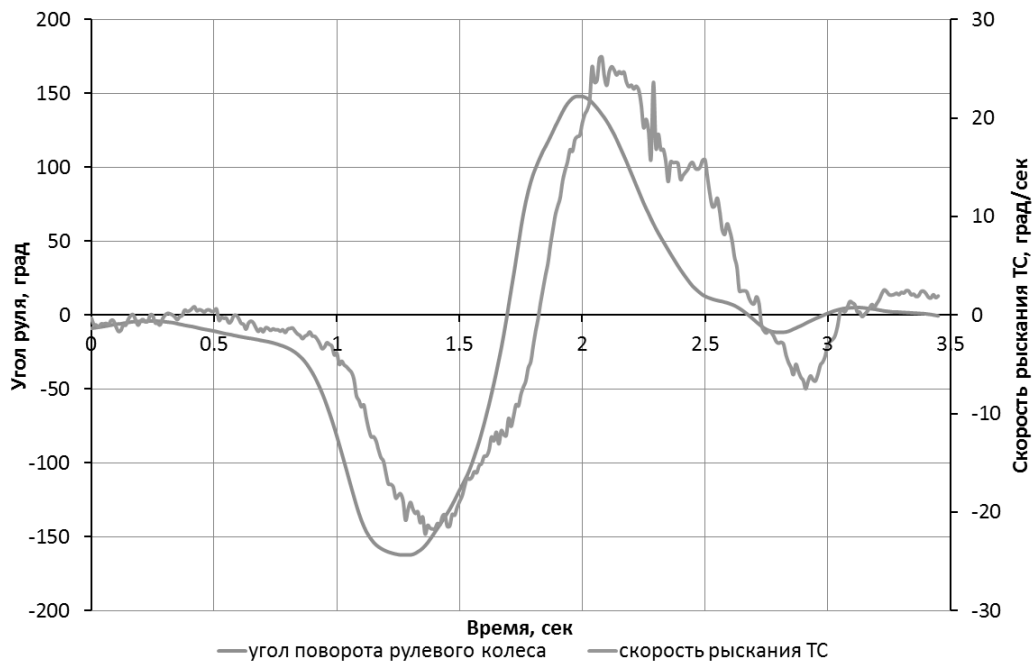
а)



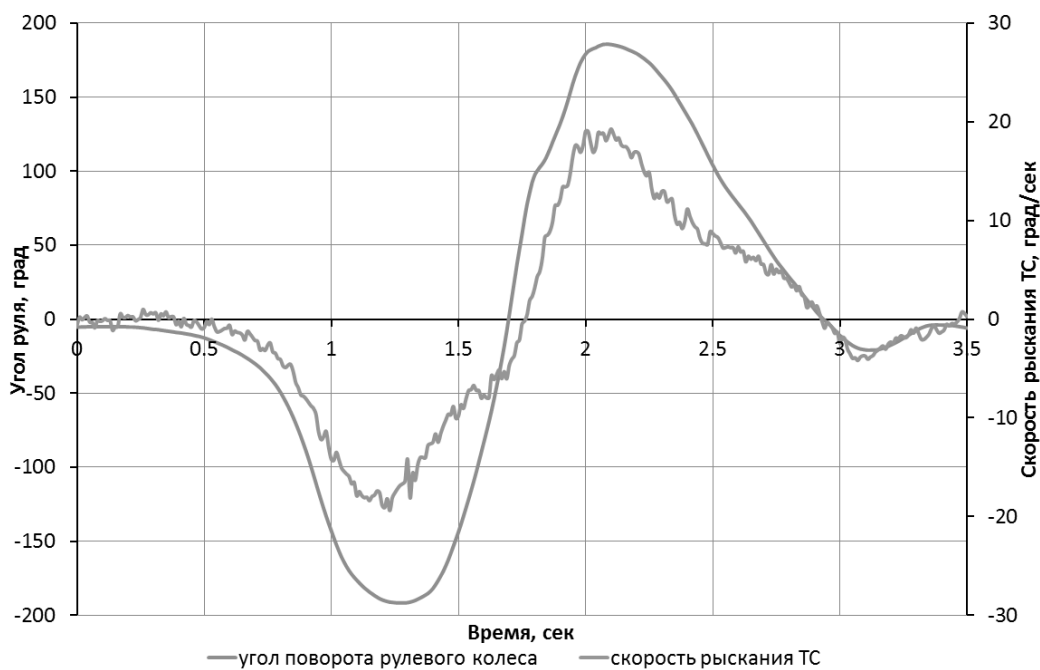
б)

Рис. 2. Фрагменты проведения испытания «переставка 20м» в различных условиях:
а – на сухом покрытии; б – на сыром покрытии

При выполнении маневра на сыром асфальте, как видно из графиков рисунок, водитель поворачивает руль на $35-40^\circ$ больше чем на сухом при одинаковой скорости, при этом скорость рыскания на 5 град/с или на 20% ниже.



а)



б)

Рис. 3. Графики изменения угла поворота рулевого колеса и скорости рыскания ТС во времени:
а – на сухом покрытии; б – на сыром покрытии

Пиковое поперечное ускорение на сыром покрытии достигает $0,6g$, а на сухом $0,75g$, при этом пиковое продольное замедление может достигать $0,55g$ на сыром покрытии и $0,72g$ на сухом. Система ЭКУ активирует функцию срабатывания тормозной системы при смене полосы движения ТС.

