

**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*

**№ 1 (120)**

**Нижний Новгород 2018**

УДК 050(06)  
ББК 9я54  
Т 78

Т 78 Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2018. №1(120).  
– 234 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**

<i>Пелиновский Дмитрий Ефимович</i>	PhD, проф. математики, Университет Мак Мастер, Гамильтон, Онтарио, Канада
<i>Палкович Ласло</i>	Проф. Сечени Иштван Университет, Дьёр, Венгрия
<i>Варлаки Петер</i>	Проф. Сечени Иштван Университет, Дьёр, Венгрия
<i>Виджай Кумар Чакка</i>	PhD, проф., Университет Шив Надар, Индия
<i>Ялцинер Ахмет Джемдет</i>	д., проф., METU, директор OERC, Турция

### **ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОГО СОВЕТА**

<i>Гуляев Юрий Васильевич</i>	член Президиума РАН, академик, д. физ.-мат. н., проф., научный руководитель ИРЭ РАН им. В.А. Котельникова
<i>Гринберг Руслан Семенович</i>	член-корр. РАН, д. эк. н., проф., научный руководитель Института экономики РАН
<i>Митяков Сергей Николаевич</i>	Академик РАЕН, член президиума РАЕН, действительный член АИН им. А.М. Прохорова, д. физ.-мат. н., проф., директор ИНЭУ НГТУ
<i>Куркин Андрей Александрович</i>	д. физ.-мат. н., проф., зав. кафедрой ПМ
<i>Кондратьев Вячеслав Васильевич</i>	член-корр. РАН, д. т. н., проф., зав. кафедрой ВСТ НГТУ
<i>Рындык Александр Георгиевич</i>	д. т. н., проф., зав. кафедрой ИР НГТУ
<i>Раевский Сергей Борисович</i>	д. т. н., проф.
<i>Кошелев Олег Сергеевич</i>	д. т. н., проф., зав. кафедрой МТКОДСП НГТУ
<i>Хранилов Валерий Павлович</i>	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, 2018

**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*

**№ 1 (120)**

**Nizhny Novgorod 2018**

*The journal is issued 4 times a year*

**The journal is included in HAC Ministry of Education and Science**

in the "List of peer-reviewed scientific publications where must be published basic scientific results of dissertations on competition of a scientific degree of Candidate of Science, on competition of a scientific degree of Doctor of Science" in specialties: 05.05.00 - 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*

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ.....</b>	<b>9</b>
<b>Гай В.Е., Утробин В.А., Викулова Е.Н., Никифоров Н.А., Макаров Н.Н., Ляхманов Д. А.</b> Метод обнаружения объектов на изображении с позиций теории активного восприятия.....	9
<b>Захаров А.С.</b> Алгоритм дискретизации стационарных и нестационарных систем с запаздываниями на основе СПЛАЙН-интерполяции.....	16
<b>Жевнерчук Д.В., Захаров А.С.</b> Семантическое моделирование генераторов программного кода распределенных автоматизированных систем.....	23
<b>Коган Д.И., Федосенко Ю.С., Хандурин Д.А.</b> Постановка, алгоритмы синтеза решений и вычислительная сложность минимаксных задач о биназначениях.....	31
<b>Ломакина Л.С., Носков К.М.</b> Нейросетевые технологии диагностирования состояний биоценоза на основе априорных статистических данных.....	37
<b>Митяков Е.С., Митяков С.Н.</b> Оценка рисков в задачах мониторинга угроз экономической безопасности.....	44
<b>Рыжаков Д.Г.</b> Основные направления инновационной деятельности в системе высшего образования Российской Федерации (по материалам новейших периодических изданий).....	52
<b>Соловьёв А.В.</b> Предпосылки к созданию единого целеориентированного управления судовой энергетической установкой.....	59
<b>Чернобаев И.Д., Суркова А.С., Панкратова А.З.</b> Моделирование текстов с использованием рекуррентных нейронных сетей.....	65
<b>Хоптар В.В.</b> Один из вариантов организации авиационной адаптивной декаметрово-вой радиосвязи.....	74
<b>ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ.....</b>	<b>81</b>
<b>Безносков А.В., Бокова Т.А., Лукичѳв Н.С., Гадетов В.А., Мелузов А.Г.</b> Экспериментальные исследования по определению потерь мощности при трении расплава свинца о вал насоса, и геометрии его свободной поверхности при вращательном движении.....	81
<b>Добров А.А., Иванова К.Г., Легчанов М.А., Курбатова Н.П., Ляхов И.Ю.</b> Получение в CFD-программе логос коэффициентов гидравлического сопротивления ячеек ТВС с дистанционирующей решеткой для модели одномерного поячейкового расчета активной зоны.....	91
<b>Земляникин М.А., Раевская Ю.В.</b> Обработка сигнала, принимаемого волоконно-оптическим гидрофоном.....	98
<b>Кайнова А.В., Сухарев Ю.П., Власичев Г.Н.</b> Реакторные установки сверхмалой мощности.....	108
<b>Кралин А.А., Крюков Е.В., Гуляев В.В.</b> Исследование регулировочных характеристик ТРВДН при поперечном регулировании выходного напряжения.....	117
<b>Матюшечкин Н.А., Белов Ю.Г., Болонина А.А., Кочеганов Д.М., Абузяров Т.Х.</b> Волоконно-оптический датчик температуры для систем тепловой защиты электрооборудования.....	122
<b>Соснина Е.Н., Веселов Л.Е.</b> Энергоустановки на ТОТЭ в системах электроснабжения энергоудаленных потребителей.....	130

<b>МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО .....</b>	<b>138</b>
<b>Горожанкин С.А., Бабанин А.Я., Савенков Н.В., Понякин В.В.</b> Измерение крутящего момента поршневого двс колесной машины при его работе на неустановившемся режиме с помощью торсионного крутильного динамометра.....	138
<b>Дьяков А.С., Клубничкин Е.Е., Клубничкин В.Е., Захаров А. Ю., Карташов А.Б.</b> Экспериментальная оценка устойчивости и управляемости снегоходов отечественного производства.....	148
<b>Дьяков А.С., Захаров А.Ю., Клубничкин В.Е., Клубничкин Е.Е., Карташов А.Б.</b> Экспериментальная оценка скоростных и тормозных свойств снегоходов отечественного производства.....	156
<b>Зезюлин Д.В., Тюгин Д.Ю., Тумасов А.В., Groшев А.М., Беляков В.В., Порубов Д.М., Филатов В.И., Береснев П.О.</b> Разработка системы беспилотного управления движением транспортного средства с электроприводом.....	165
<b>Кравец В.Н., Мусарский Р.А., Волков С.А.</b> Определение параметров коробок передач современных легковых автомобилей.....	175
<b>Огороднов С.М., Рогов П.С., Малеев С.И.</b> Экспериментальные и аналитические методы построения частных скоростных характеристик двигателей внутреннего сгорания.....	182
<b>Рудницкий В.И., Рудницкий А.В.</b> Стохастические модели оценки значимости надёжности элементов судового оборудования.....	188
<b>Рябов Д.А., Хлыбов А.А., Минков К.А.</b> О перспективе применения водовоздушной смеси для охлаждения молотовых штампов.....	196
<b>Павлов А.С.</b> Разработка методики оперативного регулирования глубины проплавления слоя шва по толщине жидкой прослойки при сварке в щелевую разделку кромок.....	204
<b>Панов А.Ю., Сатаева Д.М., Брехова А.А.</b> Влияние работы оборудования на качество и эффективность производства изделий из пластмасс.....	212
<b>Плотников С.А., Карташевич А.Н., Смольников М.В.</b> Исследование энергетических показателей трактора «БЕЛАРУС–922» при работе на топливе с добавками этанола.....	223

## CONTENTS

<b>INFORMATICS AND MANAGEMENT IN TECHNICAL AND SOCIAL SYSTEMS....</b>	<b>9</b>
<b>Gai V.E., Utrobin V.A., Vikulova E.N., Nikiforov N. A., Makarov N.N., Lyakhmanov D.A.</b> The object detection method in an image in terms of the theory of active perception.....	9
<b>Zakharov A.S.</b> Stationary and nonstationary systems discretization algorithm with delays on spline interpolation basis.....	16
<b>Zhevnerchuk D.V., Zakharov A.S.</b> Semantic modeling of the program code generators for distributed automated systems.....	23
<b>Kogan D.I., Fedosenko Yu.S., Khandurin D.A.</b> Formulation, algorithms for solution synthesis and computational complexity of minimax bi-assignment problem.....	31
<b>Lomakina L.S., Noskov K.M.</b> Neural network technologies diagnosing biocenosis states based on a priori statistics data.....	37
<b>Mityakov E.S, Mityakov S.N.</b> Assessment of risks in problems of monitoring of threats of economic security.....	44
<b>Ryzhakov D.G.</b> The main directions of innovative activity in the system of higher education of the russian federation (on the materials of the latestperiodical publications).....	52
<b>Soloviev A.V.</b> The preconditions for the creation of a unified goal directed management of marine power plant.....	59
<b>Chernobaev I.D., Surkova A.S., Pankratova A.Z.</b> Text modelling using recurrent neural networks.....	65
<b>Khoptar V.V.</b> One of the variants of organizing the aircraft radio adaptive communication in HF band.....	74
<b>ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES.....</b>	<b>81</b>
<b>Beznosov A.V., Bokova T.A., Lukichev N.S., Gadetov V.A., Meluzov A.G.</b> Experimental studies on determination of power losses through friction of lead on the pump of the pump, and geometry of its free surface while rotating motion.....	81
<b>Dobrov A.A., Ivanova K.G., Legchanov M.A., Kurbatova N.P., Lyahov I.Yu.</b> Calculation the hydraulic resistance coefficients in logos CFD-program for fa with spacer grid to use it in subchannel analysis.....	91
<b>Zemlyanikin MA, Raevskaya Yu.V.</b> Processing of signals accepted by fiber-optical hydrophone.....	98
<b>Kainova A.V., Sukharev Yu.P., Vlasichev G.N.</b> Super low power nuclear reactors.....	108
<b>Kralin A.A., Kryukov E.V., Gulyaev V.V.</b> Research of tvr regulating characteristics at output voltage transverse regulation.....	117
<b>Matushechkin N.A., Belov Y. G., Bolonina A.A., Kocheganov D.M., Abuzyarov T.H.</b> Optical fiber temperature sensor for overheating protection of electric motors and electric devices.....	122
<b>Sosnina E.N., Veselov E.L.</b> On power soft systems supply energy to remote consumers...	130
<b>MECHANICAL AND TRANSPORT: THEORY, TECHNOLOGY, PRODUCTION.....</b>	<b>138</b>
<b>Gorozhankin S.A., Babanin A.Ya., Savenkov N.V., Ponyakin V.V.</b> Measurement the torque of piston engine of the wheel vehicle at operation on the transient mode by using the torsion twisting dynamometer.....	138

---

<b>Dyakov A.S., Klubnichkin E.E., Kubnichkin V.E., Zakharov A.Yu., Kartashov A.B.</b> Experimental estimation of stability and control of snowmobiles of domestic production...	148
<b>Dyakov A.S., Zakharov A.Yu., Kubnichkin V.E., Klubnichkin E.E., Kartashov A.B.</b> Experimental estimation of speed and brake properties of snowmobiles of domestic production.....	156
<b>Zeziulin D.V., Tyugin D.Y., Tumasov A.V., Groshev A.M., Belyakov V.V., Porubov D.M., Filatov V.I., Beresnev P.O.</b> Development of a movement control system for an unmanned ground vehicle with electric drive.....	165
<b>Kravets V.N., Musarsky R.A., Volkov S.A.</b> Definition of the gearboxes parameters of modern cars .....	175
<b>Ogorodnov S.M., Rogov P.S., Maleev S.I.</b> Experimental and analytical methods for determination of partial velocity characteristics of internal combustion engines.....	182
<b>Rudnitsky V.I., Rudnitsky A.V.</b> Stochastic models for assessing the significance of the reliability of elements of ship equipment.....	188
<b>Ryabov D.A., Khlybov A.A., Minkov K.A.</b> On the perspective of application of water-air mixture for cooling hammer stamps.....	196
<b>Pavlov A.S.</b> Development of methods of operational control of the penetration layer of the weld through the thickness of the liquid layer when welding in a narrow groove.....	204
<b>Panov A.Y., Sataeva D.M., Brekhova A.A.</b> The impact of equipment on quality and efficiency of production of plastic products.....	212
<b>Plotnikov S.A., Kartashevich A.N., Smolnikov M.V.</b> Research of power indicators of tractor «Belarus-922» at work on fuel with ethanol additives.....	223



# ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

УДК 004.931

**В. Е. Гай, В. А. Утробин, Е. Н. Викулова,  
Н. А. Никифоров, Н. Н. Макаров, Д. А. Ляхманов**

## МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ НА ИЗОБРАЖЕНИИ С ПОЗИЦИЙ ТЕОРИИ АКТИВНОГО ВОСПРИЯТИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексева

Задача обнаружения объектов на изображении или в видеопотоке – одна из актуальных задач компьютерного зрения. Ключевой этап в решении данной проблемы – формирование признакового описания объекта. Предлагается новый подход к формированию признакового описания объекта на основе теории активного восприятия. Приводятся результаты тестирования предложенного метода на базе данных изображений.

*Ключевые слова:* обнаружение объектов, теория активного восприятия, распознавание образов.

### Введение

Задача обнаружения объектов на изображении – одна из фундаментальных проблем в области компьютерного зрения и обработки изображений. Практическое применение данная задача находит в системах автопилотирования, индексирования изображений и видео, охраняемых системах.

Структуру системы обнаружения объектов на изображении можно представить в виде совокупности трёх блоков: предварительная обработка изображения, формирование признакового описания, принятие решения.

Предварительная обработка изображения обычно заключается в применении к изображению фильтра, подавляющего шум. Часто реализация данного этапа не выполняется, в этом случае ответственность за устойчивость к шуму перекладывается на метод формирования признакового описания.

При формировании признакового описания объекта используется гистограмма ориентированных градиентов, каскады Хаара и т. д.

Блок принятия решения заключается в формировании модели на основе признакового описания с использованием нейронных сетей, метода опорных векторов,  $k$ -ближайших соседей.

В [1] рассмотрена задача детектирования объекта, представляющего собой несколько соединённых сфер одинакового радиуса. В решении поставленной задачи определен ряд этапов: выделение границ объекта с использованием детектора Канни, поиск структурных элементов на основе преобразования Хафа, определение положения объекта с использованием распознавания по эталону и поиска изменений по кадрам. К недостаткам предложенного метода распознавания по эталону можно отнести частный характер задачи (должна быть известна структура объекта), значительные затраты времени и вычислительных ресурсов на формирование базы данных всевозможных изображений объекта.

В работе также рассмотрен подход к решению задачи определения положения объекта с использованием нейросети. К достоинствам использования неокогнитрона при распознава-

нии относятся отсутствие необходимости этапов поиска границ и выделения окружностей, а также возможность внесения изменений для каждой новой задачи. К недостаткам следует отнести сложность структуры сети, порождающую большой объем вычислений и отсутствие возможности самообучения.

В [2] предложен метод распознавания, относящийся к классу обобщающих методов. Объект рассматривается как совокупность элементов, в качестве которых выбраны линии границ. Для обучения используется эталонное изображение объекта, на основе которого строится эталонный каркас. Исследуемое изображение обрабатывается фильтром Хаара с последующим выделением и соединением точек. Обнаружение заключается в построении каркаса исследуемого изображения, поиск наилучшего совмещения с эталоном, принятие решения об обнаружении путем сравнения количества совпавших линий с пороговым значением. К недостаткам данного метода можно отнести то, что он применим только для ограниченного класса объектов характерной формы.

В [3] описан подход к распознаванию объекта на изображении с использованием алгоритма адаптивного усиления (AdaBoost), в основе которого лежит идея отбора и комбинирования слабых классификаторов. Тестирование реализации предложенного алгоритма показало приемлемое время обработки изображений в тренировочной выборке. Установлено также, что в реальных условиях требуется обучающая выборка большого объема, а на обучение каскада классификаторов необходимо потратить несколько дней.

В [4] описан метод детектирования лиц на изображениях, в основу которого положены идеи алгоритма Viola&Jones. Для повышения скорости и точности детектирования в предобработке изображения предложено использовать серию фильтров, где каждый следующий фильтр обрабатывает только «перспективные» части изображения, полученные от предыдущих фильтров. При этом на основе использования информации о цвете и форме объекта, достигается отделение регионов, не содержащих лиц. Для детектирования лиц использовались совокупности анизотропных гауссовых примитивов, объединенные в каскадную модель (AdaBoost). Приведенные результаты экспериментов показывают, что предложенный гибридный метод превосходит классические по качеству и скорости распознавания, однако, сохраняются недостатки, связанные с трудоемкостью обучения каскада классификаторов.

В [5] представлен алгоритм обнаружения объектов, основанный на обучении свёрточной нейронной сети. Особенностью алгоритма является то, что в единой сети решаются сразу две задачи: выделение прямоугольных блоков, содержащих объекты, и определение принадлежности объекта некоторому классу. Для распознавания исходное изображение приводится к размеру  $448 \times 448$ , делится на ячейки  $7 \times 7$ , для каждой ячейки формируется метка, характеризующая ее принадлежность объекту некоторого класса.

Достоинством предложенного алгоритма является высокая скорость обработки изображений. К недостаткам следует отнести затраты на обучение сети, снижение точности обнаружения по сравнению с аналогичными алгоритмами, ограничения, связанные с размерами ячеек сетки (возникают трудности при обнаружении мелких объектов и объектов, расположенных близко друг к другу).

Данная работа посвящена решению задачи обнаружения объектов на изображении с позиций теории активного восприятия (ТАВ). Использование ТАВ позволит распознавать объекты произвольных классов с приемлемой трудоемкостью и высокой точностью, за счёт нового подхода к решению задачи формирования признаков.

### **1. Формирование признакового описания объекта с позиций теории активного восприятия**

Базовым преобразованием ТАВ является  $U$ -преобразование, которое реализуется в два этапа [6]. На первом этапе к изображению применяется  $Q$ -преобразование, после которого получаем матрицу визуальных масс  $m$  размером  $4 \times 4$  элемента:

$$m[i, j] = \sum_{k=\left(\frac{i-1}{4}\right) \cdot N}^{\frac{i}{4} \cdot N} \sum_{l=\left(\frac{j-1}{4}\right) \cdot M}^{\frac{j}{4} \cdot M} I[k, l], i = \overline{1, 4}, j = \overline{1, 4},$$

где  $I$  – изображение размером  $N \times M$  отсчётов.

Для корректной интерпретации результатов  $Q$ -преобразования отсчёты изображения должны принадлежать положительной области значений. С позиций ТАВ $Q$ -преобразование соответствует этапу предварительной обработки изображения (рис. 1).

На втором этапе к результату  $Q$ -преобразования применяется множество фильтров  $\mathbf{F} = \{F_i\}, i = \overline{1, 16}$  (рис. 1). В результате, формируется вектор спектральных коэффициентов  $\mu$ :

$$\mu_i = \sum_{k=1}^4 \sum_{l=1}^4 m[k, l] \cdot F_i[k, l].$$

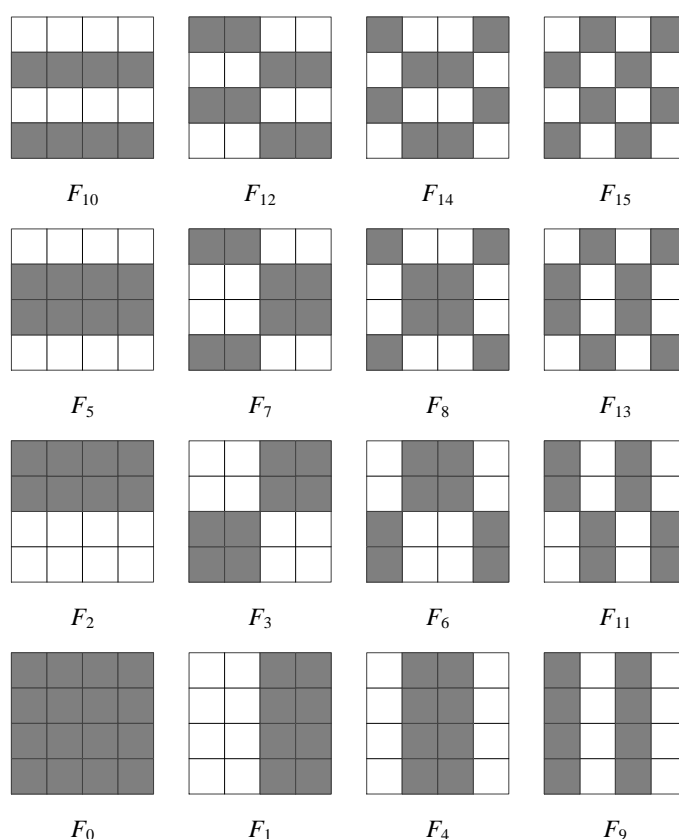


Рис. 1. Фильтры, используемые при вычислении признакового описания

Размер каждого фильтра составляет  $4 \times 4$  элемента. Элемент фильтра может принимать значения «+1» (тёмные области на рис. 1) и «-1» (светлые области на рис. 1). Конструктивно данные фильтры подобны фильтрам Уолша системы Хармута. Специфика использования данных фильтров заключается в том, что они применяются после реализации  $Q$ -преобразования.

## 2. Метод обнаружения объектов

Информационная модель обнаружения объекта на изображении показана на рис. 2.

Этап обучения заключается в выполнении следующих шагов:

1) формируются «положительные» и «отрицательные» образцы объектов для каждого из обнаруживаемых классов объектов; база данных «положительных» образцов включает изображения обнаруживаемых  $C$  классов объектов, каждый образец имеет размер  $h_c \times w_c$ ,

где  $h_c$  – высота образца;  $w_c$  – ширина образца;  $c$  – класс образца ( $c \in \overline{1, C}$ ), причём каждый образец содержит изображение детектируемого объекта, база данных «отрицательных» образцов строится аналогично базе для «положительных», каждый «отрицательный» образец не содержит изображение детектируемого объекта;

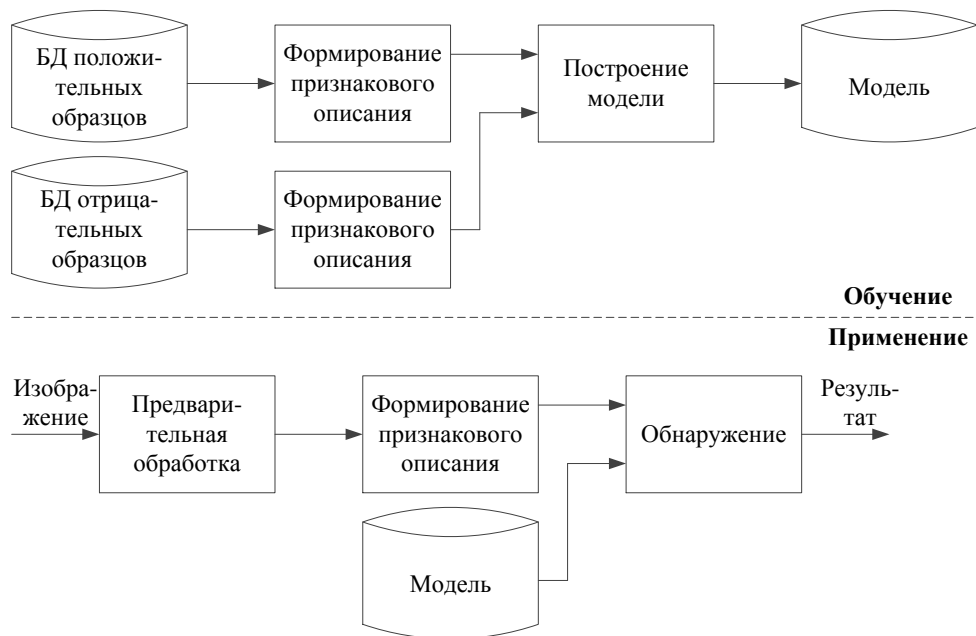


Рис. 2. Информационная модель обнаружения объектов

2) вычисляется признаковое описание для изображений, находящихся в указанных базах данных; формирование признакового описания изображения  $I$  выполняется по следующему алгоритму:

2.1) изображение  $I$  разбивается на  $L^2$  равных частей без перекрытия  $\mathbf{P}=\{P_i\}$ ,  $i=\overline{1, L^2}$  размером  $(N/L) \times (M/L)$  отсчётов (эквивалентность частей изображения выбрана исходя из того, что изображение обрабатывается в условиях априорной неопределённости), где  $P_i$  –  $i$ -я область изображения;  $L$  – количество разбиений одной стороны изображения;

2.2) для каждой части вычисляется признаковое описание на основе  $U$ -преобразования:

$$D = FC [I],$$

где оператор  $FC[\bullet]$  вычисляет признаковое описание изображения и реализуется следующим образом:

$$\forall j = \overline{1, L^2} : \\ D = D \cup U[P_j],$$

где  $U[\bullet]$  – оператор вычисления  $U$ -преобразования;  $D$  – признаковое описание изображения  $I$ .

Таким образом, число частей, на которое разбивается изображение, определяет размерность признакового описания:  $1 \times (15 \cdot L^2)$ . В результате выполнения данного шага формируется признаковое описание положительных образцов для каждого класса  $F_P = \{F_{P,i}\}$  и признаковое описание отрицательных образцов для каждого класса:  $F_N = \{F_{N,i}\}$ ,  $i = \overline{1, C}$ ;

3) с использованием метода опорных векторов на основе вычисленных признаковых описаний формируется модель для детектирования каждого из классов объектов; таким образом, каждый классификатор обучается различать два класса: «положительный» образец некоторого класса и «отрицательный» образец для того же класса:

$$\mathbf{S} = \{S_i\}, S_i = SVM_t [F_{P,i}, F_{N,i}], i = \overline{1, C},$$

где  $SVM_i[\bullet]$  – оператор определения параметров модели метода опорных векторов;  $\mathbf{S}$  – множество моделей, полученных в результате обучения классификатора для каждого из классов объектов;

Этап применения заключается в выполнении следующих шагов:

1) предварительная обработка изображения  $I$  – деление изображения  $I$ , на котором выполняется детектирование объектов, на области с шагом  $s_h$  по горизонтали и  $s_v$  по вертикали, размер области для  $i$ -го класса объектов известен заранее и установлен на этапе обучения, выделение областей выполняется на нескольких масштабах; это используется для обнаружения объектов, размер которых меньше размера эталона:

$$\mathbf{Q} = \{Q_{i, (x, y), s}\}, i = \overline{1, T},$$

где  $\mathbf{Q}$  – множество всех областей, полученных по изображению;  $Q_{i, (x, y), s}$  –  $i$ -я область  $(x, y)$  – координата верхнего правого угла области;  $s$  – масштаб изображения ( $0 < s < 1$ );  $T$  – количество полученных областей;

2) для каждой области  $Q_i$  формируется признаковое описание:

$$D_{Q_{ixys}} = FC [Q_{i, (x, y), s}], i = \overline{1, T},$$

где  $D_{Q_{ixys}}$  – признаковое описание области  $Q_{i, (x, y), s}$ ;

3) при выполнении обнаружения на вход классификатора направляются полученные на предыдущем этапе признаковые описания областей изображения:

$$C_{Q_{ixys}} = SVM_u [D_{Q_{ixys}}, \mathbf{S}],$$

где  $SVM_u$  – оператор определения класса по признаковому описанию  $D_{Q_{ixys}}$  на основе множества моделей  $\mathbf{S}$ ;  $C_{Q_{ixys}}$  – класс области  $Q_{i, (x, y), s}$ ;

4) учитывая, что на предыдущем шаге для одного объекта, находящегося на тестовом изображении, генерируется множество близких друг другу вариантов расположения («гипотез»), необходимо выполнить подавление немаксимумов с использованием алгоритма Soft-NMS, описанного в [7]; данный метод выбирает область с максимальной оценкой правдоподобия некоторого класса объектов, а все остальные области, перекрывающиеся в определённом процентном соотношении с данной областью, подавляет.

### 3. Вычислительный эксперимент

Вычислительный эксперимент предназначен для оценки точности работы предложенного метода детектирования объектов. Для проведения вычислительного эксперимента были выбраны объекты двух классов – «Пешеход» и «Легковой автомобиль». В обучающей выборке для каждого из классов хранится 1000 положительных и 1000 отрицательных эталонов, таким образом, всего 4000 изображений. Тестовая выборка включает 1000 предварительно размеченных изображений для каждого из классов размером 640×480 отсчётов.

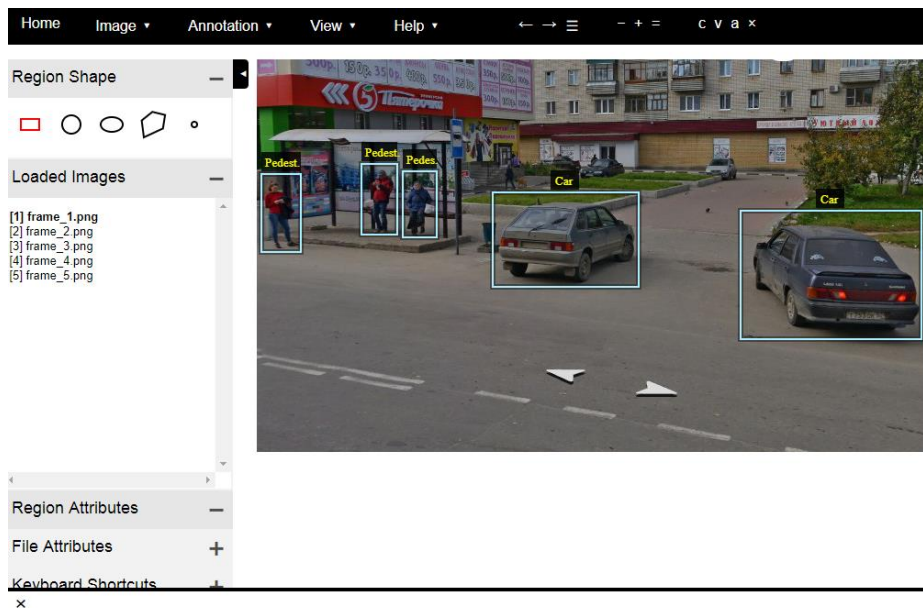
Размер эталона для класса «Пешеход» составляет 64×128 отсчётов, для класса «Легковой автомобиль» – 64×64 отсчёта. Разметка изображений выполнялась в программе VGGImageAnnotator, разработанная группой визуальной геометрии Оксфордского университета (см. рис. 3). На этапе применения величина смещения окна по изображению кратна значению  $L$ .

В табл. 1 приводятся результаты тестирования предложенного метода обнаружения объектов.

Таблица 1

Результаты вычислительных экспериментов

$L$	Класс «Пешеход»		Класс «Легковой автомобиль»	
	Ошибка первого рода (%)	Ошибка второго рода (%)	Ошибка первого рода (%)	Ошибка второго рода (%)
1	10	15	9	11
2	7	5	6	4
4	2	3	3	3



**Рис. 3. Разметка тестового изображения**

На рис. 4 показан результат детектирования объектов класса «Пешеход» и «Легковой автомобиль». Время обработки одного изображения составляет 47 мс.



**Рис. 4. Результат детектирования объектов**

В работе [2] решается задача обнаружения жеста открытой ладони в видеопотоке. Обучающая выборка составляла одно полутоновое изображение  $640 \times 480$  отсчётов. Тестовая выборка – 52 изображения, содержащих ладонь, и 48 изображений, не содержащих ладонь. Точность обнаружения 89%, среднее время обработки одного изображения – 34 мс.

В работе [3] решается задача обнаружения бейсбольного мяча. В качестве обучающей выборки используется одно изображение  $150 \times 150$  отсчётов. Обучающая выборка составляет 1000 изображений (500 – содержат объект, 500 – не содержат объект). Время обработки одного изобраа-

жения – не более 13 мс. Время, затраченное на обучение каскада классификаторов – 1 день.

В работе [4] решается задача обнаружения лиц на изображении. Тестирование производилось на специализированном тестовом наборе CMU/MITTestset, состоящем из 130 изображений, содержащих в общей сложности 507 лиц. Ошибка детектирования составляет 6,1%, время на обработку одного изображения – 35 мс.

Таким образом, реализация предложенного метода обнаружения объектов по точности обнаружения и производительности не уступает реализациям известных методов;

### Заключение

Методы обнаружения объектов на изображении имеют широкий круг применения, включая робототехнику, анализ медицинских изображений, охранные системы. В данной работе предложен метод обнаружения объектов, разработанный с позиций теории активного восприятия. Выполнено тестирование предложенного метода на двух классах объектов – «Пешеход» и «Легковой автомобиль». Результаты тестирования подтвердили эффективность предложенного метода обнаружения. По точности обнаружения объектов, предложенный метод не уступает известным подходам, а в ряде случаев – показывает лучшие результаты. Цель дальнейших исследований – повышение устойчивости предложенного метода обнаружения к искажениям анализируемого изображения.

### Библиографический список

1. **Азаренко, Д.С.** Детектирование объекта на изображении и определение его смещения на двух различных изображениях // Искусственный интеллект. – 2013. – №3. – С. 90–97.
2. **Алфимцев, А.Н.** Метод обнаружения объекта в видеопотоке в реальном времени / А.Н. Алфимцев, И.И. Лычков // Вестник ТГТУ. – 2011. – Т. 17. – № 1. – С. 44–55.
3. **Бутенко, В. В.** Поиск объектов на изображении с использованием алгоритма адаптивного усиления // Молодой ученый. – 2015. — №4. – С. 52–56.
4. **Гребнов, И. В.** Новый метод детектирования человеческих лиц на цифровых изображениях // Вестник ИГЭУ. – 2008. – Вып. 4. – С. 77–81.
5. **Redmon, J.** The IEEE / J. Redmon [et al.] // Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2016. – P. 779–788.
6. **Utrobin, V. A.** Physical interpretation of the elements of image algebra // Phys. Usp. 47 1017–1032 (2004).
7. **Bodla, N.** Improving Object Detection With One Line of Code / N. Bodla [et al.] // arXiv preprint arXiv:1704.04503. – 2017.

*Дата поступления  
в редакцию 31.01.2018*

**V.E. Gai, V.A. Utrobin, E.N. Vikulova, N.A. Nikiforov, N. N. Makarov, D.A. Lyakhmanov**

### THE OBJECT DETECTION METHOD IN AN IMAGE IN TERMS OF THE THEORY OF ACTIVE PERCEPTION

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

**Purpose:** A new approach to the formation the object parametric description in order to build object detection systems in an image or a video stream.

**Design/methodology/approach:** The parametric description forming includes two stages: a pre-processing stage, a filtering stage and obtaining a spectral coefficient vector. The basic transformations of the theory of active perception is the basis for both stages. A training phase is conducted for the purpose of object detection, including the formation of parametric descriptions for positive and negative samples of each particular object class. A detecting phase includes image preprocessing, object feature description forming and classification.

**Experiments:** The proposed method was evaluated for detecting objects belonging to two classes. The test results proved the effectiveness of the proposed detection method. The proposed method doesn't concede to known approaches in terms of the object detection accuracy and demonstrates better results in some cases.

**Findings:** The proposed method of object detection in the image has a wide range of applications, including robotics, medical image analysis, security systems.

**Research implications:** The purpose of further research – improving the proposed detection method stability of distorted images.

УДК 004.023

А.С. Захаров

**АЛГОРИТМ ДИСКРЕТИЗАЦИИ СТАЦИОНАРНЫХ И НЕСТАЦИОНАРНЫХ СИСТЕМ С ЗАПАЗДЫВАНИЯМИ НА ОСНОВЕ СПЛАЙН-ИНТЕРПОЛЯЦИИ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматриваются вопросы реализации алгоритмов оптимального управления многосвязными объектами с запаздываниями, которые широко распространены в различных отраслях промышленности. К таким объектам относятся различные теплообменные и массообменные установки, процессы с рециклами и другие.

Большой класс объектов в технике, экономике, живой природе характеризуется тем, что их прошлое состояние оказывает непосредственное влияние на то, что с ними произойдет в будущем. Для подобных классов объектов необходимо вводить дополнительный параметр – время запаздывания передачи сигнала по различным каналам. Существует несколько различных классов объектов, классифицируемых по типу запаздывания. Наиболее общий класс образуют объекты с запаздыванием по состоянию и по управлению. Именно объекты этого вида и рассматриваются в данной работе.

*Ключевые слова:* дискретизация, стационарные и нестационарные системы, сплайн-интерполяция.

**Введение**

Любая система развивается в соответствии с целью ее функционирования. При этом управление той или иной системой направлено на достижение (или, по крайней мере, на максимальное приближение) нужной цели. Требования эффективного экономического развития требуют создания интегрированных систем управления производством, включающих системы автоматизированного проектирования (САПР), автоматизированные системы управления технологическими процессами, автоматизированные системы управления производством, а также автоматизированные системы управления качеством выпускаемой продукции. Все эти системы находятся во взаимодействии друг с другом и тем самым образуют сложную иерархическую систему.

**Аналитическая часть**

При компьютерном моделировании динамических систем можно выделить три подхода – *численный, структурный и символьный*. В численном методе все данные, которые передаются на вход, представляются в виде массива чисел или в виде числовых матриц. Данные передаются на вход специализированных программ. Численный подход является основным для таких математических пакетов, как MATHCAD и MATLAB [7]. Для структурного подхода характерно представление исходной математической модели в виде структурной схемы из сумматоров, интеграторов и других вычислительных блоков. Данная схема собирается при помощи специального редактора, представленного на дисплее вычислительного комплекса. По окончании сборки схемы моделирование выполняется автоматически. Такой подход (иногда его называют визуальным программированием) используется в пакетах VISSIM, SIMULINK, LABVIEW. В третьем случае исходная математическая модель задается математическими формулами, записанными относительно символьных переменных. Результат получается в виде математических соотношений между этими переменными. Символьный подход реализован в пакетах DERIVE, MAPLE, MATHEMATICA [8].

У каждого из подходов есть свои достоинства и недостатки. Для расширения возможностей одних (SIMULINK) необходимо писать компоненты на старых языках программирования, таких как Fortran (1957 г.) и Ada (1979 г.). Другие (MATHCAD и MATLAB) не подходят для применения на производстве и используются только в образовательных целях.

В данной статье рассматривается и исследуется численный метод построения дис-



кретных математических моделей объектов управления с запаздыванием.

### Теоретическая часть

Пусть движение некоторой динамической системы описывается стационарной моделью в виде дифференциальных уравнений состояния и статического уравнения измерения. Запишем систему уравнений:

$$\begin{cases} x(t) = \sum_{i=0}^{\alpha} A_{Hi} x(t - \tau_i) + \sum_{i=0}^{\beta} B_{Hi} u(t - \theta_i) + \omega_H, \\ y(t) = \sum_{i=0}^{\gamma} C_{Hi} x(t - \eta_i) + \sum_{i=0}^{\delta} D_{Hi} u(t - \zeta_i) + v_H. \end{cases} \quad (1)$$

В системе уравнений (1) введены следующие обозначения:

- $x(t) \in R^n$  – вектор состояния,
- $u(t) \in R^m$  – вектор управления,
- $y(t) \in R^l$  – вектор измерений ОУ,
- $\alpha \geq 0, \beta > 0, \gamma > 0, \delta > 0$  – количества запаздываний непрерывной модели по состоянию и управлению,
- $A_{Hi} \in R^{n \times n} \forall i = \overline{1, \alpha}, B_{Hi} \in R^{n \times m} \forall i = \overline{1, \beta}, C_{Hi} \in R^{l \times n} \forall i = \overline{1, \gamma}, D_{Hi} \in R^{l \times m} \forall i = \overline{1, \delta}$  – переходные матрицы непрерывной модели,
- $\omega_H, v_H$  – векторы постоянных внешних воздействий НМ,
- $\tau_i, \theta_i, \eta_i, \zeta_i$  – абсолютные запаздывания НМ (транспортные задержки).

Как уже было доказано в [1], задача дискретизации сводится к поиску двух функций:  $x(t)$ ,  $u(t)$ . Значения этих векторов записываются в дискретные моменты времени и обозначаются только номером шага. Для простоты построения модели будем считать, что управление происходит в дискретные моменты времени, равные узловым моментам ( $t = kT$ ). При этом управление происходит мгновенно, а задержки на все вычисления учитываются в абсолютных запаздываниях. При таких допущениях функция  $u(t)$  является кусочно-постоянной с разрывами в узловых точках и в интерполяции не нуждается. Решение задачи дискретизации будет найдено сплайн-интерполированием функции  $x(t)$ .

Полиномиальным векторным интерполяционным сплайном (ВИС) называется такая функция  $x(t) \in R^n$ , которая соответствует условиям непрерывности всех производных порядка  $p - 1$ , где  $p$  – степень сплайна.

При этом такая функция (ВИС) является кусочно-постоянной и записывается (2):

$$x(t) = x(t_i) + (x(t_{i+1}) - x(t_i)) \frac{t - t_i}{h_i}, \quad (2)$$

где  $x(t_i)$  – узловые векторы непрерывной производной сплайна.

В данной статье рассматривается интерполяция кубическим сплайном (сплайн третьей степени). Это обусловлено наличием у всех типов сплайнов третьего порядка требований непрерывности, проходимости через все заданные точки. Кроме того, легко задаются дополнительные требования, такие как линейность функции на интервале между двумя точками, непрерывность производных выше второго порядка.

Состояние технического устройства в теории можно описать с помощью следующих физических параметров: входные, внутренние, выходные. Причем чаще всего для описания подобных параметров используются реальные физические величины: координаты, скорость, ускорение и т.д.

На практике обычно применяются два вида описаний: входно- выходные соотношения и соотношения типа вход- состояние- выход [2]. В данной работе будет рассматриваться первый подход. Модель «вход- выход» устанавливает и описывает связь между входными и выходными сигналами динамических систем. В данном случае под сигналами понимаются физические переменные, которые описывают данный процесс. В общем случае модель «вход- выход» можно понимать, как некий «черный ящик». В литературе такая модель называется «динамический черный ящик» [3]. На входе и выходе такого ящика имеются параметры  $X$  и  $Y$ . При этом выходные параметры находятся в зависимости от входных.

Перед проведением синтеза, поставим задачу построения модели «вход- выход». Для системы без запаздываний в пространстве состояний получим уравнение МВВ [4]:

$$y(k+1) = \sum_{v=0}^{a_y} A_{yv}y(k-v) + \sum_{v=0}^{a_y} B_{yv}u(k-v). \quad (3)$$

Таким образом, для построения модели необходимо вычислить ряд неизвестных параметров уравнения МВВ:

- $a_y$  – глубина запаздывания МВВ;
- $A_{yv}, B_{yv}$  – переходные матрицы МВВ.

Для вычисления описанных параметров необходимо проделать предварительные вычисления [5]. Вычислим структурные индексы наблюдаемости (инварианты Кронекера). Для этого составим матрицу, состоящую из матрицы  $A$ , умноженной на каждый из столбцов матрицы  $B$ . При этом элементы матрицы будут являться  $n$ -мерными векторами. Размерность матрицы ( $n \times l$ ):

$$\begin{pmatrix} b_1 & \dots & b_l \\ Ab_1 & \dots & Ab_l \\ \dots & \dots & \dots \\ A^{n-1}b_1 & \dots & A^{n-1}b_l \end{pmatrix} \quad (4)$$

Будем двигаться по матрице (4) по строкам и запишем элементы матрицы в порядке их следования:

$$b_1, \dots, b_l, Ab_1, \dots, Ab_l, A^{n-1}b_1, \dots, A^{n-1}b_l. \quad (5)$$

После чего будем заменять вектора матрицы (4) по следующему правилу: вектор заменяется на 1, если он линейно независим от всех предыдущих векторов в цепочке (5), в противном случае вектор заменяется на 0.

Приведем пример линейной независимости для вектора  $b_k$ . Для этого возьмем  $k-1$  предыдущих векторов из цепочки (5). Вектора называются линейно независимыми, если не существует комбинации коэффициентов, из которых хотя бы 1 не равен нулю, при условии, что выполняется:

$$x_1b_1 + \dots + x_kb_k = 0. \quad (6)$$

На практике данная операция выполняется с использованием известного алгоритма решения системы линейных алгебраических уравнений – метода Гаусса. Метод Гаусса широко применяется для решения подобного рода систем. Он не требует больших вычислительных ресурсов и оптимален по скорости, за исключением случаев, где размерность матрицы слишком велика. Чаще всего применяют модификацию алгоритма Гаусса, предложенную немецким ученым Штрассеном [21]. При реализации его алгоритма время, необходимое для перемножения двух матриц, не превышает  $O(n^3)$ .

Выполнив все вычисления для всех имеющихся векторов, получим матрицу вида:

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

В получившейся матрице количество единиц равно  $n$ . Кроме того, если в столбце есть 0, то в этом столбце все оставшиеся элементы также равны 0. Далее, получаем столбцы, у которых под элементами, равными 1, находятся элементы, равные 0. Обозначим высоту столбцов, состоящих из 1, через  $p_i$ . Эти значения и будут являться индексами Кронекера.

Для получения эквивалентной по входу- выходу канонической модели необходимо выполнить преобразование вида:

$$x^*(k) = Xx(k), \quad (8)$$

где  $X$  – матрица перехода;  $x(k) \in R^n$  – вектор состояния.

Обычно в качестве матрицы перехода используется матрица размерности  $(n \times n)$ . При этом для такой матрицы должно выполняться условие: определитель матрицы не должен быть равен 0 [6]. При таком преобразовании говорят, что вектор будет представлен в новом базисе, а вид уравнений системы при этом не изменится.

В самом простом случае таковой матрицей является единичная матрица, которую можно легко создать программными средствами, и ее определитель будет равен 1. Таким образом, этот факт удовлетворяет условию неравенства нулю определителя и такую матрицу можно использовать для преобразования в эквивалентную по входу выходу каноническую форму.

### Методическая часть

На основе предложенных моделей, сформулированных теоретических положений, получим алгоритм для дискретизации стационарных и нестационарных моделей. Данный алгоритм описан в работе [4]. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 1.



Рис. 1. Блок-схема алгоритма дискретизации стационарных и нестационарных моделей

На практике выполнения вычислений внутри каждого из этапов являются независимыми, следовательно, могут выполняться параллельно, тем самым, ускоряя вычисления и уменьшая временные задержки. Блок-схема остается одинаковой и для стационарной и для нестационарной модели. Изменяются лишь формулы вычисления для каждого из этапов.

Все вычисления удобнее всего проводить в матричном виде, что позволяет потенциально еще больше распараллелить вычисления для каждой матрицы. Это становится особо актуально при размерности матриц более чем 1000x1000 элементов.

### Экспериментальная часть

Для подтверждения теоретических и методических аспектов работы была проведена серия экспериментов с описанным алгоритмом дискретизации стационарных и нестационарных моделей. В частности, полученные результаты были использованы при решении задачи управления скоростью подачи сырьевых компонент, участвующих в химической реакции.

Пусть имеется некоторый процесс смешивания двух химических компонент (начального сырья) [7]. Целевой продукт (G – goal) получается в результате некоторой переработки этого сырья. При этом для обеспечения максимального использования сырья (минимизации сырьевых отходов) используется контур рециркуляции, в котором не переработанное до нужной кондиции сырье снова поступает на вход системы.

В данном случае не важно то, какие процессы происходят с сырьем внутри химического реактора. Задача сводится лишь к определению скорости подачи сырья из двух труб в химический реактор. Наличие контура рециркуляции заметно усложняет задачу. В процессе анализа учитывается время запаздывания, которое обуславливается обратным контуром.

Динамика процессов, происходящих в химическом реакторе, описывается нелинейной системой управления. Решить задачу управления для нелинейных систем достаточно трудно. Первым шагом в исследовании таких систем является процесс линеаризации, т. е. переход от нелинейной к линейной системе, которая приближенно описывает все процессы, протекающие в системе. Такой переход может не существовать. Тогда необходимо либо решать задачу с нелинейной системой, либо менять уравнения в системе [8].

Для представленной задачи линеаризованная система имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1(t) = -4.93x_1(t) + 1.92x_1(t-1) - 1.01x_2(t) + \\ \quad + \frac{\delta u_{10}(t)}{6V_R} \\ \dot{x}_2(t) = -3.2x_1(t) + 1.92x_2(t-1) - 5.3x_2(t) - 12.8x_c(t) + \\ \quad + \frac{\delta u_{20}(t)}{6V_R} \\ \dot{x}_c(t) = 6.4x_1(t) + 1.87x_c(t-1) + 0.347x_2(t) - 32.5x_c(t) \\ \quad - 1.04x_g(t) \\ \dot{x}_p(t) = 0.833x_2(t) + 11x_c(t) - 3.96x_g(t) + 0.724x_g(t-1). \end{array} \right. \quad (9)$$

Система (9) является тестовой системой с набором параметров, где  $x_1$  и  $x_2$  определяют отклонение веса каждого из компонентов на входе реактора, полуфабриката на входе контура рециркуляции ( $x_c$ ) и целевого продукта  $x_g$ . Отклонение значений будем считать от стартовых или номинальных (для входных продуктов) значений. Общий вес компонент, который способен вместить в себя химический реактор, обозначен  $V_R$ .

Значения, стоящие перед переменными отклонения весов сырьевых продуктов, представляют собой матрицу А. Значения, стоящие перед переменными, отвечающими за отклонение весов на предыдущем шаге, обозначаются - А1. Значения скоростей поступления сырья составляют в совокупности матрицу В. В результате получаем систему уравнений в матричном виде со следующими матрицами:

$$\left\{ \begin{array}{l} A_0 = \begin{pmatrix} -4.93 & -1.01 & 0 & 0 \\ -3.20 & -5.30 & -12.8 & 0 \\ 6.40 & 0.347 & -32.5 & -1.04 \\ 0 & 0.833 & 11.0 & -3.96 \end{pmatrix}, \\ A_1 = \begin{pmatrix} 1.92 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.92 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.87 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.724 \end{pmatrix}, \\ B = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}. \end{array} \right. \quad (10)$$

Для анализа системы управления подачей сырья в химический реактор воспользуемся разработанным в данной работе модулем. После окончания анализа проверим полученные итоговые данные с теми данными, которые приведены в источниках [1, 9, 10, 11].

Из входных параметров определяется, является ли система стационарной или нет, и в зависимости от этого выбирается нужный алгоритм дискретизации.

По окончании дискретизации выходные данные представляются в виде матричных уравнений. В дальнейшем по этим данным производится анализ управляемости и наблюдаемости системы.

Выполнив дискретизацию системы управления подачей сырья в химический реактор, получим дискретное уравнение системы:

$$x(k+1) = A_0x(k) + A_1x(k-1) + A_4x(k-4) + A_5x(k-5) + B_0u(k) + B_3x(k-3) + W. \quad (11)$$

Сравнивая дискретное уравнение, полученное в результате анализа системы с использованием модуля, описанного в данной работе, с уравнением в источниках [1, 9, 10, 11], приходим к выводу, что вычисления выполнены верно и уравнения полностью совпадают.

Следующим элементом проверки правильности работы модуля является проверка полученных дискретных матриц. Все дискретные матрицы оказались верными в пределах погрешности вычислений.

### Выводы

Целью синтеза любой системы управления является построение математической модели, которая удовлетворяет следующим основным требованиям: устойчивости, корректности описания реальной системы, инвариантности к возмущениям.

Выполненный эксперимент доказывает правильность теоретических и методических аспектов, описанных в данной статье. Все тесты пройдены успешно и показали хорошие результаты, с точки зрения скорости выполнения вычисления.

Основными достоинствами сплайн-интерполяции являются её устойчивость и малая трудоемкость. Решаемые системы линейных уравнений для построения сплайнов, позволяют получать коэффициенты полиномов с высокой точностью. Кроме того, алгоритмы расчета параметров интерполяционных сплайнов легко программируются.

### Библиографический список

1. **Никулин, Е.А.** Дискретизация систем с запаздываниями методом сплайн-интерполяции: учеб. пособие / Е.А. Никулин; ГПИ им. А.А. Жданова. – Горький, 1984. – 19 с.
2. **Воронов, А. А.** Основы теории автоматического управления: Автоматическое регулирование непрерывных линейных систем / А. А. Воронов. – 2-е изд., перераб. – М.: Изд-во Энергия, 1980. – 303 с.

3. **Борзенко, М. И.** Адаптация, прогнозирование и выбор решений в алгоритмах управления технологическими объектами / М. И. Борзенко. – М.: Энергоатомиздат, 1984. –144 с.
4. **Кондратьев, В.В.** Оптимальное дискретное управление объектами с запаздываниями: учеб. пособие / В. В. Кондратьев; ГПИ. – Горький, 1984 . – 71 с.
5. **Аграчев, Ю. Л.** Геометрическая теория управления / Ю.Л. Аграчев, А. А. Сачков. – М.: Физматлит, 2012. – 144 с.
6. **Бесекерский, В. А.** Теория систем автоматического регулирования / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – 3-е изд., исправл. – М.: Изд-во Наука, 1975. – 768 с.
7. **Козлов, В. Н.** Управление энергетическими системами / В. Н. Козлов, В. Е. Куприянов, В. Н. Шашин. – СПб: Изд-во политехнического ун-та, 2008. – 258 с.
8. **Мироновский, Л. А.** Моделирование линейных систем: учеб. пособие / Л.А. Мироновский. – СПб.: ГУАП, 2009. – 54 с.
9. **Громов, Ю.Ю.** Системы автоматического управления с запаздыванием: учеб. пособие / Ю.Ю. Громов, Н.А. Земской, А.В. Лагутин. – Тамбов: Издательство ТГТУ, 2007. – 409 с.
10. **Заболотнов, Ю. М.** Оптимальное управление непрерывными динамическими системами: учеб. пособие / Ю.М. Заболотнов. – Самара: Самар. гос. аэрокосмический ун-т, 2005. – 129 с.
11. **Никулин, Е.А.** Синтез цифровых моделей объектов управления с произвольными запаздываниями // Автоматические системы оптимального управления технологическими процессами: сб. научн. тр.; Тула. – 1985. – С. 26–34.
12. **Кондратьев, В.В.** Элементы теории дискретных систем с запаздыванием: учеб. пособие / В. В. Кондратьев; ГПИ им. А.А.Жданова. – Горький, 1982. – 79 с.

*Дата поступления  
в редакцию 31.01.2018*

**A.S. Zakharov**

## **STATIONARY AND NONSTATIONARY SYSTEMS DISCRETIZATION ALGORITHM WITH DELAYS ON SPLINE INTERPOLATION BASIS**

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

**Purpose:** The goal of synthesis of any control system is the construction of a mathematical model that satisfies the following basic requirements: stability, correctness of the description of the real system, invariance etc.

**Design/methodology/approach:** Stationary and nonstationary systems discretization algorithm

**Findings:** A method of spline interpolation of stationary and nonstationary systems developed. The method based on spline interpolation.

**Research limitations/implications:** The solution can be applied to control the feed rate of the raw materials in the chemical reactor

*Key words:* discretization, stationary and non-stationary systems, spline interpolation.

УДК 004.023

Д.В. Жевнерчук, А.С. Захаров

**СЕМАНТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРОВ ПРОГРАММНОГО КОДА  
РАСПРЕДЕЛЕННЫХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Разработка автоматизированных распределенных систем стратегического, корпоративного уровня, создание на их основе прикладных сервисов является сложным стохастическим процессом, требующим, в том числе, написания повторяющегося программного кода, а также типовых программных конструкций, реализующих шаблоны программирования, характерные для той или иной задачи.

Современные средства разработки зачастую накладывают дополнительные идеологические, синтаксические, структурные ограничения. Кроме того, в ходе разработки необходимо выполнять сопряжение программного кода, написанного на разных языках программирования и разметки.

В работе предлагается компонентное представление генератора многомодульного, многоязыкового программного кода, его семантическая модель и методика применения при разработке программного обеспечения широкого класса.

*Ключевые слова:* семантическое моделирование, интерфейс, генерация кода, конфигурирование.

**Введение**

Одним из свойств теории вычислимости (теории рекурсивных функций) является полнота по Тьюрингу. Это свойство заключается в том, что для каждой вычислимой функции существует такой элемент, который может эту функцию вычислить [1]. Иными словами, приводя это определение в области генерации программного кода, получаем следующий факт: если программа может быть написана, то существует такой элемент, который способен ее написать. Далее такой элемент будем называть генератором программного кода (ГПК).

В настоящее время все более актуальной задачей становится создание программного продукта, позволяющего автоматизировать труд разработчика прикладного программного обеспечения. Под понятием разработчик в данной статье подразумевается участник команды, который принимает участие в создании программного продукта на любом этапе. При проектировании разработчики стараются сделать структуру приложения максимально простой и стандартизированной - для облегчения программирования и сопровождения. Поэтому, при старте нового проекта, разработчику зачастую приходится выполнять однотипные действия по созданию базового шаблона той или иной конструкции. При правильных входных данных и корректной разработке генератора, большая часть кода может быть сгенерирована автоматически. Разработчику же останется внести небольшие правки в итоговый код программы.

Генераторы кода лучше всего применимы в тех проблемных областях, в которых выполняются небольшие по объему и одинаковые по сути операции [2]. Потенциально генераторы могут применяться в любых областях (задачах), где можно автоматизировать процесс работы с данными. Наиболее близкими к этому описанию являются задачи генерации кода проекта, взаимодействующего с базой данных, имеющего сходные классы и структуры для объектов, приложения для тестирования программного кода или написания документации по существующей программе.

**Аналитическая часть**

Для того чтобы сократить время для разработки стартовой (начальной) части проекта, используются автоматизированные системы (АС) генерации программного кода. Генерация кода с помощью метода, описываемого в данной статье, осуществляется в несколько этапов:

шаблонизации, конфигурирования, рендеринга. Для понимания этапов введем следующие определения.

*Определение 1. Шаблон* – это структурированный текст, определяющий блок программного кода, в котором выделены неизменяемые конструкции, характерные для используемого языка программирования, а также поля, которые могут быть заменены типами и именами используемых переменных, областями видимости, начальными значениями и т.д.

Под *шаблонизацией* будем понимать процесс формирования системы связанных друг с другом шаблонов.

*Определение 2. Конфигурирование* – это процесс формирования пар, первым элементом которых является шаблон, а вторым – вектор данных, называемый также *конфигурацией*, используемый для замены полей шаблона.

*Определение 3. Рендеринг* – это процесс замены полей шаблона полями конфигурации с последующим формированием готового блока программного кода.

Общая схема генерации программного кода включает в себя два этапа. *На первом этапе* происходит шаблонизация и конфигурирование. На вход шаблонизатора передаются конструкции языка и изменяемые поля, на выходе же получается шаблон. Для процесса конфигурирования входными параметрами являются модели предметной области, на выходе получается итоговая конфигурация. Модели предметной области формализуют структурные и функциональные аспекты автоматизируемой предметной области и являются источником используемых в автоматизируемой системе имен, типов, ограничений. *На втором этапе* из полученных шаблона и конфигурации происходит рендеринг итогового программного кода.

В ходе разработки автоматизированной системы, кроме ГПК, применяются еще генераторы, которые создают базовый прототип программной системы, включающий требуемую структуру папок, конфигурационные файлы, модули с описанной интерфейсной частью, различные дополнения и их настройки (модули с готовым функционалом, ресурсы, плагины). В зависимости от технологий, языков программирования и платформ существуют различные инструменты, решающие эту задачу [3].

Для создания автоматизированных систем, ориентированных на известный круг задач, применяют каркасный подход, предполагающий построение исходного прототипа на базе программной платформы (фреймворка), состоящего, как правило, из постоянной части, называемой ядром, и сменных модулей или точек расширения.

Наиболее известным инструментом для быстрого создания стартового проекта является скаффолдер Yeoman. *Скаффолдинг* – это метод метапрограммирования, при котором проект генерируется на базе анализа требований разработчика [4]. Основная функция метапрограммирования – это использование программ для создания других программ. Yeoman базируется на трех основных компонентах: менеджер зависимостей пакетов, необходимый для загрузки, обновления и удаления дополнительных пакетов (bower); инструмент для сборки javascript проектов с использованием заранее написанных задач (grunt); базовое приложение, отвечающее за генерацию базы для нового приложения (yo).

Настройка всего проекта выполняется одной командой, которая запускает один из более 5500 генераторов кода, описанных на сайте [4]. Например, для проекта angular необходимо выполнить команду: "yoangular", после чего генератор задает вопросы относительно компонент и генерируется проект (с правильной структурой файлов и директорий), который сразу же можно запустить на 9000 порту и открывает стартовую страницу приложения командой: gruntserver.

Для разработчиков на платформе dotNet компания Microsoft разработала генератор кода Text Template Transformation Toolkit или T4 [5] на базе шаблонов. Для использования данного генератора необходимо написать файл-шаблон в формате \*.tt. Существует большое количество готовых шаблонов для генерации стартового проекта под необходимые требования, однако из-за отсутствия единого репозитория поиск этих шаблонов крайне затруднен. Кроме того, T4 используется исключительно для генерации только C# кода.



В стеке Java-технологий для генерации рутинного повторяющегося программного кода для решения таких типовых задач, как создание кода для конструкторов классов с большим количеством полей, создание и редактирования JavaDocs, геттеров/сеттеров, управление кодом коллекций и сборщиков композиционных объектов, управление кодом для тестирования также применяются многочисленные генераторы. Одни встраиваются в интегрированные среды разработки, другие являются самостоятельными системами, поставляемыми в виде, например, jar файлов: FreeBuilder, Proto. Интеграция внешних генераторов зачастую требует написания своего специфического рутинного кода, исчисляемого десятками строк.

Для того чтобы развернуть приложение на Java (Spring), необходимо подключить большое количество различных классов – bean. Кроме того, в зависимости от способа сборки проекта, необходимо найти дополнительные библиотеки и так же их подключить к существующему проекту. Для генерации стартового проекта можно воспользоваться платформой Grails [6], с помощью которой можно сгенерировать готовый проект используя только одну команду: "grailscreate-appname".

В мире Web-разработки известны надстройки, называемые "синтаксический сахар", которые способствуют сокращению количества строк исходного кода за счет его генерации. К ним можно отнести SugarJS, CoffeeScript [7]. Подобные надстройки транслируют код, написанный на новых языках программирования, в код, написанный на языке Java-script. Самостоятельные шаблонизаторы, такие как Underscore templates, HandleBars, позволяют хранить параметрически настраиваемые шаблоны html страниц и их фрагментов на сервере, и по мере необходимости генерировать html код и пересылать его клиенту.

Итак, можно сделать выводы о том, что современные подходы и средства генерации кода не эффективны при разработке современных распределенных автоматизированных систем (АС), решающих задачи корпоративного, стратегического уровня, поскольку:

- трудно адаптируются для создания программного кода двух и более интероперабельных модулей, написанных с использованием множества языков программирования и форматов представления данных,
- в большинстве случаев ориентированы на выполнение низкоуровневой генерации по известным шаблонам, требуют изучения уникальных архитектур, объектных моделей, нотаций и пр. для использования и модификации генератора под новые задачи,
- как правило, не могут быть применены для генерации кода при алгоритмических и языковых ограничениях, включая сопряжение с существующим кодом,
- в общем случае внесение изменений в системы генерации кода невозможна без перекомпиляции системы.

### Постановка задачи

Была поставлена задача, которая заключается в разработке компонентного представления генератора гибридного (многомодульного, многоязыкового) программного кода, а также его семантической модели. Каждый компонент генератора должен обладать интерфейсами, посредством которых сопрягается: а) с другими компонентами-генераторами, б) с конфигураторами, используемыми для рендеринга шаблонов кода. Кроме того, каждый генератор может быть использован как самостоятельно, так и в качестве звена многокомпонентных цепочек.

### Теоретическая часть

Согласно принципам построения открытых информационных систем, ГПК должен обладать свойствами расширяемости, масштабируемости, кроссплатформенности и интероперабельности [8] и представлять собой совокупность компонент с выделенными интерфейсами. Введем несколько определений.

*Определение 4. Компонент ГПК* – абстрактный структурный элемент генератора программного кода, обладающий точками входа/выхода и связанными с ними элементар-

ными свойствами, к которым относятся изменяемые поля, определяющие интерфейсы ввода конфигурации и вывода программного кода как результата рендеринга.

Введем два типа компонентов ГПК.

**Определение 5. Рендер программного кода (РПК)** – структурный элемент генератора программного кода, способный принимать конфигурацию и на основе шаблона возвращать программный код.

**Определение 6. Конфигуратор программного кода (КфПК)** – структурный элемент генератора программного кода, способный принимать от клиентских систем конфигурацию и передавать ее РПК.

На рис. 1 представлена концептуальная схема компонентной организации ГПК распределенных автоматизированных систем.

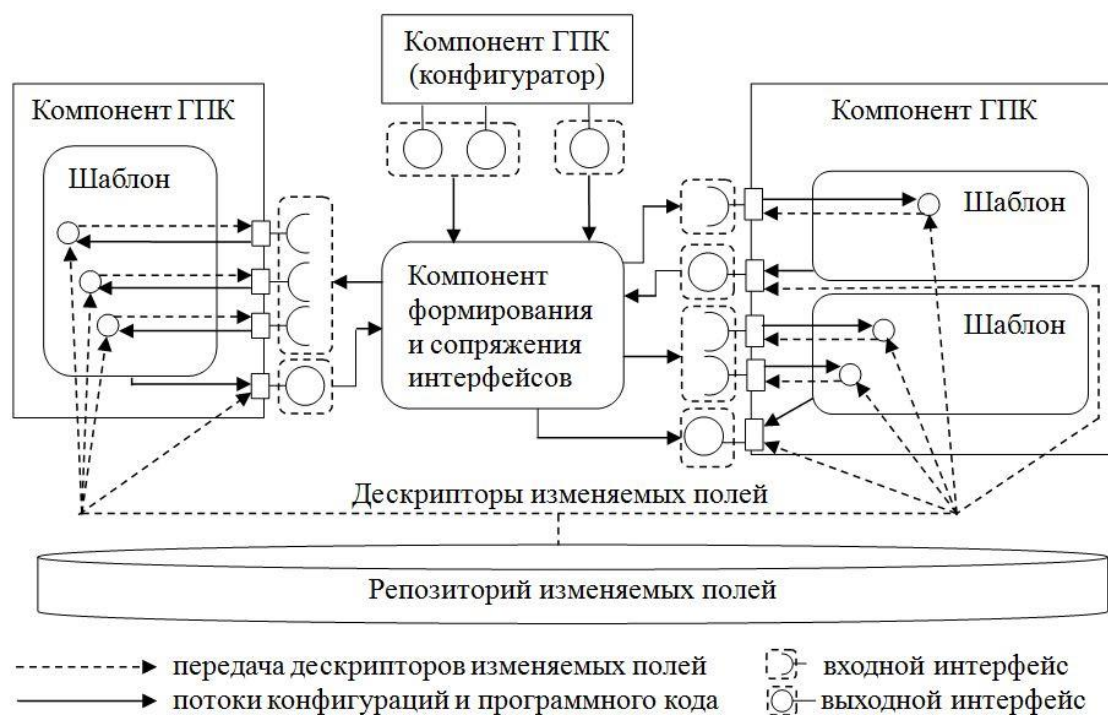


Рис. 1. Концептуальная схема ГПК АС

РПК и КфПК содержат в качестве своих элементов шаблоны. Шаблоны РПК включают неизменяемые программные конструкции и уникальные дескрипторы изменяемых полей, посредством которых возможна их идентификация. Шаблоны КфПК включают только перечень дескрипторов изменяемых полей, для которых клиентская система должна подготовить конфигурацию.

Кроме дескрипторов изменяемых полей, шаблон может обладать и другими элементарными свойствами, что позволяет строить интерфейсы, посредством которых компонент ГПК может быть сопряжен: с моделями логического и даталогического уровня, такими как алгоритмы, модели состояний, ER-модели, модели классов и др., классификаторами и блоками, определяющими семантические, технические, лицензионные и иные ограничения, блоками мониторинга режимов использования АС.

Таким образом, методика синтеза открытых информационных систем позволяет представить генератор программного кода и его внешнее окружение в виде типовых компонент, обладающих унифицированными интерфейсами, синтезируемыми на основе элементарных свойств.

Пунктирными стрелками показаны потоки дескрипторов изменяемых полей, образующиеся при создании шаблонов, а также при синтезе интерфейсов с помощью компонента формирования и сопряжения интерфейсов.

Потоки конфигураций и результатов рендеринга шаблонов, обозначенные сплошными линиями, возникают в системе при решении задачи генерации программного кода.

Пусть компонент ГПК  $c_r$  содержит шаблон, на основе которого необходимо сформировать программный код, и он определяется свойствами  $T_{c_r} = (t_{c_{r1}}, t_{c_{r2}}, \dots, t_{c_{rn}})$ , а компоненты ГПК  $C = (c_1, c_2, \dots, c_j, \dots, c_s)$  являются потенциальными поставщиками конфигураций и определяются свойствами своих шаблонов  $T_{c_j} = (t_{c_{j1}}, t_{c_{j2}}, \dots, t_{c_{jn}})$ , для любого  $j$ . Рассмотрим особенности сопряжения  $c_r$  и  $c_j$ , где  $j=1..s$ .

Возможны три основных случая:

а)  $|T_{c_r}|=0$ , шаблон компонента  $c_r$  не содержит ни одного дескриптора изменяемого поля. Обладает выходным интерфейсом, связанным с дескриптором изменяемого поля, используемым шаблонами внешних компонент ГПК, через который передается во внешнюю среду неизменяемая строка с готовым программным кодом. Код шаблона  $c_r$  является готовым программным кодом;

б)  $|T_{c_r}|=1$ , шаблон компонента  $c_r$  содержит одно изменяемое поле, для его рендеринга достаточно одного компонента ГПК  $c_o \in C$ , причем должны выполняться следующие условия:

1)  $\exists q \in T_{c_r} p \in T_{c_o} : Id_q = Id_p$  (для компонент  $c_r$  и  $c_o$  существуют элементарные свойства, определяющие изменяемые поля с одинаковыми дескрипторами);

2)  $q$  является дескриптором изменяемого поля  $c_r$ , т.е. определено на множестве точек входа блока  $c_r$ , а  $p$  является дескриптором результата рендеринга, т.е. определено на множестве точек выхода  $c_o$  соответственно;

в)  $|T_{c_r}| > 1$ , шаблон компонента  $c_r$  содержит более одного дескриптора изменяемого поля, для его рендеринга необходимо несколько компонент ГПК  $C_o \subseteq C_j$ , причем должны выполняться следующие условия:

1)  $\forall q \in T_{c_r} \exists p \in T_{C_o} : Id_q = Id_p$  (для любого изменяемого поля шаблона компонента  $c_r$  существует элементарное свойство компонента из множества  $C_o$ , определяющее изменяемое поле с таким же дескриптором);

2) все элементарные свойства  $q$  являются дескрипторами изменяемых полей  $c_r$ , т.е. они определены на множестве точек входа блока  $c_r$ , а все  $p$  являются дескриптором результата рендеринга, т.е. определены на множестве точек выхода компонент из множества  $C_o$  соответственно.

На основании концептуальной схемы предложен набор концептов и ролей, с помощью которого может быть построена семантическая модель ГПК распределенных автоматизированных систем.

### Методическая часть

Согласно предложенной концептуальной схеме генерации программного кода, была построена семантическая модель ГПК, фрагмент которой представлен на рис. 2, определяющая пространство имен концептов и ролей. Модель содержит базовые концепты, формализующие рендер и конфигурацию программного кода, как подклассы компонента ГПК, с которыми связаны точки входа/выхода потоков данных.

С каждой точкой может быть связано некоторое множество элементарных свойств, определяющих изменяемые поля и характеризующиеся дескриптором, базовым типом и ограничениями. Следует отметить, что дескриптор и базовый тип не связаны с другими концептами и поэтому могут быть реализованы простыми атрибутами, а ограничение реализуется классом, имеющим подклассы, с помощью которых можно указать допустимые, запрещенные списки и диапазоны значений.

Кроме того, рендер и конфигурация содержат шаблоны, реализуемые простыми атрибутами и представляющими собой строки, содержащие код программных конструкций и параметры-подстановки, имеющие значения дескрипторов соответствующих изменяемых полей. Изменяемые поля могут быть сгруппированы с помощью концепта, задающего интерфейс.





ции программного кода, независимые от используемого комплекса языковых средств и технологий шаблонизации.

### Библиографический список

1. **Евгеньев, Г. Б.** Интеллектуальные системы проектирования: учеб. пособие / Г. Б. Евгеньев. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 334 с.
2. **Кустов, М.Н.** Повышение эффективности алгоритмов генерации программного кода по методологии SADT. Информационные интеллектуальные системы // Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке: материалы XVI международного молодежного форума. – Харьков: ХНУРЭ, 2012. – Т. 6. – С. 228–229.
3. **Клыков, Ю. И.** Ситуационное управление большими системами / Ю. И. Клыков. – М.: Энергия, 1974. – 134 с.
4. The Web's scaffolding for modern webapps [Электронный ресурс] // 2017. – Режим доступа: <http://yeoman.io/> (дата обращения 31.07.2017)
5. **Ross, D.** Structured Analysis (SA): A Language for Communicating Ideas, IEEE Transactions on Software Engineering // IEEE Transactions on Software Engineering. – 1977. – V. SE-3. – № 1. – P. 16–34.
6. **Basu, A.** Metagraphs and Their Applications / A. Basu, R. Blanning// Springer Computer Society Press. – 2007. – 174 p.
7. **Kelly, S.** Domain-Specific Modeling: enabling full code generation / S. Kelly, J. P. Tolvanen // Hoboken. – New Jersey, USA: Wiley-IEEE Computer Society Press. – 2008. – 444 p.
8. **Фаулер, М.** Шаблоны корпоративных приложений / М. Фаулер, Д. Райс. – М.: Вильямс, 2016. – 544 с.

*Дата поступления  
в редакцию 15.01.2018*

**D.V. Zhevnerchuk, A.S. Zakharov**

## SEMANTIC MODELING OF THE PROGRAM CODE GENERATORS FOR DISTRIBUTED AUTOMATED SYSTEMS

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

**Purpose:** Development of a component representation of a multimodule code generator. The article presents a semantic model and a technique for application in the development of software.

**Design/methodology/approach:** Based on synthesis of open information systems a generator needs to comply with the following requirements: extensibility, scalability, cross-platform and interoperability. A fragment of concept scheme of distributed automated systems generator is presented.

**Findings:** In the course of the work, the methodology of the open information systems synthesis was adapted to a program code generator, which allowed us to create scalable, interoperable and cross-platform generators.

*Key words:* semantic modeling, interface, code generation, configuration.

УДК: 519.854.2

Д.И. Коган<sup>1</sup>, Ю.С. Федосенко<sup>2</sup>, Д.А. Хандурин<sup>1</sup>**ПОСТАНОВКА, АЛГОРИТМЫ СИНТЕЗА РЕШЕНИЙ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СЛОЖНОСТЬ МИНИМАКСНЫХ ЗАДАЧ О БИНАЗНАЧЕНИЯХ**Московский технологический университет<sup>1</sup>, г. Москва;  
Волжский государственный университет водного транспорта<sup>2</sup>, г. Нижний Новгород

В дискретной идеализации формулируется математическая модель распределения между исполнителями формируемых пар не взаимозаменяемых работ. Модель описывает, в частности, состояние воднотранспортной логистической системы на момент принятия решений при оперативном планировании использования группы неоднотипных речных грузовых судов для перевозки в заданные пункты нерудных строительных материалов, добываемых плавучим гидромеханизированными комплексами.

В рамках сформулированной модели вводится понятие «биназначение» и ставится обобщающая классическую оптимизационная задача о биназначениях с минимаксным критерием. Доказывается труднорешаемость поставленной задачи и её практически значимых конкретизаций, учитывающих производительности исполнителей, трудоемкости работ и директивные сроки их завершения. Конструируется реализующий концепцию динамического программирования решающий алгоритм, характеризующийся экспоненциальной вычислительной сложностью. В качестве альтернативного описывается алгоритм построения субоптимальных и оптимальных биназначений по схеме ветвей и границ.

*Ключевые слова:* задача о назначениях, биназначение, динамическое программирование, схема ветвей и границ, вычислительная сложность.

1. Исследуется возникающая в различных приложениях специфическая проблема использования дискретных ресурсов – оптимизации распределения между исполнителями формируемых пар не взаимозаменяемых работ.

В качестве примера такого приложения укажем логистическую систему типа Камского грузового района [1], в которой выделенная группа неоднотипных грузовых судов (многосекционных судовых составов) [2] используется для перевозки в заданные пункты нерудных строительных материалов (НСМ) [3], загружаемых в едином технологическом цикле плавучими гидромеханизированными добывающими комплексами (ГДК) [4] на полигонах русловых месторождений.

По завершению сеанса разработки очередного оперативного плана функционирования логистической системы рассматриваемого типа диспетчерской службой должно быть однозначно определено: а) к какому ГДК из числа расположенных на полигоне русловых месторождений следует направить под погрузку НСМ каждое конкретное судно выделенной группы; б) какой пункт назначения для выгрузки следует назначить каждому конкретному судну после его загрузки НСМ.

Для формирования оперативных планов функционирования логистической системы, эффективных в условиях складывающейся эксплуатационной обстановки, актуальной является разработка и штатное использование специализированной цифровой системы поддержки управления, включающей в себя как процедуры математического моделирования воднотранспортной логистической системы, так и средства решения соответствующим образом поставленных экстремальных задач распределения судов между ГДК для погрузки НСМ и распределения судов по пунктам выгрузки НСМ.

Материал статьи сегментирован далее следующим образом.

В пункте 2 описывается математическая модель использования дискретных ресурсов рассматриваемого типа, вводится понятие «биназначение» и ставится общая задача о биназначениях с минимаксным критерием, обобщающая стандартную задачу о назначениях [5-9] с минимаксным критерием [10-12].

Пункт 3 посвящен конструированию и краткому обсуждению технологии реализации алгоритма дискретного динамического программирования [13, 14], решающего поставленную в пункте 2 общую задачу о биназначениях; здесь же приводится оценка вычислительной сложности [15] алгоритма.

В пункте 4 вводится несколько конкретизаций введенной общей задачи о биназначениях, в том числе с учетом трудоемкостей работ и производительностей исполнителей; устанавливается, что все эти задачи труднорешаемы [15], алгоритмы полиномиальной вычислительной сложности для них построить нельзя.

Пункт 5 посвящен описанию алгоритма построения субоптимальных и оптимальных биназначений в процессе итерационного синтеза решения задачи о биназначениях по схеме ветвей и границ [16, 17]. Пункт 6 – заключение по работе.

2. Общая задача о биназначениях формулируется следующим образом. Имеются множество исполнителей  $I = \{1, 2, \dots, n\}$  и два множества работ  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$  и  $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$ . Каждый исполнитель должен быть назначен на одну из работ множества  $P$  и на одну из работ множества  $Q$ . Каждая из работ должна быть выполнена в полном объеме ровно одним исполнителем. Полагаются заданными  $(n \times n)$ -матрицы численных оценок  $A = \{a_{ij}\}$  и  $B = \{b_{ij}\}$ , где  $a_{ij}$  – оценка выполнения исполнителем  $i$  работы  $p_j$ , а  $b_{ij}$  – оценка выполнения тем же исполнителем работы  $q_j$ ,  $i = \overline{1, n}, j = \overline{1, n}$ .

Введем следующие обозначения:

$\pi_1$  – назначение исполнителей на работы из множества  $P$ ,

$\pi_2$  – назначение исполнителей на работы из множества  $Q$ .

Каждое назначение представляет собой взаимно однозначное отображение множества  $\{1, 2, \dots, n\}$  в себя. Если  $\pi_1(i) = j$ , то исполнителя  $i$  следует назначать на работу  $p_j$ . Аналогично равенство  $\pi_2(i) = j$  означает, что исполнитель  $i$  должен также выполнить работу  $q_j$ .

Биназначениями именуем пары вида  $\langle \pi_1(i), \pi_2(i) \rangle$ . Считается, что при реализации биназначения  $\langle \pi_1(i), \pi_2(i) \rangle$  каждый исполнитель  $i$ , начиная от момента времени 0, выполняет сначала работу с номером  $\pi_1(i)$ , после чего немедленно приступает к выполнению работы с номером  $\pi_2(i)$ .

В общем виде изучаемая общая задача о биназначениях с минимаксным критерием – задача 1 записывается следующим образом:

$$\min_{\pi_1, \pi_2} (\max_{\alpha} [a_{\alpha\pi_1(\alpha)} + b_{\alpha\pi_2(\alpha)}]). \quad (1)$$

Если матрицами  $A$  и  $B$  установлены длительности выполнения работ исполнителями, то, решая (1), мы отыскиваем биназначение, обеспечивающее минимальность общей продолжительности выполнения всего комплекса работ  $\{p_1, p_2, \dots, p_n, q_1, q_2, \dots, q_n\}$ .

Как легко заметить, (1) представляет собой обобщение классической минимаксной задачи о назначениях.

3. Для конструирования решающего (1) алгоритма воспользуемся концепцией динамического программирования.

Пусть  $i$  – не превышающая  $n$  натуральная константа, а  $W_1, W_2$  – произвольные  $i$ -элементные подмножества из  $\{1, 2, \dots, n\}$ .

Через  $Z(i, W_1, W_2)$  обозначим подзадачу задачи 1, в которой между исполнителями множества  $\{1, 2, \dots, i\}$  следует распределить работы с нижними индексами (номерами) из подмножеств  $W_1$  и  $W_2$ ; при этом каждый исполнитель должен получить ровно одну работу множества  $P$  (с номером, входящим в подмножество  $W_1$ ) и ровно одну работу множества  $Q$  (с номером, входящим в подмножество  $W_2$ ). Определяемый подмножествами  $W_1, W_2$  комплекс работ следует выполнить за минимальное время.

Оптимальное значение критерия в задаче  $Z(i, W_1, W_2)$  обозначим  $B(i, W_1, W_2)$ . Как очевидно,  $B(i, W_1, W_2)$  – функция Беллмана для (1), причем

$$B(1, \{j\}, \{k\}) = a_{1j} + b_{1k}; \quad j, k \in \{1, 2, \dots, n\}. \quad (2)$$



Согласно принципу Беллмана, имеем соотношение:

$$B(i, W_1, W_2) = \min_{\alpha, \beta} (\max [ (a_{i\alpha} + b_{i\beta}), B(i-1, \{W_1 \setminus \alpha\}, W_2 \setminus \beta) ] ), \quad (3)$$

где  $(\alpha, \beta)$  – произвольные пары индексов из множества  $W_1 \times W_2$ .

Формулы (2), (3) суть рекуррентные соотношения динамического программирования для решения задачи (1).

Выполнение реализующего по этим соотношениям вычислительного алгоритма начинается с определения величин  $B(1, \{j\}, \{k\})$  для всех одноэлементных множеств  $W_1$  и  $W_2$ .

Далее последовательно в порядке возрастания параметра  $i$  ( $i = 2, 3, \dots, n$ ) для всех возможных наборов  $W_1$  и  $W_2$  по формуле (3) определяются значения функции  $B(i, W_1, W_2)$ ; при этом значение  $B(n, \{1, 2, \dots, n\}, \{1, 2, \dots, n\})$  функции Беллмана при крайнем наборе значений аргументов представляет собой оптимальное значения критерия в задаче 1.

В процессе выполнения описанной вычислительной процедуры для каждой тройки  $(i, W_1, W_2)$  значений аргументов следует фиксировать пару  $(\alpha, \beta)$ , на которой реализуется минимум правой части соотношения (3). Это позволит после отыскания оптимального в задаче 1 значения критерия записать соответствующее ему биназначение.

Сложность сконструированного алгоритма решения (1) определяется числом вычисляемых значений функции Беллмана и, как очевидно, определяется величиной  $O(4^n)$ .

4. Введем в рассмотрение естественную для приложений конкретизацию (1) – задачу 2, в которой каждая из имеющихся  $2n$  работ характеризуется своей трудоемкостью: работа  $p_j$  имеет трудоемкость  $t(p_j)$ , работа  $q_j$  имеет трудоемкость  $t(q_j)$ . Считаем также, что каждый исполнитель  $i$  характеризуется своей производительностью  $w_i$ , а элементы матриц  $A$  и  $B$  вычисляются по соотношениям

$$a_{ij} = t(p_j) / w_i, \quad b_{ij} = \{t(q_j) / w_i\}, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, n}.$$

По условиям задачи 1 и задачи 2 выделим соответствующие задачи распознавания – задачу 3 и задачу 4 соответственно.

В задаче 3 при исходных данных задачи 1 и дополнительно указанной константе  $T$  спрашивается: существует ли биназначение, при реализации которого вся совокупность имеющихся работ может быть выполнена не позднее наступления момента времени  $T$  (директивного срока завершения предписанного комплекса работ).

В задаче 4 идентичный вопрос ставится при исходных данных задачи 2 и дополнительно указанной константе  $T$ .

Очевидно, что вычислительная сложность задачи 1 не ниже вычислительной сложности задач 2 и 3, а вычислительная сложность как задачи, так и задачи 3 не ниже вычислительной сложности задачи 4.

Легко показывается, что задача 4 полиномиально эквивалентна  $NP$ -полной проблеме «Паросочетания с ограничениями по весу» [15, с. 284].

Таким образом устанавливается, что все изучаемые в статье задачи труднорешаемы и, согласно естественно-научной гипотезе « $P \neq NP$ » [15], алгоритмы полиномиальной вычислительной сложности для них построить нельзя.

5. С учетом прикладной значимости рассматриваемой проблематики распределения дискретных ресурсов целесообразным является конструирование для общей задачи о биназначениях итерационного решающего алгоритма, реализующего концепцию метода ветвей и границ (ВиГ) [16, 17].

Принципиальной особенностью такого подхода является возможность решить задачу «до конца» (если продолжительность решения оказывается входящей в рамки регламентных ограничений), либо удовлетвориться заключительным при достижении предела времени счета рекордным значением критерия оптимальности в противном случае (гарантированная величина погрешности при этом будет известна).

Для реализации схемы ВиГ следует определить три основные её составляющие:

а) способ вычисления верхних оценок значения критерия в получаемых вершинах

конструируемого фрагмента дерева вариантов (в задачах минимизации эта оценка обеспечивается допустимыми решениями);

б) способ вычисления нижних оценок значения критерия в получаемых вершинах конструируемого фрагмента дерева вариантов;

в) способ ветвления.

Для вычисления верхней оценки значения критерия оптимизации в корне дерева вариантов задачи 1 решается определяемая матрицей  $A$  классическая задача о назначениях с минимаксным критерием. Получаемое при этом назначение обозначаем  $\pi_1^*$ . Далее выполняется построение матрицы  $B^*$ , каждый элемент которой  $b_{ij}^*$  находится по формуле  $b_{ij}^* = b_{ij} + a_{i\pi^*(i)}$ . Назначение  $\pi_2^*$  получается аналогично синтезу  $\pi_1^*$  – в результате решения определяемой матрицей  $B^*$  классической задачи о назначениях с минимаксным критерием.

Итоговое биназначение  $\pi^{**} = \langle \pi_1^*(i), \pi_2^*(i) \rangle$  обеспечивает верхнюю оценку в корне дерева вариантов решаемой задачи.

Легко видеть, что в качестве нижней оценки в корне дерева вариантов можно взять величину  $\Theta$ , вычисляемую по соотношению

$$\Theta = \max_{\alpha} [\min_{\beta} a_{\alpha\beta} + \min_{\beta} b_{\alpha\beta}].$$

Изложенные способы получения верхней и нижней оценок значения оптимизируемого критерия в корне дерева вариантов очевидным образом индуцируют алгоритмы их отыскания в последующих промежуточных вершинах этого дерева.

При этом наименьшая из верхних оценок, получаемых в процессе описываемого построения достаточного для решения задачи фрагмента дерева вариантов, именуется текущим рекордом, и его значение в таком процессе уменьшается. Описанный алгоритм решения задачи завершает работу как только множество перспективных для дальнейшего ветвления открытых вершин [16, 17]) оказывается пустым.

Корень дерева вариантов считаем вершиной первого ранга; вершины  $k$ -го ранга порождают при ветвлении вершины ранга  $k+1$ .

Процедура ветвления в произвольной вершине  $k$ -го ранга заключается в построении из нее ветвей, каждая из которых соответствует закреплению за  $k$ -м исполнителем некоторой пары пока свободных работ из множества  $P \times Q$ ; при этом ветви дерева вариантов надо строить только для тех пар  $(p_{\alpha}, q_{\beta})$  свободных работ, для которых сумма  $a_{k\alpha} + b_{k\beta}$  меньше значения текущего рекорда. Вместе с тем, заметим, что число ветвей дерева вариантов, выходящих из произвольной вершины ранга  $k$ , может, вообще говоря, достигнуть значения  $(n - k) \times (n - k)$ .

Итоговая величина текущего рекорда – оптимальное значение критерия, и путь от корня к вершине дерева вариантов, в которой оно достигнуто, однозначно определяет решение задачи о биназначениях.

Дополнительно отметим, что наличие некоторого предварительно построенного даже небольшого начального фрагмента дерева вариантов может существенно сократить длительность решения задачи методом динамического программирования. В самом деле, пусть при построении такого фрагмента дерева вариантов итоговым (минимальным) значением текущего рекорда оказалось число  $U$ . Тогда на каждом этапе расчетов по формуле (3) достаточно рассматривать только такие пары индексов  $(\alpha, \beta)$  из  $W_1 \times W_2$ , для которых сумма  $a_{k\alpha} + b_{k\beta}$  не превосходит  $U$ .

Отметим, что процедуры получения верхних и нижних оценок при решении задачи 1 по схеме ВиГ могут различным образом модифицироваться. Приведем простейший пример такой модификации.

Назначение  $\pi$  назовем диагональным, если либо каждому исполнителю  $i$  предписывается работа того же индекса, либо каждому исполнителю  $i$  предписывается работа индекса  $n - i$ . В задаче о назначениях имеется два диагональных решения, а в задаче о биназначениях таких решений четыре. Наилучшее по введенному критерию из четырех диагональных решений обеспечивает возможную верхнюю оценку.

Новые по сравнению с введенными способы вычисления верхних и нижних оценок могут быть использованы при решении задачи 2.

6. Нами рассмотрена проблема распределения между исполнителями формируемых пар неважнозаменимых работ. В рамках построенной математической модели введено понятие «биназначения», сформулирована общая задача о биназначениях, обобщающая классическую задачу о назначениях с минимаксным критерием оптимизации. Доказана трудно-решаемость поставленной общей задачи и её практически значимых конкретизаций, учитывающих производительности исполнителей, трудоемкости работ, а также директивные сроки их завершения.

Для решения общей задачи о биназначениях сконструирован алгоритм на основе формализма динамического программирования, приведена оценка его вычислительной сложности и описана схема конструирования решения на основе концепции ветвей и границ; при этом предложены конструктивные способы вычисления верхних и нижних оценок значений минимаксного критерия как в корне, так и в промежуточных вершинах дерева вариантов при реализации соответствующей итерационной процедуры. Такой подход позволяет для практически значимых размерностей математической модели синтезировать эффективные (субоптимальные) решения задачи о биназначениях в приемлемом времени.

Полученные результаты нашли свое отражение в пилотном проекте цифровой системы поддержки оперативного планирования распределением группы грузовых судов по пунктам погрузки и последующей выгрузки НСМ.

В качестве развития темы обобщения классической задачи о назначениях представляется целесообразным (в частности, для логистических приложений) рассмотреть задачу о 2-назначениях, в которой каждому из  $n$  исполнителей предписывается пара работ из неразбитой на части  $2n$ -элементной совокупности.

Другое практически значимое направление обобщения классической задачи о назначениях открывает модель с  $m$ -элементной ( $m > 2$ ) совокупностью множеств работ  $P_k = \{p_{1, k}, p_{2, k}, \dots, p_{n, k}\}, k = \overline{1, m}$ .

Каждый исполнитель совокупности  $I$  должен быть назначен на одну из работ каждого из множеств  $P_1, P_2, \dots, P_m$ ; при этом каждая из работ должна получить для себя ровно одного исполнителя и полагаются заданными  $m$  квадратных  $n \times n$ -матриц  $A^k = \{a_{ij}^k\}$  численных оценок выполнения исполнителем  $i$  работы  $j, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, n}, k = \overline{1, m}$ .

Постановка оптимизационных задач в рамках такой обобщенной модели управления дискретными ресурсами, а, при необходимости, с учетом дополнительных ограничений позволит, в частности, реализовать цифровую систему поддержки планирования распределения скоростных пассажирских судов по маршрутам для выполнения региональных, пригородных и внутригородских перевозок.

Понятно, что сложность таких задач кратно возрастает и соответственно для их решения в приемлемом времени необходимы алгоритмы, реализующие, в том числе метаэвристические концепции и ориентированные на суперкомпьютерные технологии организации вычислительных процессов.

Статья подготовлена по результатам исследований, выполненных при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 15-07-03141.

#### Библиографический список

1. Концепция развития внутреннего водного транспорта в Республике Татарстан / URL: <http://pandia.ru/text/78/119/109171-2.php>
2. Справочник по серийным транспортным судам. Т. 4. – М.: Транспорт, 1975. – 179 с.
3. **Козырев, В.К.** Грузоведение / В.К. Козырев. – М.: Транспорт, 1991. – 288 с.
4. **Бессонов, Е.А.** Энциклопедия гидромеханизированных работ / Е.А. Бессонов. – М.: 1989.ру, 2005. – 520 с.

5. **Votaw, Jr. D. F.** The personnel assignment problem / Jr. D. F. Votaw, A. Orden // Scientific Computation of Optimum Programs. Project SCOOP. Washington. D.C., 1952. – № 10. – P. 155–163.
6. **Kuhn, H.W.** The Hungarian Method for the assignment problem // Naval Research Logistics Quarterly. – 1955. – № 2. – P. 83–97.
7. **Pentico, D.** Assignment problems: A golden anniversary survey // European Journal of Operational Research. – 2007. – № 176. – P. 774–793.
8. **Коган, Д.И.** Задачи о назначениях в приложении к проблемам доформирования грузовых составов / Д.И. Коган, Ю.С. Федосенко Д.А. Хандурин // 'Проблемы теоретической кибернетики': XVIII международная конференция, 19-23 июня 2017. – Пенза: МАКС Пресс, 2017. – С. 117–120.
9. **Fedosenko, Yu.S.** Non-standard types assignment problems: research and algorithms / Yu.S. Fedosenko, D.I. Kogan, D.K. Khandurin // 'Information Control and Technologies': VI International Scientific-Practical Conference, 20–22 September, 2017. – Odessa: ONMU, 2017. – P. 300–302.
10. **Гейл, Д.** Теория линейных экономических моделей / Д. Гейл. – М.: ИЛ, 1963. – 418 с.
11. **Коган, Д.И.** Динамическое программирование и дискретная многокритериальная оптимизация. / Д.И. Коган. – Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского университета, 2005. – 252 с.
12. **Коган, Д.И.** Постановки и алгоритмы решения задачи о назначениях в приложении к проблемам доформирования составов транспортных средств / Д.И. Коган, Ю.С. Федосенко, Д.А. Хандурин // Вестник ВГАВТ. – 2017. – №3. – С. 23–31.
13. **Беллман, Р.** Прикладные задачи динамического программирования / Р. Беллман, С. Дрейфус. – М.: Наука, 1965. – 457 с.
14. **Корнеев, В.П.** Методы оптимизации / В.П. Корнеев. – М.: Высш. шк., 2007. – 664 с.
15. **Гэри, Д.** Вычислительные машины и труднорешаемые задачи / Д. Гэри, Д. Джонсон. – М.: Мир, 1982. – 416 с.
16. **Корбут, А.А.** Дискретное программирование / А.А. Корбут, Ю.Ю. Финкельштейн. – М.: Наука, 1969. – 368 с.
17. **Сигал, И.Х.** Введение в прикладное дискретное программирование / И.Х. Сигал, А.П. Иванова. – М.: Наука, 2007. – 237 с.

*Дата поступления  
в редакцию 31.01.2018*

**D.I. Kogan<sup>1</sup>, Yu.S. Fedosenko<sup>2</sup>, D.A. Khandurin<sup>1</sup>**

## **FORMULATION, ALGORITHMS FOR SOLUTION SYNTHESIS AND COMPUTATIONAL COMPLEXITY OF MINIMAX BI-ASSIGNMENT PROBLEM**

Moscow technological university<sup>1</sup>;  
Volga state university of water transport<sup>2</sup>

**Purpose:** The problem of increasing the efficiency of assignment of the pairs of non-interchangeable tasks between actors is considered.

**Method:** A discrete mathematical model of assignment is formulated, the notion "bi-assignment" is introduced, an optimization problem is set for bi-assignment task with a minimax criterion, and its intractability is proved.

**Results:** The algorithm for solving the problem of bi-assignment task with a minimax criterion, realizing the concept of dynamic programming, characterized by exponential computational complexity, is constructed. Another algorithm for generating suboptimal and optimal bi-assignments according to branch and bound scheme is described.

**Application domain:** The general model developed and algorithms for synthesizing optimal assignments between the actors and formed pairs of non-interchangeable works forms the core of model-algorithmic foundation for computer-aided systems for support of operational planning of vehicle use in transport logistics systems.

*Key words:* assignment problem, bi-assignment, dynamic programming, branch and bound scheme, computational complexity.

УДК 004.032.26

Л.С. Ломакина, К.М. Носков

## НЕЙРОСЕТЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЙ БИОЦЕНОЗА НА ОСНОВЕ АПРИОРНЫХ СТАТИСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева

Рассматривается проблема классификации состояний биоценозов как многомерных объектов. Предлагается алгоритм построения классификатора многомерных объектов, в частности, классификации биоценозов, с применением нейронных сетей. Рассмотрена структура нейронной сети на радиально-базисных функциях. Описан алгоритм обучения нейронной сети.

*Ключевые слова:* классификация, классификатор, нейронная сеть, биоценоз, радиально-базисные функции.

### Введение

*Медико-биологический объект (биоценоз)* – это совокупность разных видов микроорганизмов, связанных между собой определенными отношениями и населяющими определенную биологическую нишу [1]. Частным случаем биоценоза является микрофлора желудочно-кишечного тракта (ЖКТ) человека. Путем сравнения состояния микрофлоры ЖКТ пациента с эталонными значениями можно выявить риск возникновения опасных заболеваний. Качественные и количественные изменения в составе микрофлоры кишечника отражаются на состоянии как самой микрофлоры кишечника, так и на состоянии всего организма в целом. Правильная трактовка результата может иметь решающий вклад в постановку диагноза и выбора соответствующего метода лечения.

Для обработки информации в многомерном признаковом пространстве необходимы новые, более эффективные методы классификации в сложной помеховой обстановке и в условиях априорной неопределенности. Создание системы автоматического диагностирования состояний биоценоза позволит повысить скорость и точность постановки диагноза врачом.

### Задача классификации

*Классификация* – группировка множества объектов по некоторым классификационным признакам, отражающая степень сходства объектов между собой и принадлежность к заранее определенным классам. Необходимое условие для проведения классификации – существование заранее известных классов и характеризующих их признаков [2].

Цель процесса классификации состоит в построении математической модели, которая принимает на вход прогнозирующие атрибуты (признаки), а в качестве результата на выходе класс, которому соответствуют такие атрибуты. Процесс классификации заключается в создании связей между множеством признаков объектов и множеством классов и состоит из двух основных этапов: конструирования модели и её использования.

*Классификатор* – реализация процесса классификации, которая определяет объект в один из предопределенных классов по входному вектору признаков.

### Методы классификации

Все существующие методы классификации имеют достоинства и недостатки и применяются в зависимости от поставленной задачи. Их оценку следует проводить, принимая в расчет следующие характеристики:

- скорость – величина, характеризующая время, требуемое на создание классификатора и его использование;

- робастность – устойчивость к разного рода некорректным данным, зашумленным данным, а также пропусков некоторых переменных;
- интерпретируемость, т.е. прозрачность устройства для возможности анализа модели;
- надежность – классификация должна предусматривать работу с зашумленными данными и выбросами.

Нейронные сети можно вынести в отдельный большой класс методов классификации. Сети с прямой синоптической связью являются универсальным методом аппроксимации. Это свойство позволяет использовать их так же и в задачах классификации. Причем такие нейронные сети оказываются одним из наиболее эффективных способов классификации.

Нейронные сети имеют следующие преимущества перед классическими методами классификации:

- гибкую структуру;
- позволяют строить нелинейные зависимости;
- параллельные вычисления;
- возможность модификации под конкретную задачу;
- работу с зашумленными данными;
- быстрые алгоритмы обучения;
- справляются с задачами, не имеющими явного решения.

Однако наряду с большим количеством положительных черт нейронных сетей, существует ряд проблем при их использовании.

Никогда заранее не известно, какая нужна сложность вычислительной сети.

М. Минский в работе «Перцептроны» доказал, что только многослойные нейронные сети, имеющие скрытый слой, способны решать нелинейные задачи. Простейшая нейронная сеть, построенная из одного слоя перцептронов, сможет решить только линейные задачи.

### Базовая модель

Базовая модель, описывающая состояние ЖКТ, представляет собой  $n$ -мерное пространство признаков, которые априорно разделены на четыре класса, соответствующие степени дисбактериоза пациентов или его отсутствию. Результат отдельного пациента представлен в виде вектора  $\vec{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  в  $n$ -мерном евклидовом пространстве, координатами которого являются скалярные величины, каждая из которых равна количеству микроорганизмов данного вида. Модель построена на исходных данных по исследованию количественно-качественного состава микрофлоры желудочно-кишечного тракта, собранных Нижегородским научно-исследовательским институтом эпидемиологии и микробиологии имени И.Н. Блохиной. Каждая запись представлена совокупностью 29 признаков, характеризующих состояние микрофлоры желудочно-кишечного тракта по микроорганизмам 376 видов из 70 родов (табл. 1).

**Таблица 1**  
Признаки, характеризующие состояние микрофлоры ЖКТ

1	Количество <i>Bifidobacterium spp.</i>
2	Количество <i>Lactobacillus spp.</i>
3	Количество <i>Lactococcus spp.</i>
4	Количество других анаэробных микроорганизмов
5	Количество <i>Bacteroides spp.</i>
6	Количество <i>E.coli</i> (лак+)
7	Количество <i>E.coli</i> (л/д)
8	Количество <i>E.coli</i> (лак-)
9	Количество <i>E.coli</i> (гем+)
10	Количество <i>E.coli</i> (всего)
11	Количество <i>Enterococcus spp.</i>
12	Количество <i>Enterococcus</i> (гем+)

13	Количество <i>Staphylococcus epidermidis</i>
14	Количество <i>Staphylococcus aureus</i>

Окончание табл. 1

1	2
15	Количество <i>Klebsiella spp.</i>
16	Количество <i>Enterobacter spp., Pantoea spp.</i>
17	Количество <i>Citrobacter spp.</i>
18	Количество <i>Proteus mirabilis</i>
19	Количество <i>Morganella morganii</i>
20	Количество <i>Proteus vulgaris</i>
21	Количество <i>Providencia spp.</i> и др.
22	Количество <i>Hafnia spp., Serratia spp.</i>
23	Количество <i>Pseudomonas aeruginosa</i>
24	Количество НГОБ
25	Количество <i>Candida spp.</i>
26	Количество дрожжевых клеток
27	Количество <i>Shigella spp.</i>
28	Количество <i>Salmonella spp.</i>
29	Количество ЭПКП

Единицы измерения признаков не должны влиять на результаты нейросетевого моделирования. Поэтому следует провести предварительную нормировку исходных данных, т.е. привести все исходные данные к заданному диапазону.

Один из способов нелинейной нормировки – с использованием сигмоидной логистической функции или гиперболического тангенса [3]. Переход от традиционных единиц измерения к нормированным осуществляется следующим образом:

- при нормализации в пределах  $[0, 1]$ :  $\bar{x}_{ik} = \frac{1}{e^{-\alpha(x_{ik}-x_{ci})} + 1}$ ;
- при нормализации в пределах  $[-1, 1]$ :  $\bar{x}_{ik} = \frac{e^{-\alpha(x_{ik}-x_{ci})} - 1}{e^{-\alpha(x_{ik}-x_{ci})} + 1}$ ,

где  $x_{ci} = \frac{x_{\min} + x_{\max}}{2}$  – центр нормализуемого интервала измерения входных переменных;

$\alpha$  – параметр, влияющий на степень нелинейности изменения переменной в нормализуемом интервале.

### Способ представления выходных значений

Одним из способов представления выходных значений является вектор, компоненты которого соответствуют классам. Результатом классификации будет класс под номером максимального компонента выходного вектора. Такой подход позволяет получить наряду с результатом вероятность принадлежности этому классу.

При классификации состояний микрофлоры ЖКТ, выходной вектор может принимать следующий вид:

$\vec{Y} = \{\text{здоров; болен}\}$  – при разделении на 2 класса;

$\vec{Y} = \{\text{здоров; 1 степень; 2 степень; 3 степень}\}$  – при разделении на 4 класса.

### Структура сети

В качестве классификатора использована нейронная сеть на радиально-базисных функциях. Нейронные сети такого типа широко применяются при аппроксимации функций с множеством переменных и в качестве классификаторов [2]. В отличие от многослойных сетей, радиальные сети обладают свойствами, позволяющими производить более простое отображение характеристик. Сигмоидальные нейронные сети решают задачи глобальной ап-

проксимации, так как значение, отличное от нуля, применяемой активационной функции распространяется от некоторой точки в многомерном пространстве до бесконечности [4]. Радиальные функции имеют значения, отличные от 0, только в некоторой ограниченной области вокруг центра радиального элемента в виде сферы в многомерном признаковом пространстве.

Таким образом, радиальные элементы реализуют методы, связанные с локальными отображениями данных. Это является главной особенностью сетей на радиально-базисных функциях и позволяет существенно упростить структуру сети и соответственно ускорить её обучение [5].

Структура сети (рис. 1) содержит два слоя нейронов. Выходы первого (скрытого) слоя определяют степень близости входных значений к центрам радиально-базисных функций. Выходы нейронов второго слоя – это линейные комбинации выходов скрытого слоя.

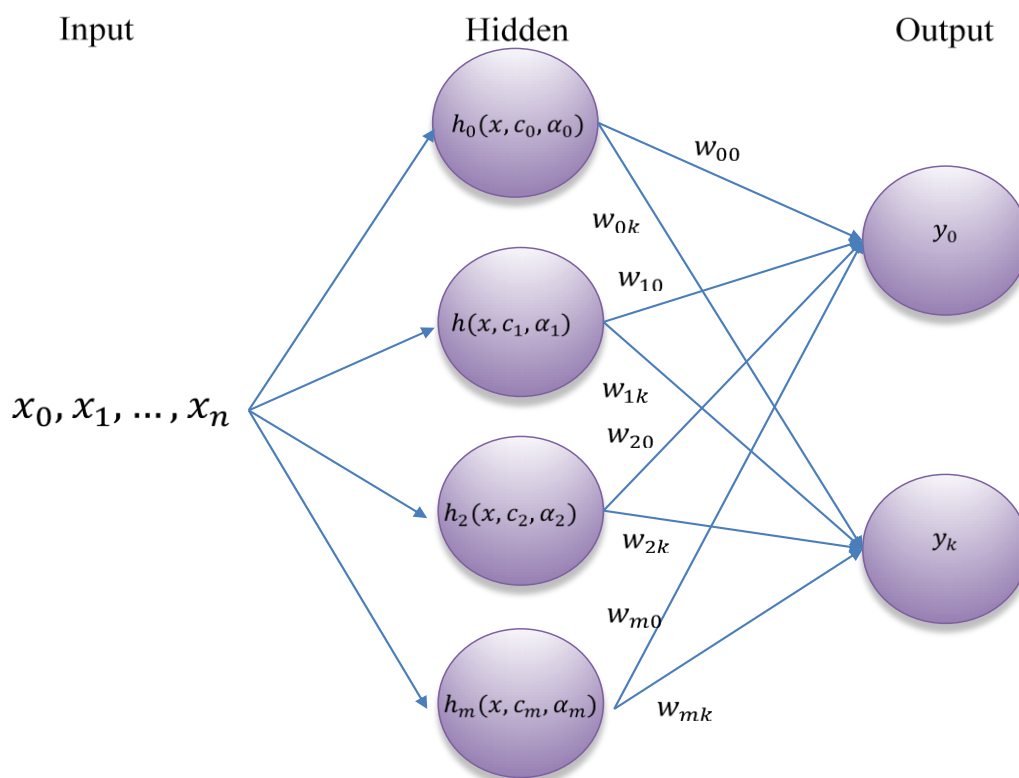


Рис. 1. Архитектура используемой нейронной сети на радиально-базисных функциях

Наиболее широко применяющиеся на практике Гауссовские функции (1) имеют локальный характер и позволяют установить зависимость между областью данных в многомерном признаковом пространстве и конкретным радиальным элементом [5]:

$$\vec{h}(x) = \exp(-\alpha \cdot \|x - \vec{c}\|^2), \quad (1)$$

где  $\vec{c}$  - вектор центров множества радиально симметричных функций;

$\|x - \vec{c}\|$  - норма вектора отклонений входной переменной от центров радиально-симметричных функций. Параметр  $\alpha$  связан с радиусом рассеяния входных переменных, он может быть заменен в выражении (1) на соответствующее отношение:  $\alpha = \frac{1}{2r^2}$ .

Норма разности векторов рассчитывается как евклидово расстояние:

$$\|x - \vec{c}\| = \sqrt{(x - c_1)^2 + (x - c_2)^2 + \dots + (x - c_m)^2}.$$

#### Алгоритм обучения нейронной сети



На стадии обучения можно выделить три этапа: подбор центров и радиусов радиально-симметричных функций и оптимизация синоптических коэффициентов линейного выходного слоя.

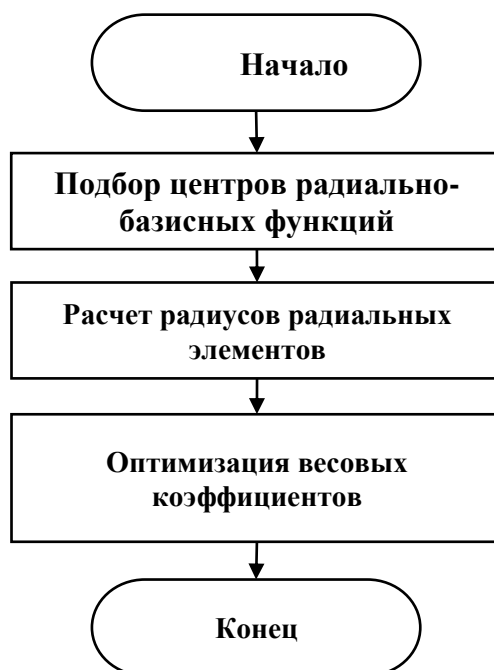


Рис. 2. Блок-схема алгоритма обучения нейронной сети

### 1. Подбор центров радиально-симметричных функций

При большом объеме обучающих примеров можно воспользоваться несколькими способами подбора центров радиальных элементов:

- в качестве центров можно использовать отдельные случайные входные вектора из обучающей выборки;
- подбор наилучших центров из множества обучающих примеров, основанный на выборе максимально далеко расположенных друг от друга векторов из обучающей выборки;
- использование различных алгоритмов кластеризации в том числе другие нейронные сети, например, сеть Кохонена.