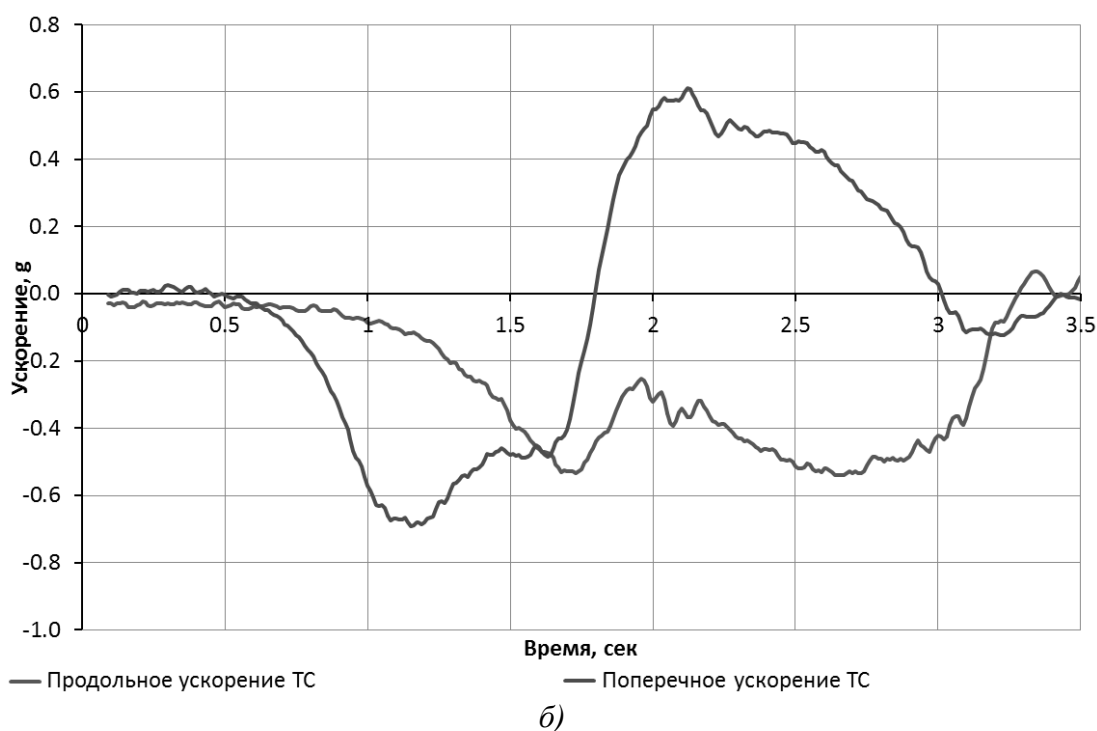


Рис. 4. Скорость движения ТС:
а – на сухом покрытии; *б* – на сыром покрытии

При нажатой педали акселератора система ЭКУ дополнительно рассчитывает оптимальный крутящий момент двигателя для сохранения стабильности поведения ТС. Система запрашивает нулевой крутящий момент в зоне максимального поворота рулевого колеса влево при значениях скорости рыскания 17-18 град/с. При выполнении маневра на сыром покрытии после смены полосы движения система запрашивает крутящий момент даже выше запрашиваемого водителем, при выполнении маневра на сухом покрытии этого не происходит.

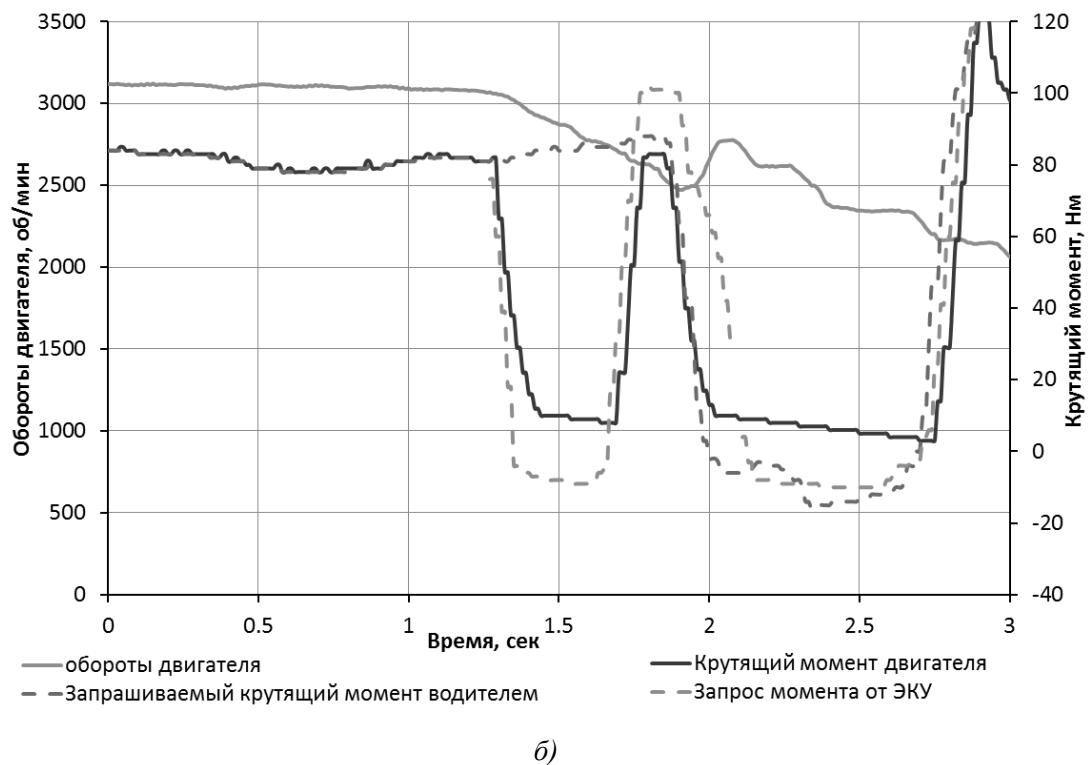
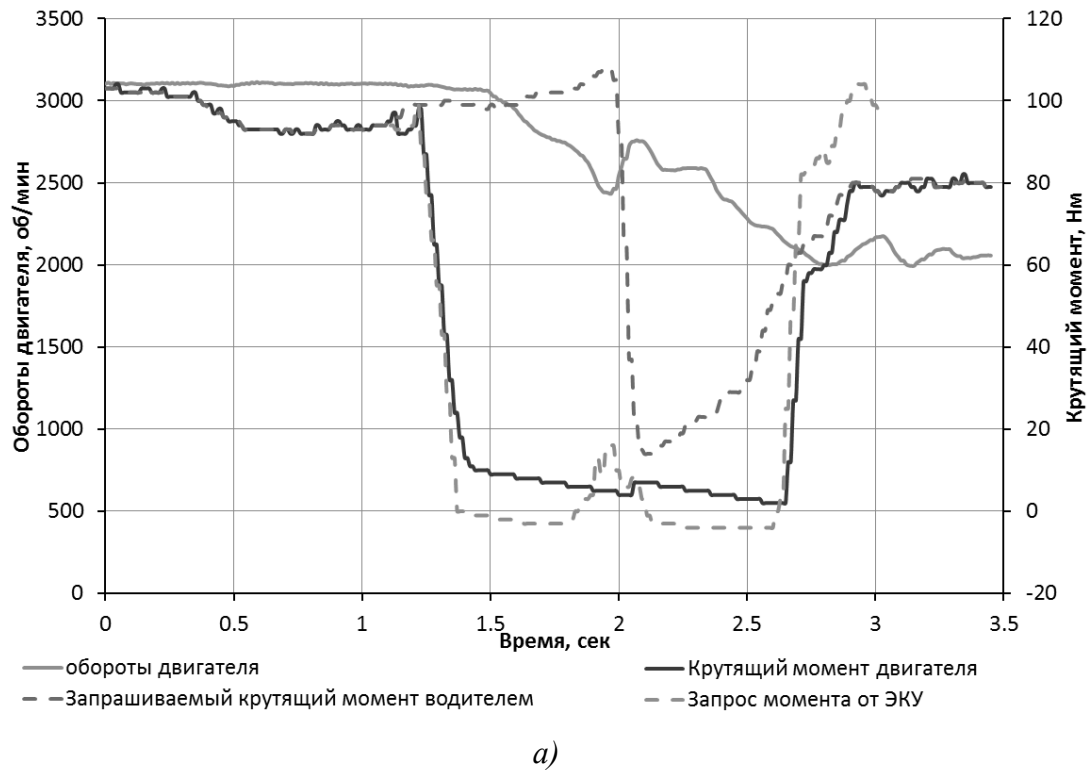