### 2. Подбор радиусов радиальных элементов

Выбор радиусов определяется требуемым видом радиально-симметричной функции. При больших значениях параметра  $\alpha$  график функции слишком острый, а это значит, что сеть не сможет корректно интерполировать данные между известными точками на достаточно большом удалении от них, так как теряет способность к обобщению обучающих данных. Наоборот, при чрезмерно малых значениях параметра  $\alpha$  сеть становится невосприимчивой к отдельным деталям.

Радиусы радиальных элементов могут задаваться как вручную при проектировании нейронной сети или автоматически рассчитываться по среднему расстоянию до нескольких (в зависимости от общего объема обучающей выборки и количества скрытых нейронов) ближайших примеров.

### 3. Оптимизация весовых коэффициентов

Использование псевдообратной матрицы является наиболее простым и быстрым алгоритмом оптимизации весовых коэффициентов:

1) рассчитывается характеристическая матрица  $\bar{N}$  значений радиально-симметричных элементов всех обучающих примеров:

$$\bar{H} = \begin{bmatrix} h_1(x_1) & h_2(x_1) & \dots & h_m(x_1) \\ h_1(x_2) & h_2(x_2) & \dots & h_m(x_2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_1(x_n) & h_2(x_n) & \dots & h_m(x_n) \end{bmatrix},$$

где  $n$  – количество обучающих примеров;  $m$  – количество радиальных элементов;

2) методами линейной алгебры рассчитывается матрица весовых коэффициентов выходного слоя нейронов  $\bar{W}$ :

$$\bar{W} = (\bar{H}^T \cdot \bar{H})^{-1} \cdot \bar{H}^T \cdot \bar{Y},$$

где  $\bar{Y}$  – матрица выходов обучающих примеров;

$$\bar{Y} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{21} & \dots & Y_{k1} \\ Y_{12} & Y_{22} & \dots & Y_{k2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{1n} & Y_{2n} & \dots & Y_{kn} \end{bmatrix},$$

$n$  – количество обучающих примеров;  $k$  – количество выходов нейронной сети.

### Результаты

Создана программная реализация классификатора, построенного на основе нейронной сети. В качестве обучающих и тестовых примеров использованы данные по бактериологическому исследованию микрофлоры кишечника, предоставленные Нижегородским научно-исследовательским институтом эпидемиологии и микробиологии им. Академика И. Н. Блохиной.

Для оценки точности и полноты классификации применен метод кросс-валидации, при котором оценка точности основывается на поочередном разбиении всего множества исходных данных на тестовое и тренировочные множества, пока тестовое множество не охватит весь набор данных. Деление множества на обучающие и тестовые примеры осуществляется путем разбиения всего множества данных на заданное  $k$  число частей. Метод состоит из  $k$  итераций, в ходе выполнения каждой из которых тестовым множеством называется одна из  $k$  частей, которая до этого не являлась тестовым множеством. Такой метод позволяет наиболее полно провести оценку точности разбиения данных по классам.

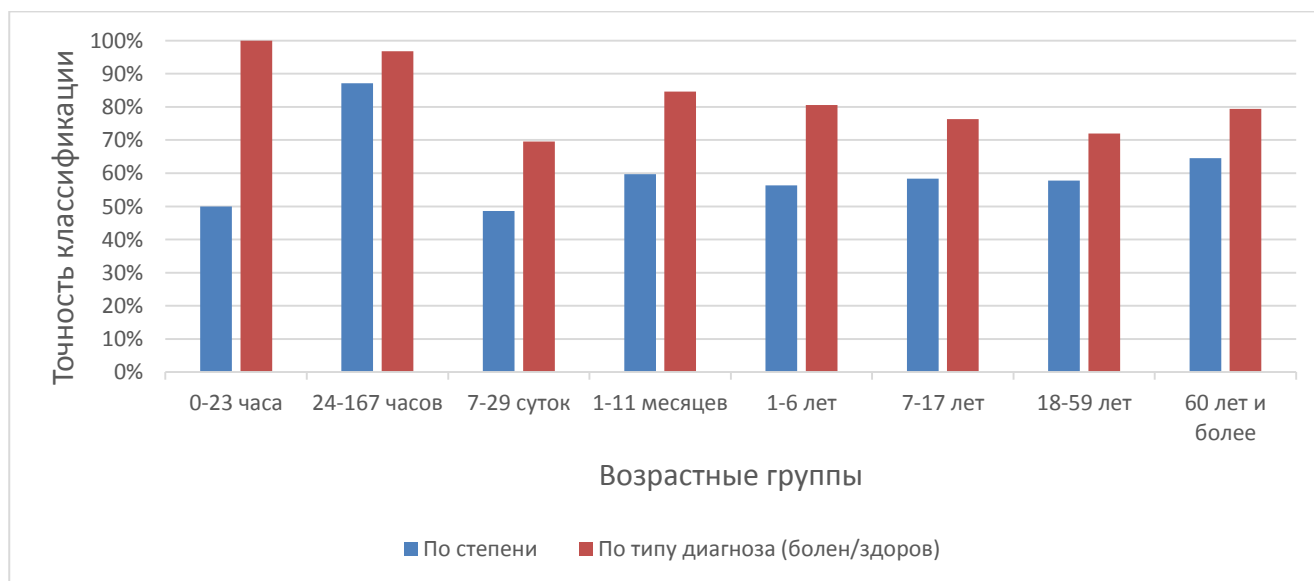


Рис. 3. Точность классификации по возрастным группам

Точность построенного классификатора (рис. 3) различается в зависимости от возрастных групп пациентов, а также от количества обучающих примеров. Общая точность классификации по всем возрастным группам: 62.55% при классификации по степени дисбак-

териоза (4-компонентный выходной вектор) и 83.69% при классификации по типу диагноза (2-компонентный выходной вектор).

### Заключение

Рассмотрена возможность применения нейронных сетей на радиально-базисных функциях для построения классификатора многомерных объектов, в частности, биоценозов.

Описана структура и алгоритм обучения используемой нейронной сети на радиально-базисных функциях.

Выполнена оценка точности классификатора, построенного на основе нейронной сети на радиально-базисных функциях.

### Библиографический список

1. **Lomakina, L.S.** Expert system for biocenosis diagnosis based on / L.S. Lomakina, I.V. Solovieva, S.A. Zelentsov // Bayesian data analysis and fuzzy production rule system (Scopus); The 5th BioMedPub 26-27 aug. 2017, Bandung, Indonesia. – P. 6657–6664.
2. **Хливенко, Л.В.** Практика нейросетевого моделирования: монография / Л.В. Хливенко. – Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2015. – 214 с.
3. **Ломакина, Л.С.** Модели и алгоритмы диагностирования состояний биоценоза на основе априорных статистических данных / Л.С. Ломакин [и др.] // Научно-технический вестник Поволжья. Казань: НИКГУ. – 2013. – № 5. – С. 251–256.
4. **Рутковская, Д.** Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. – М.: Горячая линия - Телеком, 2006. – 452 с.
5. **Осовский, С.** Нейронные сети для обработки информации: [пер. с польского И.Д. Рудинского] / С. Осовский. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 344 с.

*Дата поступления  
в редакцию 31.01.2018*

**L.S. Lomakina, K.M. Noskov**

### NEURAL NETWORK TECHNOLOGIES DIAGNOSING BIOCECENOSIS STATES BASED ON A PRIORI STATISTICS DATA

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

**Purpose:** Development of models and algorithms for data processing of the gastrointestinal tract microflora bacteriological studies. This allows increasing the speed and quality of diagnosis and choice of treatment

**Design/methodology/approach:** An algorithm with the use of neural networks for constructing a classifier for multidimensional objects, in particular, classification of biocenoses, is proposed.

**Findings:** The structure of a neural network based on radial-basis functions is considered. Described neural network training algorithm.

**Research limitations/implications:** The methods described in the work can find practical application in automated systems for diagnosing biocenosis. The results of work are in demand by scientific institutions and organizations of medical and biological profile

**Originality/value:** Developed models and algorithms for creating decision support systems for diagnosing biocenosis.

*Key words:* classification, classifier, neural network, biocenosis, radial basis functions.

УДК 338.242

Е.С. Митяков, С.Н. Митяков

**ОЦЕНКА РИСКОВ В ЗАДАЧАХ МОНИТОРИНГА УГРОЗ  
ЭКОНОМИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Приведена методика оценки рисков в задачах мониторинга угроз экономической безопасности. Для оценки рисков предлагается анализировать преобразованные безразмерные показатели. При этом все преобразованные индикаторы экономической безопасности изменяются в одних и тех же пределах независимо от выбора конкретных функции.

Показано, что для проведения мониторинга необходимо использовать инструментарий пороговых значений. При выработке рекомендаций по обеспечению необходимого уровня экономической безопасности следует учитывать степень удаленности индикатора от порогового значения и сложившуюся динамику. В работе выделено семь характерных «зон риска» для позиционирования степени отклонения значения индикатора от порогового уровня.

Авторами предложена модель, которая устанавливает взаимно-однозначное соответствие между значением индикатора и вероятностью реализации угрозы экономической безопасности. Модель позволяет не только визуально анализировать динамику соответствующих индикаторов, но и поставить в соответствие их значению вероятность возникновения реализации угрозы.

*Ключевые слова:* экономическая безопасность, индикаторы экономической безопасности, пороговые значения, зоны риска, угрозы экономической безопасности, риски экономической безопасности, мониторинг.

В научной литературе для обозначения факторов негативного влияния на экономическую систему используют термины «риск», «вызов» и «угроза». В Стратегии экономической безопасности Российской Федерации на период до 2030 года дана следующая трактовка этим терминам: «Угроза экономической безопасности – совокупность условий и факторов, создающих прямую или косвенную возможность нанесения ущерба национальным интересам Российской Федерации в экономической сфере. Вызовы экономической безопасности – совокупность факторов, способных при определенных условиях привести к возникновению угрозы экономической безопасности. Риск в области экономической безопасности – возможность нанесения ущерба национальным интересам Российской Федерации в экономической сфере в связи с реализацией угрозы экономической безопасности» [1].

Исходя из предложенного ранее и иных определений, риск имеет в основном вероятностный характер. Здесь и далее мы будем определять риск в области экономической безопасности как вероятность реализации угрозы. Мониторинг экономической безопасности производится с помощью специальных показателей в профильных источниках, называемых индикаторами. В 2000 г. Научный совет при Совете безопасности РФ одобрил перечень и пороговые значения 19 индикаторов экономической безопасности, разработанных Институтом экономики РАН [2]. В 2008 г. Институтом экономики РАН разработан новый перечень из 36 индикаторов и их пороговые значения [3], а в 2011 г. опубликован уточненный список индикаторов [4]. При мониторинге экономической безопасности России были выделены четыре сферы: «Реальная экономика», «Социальная сфера», «Денежно-финансовая сфера», «Внешнеэкономическая сфера». В 2014 г. сотрудниками НГТУ им. Р.Е. Алексеева совместно с учеными Института экономики РАН разработана система индикаторов экономической безопасности региона, включающая 30 индикаторов [5]. Наконец, в Стратегии экономической безопасности Российской Федерации на период до 2030 года введена новая система индикаторов экономической безопасности, включающая 40 индикаторов, часть из которых уже использовалась ранее в разработках Института экономики РАН. Условно все новые индикаторы экономической безопасности можно распределить по пяти проекциям. Кроме перечис-

ленных ранее сфер экономической безопасности, в новую стратегию включена еще одна проекция – «Инновационная сфера». Данную сферу можно выделить в отдельный блок, поскольку она является в настоящее время ключевой в решении задач обеспечения устойчивого развития экономики России в условиях нестабильных мировых цен на энергоресурсы и ужесточения санкций.

### Пороговые значения индикаторов

В идеале каждому виду вызовов и угроз должен соответствовать один или несколько индикаторов. На самом деле положение более сложное. Установить полное соответствие между угрозой и индикатором не всегда представляется возможным. В различных ситуациях используются разные модели мониторинга экономической безопасности. В частности, для определения тенденций можно задействовать динамическую модель, которая использует информацию базового и текущего периодов. Для сравнения степени развития экономической системы с другими системами, позиционирование (определение рейтинга) исследуемого объекта применяют сравнительные модели.

В задачах мониторинга экономической безопасности неизбежно возникает необходимость определения границ безопасного функционирования системы и выработки пороговых значений, позволяющих оценивать предельный уровень изменения ее параметров, за рамками которого возникают опасности в той или иной сфере. Поэтому, в большинстве исследований, связанных с мониторингом экономической безопасности, используются модели сравнения с пороговым значением. В последнем случае можно выделить однопороговые (например, «ВВП на душу населения») и двухпороговые индикаторы (например, «Коэффициент фондов»). В то же время, в научной литературе нет единого мнения о пороговых значениях индикаторов экономической безопасности и соответствующих рисках, связанных с не достижением этих значений. В новой Стратегии пороговые значения экономической безопасности вообще не упоминаются, хотя они крайне важны при идентификации рисков.

В.К. Сенчагов отмечает: «... пороговые значения – важный инструмент системного анализа, прогнозирования и индикативного социально-экономического планирования. С помощью этого инструмента тот или иной объект, в данном случае экономика, рассматривается с позиции соответствия тенденций ее развития (внутри и во взаимодействии с экономиками других стран) национальным интересам страны. Теория безопасности имеет практическое значение, только если она органически включает теорию предельных значений объекта» [2, с. 82-83].

По мнению В.К. Сенчагова, под пороговыми понимают «предельные значения, игнорирование которых препятствует нормальному развитию экономики и социальной сферы и приводит к формированию разрушительных тенденций в области производства и уровня жизни населения» [6]. Вместе с тем, за двадцатилетний период существования системы индикаторов экономической безопасности России, предложенной учеными ИЭ РАН, более половины индикаторов стабильно находились за пределами пороговых значений. При этом по большому счету мы не видели тех разрушительных тенденций, заложенных в определении. Последнее вовсе не означает, что нужно отказаться от методологии пороговых значений. Наоборот, следует уделить этому вопросу больше внимания, расширять состав экспертов, детально исследовать двух- и многопороговые ситуации

А.В. Калина и И.П. Савельева для определения пороговых значений предлагают использовать различные подходы: метод аналогий, методы экспертного анализа, утвержденные нормативы и общепринятые требования и стандарты [7]. В некоторых случаях для определения пороговых значений целесообразно использование математического аппарата, основанного на теории распознавания образов.

По мнению Н.Д. Эриашвили и Е.Н. Барикаева, за пределами пороговых значений экономические системы теряют способность к динамическому саморазвитию. При этом пороговое значение одного индикатора не должны достигаться в ущерб другим [8]. В качестве примера авторы приводят возможность прироста ВВП за счет экспорта нефти. Они считают, что большое значение имеют не столько сами показатели, сколько их пороговые значения.

В.И. Авдийский и В.К. Сенчагов полагают, что пороговые значения индикаторов экономической безопасности должны: характеризовать существенные, а не второстепенные черты состояния экономического субъекта; отражать его экономические интересы; выявлять наиболее вероятные угрозы его функционирования; обеспечивать совместимость данного перечня с действующей системой учета статистики, планирования и прогнозирования [9].

А.Б. Виссарионов и Р.Р. Гумеров предложили использовать трехуровневую шкалу значений индикаторов экономической безопасности [10]. *Первый уровень* представляет собой целевые значения индикаторов, описывающие желаемое состояние объекта в соответствии с документами стратегического планирования. *Второй уровень* – транзитивное значение, характеризующее точку перелома, за которой система утрачивает способность к саморазвитию без дополнительных антикризисных мероприятий. *Третий уровень* – критические значения, за пределами которых страна утрачивает экономическую и политическую независимость, для восстановления которой необходим переход к мобилизационной экономике.

В коллективной монографии под редакцией Ю.Л. Воробьева [11] рассмотрен голландский подход к оценке рисков, который в последнее время получил широкое распространение в зарубежной практике. В соответствии с этим подходом весь спектр возможных значений риска разбивают на три области в соответствии принципом «светофора»: недопустимый (чрезмерный) риск – «красная» область, приемлемый риск – «желтая» область; пренебрежимый риск – «зеленая» область.

На наш взгляд, при выработке рекомендаций по обеспечению необходимого уровня экономической безопасности необходимо учитывать степень удаленности индикатора от порогового значения и его динамику. Для этого предлагается расширить теорию пороговых значений с помощью «зонной теории».

### Зоны риска

Взаимосвязь фактических и пороговых значений индикаторов экономической безопасности с так называемыми «зонами риска» дается в работе В.К. Сенчагова и С.Н. Митякова [12]. Для повышения эффективности сравнительного анализа индикаторов авторами предложены различные способы их преобразования к безразмерному виду. Для проведения адекватных преобразований выделены два типа индикаторов: «затратные» и «эффектные». Рост первых ведет к снижению, а рост вторых – к увеличению уровня экономической безопасности. Для «затратных» индикаторов должно выполняться условие «не более порогового значения» (пример – уровень безработицы); для «эффектных» – условие «не менее порогового значения» (пример – объем ВВП на душу населения). Преобразующие функции выбираются таким образом, чтобы после преобразования все индикаторы стали «эффектными».

Необходимо отметить, что для каждого индикатора функция для преобразования должна выбираться индивидуально. Если индикатор изменяется в непредсказуемых пределах, целесообразно использовать функции для «эффектных» и «затратных» индикаторов соответственно:

$$y = \begin{cases} 2^{\left(1-\frac{a}{x}\right)/\ln\frac{10}{3}}, & \text{если } \frac{x}{a} > 1; \\ 2^{-\log_{10}\frac{a}{x}}, & \text{если } \frac{x}{a} \leq 1, \end{cases} \quad (1)$$

$$y = \begin{cases} 2^{\left(1-\frac{x}{a}\right)/\ln\frac{10}{3}}, & \text{если } \frac{x}{a} < 1; \\ 2^{-\log_{10}\frac{x}{a}}, & \text{если } \frac{x}{a} \geq 1, \end{cases} \quad (2)$$

где  $x$  – реальное значение индикатора;  $a$  – его пороговое значение.

В том случае, если пределы изменения индикатора известны (например, от 0 до 100%),

для функционального преобразования необходимо использовать функции, полученные кусочно-линейной или кусочно-параболической интерполяцией.

В нашей модели все преобразованные индикаторы экономической безопасности, независимо от выбора функции для преобразования, изменяются в пределах от 0 до 1,75. При этом уровень  $y = 1$  соответствует пороговому значению, при  $y < 1$  значение индикатора ниже порогового значения, возникает существенный риск реализации угрозы экономической безопасности. При  $y > 1$  риск реализации угрозы менее значителен.

В определении порогового значения, предложенном В.К. Сенчаговым, практически содержится всего две зоны: «зона риска», определяемая в случае недостижения индикатором его порогового значения, и «зона благополучия», определяемая в случае его превышения. Как показал анализ динамики индикаторов экономической безопасности, такое разделение недостаточно информировано. Важным является то, насколько значение индикатора меньше (или больше) порогового значения. Недостаточной, по нашему мнению, является и модель «светофора», использующая всего три зоны: «красную», «желтую» и «зеленую».

Для мониторинга экономической безопасности предлагается использовать семь основных «зон риска»:

- 1) зона «катастрофического риска», в которой значение исходного индикатора более чем в 10 раз меньше порога, а значение преобразованного индикатора  $y < 0,25$ ;
- 2) зона «критического риска», где значение исходного индикатора меньше порога от 3 до 10 раз, а преобразованный индикатор изменяется в пределах  $0,25 \leq y < 0,5$ ;
- 3) зона «значительного риска», в которой значение исходного индикатора меньше порога от 1,66 до 3 раз, а преобразованный индикатор изменяется в пределах, где  $0,5 \leq y < 0,75$ ;
- 4) зона «умеренного риска», где значение исходного индикатора меньше порога от 1 до 1,66 раз, а преобразованный индикатор изменяется в пределах  $0,75 \leq y < 1$ ;
- 5) зона «стабильности №1», где значение исходного индикатора больше порога от 1 до 1,66 раз, а преобразованный индикатор изменяется в пределах  $1 \leq y < 1,25$ ;
- 6) зона «стабильности №2», в которой значение исходного индикатора больше порога от 1,66 до 3 раз, а преобразованный индикатор изменяется в пределах  $1,25 \leq y < 1,5$ ;
- 7) зона «стабильности №3», где значение исходного индикатора более чем в 3 раза превышает порог, а преобразованный индикатор  $y > 1,5$ .

Таким образом, чем меньше значение  $y$ , тем более значительным является риск, тем больше вероятность нанесения ущерба национальным интересам Российской Федерации в экономической сфере в связи с реализацией угрозы экономической безопасности. С другой стороны, при приближении  $y$  к своему асимптотическому значению (1,75) риск реализации угрозы практически стремится к нулю, а соответствующий индикатор в системе мониторинга факторов, угрожающих экономической безопасности, теряет свою актуальность.

### Идентификация рисков

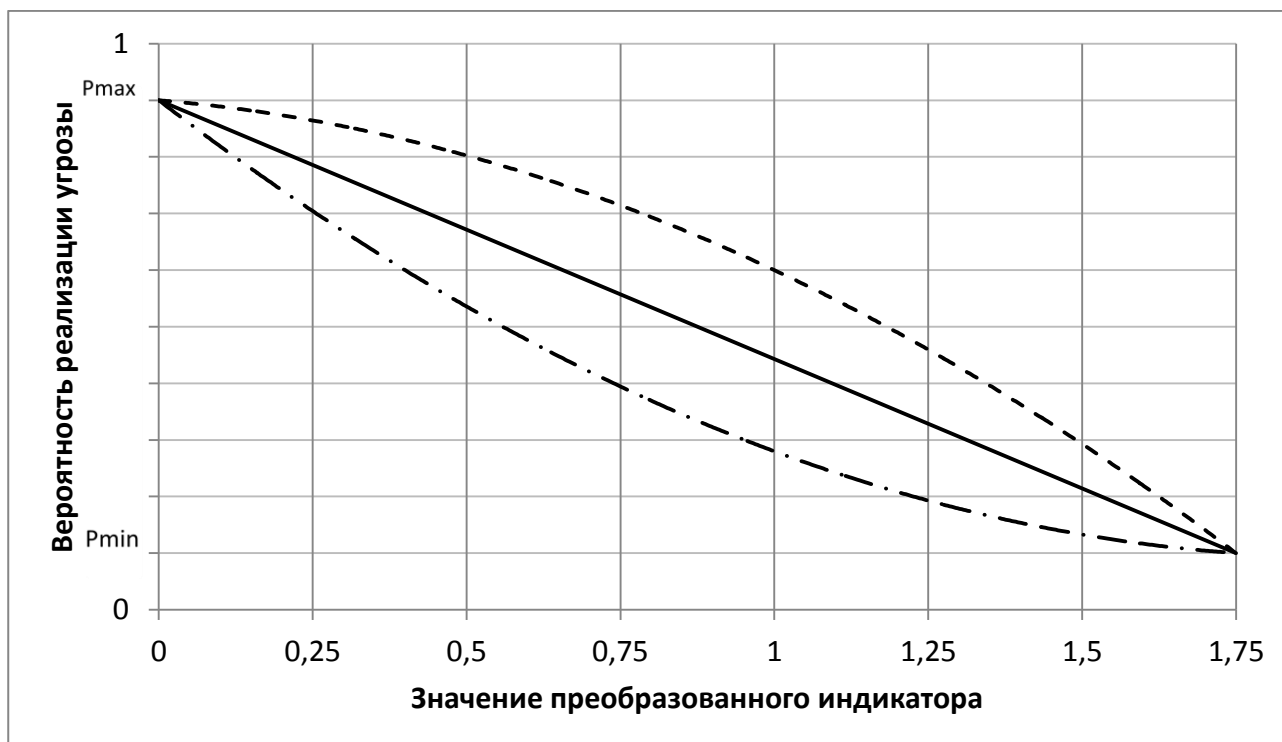
Дальнейшее развитие теории пороговых значений видится нам во взаимосвязи с возможной идентификацией рисков. Это означает, что любому значению индикатора ставится в соответствие свой уровень риска, определяемый как вероятность наступления нежелательного события, связанного с реализацией угрозы экономической безопасности.

В работе А.А. Куклина, Н.Л. Никулиной, Г.П. Быстрой, А.С.Найденова, Б.А. Коробицына изложены теоретические и методические подходы к диагностике угроз и рисков экономической безопасности региона [13]. Авторы рассматривают экономический риск как вероятность реализации угроз, способных негативно повлиять на экономическую систему и изменить ее текущее состояние. В работе приведены методы оценки рисков и их апробация на индикаторах экономической безопасности региона.

В работе О.М. Дюжиловой и И.В. Вякиной систематизирован характер рисков и угроз экономической безопасности в соответствии с прямым и косвенным ущербом в случае их наступления [14]. Авторы полагают, что необходимыми условиями эффективного решения

проблем риска являются: достоверная оценка состояния экономической безопасности системы; достоверное прогнозирование рисков; опережающее принятие решений, обеспечивающих развитие системы с надлежащим уровнем экономической безопасности.

В данной работе предлагается модель, основной целью которой является установление взаимно-однозначного соответствия между значением преобразованного индикатора и вероятностью реализации угрозы экономической безопасности (рис. 1).



**Рис. 1. Взаимосвязь значения индикатора экономической безопасности с риском как вероятностью реализации угрозы**

Значение уровня риска может изменяться в пределах от  $P_{\min}$  до  $P_{\max}$  (от минимально возможного до максимально возможной вероятности), которые задаются экспертно. Наиболее вероятный сценарий изображен сплошной линией, оптимистический сценарий – штрихпунктирной, пессимистический – пунктирной линией. Использование такой модели позволяет любому значению преобразованного индикатора поставить в соответствие определенный уровень риска как вероятности реализации угрозы.

Далее на рис. 2 и рис. 3 приведена динамика двух индикаторов экономической безопасности страны в исходном и преобразованном видах. На рис. 2, а и 3, а индикаторы отображаются линией с маркерами, а их пороговые значения – сплошной линией с вертикальными насечками, нанесенными со стороны экономически безопасных значений индикаторов. Первый из них, «Общий размер золотовалютных резервов на конец года, млрд долл.», демонстрирует положительный тренд и, начиная с 2006 г., находится в зонах стабильности. Второй, «Среднегодовые темпы прироста ВВП, %», демонстрирует значительную дисперсию. При этом в периоды 2009 г. и 2015-2016 гг. значения индикатора вошли в зону катастрофического риска.

Представленные на рис. 2 и рис. 3 индикаторы демонстрируют перманентные переходы из одной зоны риска в другую, что является достаточно характерным для системы индикаторов экономической безопасности в целом. Использование модели, изображенной на рис. 1, позволяет не только визуально проанализировать динамику соответствующих индикаторов, но и поставить в соответствие их значению вероятности возникновения реализации угрозы.



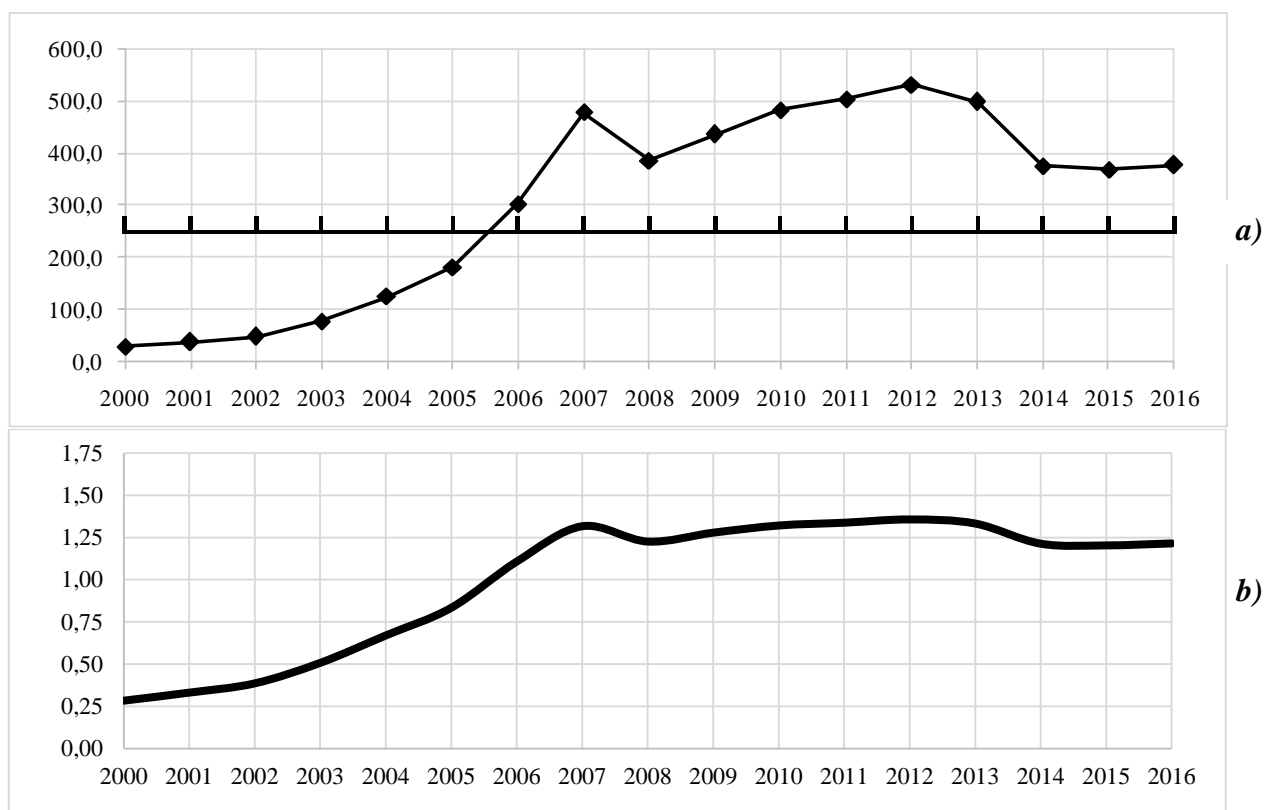


Рис. 2. Динамика исходного (а) и преобразованного (б) индикатора «Общий размер золотовалютных резервов на конец года»

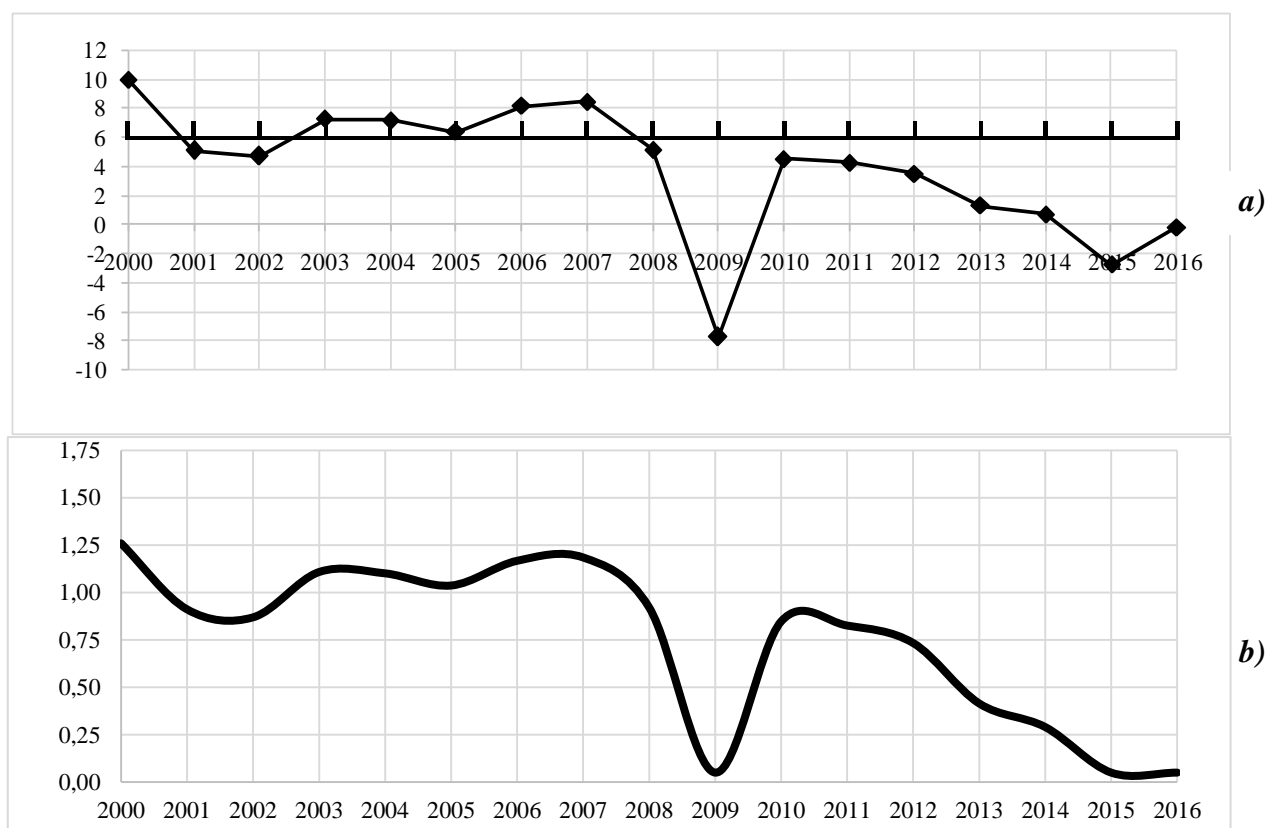


Рис. 3. Динамика исходного (а) и преобразованного (б) индикатора «Среднегодовые темпы прироста ВВП»

### Выводы

Обобщая изложенное, можно констатировать, что для проведения мониторинга экономической безопасности целесообразно использовать инструмент пороговых значений. При этом их следует рассматривать не с позиций обязательного наступления катастрофы (от термина «пороговый эффект»), а с тем, чтобы отделить нормальный уровень экономической безопасности от недостаточного. При выработке рекомендаций по обеспечению требуемого уровня экономической безопасности необходимо учитывать степень удаленности индикатора от порогового значения и его динамику.

В работе предложено выделить семь характерных «зон риска» для позиционирования степени отклонения значения индикатора от порогового уровня. Авторами предложена модель, позволяющая установить взаимно-однозначное соответствие между значением индикатора и вероятностью реализации угрозы экономической безопасности.

Указанные ранее обстоятельства предстоит учитывать при организации мониторинга угроз экономической безопасности.

### Библиографический список

1. Указ Президента РФ от 13 мая 2017 г. № 208 «О стратегии экономической безопасности Российской Федерации на период до 2030 года» [Электронный ресурс]. <http://www.consultant.ru> (дата обращения 06.02.2018).
2. Экономическая безопасность России: общий курс: учебник / под ред. В.К. Сенчагова. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 815 с.
3. Стратегия экономической безопасности при разработке индикативных планов социально-экономического развития на долгосрочную и среднесрочную перспективу: монография. – М.: Институт экономики РАН, 2009. – 232 с.
4. **Сенчагов, В.К.** Модернизация финансовой сферы // Вопросы экономики. – 2011 – №3. – С. 53–64.
5. Экономическая безопасность регионов России: монография / под ред. В.К. Сенчагова. – Н. Новгород: Растр-НН, 2014. – 299 с.
6. **Сенчагов, В.К.** Экономика, финансы, цены: эволюция, трансформация, безопасность / В.К. Сенчагов. – М.: Анкил, 2010. – 802 с.
7. **Калина, А.В.** Формирование пороговых значений индикативных показателей экономической безопасности России и ее регионов / А.В. Калина, И.П. Савельева // Вестник ЮУрГУ. Сер. «Экономика и менеджмент». – 2014. – №4. – Т. 8. – С. 15–24.
8. **Эриашвили, Н.Д.** Определение, критерии и пороговые значения экономической безопасности / Н.Д. Эриашвили, Е.Н. Барикаев // Вестник Московского университета МВД России. – 2009. – № 12. – С. 30–33.
9. **Авдийский, В.И.** Методологии определения пороговых значений основных (приоритетных) факторов рисков и угроз экономической безопасности хозяйствующих субъектов / В.И. Авдийский, В.К. Сенчагов // Экономика. Налоги. Право. – 2014. – №4. – С. 73–78.
10. **Виссарионов, А.Б.** Об использовании предельных (пороговых) значений индикаторов экономической безопасности Российской Федерации / А.Б. Виссарионов, Р.Р. Гумеров // Управленческие науки. – 2017. – № 3. – С. 12–20.
11. Стратегические риски России: оценки и прогноз / МЧС России под общ. ред. Ю.Л. Воробьева. – М.: Деловой экспресс, 2005. – 392 с.
12. **Сенчагов, В.К.** Использование индексного метода для оценки уровня экономической безопасности / В.К. Сенчагов, С.Н. Митяков // Вестник академии экономической безопасности МВД России. – 2011. – №5. – С. 41–50.
13. **Куклин, А.А.** Диагностика угроз и рисков экономической безопасности региона / А.А. Куклин [и др.] // Проблемы анализа риска. – 2013. – № 2. – Т. 1. – С. 80–90.

14. Дюжилова, О.М. Организационно-методологические аспекты оценки рисков и обеспечения экономической безопасности региона / О.М. Дюжилова, И.В. Вякина // Вестник ТвГТУ. Сер. «Науки об обществе и гуманитарные науки». – 2016. – Вып. 1. – С. 177–188.

*Дата поступления  
в редакцию 16.02.2018*

**E.S Mityakov, S.N. Mityakov**

**ASSESSMENT OF RISKS IN PROBLEMS OF MONITORING  
OF THREATS OF ECONOMIC SECURITY**

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

**Objective:** To develop a risks assessment technique for monitoring threats to economic security based on application of threshold values of indicators and identification of risk areas.

**Approach:** For risk assessment, the article proposes to analyze the transformed dimensionless indicators. In this case, all converted indicators of economic security vary within the same limits, regardless of the choice of a specific function. The approach to risk assessment is based on establishing the relationship between the value of the transformed indicator and the probability of realizing a threat to economic security.

**Results and scope of their application:** In the article, the authors identified seven characteristic "risk zones" for positioning the degree of deviation of the indicator value from the threshold level. The authors proposed a model that allows setting a one-to-one correspondence between the indicator value and the probability of realizing a threat to economic security. Using this model allows not only to visually analyze the dynamics of the relevant indicators, but also to match their probability of occurrence of the threat.

**Conclusions:** The results of the research can be applied in developing recommendations for ensuring the necessary level of economic security for systems of various levels.

*Key words:* economic security, indicators of economic security, threshold values, zones of risk, threat of economic security, risks of economic security, monitoring.

УДК 378.1

Д.Г. Рыжаков

**ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ  
В СИСТЕМЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
(ПО МАТЕРИАЛАМ НОВЕЙШИХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ИЗДАНИЙ)**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлена попытка осмысления основных направлений изучения различных аспектов инновационной деятельности на страницах современной отечественной научной периодики. Приводится обзор различных подходов к инновациям в системе высшего образования Российской Федерации.

*Ключевые слова:* инновация, высшее образование, научная периодика.

В отечественной науке изучению различных аспектов инновационной деятельности в образовании в последнее время уделяется весьма значительное внимание. Следствием этого постоянно растущего интереса является разнообразный по направлениям поток литературы [1]. На наш взгляд, можно выделить три основные тенденции в изучении инновационных процессов в образовании. *Во-первых*, издание многочисленных работ учебно-методического и монографического характера. *Во-вторых*, проведение конференций по актуальным вопросам инновационной деятельности в образовании [2]. *В-третьих*, сегодня наблюдается усиление исследовательской активности и на страницах периодической печати. Мы сосредоточим наши усилия именно на специализированных научных журналах, поскольку до сих пор нет обобщающих публикаций, отражающих состояние данного направления исследований.

Солидный задел в изучении общих вопросов инновационной деятельности в образовании был сделан В.Г. Халиным в первой половине 2000-х гг. [3]. Затронуты вопросы, прежде всего, модернизации системы высшего профессионального образования. Отмечается роль технопарков в структуре современного высшего образования, которые должны способствовать инновационной деятельности вузов путем создания малых инновационных фирм для коммерциализации достижений университетов. Анализируя опыт функционирования университетских технопарков, автор приходит к выводу, что свою целевую функцию они не выполняют. По оценке экспертов, только 10-12 инновационных комплексов действительно соответствуют международным стандартам [3, с. 16]. Главная причина такого положения, по мнению ученого, заключается в отсутствии продуманной государственной инновационной политики в системе высшего образования современной России.

В несколько ином ключе написано исследование Е.И. Муратовой [4], посвященное особенностям повышения эффективности подготовки магистров к инновационной деятельности (на примере Тамбовского государственного технического университета). В статье подробное освещение получили разнообразные стороны трансформации классической магистерской подготовки в инновационно ориентированную. Особую роль, по словам Е.И. Муратовой, в инновационной деятельности магистров играют научно-образовательные центры, организованные при ТГТУ, где учащиеся магистратуры выполняют инновационные проекты [4, с. 83].

Развернутые суждения об особенностях становления инновационной деятельности в образовании содержит статья В.А. Адольфа [5]. Основное внимание исследователь уделил проблеме подготовки педагога к инновационной деятельности и развитию творческого потенциала его личности. Обратил он внимание и на само понятие "инновация", причем рассматривал его в историческом контексте, опираясь на отечественную и иностранную литературу. Рассматривая работу педагогических учебных заведений (на примере Красноярского края), автор пришел к неутешительному выводу, что подготовкой педагога к инновационной

деятельности педагогические учебные заведения практически не занимаются. Внедрение информационных технологий по масштабу невелико (8,7 % от существующих школ края) [5, с. 84]. В ходе анализа различных подходов к проблеме профессионального становления педагога, ориентированного на инновационную деятельность, выделен ряд факторов, необходимых для успешного решения данной задачи. Суть процесса профессионального становления педагога, занимающегося инновационной деятельностью, заключается в необходимости расширения индивидуальных образовательных горизонтов и решением разноуровневых задач, присущих данному виду деятельности (освоение знаний и умений на основе конструирования понятий и смыслов, решение профессиональных задач на основе моделирования инновационной образовательной среды, выстраивание собственной траектории профессионального движения на основе проектирования деятельности, индивидуальных образовательных задач и программы по их реализации) [5, с. 86].

Любопытный ракурс в изучении интересующей нас проблемы предложила М.И. Гомбоева [6, 7], которая раскрывает инновационную деятельность в образовании через призму управления эффективностью научно-исследовательской деятельности в региональном вузе. Ученый не ограничивается только подробным и компетентным разбором основных направлений научно-исследовательской работы в региональном вузе на примере Забайкальского государственного гуманитарно-педагогического университета, но анализирует её инновационную составляющую. Заслуживает поддержки высказанная М.С. Гомбоевой мысль о необходимости создания системы показателей эффективности инновационной деятельности для университета.

Определились также некоторые новые подходы к проблемам инновационной деятельности региональных вузов в целом. Здесь прежде всего следует отметить статью А.В. Шкурко [8]. Нижегородский социолог акцентировал проблему низкой конкурентоспособности отечественной науки, связав её с высоким уровнем централизации и низким уровнем вовлеченности вузов в научно-техническую и инновационную деятельность. Интерес представляет вывод автора о неспособности современной модели образования обеспечить массовое производство инноваций [8, с. 65]. Второй темой, разрабатываемой А.В. Шкурко, является реализация научного и инновационного потенциала вузов посредством переосмысления их социальных функций, объединения вузов в исследовательские консорциумы, перехода на международные стандарты оценки эффективности научно-технической работы. Третья тема – это то, что принято называть рефрейминг (переструктурирование) образовательных учреждений, предполагающее изменение идеологии и психологии как руководства, так и персонала. По мнению исследователя, необходим сдвиг в восприятии вузов как научно-образовательных, а не только учебных заведений. Наконец, подчеркивается особая роль кафедр как исследовательских центров, поскольку именно они являются основной структурной единицей, обеспечивающей организацию и проведение исследовательской работы. Значительный вклад в исследование инновационной составляющей региональных университетов внесла Е.В. Горюнова [9]. Она, в частности, предприняла попытку проанализировать подходы к формированию стратегий, обеспечивающих рост качества образования и снижение инвестиционных рисков, что создает возможность более активного привлечения внебюджетных средств. Е.В. Горюнова отстаивает идею "института вузовского резерва" [9, с. 33], которая подразумевает, что право посещать учебные занятия в вузе имеют не только студенты, но и "резервисты" – не прошедшие по конкурсу абитуриенты, ориентированные на обязательное получение образования в конкретном вузе. Их "задача" состоит в том, чтобы "вытеснить" с бюджетных мест "отстающих" студентов. "Двоечники" уступают свои места наиболее успешным "резервистам", а сами могут продолжить обучение на коммерческой основе [9, с. 33]. Отмечается, что "институт вузовского резерва" обеспечивает решение проблемы качества образования, повышает эффективность расходования бюджетных средств, а также способствует привлечению дополнительных финансовых ресурсов за счет роста платных образовательных услуг [9, с. 33]. В этом же направлении – изучение различных аспектов инновационной дея-

тельности региональных вузов – написана статья Р.И. Азаровой [10]. Интересную трактовку получил сам термин "инновационная деятельность" применительно к региональному вузу как "процесс создания условий для наиболее полного достижения целей, ориентированных на совершенствование качества образования в условиях современных реформ" [10, с. 3]. Не были обделены вниманием и различные подходы к моделям инновационной деятельности в вузе. Перу А.Н. Ковтуновой принадлежит статья, рассматривающая практику инноваций в одном отдельно взятом региональном вузе (Институт социального образования Уральского государственного педагогического университета) [11]. Обозначаются цели, задачи и направления инновационной образовательной деятельности, определяются её основные участники в вузе.

Важной темой в последнее время стало изучение экономической составляющей различных сторон инновационной деятельности в вузе. Этой теме посвящено немало страниц специализированных периодических изданий [12, 13, 14, 15,]. Более подробно остановимся на исследованиях К.И. Софроновой [16, 17], где специально показывается место и роль вуза в системе хозяйствующих субъектов экономики. Сделанные наблюдения и выводы позволяют говорить о том, что вузы перестают быть только хозяйствующими субъектами, производящими и предоставляющими потребителям образовательные услуги, а выходят на рынки интеллектуальной продукции в качестве производителей наукоемких товаров и услуг.

Под иным углом зрения инновационная деятельность в университетах рассмотрена в концептуальной статье М.С. Чвановой [18]. Исходным пунктом её размышлений является социальное партнерство в сфере профессионального образования как средство решения социальных и экономических проблем. Существенное внимание М.С. Чванова сосредотачивает на совершенствовании социально-инновационной деятельности. Ставится вопрос о необходимости создания ассоциации социального партнерства в вузах. Основной формой социального партнерства, по мнению автора, является проектная деятельность сотрудников, аспирантов и студентов, которая создает социально значимые инновационные проекты в сотрудничестве с различными предприятиями, организациями и пр. Характер социального партнерства определяется многообразием направления его развития. Социальное партнерство вуза можно рассматривать как социальный ресурс образовательного учреждения; как способ интеграции инновационной и образовательной деятельности; как институт разработки механизмов научно-исследовательского и профессионального сотрудничества на основе договоров [18, с. 584]. Подверглись анализу механизмы, критерии и показатели оценки социально-инновационных процессов в вузе. Подробно описывается процедура экспертизы проектов, солидную разработку получила проблема гуманитарности проекта (отражение в проекте гуманистического мировоззрения) и пр.

В русле повышенного внимания к особенностям финансирования университетских инновационных программ в условиях экономического кризиса и ограниченного бюджета написана работа О. А. Латухи [19]. Автор анализирует два основных подхода к развитию вузов. *Во-первых*, создание так называемых исследовательских университетов. *Во-вторых*, разработка концепции "ведущего вуза". Подчеркивая необходимость сохранения культурного наследия высшей школы как фактора инновационного развития, исследователь указывает на необходимость совмещения модели исследовательского вуза и ведущего вуза следующим образом: *во-первых*, выбрать приоритетные направления развития отечественной экономики; *во-вторых*, включить в государственную рейтинговую оценку вузов международные показатели; *в-третьих*, протестировать по ней все российские вузы и выделить лидеров, которым предоставлять целевое финансирование [19, с. 49].

Пристальное внимание к инновационной деятельности в контексте информационной безопасности является характерной приметой текущего этапа развития науки [20, 21, 22, 23]. Поднимаются такие проблемы, как, например, влияние конкуренции в научной работе на информационную безопасность, анализ состава рисков, связанных с информационной без-

опасностью научной деятельности [21, с. 113]. Следует отметить обоснованное стремление выявить "информационную опасность", возникающую в процессе обработки больших объемов персональных данных физических лиц, "коммерчески значимой" для вуза информации [21, с. 114]. Интересные обобщения делает Ю.М. Брумштейн, анализируя структуру рисков информационной безопасности, "для региональных вузов в целом", которая *включает в себя*: несвоевременное и неполное получение информации, значимой для научной деятельности региональных вузов; слабую координацию действий преподавателей и сотрудников администрации вузов и, как следствие, возникновение неуправляемой внутренней конкуренции за тематику научных исследований, гранты и пр.; неэффективность затрат ресурсов на разработку тем с низкой научной и практической значимостью; потерю приоритета региональных вузов на результаты научных исследований из-за несвоевременной их публикации; несанкционированные утечки информации о предполагаемых к проведению в региональных вузах перспективных исследованиях и разработках; слабое "продвижение" в информационном пространстве результатов научной деятельности, снижающее его "научную репутацию"; выявление плагиата сотрудников (преподавателей) региональных вузов; потерю накопленной и передаваемой информации в региональных вузах; потерю региональными вузами имущественных прав на объекты интеллектуальной собственности. Необходимо указать и на неутешительные выводы, к которым пришел Ю.М. Брумштейн, он, в частности, констатировал тот факт, что научная деятельность в региональных вузах осуществляется в условиях жесткой конкуренции за весьма ограниченные ресурсы, а недостаточное информационное обеспечение научной деятельности – один из важнейших факторов снижения ее результативности и повышения информационных рисков [21, с. 119].

Информационно-правовые и этические аспекты стали предметом статьи К.Е. Миронова [23]. Немаловажным достоинством предлагаемого автором подхода является то, что инновационная деятельность рассматривается в свете необходимости оградить студентов от "информационного мусора", научить их использовать только достоверные источники информации [23, с. 63]. Обратил внимание исследователь и на современный рынок образовательных услуг с точки зрения инноваций (как конкретных нововведений) и информационной безопасности. По мнению К.Е. Миронова, в современных условиях конкурентоспособным окажется тот вуз, который предложит качественно новые решения в сфере образовательных услуг и сможет охранять их содержание от конкурентов [23, с. 63]. Не обошел стороной исследователь стратегию инновационного развития нашей страны на период до 2020 г. В выводах констатируется необходимость дальнейшей серьезной работы на законодательном уровне, которая позволила бы сделать инновационную деятельность более свободной от государственного регулирования и бюрократических проволочек.

Интерес для нашей темы представляют наблюдения, сделанные В.М. Володиным [24], который, среди прочего, исследовал механизмы совершенствования управления процессами менеджмента инновационно ориентированных вузов и интеграцию университетов в систему национальной экономики. Отмечено, что зарубежные страны существенно обгоняют российские вузы в этом вопросе. Подобное положение, как указывает исследователь, объясняется недостаточным использованием отечественного научного потенциала [24, с. 155]. Важным представляется тезис В.М. Володина о необходимости развития инновационной деятельности вузов на уровне региональных органов власти на основе комплексного планирования и реализации программ социально-экономического развития области. Например, снижение совокупной налоговой нагрузки на региональный сектор экономики, участвующий в процессе интеграции научной деятельности совместно с региональными вузами, законодательно закрепленное налоговое стимулирование всех участников национальной системы инноваций [24, с. 159].

На важный аспект коммерциализации научных разработок как результата инноваци-

онной деятельности обратил внимание А.А. Владыкин [25], который сосредоточился на исследовании процесса практического использования результатов научных исследований и разработок с целью вывода их на рынок и получения коммерческого эффекта.

Система образования как составная часть экономики стала предметом исследования в работе Л.Ф. Голубевой [26]. Инновационная деятельность представлена важнейшим условием подъема качества образования.

Статистическому анализу и мониторингу опыта инновационной деятельности в регионах России на примере работы Федеральных инновационных площадок (ФИП) посвящена статья Е.А. Осиповой [27]. Для нас особо ценны ее выводы о необходимости финансовой и административной поддержки инновационных проектов, заинтересованности органов исполнительной власти в развитии образования как на федеральном, так и на региональном уровне.

Подводя итог, необходимо констатировать, что в современной российской науке, несмотря на ряд весомых достижений, исследование различных аспектов инновационной деятельности только становится одним из важнейших направлений работы ученых, а проблемы, связанные, например, с вопросами законодательного и информационно-методического обеспечения инновационного потенциала регионального вуза пока, еще остаются на периферии научного интереса.

#### Библиографический список

1. **Журавлевская, Н.Т.** Методология, теория и практика системного управления развитием инновационной деятельности в высшем образовании. – Томск: Томский гос. ун-т, 2007. – 293 с.
2. **Гарайбех, Ю.А.** Организация инновационной деятельности в системе высшего образования России / Ю.А. Гарайбех. – Астрахань: Нова, 2007. – 307 с.
3. **Федоров, О.В.** Инновационная деятельность / О.В. Федоров. – М.: Инфра-М, 2007. – 514 с.
4. **Старжинский, В.П.** Методология науки и инновационная деятельность / В.П. Старжинский. – М.: Инфра-М, 2013. – 326 с.
5. **Антонец, В.А.** Основы инновационной деятельности / В.А. Антонец. – Н. Новгород: Нижегородский гос. ун-т им. Н.И. Лобачевского, 2014. – 303 с.
6. **Куликова, Ю.П.** Управление инновационным развитием образовательных учреждений высшего профессионального образования на основе интеграции учебного процесса, научной деятельности и бизнеса / Ю.П. Куликова. – М.: АПИИТ "ГИРОМ", 2012. – 92 с.
7. Итоги и перспективы интегрированной системы образования в высшей школе России: образование – наука – инновационная деятельность: труды II Международной научно-практической конференции 26 – 28 октября 2011 года / под ред. Л.В. Кожитова. – М.: Изд-во МГИУ, 2011. – 830 с.
8. Инновации в системе высшего образования: материалы III-й Всероссийской научно-методической конференции / отв. ред. А.В. Федоров. – Челябинск: НОУ ВПО "Челябинский ин-т экономики и права им. М.В. Ладосина, 2012. – 114 с.
9. Образовательное пространство вуза: состояние, тенденции инновационный потенциал: материалы межвузовской научно-практической конференции преподавателей и студентов, г. Новороссийск, 16 – 18 февраля 2015 г. / отв. ред. С.Е. Ратенко. – Новороссийск: Кубанский гос. ун-т, 2015. – 148 с.
10. **Халин, В.Г.** Инновационная деятельность в университетах современной России [Текст] / В.Г. Халин // Интеграция образования. 2006. № 1. С. 13–22.
11. **Муратова, Е.И.** Дедуктивные условия повышения эффективности подготовки магистров к инновационной деятельности в условиях регионального технического вуза // Инновация. – 2006. – № 9. – С. 82–83.
12. **Адольф, В.А.** Инновационная деятельность в образовании: проблемы становления // Высшее образование в России. – 2010. – № 1. – С. 81–87.



13. **Гомбоева, М.И.** Корпоративная культура и управление эффективностью научно-исследовательской деятельности в региональном вузе // Гуманитарный вектор. Серия: Педагогика, психология. – 2010. – № 1. – С. 205–217.
14. **Гомбоева, М.И.** Управление эффективностью НИР в региональном вузе: публицистическая активность и грантовая деятельность ППС // Гуманитарный вектор. Серия: Педагогика, психология. – 2012. – № 1. – С. 172–178.
15. **Шкурко, А.В.** Развитие научного потенциала региональных вузов как способ преодоления проблем анклавной модели инновационной системы // Инновации. – 2010. – № 2. – С. 65 – 72.
16. **Горюнова, Е.В.** Инновационная деятельность региональных вузов и некоторые возможности её финансирования // Вестник Российского университета дружбы народов. Сер.: Экономика. – 2010. – № 3. – С. 31–36.
17. **Азарова, Р.И.** Подходы к организации инновационной деятельности в вузе как условие совершенствования качества образования (на примере регионального вуза) // Экономика, Статистика и Информатика. – 2011. – № 1. – С. 3–7.
18. **Ковтунова, А.Н.** Организация инновационной деятельности в вузе // Педагогическое образование в России. – 2011. – № 2. – С. 164–169.
19. **Ерыгина, Л.В.** Возможности коммерциализации инновационных разработок в вузе // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетникова. – 2011. – № 6. – С. 195–200.
20. **Митрофанова, Т.Ю.** Выбор конкурентной стратегии вуза на основе анализа капитализации бренда // Проблемы науки и образования. – 2010. – № 15. – С. 398–401.
21. **Жданов, С.А.** Высшие учебные заведения России и инновационная экономика // Региональная экономика: теория и практика. – 2014. – № 4. – С. 29–33.
22. **Яненко, М.Б.** Маркетинговые инновации в экономике знаний: современное состояние, проблемы и перспективы развития // Техничко-технологические проблемы сервиса. – 2015. – № 2. – С. 88–95.
23. **Софронова, К.И.** Роль и место вуза в современной экономической, национальной и региональной инновационных системах // Экономика образования. – 2011. – № 2. – С. 24–30.
24. **Софронова, К.И.** Интеграция региональной инновационной инфраструктуры с научно-инновационной деятельностью вуза // Экономические науки. – 2009. – № 10. – С. 16–22.
25. **Чванова, М.С.** Социальное партнерство – один из механизмов совершенствования социально-инновационной деятельности вуза // Образовательные технологии и общество. – 2012. – № 3. – С. 581 – 601.
26. **Латуха, О.А.** Инновационная деятельность современного вуза // Вестник Новосибирского государственного педагогического университета. – 2012. – № 4. – С. 44 – 51.
27. **Садердинов, А.А.** Информационная безопасность предприятия / А.А. Садердинов. – М.: Издательско-торговая корпорация "Дашков и Ко", 2004. – 336 с.
28. **Брумштейн, Ю.М.** Научная деятельность в региональных вузах: анализ вопросов информационной безопасности // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2012. – № 5. – С. 113 – 120.
29. **Шевко, Н.Р.** Актуальные проблемы обеспечения информационной безопасности современного общества // Вестник Казанского юридического института МВД России. – 2012. – № 8. – С. 16–28.
30. **Миронов, К.Е.** Информационная безопасность в инновационной деятельности образовательных учреждений // Вестник Нижегородского государственного инженерно-экономического университета. – 2013. – № 1. – С. 60–65.
31. **Володин, В.М.** Некоторые аспекты современного видения инновационной работы в вузе // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. – 2013. – № 2. – С. 155–163.
32. **Владыкин, А.А.** Коммерциализация научных разработок как результат инновационной деятельности и способ дополнительного финансирования высшего учебного заведения // Теория и практика общественного развития. – 2013. – № 4. – С. 219–223.
33. **Голубева, Л.Ф.** Инновационная деятельность в высшем образовании // Социально-экономические явления и процессы. – 2013. – № 7. – С. 35–40.

34. **Осипова, Е.А.** Инновационная деятельность в образовании: актуальные проблемы и направления развития // Успехи современной науки. – 2016. – Т.1. – № 9. – С. 55–58.

*Дата поступления  
в редакцию 04.02.2018*

**D.G. Ryzhakov**

**THE MAIN DIRECTIONS OF INNOVATIVE ACTIVITY IN THE SYSTEM  
OF HIGHER EDUCATION OF THE RUSSIAN FEDERATION  
(ON THE MATERIALS OF THE LATEST PERIODICAL PUBLICATIONS)**

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

**Purpose:** The main directions of innovative activity in the system of higher education of the Russian Federation are considered. An attempt is made to analyze the most important tendencies of contemporary scientific discussions on various aspects of innovative activity in the Russian higher education.

**Design/methodology/approach:** The article uses a comparative analysis of numerous publications devoted to innovation in the system of national higher education.

**Findings:** The conclusion is made about the need for further study of various aspects of innovations in higher education, for example, legislative and information-methodological support of innovations in higher education.

**Originality/value:** The overview of opinions presented in this article can be useful in developing further problems of innovation in higher education.

*Key words:* innovation, higher education, scientific periodicals.

УДК 629.5.064-52

А.В. Соловьёв

**ПРЕДПОСЫЛКИ К СОЗДАНИЮ ЕДИНОГО ЦЕЛЕОРИЕНТИРОВАННОГО  
УПРАВЛЕНИЯ СУДОВОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКОЙ**

ФГБОУ ВО "Волжский государственный университет водного транспорта"

Показано, что современное развитие компьютерных аппаратных средств, информационных сетей и цифровых технологий позволяет реализовывать сложные иерархические алгоритмы управления, позволяющие снизить эксплуатационные издержки и компенсировать снижение профессионального уровня кадрового состава флота.

Рассмотрены вопросы повышения эффективности работы судовой энергетической установки (СЭУ). В работе продемонстрировано, что существуют с позиций безопасности и являются важными множество факторов, которые должен учитывать как судоводитель, так и настраиваемая им система автоматизированного управления. Предлагается такая идеология системы, в которой человек (судоводитель) выбирает режим управления СЭУ (не режим работы пропульсивного комплекса), а система автоматически активизирует те или иные объекты СЭУ, которые должны работать на обеспечение этого режима. Такой подход позволяет создать единую целеориентированную систему автоматического управления СЭУ, предусматривающую восемь сценариев управления, на основе которых разрабатывается линейка настроек. Приведено описание сценариев управления СЭУ при их реализации.

*Ключевые слова:* система автоматического управления, судовая энергетическая установка, сценарий управления, эффективность работы СЭУ.

Комплексные процессы сбора, обработки, хранения и передачи информации (информатизация) в последние десятилетия во всем мире все активнее внедряются в практическую деятельность организаций, функционирующих в различных областях техники, в том числе в сфере транспортных услуг. Судостроение относится к традиционно консервативным отраслям техники, но и здесь в связи с высокими темпами развития электронных систем контроля и мониторинга судовые двигатели и другие объекты судовых энергетических установок (СЭУ) мировых производителей в настоящее время оснащаются такими приборами и системами контроля и мониторинга (датчиками, сенсорами, извещателями и т. п.), о чем еще вчера можно было только мечтать. Естественно, что следующим шагом технического прогресса в судостроении будет создание интеллектуальных информационных систем, позволяющих снизить эксплуатационные издержки и компенсировать снижение профессионального уровня кадрового состава флота, наблюдающегося в последнее время во всем мире.

Создание и развитие таких систем в настоящее время становится приоритетным направлением государственной политики, о чем свидетельствует утверждение распоряжением Правительства Российской Федерации от 28 июля 2017 г. № 1632-р программы «Цифровая экономика Российской Федерации». Применительно к внутреннему водному транспорту цифровой экономикой автор считает совокупность отношений, складывающихся в системе оказания транспортных услуг, основывающихся на новых методах генерирования, обработки, хранения, передачи данных, а также цифровых компьютерных технологиях.

Один из трех уровней цифровой экономики представляют «платформы и технологии, где формируются компетенции для развития рынков и отраслей экономики (сфер деятельности)». Следовательно, для отрасли внутреннего водного транспорта важной целью в рамках государственной Программы цифровой экономики является создание цифровых технологий, способствующих развитию отрасли и прежде всего флота, т.е. языком Программы способствующих «формированию исследовательских компетенций».

**Примечание.** Компетенция – неаддитивная, синергетическая система знаний, умений, навыков и способностей, объединенных ее ключевым системообразующим элементом (конфигуратором) и

направленных на решение определенных задач деятельности. *Профессиональная компетенция* – способность успешно действовать на основе практического опыта, умения и знаний при решении профессиональных задач. Компетенции можно рассматривать как возможность установления связи между наличными знаниями и требованиями ситуации, как умение-способность в определенных условиях найти действие, адекватное проблемной ситуации.

Обычно понятие *компетенции* связывают с субъектами, системы обучения которых формируют их компетенции в определенных областях знания и техники. Но немаловажным обстоятельством является то, что человек (субъект компетенции) на современном уровне развития техники и ее автоматизации в силу ограниченности психофизиологических возможностей человеческого индивидуума в сложных условиях не всегда может найти управленческое действие, адекватное проблемной или иной эксплуатационной ситуации. Особенно ярко это проявляется на современных судах с высоким уровнем автоматизации, когда судоводитель должен практически мгновенно принимать решения, направленные на удовлетворение множества требований, выдвигаемых эксплуатационной ситуацией (безопасность судоходства, экономия энергоресурсов, экологическая безопасность и т. д.).

Именно здесь цифровые технологии, основанные на знаниях в различных областях техники и опыте специалистов, другими словами, искусственный интеллект, и должны заменить интеллект человека-оператора, который не всегда может охватить и оценить многоуровневую задачу во всей ее многомерной сложности.

Так же отметим, что в соответствии со «Стратегией развития внутреннего водного транспорта РФ на период до 2030 г.» [1] приоритетными задачами являются повышение безопасности, экологичности и энергоэффективности перевозок на внутреннем водном транспорте (ВВП). При этом одной из актуальных задач для повышения эффективности использования флота на перевозках является снижение эксплуатационных издержек, которое может быть достигнуто путем рационального использования топлива и совершенствования технической эксплуатации флота.

Решение указанных задач в первую очередь необходимо для обеспечения конкурентоспособности внутреннего водного транспорта по отношению к другим видам транспорта.

Введем понятие *эффективности работы СЭУ*, которое будем использовать для проведения общего анализа. Под эффективностью работы СЭУ будем понимать отношение требуемой для движения судна по расписанию мощности с обеспечением энергией всех потребителей судна при данных эксплуатационных путевых условиях ко всей затраченной энергии (ресурсам), необходимой для получения мощности и энергии. Повышение эффективности работы СЭУ достигается максимально возможным в данных эксплуатационных условиях снижением затрат энергии и ресурсов, прежде всего расхода топлива, необходимых для получения полезного эффекта.

Анализ литературных источников [2-6] показывает, что повышение эффективности работы СЭУ может быть достигнуто следующими основными способами:

- 1) обеспечением постоянного во времени эксплуатации исправного состояния двигателей и других судовых технических средств судна, параметры рабочего процесса и технического состояния которых регламентированы технической документацией изготовителя. Особое внимание при этом следует уделить поддержанию исправного технического состояния топливной аппаратуры потребителей топлива;

- 2) обеспечением постоянного во времени эксплуатации исправного состояния движительно-рулевого комплекса;

- 3) выбором судоводителем при осуществлении рейса таких режимов работы ГД, которые обеспечивают минимально возможный расход топлива в данных эксплуатационных условиях, т.е. при данной глубине судового хода, извилистости фарватера, путевой обстановке, ограничениями на скорость движения, накладываемых местными правилами плавания, давлением ветра и волнением водной поверхности;

- 4) исключением из работы ненужных в данный период времени судовых потребителей энергии, прежде всего электрической;

5) введением в действие резервов энергосбережения, из которых наиболее пригодны для реализации мероприятия по утилизации на судне вторичной теплоты, т.е. теплоты сгоревшего топлива, не преобразованной в работу при осуществлении рабочего процесса главных и вспомогательных двигателей, не переданную теплоносителю в автономных и утилизационных котлах, вырабатываемую холодильными машинами и другими объектами СЭУ.

Наиболее эффективным направлением энергосбережения является экономия топлива ГД и ДГ в процессе эксплуатации судна, так как расходы на топливо в себестоимости речных перевозок достигают 30 % [7].

На экономичность ГД и ДГ оказывает влияние большое количество эксплуатационных факторов, которые можно разделить на две основные группы. *Первую* составляют факторы, относящиеся непосредственно к двигателю, а именно:

- температурный режим двигателя;
- состояние регулировки двигателя;
- износы узлов и деталей;
- работа агрегатов наддува и т. д.

*Вторая группа* применительно к ГД включает в себя ряд внешних факторов и условий, определяющих режим работы судового комплекса, к ним относятся:

- путевые условия при движении судна на глубокой воде и мелководье;
- движение с полной загрузкой или порожнем;
- движение с составом или легкачом;
- циркуляция;
- работа на швартовах;
- плавание во льдах;
- плавание в условиях тихой погоды или в шторм.

*Факторы первой группы* относятся к показателям технического состояния ДВС. Влияние этих факторов может быть минимизировано путем непрерывного контроля параметров рабочего процесса при эксплуатации двигателя и немедленного реагирования обслуживающего персонала на отклонение этих факторов и показателей работы двигателя от их допускаемых значений, указанных в технической документации изготовителя.

*Факторы второй группы* влияют на экономичность ГД, при этом наиболее существенную роль играет правильный выбор режимов его работы в различных условиях эксплуатации. Для выполнения требований рационального использования топлива эти режимы должны располагаться в области, ограниченной, с одной стороны, допустимыми величинами мощности или среднего эффективного давления, с другой – одной из экономических характеристик. В самом простом варианте система автоматического управления главными двигателями позволит реализовать необходимый режим их работы на различных участках пути, в соответствии с рассчитанными режимами движения судна, используя традиционную для большинства судоходных компаний систему порейсового нормирования расхода топлива. В этом случае закон изменения управляемой величины (режим работы главного двигателя) должен быть известен заранее, что чревато существенными погрешностями нормирования.

Вопросы нормирования расхода топлива нашли отражение в работах Г.А. Самыкина, Г.А. Конакова, В.А. Пискунова и других авторов, результатами которых стала разработка системы порейсового нормирования, обеспечивающей возможность выбора «оптимальных» режимов движения в зависимости от нагрузки и путевых условий. Понятно, что при разработке методов расчета порейсовых норм расхода топлива важное значение имеет правильная оценка влияния мелководья на режимы движения судна, так как при прохождении судном фарватера с ограниченными глубинами сопротивление воды его движению резко возрастает, приводя при произвольном выборе скорости к значительному возрастанию расхода топлива. Поэтому, как бы всесторонне не решался вопрос о выборе скорости судна, одной из важнейших задач является оценка выбранных режимов с точки зрения рациональности топливоиспользования.

Системы порейсового нормирования расхода топлива обеспечивают достаточно точный учет влияния таких факторов, как глубина фарватера, скорость течения реки и количество перевозимого груза. Использование порейсовых норм расхода топлива позволяет судить о техническом состоянии судна и СЭУ. Но системы порейсового нормирования топлива имеют существенные недостатки, такие как:

- необходимость судоводителю вручную задавать (выдерживать) нужные режимы работы главных двигателей на различных участках пути и различных внешних условиях, поэтому практически всегда будет присутствовать ошибка выбора наиболее экономичного в данных условиях режима работы главных двигателей;
- не учитываются режимы работы при циркуляции, на швартовах, плавании во льдах и штормовую или тихую погоду.

Ясно, что порейсовое нормирование расхода топлива мало пригодно для той системы управления объектами СЭУ, которая могла бы быть форсайтом элементов искусственного интеллекта, действия которого при автоматизированном управлении СЭУ на порядок будут более эффективными с позиций топливосбережения, нежели действия человека-судоводителя, пусть даже вооруженного порейсовой системой нормирования топлива.

Для целей настоящей работы более перспективным представляется разработка системы автоматического управления главными двигателями на основе алгоритма, позволяющего в режиме онлайн выбирать самые эффективные по топливосбережению режимы работы главных двигателей в зависимости от факторов второй группы.

На основе анализа изложенного ранее материала можно сделать вывод о том, что добившись максимально возможной в тех или иных путевых условиях экономичности судна по топливу, автоматически будет решена проблема выбора «оптимальных» режимов движения судна. Существуют и являются с позиций безопасности важными множество факторов, которые должен учитывать как судоводитель, так и настраиваемая им система автоматизированного управления. Это и экологическая безопасность судна, и необходимость развития ГД максимальной мощности в особых обстоятельствах, и необходимость поддержания регламентированной скорости движения на том или ином плесе, и целесообразность обеспечения максимальной долговечности элементов СЭУ, а также требование обеспечения максимально возможной безопасности судна в рейсе или при погрузке, если будет получен сигнал о возможной угрозе безопасности судна, и необходимость перехода на маневровый режим работы СЭУ и технических средств судна.

Анализ показывает, что невозможно одновременно реализовать цели максимальных экономичности и экологичности, а также долговечности оборудования судна и т. д. Поэтому полная автоматизация процесса управления судном и СЭУ без участия человека в ближайшем будущем вряд ли возможна и это должно быть учтено при разработке модели автоматизированного управления СЭУ. В связи с этим автором предлагается такая идеология подобных систем, в которых человек (судоводитель) выбирает режим управления СЭУ (не режим работы пропульсивного комплекса), а система автоматически активизирует те или иные объекты СЭУ, которые должны работать на обеспечение данного режима.

Выполненные автором предварительные исследования и его опыт эксплуатации электроэнергетических установок судов речного флота позволили предложить концепцию единого целеориентированного автоматического управления (ЕЦСУ) СЭУ, предусматривающую восемь сценариев управления, на основе которых разрабатывается линейка настроек модели.

Оставляя за рамками статьи особенности функционирования объектов СЭУ при реализации того или иного сценария управления, перечислим предлагаемые сценарии управления СЭУ.

**Сценарий 1.** Объекты СЭУ с момента прохождения сигнала о соответствующем действии (намерении) судоводителя переключаются на обеспечение максимальной мощности главных двигателей. Необходимость такого режима работы СЭУ возникает крайне редко и может потребоваться при выведении судна на безопасный плес под угрозой столкновения с

другими судами или плавучими объектами, намеренном выбрасывании судна на мель, снятии с мели и т. п.

**Сценарий 2.** Объекты СЭУ с момента прохождения сигнала о соответствующем действии (намерении) судоводителя переключаются на режим обеспечения номинальной мощности СЭУ. Необходимость такого режима работы СЭУ возникает при несоответствии графика движения судна временным ориентирам, задаваемым расписанием.

**Сценарий 3.** Объекты СЭУ с момента прохождения сигнала о соответствующем действии (намерении) судоводителя переключаются на режим обеспечения максимальной экономичности СЭУ. Такой режим может быть назначен судоводителем, если имеется запас ходового времени по сравнению графиком движения, задаваемым расписанием.

**Сценарий 4.** Объекты СЭУ с момента прохождения сигнала о соответствующем действии (намерении) судоводителя переключаются на режим обеспечения минимальной или регламентированной скорости движения. Такой режим может быть назначен судоводителем при прохождении судном работающих и неработающих судов технического флота, пришвартованных к береговым причальным сооружениям судов в узостях, при движении судна в каналах и т. д.

**Сценарий 5.** Объекты СЭУ с момента прохождения сигнала о соответствующем действии (намерении) судоводителя переключаются на режим обеспечения максимальной экологической безопасности СЭУ. Такой режим может быть назначен судоводителем при прохождении судном природоохранных зон, гидроузлов, городов и крупных сельских поселений.

**Сценарий 6.** Объекты СЭУ с момента прохождения сигнала о соответствующем действии (намерении) судоводителя переключаются на режим обеспечения максимальной долговечности элементов СЭУ. Этот режим во многом близок к режиму, соответствующему сценарию 3, но отличается от него переходом на указанные в технической документации «щадящие» режимы работы главных двигателей, дизель-генераторов, насосов, сепараторов, компрессоров и других объектов СЭУ, максимальная долговечность которых играет важную роль в обеспечении экономических показателей эксплуатации судна. Такой режим может быть назначен судоводителем, если имеется запас ходового времени по сравнению графиком движения, задаваемым расписанием.

**Сценарий 7.** Объекты СЭУ с момента прохождения сигнала о соответствующем действии (намерении) судоводителя переключаются на режим обеспечения максимальной технической безопасности судна в рейсе, при погрузке и (или) на стоянке. Такой режим может быть назначен судоводителем, если он получит информацию о возможной угрозе безопасности судна.

**Сценарий 8.** Объекты СЭУ с момента прохождения сигнала о соответствующем действии (намерении) судоводителя переключаются на маневровый режим (режим ручного управления главными двигателями, подруливающими устройствами, движителями).

Для каждого сценария разработаны протоколы управления объектами СЭУ для реализации данного сценария [8].

Анализ возможных действий системы с тем или иным сценарием управления показывает, что для сценариев 1, 2, 4, 6, 7 и 8 дополнительной разработки критериев результативности, на которые должна быть ориентирована система управления, не требуется – такими критериями являются:

- для сценария 1 – максимальная мощность главных двигателей;
- для сценария 2 – номинальная мощность главных двигателей;
- для сценария 4 – скорость движения судна;
- для сценария 6 – режимы работы объектов СЭУ, обеспечивающие их наибольшую долговечность;
- для сценария 7 – предупреждение угроз безопасности судна или ликвидация таких угроз;
- для сценария 8 – автоматическое управление и критерий результативности такого управления не требуется.

Однако для сценариев 3 и 5 критерии результативности автоматического управления требуются и таковыми, по мнению автора, могут быть для сценария 3 энергетическая эффективность [9], а для сценария 5 – экологическая эффективность судна [10].

Предложенная в работе ЕЦСУ СЭУ позволяет повысить техническую безопасность плавания, экологическую и энергетическую эффективность и снизить эксплуатационные издержки, так как при любых условиях эксплуатации судна задаются наиболее оптимальные режимы работы объектов СЭУ, заранее определенные сценарием управления.

#### Библиографический список

1. Министерство транспорта Российской Федерации. Стратегии развития внутреннего водного транспорта Российской Федерации на период до 2030 года. – М.: 2013. – 137 с.
2. Судовые энергетические установки / А.В. Артемов [и др.]. – Л.: Судостроение, 1987. – 480 с.
3. **Абрамов, Г.А.** Разработка концепции утилизации теплоты на речных судах: дисс. ... канд. техн. наук / Абрамов Г.А. – Н. Новгород: ГИИВТ, 1994. – 141 с.
4. **Маслов, В.В.** Утилизация теплоты судовых дизелей / В.В. Маслов. – М.: Транспорт, 1990. – 144 с.
5. **Васильев, Б.В.** Диагностирование технического состояния судовых дизелей / Б.В. Васильев, Д.И. Кофман, С. Г. Эренбург; под ред. д-ра техн. наук проф. Б.В. Васильева. – М.: Транспорт, 1982. – 144 с.
6. **Моек, Е.** Техническая диагностика судовых машин и механизмов: [пер. с нем. Э. Б. Кублановой] / Е. Моек, Х. Штрикерт. – Л.: Судостроение, 1986. – 232 с.
7. **Самыкин, Г.А.** Исследование эксплуатационной экономичности главных двигателей речных теплоходов: дисс. ... канд. техн. наук / Самыкин Г.А. – Горький ГИИВТ, 1975. – 207 с.
8. **Соловьёв, А.В.** Концепция единого целеориентированного управления судовой энергетической установкой // Вестник государственного университета морского и речного транспорта имени адмирала С.О. Макарова, 2017. – Т 9. – № 5. – С. 1027–1039.
9. **Соловьёв, А.В.** Энергетическая эффективность судов / А.В. Соловьёв, П.И. Бажан, И.В. Голубев // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта.– Н. Новгород: Изд-во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2017. – Вып. 50. – С. 260–268
10. **Соловьёв, А.В.** Методика оценки экологической эффективности судов внутреннего плавания // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. – 2017. – Т.9. – №2. – С. 306–322.

*Дата поступления  
в редакцию 19.01.2018*

**A.V. Soloviev**

#### THE PRECONDITIONS FOR THE CREATION OF A UNIFIED GOAL DIRECTED MANAGEMENT OF MARINE POWER PLANT

Volga state university of water transport

**Purpose:** The issues of improving the efficiency of the ship power plant (SPP). The paper demonstrates that there are many important factors from the point of view of safety that must be taken into account both by the shipmaster and by setting up an automated control system. It is proposed that the ideology of the system in which a person (shipmaster) chooses the mode of control of SPP (not the mode of operation of the propulsion system), and the system automatically activates certain objects of SPP, which should work to ensure this regime.

**Methodology:** The methodology of the system approach is used in the study (system analysis and system synthesis).

**Findings/Research implications:** The concept of a single purpose-oriented control system SPP, providing for eight management scenarios.

**Value:** The proposed system of purpose-oriented control of the ship power plant can improve the technical safety of navigation, environmental and energy efficiency and reduce operating costs, because under any conditions of operation of the vessel are given the most optimal modes of operation of SPP objects, pre-defined management scenario.

*Key words:* automatic control system, ship power plant, the management scenario, the efficiency of SPP.



УДК 519.766

И.Д. Чернобаев, А.С. Суркова, А.З. Панкратова

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕКСТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕКУРРЕНТНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева

Посвящена построению и исследованию модели текстов на естественном языке, основанных на использовании рекуррентных нейронных сетей. Авторами предложена модификация модели за счет применения ненасыщаемой логарифмической функции активации.

Рассмотрено использование предложенной методики построения модели для задач автоматического реферирования текстов, сравнение со стандартными методами показало лучшие результаты для предложенной модификации.

*Ключевые слова:* нейронная сеть, рекуррентная нейронная сеть, Long-Short-Term-Memory, функция активации, обработка естественных языков, Encoder-Decoder.

### Введение

Моделирование текстов является актуальной задачей в связи с непрерывным ростом информации, доступной в текстовом виде. Данная задача является подзадачей в таких областях, как анализ тональности текста, автоматическое реферирование, определение автора текста, классификация и кластеризация текстовых данных.

Существует множество различных видов моделей, наиболее распространенными из которых являются: векторная модель, модель на основе N-грамм, и модели на основе нейронных сетей, которые в свою очередь подразделяются на Word2Vec, CBOW, skip-gram и другие [1]. Векторная модель рассматривает текст как неупорядоченное множество слов и применяется при решении задач классификации и кластеризации документов, реферирования текстов, поиска документов по запросу. Модель на основе N-грамм основана на применении статистического подхода и используется в задачах, связанных с распознаванием речи, машинным обучением и сжатием данных. Нейросетевые модели успешно применяются при решении задачи машинного перевода, аннотирования изображений, распознавания речи, классификации текстов благодаря способности нейронных сетей автоматически усваивать закономерности обучающей выборки. Актуальность нейросетевых моделей обусловлена тем, что при правильном обучении такие модели превосходят альтернативные.

Целью данной работы является исследование модели представлений текстов на основе рекуррентной нейронной сети.

### Теоретический анализ

На сегодняшний день моделирование текстов с использованием нейронных сетей является одним из наиболее успешных методов языкового моделирования. Языковое моделирование ставит своей задачей выявить закономерности естественного языка, важные при решении конкретных задач.

Языковая модель [2] позволяет определить вероятность предложения как:

$$P(w_1, w_2, \dots, w_m) = \prod_{i=1}^m P(w_i | w_1, \dots, w_{i-1}),$$

где  $w_i$  – слова предложения;  $P(w_1, w_2, \dots, w_m)$  – вероятность предложения;  $P(w_i | w_1, \dots, w_{i-1})$  – вероятность появления слова  $w_i$  после последовательности слов  $w_1, \dots, w_{i-1}$ ;  $m$  – число слов в предложении.

Вероятность предложения определяется произведением условных вероятностей каждого слова при условии наличия предшествующих слов. Например, вероятность предложения "Рукописи не горят" определяется как вероятность слова "горят" при условии "Рукописи не", умноженная на вероятность "не" при условии "Рукописи":

$$P(\text{"Рукописи не горят"}) = P(\text{"горят"}|\text{"Рукописи не"}) * P(\text{"не"}|\text{"Рукописи"})$$

Способность учета предшествующих элементов последовательности – отличительная особенность рекуррентной нейронной сети (РНС) [3]. Нелинейная функция активации используется повсеместно в нейронных сетях для осуществления процесса обучения.

При обучении стандартных РНС на длинных предложениях возникает проблема исчезающего градиента. Суть ее заключается в том, что значение производной от нелинейной функции активации может принимать значения, близкие к нулю (рис. 1), которые, в свою очередь, передаются через цепь произведений и приводят к «исчезновению» итоговых изменений градиента.

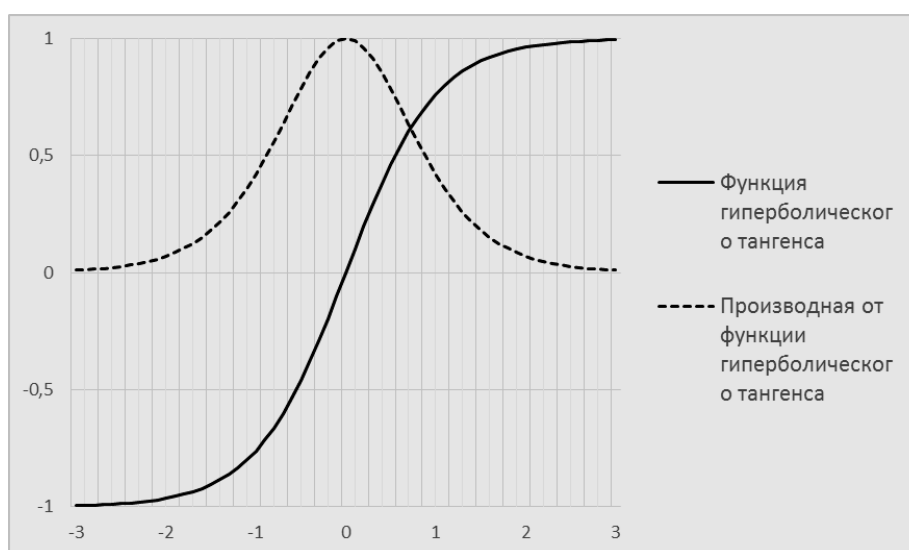


Рис. 1. График функции гиперболического тангенса и его производной

Для решения данной проблемы была разработана специальная архитектура РНС - сеть с долговременной-краткосрочной памятью (Long-Short-Term-Memory (LSTM)), представленная в [4]. Данный тип сетей широко применяется в области обработки естественного языка. Противостоять проблеме исчезающего градиента LSTM сети позволяет механизм фильтров. Этот механизм дает возможность регулировать поступление новой информации в вектор состояния  $c_t$  сети, а также вывод состояния  $h_t$  сети и обновление ее состояния  $c_t$ . Векторы фильтров сети определяются по формулам:

$$i_t = \sigma(U_i \cdot x_t + W_i \cdot h_{t-1}), \quad (1)$$

$$f_t = \sigma(U_f \cdot x_t + W_f \cdot h_{t-1}), \quad (2)$$

$$o_t = \sigma(U_o \cdot x_t + W_o \cdot h_{t-1}), \quad (3)$$

$$g_t = \tanh(U_g \cdot x_t + W_g \cdot h_{t-1}), \quad (4)$$

где  $\sigma(z) = \frac{1}{1+e^{-z}}$  – сигмоидальная функция;  $\tanh(z) = \frac{e^z - e^{-z}}{e^z + e^{-z}}$  – функция гиперболического тангенса;  $x$  – входная последовательность;  $h$  – вектор скрытого состояния ячейки сети;  $U_i, U_f, U_o, U_g, W_i, W_f, W_o, W_g$  – матрицы весовых коэффициентов фильтров сети  $i, f, o, g$ ; индекс  $t$  – индекс элемента обучающей последовательности.

На основании значений фильтров сети определяются ее вектора внутреннего состояния (внутренней памяти) и скрытого состояния:

$$c_t = \text{tah}(i_t \circ g_t + f_t \circ c_{t-1}), \quad (5)$$

$$h_t = o_t \circ c_t, \quad (6)$$

где  $c_t$  - вектор внутреннего состояния ячейки сети;  $h_t$  - вектор скрытого состояния ячейки сети;  $\circ$  - операция поэлементного произведения.

Уравнения (1) – (6) соответствуют этапу прямого распространения сигнала по сети. Структура ячейки LSTM сети представлена на рис. 2.

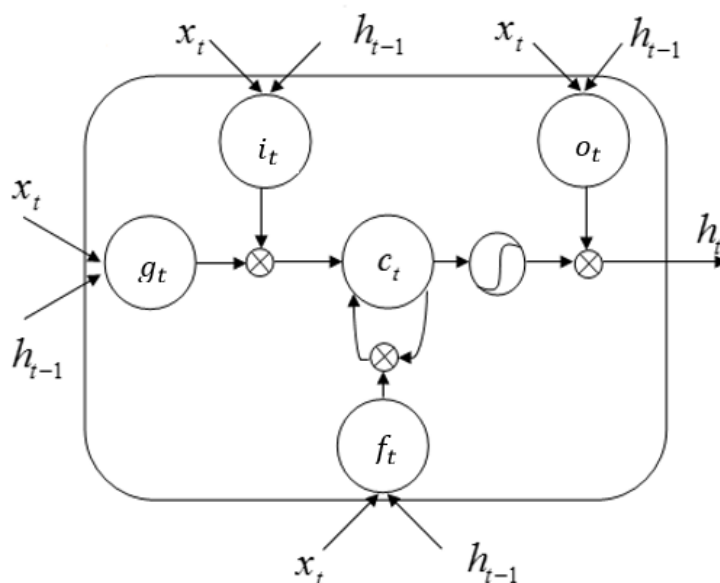


Рис. 2. Структура LSTM ячейки

Данный механизм позволяет LSTM сети бороться с проблемой исчезающего градиента при работе с длинными последовательностями. Посредством обучения параметров фильтров ( $U_i, U_f, U_o, U_g, W_i, W_f, W_o, W_g$ ) сеть «настраивает» свою «память».

Несмотря на то, что LSTM сети спроектированы для борьбы с проблемой исчезающего градиента, значение вектора скрытого состояния ячейки LSTM может оказаться большим и, как следствие, привести к «насыщению» функции активации. Насыщением называется явление, при котором большие или малые значения, передаваемые на вход функции, приводят к ее выводу, близкому к пределу данной функции. Следствием этого являются малые значения производной функции и явление исчезающего градиента, которое значительно замедляет процесс обучения сети. И хотя LSTM сеть разработана для уменьшения влияния данного явления, она не может предотвратить его возникновение вследствие использования функции гиперболического тангенса в роли функции активации.

В данной работе для решения проблемы насыщаемости функции активации предложено использование функции активации, которая не насыщается. Данный подход позволит сделать обучение сети более быстрым и точным.

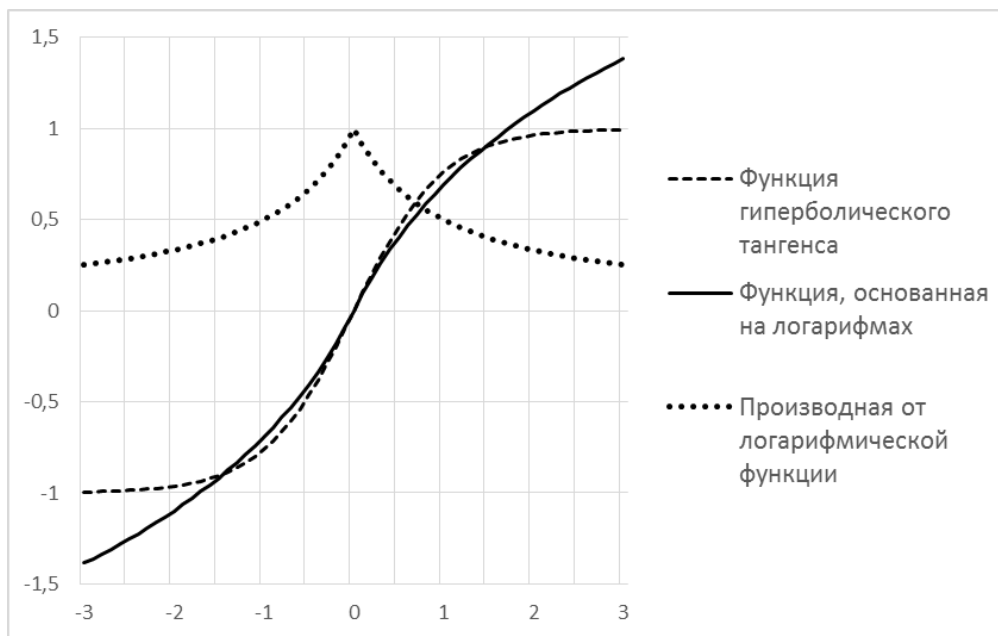
Функция активации, основанная на логарифме, изначально предложена в [5], позволяет избегать насыщения при обработке больших значений и определяется формулой:

$$f(x) = \begin{cases} \ln(x+1), & x \geq 0, \\ -\ln(-x+1), & x < 0. \end{cases}$$

Производная данной функции определяется следующим образом:

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \begin{cases} \frac{1}{1+x}, & x \geq 0, \\ -\frac{1}{1-x}, & x < 0. \end{cases}$$

Графики функции гиперболического тангенса, функции, основанной на логарифмах, и ее производной изображены на рис. 3.



**Рис. 3. График функции гиперболического тангенса и функции, основанной на логарифмах**

Преимуществом предложенной функции активации по сравнению с функцией гиперболического тангенса является ее «ненасыщаемость» и потому ее применение улучшит эффективность обучения LSTM сети.

Сигмоидальная функция активации также подвержена проблеме насыщения, однако заменить ее предложенной не представляется возможным, поскольку она не может служить в качестве шлюза в силу того, что не масштабирует вводимые значения в интервале от 0 до 1.

В работе проверена возможность использования предложенной модели в задачах автоматического реферирования.

### Методика

Для решения задачи моделирования текстов использована модель Encoder-Decoder. Изначально она была разработана в рамках создания системы машинного перевода. В ее основе заложена идея о преобразовании последовательности слов на одном языке в последовательность слов на другом, а задача заключается в определении наиболее вероятного перевода для входной последовательности слов. Применение данной модели к задаче автоматического реферирования оправданно, поскольку задачей реферирования также является преобразование исходного текста (последовательности слов и предложений) в реферат.

Модель Encoder-Decoder, описанная в [6], состоит из двух компонентов:

Энкодер считывает входную последовательность  $x \in R^n$  и вычисляет ее векторное представление  $h_x$ . Декодер использует  $h_x$  для генерирования целевой последовательности  $y' \in R^m$ .

Схематичное изображение модели энкодер-декодер показано на рис. 4.

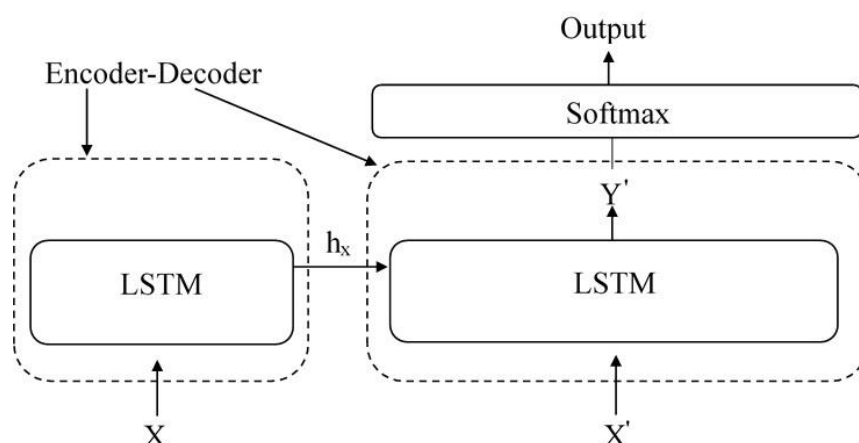


Рис. 4. Модель Encoder – Decoder

### 1 этап. Обучение

*Шаг 1.* Энкодер считывает исходное предложение  $(x_1, x_2, \dots, x_T)$ .

*Шаг 2.* Вычисление векторного представления введенного предложения (вывод энкодера) и его передача на вход декодера.

*Шаг 3.* Передача вывода энкодера и целевого предложения  $(x'_1, x'_2, \dots, x'_{T-1})$  без последнего элемента на вход декодера.

*Шаг 4.* Определение вывода декодера. Для каждого слова целевого предложения декодером выводится вектор, элементы которого соответствуют вероятности появления каждого слова в словаре.

*Шаг 5.* Вычисление ошибки модели следующим образом: целевая последовательность, сдвинутая на один элемент вправо (предложение без маркера начала, но с маркером конца), поэлементно сравнивается с выводом декодера. Ошибка определяется по формуле

перекрестной энтропии:  $E(\hat{y}, y) = -\frac{1}{N} \cdot \sum_{n \in N} \hat{y}_n \cdot \log(y_n)$ , где  $\hat{y}$  – целевая последовательность, верное предложение;  $y$  – вывод декодера, предложенная моделью последовательность  $(y'_1, y'_2, \dots, y'_T)$ .

**2 этап. Тестирование обученной модели.** На данном этапе шаги 1, 2 и 5 совпадают с шагами первого этапа, на шагах 3 и 4 выполняются действия:

*Шаг 3.* Декодер на вход принимает только векторное представление исходного предложения

*Шаг 4.* Генерация вывода декодера до тех пор, пока не будет сгенерирован маркер конца предложения <EOS>.

Важным моментом является различие длин исходной и целевой последовательностей.

Таким образом, модель принимает на вход исходное предложение, вычисляет его векторное представление и, на основании этого представления, генерирует предложение.

В качестве рабочих компонентов как энкодера, так и декодера используются LSTM сети. LSTM-энкодер на выходе имеет вектор фиксированной длины – векторное представление  $h_x$  входной последовательности  $(x_1, x_2, \dots, x_T)$ . Этим вектором инициализируется скрытое состояние LSTM-декодера, который выполняет роль языковой модели [7] и, в свою очередь, выводит последовательность  $(y'_1, y'_2, \dots, y'_T)$ . Данная последовательность поступает в слой нормализованной экспоненциальной функции (softmax), который позволяет получить вероятность итоговой последовательности.

### Экспериментальная часть

Для подтверждения эффективности предложенной модификации проведен ряд экспериментов по сравнению базовых характеристик модели с использованием стандартной модели Encoder-Decoder и ее модификации [8]: зависимость времени обучения от объема словаря, от размерности скрытого слоя и от объема обучающего корпуса текстов.

#### 1. Зависимость времени обучения от объема словаря

В данном эксперименте изменяется размерность словаря при постоянных значениях размерности скрытого слоя и объема обучающего корпуса текстов (100 и 10 соответственно). Результаты приведены в табл. 1.

**Таблица 1**

#### Зависимость времени обучения модели от количества слов в словаре

Количество слов в словаре	Время обучения, миллисекунды	
	стандартная модель Encoder-Decoder	модификация модели Encoder-Decoder
100	89,440	85,310
500	96,270	93,286
1000	105,748	100,885
3000	168,747	154,441
6000	226,566	203,110

#### 2. Зависимость времени обучения от размерности скрытого слоя LSTM сети

В данном эксперименте изменяется размерность скрытого слоя, объем словаря и обучающего корпуса являются константными величинами: 100 и 100 слов соответственно. Результаты эксперимента приведены в табл. 2.

**Таблица 2**

#### Зависимость времени обучения от размерности скрытого слоя

Размерность скрытого слоя	Время выполнения для стандартного Encoder-Decoder, миллисекунды	Время выполнения для модифицированного Encoder-Decoder, миллисекунды
10	90,207	82,507
20	96,316	85,975
50	109,046	103,079
100	187,282	180,688
150	265,472	236,858

#### 3. Зависимость времени обучения от объема обучающего корпуса текстов

В данном эксперименте переменной величиной является объем обучающего корпуса текстов, константными величинами являются объем словаря и размерность скрытого слоя: 100 и 10 соответственно. Результаты экспериментов приведены в табл. 3.

**Таблица 3**

#### Зависимость времени обучения от размера обучающего корпуса текстов

Количество слов в обучающем корпусе текстов	Время выполнения для стандартного Encoder-Decoder, миллисекунды	Время выполнения для модифицированного Encoder-Decoder, миллисекунды
100	1,063	0,9689
500	5,202	4,867
1000	10,464	9,833
3000	30,808	29,728
6000	61,624	58,103
8000	82,205	78,621

Исходя из табл. 1–3, можно сделать вывод о линейном характере полученных зависимостей.

Также графики отражают уменьшение времени выполнения алгоритма при использовании модифицированной модели. Это объясняется тем, что на вычисление функции гиперболического тангенса затрачивается больше операций. Полученные графики отражают тенденцию увеличения времени обучения модели в зависимости от изменяемых параметров.

Для сравнения скорости уменьшения ошибки в процессе обучения был проведен эксперимент по обучению модели с использованием модифицированной LSTM-сети и без модифицированной сети. Обучение выполнялось на одном и том же корпусе текстов, за одинаковое число эпох в обоих случаях. Процесс уменьшения ошибки в ходе обучения показан на рис. 5.

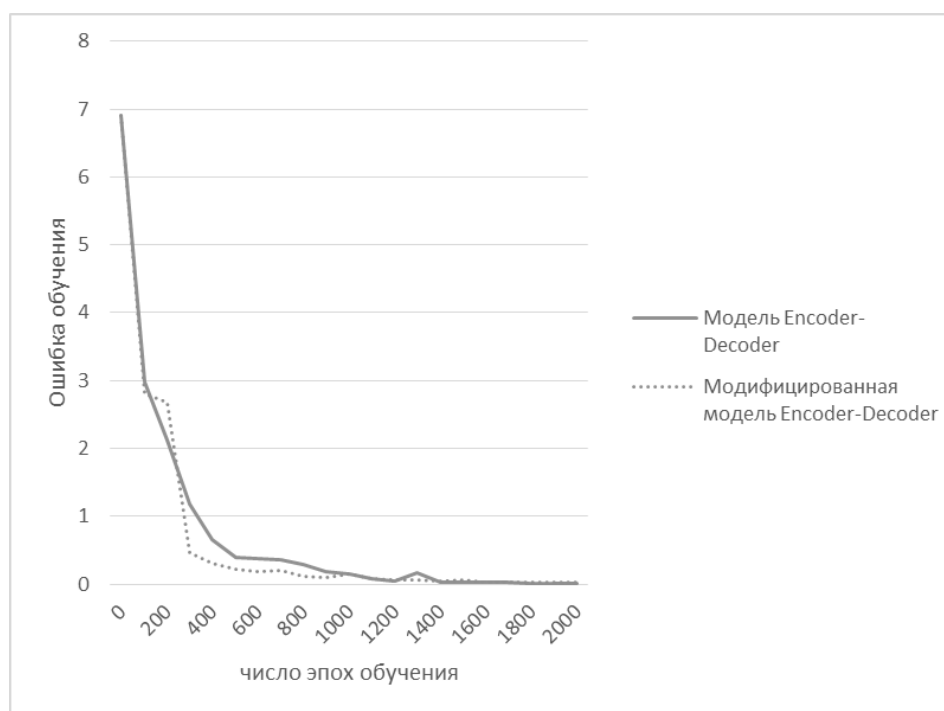


Рис. 5. График уменьшения ошибки модели в процессе обучения

На рисунке видно, что в процессе обучения ошибка уменьшается быстрее при использовании модифицированной модели Encoder-Decoder. Это объясняется тем, что функция, основанная на логарифмах активации, имеет большие значения производной при больших значениях вектора внутреннего состояния ячейки сети и вектора-кандидата нового внутреннего состояния ячейки сети.

Для экспериментальной проверки эффективности предложенной модели из материалов электронного новостного издания Science Daily [9] составлен корпус текстов объемом 30 статей. Тематика статей – песчаные смерчи на марсе (Mars Dust Devils). У каждой статьи использовался существующий реферат из нескольких предложений (1-6), рассматриваемый как эталонный для обучения модели.

С помощью разработанной программы на основе составленного корпуса обучена модель и построены рефераты для каждой статьи корпуса. Работа модели encoder-decoder оценивалась с помощью перечисленных метрик в сравнении с классическим алгоритмом на базе метода Луна. Для анализа результатов эффективности работы модели использовались численные метрики: точность  $p$ , полнота  $r$  и  $F$ -мера.

Также проведен эксперимент по оценке качества реферирования текста с использованием двух разных обученных моделей. Модели обучались на корпусах текстов разной тематики: Big Data и Mars Dust Devils. Объем словаря для корпусов составил 1053 и 995 слов со-

ответственно. Каждый корпус состоит из 15 текстов. Тематика текстов определялась на основе частотных характеристик важных слов. Для проверки качества реферата каждой модели на вход подан текст, наиболее близкий по своей теме к Mars Dust Devils.

### Результаты

Усредненные результаты тестирования эффективности алгоритмов представлены в табл. 4.

**Таблица 4**

**Усредненные оценки качества алгоритмов реферирования**

Алгоритм реферирования	Численные метрики		
	Полнота	Точность	F-мера
Модифицированная модель Encoder-Decoder	0,862	0,735	0,791
Модель Encoder-Decoder	0,780	0,526	0,643
Метод Луна	0,670	0,353	0,523

Алгоритм с использованием предложенной модифиции модели Encoder-Decoder получил наивысшее среднее значение полноты (0,862), точности (0,730) и F-меры (0,768) в сравнении с другими рассмотренными алгоритмами. Самые низкие результаты показали рефераты, построенные с помощью классического алгоритма на основе метода Луна.

### Выводы

В ходе данной работы исследована нейросетевая модель Encoder-Decoder в задаче автоматического реферирования текстов и предложена ее модификация с использованием не насыщаемой функции активации, в качестве такой функции предложено использовать функцию активации, основанную на логарифмах. Результаты экспериментов показали эффективность выбранной модели и алгоритма классификации. Система показала лучший результат при совпадении тематики исходного текста и корпуса текстов, на котором обучена модель.

Разработана модификация модели Encoder-Decoder и выполнен сравнительный анализ полученной модели со стандартной моделью Encoder-Decoder и методом реферирования Луна. Модифицированная модель Encoder-Decoder может применяться в задачах автоматического реферирования, генерации текстов и машинного перевода.

Использование разработанной модели в совокупности с алгоритмами обработки текстовых данных является перспективным, так как это позволит автоматизировать процесс составления обучающих корпусов текстов, используемых для обучения системы реферирования.

В рамках дальнейшего развития описанного подхода предлагается обучение модели на больших объемах текстовых корпусов, создание нескольких моделей, обученных на корпусах определенной тематики.

### Библиографический список

1. **Ломакина, Л.С.** Теоретические аспекты концептуального анализа и моделирования текстовых структур / Л.С. Ломакина, А.С. Суркова // *Фундаментальные исследования*. – 2015. – № 2 (часть 17). – С. 3713–3717.
2. **Bengio, Y.** Neural net language models. // *Scholarpedia*. 2008, 3(1) URL: [http://www.scholarpedia.org/article/Neural\\_net\\_language\\_models](http://www.scholarpedia.org/article/Neural_net_language_models).
3. **Хливненко, Л.В.** Практика нейросетевого моделирования / Л.В. Хливненко. – Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2015. – 214 с.
4. **Hochreiter, S.** Long short-term memory / S. Hochreiter, J. Schmidhuber // *Neural computation*. 1997. 9(8):1735-1780.
5. **Bilski, J.** The backpropagation learning with logarithmic transfer function // *Proceedings of the 5th Conference on Neural Networks and Soft Computing*. 2000. – P. 71–76.



6. **Cho, K.** Learning phrase representations using RNN encoder-decoder for statistical machine translation / K. Cho [et al.] // Proceedings of the 2014 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing 2014. – P. 1724-1734.
7. **Sundermeyer, M.** LSTM Neural Networks for Language Modeling. / M. Sundermeyer, R. Schlüter, H. Ney / M. Sundermeyer, R. Schlüter, H. Ney // InInterspeech 2012. – P. 194–197.
8. **Суркова, А.С.** Использование модели Encoder-Decoder для реферирования текстов / А.С. Суркова, И.Д. Чернобаев // Системы управления и информационные технологии. – 2017. – №4(70). – С. 72–76.
9. Science Daily // Электронное новостное издание: сайт. – URL: <https://www.sciencedaily.com> (дата обращения 25.08.2017).

*Дата поступления  
в редакцию 15.01.2018*

**I. D. Chernobaev, A. S. Surkova, A.Z. Pankratova**

## **TEXT MODELLING USING RECURRENT NEURAL NETWORKS**

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

**Purpose:** Creation of model and algorithm to model natural language text with recurrent neural networks.

**Design/methodology/approach:** Application of recurrent neural networks, encoder-decoder architecture, non-saturating activation function.

**Findings:** Not-saturating activation function application allows achieving better results in model learning and exploitation.

*Key words:* neural network, recurrent neural network, Long-Short-Term-Memory, activation function, natural language processing, Encoder-Decoder.

УДК 621.391.27

В.В. Хоптар

**ОДИН ИЗ ВАРИАНТОВ ОРГАНИЗАЦИИ АВИАЦИОННОЙ АДАПТИВНОЙ  
ДЕКАМЕТРОВОЙ РАДИОСВЯЗИ**

Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Полет», г. Н. Новгород

Рассмотрены процедуры организации системы авиационной адаптивной автоматической декаметровой радиосвязи на незакрепленных частотах. Приведены структурная схема, состав и алгоритм работы системы.

*Ключевые слова:* ДКМ радиосвязь, ионосферный мониторинг, ЛЧМ-сигналы.

Вопросы организации дальней ДКМ радиосвязи являются особенно актуальными для дальних магистральных летательных аппаратов (ЛА), движущихся со скоростями более 800 км/ч. За короткое время они проходят много временных поясов с различной геофизической и помеховой обстановками и соответственно с различными условиями ионосферного распространения ДКМ радиоволн. Это не позволяет составить точный план связи на все время полета, а использование прогнозных моделей ионосферного канала не обеспечивает необходимого качества радиосвязи, особенно в высоких широтах. Поэтому для управления частотным ресурсом и другими параметрами радиолинии в условиях нестационарности канала необходимо постоянно осуществлять в реальном времени мониторинг текущей ионосферной обстановки и контроль загруженности канала помехами. Кроме того, установление и поддержание ДКМ радиосвязи в авиационных каналах должно происходить автоматически, без участия экипажа воздушного судна. В настоящее время организация ДКМ радиосвязи в РФ имеет следующие особенности:

- отсутствуют единые стандарты по организации ДКМ радиосвязи и стандарты на характеристики модемов и сигнально-кодовых конструкций, что приводит к несовместимости каналовобразующих средств, используемых разными ведомствами в едином сетевом пространстве;
- наземным опорным радиоцентрам (ОпРЦ), как правило, назначают не более четырех частот (дневная, ночная и две запасных), а протяженность зоны ответственности ОпРЦ может достигать от 100 до 3000 км. И, несмотря на то, что у ведомства имеется достаточно большой массив разрешенных частот, в одну зону попадают как ближние связи, для которых частоты выше 8-10 МГц практически бесполезны, так и дальние связи, для которых используются частоты выше 10 МГц. В результате получается ситуация, при которой на каждый сеанс связи из разрешенных частот доступны единицы, в лучшем случае десятки, из которых больше половины не подходят по условиям распространения, а из оставшихся подходящих большая часть забита помехами;
- использующийся в зоне ответственности радиально-узловой принцип организации связи требует передачи информационных сообщений от ЛА к центру управления (ЦУ), что снижает скорость и надежность передачи сообщений.

Все это, в совокупности, во флуктуирующем с переменными параметрами радиоканале «борт ЛА-наземный ОпРЦ» на фоне нестационарных помех обеспечивает надежность передачи сообщений, не превышающую (0,60-0,70).

*Целью работы* является рассмотрение варианта организации авиационной адаптивной автоматической ДКМ радиосвязи в радиоканалах «борт ЛА-наземный ОпРЦ» на незакрепленных частотах (без частотного планирования), обеспечивающий надежность передачи со-

общений (0,95-0,99), экономию частотного ресурса за счет применения технологии ионосферного мониторинга и одновременной адаптации по частоте и пространству [1].