Рис. 6. Графики изменения параметров двигателя:
а – на сухом покрытии; *б* – на сыром покрытии

При выполнении маневра на сыром покрытии с активированной электронной системой курсовой устойчивости существенно повышается стабильность выполнения маневров, на мокром покрытии процент удачных заездов остается практически на уровне сухого покрытия. С деактивированной системой ЭКУ на сыром асфальте даже высококлассный водитель-испытатель при выполнении маневра на предельной скорости не всегда успевает скорректировать возникающий занос и сбивает конусы в выходном коридоре.

Библиографический список

1. Klaus Wüst, Albert Lutz "Simulation-aided Homologation of ESP Systems for NAFTA Vans by Software-in-the-Loop Simulation" / Daimler AG, Robert Bosch GmbH // IPG Technology Conference Ettlingen, 18.-19. September 2012.
2. Hahn, K., Holzmann, H., Weyer, F., Roemer, M. et al., "Simulation-based Certification of ESC Systems for Passenger Vehicles in Europe" / SAE Int. J. Passeng. Cars - Electron. Electr. Syst. 5(1):89-99, 2012, doi:10.4271/2012-01-0235.
3. M. Vogel, O. von Stryk, R. Bulirsch "Real-Time Simulation of Vehicle Dynamics: On-line Control and Handling Investigations", Technical University at Munich, Chair for Higher Mathematics and Numeric mathematics, Munich. <http://www.math.chalmers.se/Conf/ECMI98/standard / Abstracts/Vehicles-aerodynamics/voegel.pdf>

*Дата поступления
в редакцию 10.11.2017*

E.I. Toropov, A.S. Vashurin, Y.P. Trusov, P.S. Moshkov, A.A. Anikin, Y.I. Palutin

FIELD TESTS FOR DEBUGGING OF A SOFTWARE AND HARDWARE COMPLEX FOR THE NEEDS OF EVALUATION OF CONTROLLABILITY OF LIGHT COMMERCIAL VEHICLES (LCV) EQUIPPED WITH ELECTRONIC STABILITY CONTROL (ESC) SYSTEMS. PARTICULARITIES OF MANEUVERS ON DRY AND WET ASPHALT

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

Purpose: fulfillment of special tests for debugging of a software and hardware complex for the needs of evaluation of controllability of light commercial vehicles (LCV) equipped with electronic stability control (ESC) systems.

Design/methodology/approach: field tests were fulfilled under different conditions (wet and dry asphalt) and implied maneuver called "elk test" by GOST 31507-2012. The maneuver was performed for the cases when ESC system was activated and deactivated. The data was obtained by use of measuring equipment of NNSTU CCU "Transport systems" that was installed on a vehicle.

Findings: stability of the vehicle during elk test was much higher when ESC system was activated. This difference is especially noticeable for wet asphalt. Even a very experienced test driver often could not manage to correct the arising drift when maneuvering at the maximum speed on wet asphalt.

Research limitations/implications: described works doesn't imply any significant limitations.

Originality/value: installation of ESC on each vehicle model requires a large volume of adaptation tests to be implemented. The use of modern computer aided design tools and hardware-in-the-loop techniques could help to simplify and speed up this process as well as to decrease volume of field tests.

Key words: electronic stability control systems (ESC), light commercial vehicle (LCV), hardware-in-the-loop (HIL) testing, UNECE No. 13-11, controllability, elk test, CAN.

УДК 629.113

В.Ю. Шурыгин¹, А.В. Тумасов¹, Л.Н. Орлов¹, А.А. Аникин¹, Ю.И. Палутин²**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСПЫТАНИЙ ПО ОЦЕНКЕ
ЭНЕРГОПОГЛОЩАЮЩИХ СВОЙСТВ ЗАДНЕЙ ЧАСТИ СПИНКИ СИДЕНЬЯ**Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева¹,
Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия²

Представлены результаты расчетного исследования задней части спинки сиденья на энергопоглощение. Расчетные исследования выполнены в соответствии с требованиями Правил ЕЭКООН №21. Для проведения расчётного исследования разработана конечно-элементная модель, компьютерное моделирование выполнено в программном комплексе LS-Dyna. В работе рассмотрено два режима нагружения модели, а именно динамический и статический.