Реализация варианта построения авиационной адаптивной автоматической ДКМ радиосвязи осуществляется с помощью использования технологии ионосферного мониторинга (ИМ) в наземной и воздушной компонентах. Для этого в состав наземного ОпРЦ вводится аппаратно-программный комплекс ионосферного мониторинга, состоящий из двух конструктивно и функционально независимых частей (постов ИМ) – приемного и передающего (рис. 1). Типовая структура наземного ОпРЦ предполагает разнесение за пределы прямой видимости передающего и приемного комплексов. При этом расстояние между ними может составлять от 5 до 40 км. В результате, как приемный, так и передающий посты ИМ из состава ОпРЦ имеют собственные антенно-фидерные системы и автоматизированные рабочие места (АРМ), с помощью которых осуществляется обработка радиопрогностической информации, формирование и прием/передача служебных пакетов в локальную информационную сеть, а также общее управление работой данного поста ИМ. В качестве зондирующего сигнала во всем ДКМ диапазоне (от 2 до 30 МГц) передающим постом ИМ используется ЛЧМ-сигнал со ступенчато изменяемой частотой.

Структурная схема комплекса ДКМ радиосвязи наземного ОпРЦ представлена на рис. 1, где введены следующие обозначения:

- 1 – приемник зондирующего ЛЧМ-сигнала;
- 2 – широкополосная антенна для приема зондирующего ЛЧМ-сигнала;
- 3 – передатчик зондирующего ЛЧМ-сигнала;
- 4 – широкополосная антенна для передачи зондирующего ЛЧМ-сигнала;
- 5 – приемник спутниковых сигналов GPS/ГЛОНАСС;
- 6 – антенна для приема спутниковых сигналов GPS/ГЛОНАСС;
- 7 – АРМ приемного комплекса ДКМ радиосвязи;
- 8 – АРМ передающего комплекса ДКМ радиосвязи;
- 9 – АРМ приемного поста ИМ;
- 10 – АРМ передающего поста ИМ;
- 11 – локальная сеть передачи данных Ethernet;
- 12 – штатная широкополосная антенна для приема связного ДКМ сигнала;
- 13 – штатный связной приемник ДКМ диапазона;
- 14 – формирователь пакета ретранслируемых служебных сообщений;
- 15 – контроллер;
- 16 – наземная магистральная сеть передачи данных;
- 17 – анализатор ретранслируемых служебных сообщений;
- 18 – штатный связной передатчик ДКМ диапазона;
- 19 – согласующее устройство;
- 20 – штатная всенаправленная передающая антенна ДКМ диапазона;
- 21 – блок хранения исходных данных;
- 22 – USB-вход для загрузки исходных данных.

Синхронизация работы передающих и приемных постов ИМ всех ОпРЦ достигается путем сверки и последующей корректировки шкал времени опорных генераторов приемников 1 зондирующего ЛЧМ-сигнала, оснащенных широкополосными приемными антеннами 2, и передатчиков 3 зондирующего ЛЧМ-сигнала, оснащенных широкополосными передающими антеннами 4, через приемники 5 спутниковых сигналов GPS/ГЛОНАСС, оснащенные антеннами 6, с эталонной шкалой мирового времени (единого времени UTC). Точность синхронизации метками приемников GPS/ГЛОНАСС – (10-50) мкс, нестабильность частоты сигнала опорного генератора менее  $2 \times 10^{-8}$  с, что дает потенциальную разрешающую способность приемника из состава аппаратно-программного комплекса (АПК) ИМ порядка 1 Гц.

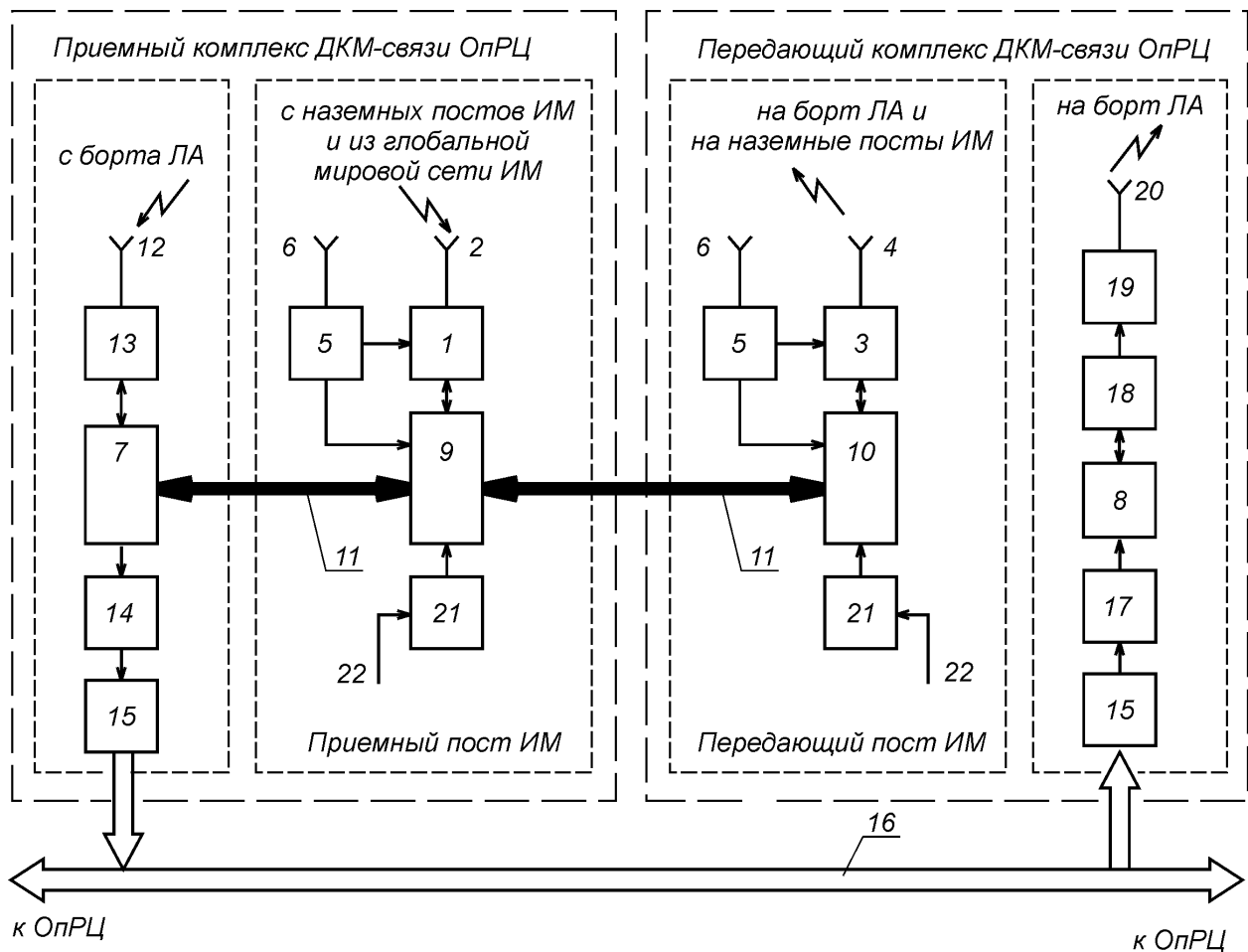


Рис. 1. Структурная схема комплекса ДКМ радиосвязи наземного ОпРЦ

При невозможности проведения первоначальной привязки шкал времени к спутниковым сигналам предусмотрены:

- режим автоматической синхронизации указанных шкал по сигналам станций единого времени, работающих в ДКМ диапазоне;
- режим вхождения в синхронизм приемников из состава приемных постов ИМ по специальному периодическому ЛЧМ-сигналу от находящихся в одной зоне ответственности передатчиков из состава передающих постов ИМ.

Общее управление и контроль функционирования комплекса ДКМ радиосвязи наземного ОпРЦ осуществляется через АРМ 7, 8 приемного и передающего комплексов ДКМ радиосвязи и АРМ 9, 10 приемного и передающего постов ИМ, объединенных локальной сетью 11 передачи данных Ethernet, в которой для соединения абонентов используют физические, так называемые MAC-адреса конечных устройств, что значительно увеличивает трафик.

Принятые с борта ЛА штатной широкополосной антенной 12 ДКМ приемника 13 служебные сообщения через АРМ 7 поступают в формирователь пакета ретранслируемых служебных сообщений 14 и через контроллер 15, обеспечивающий работу по протоколу X.25, по наземной магистральной сети 16 передачи данных, охватывающей все ОпРЦ, доставляются адресату. Поступающее из магистральной сети 16 передачи данных через контроллер 15 служебное сообщение анализируется в анализаторе 17 ретранслируемых служебных сообщений, и через АРМ 8, штатный связной передатчик ДКМ диапазона 18, согласующее устройство 19 и штатную всенаправленную передающую антенну 20 отсылается на борт ЛА.

Передающий пост ИМ осуществляет передачу ЛЧМ-сигналов на борт ЛА и наземные

посты ИМ, согласно хранящемуся в блоке 21 хранения исходных данных частотно-временному расписанию (ЧВР). ЧВР загружается (изменяется) через USB-вход 22 для загрузки исходных данных при предполетной подготовке.

Приемный пост ИМ принимает и анализирует ЛЧМ-сигналы от ЛЧМ-передатчиков в зоне своей ответственности, а также возможные сигналы от мировой сети ИМ. После проведения зондирования ионосферы и получения экспериментальных амплитудно-частотных характеристик и ионограмм проводится их обработка на основе структурно-физической модели радиосвязного ДКМ канала аналогично [2] и вычисляются следующие характеристики ионосферного канала: наименьшие наблюдаемые частоты, максимальные наблюдаемые частоты, интервалы многолучевости, количество лучей на контролируемых частотах, интервалы временного рассеяния (для определения максимально возможной скорости передачи данных при заданном типе используемого в модеме бортового комплекса связи (БКС), полоса когерентности, коэффициент мутности ионосферы (отношение энергии зеркальной компоненты сигнала к энергии рассеянной компоненты сигнала), отношение сигнал/помеха на всех контролируемых частотах, выбор интервалов частот с наибольшей надежностью передачи сообщений для различных видов связных сигналов при заданной допустимой вероятности ошибки на бит. В качестве базового комплекса ИМ для оснащения ОпРЦ можно использовать разработанный АО «НПП «Полет» и прошедший испытания АПК ИМ «Мицар-К» [3].

Каждый приемный пост ИМ имеет полную, многокритериальную картину параметров ионосферного канала для анализа распространения ДКМ радиоволн и обеспечения безопасности полетов ЛА как в одной, так и в соседних зонах ответственности общей протяженностью до 6000 км. Параметры сохраняются в базе данных и по запросу могут быть направлены в центр управления ДКМ радиосвязью.

Для реализации предлагаемого способа ДКМ радиосвязи на территории РФ необходимо использовать сеть стационарных ОпРЦ, соединенных между собой магистральными линиями (физически это могут быть проводные, оптоволоконные или радиорелейные линии), функционирующими на базе сетевых протоколов X.25 (или TSP/IP). При организации воздушной ДКМ радиосвязи «борт ЛА – наземный ОпРЦ» эти магистральные линии фактически играют роль так называемого «обратного канала».

При выборе места расположения ОпРЦ необходимо:

- учитывать особенности географического положения РФ (ее протяженность с востока на запад);
- учитывать влияние геофизических факторов (наличие высокоширотных областей, подверженных влиянию главного ионосферного провала (ГИП), сужающего частотный ДКМ диапазон прохождения радиоволн на (30-60%), смещая его в низкочастотную область с высоким уровнем помех);
- создавать условия для наилучшего распространения радиоволн (организовывать односторонние трассы).

Всю территорию РФ оптимально предлагается разделить на шесть зон ответственности с наличием в каждой зоне от 2 до 4 ОпРЦ, что составит в целом от 25 до 30 ОпРЦ. Расстояние между ОпРЦ должно составлять от 1500 до 3000 км, а крайние («северные» и «южные») ОпРЦ в зоне должны располагаться с учетом выноса из области ГИП точки отражения от ионосферы.

Каждому ОпРЦ присваивается свой идентификационный номер, а передающему посту ИМ задается ЧВР со следующими параметрами:

- время развертки ЛЧМ-сигнала  $t_p$  – период времени с N-минутными интервалами, в которое каждый пост начинает работу относительно реального времени;
- стартовое время  $t_c$  – период времени, на который синхросигналы передатчика поста ИМ запаздывают относительно времени развертки;

- время начала передачи  $t_n = t_p + t_c$  – реальное время, когда передатчик начинает работу в период времени, оговоренный в ЧВР;
- частотный диапазон работы (разность между конечной и начальной частотами);
- скорость развертки  $df/dt$  ЛЧМ-сигнала.

Для введения технологии ИМ в воздушную компоненту авиационной адаптивной автоматической ДКМ радиосвязи необходимо дооснастить бортовой комплекс связи четырехканальным приемником-анализатором ЛЧМ-сигналов. Надежность авиационного радиоканала при приеме сигналов от четырех пространственно-разнесенных наземных ОпРЦ с некоррелированными радиосигналами (системная надежность)  $P_{\text{сист}}$  может быть записана в виде:

$$P_{\text{сист}} = 1 - \prod_{i=1}^{i=4} \left[ (1 - P_{\text{ап}}^{\text{Б}} \times P_i^{\text{HF}}) \times (1 - P_{\text{ап}}^3 \times P_i^{\text{HF}}) \right],$$

где  $P_i^{\text{HF}}$  – усредненная надежность радиоканала ДКМ радиосвязи для  $i$ -го радионаправления;  $P_{\text{ап}}^{\text{Б}}$  – аппаратная надежность для борта ЛА;  $P_{\text{ап}}^3$  – аппаратная надежность для наземного ОпРЦ.

Аппаратная надежность для борта ЛА  $P_{\text{ап}}^{\text{Б}}$  может быть выражена формулой:

$$P_{\text{ап}}^{\text{Б}} = \frac{A_{\text{от}}^{\text{Б}}}{A_{\text{от}}^{\text{Б}} + A_{\text{в}}^{\text{Б}}},$$

где  $A_{\text{от}}^{\text{Б}}$  – среднее время наработки на отказ в часах;  $A_{\text{в}}^{\text{Б}}$  – среднее время восстановления аппаратуры после отказа в часах.

Аппаратная надежность для наземного ОпРЦ рассчитывается по такой же формуле:

$$P_{\text{ап}}^3 = \frac{A_{\text{от}}^3}{A_{\text{от}}^3 + A_{\text{в}}^3}.$$

Для среднестатистических параметров расчет показывает, что при  $A_{\text{от}}^{\text{Б}} = 2500$  ч,  $A_{\text{в}}^{\text{Б}} = 30$  ч,  $P_{\text{ап}}^{\text{Б}} = 0,998$ ,  $A_{\text{от}}^3 = 5000$  ч,  $A_{\text{в}}^3 = 20$  ч,  $P_{\text{ап}}^3 = 0,996$  даже для  $P_1^{\text{HF}} = 0,6$ ,  $P_2^{\text{HF}} = 0,3$ ,  $P_3^{\text{HF}} = 0,7$ ,  $P_4^{\text{HF}} = 0,92$  системная надежность  $P_{\text{сист}} = 0,999$ .

Таким образом, при одновременном приеме на борту ЛА сигналов от четырех наземных станций даже при недостаточной надежности отдельных каналов системная надежность более чем удовлетворительная.

Бортовой четырехканальный приемник-анализатор – это многофункциональное устройство, которое обеспечивает прием и обработку зондирующих ЛЧМ-сигналов от четырех пространственно-разнесенных ЛЧМ-передатчиков наземных ОпРЦ, вычисление основных параметров ионосферного радиоканала, анализ условий распространения ДКМ радиоволн по всем четырем радиоканалам «борт ЛА-наземный ОпРЦ», выделение оптимального канала, запись и хранение предполетного плана связи (координат и идентификаторов наземных ОпРЦ, ЧВР ЛЧМ-передатчиков ИМ из состава ОпРЦ и алгоритмов его изменения по псевдослучайному закону), формирование пакета данных служебной информации для передачи его через штатный БКС ДКМ диапазона и наземную магистральную сеть оптимальному на данный момент по условиям распространения опорному радиоцентру.

Прием зондирующих ЛЧМ-сигналов осуществляется с помощью бортовой активной всенаправленной широкополосной антенны ДКМ диапазона. При этом синхронизация рабо-

ты бортового четырехканального приемника-анализатора ЛЧМ-сигналов и АПК ИМ всех ОпРЦ достигается путем сверки и корректировки шкал времени их опорных генераторов с эталонной шкалой мирового времени через приемники сигналов глобальных навигационных спутниковых систем GPS/ГЛОНАСС.

Выбор наилучшей (оптимальной) в данный момент рабочей частоты приема ДКМ радиосигналов (ОРЧ) производится на основе анализа постами ИМ нескольких ОпРЦ условий распространения в точке приема по критериям наибольшей надежности передачи сообщений при заданной вероятности ошибки на бит. Также пост ИМ ОпРЦ вычисляет максимально возможную скорость передачи данных в канале «борт ЛА–наземный ОпРЦ», исходя из величины отношения «сигнал/шум» на выбранной частоте и с учетом типа модемов на борту ЛА и в ОпРЦ.

Алгоритм поддержания ДКМ радиосвязи с бортом ЛА в процессе полета реализуется следующим образом. Если в работающем ДКМ радиоканале «борт ЛА-наземный ОпРЦ» надежность передачи сообщений в процессе полета не меньше допустимой при заданной вероятности ошибки на бит, ДКМ радиосвязь поддерживается на данном радиоканале, даже если на других радионаправлениях надежность передачи сообщений выше. Если надежность передачи сообщений становится меньше допустимой, спецвычислитель из состава бортового четырехканального приемника-анализатора обрабатывает информацию о прохождении ЛЧМ-сигналов от всех четырех постов ИМ во всем ДКМ диапазоне и по критерию наибольшей надежности передачи сообщений при заданной вероятности ошибки на бит определяет оптимальный ОпРЦ для ведения ДКМ радиосвязи в канале «борт ЛА–наземный ОпРЦ». Затем определенные в спецвычислителе идентификационный номер, ОРЧ ДКМ радиосвязи, надежность передачи сообщений, максимально возможная скорость передачи данных выбранного для ведения ДКМ радиосвязи ОпРЦ передаются в контроллер из состава бортового четырехканального приемника-анализатора, который формирует пакет служебного сообщения в соответствии с форматом протокола АХ.25 с новыми радиопрогностическими данными и добавляет еще один параметр – время начала вхождения в связь  $t_n$ . Далее контроллер по локальной бортовой сети передает в приемник штатного БКС ДКМ диапазона команду на его перестройку на обновленные данные для осуществления связи с выбранным ОпРЦ, а в передатчик штатного БКС – обновленные данные для передачи их в предыдущий ОпРЦ по радиоканалу на выбранной частоте в соответствии с протоколом АХ.25.

В случае, когда надежность передачи сообщений в процессе полета становится меньше допустимой при заданной вероятности ошибки на бит для всех ОпРЦ, находящихся в данной зоне ответственности по изложенному ранее алгоритму поддержания ДКМ радиосвязи БКС ЛА начинает работать с любым ОпРЦ другой зоны ответственности, оснащенным постом ИМ с учетом заранее известного ЧВР его работы.

Использование предложенного варианта построения авиационной адаптивной автоматической декаметровый радиосвязи на незакрепленных частотах позволит организовать высоконадежную отечественную систему дальней связи.

#### Библиографический список

1. Пат. RU № 2622767. М. кл. H04B 7/00. Способ авиационной адаптивной автоматической декаметровой радиосвязи на незакрепленных частотах / Валов В.А., Бредихин Д.В., Хоптар В.В. 2017. БИ № 17.
2. **Вертоградов, Г.Г.** Автоматизированный аппаратно-программный комплекс для определения оптимальных рабочих частот связной радиолинии по данным наклонного зондирования ионосферы / Г.Г. Вертоградов, В.П. Урядов, Е.Г. Вертоградова // Труды XIII Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь»: сб. ст.; Воронеж, 2007. – Т. 2. – С. 1203-1214.

3. **Белоусов, Е.Л.** Многофункциональный аппаратно-программный комплекс ДКМВ радиосвязи с системой прогнозирования ионосферных каналов / Е.Л. Белоусов [и др.] // Новые информационные технологии в системах связи и управления: докл. на научно-технической конференции. – Калуга: КНИИТМУ, 2008.

*Дата поступления  
в редакцию 10.01.2018*

**V.V. Khoptar**

**ONE OF THE VARIANTS OF ORGANIZING  
THE AIRCRAFT RADIO ADAPTIVE COMMUNICATION IN HF BAND**

«POLYOT Research & Production Company», JSC

**Purpose:** Investigation of the alternative method of organizing aviation adaptive automatic system of HF radio communication on unfixed frequencies ensuring message transfer reliability of 0.95-0.99, and frequency resources saving due to application of ionospheric monitoring technology (IM) and frequency and space adaptation.

**Design/methodology/approach:** This method of system integration is realized with the use of IM hardware and software transmit and receive complexes in ground and air components correspondingly.

**Research limitations/implications:** The scope of application covers HF radio communication systems.

**Findings:** The usage of the proposed alternative method of developing the aviation adaptive automatic system of HF radio communication on unfixed frequencies enables to arrange a highly-reliable long-range communication system.

*Key words:* HF radio communication, ionospheric monitoring, linear frequency modulation signals.



---

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

---

УДК 621.039

А.В. Безносков, Т.А. Бокова, Н.С. Лукичѳв, В.А. Гадетов, А.Г. Мелузов

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ ПРИ ТРЕНИИ РАСПЛАВА СВИНЦА О ВАЛ НАСОСА, И ГЕОМЕТРИИ ЕГО СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ВРАЩАТЕЛЬНОМ ДВИЖЕНИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

**Предмет, тема, цель работы:** В НГТУ проводятся экспериментальные исследования с целью определения потерь мощности при трении расплава свинца о вал насоса, и геометрии его свободной поверхности при вращательном движении.

**Метод или методология проведения работы:** Для обоснования концепции авторами было предложено рассмотреть вопросы: создания стенда ТВС-2015 для изучения характеристик трения вала насоса в среде ТЖМТ, проведения исследования влияния трения вала насоса в трех различных средах (в воде, в воздухе, в жидком свинце) для последующих сравнительных анализов, расчетного обоснования потерь мощности, связанных с потерями на трении вала циркуляционного осевого насоса в среде ТЖМТ, получения и обоснования данных, отображающих поведение свободной поверхности теплоносителя при вращении имитатора вала насоса, геометрическое построение свободной поверхности теплоносителя по определенной функции, создания базы данных расчетно-теоретических характеристик подтвержденных экспериментальным исследованием по влиянию трения вала на потери мощности электродвигателя.

**Результаты и область их применения:** Новые решения позволяют повысить экономичность энергоблока за счет уменьшения массогабаритных характеристик реакторного контура.

Полученные результаты исследований потерь, испытаний геометрии свободной поверхности показали существенные различия полученных характеристик. Данные испытаний являются основополагающими для усовершенствования осевых циркуляционных насосов для установки БРЕСТ ОД 300.

**Выводы:** Результаты исследований мощностных потерь, а также испытаний геометрии свободной поверхности показали существенные различия полученных характеристик на водяном и свинцовом теплоносителе, а также при разных уровнях заполнения. Полученные данные показали линейную зависимость при различных оборотах вращения вала насоса при уровне заполнения теплоносителем в 1500 мм. Ревизия экспериментального участка показала минимальные различия шероховатости поверхностей имитатора вала до и после проведения экспериментов.

*Ключевые слова:* свинцовый теплоноситель, потеря мощности, КПД установки, геометрия свободной поверхности, трение свинцового теплоносителя о вал.

По принципу действия насосы для перекачки тяжелых жидкометаллических теплоносителей (ТЖМТ) выполняются только динамические [1]. В настоящее время конструкции объемных насосов для ТЖМТ или их проработки отсутствуют. Принципиальная возможность создания объемных насосов роторного типа (шестеренных и др.) не исключена для условий подач теплоносителя с малыми расходами и высокими напорами [2].

В динамическом насосе, в результате действия сил инерции и вязкости перекачиваемой среды внутри рабочего пространства насоса, кинетическая энергия от рабочего колеса передается перекачиваемой жидкости, в основном преобразуясь в энергию давления. Традиционно для любой гидравлической машины полный КПД определяется из выражения:

$$\eta = \eta_{\text{г}} * \eta_{\text{об}} * \eta_{\text{мех}},$$

где  $\eta$  – гидравлический КПД;  $\eta_{\text{об}}$  – объемный КПД;  $\eta_{\text{мех}}$  – механический КПД.

Если для расчета объемных и механических потерь и, следовательно, для определения соответствующих КПД имеются некоторые теоретические методы, проверенные опытом, то гидравлические потери почти не поддаются расчету.

В межлопастных каналах рабочего колеса насоса имеются не только потери на трение о стенки, вычисление которых уже представляет довольно сложную задачу, но также потери на вихреобразование, обычно являющиеся главной составляющей гидравлических потерь. Кроме этого, в состав гидравлических потерь входят потери, связанные с отрывом потока от обтекаемой поверхности, потери при резком расширении канала на повороте и т.д. не зная действительных значений скоростей течения и их распределения в различных сечениях рабочего колеса, большинство из этих потерь подсчитать практически невозможно. Это особенно актуально с учетом использования в качестве перекачиваемой жидкости ТЖМТ [3].

Необходимое для оценки работы насоса значение полного КПД может быть найдено лишь в результате специальных опытных исследований.

Поскольку с КПД связаны все другие показатели работы насоса, то совершенно необходимо проведение испытаний при различных значениях напора и подачи, изменяющихся от минимальных значений до максимальных. Такие испытания обычно называют параметрическими, поскольку по их результатам определяют напорную и энергетическую характеристики насоса, дающие полное представление о его работе [4].

Непосредственные испытания насосов позволяют также установить особенности их работы на режимах, которые недостаточно поддаются расчету. К ним в первую очередь относятся исследования работы машины в условиях развившейся кавитации. Испытания для получения напорной и энергетической характеристик традиционно проводят с соблюдением мер, исключающих полностью возникновение кавитации или, по крайней мере, ограничивающих ее развитие до пределов, не оказывающих практического влияния на работу насоса.

Испытания насосов приобретают особую важность в тех случаях, когда приходится разрабатывать насос новой конструкции, особенно для перекачки жидкостей (свинцового теплоносителя), аналоги и прототипы которых отсутствуют.

В большинстве случаев насосы по габаритам, подаче и мощности таковы, что их целесообразно испытывать в натурных размерах. Если насосы имеют значительные размеры при больших подачах и мощности, а также испытания которых дороги, то требуется проведение модельных испытаний. Определение энергетических параметров насосов при этом в значительной степени усложняется из-за необходимости точного моделирования самой машины и режимов ее работы, а также обязательного пересчета полученных результатов.

К специфичным свойствам свинцового теплоносителя, определяющим процессы в проточной части насосов, перекачивающих ТЖМТ, относятся [5]:

- низкое давление насыщенного пара  $1,44 \times 10^{-17}$  Па при  $t = 127$  °С,  $5,38 \times 10^{-5}$  Па при  $t = 527$  °С;
- высокая температура кипения  $t_{\text{кип}} = 1750$  °С при атмосферном давлении, в условиях реакторного контура – больше;
- большее чем у воды, поверхностное натяжение  $\sigma \approx 400$  н/м при  $t = 350$  °С;
- существенно большая плотность  $\rho = 10,5 \times 10^{-3}$  кг/м<sup>3</sup> при  $t = 450$  °С, определяющая силы инерции в потоке;
- теплопроводность  $\lambda = 16,58$  Вт/мК при  $t = 400$  °С, большая чем у воды, но меньшая чем у натрия;
- кинематическая вязкость  $\nu \approx 20,99 \times 10^{-8}$  м<sup>2</sup>/с при  $t = 400$  °С;
- несмачиваемость поверхности сталей и чугунов с нанесенными на них защитными оксидными покрытиями; краевой угол смачивания оксидированных сталей (в среде сухого аргона) составляет  $\Theta = 110 - 120^\circ$ .

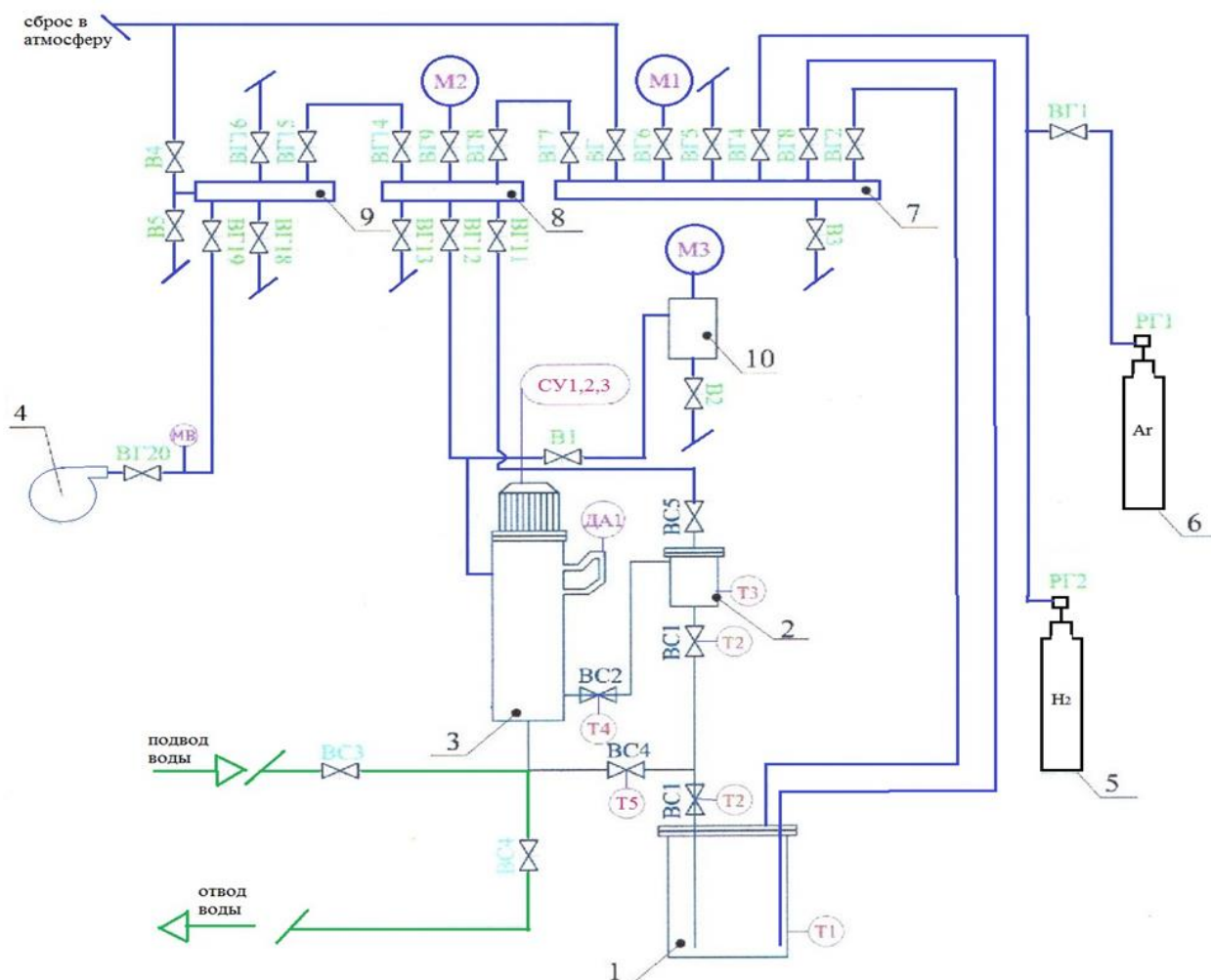
Характеристика взаимодействия (сцепления) свинца с поверхностями оксидированной стали и чугуна (работа адгезии) существенно меньше характеристики взаимодействия (сцепления) молекул свинца (работы когезии) между собой. У натрия и воды эти соотношения противоположны.

На частичках примесей могут концентрироваться газы (парогазовые смеси), которые при уменьшении давления в потоке увеличиваются в объеме и могут рассматриваться как зародыши кавитационных пузырей.

В потоке свинца в реальном контуре всегда имеются нерастворенные твердые частицы примесей – оксидов свинца, оксидов и других соединений компонентов конструкционных материалов, образующие ядра кавитации и определяющие их число. В трещинах этих частиц, которые являются гидрофобными по отношению к свинцу, находятся газы (парогазовые смеси), которые при понижении давления могут формировать разрывы сплошности в свинце – пузырьки газа, которые затем агломерируют [6, 7].

Температура кипения свинца превышает температуру плавления сталей – конструкционных материалов реакторного контура, что в отличие от воды и натрия, исключает образование паровых пленок, пузырей, как на теплопередающих поверхностях (оболочках ТВЭЛ), так и в объеме теплоносителя.

Анализ свойств свинцового теплоносителя показывает, что условия реакторных контуров с этим теплоносителем существенно отличаются от условий реакторных контуров с традиционными теплоносителями (вода, натрий).



**Рис. 1. Схема экспериментального стенда ТВС-2015:**

1 - бак плавильный 2,5 м<sup>3</sup>; 2 - фильтр; 3 - экспериментальный участок; 4 - вакуумный насос; 5 - баллон водородный; 6 - баллон аргоновый; 7, 8, 9 - коллекторы давления; 10 - конденсатор

В представляемой работе рассматриваются осевые циркуляционные насосы, которые на данный момент заявлены основными для перекачки свинцового теплоносителя для реакторной установки БРЕСТ ОД 300 [8-10].

Вторым важным моментом в работе является изучение поведения свободной поверхности расплава свинца, как будет выглядеть геометрия воронки при вращательном движении имитатора вала.

Соответственно целью работ являлось получение базы данных по мощностным потерям на поверхность вала, а также построение геометрии свободной поверхности теплоносителя при вращательном движении имитатора вала.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- разработать экспериментальный стенд с использованием водяного и тяжелого высокотемпературного жидкометаллического теплоносителей и методики для проведения на них сравнительного анализа полученных данных;
- провести сравнительные экспериментальные и расчетно-теоретические исследования мощностных потерь на воде и на высокотемпературном жидкометаллическом теплоносителе;
- провести исследования по получению геометрии свободной поверхности тяжелого высокотемпературного жидкометаллического теплоносителя, и провести анализ полученных данных;

*Целью работ* первого этапа является сравнительное экспериментальное исследование мощностных потерь имитатора вала на свинцовом и на водяном теплоносителях.

На рис. 1 представлена схема стенда для сравнительных экспериментальных исследований мощностных потерь по поверхности имитатора вала на свинцовом и на водяном теплоносителях.

Стенд ТВС-2015 в базовой комплектации предназначен для проведения исследований характеристик взаимодействия: вращающийся вал – среда, в трех различных средах: вода, воздух, жидкий свинец.

Задачами работ, выполняемых на стенде ТВС-2015, являются:

1. Создание стенда ТВС-2015 для изучения характеристик трения вала насоса в среде ТЖМТ;
2. Проведение исследования влияния трения вала насоса в трех различных средах для последующих сравнительных анализов;
3. Расчетное обоснование потерь мощности, связанных с потерями на трении вала циркуляционного осевого насоса в среде ТЖМТ;
4. Получение и обоснование данных, отображающих поведение свободной поверхности теплоносителя при вращении имитатора вала насоса, геометрическое построение свободной поверхности теплоносителя по определенной функции;
5. Создание базы данных расчетно-теоретических характеристик, подтвержденных экспериментальным исследованием по влиянию трения вала на потери мощности электродвигателя.

Основные характеристики стенда ТВС-2015:

- Теплоноситель – расплав свинца марки С0 ГОСТ 3778-98;
- Температура свинцового теплоносителя – 450 – 500 °С, кратковременно 550 °С;
- Термодинамическая активность кислорода в свинцовом теплоносителе от  $10^{-5}$ - $10^{-4}$  до 10 плюс твердая фаза оксидов свинца;
- Газ в системе газа: аргон, водород, аргоно-водородная и аргоно-кислородная смеси;
- Привод – электродвигатель асинхронный, 1 шт.,  $n_{ном}=1500$  об/мин,  $N_{ном}$  до 11 кВт, с частотным регулированием скорости вращения;
- Система обогрева оборудования и трубопровода контура свинцового теплоносителя – электрическая, нихромовыми спиралями с кордиеритовыми бусами;
- Мощность электронагревательных спиралей стенда, суммарная до 100 кВт, напряжение 380/220 В.

На рис. 2 представлен экспериментальный участок, выполненный в виде насоса, но от насоса отличается тем, что не перекачивает теплоноситель, а лишь имитирует движение вала.

Имитатор вала сделан из трубы 104x2 материал 12X18Н10Т, на конце имитатора вала расположена заглушка с углублением под нижний упорный подшипник, который в свою очередь сделан в виде пяты и подпятника.

Методика испытаний заключалась в следующем, вводился экспериментальный участок, и устанавливалась скорость вращения его имитатора вала от 150 до 600 об/мин, с увеличением на 50 об/мин, выдерживалось время 5 мин, и производилось списание показаний датчика момента вращения, мощности двигателя, также эти замеры происходили на четырех уровнях заполнения, 1-й уровень 100 мм, 2-й 500 мм, 3-й 1000 мм, 4-й 1500 мм. После проведения экспериментальных исследований имитатора вала насоса в среде жидкометаллического и водяного теплоносителя на стенде ТВС-2015 были получены данные, по которым были проведены расчётные обоснования потерь мощности вала о теплоноситель.

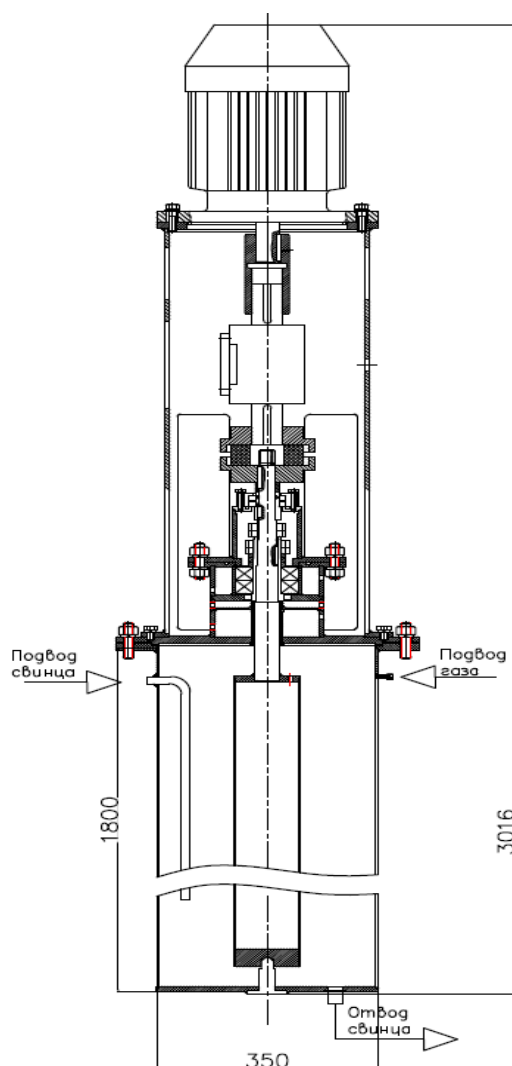


Рис. 2. Схема экспериментального участка

Расчётное обоснование потерь мощности вала о свинцовый и водный теплоноситель проводилось следующим образом:

Расчёт потребляемой мощности при вращательном движении:

$$N = M * \omega = \frac{2\pi * M * n}{60};$$

где  $M$  – момент силы;  $\omega$  – угловая скорость;  $\pi$  – число пи;  $n$  – частота вращения (число оборотов в минуту, об/мин.).

В результате полученных данных, принимая во внимание, что при уровне заполнения в 100 мм нижний упорный подшипник полностью находится в свинце, а при уровне заполнения в 1500 мм экспериментальный участок полностью находится в свинце теплоносителя, видно, что потери мощности на валу равны разнице между потерями на двух уровнях заполнения, а именно:

Для наглядности можно представить график (рис. 3), на котором чётко видно, что зависимость мощности на валу, без учёта нижнего подшипника от числа оборотов линейная.

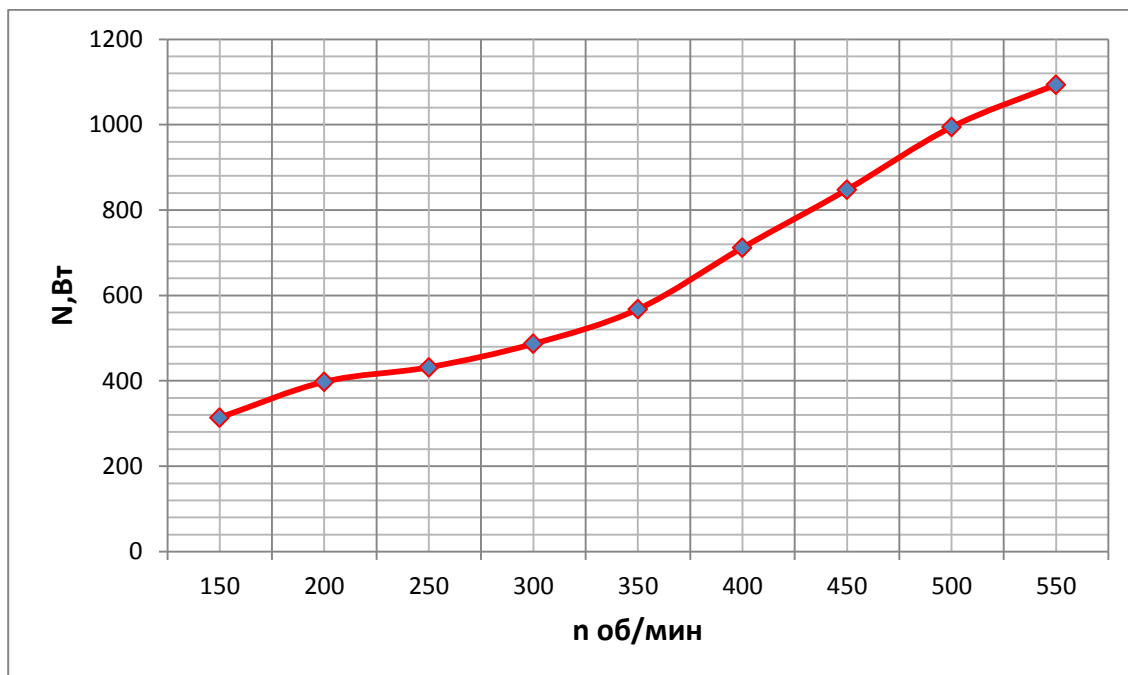


Рис. 3. Зависимость мощности на валу насоса от числа оборотов

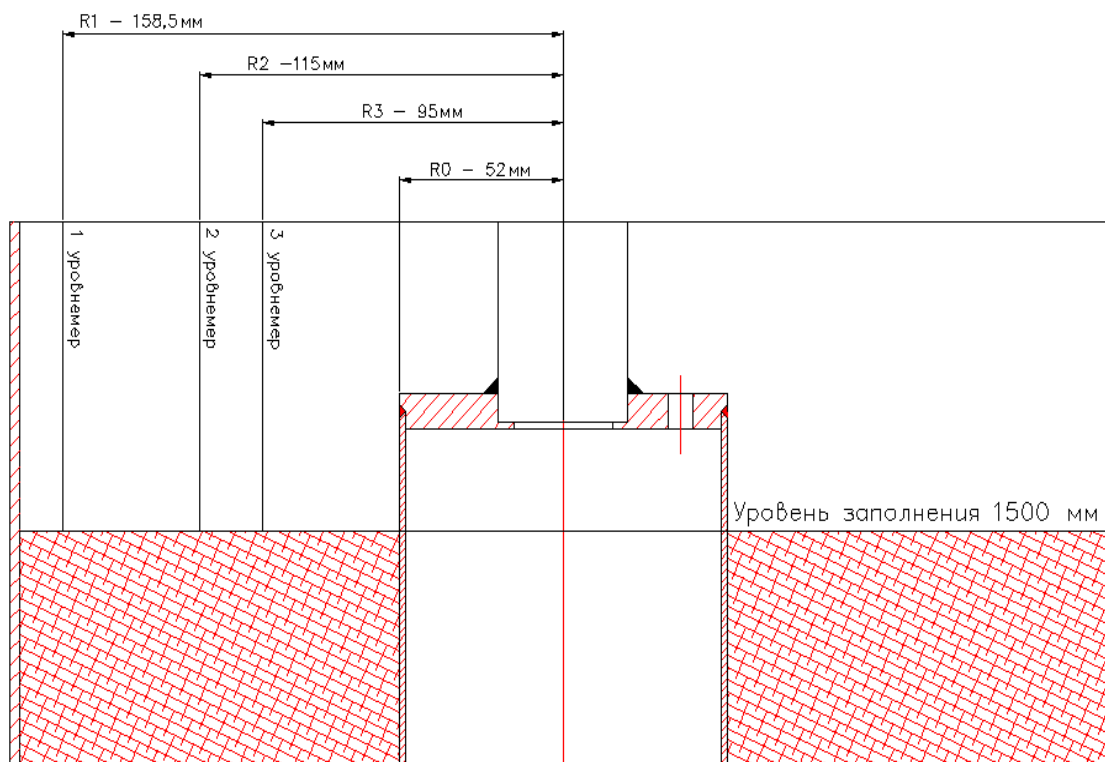


Рис. 4. Расположение уровнемеров на 1-м этапе

Экспериментальные исследования геометрии свободной поверхности свинцового теплоносителя состояли из двух последовательных этапов.

*1 этап.* Использовались три одноконтактных уровнемера для получения геометрии свободной поверхности свинцового теплоносителя, которые располагались на расстоянии от центра вала следующим образом (рис. 4):

$R1 - 158,5 \text{ мм};$

$R2 - 115 \text{ мм};$

$R3 - 95 \text{ мм};$

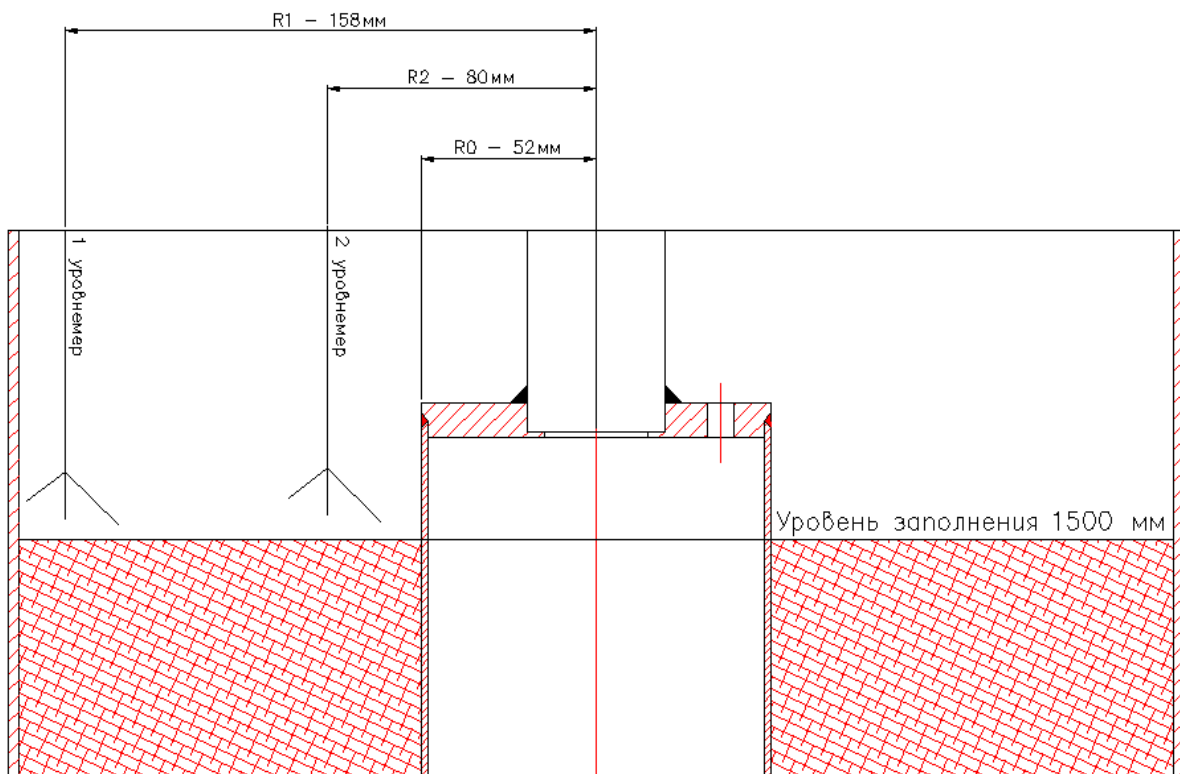
$R0 - 52 \text{ мм}.$

*2 этап.* Использовались два трехконтактных уровнемера для получения геометрии свободной поверхности свинцового теплоносителя, которые располагались на расстоянии от центра вала, следующим образом (рис. 5):

$R1 - 158 \text{ мм};$

$R2 - 80 \text{ мм};$

$R0 - 52 \text{ мм}.$



**Рис. 5. Расположение уровнемеров на 2-м этапе**

Уровень заполнения бака экспериментальной сборки:

I уровень заполнения 500 мм от днища бака экспериментальной сборки,

II уровень заполнения 1000 мм от днища бака экспериментальной сборки,

III уровень заполнения 1500 мм от днища бака экспериментальной сборки.

Давление в системе газа  $P_T = 1,1 \text{ кгс/см}^2$  (со свинцовым теплоносителем).

Температура свинцового теплоносителя  $T_{Pb} = 450-480 \text{ }^\circ\text{C}$ , кратковременно  $550 \text{ }^\circ\text{C}$ .

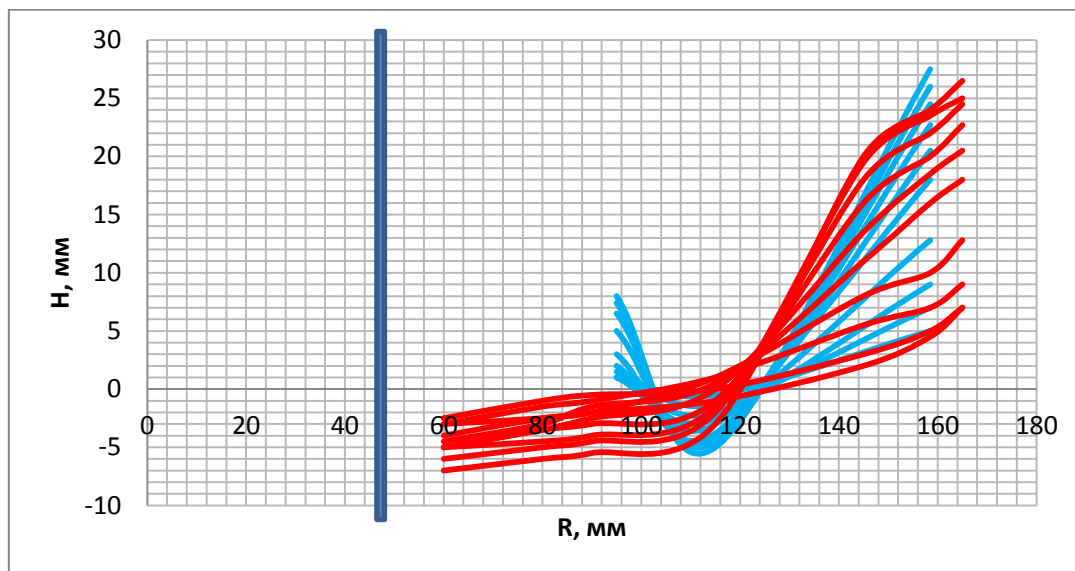
Частота вращения имитатора вала от 150 об/мин до 600 об/мин, при повышении на 50 об/мин.

Анализ сравнительной зависимости высоты свободной поверхности теплоносителя (H) от расстояний расположения сигнализаторов уровня (R) от центральной оси экспериментального участка и скорости вращения имитатора вала (n) (рис. 6-8) на 1-м

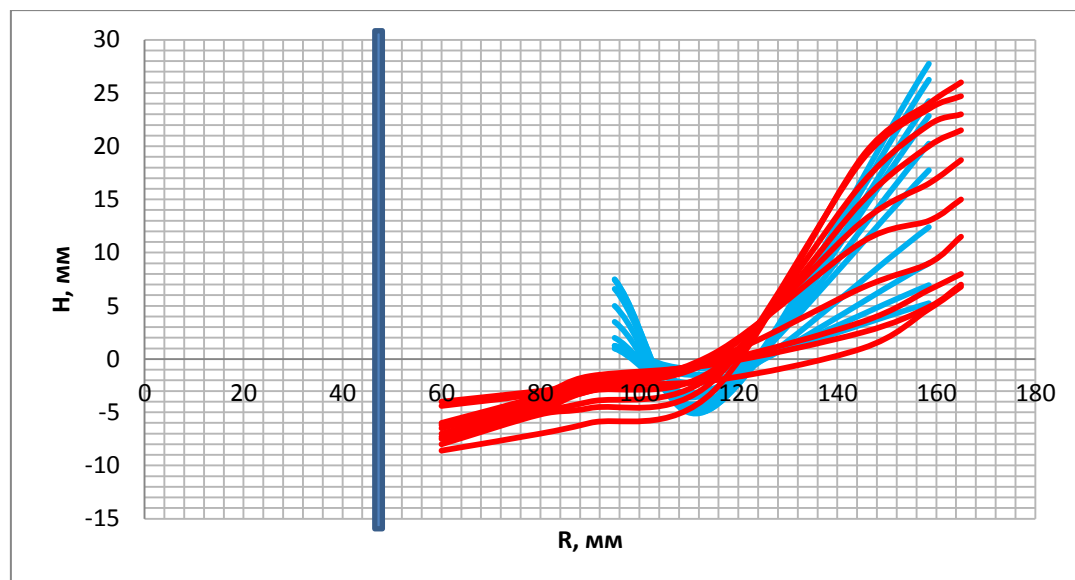
и 2-м этапах, при уровне заполнения бака насоса свинцовым теплоносителем на 1500 мм показывает следующее:

При стояночном режиме на водороде в течение 10 ч налипание на поверхность имитатора вала отсутствует, что доказывает наличие на 1-м этапе оксидных масс.

При уровнях заполнения в 1000 и 500 мм следуют такие же выводы.

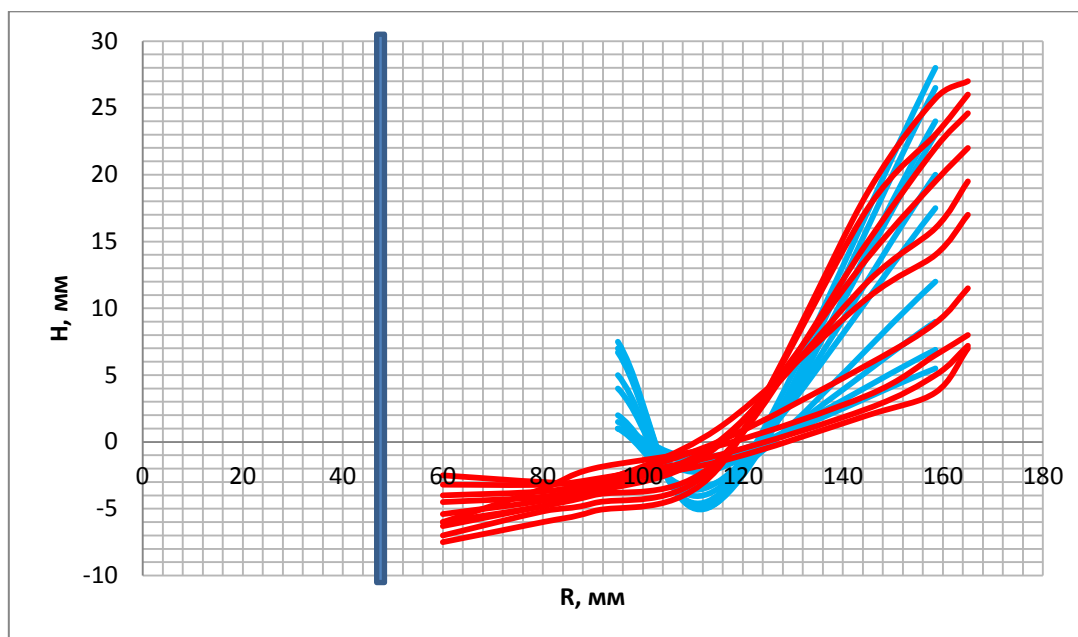


**Рис. 6. Сравнительная зависимость высоты свободной поверхности теплоносителя ( $H$ ) от расстояний расположения сигнализаторов уровня ( $R$ ) и скорости вращения имитатора вала ( $n$ ) при уровне заполнения 1500 мм**



**Рис. 7. Сравнительная зависимость высоты свободной поверхности теплоносителя ( $H$ ) от расстояний расположения сигнализаторов уровня ( $R$ ) и скорости вращения имитатора вала ( $n$ ) при уровне заполнения 1000 мм**





**Рис. 8.** Сравнительная зависимость высоты свободной поверхности теплоносителя ( $H$ ) от расстояний расположения сигнализаторов уровня ( $R$ ) и скорости вращения имитатора вала ( $n$ ) при уровне заполнения 500 мм

### Заключение

Результаты исследований *мощностных потерь* показали существенные различия полученных характеристик на водяном и свинцовом теплоносителе, а также при разных уровнях заполнения. Полученные данные показали линейную зависимость при различных оборотах вращения вала насоса при уровне заполнения теплоносителем в 1500 мм. Ревизия экспериментального участка показала минимальные различия шероховатости поверхностей имитатора вала до и после проведения экспериментов.

Результаты испытаний *геометрии свободной поверхности* показали существенные различия полученных характеристик на водяном и свинцовом теплоносителе, а также при разных уровнях заполнения. Полученные данные показали линейную зависимость при различных оборотах вращения вала насоса при уровне заполнения теплоносителем в 1500 мм. Ревизия экспериментального участка показала минимальные различия шероховатости поверхностей имитатора вала до и после проведения экспериментов.

### Библиографический список

1. **Пфлейдерер, К.** Лопаточные машины для жидкости и газа / К. Пфлейдерер. – М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1960. – 685 с.
2. **Карелин, В.Я.** Кавитационные явления в центробежных и осевых насосах В.Я. Карелин. – М.: Машинстроение, 1975. – С. 5–20; – С. 57–79.
3. **Beznosov, A.V.** Technologies and Major Equipment of Circuits Cooled with Pb, Pb-Bi LAP LAMBERT / A.V. Beznosov, T.A. Vokova, P.A. Vokov // Academic Publishing (2015-01-27)
4. **Безносков, А.В.** Тяжелые жидкометаллические теплоносители в атомной энергетике / А.В. Безносков, Ю.Г. Драгунов, В.И. Рачков. – М.: ИздАТ, 2006. – 370 с.
5. **Безносков, А.В.** Специфика циркуляционных насосов реакторных контуров со свинцовым и свинецвисмутовым теплоносителями, / А.В. Безносков [и др.] // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2009. – № 4. – С. 155–160.
6. **Безносков, А.В.** Особенности гидродинамики свинцового и свинцово-висмутового теплоносителей / А.В. Безносков [и др.] // Атомная энергия. – 2010. – Т. 109. – № 2. – С. 72–76.
7. **Безносков, А.В.** Экспериментальное исследование проточной части модели осевого главного

- циркуляционного насоса реакторной установки с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем / А.В. Безносков [и др.] // Вестник машиностроения. – 2014. – № 2. – С. 53–56.
8. **Боков, П. А.** Исследование условий возникновения и характеристик кавитации в главных циркуляционных насосах реакторов на быстрых нейтронах, охлаждаемых ТЖМТ: дисс. ... на соискание учёной степени канд. техн. наук / Боков П. А. – Н. Новгород, 2015. – 177 с.
  9. **Безносков, А.В.** Экспериментальное исследование условий возникновения и характеристик газовой кавитации в потоке свинцового теплоносителя инновационных ядерных реакторов на быстрых нейтронах / А.В. Безносков [и др.] // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2012. – № 2. – С. 85–94.
  10. **Безносков, А.В.** Оборудование энергетических контуров с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями в атомной энергетике / А.В. Безносков, Т.А. Бокова; Нижегород. гос. техн. ун-т. Литера. – Н.Новгород, 2012. – 536 с.

*Дата поступления  
в редакцию 01.02.2018*

**A.V. Beznosov, T.A. Bokova, N.S. Lukichev, V.A. Gadetov, A.G. Meluzov**

## **EXPERIMENTAL STUDIES ON DETERMINATION OF POWER LOSSES THROUGH FRICTION OF LEAD ON THE PUMP OF THE PUMP, AND GEOMETRY OF ITS FREE SURFACE WHILE ROTATING MOTION**

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

**Purpose:** NSTU conducts experimental studies to determine the power losses during friction of the lead melt on the pump shaft, and the geometry of its free surface during rotational motion.

**Design/methodology/approach:** To substantiate the concept, the authors were invited to consider: the creation of the TVS-2015 stand for studying the characteristics of the friction of the pump shaft in the medium of the liquid medium, investigating the effect of friction of the pump shaft in three different media (water, air, liquid lead) for subsequent comparative analyzes, power associated with the frictional losses of the shaft of the circulating axial pump in the medium of TZHMT, obtaining and justifying the data showing the behavior of the free surface of the coolant during rotation of the imitator of the shaft pump, the geometric construction of the free surface of the coolant by a certain function, the creation of a database of calculated and theoretical characteristics confirmed by the experimental study of the influence of friction of the shaft on the power loss of the motor.

**Findings:** New solutions make it possible to increase the efficiency of the power unit due to the reduction of the mass-dimensions characteristics of the reactor circuit.

**Research limitations/implications:** The results of the studies of losses and tests of the free surface geometry showed significant differences in the characteristics obtained. The test data are fundamental for the improvement of axial circulation pumps for the installation of BREST OD 300.

**Originality/value:** The results of studies of power losses, as well as tests of the geometry of the free surface showed significant differences in the obtained characteristics on the water and lead coolant, as well as at different levels of filling. The data obtained showed a linear dependence at various rotational speeds of the pump shaft at a filling level of the coolant of 1500 mm. Revision of the experimental section showed minimal differences in the roughness of the imitation shaft surfaces before and after the experiments.

*Key words:* lead coolant, loss of power, efficiency of the unit, geometry of free surface, friction of lead coolant about the shaft.

УДК 621.039

А.А. Добров, К.Г. Иванова, М.А. Легчанов, Н.П. Курбатова, И.Ю. Ляхов

**ПОЛУЧЕНИЕ В CFD-ПРОГРАММЕ ЛОГОС КОЭФФИЦИЕНТОВ  
ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЯЧЕЕК ТВС  
С ДИСТАНЦИОНИРУЮЩЕЙ РЕШЕТКОЙ ДЛЯ МОДЕЛИ  
ОДНОМЕРНОГО ПОЯЧЕЙКОВОГО РАСЧЕТА АКТИВНОЙ ЗОНЫ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Статья посвящена разработке методики использования результатов гидродинамического расчета в трехмерной CFD-программе ЛОГОС для формирования недостающих данных о коэффициентах местного гидравлического сопротивления дистанционирующей решетки ТВС в программе одномерного поячейкового расчета активной зоны.

*Ключевые слова:* активная зона, тепловыделяющая сборка, вычислительная гидродинамика.

Повышение требований к качеству и уровню обоснования технических решений, используемых при проектировании ядерных энергетических установок, а также ограничение стоимости и сроков НИР при выборе оптимальных конструкций приводит к необходимости совершенствования программных средств, применяемых для моделирования физических процессов. Реакторная установка при номинальных режимах эксплуатации может работать на тех уровнях мощности, для которых обеспечивается достаточное охлаждение «самых горячих» участков тепловыделяющих сборок (ТВС). Поэтому теплогидравлический расчет активной зоны имеет одно из определяющих значений при проектировании реактора.

Инженерный уровень определения теплогидравлических характеристик активной зоны основан на использовании поячейковых методик. Однако с развитием компьютерных вычислительных технологий весьма актуальной становится задача использования современных программ вычислительной гидродинамики (CFD – computational fluid dynamics) при проведении теплогидравлических расчетов активных зон ядерных реакторов. CFD-программы позволяют учесть локальные гидродинамические эффекты в потоке теплоносителя и спрогнозировать отдельные важные теплогидравлические характеристики элементов ТВС еще на этапе проектирования [1–2].

Следует отметить, что прямой теплогидравлический расчет активной зоны ядерного реактора с использованием трехмерных CFD-программ на сегодняшний день невозможен, что обусловлено необходимостью построения расчетной сетки, состоящей из нескольких миллиардов элементов, за пределами требованиями к вычислительным ресурсам и неполнотой моделей течения двухфазной жидкости в реакторных условиях. Поэтому весьма перспективной является возможность использования CFD-программ для получения замыкающих соотношений по коэффициентам перемешивания и гидравлического сопротивления, а также для доработки математических моделей, реализованных в инженерных ячейковых кодах [3].

В данной работе продемонстрирован вариант подхода к определению указанных коэффициентов для моделей ТВС на основе результатов гидродинамических расчетов, проведенных в CFD-программе ЛОГОС, разработанной в ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ».

**Краткое описание методики поячейкового расчета ТВС ядерного реактора**

Поперечное сечение рассматриваемой части активной зоны реактора условно разбивается на ячейки, в пределах которых свойства теплоносителя усредняются (рис. 1). Канал или ячейка определяется как объем, занимаемый теплоносителем между группой смежных топливных стержней, но при этом учитывается турбулентный и конвективный обмен массой,

импульсом и энергией с соседними ячейками. Система дифференциальных уравнений содержит четыре уравнения (неразрывности, сохранения энергии, сохранения импульса в аксиальном направлении и сохранения импульса в поперечном направлении).

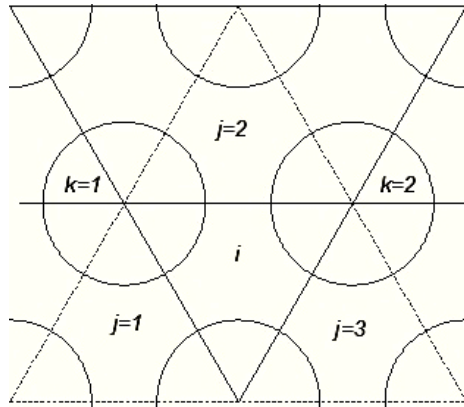


Рис. 1. Схема условного разбиения поперечного сечения на ячейки

Упрощенная форма уравнений баланса имеет следующий вид [4]:

- для массы

$$\frac{d}{dz}(\rho_i \omega_i f_i) + \sum_{j=1}^3 \mu_{\Sigma}^M \frac{\omega_i + \omega_j}{2} (\rho_i - \rho_j) \cdot \Delta S_{ij} = 0$$

-для количества движения вдоль и поперек потока:

$$-\frac{d(p_i f_i)}{dz} = \lambda_i \rho_i \omega_i |\omega_i| f_i + \frac{d}{dz}(\rho \omega_i^2 f_i) - \sum_{j=1}^3 \mu_{\Sigma}^{\omega} \frac{\rho_i + \rho_j}{2} \cdot \frac{\omega_i + \omega_j}{2} \cdot (\omega_i - \omega_j) \cdot \Delta S_{ij},$$

$$p_i - p_j = \lambda_{ij} \frac{\rho_i + \rho_j}{2} \omega_{ij} |\omega_{ij}| \frac{\Delta S_{ij}}{3};$$

- для энергии

$$\frac{d}{dz}(\rho_i \omega_i f_i I_i) = \sum_{k=1}^3 q F_k \Pi_{ij} + \sum_{j=1}^3 \mu_{\Sigma}^T \frac{\rho_i + \rho_j}{2} \cdot \frac{\omega_i + \omega_j}{2} \cdot (I_i - I_j) \cdot \Delta S_{ij},$$

где  $z$  – продольная координата;  $\rho_i$  – плотность;  $\omega_i$  – скорость потока в канале с сечением  $f_i$ ;  $\Delta S_{ij}$  – площадь зазора между твэлами на единицу длины;  $p_i$  – статическое давление;  $\lambda_i$  – коэффициент гидравлического сопротивления в канале;  $\lambda_{ij}$  – коэффициент гидравлического сопротивления поперечному течению в канале;  $I_i$  – энтальпия теплоносителя в канале;  $\mu_{\Sigma}^M$ ,  $\mu_{\Sigma}^{\omega}$ ,  $\mu_{\Sigma}^T$  – суммарный (молекулярный, турбулентный и конвективный) коэффициент межканального обмена массой, количеством движения и энтальпией соответственно.

Такая методика используется многие годы, хотя во многом полагается на замыкающие соотношения (коэффициенты гидравлических потерь на трение и местные сопротивления, коэффициенты теплоотдачи, турбулентного обмена и т.д.), полученные экспериментально. В связи с этим при разработке новых конструкций ТВС зачастую отсутствует информация, необходимая для определения замыкающих соотношений, и, как следствие, возникают сложности в получении результатов в ячейковых программах.

### Методика определения в программе ЛОГОС коэффициентов гидравлического сопротивления дистанционирующей решетки ТВС для отдельных ячеек

Пакет программ ЛОГОС предназначен для стационарных и нестационарных расчетов ламинарного и турбулентного тепломассопереноса в жидких и газообразных средах в произвольных трехмерных областях. Расчет производится на основе численного решения полной системы дифференциальных уравнений гидродинамики и тепломассообмена [5-7].

В качестве объекта исследования была выбрана модель фрагмента ТВС реактора РИТМ-200. Сборка заключена в шестигранный чехол, внутри которого размещены центральный вытеснитель с поглощающим стержнем СУЗ, пучок твэлов и стержни с выгорающим поглотителем [8]. Твэлы дистанционированы друг от друга с помощью пластинчатых решеток (ДР), причем конструкция ДР выполнена таким образом, что ее пластины перекрывают проходное сечение неравномерно, что влияет на распределение скорости теплоносителя после решетки.

Для экономии вычислительных ресурсов рассматривалась область, представляющая собой сегмент модели ТВС с установленной дистанционирующей решеткой (рис. 2).

В расчетной области средствами препроцессора ЛОГОС. ПреПост была сгенерирована гибридная сетка, состоящая из четырехгранных, шестигранных и призматических элементов. В дистанционирующей решетке и непосредственной близости от нее строилась неструктурированная тетраэдрическая сетка.

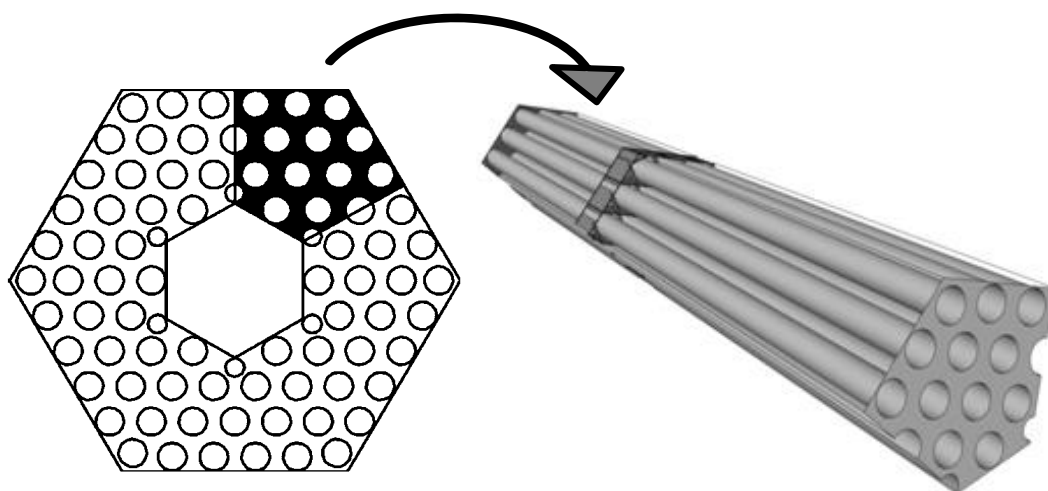


Рис. 2. Общий вид расчетной области с дистанционирующей решеткой

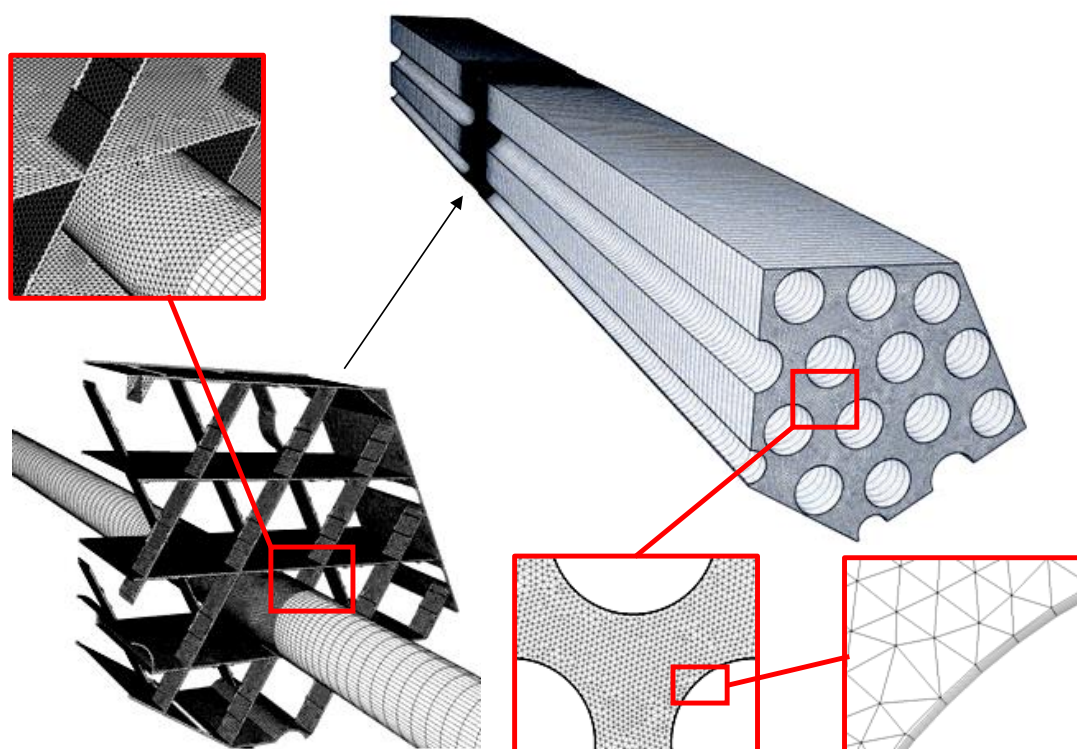
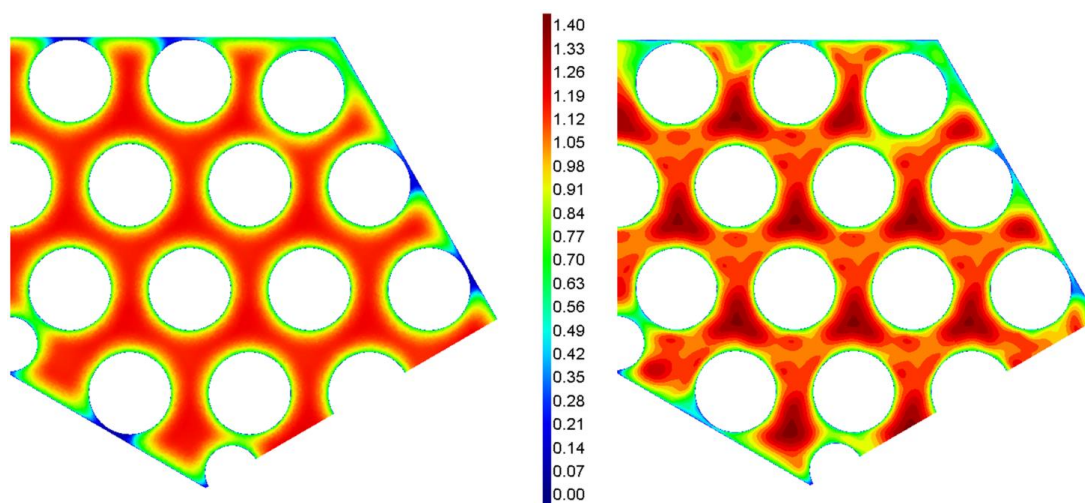


Рис. 3. Общий вид сеточной модели

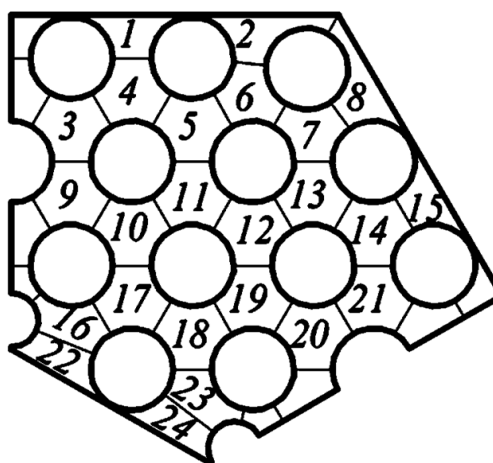
Сетка в пучке твэлов строилась из призматических элементов методом экструзии поверхностных элементов по нормали к границам области тетраэдрической сетки. Максимальный размер элемента в продольном направлении составил  $1/4$  диаметра твэла. Общий вид расчетной сетки представлен на рис. 3.

На рис. 4 представлены картограммы продольной составляющей скорости теплоносителя, нормированной на среднерасходную скорость в сечениях до и после решетки. Можно заметить, что пластины ДР приводят к перераспределению профиля скорости теплоносителя. В тех ячейках, где пластины ДР перекрывают центр, максимум локальной скорости за решеткой на 15% больше среднерасходной скорости через модель, причем профиль скорости относительно равномерно распределен по ячейке. В ячейках, где центр не перекрыт пластинами, профиль скорости имеет выраженный пик, при этом максимальное значение скорости на 25-30% выше среднерасходной.



**Рис. 4. Профили относительной осевой скорости, полученной в программе ЛОГОС до и после ДР**

Учесть влияние пластин ДР на гидродинамику потока в поячейковых программах, как отмечалось ранее, можно путем учета коэффициентов гидравлического сопротивления, индивидуально для каждой ячейки. Результаты CFD-моделирования были использованы при получении замыкающих соотношений для учета влияния ДР в поячейковом коде.



**Рис. 5. Схема разбиения сечения модели на ячейки**

По результатам CFD-расчета были определены КГС каждой ячейки, на которые раз-

бита расчетная область. Значение коэффициента гидравлического сопротивления  $\zeta_i$  определялось по формуле

$$\zeta_i = \frac{2 \cdot \Delta P_{\text{др}}}{\rho \cdot W_i^2}$$

где  $\zeta_i$  – КГС  $i$ -й ячейки на участке модели с ДР;  $W_i$  – среднерасходная скорость через  $i$ -ю ячейку модели после ДР.

Условное разбиение сечения на ячейки проводилось согласно принципам, заложенным в программы поячейкового расчета. Схема условного разбиения сечения представлена на рис. 5.

Алгоритм определения среднерасходной скорости через  $i$ -ю ячейку  $W_i$  в постпроцессоре программы ЛОГОС заключается в следующем:

1. Выбираются элементы сетки, принадлежащие к заданному поперечному сечению модели. Для этого используется фильтр «Построение сечения плоскостью» постпроцессора. Эта процедура реализуется с помощью встроенного макроязыка [9] в виде команд:

```
plane = plane()
plane.set("Type","normal")
plane.set("X", 0)
plane.set("Y", 0)
plane.set("Z", 0)
plane.set("NormalX", 0)
plane.set("NormalY", 0)
plane.set("NormalZ", 1)
```

2. Выбираются элементы сетки, принадлежащие в выбранном сечении к заданной ячейке, ограниченной твэлами  $k_1, k_2, k_3$  схемы рис. 5. Для этого используется фильтр постпроцессора «Абстрактный». Функция реализуется на макроязыке в виде команд:

```
abstract = abstract()
abstract.setParams("triangle", (X1, Y1, Z1), (X2, Y2, Z2), (X3, Y3, Z3)),
```

где  $X1, Y1, Z1$  – координаты твэла, ограничивающего ячейку.

3. По выбранному набору сеточных элементов производится расчет среднего значения скорости в ячейке  $W_i$ . Для этого используется модуль «Калькуляция величин». На макроязыке команда выглядит следующим образом:

```
findAvg("Wz",["Имя элемента сцены"])
```

В имени идентификатора сцены указывается результат выполнения функции по п. 2.

Представленный алгоритм выполняется по циклу для каждой ячейки схемы разбиения. Результат выполнения сценария и определения КГС для каждой ячейки представлен в табл. 1. Полученные значения  $\zeta_i$  сведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения КГС для каждой ячейки расчетной модели

№ ячейки, $i$	1	2	3	4	5	6	7	8
КГС ячейки, $\zeta_i$	0.380	0.370	0.304	0.261	0.301	0.289	0.334	0.448
№ ячейки, $i$	9	10	11	12	13	14	15	16
КГС ячейки, $\zeta_i$	0.261	0.306	0.261	0.302	0.259	0.297	0.483	0.327
№ ячейки, $i$	17	18	19	20	21	22	23	24
КГС ячейки, $\zeta_i$	0.261	0.304	0.259	0.300	0.260	0.364	0.252	0.416

### Заключение

В статье приведены результаты расчетного исследования течения потока теплоносителя за дистанционирующей решеткой во фрагменте ТВС реактора РИТМ-200, проведенного с использованием CFD-программы ЛОГОС. В результате расчета получены данные о коэффициенте гидравлического сопротивления пластинчатой дистанционирующей решетки. Замечено, что конфигурация пластин дистанционирующей решетки приводит к перераспределению расходов по ячейкам. Значения среднерасходных скоростей в ячейках, идентичных в твэльном пучке, но по-разному затесненных пластинами ДР, различаются, что может приводить к неодинаковым условиям охлаждения твэлов. Учет этого эффекта в программах поячейкового теплогидравлического расчета позволяет повысить точность расчета и снизить консерватизм при обосновании теплотехнической надежности активной зоны.

В работе приведен алгоритм написания сценария для автоматизированной обработки результатов CFD расчета и получения необходимых данных для одномерной программы. Использование вычислительной гидродинамики для формирования исходных данных и получения замыкающих соотношений в поячейковых программах является эффективным методом на этапе проработки и оптимизации конструкции ТВС.

### Библиографический список

1. **Добров, А.А.** Применение вычислительной гидродинамики для повышения теплогидравлической эффективности перемешивающих решёток в ТВС-КВАДРАТ / А.А. Добров [и др.] // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. – 2016. – № 3 (114). – С. 55–63.
2. **Дмитриев, С.М.** Применение программы ЛОГОС для исследования особенностей гидродинамики в тепловыделяющей сборке реактора КЛТ-40С / С.М. Дмитриев [и др.] // Системы управления и информационные технологии. – 2014. – Т. 57. – №3.2. – С. 232–236.
3. **Дмитриев, С.М.** Моделирование течения потока теплоносителя в топливной сборке реактора плавучей АЭС с использованием CFD-программы ЛОГОС / С.М. Дмитриев [и др.] // Инженерно-физический журнал. – 2015. – Т. 88. – № 5. – С. 1253–1259.
4. **Дмитриев, С.М.** Расчётное исследование локальной гидродинамики потока теплоносителя во входном участке ТВС реакторной установки РИТМ-200 / С.М. Дмитриев [и др.] // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. – 2017. – № 1. – С. 129–134.
5. **Солонин, В.И.** Теплогидравлические процессы в активных зонах водоохлаждаемых реакторов: учеб. пособие / В.И. Солонин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – 140 с.
6. **Гребенников, А.Н.** Адаптация, верификация и использование пакета программ ЛОГОС для решения задач атомной энергетики / А.Н. Гребенников [и др.] // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: Междунар. научно-технич. конф: сб. тез. докл. 8-й. – Подольск, 2013. – С. 65–66.
7. **Шагалиев, Р.М.** Пакет программ ЛОГОС для моделирования задач атомной энергетики / Р.М. Шагалиев [и др.] // International Congress on Advances in Nuclear Power Plants: сб. тез. и докл. – Четжу (Jeju) Южная Корея, 2013.
8. **Дмитриев, С.М.** Верификация CFD программы ЛОГОС на базе экспериментальных исследований НГТУ по изучению локального массообмена потока теплоносителя в ТВС / С.М. Дмитриев [и др.] // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. – 2016. – № 4. – С. 91–99.
9. **Самойлов, О.Б.** Исследование распределения потоков тепловых и эпитепловых нейтронов в ТВС универсального атомного ледокола / О.Б. Самойлов [и др.] // Атомная энергия. – 2016. – Т.121. – №6. – С. 307–313.
10. Руководство пользователя параллельной системы постобработки ScientificView (версия 1.8.0). Макроязык. – М.: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2015. – 56 с.

*Дата поступления  
в редакцию 10.02.2018*



---

A.A. Dobrov, K.G. Ivanova, M.A. Legchanov, N.P. Kurbatova, I.Yu. Lyahov

**CALCULATION THE HYDRAULIC RESISTANCE COEFFICIENTS IN LOGOS  
CFD-PROGRAM FOR FA WITH SPACER GRID TO USE  
IT IN SUBCHANNEL ANALYSIS**

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

**Purpose:** Numerical simulation of coolant flow in FA with spacer grid using LOGOS CFD-program.

**Design/methodology/approach:** The technique of determination of coefficients of hydraulic resistance of the FA spacer grid with use of results of CFD calculation and a macro language of the LOGOS program is presented.

**Results:** The values of the hydraulic resistance coefficients, which can be used during the subchannel analysis –of the core, are obtained.

*Key words:* core, fuel assembly, computational fluid dynamics.

УДК 681.787

М.А. Земляникин, Ю.В. Раевская

**ОБРАБОТКА СИГНАЛА, ПРИНИМАЕМОГО ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМ ГИДРОФОНОМ**

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева

Рассматриваются две схемы демодуляции сигнала, принимаемого волоконно-оптическим гидрофоном – схема гомодинного метода демодуляции на основе перекрестного перемножения и схема демодуляции на основе вычисления значений функции арктангенса. Приводятся результаты расчетов амплитудных характеристик схем демодуляции, производится их сравнение с экспериментальными характеристиками, а также делается сравнение двух схем демодуляции между собой, даются результаты работы схем демодуляции.

*Ключевые слова:* волоконно-оптический гидрофон, амплитудная характеристика, гомодинный метод демодуляции.

**Введение**

Особенностью водной среды является малая дальность распространения электромагнитных волн в ней. Это затрудняет создание приборов, применяющих беспроводную связь, подобных тем, которые используются на суше. Поэтому большинство телеизмерений в водной среде проводятся с помощью гидроакустических систем. Так, например, задача организации судоходства и осуществления связи военных и гражданских судов успешно решается с помощью гидролокации, разведки морских нефтегазоносных бассейнов, включая входящие в арктический шельф, а также осуществляется компактными и протяженными гидроакустическими системами, применяемыми в системах наблюдения акваторий портов и охраны морских границ.

На протяжении всего прошлого столетия гидроакустические измерения проводились с помощью приборов, использующих пьезокерамические чувствительные элементы [1]. В пьезоэлектрическом гидрофоне используется прямой пьезоэффект некоторых веществ (сегнетова соль, ниобат калия), при котором механические напряжения, приложенные к кристаллу, вызывают появление поверхностных электрических зарядов на его гранях. При переменном механическом напряжении возникает переменная электродвижущая сила на электродах-обкладках. Вещество, обладающее пьезоэлектрическими свойствами, не обязательно является монокристаллом, поэтому нашли широкое применение поликристаллические материалы, называемые пьезокерамикой (например, титанат бария, титанат-цирконат свинца). Чувствительные элементы пьезоэлектрических гидрофонов изготавливают в виде пакетов прямоугольной или цилиндрической формы. Однако такие чувствительные элементы обладают некоторыми существенными недостатками – они имеют большой вес и объем, и их достаточно сложно мультиплексировать.

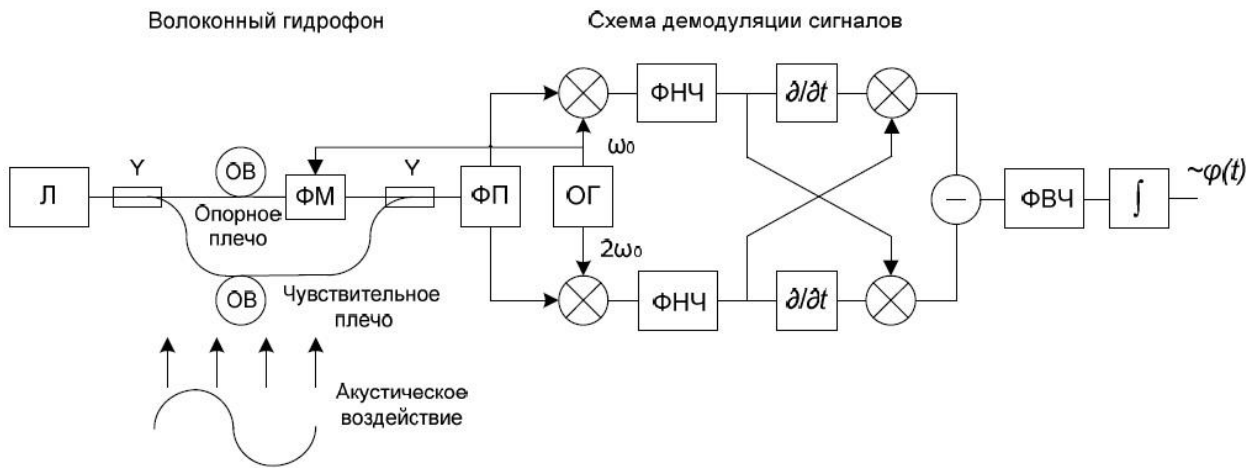
Поэтому за несколько последних десятилетий количество гидроакустических систем, построенных на основе волоконно-оптических интерферометрических датчиков, увеличилось в разы. Причиной этой перемены является ряд преимуществ волоконно-оптических датчиков над пьезоэлектрическими [2, 3]:

- высокая чувствительность,
- устойчивость к электромагнитным помехам,
- электрическая пассивность,
- малые габариты,
- легкость мультиплексирования,
- низкая стоимость изготовления чувствительных элементов,
- приемники могут быть удалены на расстояние 5-10 км от блока сбора данных,
- по одному оптическому волокну можно передавать сигналы многих датчиков.

Несмотря на значительные успехи в области построения современных волоконно-оптических измерительных гидроакустических систем, все еще существует ряд проблем, которые не являются до конца решенными. Поэтому детального рассмотрения требуют вопросы проектирования волоконно-оптического гидроакустического датчика, а также его чувствительного элемента, организации сети волоконно-оптических гидрофонов, определения оптимальных способов демодуляции интерферометрических сигналов и алгоритмов последующей их обработки, которая обеспечивает достижение целей, поставленных перед разработчиком. В настоящей статье рассматриваются схемы демодуляции сигналов, принимаемых волоконно-оптическим гидрофоном и алгоритмы их последующей обработки.

**Схема гомодинного метода демодуляции на основе перекрестного перемножения**

Схема гомодинного метода демодуляции на основе перекрестного перемножения [4] представлена на рис. 1. Левая часть схемы представляет собой волоконно-оптический гидрофон, а правая – схему демодуляции сигналов.



**Рис. 1. Схема гомодинного метода демодуляции на основе перекрестного перемножения:**  
 Л – лазерный источник излучения; Υ – волоконный разветвитель; ОВ – оптическое волокно;  
 ФМ – фазовый модулятор; ФП – фотоприемник; ОГ – опорный генератор; ФНЧ – фильтр  
 низких частот; ФВЧ – фильтр высоких частот, используемый для исключения влияния  
 механических воздействий, а также температуры; ∫ – интегратор

Выходной сигнал интерферометра, входящего в состав волоконно-оптического гидрофона, представляется синусоидальной функцией, аргументом которой является разность фаз между плечами интерферометра  $\theta(t)$ . В разности фаз содержится необходимая информация об измеряемом давлении. Ток фотоприемника на выходе интерферометра представляется формулой

$$i(t) = A \cos \theta(t) + B, \tag{1}$$

где  $A$  и  $B$  – параметры, относящиеся к интенсивности сигнала и чувствительности детектора.

Во многих схемах демодуляции используется также высокочастотное колебание частоты  $\omega_0$ , поэтому ток фотоприемника имеет вид

$$i(t) = A \cos[C \cos \omega_0 t + \varphi(t)] + B, \tag{2}$$

где  $C \cos \omega_0 t$  - несущий сигнал;  $C$  – индекс модуляции;  $\varphi(t)$  включает себя не только интегрирующий нас сигнал, но и смещение рабочей точки интерферометра.

Ток  $i$  имеет значительное количество гармонических составляющих, возникающих из-за фазовой модуляции. Амплитуда  $n$ -й гармоники связана с функцией Бесселя  $n$ -го порядка с аргументом  $\varphi_m$ , используя это разложение, получим формулу:

$$i(t) = A \left\{ \left[ J_0(C) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k}(C) \cos 2k\omega_0 t \right] \cos \varphi(t) - \left[ 2 \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1}(C) \cos(2k+1)\omega_0 t \right] \sin \varphi(t) \right\} + B. \quad (3)$$

Например, амплитуда компоненты с частотой основного тона представляется формулой:

$$-2A J_1(C) \cos \omega_0 t \sin \varphi(t), \quad (4)$$

амплитуда второй гармоники:

$$-2A J_2(C) \cos 2\omega_0 t \cos \varphi(t). \quad (5)$$

Из этого выражения видно, что если  $\varphi(t) = 0$ , то только четные гармоники присутствуют в выходном сигнале (рис. 2), в то время как при  $\varphi(t) = \pi/2$  останутся только нечетные гармоники (рис. 3).

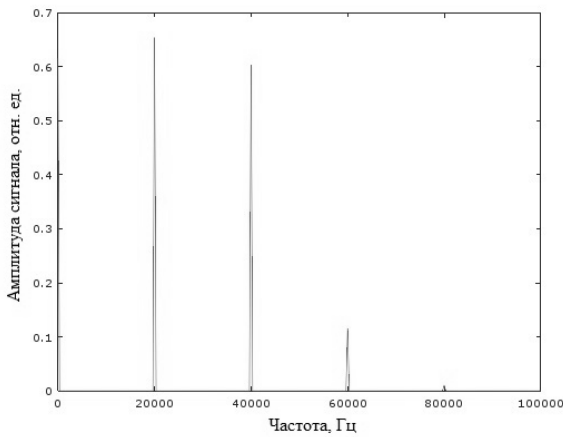


Рис. 2. Спектр выходного сигнала интерферометра при  $\varphi(t) = 0$ ,  $f_0 = 10$  кГц

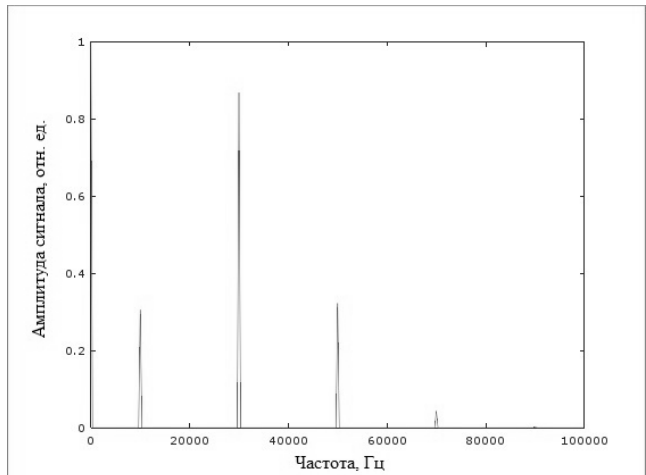


Рис. 3. Спектр выходного сигнала интерферометра при  $\varphi(t) = \pi/2$ ,  $f_0 = 10$  кГц

Похожим образом  $\varphi(t)$  может быть разложен на сигнал с частотой  $\omega$  (циклическая частота измеряемого сигнала) и сдвиг из-за влияния окружающей среды  $\psi(t)$ :

$$\varphi(t) = D \cos \omega t + \psi(t). \quad (6)$$

При разложении в ряд Фурье получаем:

$$\cos \varphi(t) = \left[ J_0(D) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k}(D) \cos 2k\omega t \right] \cos \psi(t) - \left[ 2 \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1}(D) \cos(2k+1)\omega t \right] \sin \psi(t), \quad (7)$$

$$\sin \varphi(t) = \left[ 2 \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1}(D) \cos(2k+1)\omega t \right] \cos \psi(t) - \left[ J_0(D) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k}(D) \cos 2k\omega t \right] \sin \psi(t). \quad (8)$$

Эти уравнения, аналогично (3), показывают, что в случае  $\psi(t) = 0$  в спектре присутствуют только четные гармоники частоты  $\omega$  вокруг четных гармоник несущего сигнала с частотой  $\omega_0$ , а также нечетные гармоники частоты  $\omega$  вокруг нечетных гармоник несущего сигнала (рис. 4).

При  $\psi(t) = \pi/2$  в спектре присутствуют только нечетные гармоники частоты  $\omega$  вокруг четных гармоник несущего сигнала с частотой  $\omega_0$ , а также нечетные гармоники частоты  $\omega$  вокруг нечетных гармоник несущего сигнала (рис. 5).

Чтобы выделить  $\varphi(t)$ , сначала выделим амплитуды первой и второй гармоник частоты  $\omega_0$  из  $i(t)$  с помощью смесителя, перемножив  $i(t)$  с  $G\cos \omega_0 t$  и  $H\cos 2\omega_0 t$ , соответственно. Данные сигналы подают на фильтр нижних частот, на выходе которого получаем амплитуды основной и второй гармоник, соответственно:

$$-2AG J_1(C) \sin \varphi(t), \tag{9}$$

$$-2AH J_2(C) \cos \varphi(t) \tag{10}$$

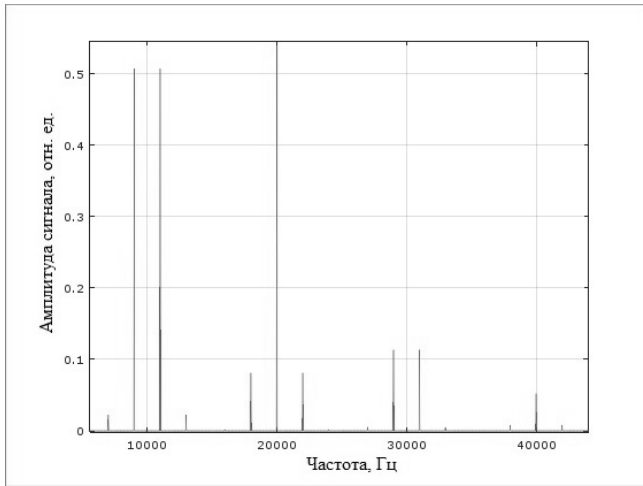


Рис. 4. Спектр сигнала при  $\psi(t) = 0$ ,  $f_0 = 10$  кГц,  $f = 1$  кГц

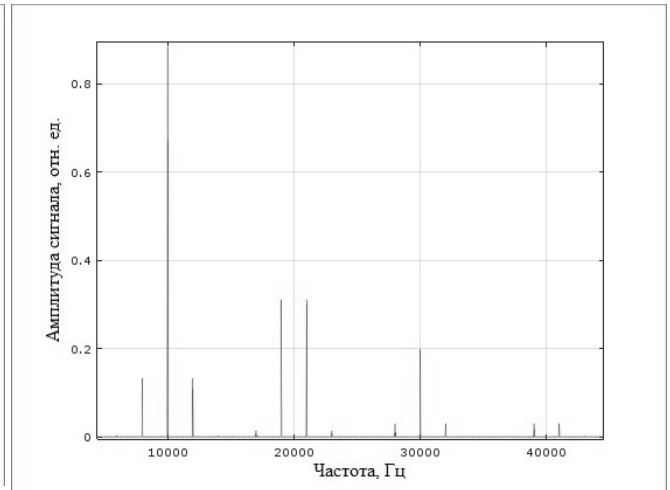


Рис. 5. Спектр сигнала при  $\psi(t) = \pi/2$ ,  $f_0 = 10$  кГц,  $f = 1$  кГц

Затем дифференцируем обе компоненты по времени:

$$-2AG J_1(C) \cos \varphi(t) \dot{\varphi}(t), \tag{11}$$

$$2AH J_2(C) \sin \varphi(t) \dot{\varphi}(t). \tag{12}$$

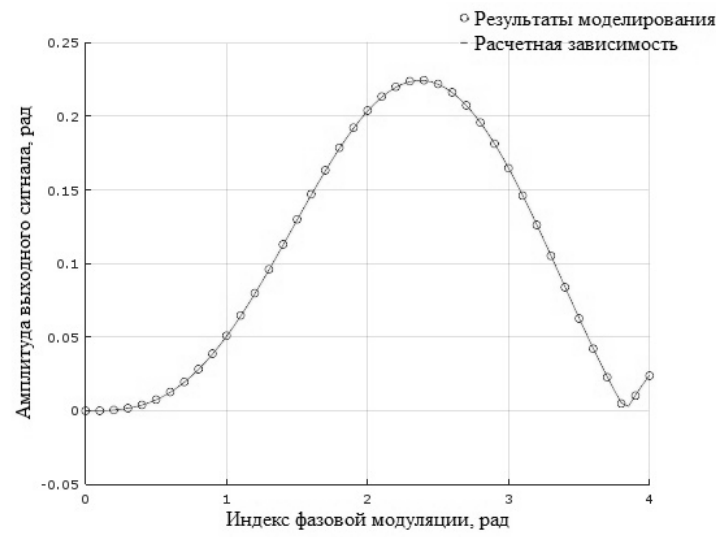
Перемножив (10) и (11), а также (9) и (12), и вычтя второе произведение из первого, получим:

$$\begin{aligned} & (-2A)H J_2(C) \cos \varphi(t) (-2A)G J_1(C) \cos \varphi(t) \dot{\varphi}(t) - \\ & - (-2A)J_1(C) \sin \varphi(t) 2AH J_2(C) \sin \varphi(t) \dot{\varphi}(t) = \\ & = 4A^2 GH J_1(C) J_2(C) (\cos \varphi(t)^2 + \sin \varphi(t)^2) \dot{\varphi}(t) = \\ & = A^2 GH J_1(C) J_2(C) \dot{\varphi}(t). \end{aligned} \tag{13}$$

Таким образом, полученный сигнал прямо пропорционален производной фазы  $\varphi(t)$ . После интегратора сигнал будет иметь вид:

$$4A^2 GH J_1(C) J_2(C) \varphi(t). \tag{14}$$

Из формулы (14) становится понятно, что выходной сигнал прямо пропорционален произведению  $J_1(C) J_2(C)$  и для обеспечения максимальной чувствительности волоконно-оптического интерферометра необходимо максимизировать данное произведение. Результаты моделирования, представленные на рис. 6, показывают, что максимальное значение, равное 0,2246, достигается при  $C = 2,37$  рад, что согласуется с результатами, приведенными в литературе.

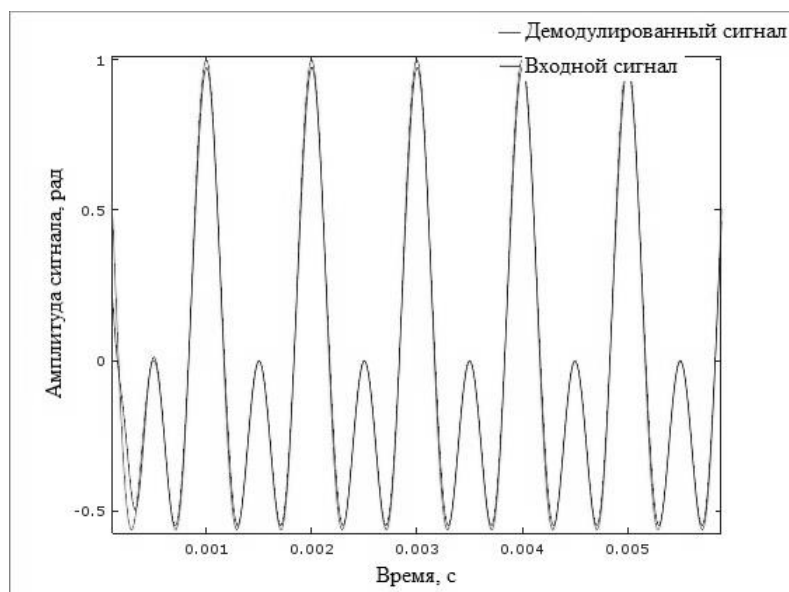


**Рис. 6. Сравнение результатов расчетной и экспериментальной зависимостей амплитуды выходного сигнала от индекса фазовой модуляции  $C$**

Таким образом, получим искомую фазу  $\varphi(t)$ , из которой можно найти значение давления.

*Достоинством* данного метода является независимость выходного сигнала от положения рабочей точки интерферометра, что объясняет его широкое использование.

*Недостаток* – зависимость выходного сигнала от мощности лазера, т.е. неизбежные флуктуации мощности лазерного источника излучения приводят к отклонению демодулированного сигнала от измеряемого.



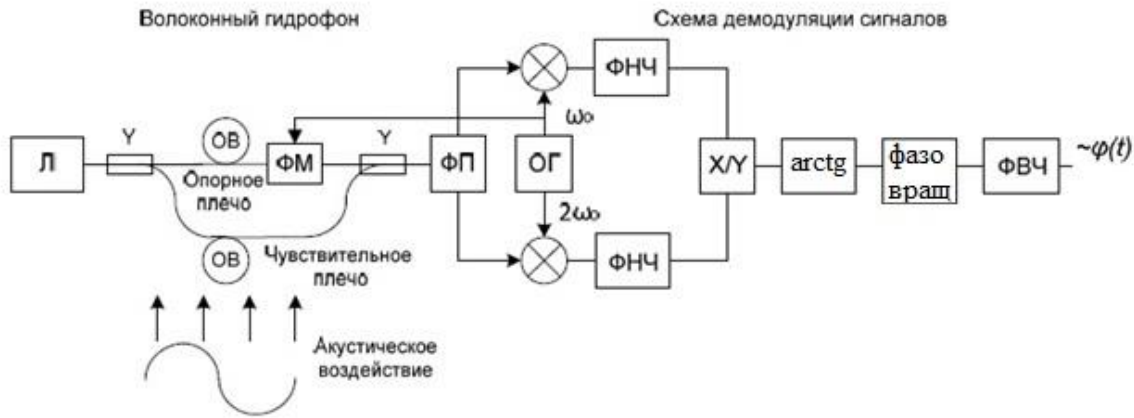
**Рис. 7. Результат работы схемы демодуляции на основе перекрестного перемножения**

Моделирование данной схемы демодуляции было проведено с использованием средств пакета программ математического моделирования MATLAB. В качестве фильтра нижних частот использовался фильтр Баттерворта из-за отсутствия пульсаций и гладкости его амплитудно-частотной характеристики в полосе пропускания. Фильтрация производилась с помощью функции `filtfilt`, которая исключает фазовый сдвиг, но в два раза увеличивает порядок фильтра. Для применения численного дифференцирования была реализована функция `diff`, вычисляющая производную в точке по четырем узлам. Численное интегрирование производилось с помощью встроенной функции `sumtrapz`, использующей метод трапеций.

Результат работы реализованного алгоритма приведен на рис. 7. Измеряемый сигнал равен сумме двух гармонических сигналов с частотами 1 кГц и 2 кГц, и амплитудами, равными 0,5 рад. Также используется нормировка на  $J_1(C)J_2(C)$  и на  $V^2$ . Из рисунка видно, что входной и демодулированный сигналы практически совпадают.

**Схема демодуляции на основе вычисления значений функции арктангенса**

Недостатком схемы гомодинного метода демодуляции на основе перекрестного перемножения, как было изложено ранее, является зависимость выходного сигнала от мощности лазера. Был разработан ряд схем демодуляции, в которых влияние данного фактора исключено. Одной из них является схема гомодинного метода демодуляции на основе вычисления значений функции арктангенса [5], которая приведена на рис. 8.



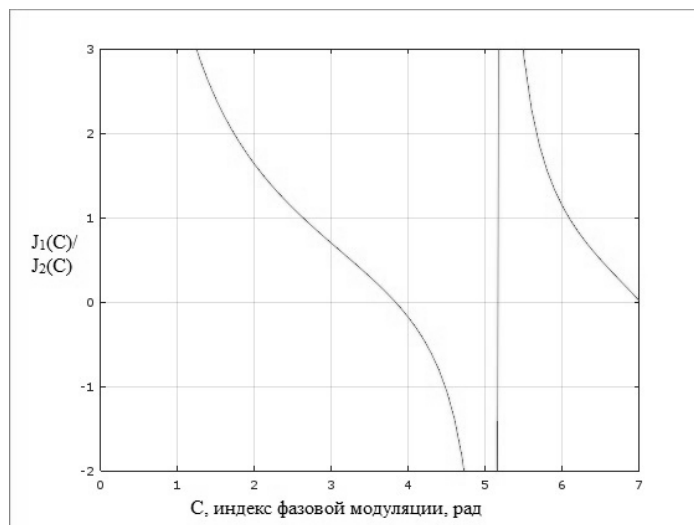
**Рис. 8. Схема гомодинного метода демодуляции на основе вычисления функции арктангенса**

Элементы данной схемы идентичны соответствующим элементам схемы на основе перекрестного перемножения, X/Y – блок деления, arctg – блок вычисления значений функции арктангенса, фазовращ – фазовращатель, ФВЧ – фильтр высоких частот.

Как было показано, в схеме на основе перекрестного перемножения амплитуды сигналов после фильтров нижних частот имеют вид

$$-2AG J_1(C) \sin \varphi(t), \tag{15}$$

$$-2AH J_2(C) \cos \varphi(t). \tag{16}$$

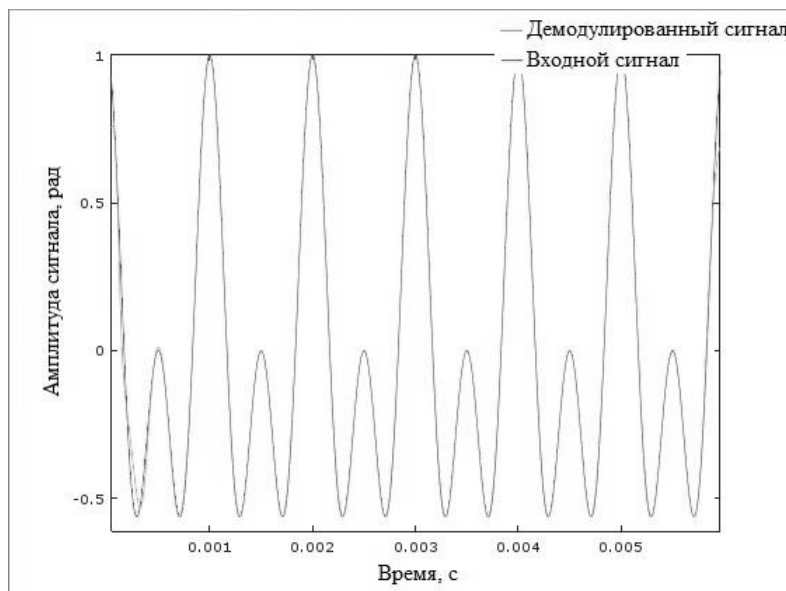


**Рис. 9. Значения функции  $\frac{J_1(C)}{J_2(C)}$  в зависимости от индекса фазовой модуляции**

Тогда при делении (15) на (16) выходной сигнал будет равен  $\frac{J_1(C)}{J_2(C)} \operatorname{tg}\varphi(t)$  при равных амплитудах  $G$  и  $H$ . Чтобы найти искомую фазу, необходимо разделить на  $\frac{J_1(C)}{J_2(C)}$  и вычислить функцию арктангенса. Но в случае, если  $\frac{J_1(C)}{J_2(C)} = 1$ , процедуру деления производить не требуется. Построив зависимость  $\frac{J_1(C)}{J_2(C)}$  от индекса модуляции  $C$  (рис. 9), на графике можно заметить, что  $\frac{J_1(C)}{J_2(C)} = 1$  при  $C = 2,63$  и  $C = 6,09$ .