Ключевые слова: сиденье, компьютерное моделирование, энергопоглощение

Повышение пассивной безопасности наземных транспортных средств является актуальной задачей. При проектировании транспортных средств, предназначенных для перевозки людей, решаются вопросы компоновки салона, расположения мест и пассивной безопасности сидений [1], в том числе кунгов многоцелевых транспортных средств, микроавтобусов используемых различными министерствами, госслужбами и др. При этом важную роль играет травмобезопасность спинок сидений, что напрямую связано с их энергопоглощающими свойствами. В настоящее время всё большую популярность набирают методы имитационного моделирования. Они позволяют в относительно короткий срок понять поведение системы при различных видах нагружения, внести необходимые корректировки без проведения дорогостоящих и трудоёмких экспериментальных работ.

В данной работе рассмотрен вопрос энергопоглощения спинкой сиденья автобуса удара головы пассажира сидящего сзади. Данный вид нагружения регламентируются Правилами ЕЭКООН №21 [2]. В соответствии с ними нагружение спинки сиденья осуществляется ударом маятника диаметром 165 мм, массой 6,8 кг, скоростью 24,1 км/ч. При этом замедление шара (модели головы) не должно превышать 80 g, действующих непрерывно в течение более трёх миллисекунд.

На первом этапе исследования необходимо определить точку удара, допускается нахождение экспериментальным или графическим способом. Графический способ определения точки удара показан на рис. 1.

Для моделирования условий нагружения был выбран программный комплекс LS-Dyna [3], который позволяет решать: квазистатические задачи, возможность задания контактного взаимодействия, нелинейную динамику, оценку сопротивляемости удару, задачи динамической прочности.

Для проведения исследований разработана подробная конечно-элементная модель каркаса сиденья [4] (рис. 2), которая состоит из 23305 узлов и 24889 элементов. При этом каркас сиденья имеет упруго-пластический материал, шар – абсолютно жесткий.

Согласно требованиям Правил ЕЭКООН №21 скорость модели головы в момент удара, должна быть равна 24,1 км/ч. Для этого в программно-пакетном комплексе LS-Dyna применена карточка **initial-velocity-generation**, в которой необходимо задать угловую скорость модели головы (формула 1).

$$\omega = \frac{V}{R} = 8,8 \text{ 1/c}, \quad (1)$$

где ω – угловая скорость модели головы 1/c; V – поступательная скорость модели головы 24,1 км/ч; R – радиус вращения модели головы (высота от центра сочленения бедра до центра модели головы), 760 мм.

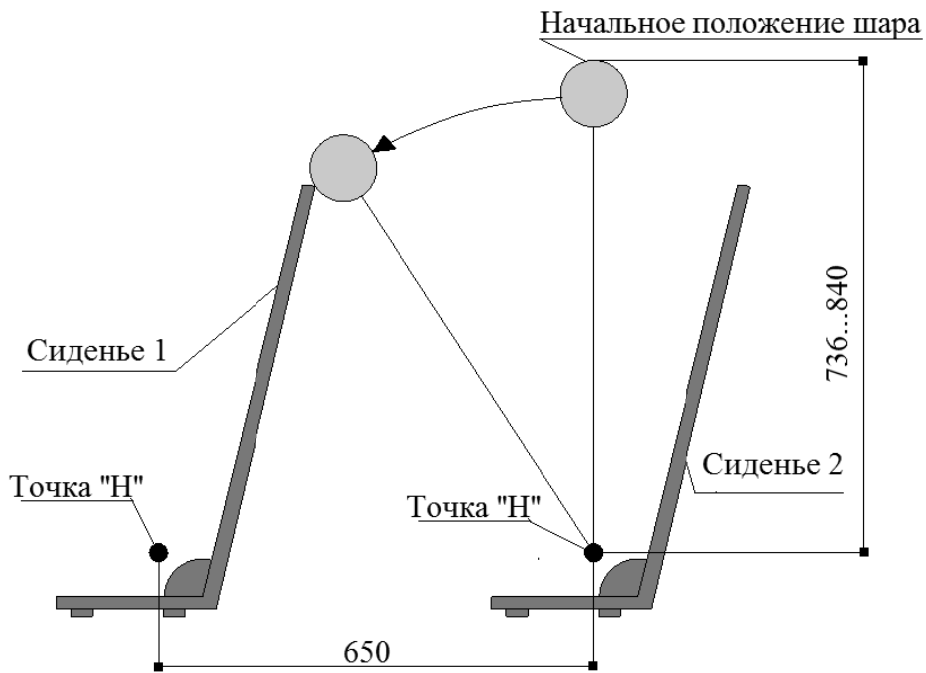


Рис. 1. Графический способ определения точки удара

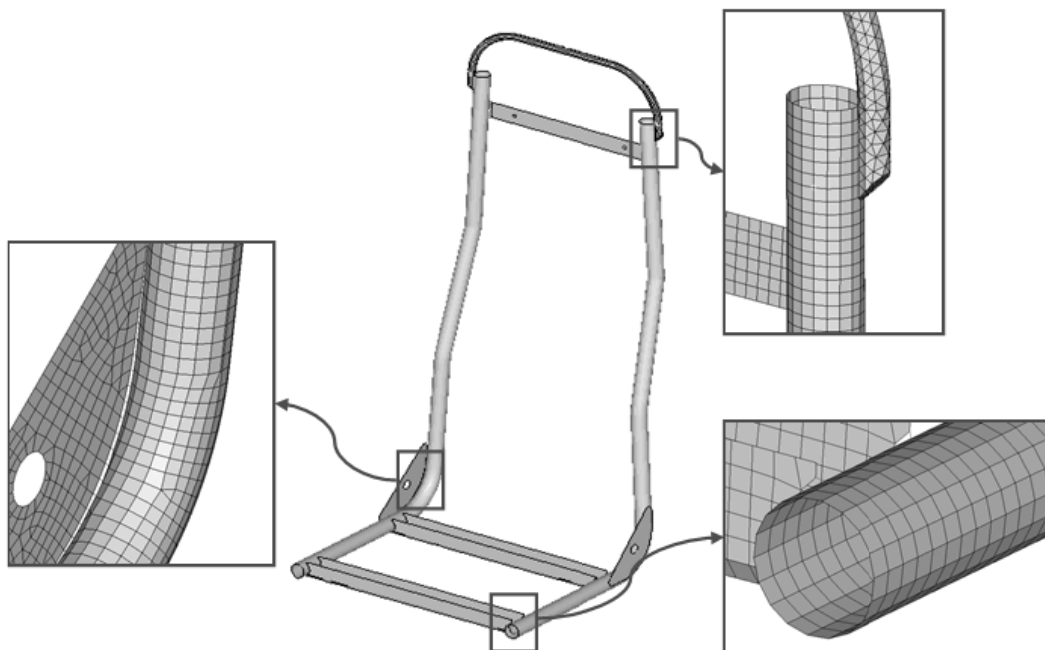


Рис. 2. Конечно-элементная модель

Далее приведён пример карточки LS-Dyna для задания скорости шару:

*INITIAL_VELOCITY_GENERATION – карточка LS-Dyna

\$HMNAME LOADCOLS velocity – имя карточки

\$HWCOLOR LOADCOLS 1 3

198 1 8.8 - угловая скорость

-137.718 -812.669 225.606 -1.0 – координаты центра вращения и направление оси.

Результаты расчёта ускорения шара от начального момента удара до полной остановки шара показаны на рис. 3.

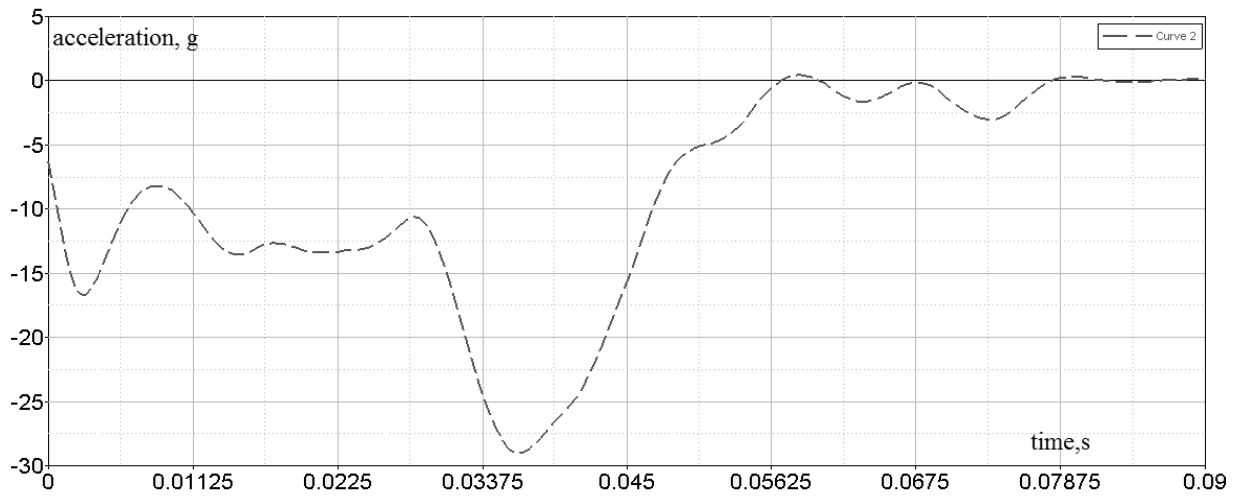
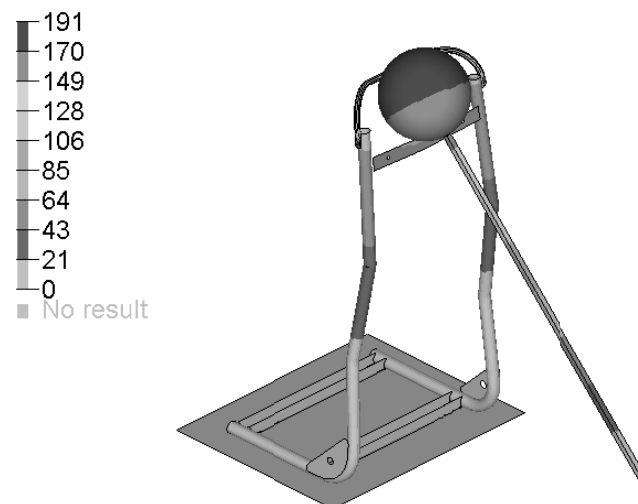
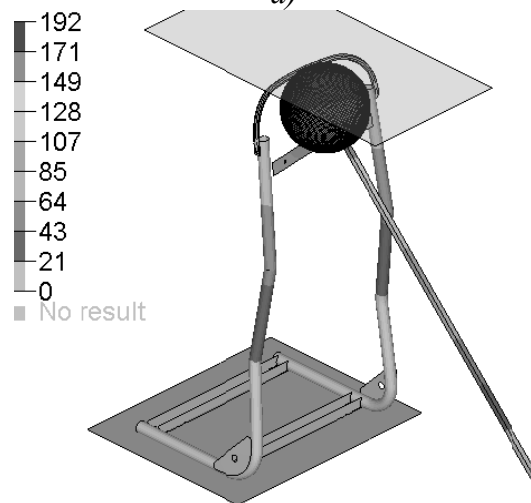


Рис. 3. Результаты ускорения шара



а)



б)

Рис. 4. Деформации каркаса сиденья
а – динамический расчёт; б – статический расчёт

Как видно из графика ускорений шара, максимальные замедления составили не более 28 g, что ниже предельно допустимых значений в 80 g.

Практический интерес также представляет рассмотрение статического продавливания конструкции. Данный вид нагружения целесообразно применять на начальных этапах проектирования, в процессе доводки конструкции с точки зрения повышения ее несущей способности и выбора рационального варианта. Для примера далее приведены результаты статического нагружения рассматриваемой модели шаром с воспроизведением его кинематики движения, аналогичным удару. Деформации конструкции для двух вариантов расчета показаны на рис. 4. На рис. 5 показан график зависимости контактной силы между шаром и каркасом сиденья, проведено сравнение аналогичного графика для динамического и статического расчетов.

Сравнительный анализ результатов двух расчетов (статического и динамического) показал, что расхождение значений максимальной контактной силы находится на уровне 10%. Относительно малое расхождение свидетельствует об адекватном поведении модели и приемлемой точности моделирования.

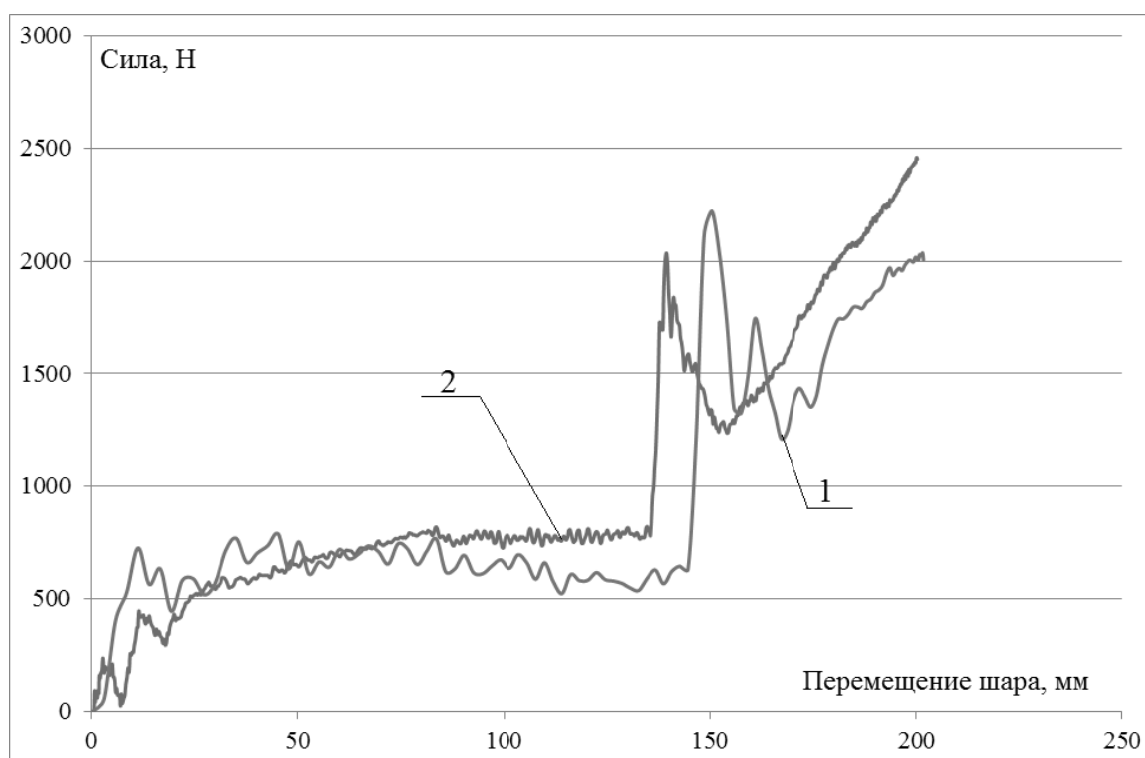


Рис. 5. Сравнение результатов расчётов
1 – динамический расчёт; 2 – статический расчёт

На обоих графиках можно заметить резкий всплеск контактной силы (перемещение шара 134 мм для статического и 145 мм для динамического расчёта), это объясняется тем, что шар сминает ручку, и точка контакта переходит на нижнюю поперечину, вследствие чего повышается жесткость конструкции.

Удовлетворительная сходимость результатов двух расчетов позволяет использовать выбранный подход к моделированию испытаний на стадии разработки каркасов сидений наземных транспортных средств. Этап моделирования является, безусловно, важным, он позволяет в относительно короткие сроки исследовать достаточно большее количество вариантов конструкции, нежели при проведении экспериментальных исследований. При этом, исходя из результатов компьютерного моделирования, на начальных этапах проектирования допускается имитация статического нагружения конструкции. Такой вариант нагружения

является более простым как при проведении расчетных исследований, так и при проверке принятых решений в ходе экспериментальных исследований. Испытания каркасов сидений наземных транспортных средств на энергопоглощение является довольно трудоёмким и дорогостоящим процессом, а разработанная методика позволяет достаточно точно спрогнозировать поведение конструкции при сертификационных испытаниях. В совокупности полученные результаты могут представлять большой интерес для инженеров, инженерных отделов компаний, занимающихся проектированием сидений наземных транспортных средств.

Библиографический список

1. **Кочанов, Е.В.** Расчетно-экспериментальная оценка несущей способности пассажирского сиденья с ремнем безопасности / Е.В. Кочанов, С.А. Багичев, Е.А. Наумова // Грузовик. – 2015. – №12. – С. 2-4.
2. **Правила ЕЭК ООН №21** «Единые предписания, касающиеся официального утверждения транспортных средств в отношении их внутреннего оборудования».
3. **Рябов, Д.М.** Метод расчета сидений энергопоглощающих конструкций бронированных колесных машин / Д.М. Рябов, А.А. Смирнов // Наука и Инновации, – 2013. – №12(24). – С. 23.
4. **Орлов, Л.Н.** Основы разработки конечно-элементных моделей кузовных конструкций автотранспортных средств. Расчеты на безопасность и прочность: учеб. пособие / Л.Н. Орлов, А.В. Тумасов, Е.В. Кочанов [и др.]; под ред. Л.Н. Орлова; Нижегород. гос. техн. ун-т. им. П.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2014. – 144 с.

*Дата поступления
в редакцию 23.11.2017*

V. Y. Shurygin¹, A. V. Tumasov¹, L. N. Orlov¹, A. A. Anikin¹, Y. I. Palutin²

COMPUTER SIMULATION OF TESTS FOR THE ASSESSMENT OF THE ENERGY-ABSORBING PROPERTIES OF THE BACK OF THE SEAT BACK

Nizhny Novgorod state technical university n. a. Alekseev¹,
Nizhny Novgorod state agricultural Academy²

Purpose: Study of energy absorption of the rear backrest/

Design/methodology/approach: The calculations have been performed in accordance with the requirements of regulation UNECE No. 21. To conduct computational studies of the developed finite element model, computer simulations performed using the software package LS-Dyna. The paper discusses two modes of loading models, namely dynamic and static.