При данных индексах модуляции результат после применения функции арктангенса будет без искажений. При индексе модуляции  $C = 4,48$   $\frac{J_1(C)}{J_2(C)} = -1$ , так как  $\operatorname{arctg}(-x) = -\operatorname{arctg}(x)$ , и для получения правильного результата необходимо инвертировать знак полученного значения.

Данный алгоритм был реализован с помощью пакета прикладных программ MATLAB, реализация левой части схемы аналогична реализации предыдущей схемы. Значения функции арктангенса вычислялись с помощью встроенной функции `atan`. Результаты работы модели представлены на рис. 10.



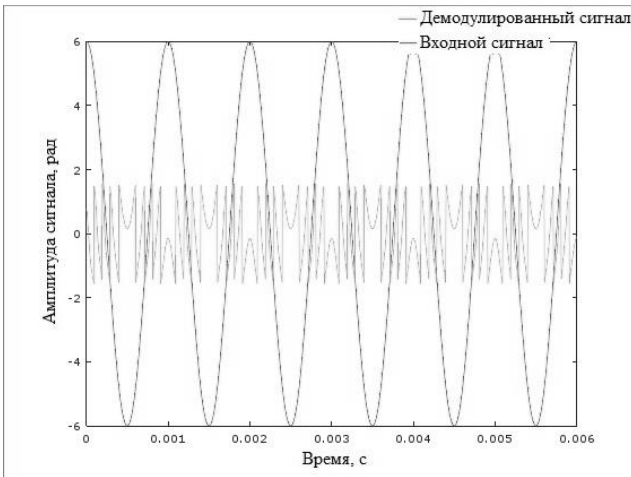
**Рис. 10.** Результат работы схемы демодуляции на основе вычисления значений функции арктангенса при амплитуде сигнала меньше  $\frac{\pi}{2}$

Измеряемый сигнал равен сумме двух гармонических сигналов с частотами 1 кГц и 2 кГц, и амплитудами равными 0,5 рад.

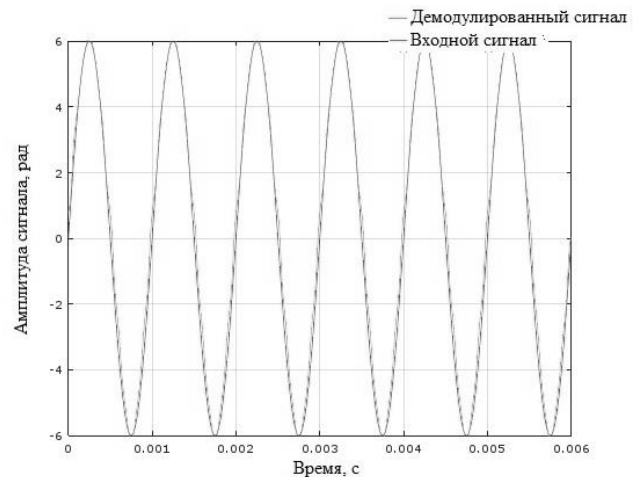
Как известно, функция  $\operatorname{arctg} x$  принимает значения в промежутке  $\left(-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}\right)$ , в то время как значения измеряемой разности фаз могут превышать это значение и достигать десятков радиан. Поэтому без применения фазовращателя выходной сигнал при амплитуде гармонического входного сигнала  $A = 6$  рад и частоте  $f = 1$  кГц выглядел бы так, как показано на рис. 11.

Алгоритм работы данного фазовращателя заключается в следующем: вычисляются значения функции арктангенса в двух соседних точках. Если разность  $\geq \frac{\pi}{2}$ , то из всех последующих значений вычитается  $\frac{\pi}{2}$ , иначе, если разность  $\leq -\frac{\pi}{2}$ , то ко всем последующим значениям прибавляется  $\frac{\pi}{2}$ .





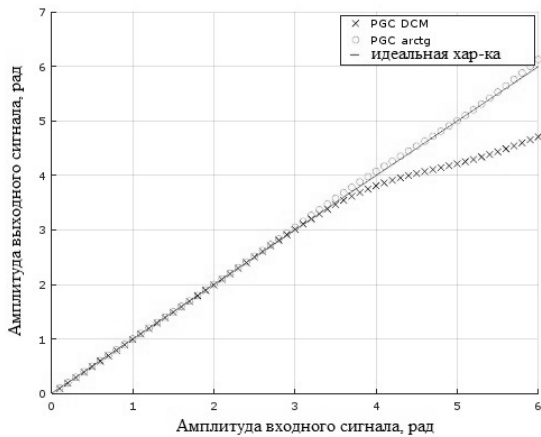
**Рис. 11.** Результат работы схемы демодуляции на основе вычисления значений функции арктангенса при амплитуде сигнала больше  $\frac{\pi}{2}$  без использования фазовращателя



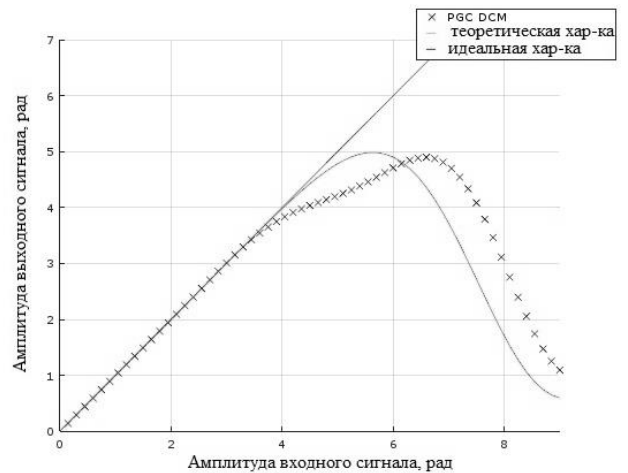
**Рис. 12.** Результат работы схемы демодуляции на основе вычисления значений функции арктангенса при амплитуде сигнала больше  $\frac{\pi}{2}$  при использовании фазовращателя

**Сравнение схем демодуляции на основе перекрестного перемножения и вычисления значений функции арктангенса**

Амплитудные характеристики данных схем гомодинного метода демодуляции на основе перекрестного перемножения и вычисления значений функции арктангенса представлены на рис. 13.



**Рис. 13.** Амплитудные характеристики схем демодуляции



**Рис. 14.** Сравнение теоретической и экспериментальной амплитудной характеристик метода демодуляции на основе перекрестного перемножения

Из графика видно, что амплитудная характеристика первого метода значительно отличается от линейной. В литературе [6] показано, что амплитудная характеристика имеет вид:

$$2A^2 J_1(C) J_2(C) \sum_{k=0}^{N-1} J_k(D) J_{k+1}(D), \tag{17}$$

где  $N$  равно количеству гармоник измеряемого сигнала, укладываемых в полосу пропускания фильтра нижних частот.

Сравнение теоретической и экспериментальной [7] амплитудных характеристик для метода перекрестного перемножения представлено на рис. 14.

Качество работы реализованных демодуляторов можно оценить по табл. 1, в которой указана величина среднеквадратического отклонения в зависимости от вида модулирующего сигнала.

*Таблица 1*

**Величина среднеквадратического отклонения (СКО) в зависимости от вида модулирующего сигнала**

Модулирующее сообщение	Величина СКО при использовании PGC DCM	Величина СКО при использовании PGC arctg
Двухтональное (500 Гц, 1 кГц)	0,0004	0,0014
Двухтональное (500 Гц, 2 кГц)	0,0025	0,0016
Трехтональное (500 Гц, 1 кГц, 2 кГц)	0,0452	0,0023

Результаты в табл. 1 свидетельствуют о том, что СКО в первом методе резко увеличивается при усложнении сигнала.

### Заключение

Была рассмотрена реализация схем гомодинного метода демодуляции на основе перекрестного перемножения и на основе вычисления значений функции арктангенса. Реализация производилась с помощью пакета прикладных программ MATLAB. Проверялась работоспособность данных схем на типовых сигналах. Полученные при моделировании амплитудные характеристики сравнивались с теоретическими характеристиками. Также оценивалось качество алгоритмов по величине среднеквадратического отклонения.

Из приведенного анализа становится ясно, что метод на основе вычисления значений функции арктангенса обладает большей точностью и его амплитудная характеристика линейна в большем диапазоне, поэтому при реализации схемы демодуляции в цифровом виде метод гомодинной демодуляции на основе вычисления значений функции арктангенса более предпочтителен.

### Библиографический список

1. **Рыбьянец, А.Н.** Современное состояние и перспективы развития пьезоэлектрической керамики за рубежом / А.Н. Рыбьянец, В.П. Сахненко // Микросистемная техника. – 2002. – № 3. – С. 16–22.
2. **Fiber Optic Hydrophones.** Stockbridge: 2011. – 5 p.
3. **Eisenmenger, W.** Fiber optic probe hydrophone / W. Eisenmenger, J. Staudenraus, C. Wurster // Proc. of the IEEE Ultrasonics Symposium. – 1994. – V. 2. – P. 941–944.
4. **Dandridge, A.** Homodyne demodulation scheme for fiber optic sensors using hase generated carrier / A. Dandridge , T.G. Gialloronzi, A.B. Tveten // IEEE Journal of Quantum Electronics. – 1982. – V. 18. – № 10. – P. 1647–1653. doi: 10.1109/JQE.1982.1071416
5. **Liao, Y.** The arctangent approach of digital PGC demodulation for optic interferometric sensors / Y. Liao, X. Mao, L. Wang, M. Zhang // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2006. V. 6292. Art. 62921E. doi: 10.1117/12.678455
6. **Плотников, М. Ю.** Волоконно-оптический гидрофон : дисс. ... канд. техн. наук : 05.11.01 / Плотников, М. Ю. – СПб.: НИУ ИТМО, 2014. – 155 с.

7. **Беликин, М.Н.** Экспериментальное сравнение алгоритмов гомодинной демодуляции сигналов для фазового волоконно-оптического датчика / М.Н. Беликин [и др.] // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2015. – Т. 15. – № 6. – С. 1008–1014.

*Дата поступления  
в редакцию 01.02.2018*

**М.А. Zemlyanikin, Yu.V. Raevskaya**

## **PROCESSING OF SIGNALS ACCEPTED BY FIBER-OPTICAL HYDROPHONE**

Nizhny Novgorod state technical university. R.E. Alekseev

**Purpose:** Despite significant progress in building modern fiber-optic measuring sonar systems, there are still a number of problems that are not completely resolved. Therefore, detailed consideration requires the design of a fiber-optic hydroacoustic sensor, as well as its sensitive element, the organization of a network of fiber-optic hydrophones, the determination of optimal methods for demodulating interferometric signals and algorithms for their subsequent processing, which ensures the achievement of the goals set for the developer. The purpose of this work is to investigate the operation of possible demodulation schemes for signals coming from an interferometer included in a fiber-optic hydrophone, as well as algorithms for the subsequent processing of these signals.

**Design/methodology/approach:** The operation of demodulation circuits was tested using the MATLAB software package.

**Findings:** The analysis showed that the homodyne modulation scheme based on calculating the values of the arctangent function is more accurate and its amplitude characteristic is linear over a larger range, therefore, when the demodulation scheme is implemented digitally, the homodyne demodulation method based on calculating the values of the arctangent function is more preferable.

**Research limitations/implications:** Amplitude characteristics were obtained for circuits for two signal demodulation schemes (based on cross multiplying and calculating the values of the arc tangent function), a comparison was made between the theoretical and experimental amplitude characteristics.

**Originality/value:** The amplitude characteristics of the demodulation circuits and algorithms for processing interferometer signals obtained as a result of the investigation can be used in the future to design a fiber-optic hydrophone and organize a network of fiber-optic hydrophones.

*Key words:* fiber-optic hydrophone, amplitude characteristic, homodyne demodulation method.

УДК 621.039.5

А.В. Кайнова, Ю.П. Сухарев, Г.Н. Власичев

**РЕАКТОРНЫЕ УСТАНОВКИ СВЕРХМАЛОЙ МОЩНОСТИ**

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева

**Цель:** Анализ основных тенденций в проектировании современных реакторов малой мощности.**Методология:** Анализ доступных источников по тематике исследования: статей, материалов конференций, отчетов.**Результаты:** Проведен обзор некоторых из существующих проектов реакторных установок сверхмалой мощности как российских, так и зарубежных. Приведены основные характеристики разрабатываемых реакторов, некоторые особенности их конструкции, а также область их применения и характеристики безопасности. Определена цель дальнейших разработок и задачи, необходимые для достижения поставленной цели.*Ключевые слова:* реакторы малой и сверхмалой мощности, водо-водяные энергетические реакторы, реакторы на быстрых нейтронах, высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы, реакторы с жидкосольевым теплоносителем.**Введение**

По мере развития ядерной энергетики с 1950-х годов мощность реакторных установок возросла с 60 до более 1600 МВт. Однако наращивание мощности ведет к увеличению массогабаритных характеристик, капиталовложений, количества обслуживающих реакторную установку систем аварийной и нормальной эксплуатации, персонала. Таким образом, для некоторых потенциальных потребителей ядерной энергии строительство крупного реактора оказывалось экономически невыгодным или в судовой энергетике вовсе невозможным. Как следствие, активно развивались и небольшие энергетические реакторы, прежде всего, для использования в составе судовых установок, а также проведения исследовательских работ.

Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ) определяет «малые» реакторы как реакторы мощностью до 300 МВт (электрических), «сверхмалые» до 15 МВт.

Сегодня из-за высоких капитальных затрат при строительстве крупных реакторов, а также потребности в обслуживании отдаленных и труднодоступных районов, небольших электрических цепей наблюдается повышение интереса к проектам реакторов малой и сверхмалой мощности. Современные маломощные реакторные установки являются высокотехнологичными, надежными и безопасными в течение длительного срока службы, а также простыми по своему устройству. Кроме того, большинство из них имеют большое количество пассивных систем безопасности, не требующих вмешательства оператора в аварийной ситуации. Многие из проектируемых маломощных установок предназначены для размещения под землей, что обеспечивает высокую защищенность от террористических угроз и хищения делящихся материалов, а также позволяет локализовать выход радиоактивных продуктов.

В докладе Всемирной ядерной ассоциации [1] отмечено, что востребованность маломощных реакторов определяется рядом факторов:

- высокотехнологичность данного типа реакторов позволяет наладить серийное производство, повысив качество и эффективность строительства;
- возможность подземного или подводного размещения обеспечивает защиту от естественных (например, сейсмических) или антропогенных (например, ударных) воздействий;
- малые габариты и высокий уровень самозащищенности позволяют экспортировать реакторы малой мощности в страны, в которых отсутствует собственная ядерная энергетика;

- серийное производство и большое количество пассивных систем безопасности позволяют в разы снизить затраты на строительство по сравнению с крупными реакторами. Согласно отмеченному ранее, область возможного применения маломощных реакторов достаточно обширна, они могут быть использованы:

- в качестве автономных источников электро- и теплоснабжения в труднодоступных и удаленных районах;
- для научных и прикладных исследований студентов вузов ядерного направления;
- как тренажеры для подготовки персонала АЭС (позволяют наиболее полно смоделировать условия работы на атомной станции по сравнению с существующими тренажерами);
- при эксплуатации длительное время в режиме саморегулирования могут быть достаточно востребованы в странах, где отсутствует собственная атомная энергетика либо научно-технический уровень не позволяет постройку собственных станций.

Хорошее представление о разработках маломощных реакторов дают сообщения и доклады, сделанные на секции «Малая атомная энергетика» 10-й конференции Ядерного общества России (1999г.) [2], на Российской конференции молодых ученых, специалистов, аспирантов, студентов «Атомные электростанции сверхмалой мощности для прикладных и учебных целей» [3] (2016г.), материалы изданий РНЦ «Курчатовский институт» по истории атомной энергетике Советского Союза и России (2004г.) [4], а также отчет Агентства по ядерной энергии Организации экономического сотрудничества и развития (2011г.) [5].

Целью данной работы является анализ основных тенденций в проектировании современных маломощных реакторов. Представлен краткий обзор некоторых из существующих проектов реакторов сверхмалой мощности и предложен концепт реактора, представляющий интерес для дальнейшей разработки.

В данной статье рассмотрены следующие проекты реакторов сверхмалой мощности:

- МАСТЕР (Россия);
- БРУЦ (Россия);
- МАРС (Россия);
- ГРЭМ (Россия);
- ELECTRA (Швеция);
- Rapid-L (Япония);
- U-Battery (Великобритания, Нидерланды).

### Российские проекты

Проект реактора **МАСТЕР** (Малогобаритный автономный саморегулируемый теплопроводный реактор) [6] разрабатывается в Институте атомной энергетики г. Обнинска. Реактор представляет собой установку водо-водяного типа, уменьшенную копию ВВЭР-1000. Предназначен для использования на учебных АЭС, также рассматривается возможность экспорта в страны, начинающие освоение ядерной энергетике. Основные характеристики реакторной установки приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики реактора МАСТЕР

Параметр	Значение
1	2
Мощность реактора (тепловая), кВт	300
Кампания реактора, лет	60
Активная зона	
Высота активной зоны, м	1,6

Радиус активной зоны, м	0,5
-------------------------	-----

Окончание табл. 1

1	2
Материал топлива	UBe <sub>13</sub> +Mg
Обогащение по U-235, %	40
Доля Mg в топливе, %	25
Отражатели	
Толщина радиального отражателя, мм	100
Толщина аксиального отражателя, мм	100
Материал отражателей	Be

Тепло с активной зоны снимается контуром с естественной циркуляцией, теплоноситель – вода высокой чистоты. Для компенсации потери реактивности при выгорании топлива используются стержни выгорающего поглотителя – борированной стали с добавлением 3% природного бора.

Также авторы отмечают, что регулирование мощности реактора обеспечивается за счет введения в реактор контура жидкого поглотителя.

Основным недостатком данной реакторной установки является высокое обогащение топлива, которое по международным стандартам не должно превышать 20%. Высокое обогащение обуславливалось необходимостью минимизации скорости потери реактивности в ходе кампании реактора. В качестве мер по пресечению хищения делящихся высокообогащенных материалов предлагается размещение реакторной установки под землей. Однако разработчиками отмечается, что в дальнейшем будут рассмотрены пути снижения топливного обогащения.

Проект реактора **БРУЦ** (Быстрый реактор для учебных целей) [7] также предложен специалистами Института атомной энергетики г. Обнинска.

Авторами рассматривается возможность создания исследовательского реактора на быстрых нейтронах с моноблочной компоновкой основного оборудования. Данная установка может быть использована в качестве учебной, для обучения аспирантов и студентов принципам обращения с быстрыми реакторами, а также для подготовки специалистов АЭС и научных центров. Рассматривается применение реактора и для прикладных задач, таких как выжигание младших актинидов и производство изотопов. Основные характеристики реакторной установки приведены в табл. 2.

Таблица 2

## Характеристики реактора БРУЦ

Параметр	Значение
Мощность реактора (тепловая), МВт	0,5
Кампания активной зоны, лет	20
Расчетный срок службы реактора, лет	40
Активная зона	
Высота активной зоны, м	0,62
Радиус активной зоны, м	0,618
Материал топлива	UO <sub>2</sub>

Обогащение по U-235, %	19,7
------------------------	------

В качестве теплоносителя рассматриваются естественный свинец и свинец, обогащенный по изотопу  $^{208}\text{Pb}$ . Тепло от реактора отводится за счет естественной циркуляции теплоносителя первого контура.

Разработчиками также предусмотрена система пассивного отвода тепла за счет естественной циркуляции воздуха в зазоре между стенками корпуса и шахты реактора. Данная система обеспечивает отвод остаточного тепла и сброс его в атмосферу как при аварийном, так и штатном расхолаживании БРУЦ.

Проект реактора МАРС (Медицинский америциевый реактор солевой) [8] предложен группой специалистов ЭНИМЦ «Моделирующие системы», ГНЦ РФ – ФЭИ им. А. И. Лейпунского, Института атомной энергетики г. Обнинска, а также Университета им. Бен-Гуриона (Израиль).

Реакторная установка предназначена для лучевой терапии злокачественных образований методами нейтронной и нейтронозахватной терапии. Предполагается размещение реактора непосредственно на площадке онкологической клиники. Основные характеристики установки приведены в табл. 3.

Таблица 3

## Характеристики реактора МАРС

Параметр	Значение
Мощность реактора, кВт	$\leq 10$
Расчетный срок службы реактора в старт-стопном режиме, ч	400
Активная зона	
Высота активной зоны, м	0,21
Радиус активной зоны, м	0,084
Материал топлива	$\text{Am}_2(\text{SO}_4)_3$
Обогащение по $^{242\text{m}}\text{Am}$ , %	$> 50$

Активная зона располагается в стакане из окиси бериллия, который является отражателем. Для выхода пучка нейтронов один из торцов открыт, на нем размещен фильтр нейтронного пучка. Твэлы представляют собой параллельно расположенные пустотелые диски, соединенные каналами для залива и удаления топлива. Теплосъем осуществляется естественной циркуляцией воды, циркулирующей в межтвэльном пространстве.

Отмечается, что установка имеет три барьера безопасности: Твэлы, прочный корпус с контуром циркуляции теплоносителя и корпус реактора в целом. Функции компенсаторов выгорания, регулирования и аварийной защиты выполняют шесть поглощающих стержней из бериллия и карбида бора.

Авторы отмечают технологическую сложность получения высокого обогащения по изотопу  $^{242\text{m}}\text{Am}$ , в связи с чем в [9] приведены исследования других возможных топливных композиций. По результатам расчетов, с целью повышения безопасности и технологичности, решено использовать в качестве топлива диоксид урана с обогащением по  $^{235}\text{U}$  не более 20%. С позиции экономической привлекательности твэлы в виде дисков-пластин заменены на цилиндрические.

Проект реактора ГРЭМ [10] разработан специалистами НИКИЭТ им. Н.А. Доллежала (г. Москва).

Реакторная установка создавалась для транспортабельной атомной станции сверхмалой мощности на основе технологий, созданных НИКИЭТ для установок космического бази-

рования. Основное назначение ГРЭМ – тепло- и электроснабжение локальных потребителей, в основном объектов инфраструктуры бытового и промышленного назначения.

ГРЭМ представляет собой высокотемпературный быстрый газоохлаждаемый реактор с активной зоной на основе наноструктурированного карбонитридного топлива, разработанного в рамках программы развития космической энергетики. Теплоноситель – гелий-ксеноновая смесь, позволяющая обеспечить минимальные массогабаритные характеристики. Тепловая мощность реактора составляет 2,6 МВт, электрическая – 1 МВт. Срок эксплуатации установки – до 25 лет без перегрузок топлива.

Транспортировка установки предполагается на трех полуприцепах ЧМЗАП-99990 на базе тягача МАЗ-537 «Уран».

Вопросы о расположении и составе радиационной защиты на данный момент прорабатываются.

### Зарубежные проекты

Проект реактора **ELECTRA** (European Lead Cooled Training Reactor) [11] предложен шведскими инженерами из Королевского технологического института г. Стокгольма (Швеция).

ELECTRA – маломощный реактор на быстрых нейтронах, предназначенный для учебных целей: исследований динамики быстрых реакторов, технологий топливного цикла, подготовки операторов АЭС. Данная реакторная установка относится к IV поколению. Основные характеристики реакторной установки приведены в табл. 4.

Отмечается, что плутоний для топливной композиции данного реактора может быть использован из отработанного уранового топлива. В качестве теплоносителя первого контура используется свинец со 100%-ным уровнем естественной циркуляции. Компенсация избыточной реактивности осуществляется за счет специальных конструкций – вращающихся «барбанов», расположенных по периметру активной зоны и заполненных выгорающим поглотителем В<sub>4</sub>С. Обогащение по бору составляет 90%.

Таблица 4

#### Характеристики реактора ELECTRA

Параметр	Значение
Мощность реактора (тепловая), МВт	0,5
Кампания активной зоны (на полной мощности), лет	15
Активная зона	
Высота активной зоны, м	0,3
Радиус активной зоны, м	0,15
Материал топлива	(Pu <sub>0,4</sub> Zr <sub>0,6</sub> )N
Содержание <sup>15</sup> N в топливе, %	90

Проект реактора **Rapid-L** (Refueling by All Pins Integrated Design) [12] разработан в Японском институте атомной энергии.

Rapid-L – реактор сверхмалой мощности на быстрых нейтронах. Изначально проектировался для использования в качестве источника энергии на Луне. Также в сети Интернет [13] появлялись сообщения о намерениях японских инженеров использовать данный реактор в качестве источника электро- и теплоснабжения офисных зданий и многоквартирных домов. Основные характеристики реактора Rapid-L приведены в табл. 5.



Таблица 5

## Характеристики реактора Rapid-L

Параметр	Значение
Мощность реактора (тепловая), МВт	5
Кампания активной зоны (на полной мощности), лет	10
Активная зона	
Высота активной зоны, м	0,6
Радиус активной зоны, м	0,6
Материал топлива	UN
Обогащение по U-235, %:	
внутренняя часть активной зоны, %	40
внешняя часть активной зоны, %	50

В качестве теплоносителя, охлаждающего активную зону реактора, используется жидкометаллический изотопически чистый  ${}^7\text{Li}$ . Топливные сборки в реакторе образуют единый блок, полностью заменяемый при перегрузках. Для обеспечения длительной безопасной и автономной эксплуатации в реакторе Rapid-L используется трехмодульная система управления, включающая модули ввода и вывода поглотителя нейтронов в реактор, а также модуль, обеспечивающий саморегулирование реактивности при изменении температуры. В качестве выгорающего поглотителя в данном реакторе используется жидкий  ${}^6\text{Li}$  с обогащением по данному изотопу 95%.

Благодаря трехмодульной системе управления реактор может функционировать полностью в автономном режиме (без оператора) [14].

Проект реактора **U-Battery** [15] разрабатывался в университетах Манчестера (Великобритания) и Делфта (Нидерланды). Позднее для продвижения проекта был сформирован консорциум во главе с британской компанией URENCO.

U-Battery представляет собой высокотемпературный газоохлаждаемый реактор на тепловых нейтронах. Установка может быть использована как источник тепло- и электро-снабжения для крупных промышленных объектов, удаленных и труднодоступных районов, а также в качестве резервных источников энергии для крупных атомных станций. Основные характеристики реакторной установки приведены в табл. 6.

Таблица 6

## Характеристики реактора U-Battery

Параметр	Значение
1	2
Мощность реактора (тепловая), МВт	10
Расчетный срок службы реактора, лет	60
Интервал между перегрузками, лет	5
Активная зона	
Высота активной зоны, м	0,32
Радиус активной зоны, м	0,108
Материал топлива	UO <sub>2</sub>
Обогащение по ${}^{235}\text{U}$ , %	20

Окончание табл. 6

1	2
Отражатели	
Толщина радиального отражателя, мм	200
Толщина аксиального отражателя, мм	200
Материал радиального и аксиального отражателей	BeO
Толщина центрального отражателя, мм	250
Материал центрального отражателя	графит

В данном реакторе используются шаровые твэлы TRISO, теплосъем с которых осуществляется гелием в режиме естественной циркуляции. Органы СУЗ располагаются в центральном графитовом отражателе. Для компенсации запаса реактивности используются стержни с выгорающим поглотителем – карбидом бора.

### Малогабаритный высокотемпературный реактор без первичного теплоносителя

Реакторные установки сверхмалой мощности относятся к малоизученной области использования ядерной энергии. В связи с этим представляет интерес разработка маломощного реактора по типу высокотемпературного газоохлаждаемого реактора, но без контура первичного теплоносителя. В условиях отсутствия теплоносителя теплосъем с корпуса реактора осуществляется за счет теплопроводности и излучения системой поверхностного охлаждения без превышения максимально допустимой для топлива типа ТРИСО температуры (1600°C). Обеспечение достаточного теплосъема при номинальной мощности без принудительной циркуляции теплоносителя придает установке значительно более высокие свойства внутренней самозащищенности. В данном типе реактора полностью отсутствует возможность аварии с прекращением энергопитания, которая в случае своего возникновения в других типах реакторов приводит к наиболее тяжелым последствиям. Кроме того, большой запас по температуре топлива ( $\approx 400^\circ\text{C}$ ), между рабочей и предельно допустимой температурами дает возможность обеспечить саморегулирование за счет температурного коэффициента реактивности. Использование данного температурного запаса позволяет введение более чем 3% отрицательной реактивности, что достаточно как для компенсации оперативного запаса реактивности на выгорание, так и прекращения ядерной реакции деления. В этом смысле реакторная установка аналогична «газовой колонке», в которой при отключении подачи охлаждающей воды (система поверхностного охлаждения) блокируется подача газа.

Для реализации данного проекта необходимо, в первую очередь, решить следующие задачи:

- определить максимально возможную тепловую мощность реактора;
- выбрать величину топливной загрузки, обогащение по основному делящемуся изотопу;
- рассчитать нейтронно-физические характеристики: распределение энерговыделения, кампанию реактора;
- рассмотреть возможности саморегулирования реактора, компенсации потери реактивности при выгорании топлива;
- оценить эффективность систем управления.

Данная установка в силу своих внутренне присущих свойств безопасности может быть использована в качестве источника электро- и теплоснабжения в труднодоступных и удаленных районах.

### Заключение

В статье отмечены факторы, обуславливающие востребованность создания реакторов малой и сверхмалой мощности, рассмотрена область их возможного применения. Проведен обзор некоторых из существующих проектов маломощных реакторных установок, а также

приведены основные характеристики разрабатываемых реакторов и некоторые особенности их конструкции, отмечены характеристики безопасности.

Проекты маломощных реакторных установок охватывают почти все типы существующих реакторов: водо-водяные энергетические реакторы, реакторы на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем, реакторы с жидкосолевым теплоносителем, высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы на быстрых и тепловых нейтронах. Подводя итоги данного обзора современных проектов реакторов сверхмалой мощности, необходимо отметить, что, несмотря на все разнообразие типов реакторов, основное внимание при проектировании данного типа установок уделяется:

- использованию пассивных систем безопасности;
- использованию систем отвода тепла на основе естественной циркуляции;
- снижению количества эксплуатирующего персонала;
- увеличению срока службы реактора и интервалов между перегрузками.

Цель дальнейших исследований – оптимизация нейтронно-физических характеристик малогабаритного высокотемпературного реактора без контура первичного теплоносителя. Данный тип реактора обладает высокими свойствами внутренней самозащищенности, кроме того, в нем исключена возможность возникновения аварии, связанной с обесточиванием установки.

#### Библиографический список

1. Facilitating International Licensing of Small Modular Reactors [Electronic resource] / Cooperation in Reactor Design Evaluation and Licensing (CORDEL) Working Group of the World Nuclear Association // World Nuclear Association, 2015. – URL: [http://www.world-nuclear.org/uploadedFiles/org/WNA/Publications/Working\\_Group\\_Reports/REPORT\\_Facilitating\\_Intl\\_Licensing\\_of\\_SMRs.pdf](http://www.world-nuclear.org/uploadedFiles/org/WNA/Publications/Working_Group_Reports/REPORT_Facilitating_Intl_Licensing_of_SMRs.pdf) (accessed 10.11.2017)
2. От первой в мире АЭС к атомной энергетике XXI века: сб. тез. докл. X ежегодной конф. Обнинск: 28 июня-2 июля 1999. – Обнинск: Ядерное общество России, 1999.
3. Атомные электростанции сверхмалой мощности для прикладных и учебных целей: Российская конф. молодых ученых, специалистов, аспирантов, студентов: тез. докл. – Обнинск: ИАТЭ НИЯУ МИФИ. 2016.
4. История атомной энергетике Советского Союза и России / под ред. В.А. Сидоренко. – М.: ИзДАТ, 2004. – Вып. 5.
5. Nuclear Development, Current Status, Technical Feasibility and Economics of Small Nuclear Reactors [Electronic resource] / Organisation of Economic Cooperation and Development (OECD) // Nuclear Energy Agency, 2011. – URL: <http://www.oecd-nea.org/ndd/reports/2011/current-status-small-reactors.pdf> (accessed 11.11.2017)
6. **Казанский, Ю.А.** Саморегулируемый реактор сверхмалой мощности для теплоснабжения «МАСТЕР ИАТЭ» / Ю.А. Казанский [и др.] // Изв. вузов. Ядерная энергетика. – 2003. – № 3. – С. 63–71.
7. **Самохин, Д.С.** Быстрый свинцовый реактор малой мощности для учебных целей / Д.С. Самохин [и др.] // Изв. вузов. Ядерная энергетика. – 2015. – № 3. – С. 135-143.
8. **Левченко, В.А.** Основные характеристики америциевого реактора для нейтронной терапии. Реактор «МАРС» / В.А. Левченко [и др.] // Изв. вузов. Ядерная энергетика. – 2003. – № 3. – С. 72–82.
9. **Левченко, В.А.** Выбор топливной композиции для специализированного медицинского реактора / В.А. Левченко, В.А. Баршевцев, Ю.А. Казанский // Изв. вузов. Ядерная энергетика. – 2009. – № 3. – С. 113–119.
10. **Драгунов, Ю.Г.** Транспортабельная ядерная энергоустановка ГРЭМ для производства энергии и тепла мощностью 1000 кВт (э) / Ю.Г. Драгунов [и др.] // Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетике; под ред. акад. РАН А.А. Саркисова. – М.: Наука, 2011. – С. 267–271.
11. **Wallenius, J.** ELECTRA: A Lead Cooled Reactor for Training and Education / J. Wallenius, E. Sundantseteg, S. Borrot [et al.] // Problems of Atomic Science and Technology. Series: Nuclear and Reactor Constants. – 2015. – №4. – P. 124–139.

12. **Kambe, M.** Super Safe Small Reactor RAPID-L Conceptual Design and R&D [Electronic resource] / M. Kambe, H. Tsunoda, K. Mishima [et al.] // Japan Atomic Energy Research Institute, 2003. – URL: [http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/37/002/37002589.pdf?r=1](http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/37/002/37002589.pdf?r=1) (accessed 15.11.2017)
13. **Hadfield, P.** Mini nuclear reactor could power apartment blocks [Electronic resource] / P. Hadfield, M. Fitzpatrick // NewScientist, 2001. – URL: <https://www.newscientist.com/article/dn1186-mini-nuclear-reactor-could-power-apartment-blocks/> (accessed 15.11.2017)
14. **Kambe, M.** RAPID-L and RAPID Operator Free Fast Reactor Concepts without Any Control Rods [Electronic resource] / M. Kambe, H. Tsunoda, K. Mishima [et al.] // Proc. of the Int. Conf. on Global Environment and Advanced Nuclear Power Plants (GENES4/ANP2003). – Kyoto, Japan, 2003. – P. 1039. – URL: <https://www.uxc.com/smr/Library/Design%20Specification/RAPID/Papers/2003%20-%20RAPID-L%20and%20RAPID%20Operator%20Free%20Fast%20Reactor%20Concepts%20Without%20Any%20Control%20Rods.pdf> (accessed 15.11.2017)
15. **Ding, M.** Design of a U-Battery [Electronic resource] / M. Ding [et al.] // TU-Delft, Manchester University, 2011. – URL: [http://www.janleenkloosterman.nl/reports/ubattery\\_final\\_201111.pdf](http://www.janleenkloosterman.nl/reports/ubattery_final_201111.pdf) (accessed 17.11.2017)

*Дата поступления  
в редакцию* 31.01.2018

**A.V. Kainova, Yu.P. Sukharev, G.N. Vlasichev**

## **SUPER LOW POWER NUCLEAR REACTORS**

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

**Purpose:** This article aims to analyse the major trends in design of Low Power Nuclear Reactors.

**Methodology:** The main investigation method is the analysis of the accessible sources of information related to the scope of the study: articles, conferences proceedings, reports.

**Results:** Some of existing projects of Super Low Power Nuclear Reactors, both Russian and foreign, are reviewed. The main developed characteristics of Low Power Reactors and its design features are given, as well as these reactors field of application and safety performance. The aim of the further development is defined and the objectives of the study needed to achieve this aim are noticed.

*Key words:* Low and Super Low Power Nuclear Reactors, Pressurized Water Reactors, Fast Neutron Reactors, High Temperature Gas-Cooled Reactors, Molten Salt Reactors.

УДК 621.3

А.А. Кралин, Е.В. Крюков, В.В. Гуляев

**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕГУЛИРОВОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРВДН ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ РЕГУЛИРОВАНИИ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Посвящена изучению регулировочных характеристик тиристорного регулятора вольтодобавочного напряжения (ТРВДН) в режиме поперечного регулирования. Представлены результаты гармонического анализа выходного напряжения ТРВДН, полученные с использованием моделирования в пакете Simulink.

*Ключевые слова:* регулирование напряжения, тиристорный регулятор, имитационная модель, регулировочные характеристики, гармонический анализ.

Одной из актуальных задач энергетической стратегии России до 2035 является обеспечение эффективной надежности электроснабжения в сочетании с интеллектуализацией систем [1].

Переоснащение и повышение технического уровня распределительных сетей среднего напряжения являются первоочередной задачей. Общая протяженность распределительных электрических сетей 6–20 кВ в России составляет порядка 2150 тыс. км. В сетях установлено около 290 тыс. трансформаторных подстанций 6–10 кВ мощностью 100–630 кВА.

В последнее время нагрузка на городские и сельские распределительные сети возрастает каждый год на 2–3%. РЭС России выполняют, как правило, функции пассивного трансформатора и распределения электроэнергии. Сети имеют большой износ, низкий процент автоматизации, большие потери электроэнергии.

При эксплуатации РЭС возможны ситуации, когда какой-либо участок сети не может пропускать требуемую мощность либо уровень напряжения у потребителя не будет соответствовать требованиям ГОСТ. В связи с этим часто возникают вопросы поддержания должного уровня и качества напряжения, а также увеличения пропускной способности РЭС.

Получение оптимального напряжения, а также регулирование потоков реактивной мощности наиболее оптимальным будет при скоординированном подходе к использованию устройств регулирования параметров электроэнергии, что требует внедрения новых автоматизированных интеллектуальных распределительных электрических сетей классов напряжений 6–20 кВ на основе применения технологии гибких управляемых линий электропередач переменного тока (ГЛЭП) или, в соответствии с терминологией *IEEE - Flexible AC Transmission Systems* (гибкие передающие системы переменного тока) [2].

Гибкие передающие системы переменного тока могут быть реализованы внедрением в структуру электрической сети устройств продольной, поперечной и продольно-поперечной компенсации на основе твердотельных регуляторов величины и фазы вольтодобавочного напряжения (ТРВДН) [3]. ТРВДН выполненные на основе полупроводниковых устройств силовой электроники обладают большим ресурсом работы, лучшим быстродействием по сравнению с электромеханическими, лучшими массогабаритными показателями по сравнению с трансформаторами с подмагничиванием и феррорезонансными регуляторами, а также большей перегрузочной способностью по сравнению с тиристорными регуляторами напряжения. На рис. 1 представлен один из вариантов схема силовой части ТРВДН [4].

Следует отметить, что предлагаемый ТРВДН обладает свойствами РПН и фазоповоротного трансформатора и может использоваться для эффективного управления потоками мощности в интеллектуальных распределительных электрических сетях различной конфигурации [5]. Применение ТРВДН в распределительных сетях позволяет отказаться от совместного использования нескольких устройств: регулятора напряжения с вольтодобавочными

трансформаторами, фазоповоротного устройства и (или) регулятора реактивной мощности. При этом использование одного устройства ТРВДН вместо двух значительно сократит стоимость устанавливаемого силового оборудования. Также важно отметить, что сложность силовых схем ФПУ и ТРВДН сопоставима.

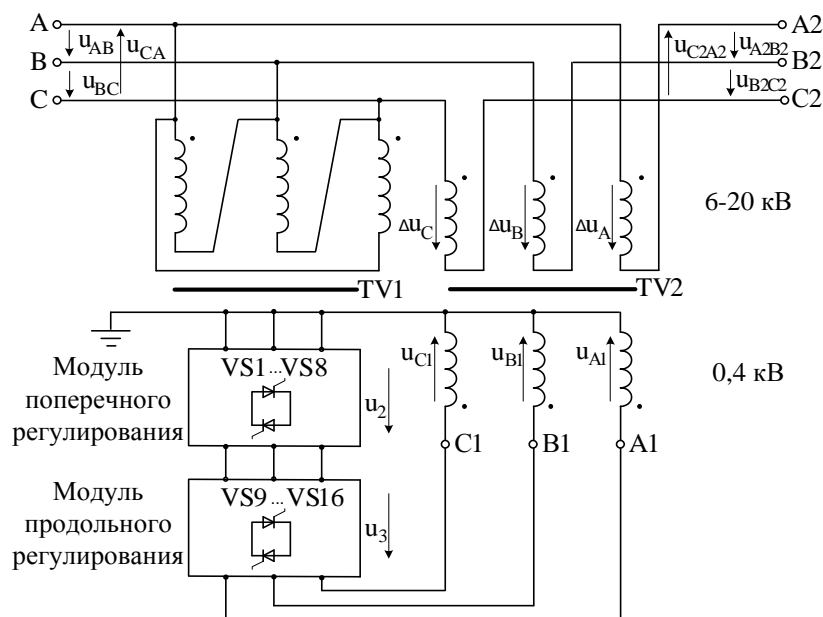


Рис. 1. Схема силовой части ТРВДН

Исследование электромагнитных процессов ТРВДН целесообразно выполнять на имитационных моделях. Имитационное моделирование позволяет построить регулировочные характеристики устройства, определить гармонический состав выходного напряжения, рассчитать основные электромагнитные величины для определения оптимальных режимов работы исследуемого устройства.

Основными составными элементами имитационной модели ТРВДН, выполненной в программе Simulink, являются модель трехфазной сети, модели шунтового и сервисного трансформаторов, модели тиристорных ключей, нагрузки и системы управления. Разработанные модели позволяют получить зависимости мгновенного и действующего значения выходного напряжения, определить величины углов сдвига между векторами входного и выходного напряжения, выполнить гармонический анализ выходного напряжения.

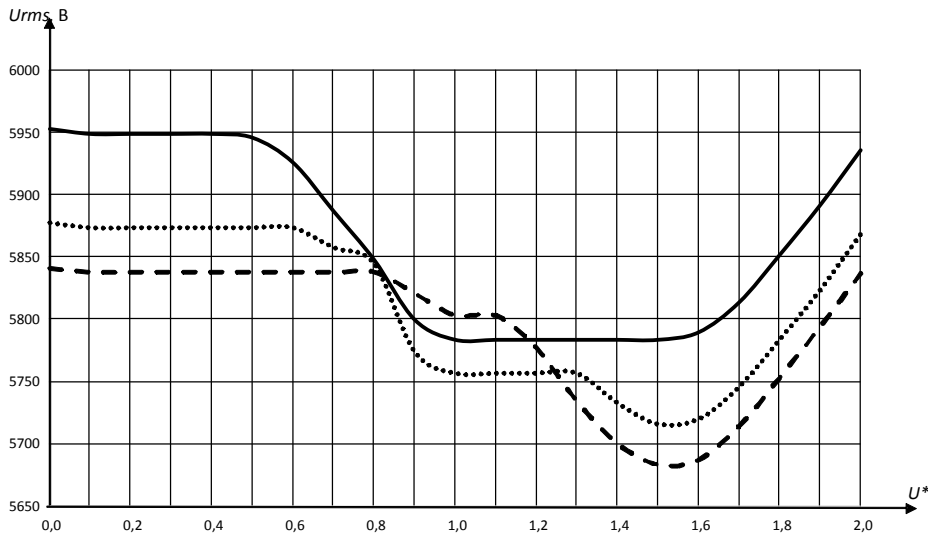
При поперечном регулировании ТРВДН формирует выходное напряжение, опережающее или запаздывающее относительно входного на угол  $\alpha$ . Следует отметить, что поперечное регулирование напряжения вызывает увеличение выходного линейного напряжения.

Исследование выходного напряжения ТРВДН при поперечном регулировании проводилось при различных углах нагрузки  $\varphi$ . В качестве примера на рис. 2 представлены зависимости действующего значения выходного напряжения  $U_{rms}$  ТРВДН от напряжения управления  $U^*$  при поперечном регулировании в режиме опережения напряжения при углах нагрузки  $\varphi=0^\circ$ ,  $\varphi=30^\circ$ ,  $\varphi=60^\circ$ .

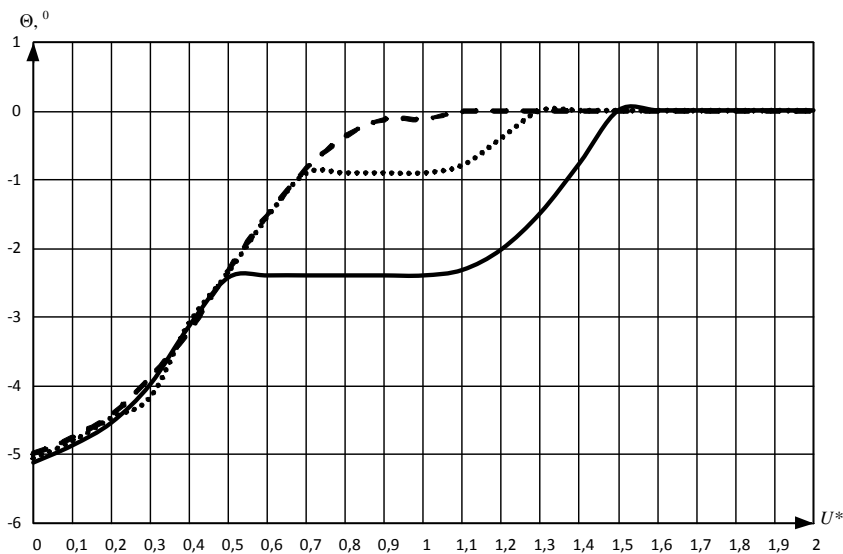
В модуле поперечного регулирования используется ступень вторичной обмотки шунтового трансформатора с напряжением, составляющим 8,3% от фазного напряжения сети. В процессе поперечного регулирования выходного напряжения ТРВДН изменение действующего значения выходного напряжения  $U_{rms}$  составляет не более 2,8%. Таким образом, значительное изменение напряжения управления  $U^*$  не приводит к существенному изменению действующего значения выходного напряжения ТРВДН.

Режим поперечного регулирования позволяет изменять угол сдвига фазы  $\Theta$  между векторами входного и выходного напряжения. Диапазон изменения данного параметра в ре-

жиме отставания напряжения для различных углов нагрузки поясняют зависимости, представленные на рис. 3.



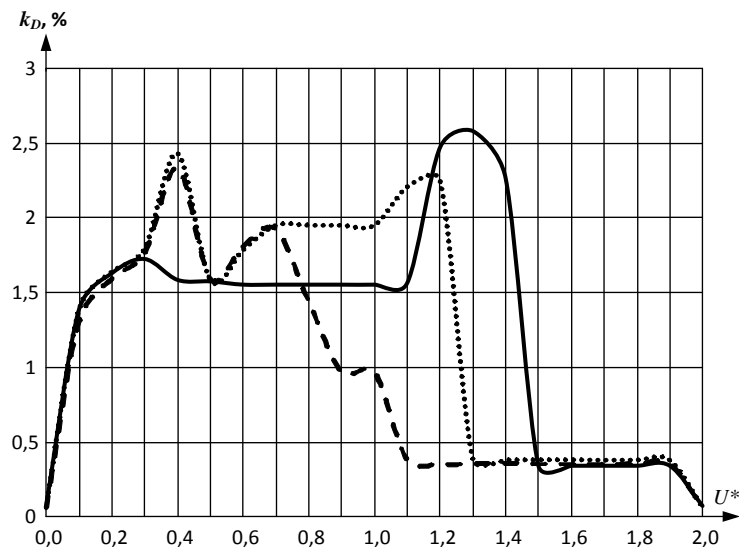
**Рис. 2.** Зависимости выходного напряжения  $U_{rms}$  ТРВДН от напряжения управления  $U^*$  при поперечном регулировании в режиме опережения напряжения при углах нагрузки: —  $\varphi=0^\circ$ ; .....  $\varphi=30^\circ$ ; - -  $\varphi=60^\circ$



**Рис. 3.** Зависимость угла  $\Theta$  от напряжения управления  $U^*$  при поперечном регулировании в режиме отставания напряжения при углах нагрузки: —  $\varphi=0^\circ$ ; .....  $\varphi=30^\circ$ ; - -  $\varphi=60^\circ$

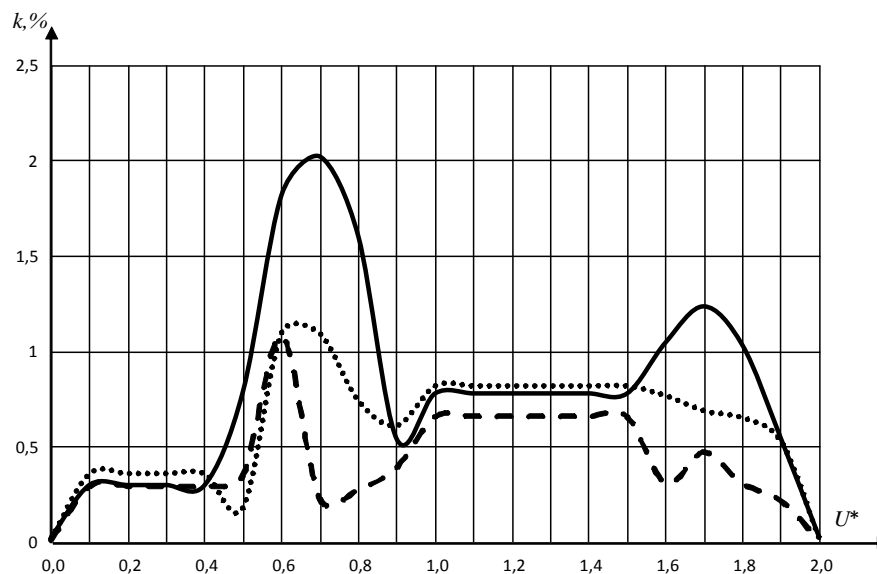
В ходе проведенного моделирования установлено, что при поперечном регулировании угол сдвига между векторами входного и выходного напряжения изменяется на 5 град. в сторону опережения и на 5 град. в сторону отставания.

В процессе импульсно-фазового регулирования напряжения происходит изменение структуры силовой схемы ТРВДН, вызванное коммутацией тиристоров соответствующих модулей. При этом происходит искажение формы выходного напряжения. На рис. 4 представлены зависимости коэффициента нелинейных искажений в режиме запаздывания выходного напряжения. Указанные зависимости позволяют установить, что максимальное значение коэффициента нелинейных искажений  $k_D$  составляет 2,7% и соответствует активной нагрузке  $\varphi=0^\circ$ . При значениях фазового угла нагрузки  $\varphi=30^\circ$  и  $\varphi=60^\circ$   $k_D$  не превышает значения 2,4%.



**Рис. 4. Зависимости коэффициента нелинейных искажений от напряжения управления при поперечном регулировании с запаздыванием напряжения для углов нагрузки:**  
 —  $\varphi=0^{\circ}$ , .....  $\varphi=30^{\circ}$ , - - -  $\varphi=60^{\circ}$

Следует отметить, что в случае трехпроводной системы электроснабжения в гармоническом составе выходного напряжения отсутствуют четные гармоники, кратные трем, гармоники и постоянная составляющая. Поэтому при исследовании процессов регулирования целесообразно анализировать зависимости коэффициента нелинейных искажений, коэффициентов пятой, седьмой и одиннадцатой гармонических составляющих.



**Рис. 5. Зависимости изменения коэффициентов 5, 7, 11 гармоник выходного напряжения от величины напряжения управления при опережении напряжения для угла нагрузки  $\varphi=0^{\circ}$ :**  
 — коэффициент пятой гармоники; ..... коэффициент седьмой гармоники;  
 - - - коэффициент одиннадцатой гармоники

Установлено, что коэффициент пятой гармоники при поперечном регулировании имеет наибольшее значение 2,1% при активной нагрузке ( $\varphi=0^{\circ}$ ). Значения коэффициентов седьмой и одиннадцатой гармоник в процессе регулирования не превышают 1,2% (рис. 5). С ростом номера гармоники значение ее амплитуды снижается.



### Выводы

1. В процессе поперечного регулирования угол сдвига между векторами входного и выходного напряжения изменяется на 5 град. в сторону опережения и на 5 град. в сторону отставания.
2. С уменьшением угла нагрузки при поперечном регулировании возрастают значения высших гармонических выходного напряжения.
3. При всех значениях угла нагрузки преобладает величина пятой гармоники, при этом максимальное её значение соответствует активной нагрузке  $\varphi=0^0$ .
4. Выходное напряжение ТРВДН при поперечном регулировании отвечает требованиям ГОСТ 32144-2013 для сетей среднего напряжения: значение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения не превышает 5%; значения коэффициентов пятой, седьмой, одиннадцатой гармонических составляющих не превышают соответственно 4, 3 и 2%.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение №14.577.21.0242 о предоставлении субсидии от 26.09.2017, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57717X0242).*

### Библиографический список

1. Концепция реализации национального проекта “Интеллектуальная энергетическая система России”. – М., 2015. – 25 с.
2. **Соснина, Е.Н.** Основные направления развития интеллектуальных электрических сетей на основе адаптивного управления / Е.Н. Соснина, Р.Ш. Бедретдинов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2012. – №5. – С. 25–28.
3. **Соснина, Е.Н.** Исследование твердотельного регулятора напряжения и мощности в сети 6–20 кВ / Е.Н. Соснина [и др.] // Пром-инжиниринг: сб. трудов 2-й Междунар. научно-технич. конф. «». – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2016. – С. 322–327.
4. **Sosnina, E.N.** Power flow control device prototype tests / E.N. Sosnina [et al.]// IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Asia. – 2016. – P. 312–316.
5. **Соснина, Е.Н.** Тиристорный регулятор величины и фазы вольтодобавочного напряжения в распределительных электрических сетях 6-10 кВ / Е.Н. Соснина [и др.] // Актуальные проблемы электроэнергетики: сб. научно-технич. ст., 2017. – С. 132–136.

*Дата поступления  
в редакцию 05.02.2018*

**A.A. Kralin, E.V. Kryukov, V.V. Gulyaev**

### RESEARCH OF TVR REGULATING CHARACTERISTICS AT OUTPUT VOLTAGE TRANSVERSE REGULATION

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

**Purpose:** Research of the TVR regulating characteristics and harmonic analysis.

**Design/methodology/approach:** The analysis was carried out using simulation model. The TVR model has been developed in the visual programming environment MATLAB - Simulink with the use of the elements of the library of SimPowerSystems electrical devices.

**Findings:** The study of the TVR output voltage regulatory characteristics and harmonic analysis was conducted. The shift angle between the input and output voltage vectors changes by 5 degrees in advance and by 5 degrees in the direction of the lag. The output voltage higher harmonic component values increase with the decrease of the angle. The fifth harmonic magnitude is dominated at all values of the load angle, while its maximum value corresponds to the resistive load.

*Key words:* voltage regulation, thyristor regulator, simulation model, operating characteristics, harmonic analysis.