Findings: Comparative analysis of the results of the two calculations (static and dynamic) showed that the divergence values of the maximum contact force is at the level of 10%. The relatively small divergence is an indication of adequate behavior of the model and acceptable accuracy of simulation. Test of seat frames ground vehicles the energy absorption is a quite time-consuming and expensive process, and the developed method allows to accurately predict the behavior of the design under certification tests. The obtained results may be of great interest to engineers, engineering departments involved in design of seat of vehicles.

Research limitations/implications: In this paper, uses methods of simulation.

Originality/value: Developed new finite element models.

Key words: seat, computer simulation, energy absorption.

НАШИ АВТОРЫ

ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Бремзен Антон Михайлович – студент
НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
murlokb@mail.ru

Волжанкин Николай Владимирович –
магистрант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
mrkeht@gmail.com.

Волохин Алексей Владимирович – стар-
ший преподаватель кафедры НГТУ
им. Р.Е. Алексеева; vm@nntu.ru

Гиниятуллин Айрат Рафаэлевич – канд.
физ.-мат. наук, науч. сотрудник НГТУ
им. Р.Е. Алексеева;

aginiyatullin@eias.ru

Злобина Наталья Вадимовна – магист-
рант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
welcomenat94@gmail.com

Ермилов Андрей Эдуардович - аспирант
НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
railwaythebest@yandex.ru

Ильичев Кирилл Владимирович – сту-
дент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
kirill989ilichev@gmail.com

Козырев Олег Рамазанович – канд. физ.-
мат. наук, доцент, старший науч. сотруд-
ник НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
orkozyrev@gmail.com

Логвинова Кира Владимировна – канд.
физ.-мат. наук, доцент НГТУ
им. Р.Е. Алексеева;

Лещева Светлана Викторовна – к.ф.-м.н.,
доцент кафедры «Высшая математика»
НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

vm@nntu.nnov.ru

Лухманова Татьяна Владимировна – к.ф.-
м.н., доцент кафедры «Высшая математи-
ка» НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

vm@nntu.nnov.ru

Манцеров Сергей Александрович –
канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой
НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

sergei639@gmail.com

Мохнина Наталья Вячеславовна – канд.
физ.-мат. наук, доцент НГТУ им. Р.Е.
Алексева; vm@nntu.ru

Мисевич Павел Валерьевич – д-р. техн.
наук доцент, профессор НГТУ
им. Р.Е. Алексева; p_misevich@mail.ru

Обыденнова Светлана Юрьевна –
начальник планового-финансового отдела
НГТУ им. Р.Е. Алексева;

romashka@nntu.ru

Пособилов Николай Егорович –
канд. техн. наук, доцент
НГТУ им. Р.Е. Алексева;

posne44@mail.ru

Шамин Роман Вячеславович – д-р физ-
мат. наук, зав. кафедрой математического
моделирования в космических системах
Российского университета дружбы наро-
дов; roman@shamin.ru

Шмелева Анна Геннадьевна – канд. физ.-
мат. наук, доцент Московский технологи-
ческий университет (МИРЭА);

ann_shmeleva@mail.ru

Юрова Надежда Вячеславовна – ст. пре-
подаватель НГТУ им. Р.Е. Алексева;
vm@nntu.ru

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

Ахлестин Пётр Владимирович – аспи-
рант ФГБОУ ВО «Волжский государст-
венный университет водного транспорта»;
mitohondrius@yandex.ru

Байков Александр Иванович – канд.
техн. наук, доцент НГТУ

им. Р.Е. Алексева;

baikov-a-i@yandex.ru

Безносков Александр Викторович – д-р.
техн. наук, профессор beznosov@nntu.ru

Боков Павел Андреевич – канд. техн.
наук, старш. преподаватель

НГТУ им. Р.Е. Алексева;

atcmi@nntu.ru

Бокова Татьяна Александровна – канд.
техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексе-
ва; tatabo@bk.ru

Волков Никита Сергеевич – магистрант, техник НГТУ им. Р.Е. Алексеева; (831) 436-80-23

Дмитриев Сергей Михайлович – д-р техн.наук, профессор, ректор НГТУ им. Р.Е. Алексеева; dmitriev@nntu.ru

Доронков Денис Владимирович – ассистент кафедры «Ядерные реакторы и энергетические установки» НГТУ им. Р.Е. Алексеева; nevid000@mail.ru

Жеребцов Андрей Леонидович – главный энергетик - начальник отдела главного энергетика ООО «Газпром трансгаз Сургут»; gherebtsoval@yandex.ru

Журавлева Ольга Романовна - магистрант, техник НГТУ им. Р.Е. Алексеева; (831) 436-80-23

Захаров Алексей Геннадьевич - руководитель проекта ЛЦТЭ ЦТЭ НТЦ РУ и ЭЭО компании «НИПОМ»; alzah81@yandex.ru

Егоров Айаал Николаевич – начальник монтажно-наладочного центра СТ «Алмазавтоматика» ПАО АК «АЛРОСА»; egorovan@alrosa.ru.

Иванова Нина Леонидовна – канд.биолог.наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; missis.ivanovanl@yandex.ru

Ковалев Денис Валерьевич - руководитель лаборатории ЦТЭ НТЦ РУ и ЭЭО компании «НИПОМ»; kovalev.dzr@mail.ru

Коробко Григорий Иванович – канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта», tv-out@narod.ru

Легчанов Максим Александрович – канд. техн. наук, доцент, зам. директора ИЯЭ и ТФ НГТУ им. Р.Е. Алексеева; legchanov@mail.ru

Львов Александр Вячеславович – инженер НГТУ им. Р.Е. Алексеева; (831) 436-80-23

Мальцев Алексей Николаевич - аспирант ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта»; al.n.maltsev@yandex.ru.

Мелузов Александр Георгиевич – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; meluzov@mail.ru

Новожилова Ольга Олеговна – канд.техн.наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; oo.novozhilova@gmail.com

Пегасина Александра Сергеевна – магистрант НГТУ им. Р.Е. Алексеева; (831) 436-80-23

Раевский Алексей Сергеевич – д-р физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой НГТУ им. Р.Е. Алексеева; physics@nntu.ru

Раевский Сергей Борисович – д-р техн. наук, профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева, заслуженный деятель науки РФ. physics@nntu.ru

Рыжакова Татьяна Станиславовна – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; physics@nntu.ru

Рябов Дмитрий Сергеевич - магистрант НГТУ им. Р.Е. Алексеева; (831) 436-80-23

Сорокин Владислав Дмитриевич – инженер кафедры «Атомные и тепловые станции» НГТУ им. Р.Е. Алексеева; vlad.sorokin1987@mail.ru

Семёнов Александр Сергеевич – канд. физ.-мат. наук, доцент, зав. кафедрой Электроэнергетики и автоматизации промышленного производства Политехнического института (филиала) Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова в г. Мирном; sash-alex@yandex.ru.

Федоров Олег Васильевич – д-р техн. наук, проф., профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева; fov52@mail.ru.

Хробостов Александр Евгеньевич – канд. техн. наук, доцент, директор ИЯЭ и ТФ; khrobostov@nntu.ru

Шилов Максим Петрович – аспирант ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта»; MaksimShilov1@yandex.ru

Хватов Олег Станиславович – д-р. техн. наук, профессор, зав. кафедрой ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта»; 8 (831)-419-35-13

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

Аникин Алексей Александрович – д-р техн. наук, профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева; 8 (831) 436-73-63

Беляков Владимир Викторович – д-р техн. наук, профессор, начальник Управления научно-исследовательских и инновационных работ НГТУ им. Р.Е. Алексеева»; nauka@nntu.ru

Белявский Георгий Иванович – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; tkm@nntu.ru.

Береснев Павел Олегович - аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева; pavel.beresnev@nntu.ru

Васильев Сергей Александрович – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; rmnik.my@yandex.ru

Вашурин Андрей Сергеевич – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; vashurin@nntu.ru

Зезюлин Денис Владимирович – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева»; denis.zeziulin@nntu.ru

Зиновьев Юрий Александрович – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; tkm@nntu.ru.

Колотилин Владимир Евгеньевич - канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; transfer@nntu.ru

Колпаков Алексей Александрович – канд. техн. наук, главный металлург ОАО «ГАЗ»; efremovaog@gaz.ru

Кузнецов Сергей Викторович – канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой НГТУ им. Р.Е. Алексеева; fam@nntu.ru.

Куркин Андрей Александрович – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой НГТУ им. Р.Е. Алексеева; aakurkin@gmail.com

Макаров Владимир Сергеевич - канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; vladimir.makarov@nntu.ru

Мошков Павел Сергеевич – аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева; pavel.moshkov@nntu.ru

Орлов Лев Николаевич – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой НГТУ им. Р.Е. Алексеева; 8 (831) 436-73-63

Панов Алексей Юрьевич – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой, директор ИПТМ НГТУ им. Р.Е. Алексеева; fam@nntu.ru

Папунин Алексей Валерьевич - старший преподаватель НГТУ им. Р.Е. Алексеева»; lexa-lenia@rambler.ru

Палутин Юрий Иванович – д-р техн. наук, профессор НГСХА; 8 (831) 462-78-17

Порубов Дмитрий Михайлович - аспирант dmitry.porubov@nntu.ru

Песков Вячеслав Иванович – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; vp.peskov@mail.ru

Песков Дмитрий Вячеславович – консультант по финансово-организационным вопросам строительных фирм; vp.peskov@mail.ru

Ребрушкин Максим Николаевич – ассистент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; rmnik.my@yandex.ru

Святов Евгений Евгеньевич – ведущий инженер-конструктор АНО «Учебный центр НС Лабс»; sweel@mail.ru

Торопов Евгений Иванович – аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева; evgeny.toropov@nntu.ru

Трусов Юрий Павлович – зам. директора
Центра коллективного пользования
НГТУ им. Р.Е. Алексеева «Транспортные
системы»;

yury.trusov@nntu.ru

Тумасов Антон Владимирович – канд.
техн. наук, доцент,
директор ИТС НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

anton.tumasov@gmail.com

Шнейберг Алексей Михайлович - канд.
техн. наук, доцент

НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

tkm@nntu.ru.

Швецов Владимир Дмитриевич – канд.
техн.наук, доцент

НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

tkm@nntu.ru

Шурыгин Вадим Юрьевич – ассистент
НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

Shurygin.063@yandex.ru

Филатов Валерий Игоревич -

аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

valera.filatov@nntu.ru

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: rsl@nntu.ru , aespirance@yandex.ru

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ, НАПРАВЛЯЕМЫХ В РЕДАКЦИЮ

- В редакцию направляют **два экземпляра** статьи, отпечатанных на лазерном принтере на белой бумаге формата А4, с одной стороны листа, через один интервал 12 кеглем. Сноски и примечания 10 кеглем. Поля: левое, правое и нижнее – 20 мм, верхнее – 25 мм.
- 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 экспортного и экспертного контроля, 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**.
- Текст набирают без переносов, используя 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.
- 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.
- 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 **jpf** или **tif** с разрешением **300 dpi**. Рисунки выполняются по ГОСТ, подрисовочная подпись 11 жирный кегль.
- К статье следует приложить CD с файлами: текста статьи с библиографией на русском языке; **фамилиями авторов, названием статьи, информацией о месте работы всех авторов, аннотацией и ключевыми словами на английском языке**.
- В сведениях об авторах следует сообщить: ФИО (полностью), место работы, должность, ученую степень и звание, телефон и адрес электронной почты.

**ТРУДЫ НГТУ
им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА**

№ 4 (119)

Редакторы: **Н.Н. Максимова, О.В. Пугина**
Технический редактор **Т.П. Новикова**

Редакция:

603950, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24.
rsl@nntu.ru, aespurance@yandex.ru

Подписано в печать 18.12.2017. Формат 60x84 ¹/₈. Бумага офсетная.

Печать трафаретная. Усл. печ. л. 23,75. Тираж 300 экз. Заказ .

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева.

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