УДК 681.586.5

Н. А. Матюшечкин<sup>1</sup>, Ю. Г. Белов<sup>2</sup>, А. А. Болонина<sup>2</sup>, Д. М. Кочеганов<sup>2</sup>, Т. Х. Абузьяров<sup>2</sup>**ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ТЕМПЕРАТУРЫ ДЛЯ СИСТЕМ  
ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ**НПП «Полет» (Н. Новгород)<sup>1</sup>,Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>2</sup>

Приводится описание конструкции и технологические характеристики волоконно-оптического датчика температуры релейного типа. Модуляция светового потока в датчике осуществляется в точке фазового перехода поликристаллического высокомолекулярного органического вещества – янтарного ангидрида. Данный тип датчика может найти применение в системах тепловой защиты электрических машин и аппаратов в зонах действия мощных электромагнитных полей.

*Ключевые слова:* датчик температуры, оптическое волокно, тепловая защита, электрические машины и аппараты.

**Введение**

Обеспечение нормального теплового режима работы – важное условие для долговременного и надежного функционирования электрических машин и аппаратов. Тепловые перегрузки приводят к ухудшению эксплуатационных свойств конструкционных материалов и покрытий, в частности, к ускоренному старению электрической изоляции токоведущих частей, выходу из строя электролитических конденсаторов, разрушению и заклиниванию подшипников, что может привести к возникновению аварийных ситуаций. Для организации тепловой защиты создаются системы с непосредственным контролем температуры при помощи встраиваемых датчиков. Как правило, для этих целей используются термодатчики на базе термисторов и термопар. Недостатком датчиков данных типов является наличие токоведущих частей, что накладывает ограничения на их применение в обмотках высоковольтных электрических машин и аппаратов в условиях неблагоприятной электромагнитной обстановки, обусловленной работой мощных электроприводов, радиолокационной техники, установок индукционного нагрева и т.п. Волоконно-оптические датчики температуры не подвержены воздействию электромагнитных полей благодаря использованию в качестве каналов передачи сигнала оптических волокон, являющихся диэлектрическими волноводами.

По принципу действия волоконно-оптические датчики можно разделить на две группы [1-3]. К первой относятся датчики, в которых регистрируемое возмущение, в том числе температура, воздействует непосредственно на оптическое волокно. Наиболее известны датчики с фазовой модуляцией излучения и поляризационные датчики. Ко второй группе относятся датчики с внешней модуляцией излучения, при этом модулятор располагается непосредственно в волоконно-оптической линии. В качестве модуляторов могут использоваться химические индикаторы, флуоресцирующие вещества, волоконные брэгговские решетки и другие объекты, свойства которых меняются под воздействием регистрируемого возмущения.

В волоконно-оптических датчиках с фазовой модуляцией фиксируется изменение фазы проходящего по волокну излучения под воздействием регистрируемого возмущения. Измерение величины сдвига фазы излучения осуществляется с помощью интерферометра. Преимуществом датчиков данного типа является высокая чувствительность, недостатком – сложная конструкция самого датчика и приемника сигнала, а также относительно большие габариты из-за необходимости использования в измерительном плече датчика длинного измерительного волокна [1].

В поляризационных волоконно-оптических датчиках регистрируется поворот плоскости

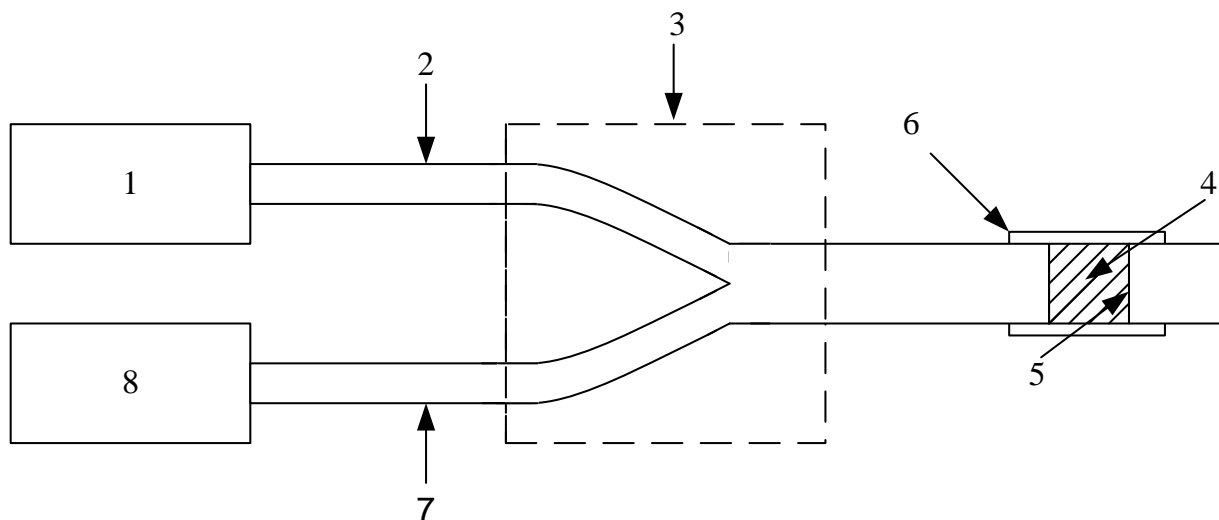
поляризации проходящего по оптическому волокну излучения под воздействием регистрируемого возмущения. Недостатки датчика данного типа те же, что и у фазовых датчиков [1].

В волоконно-оптических датчиках с модуляцией длины волны излучения могут применяться такие эффекты, как эффект Доплера, наблюдаемый при облучении световым пучком, выходящим из торца оптического волокна, движущихся частиц. Величина сдвига длины волны излучения (сдвига Доплера) может быть определена при помощи спектрального анализа отраженного частицами излучения. Недостатки датчиков данного типа аналогичны двум предыдущим [2].

В волоконно-оптических датчиках с амплитудной модуляцией регистрируется изменение мощности светового потока под действием внешнего возмущения. Преимущества датчиков данного типа – простота и надежность конструкций датчика и приемного элемента [3], что является критичным в выбранной сфере применения.

### Принцип работы датчика

Для решения задачи аварийного отключения аппаратуры в условиях действия мощных электромагнитных полей разработан волоконно-оптический датчик температуры с амплитудной модуляцией, обладающий преобразовательной характеристикой релейного типа. Функциональная схема такого датчика представлена на рис. 1.



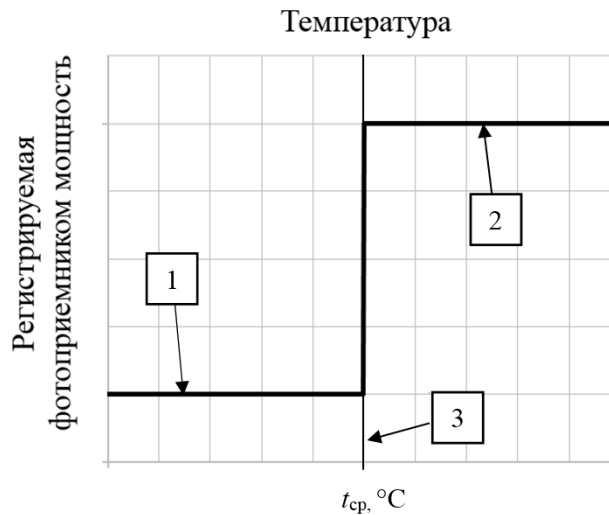
**Рис. 1. Функциональная схема волоконно-оптического датчика температуры:**

- 1 – источник излучения; 2 – подводящее излучение оптическое волокно;  
3 – направленный разветвитель; 4 – рабочее вещество; 5 – зеркало; 6 – корпус датчика;  
7 – отводящее излучение оптическое волокно; 8 – приемник излучения

Принцип работы устройства заключается в следующем. Корпус датчика помещается в среду, температуру которой требуется контролировать. Световой поток от источника излучения 1 распространяется по оптическому волокну 2 и с помощью разветвителя 3 направляется на рабочее вещество 4. Затем излучение отражается от зеркала 5 и с помощью разветвителя 3 направляется в оптическое волокно 7, которое подводит этот световой поток к приемнику излучения 8. В корпусе датчика между оптическим волокном и зеркалом образуется зазор, который заполняется поликристаллическим рабочим веществом 4, изменяющим фазовое состояние при температуре, равной необходимой пороговой температуре срабатывания датчика. При температуре среды ниже пороговой температуры срабатывания датчика рабочее вещество 4 находится в твердом состоянии и интенсивно рассеивает излучение. Приемник излучения 8 регистрирует минимальный уровень входного сигнала. При температуре среды больше или равной пороговой срабатывания датчика у рабочего вещества 4 происходит фа-

зовый переход первого рода, в результате чего его светопропускная способность возрастает и уровень входного сигнала, регистрируемого приемником излучения  $\delta$ , увеличивается.

Фазовый переход рабочего вещества происходит в узком диапазоне температур (около  $1^\circ\text{C}$  в окрестности  $t_{\text{ср}}^0$ ), благодаря чему преобразовательная характеристика датчика имеет релейный вид: ступень с явно выраженным высоким и низким уровнем выходного сигнала (рис. 2), что позволяет без труда зарегистрировать достижение заданной точки срабатывания датчика.



**Рис. 2. Качественный вид преобразовательной характеристики датчика релейного типа:**

- 1 – сигнал датчика низкого уровня; 2 – сигнал датчика высокого уровня;  
3 – температура фазового перехода рабочего вещества (температура срабатывания датчика)

Применение рабочих веществ с различными значениями температуры плавления позволяет создать датчик с требуемой температурой срабатывания. В качестве примера в табл. 1 приводятся ряд поликристаллических веществ, температура плавления которых позволяет использовать их в датчиках для тепловой защиты токоведущих частей с классами нагревостойкости электроизоляционных материалов  $Y, A, E, B, F, H, 200, 220, 250$ .

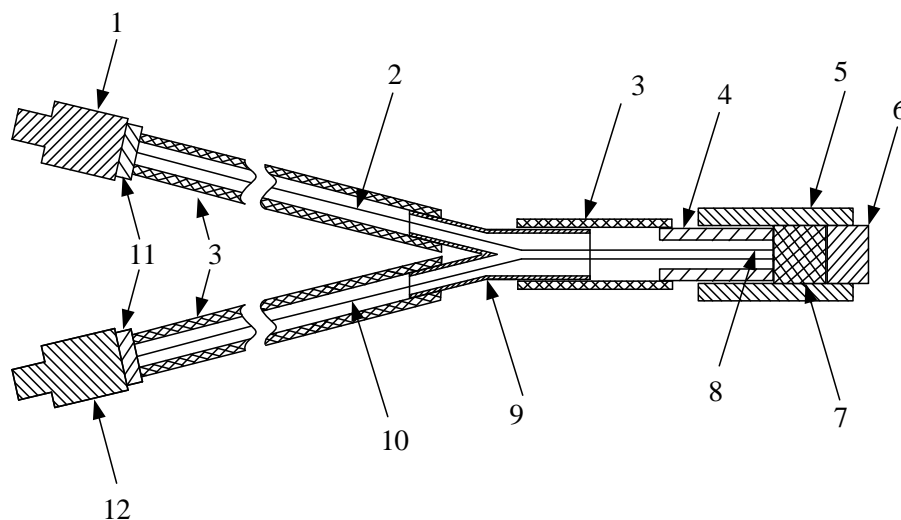
**Таблица 1**

**Классы нагревостойкости электроизоляционных материалов и соответствующие им по температуре плавления виды рабочих веществ**

№ п/п	Класс нагревостойкости электроизоляционных материалов	Температура, характеризующая нагревостойкость материалов данного класса, $^\circ\text{C}$	Рабочее вещество	Температура плавления рабочего вещества, $^\circ\text{C}$
1	$Y$	90	1,4 –дибромбензол [4]	87,5
2	$A$	105	Гидрокоричная кислота [4]	101,5
3	$E$	120	Янтарный ангидрид [4]	119,6
4	$B$	130	Карбамид [5]	129-134
5	$F$	155	пара-Нитроанилин [4]	149
6	$H$	180	$\alpha$ – Камфора [4]	178,4
7	200	200	Лактоза [6]	200
8	220	220	Антрацен [4]	216
9	250	250	Глицин [4]	247,2

### Описание разработанной конструкции датчика

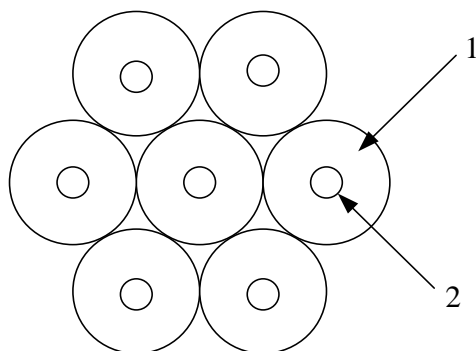
С использованием описанного принципа был изготовлен экспериментальный образец датчика, конструкция которого показана на рис. 3.



**Рис. 3. Конструкция экспериментального образца волоконно-оптического датчика температуры:**

1 – наконечник оптического соединителя, подключаемый к источнику излучения; 2 – оптическое волокно, подводящее излучение; 3 – оболочка оптического кабеля; 4 – корпус гексагональной упаковки волокон; 5 – корпус датчика; 6 – зеркало; 7 – рабочее вещество; 8 – гексагональная упаковка семи оптических волокон; 9 – арматура для закрепления оптического кабеля; 10 – оптические волокна, отводящие излучение; 11 – втулка для закрепления оболочки оптического кабеля; 12 – наконечник оптического соединителя, подключаемый к приемнику излучения

Герметичная конструкция корпуса датчика позволяет использовать любые рабочие вещества без риска утечки. В образце в качестве рабочего вещества используется янтарный ангидрид с температурой плавления  $119,6^{\circ}\text{C}$ . Для уменьшения потерь в рассматриваемом датчике при прохождении излучения в прямом и обратном направлениях применена упаковка гексагональной формы из семи оптических волокон (рис. 4). Центральное волокно используется для подведения излучения в корпус датчика, шесть периферийных волокон – для отвода излучения. Внешний вид датчика показан на рис. 5.

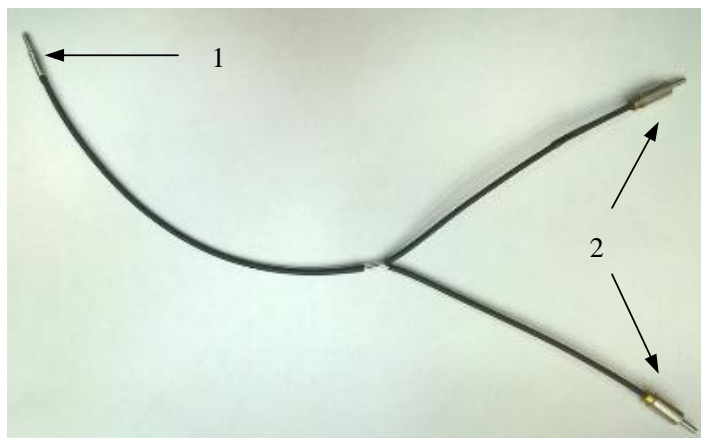


**Рис. 4. Гексагональная упаковка семи оптических волокон:**

1 – оболочка оптического волокна; 2 – сердцевина оптического волокна

Достоинством данного датчика температуры являются малые размеры, определяемые габаритами оптических узлов. При разработке конструкции экспериментально были выбраны оптимальные с точки зрения прочности и малых габаритов параметры корпуса.

Дальнейшее уменьшение размеров может привести к снижению механической прочности соединений, что является неприемлемым. На линейный размер датчика влияет величина зазора в корпусе для размещения рабочего вещества. Слишком большая величина зазора не только негативно влияет на компактность датчика, но и приводит к недопустимо большому увеличению потерь энергии в рабочем веществе датчика. Слишком малая величина зазора приводит к уменьшению перепада в преобразовательной характеристике датчика, что затрудняет фиксацию момента его срабатывания. К тому же усложняется технологический процесс изготовления датчика. Для обеспечения гарантированной регистрации момента срабатывания датчика необходимо иметь величину перепада на преобразовательной характеристике около 20 дБ.

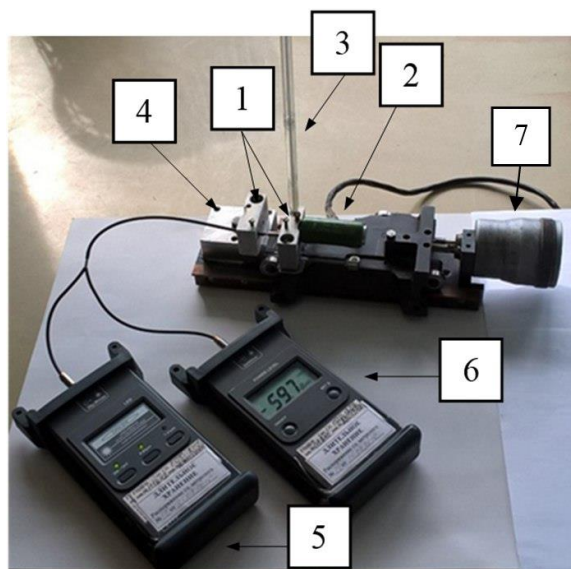


**Рис. 5. Внешний вид датчика температуры:**

1 – корпус датчика; 2 – наконечники оптических соединителей, подключаемые к приемнику и источнику излучения

### Результаты экспериментального исследования датчика

Для определения требуемой величины зазора и снятия характеристик датчика использована установка (рис. 6).



**Рис. 6. Внешний вид установки для исследования работы датчика:**

1 – алюминиевые пластины; 2 – электронагреватель; 3 – ртутный термометр;  
4 – исследуемый датчик; 5 – источник излучения типа FOD-2115;  
6 – приемник излучения; 7 – тиски с микрометрическим винтом

В результате проведения нескольких циклов нагрева и охлаждения датчика с различными величинами рабочего зазора была определена величина рабочего зазора, равная 2,8 мм, обеспечивающая перепад в преобразовательной характеристике датчика, равный 20 дБ.

Снятие преобразовательной характеристики, т.е. зависимости сигнала датчика от температуры, выполнялось следующим образом. Включался электронагреватель, прикрепленный к правой пластине. Ввиду высокой теплопроводности алюминия и достаточно больших размеров пластин фиксируемые показания термометра, закрепленного на пластине, соответствовали реальной температуре корпуса датчика. Одновременно с регистрацией температуры на фотоприемнике определялся уровень мощности на выходе датчика. При температуре ниже температуры плавления рабочее вещество находится в твердом состоянии и интенсивно рассеивает световой поток за счет своей поликристаллической структуры. При повышении температуры до температуры плавления рабочее вещество переходит в расплавленное состояние, и его прозрачность значительно возрастает. При этом происходит увеличение мощности, регистрируемой приемником излучения. Для обеспечения точности регистрации показаний приборов температура повышается постепенно, процесс нагрева установки от минимальной до максимальной температуры производится за время, равное 5 мин. При снятии преобразовательной характеристики датчика верхнее значение температуры доводится до 135°C, после чего электронагреватель отключается и снимается преобразовательная характеристика при остывании датчика. Охлаждение датчика проводится до температуры 100°C.

Измерение параметров датчика осуществляется при длинах волн излучения 0,85 и 1,31 мкм. Полученные преобразовательные характеристики датчика представлены на рис. 7 и рис. 8. Вертикальной линией отмечена температура начала процесса плавления янтарного ангидрида.

Как видно из рис. 7 и рис. 8, на длине волны 1,31 мкм несколько увеличивается перепад уровней преобразовательной характеристики датчика (до 22 дБ), что обусловлено уменьшением поглощательной способности рабочего вещества.

Процесс фазового перехода связан с поглощением или отдачей скрытой теплоты плавления/кристаллизации и, следовательно, обладает определенной инерционностью. Это обстоятельство проявляется в небольшом наклоне преобразовательной характеристики датчика в окрестности температуры срабатывания. Однако влияние данного фактора в разработанном датчике мало и не сказывается на его функциональных свойствах вследствие малой массы рабочего вещества и малой величины его теплоты плавления.

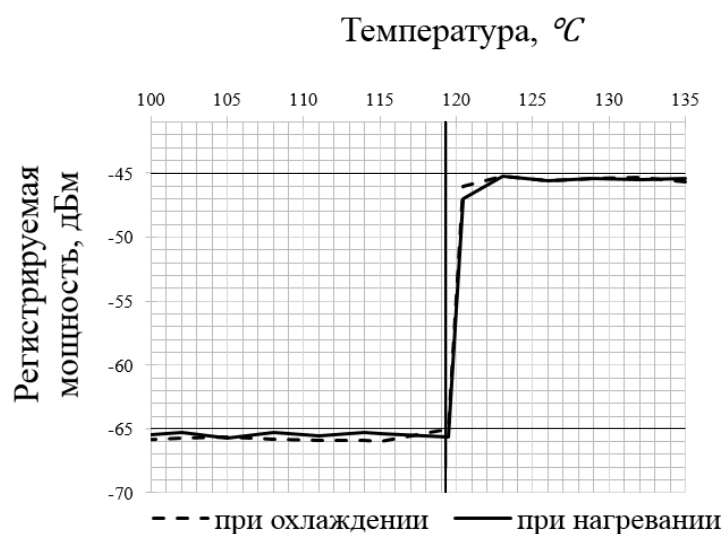


Рис. 7. Преобразовательная характеристика датчика при  $\lambda=0,85$  мкм

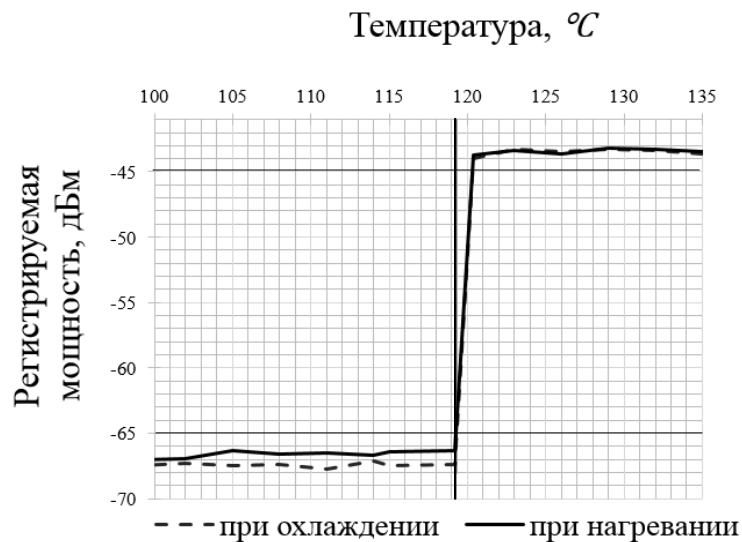


Рис. 8. Преобразовательная характеристика датчика при  $\lambda=1,31$  мкм

### Заключение

Изготовлен и исследован образец волоконно-оптического датчика температуры с преобразовательной характеристикой релейного вида, использование которого возможно при построении системы тепловой защиты электрических двигателей и аппаратов. В качестве рабочего вещества был применен янтарный ангидрид с температурой плавления  $119,6^{\circ}\text{C}$ , поэтому данный образец датчика может быть использован для организации тепловой защиты токоведущих частей с изоляционными материалами класса нагревостойкости *E*. Конструкция датчика универсальна и пригодна для использования различных поликристаллических органических веществ, что позволяет изготовить датчик с требуемой температурой срабатывания. Герметичный корпус исключает попадание рабочего вещества в окружающую среду.

Торцевой тип конструкции повышает удобство эксплуатации, обеспечивая возможность подведения и отведения излучения с одной стороны датчика. Используемая гексагональная упаковка из семи оптических волокон позволяет снизить потери энергии при прохождении излучения по сравнению с датчиком, в котором используется стандартный направленный разветвитель. Для получения перепада преобразовательной характеристики на уровне 20 дБ была установлена величина рабочего зазора датчика, равная 2,8 мм. Длина корпуса датчика равна 11 мм, диаметр 2,5 мм.

Фазовый переход в датчике происходит в пределах  $1^{\circ}\text{C}$ , положение точки фазового перехода стабильно и не зависит от срока эксплуатации, что позволяет сохранять параметры датчика на требуемом уровне.

### Библиографический список

1. Бусурин, В. И. Волоконно-оптические датчики: физические основы, вопросы расчета и применения / В. И. Бусурин, Ю.Р. Носов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
2. Optical fiber sensors using wave length modulation and simplified spectral analysis [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0022-3735/17/12/035>
3. Зак, Е. А. Волоконно-оптические преобразователи с внешней модуляцией / Е.А. Зак. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 128 с.
4. Бабичев, А. П. Физические величины: справочник / А. П. Бабичев [и др.]; под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
5. Колесников, А. Л. Технический анализ сырья, полупродуктов и готовой продукции синтетических лекарственных препаратов / А. Л. Колесников. – М.: Медгиз, 1959. – 479 с.



- б. Демидов, А. Н. Введение в пиротехнику/ А.Н. Демидов. – М.: Гос. военное изд-во Наркомата обороны Союза ССР, 1939. – 100 с.

*Дата поступления  
в редакцию 05.02.2018*

**N. A. Matushechkin<sup>1</sup>, Y. G. Belov<sup>2</sup>, A. A. Bolonina<sup>2</sup>, D. M. Kochegarov<sup>2</sup>, T. H. Abuzyarov<sup>2</sup>**

**OPTICAL FIBER TEMPERATURE SENSOR FOR OVERHEATING PROTECTION  
OF ELECTRIC MOTORS AND ELECTRIC DEVICES**

JSC SIE «Polyot» (N. Novgorod) <sup>1</sup>,  
Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alekseev<sup>2</sup>

**Object of probe:** Optical fiber thermal cutoff sensor.

**Purpose:** Overheating protection of electric motors and electric devices under the influence of strong electromagnetic fields.

**Results:** The article shows results of developing and manufacturing of optical fiber thermal cutoff sensor, ready to use under the influence of strong electromagnetic fields due to the absence of conductive materials in the sensor design. The principle of operation based on melting process of working substance and change in its optical properties. Experiments shows stable and effective work of the designed sensor.

*Key words:* temperature sensor, optical fiber, overheating protection, electric motors and electric devices.

УДК 621.311

Е.Н. Соснина, Л.Е. Веселов

**ЭНЕРГОУСТАНОВКИ НА ТОТЭ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ  
ЭНЕРГОУДАЛЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ**

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева

Решается проблема автономного электроснабжения энергоудаленных потребителей за счет применения энергоустановок на твердооксидных топливных элементах (ЭУ на ТОТЭ), работающих на биогазе. Выявлены наиболее перспективные типы ЭУ и топливных элементов. Приведена методика выбора ЭУ на ТОТЭ для электроснабжения сельскохозяйственных предприятий (СХП) малой мощности. Рассмотрены вопросы интеграции ЭУ на ТОТЭ в систему электроснабжения СХП. Разработаны алгоритм и Simulink-модель системы электроснабжения (СЭС) с ЭУ на ТОТЭ, позволяющие проводить исследования основных энергетических характеристик системы.

*Ключевые слова:* энергоустановка на ТОТЭ, твердооксидный топливный элемент, система электроснабжения, энергоудаленный потребитель, биогаз, сельскохозяйственное предприятие, Simulink-модель.

Устойчивая работа потребителей электрической энергии определяется надежным и бесперебойным электроснабжением. Обеспечение потребителей России электроэнергией требуемого качества в условиях прогнозируемого в долгосрочном периоде ежегодного увеличения спроса на электрическую энергию и мощность является актуальной проблемой [1].

Наиболее остро данный вопрос стоит перед энергоудаленными потребителями малой и средней мощности, расположенных в отдаленных районах страны и не имеющих централизованного электроснабжения. К таким потребителям относятся небольшие по численности населенные пункты, объекты связи и навигации, государственные и частные сельскохозяйственные предприятия, объекты вооруженных сил и др. Электрическая нагрузка приведенной категории потребителей может составлять от десятков до сотен кВт [2].

Вместе с тем в ряде государственных программ перспективного развития энергетики страны сделан акцент на внедрении в государственных масштабах нетрадиционных и возобновляемых источников энергии. Одно из актуальных направлений в этой сфере – использование биогаза для последующей выработки электрической и тепловой энергии [3, 4, 5].

Благодаря своему происхождению (анаэробному метановому брожению биомассы) биогаз общепринято считается возобновляемым источником энергии. В его состав входят 55–65% метана, 35–45% двуокиси углерода, приблизительно по 1% водорода и сероводорода, а также иные примеси. Основным источником биогаза являются органические отходы: навоз, солома, твердые бытовые отходы и т.п. Биогаз получают в специальных установках – метантанках (или анаэробных колоннах), которые оборудуют на фермах, СХП, полигонах бытовых отходов или в виде малых (односемейных) биогазовых установок. Производство биогаза является экологически целесообразным (благодаря утилизации промышленных и биологических отходов) и экономически выгодным, особенно при переработке непрерывного потока отходов: стоки животноводческих ферм, скотобоен, растительных отходов. На сегодняшний день применение биогаза широкое распространено в странах Европы (Германия, Швейцария, Дания), Азии (Индия, Китай, Вьетнам) и в США.

Авторами предлагается эффективное решение проблемы бесперебойного электроснабжения энергоудаленных потребителей малой мощности за счет применения автономных мини-ТЭЦ, использующих в качестве топлива биогаз [6].

Мини-ТЭЦ представляет собой когенерационную энергоустановку (ЭУ), способную эффективно преобразовывать продукты сбраживания биоотходов в электрическую и тепло-

вую энергию. Наиболее перспективными представляются мини-ТЭЦ на топливных элементах (ТЭ), использующих прямое преобразование биогаза в электроэнергию. Согласно проведенным исследованиям [7], эффективность когенерационных ЭУ определяется экономичностью первичного двигателя и системы утилизации тепла, коэффициентом использования топлива. В табл. 1 приведены сравнительные характеристики эффективности когенерационных ЭУ разных типов [8]. ЭУ на ТЭ имеет лучшие показатели эффективности, отсутствие процесса сжигания топлива обеспечивает их высокую экологичность.

Таблица 1

## Эффективность когенерационных энергоустановок

Характеристики эффективности установки	ГТУ	ГПУ	ЭУ на ТЭ
Электрический КПД первичного двигателя, %	25-35	40-45	50-55
Коэффициент использования топлива, %	до 90	70-92	до 95
Удельный расход условного топлива на выработку электроэнергии без учета утилизации тепла, г.у.т./кВт·ч	300-615	360-610	210-340

Наибольшее внимание исследователей и разработчиков во всем мире привлекают твердооксидные топливные элементы (ТОТЭ) они имеют самый высокий КПД, низкую стоимость керамических материалов и могут работать на обычном углеводородном топливе [9, 10].

В данной статье рассмотрено решение проблемы электроснабжения энергоудаленных потребителей с использованием ЭУ на ТОТЭ. Одной из лидирующих компаний на европейском рынке, активно занимающейся разработкой подобных энергоустановок, является швейцарская компания Hesis [11].

Несмотря на преимущества ЭУ на ТОТЭ, они пока не применяются в системах электроснабжения потребителей. Применение таких ЭУ сдерживается их низкой маневренностью, отсутствием технических решений по интеграции в СЭС потребителей при проектировании новых и реконструкции действующих энергосистем [12,13], отсутствием нормативных документов по проектированию ЭУ на ТОТЭ, работающих на биогазе, и рядом других проблем.

Для решения перечисленных проблем: проведено исследование системы электроснабжения СХП молочного животноводства, на примере которой разработана методика выбора мощности энергоустановки на ТОТЭ; предложены схемные решения системы электроснабжения СХП, разработан алгоритм функционирования энергосистемы; проведено компьютерное моделирование с анализом полученных результатов.

## Методика выбора энергоустановки на ТОТЭ

Разработанная методика предназначена для выбора источника питания небольших СХП молочного животноводства установленной мощностью до 1МВт и номинальным напряжением 380 В, имеющих возможность генерации биогаза. Выбор ЭУ на ТОТЭ включает четыре этапа.

На первом этапе определяется расчетная электрическая нагрузка предприятия. Для проектируемых предприятий расчетная нагрузка определяется известными аналитическими и эмпирическими методами [14]. При реконструкции системы электроснабжения (СЭС) – по графикам электрической нагрузки предприятия.

На втором этапе рассчитывается объем суточной выработки биометана ( $V_M$ ) и теоре-

тически возможной мощности ЭУ ( $P_{\text{ТЭЦ.ТЕОР}}$ ). Исходными данными являются численность крупнорогатого скота ( $N_{\text{КРС}}$ ) и масса суточных биоотходов от каждого животного ( $M_i$ ). Расчет проводится в соответствии с [15]:

$$V_M = N_{\text{КРС}} \cdot M_i \cdot K_{\text{П}} \cdot K_{\text{И.Б}} \cdot N_{\text{Б}} \left( 1 - \frac{V}{100} \right) \left( \frac{R_C F G}{100} \right), \quad (1)$$

где  $K_{\text{П}}$  – коэффициент, учитывающий примеси в биомассе, о.е.;  $K_{\text{И.Б}}$  – коэффициент использования биомассы, о.е.;  $N_{\text{Б}}$  – удельный выход биогаза на 1 кг сухого вещества, м<sup>3</sup>;  $V$  – влажность биомассы, %;  $R_C$  – содержание органических веществ в сухой биомассе, %;  $F$  – уровень сбраживания биомассы, %;  $G$  – содержание метана в биогазе, % [16].

На третьем этапе рассчитываются собственные нужды ЭУ на ТОТЭ ( $P_{\text{С.Н}}$ ).

На четвертом этапе производится окончательный выбор мощности ЭУ с учетом электрических потерь в элементах СЭС ( $\Delta P$ ).

Установленная электрическая мощность ЭУ  $P_{\text{ТЭЦ.Э}}$

$$P_{\text{ТЭЦ.Э}} \geq P_{\text{Р.СУМ}} = P_{\text{Р}} + P_{\text{С.Н}} + \Delta P, \quad (2)$$

где  $P_{\text{Р.СУМ}}$  – суммарная расчетная мощность СХП, кВт;  $P_{\text{Р}}$  – расчетная мощность СХП, кВт.

При этом должно выполняться условие (3)

$$P_{\text{ТЭЦ.Э}} \leq P_{\text{ТЭЦ.ТЕОР}} = \frac{V_M}{F_{\text{У.С}}}, \quad (3)$$

где  $P_{\text{ТЭЦ.ТЕОР}}$  – теоретически возможная электрическая мощность ЭУ, зависящая от объема суточной выработки биометана на предприятии и удельного расхода топлива ЭУ на ТОТЭ на выработку 1кВт энергии ( $F_{\text{У.С}}$ ).

Установленная тепловая мощность ЭУ определяется на основе выбранной  $P_{\text{ТЭЦ.Э}}$  по данным производителя ЭУ на ТОТЭ.

В качестве примера поразработанной методике произведен выбор ЭУ на ТОТЭ для электроснабжения действующего СХП молочного животноводства. Суммарная установленная мощность СХП – 106 кВт, численность КРС – 550 голов. Предприятие может ежедневно вырабатывать 906,9 м<sup>3</sup> биометана, что позволяет использовать ЭУ на ТОТЭ номинальной электрической мощностью 140 кВт непрерывно в течение года.

### Интеграция энергоустановки на ТОТЭ в систему электроснабжения СХП

Система электроснабжения с ЭУ на ТОТЭ состоит из четырех подсистем:

- основной генерации (ЭУ на ТОТЭ);
- накопления электроэнергии;
- преобразования и распределения электроэнергии;
- резервной генерации.

Система накопления на основе стационарных аккумуляторных батарей (АБ) решает проблему низкой маневренности ЭУ на ТОТЭ путем покрытия пиковых нагрузок в дневные часы и обеспечения необходимого уровня потребления электроэнергии в ночные часы минимума. На рис. 1 приведен суточный график нагрузки исследуемого СХП с наибольшим дневным пиком (типичные зимние сутки). Нижняя пунктирная линия показывает зону покрытия нагрузок ЭУ на ТОТЭ. В периоды минимума нагрузки (min1, min2 и min3) электроэнер-

гия, вырабатываемая ЭУ, идет на заряд АБ. В периоды максимума нагрузки (max1 и max2) происходит обратное действие – разряд АБ, а в случае полного разряда системы накопления в работу включается резервный источник питания – газовый электрогенератор.

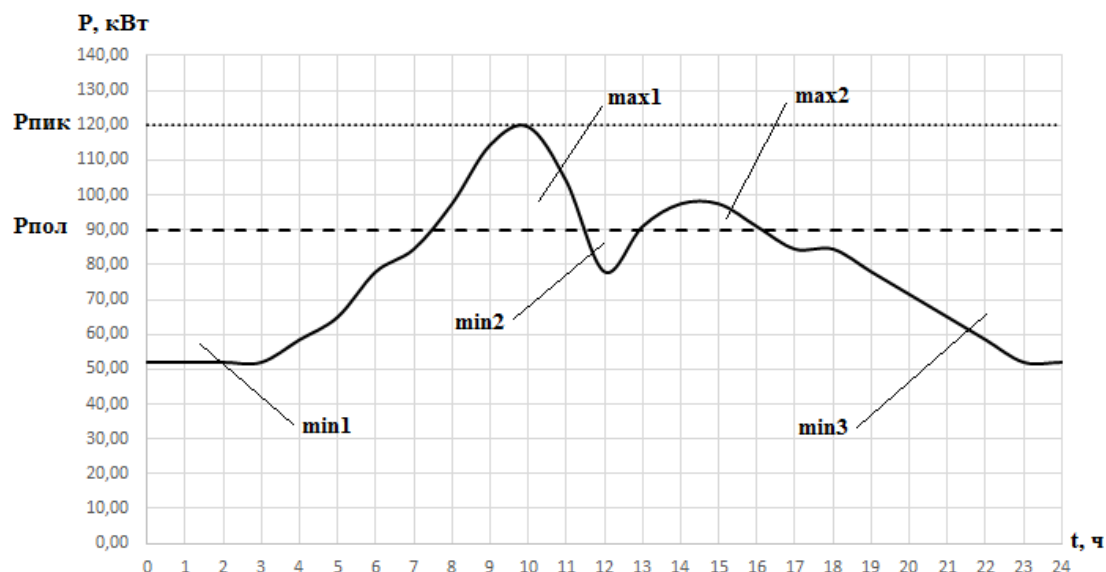


Рис. 1. Суточный график нагрузки исследуемого СХП с ЭУ на ТОТЭ

Интеграция ЭУ и системы накопления в СЭС предприятия осуществляется с помощью подсистемы преобразования на базе инверторов типа DC/AC (рис. 2).

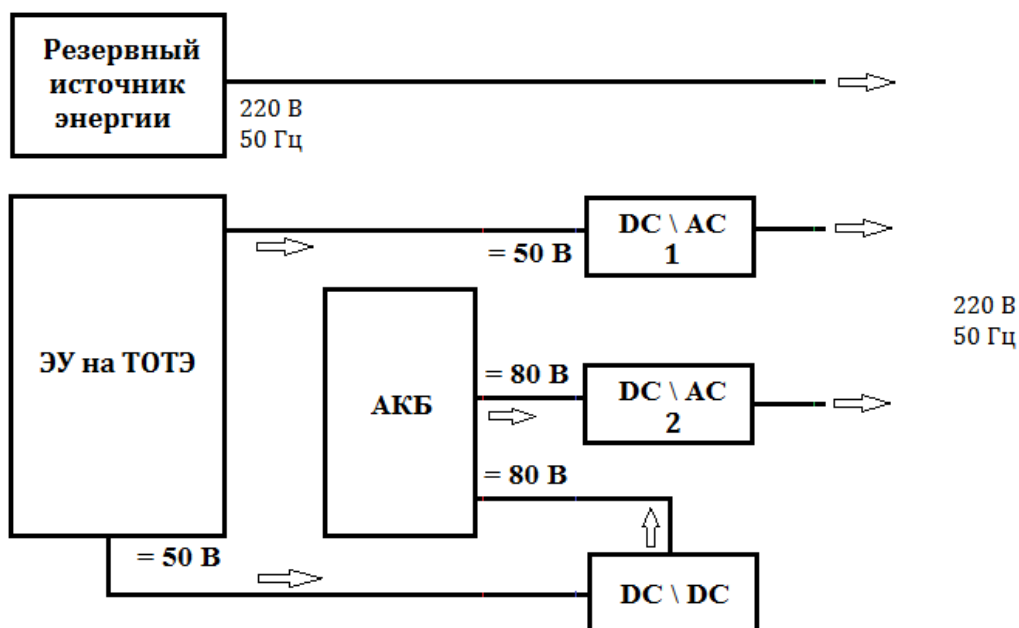
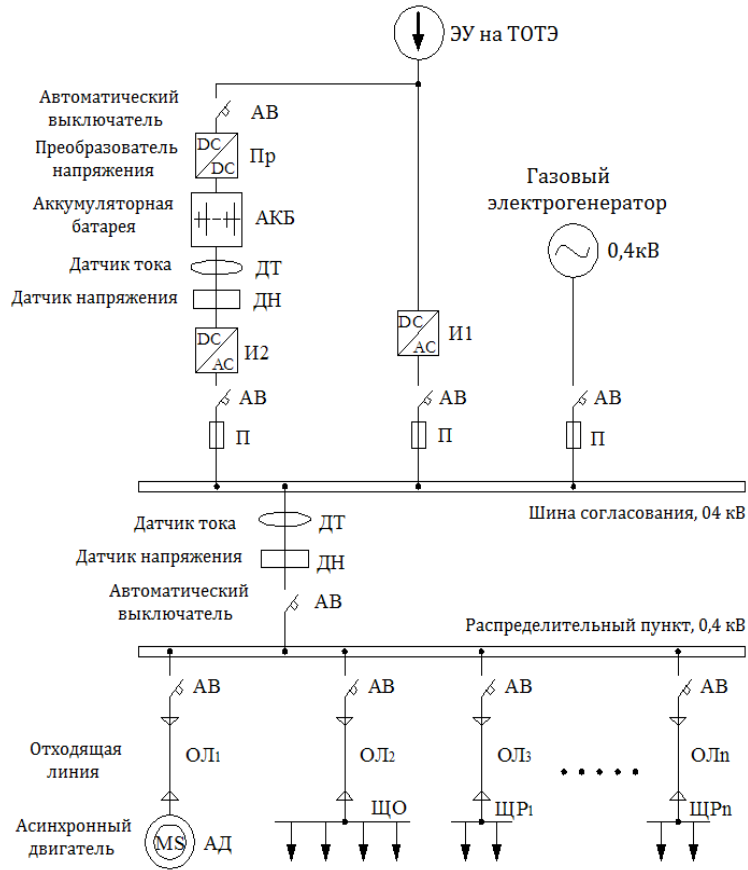


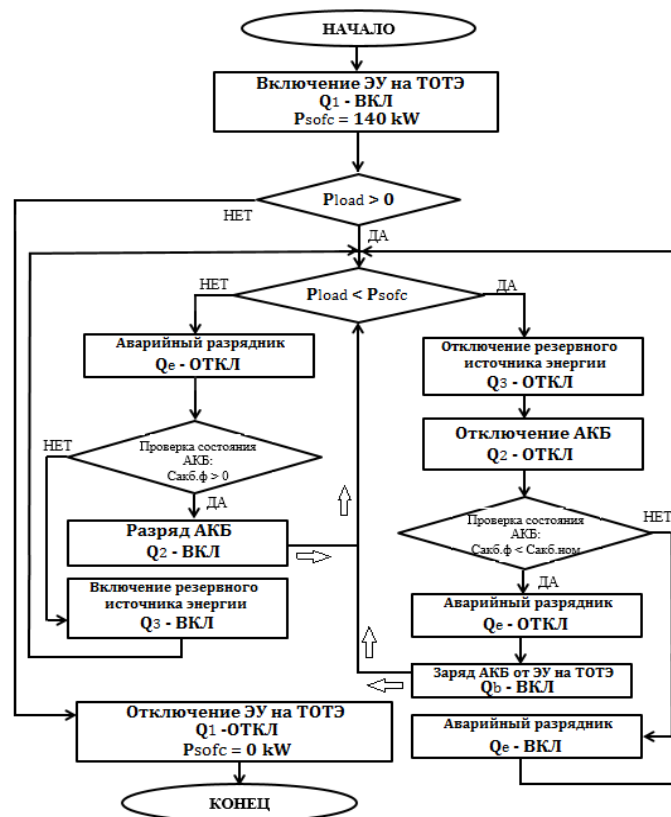
Рис. 2. Структурная схема системы преобразования

Подсистема резервной генерации предназначена для работы в период одновременного превышения потребляемой нагрузки предприятия над генерируемой мощностью ЭУ и полного разряда АБ. Источником энергии системы является газовый электрогенератор отечественного производства мощностью 10 кВт [17].

Однолинейная схема электроснабжения энергоудаленного СХП с ЭУ на ТОТЭ приведена на рис. 3.



**Рис. 3. Однолинейная схема электроснабжения энергоудаленного предприятия с ЭУ на ТОТЭ:**  
ЩО – щит освещения; ЩР – щит распределительный



**Рис. 4. Блок-схема алгоритма функционирования СЭС исследуемого СХП**

### Компьютерное моделирование СЭС с ЭУ на ТОТЭ

Для определения порядка взаимодействия элементов исследуемой СЭС разработан алгоритм, позволяющий исключить дефицит электроэнергии и превышение генерации над электропотреблением предприятия. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 4.

Начальными параметрами работы ЭУ являются номинальная электрическая мощность ( $P_{sofc} = 140$  кВт) и тепловая мощность ЭУ. Необходимым условием для запуска ЭУ является наличие нагрузки СХП. Питание собственных нужд энергосистемы осуществляется от ЭУ на ТОТЭ.

Разработанный алгоритм состоит из двух основных контуров (кругов), разделенных условием (4)

$$P_{LOAD} < P_{SOFC} \tag{4}$$

При электрической мощности нагрузки ( $P_{load}$ ) меньшей мощности ЭУ на ТОТЭ ( $P_{sofc}$ ) происходит проверка состояния резервного источника питания и, в случае его работы подача сигнала на отключение выключателя  $Q_3$ . Аналогично подается сигнал на отключение АБ от цепи нагрузки (выключатель  $Q_2$ ).

Следующий шаг – проверка емкости АБ. При фактической емкости АБ меньшей номинальной ( $C_{аб.ф} < C_{аб.ном}$ ), подается сигнал на отключение аварийного разрядника (выключатель  $Q_e$ ), и начинается процесс заряда АБ. Аварийный разрядник (чисто активная нагрузка) предусмотрен на случай превышения мощности генерации основного источника энергии над мощностью нагрузки при 100% заряда АБ. При  $C_{аб.ф} = C_{аб.ном}$  (100% заряда) подается сигнал на включение выключателя  $Q_e$ .

При мощности нагрузки, меньшей мощности ЭУ на ТОТЭ, происходит отключение выключателя  $Q_e$  с последующей проверкой состояния АБ. Если фактическая емкость АБ  $C_{аб.ф} > 0$ , подается сигнал на включение в цепь нагрузки системы накопления (выключатель  $Q_2$ ). При полном разряде АБ ( $C_{аб.ф} = 0$ ) подается сигнал на подключение резервного источника энергии (включение выключателя  $Q_3$ ).

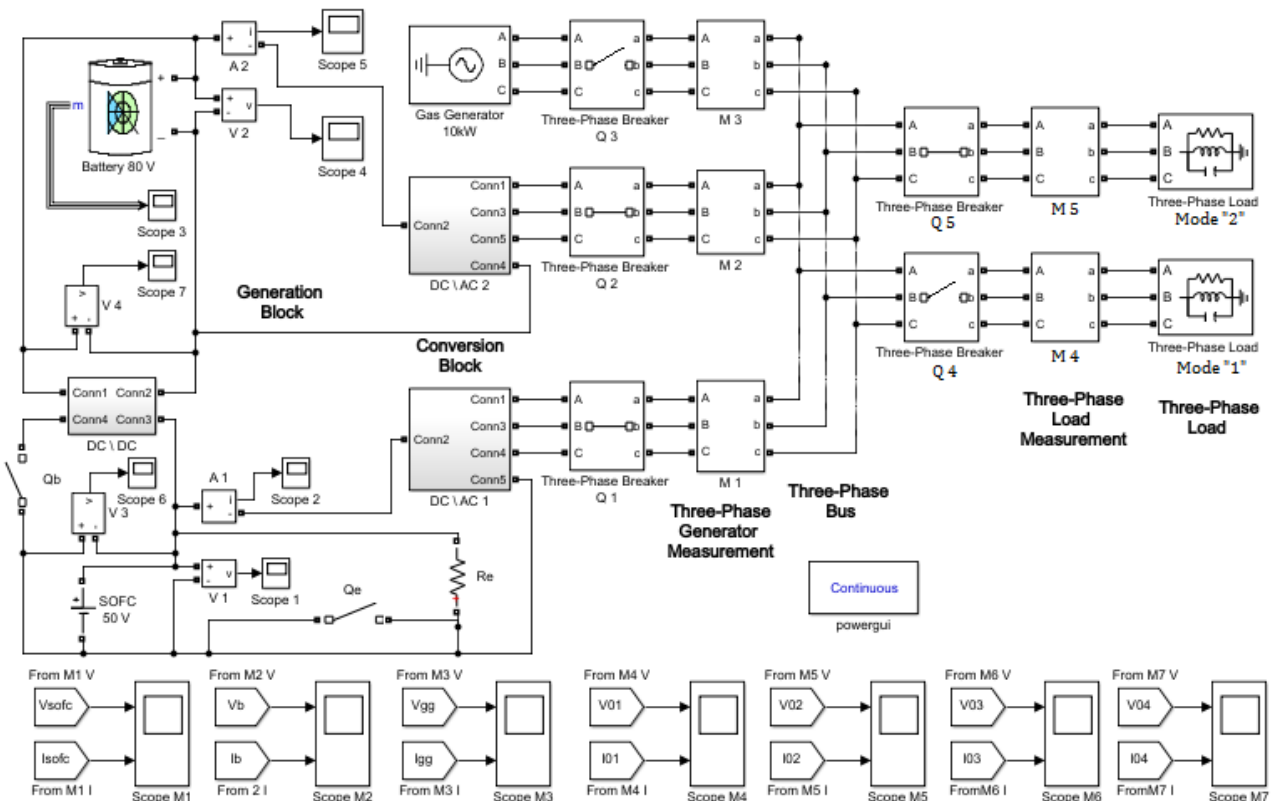


Рис. 5. Simulink-модель системы электроснабжения с ЭУ

Мониторинг соотношения мощностей генерации и нагрузки происходит непрерывно.

Для отработки алгоритма и отладки механизмов его управления в программном комплексе Matlab-Simulink разработана имитационная компьютерная модель системы электрообеспечения СХП на основе ТОТЭ. Разработанная модель представляет собой комбинированное соединение типовых и программируемых блоков в программном комплексе Matlab-Simulink в единую систему. На рис. 5 представлена первая итерация модели согласованного функционирования четырех подсистем, позволяющая имитировать ряд теоретических измерений (осциллограммы токов и напряжений, а также их действующие значения) для двух режимов функционирования СЭС исследуемого СХП:

- режим 1: мощность генерации ( $P_{ГЕН1}$ ) равна номинальной мощности ЭУ на ТОТЭ;
- режим 2: мощность генерации ( $P_{ГЕН2}$ ) равна сумме номинальных мощностей ЭУ и системы накопления, рассчитанной на работу в пиковый период.

Следует отметить, что первичная итерация модели требует доработки и продолжения исследований с целью приближения моделируемой системы к реальным условиям.

Действующее значение напряжения на зажимах нагрузки с увеличением мощности генерации (пропорциональным увеличению мощности нагрузки) незначительно уменьшается (в пределах 1%), что находится в рамках действующего стандарта на качество электроэнергии [18]. При этом действующее значение тока при увеличении нагрузки и мощности генерации увеличивается примерно на 4,1%.

### Заключение

На основе проведенных исследований получены следующие результаты:

1. Разработана методика выбора мощности энергоустановки на ТОТЭ, работающей на биогазе. Методика позволяет осуществить подбор оптимальной мощности источника питания с учетом объема биогаза на предприятии и его суммарной установленной мощности.
2. Разработаны технические решения по интеграции энергоустановки на ТОТЭ в систему электроснабжения энергоудаленного СХП.

Рассмотренная СЭС с ЭУ на ТОТЭ включает в себя четыре подсистемы: основной и резервной генерации, преобразования и накопления. Наличие подсистем накопления и преобразования позволяет решить проблемы низкой маневренности ЭУ на ТОТЭ и интеграции ЭУ в СЭС потребителей. Система резервной генерации обеспечивает работу предприятия в критическом случае – превышении мощности нагрузки над генерацией и полном разряде АКБ.

3. На основе предложенного алгоритма в программном комплексе Matlab-Simulink разработана имитационная компьютерная модель СЭС с ЭУ на ТОТЭ.

Представленная модель позволяет проводить исследования основных электрических характеристик системы (осциллограммы токов и напряжений) на источниках питания и нагрузке, позволяющих сделать вывод о согласованной работе системы генерации и потребителей СХП.

### Библиографический список

1. Генеральная схема размещения объектов электроэнергетики до 2035 года. Утверждена Распоряжением Правительства РФ от 09.06.2017 № 1209-р. М., 2017. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71599734/#1000>.
2. Григорьев, С.В. Энергоснабжение обособленных и удаленных потребителей на основе использования петротермальных источников энергии: дисс. ... канд. техн. наук: 05.14.01 / С.В. Григорьев. – М.: Нац. исслед. ун-т МЭИ, 2014. – 220 с.
3. Проект «Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года» (редакция от 01.02.2017). М., 2017. [Электронный ресурс]. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1920>.
4. Энергоэффективность и развитие энергетики: гос. программа Российской Федерации. Утверждено постановление Правительства Российской Федерации от 15 апреля 2014 года № 321 (с изменениями на 30 декабря 2017 года) (редакция, действующая с 12 января 2018 года). — М., 2018. [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/499091759>.
5. Об основах государственной политики Российской Федерации в районах Севера: доклад на



- заседании Президиума Госсовета №36. [Электронный ресурс]. URL: <http://archive.kremlin.ru/text/appears2/2004/04/28/97302.shtml>.
6. **Попель, О.С.** Перспективные применения возобновляемых источников энергии – в мировой практике и в России: научная конференция фонда Сколково. [Электронный ресурс]. URL: [gosbook.ru/node/36164](http://gosbook.ru/node/36164).
  7. **Томаров, Г.В.** Мини-ТЭЦ на основе когенерационных технологий / Г.В. Томаров, В.С. Рабенко, В.А. Буданов // Вестник ИГЭУ. – 2008. – № 2. – С. 27–35.
  8. **Вершинский, В.П.** Какой привод выбрать [Электронный ресурс]. URL: [turbine-diesel.ru](http://turbine-diesel.ru)
  9. **Маркеев, Д.С.** Электрохимические генераторы на топливных элементах последние разработки / Д.С. Маркеев, Д.В. Ростовщикова, Л.Г. Перминова // Молодёжь и наука: сб. материалов VI Всерос. научно-технич. конф. студентов, аспирантов и молодых. – Красноярск: Сибирский федеральный ун-т, 2011. – 270 с.
  10. Официальный интернет-сайт компании BloomEnergy. 2014 [Электронный ресурс]. URL: [bloomenergy.com/fuel-cell/solid-oxide](http://bloomenergy.com/fuel-cell/solid-oxide).
  11. Новые разработки в сфере мини-ТЭЦ // Электропанорама. – 2000. – №5. – С. 43–50.
  12. **Соснина, Е.Н.** Автоматизированная информационная база данных по энергоустановкам на возобновляемых источниках энергии / Е.Н. Соснина, Д.А. Филатов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2014. – № 1 (103). – С. 194–199.
  13. **Соснина, Е.Н.** Разработка методики сравнительного анализа энергоустановок на возобновляемых источниках энергии / Е.Н. Соснина, Д.А. Филатов // Актуальные проблемы электроэнергетики: сб. научно-технич. ст. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2013. – С. 87–91.
  14. **Вагин, Г.Я.** Системы электроснабжения: комплекс учебно-метод. материалов / Г.Я. Вагин, Е.Н. Соснина. – Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2012. – 143 с.
  15. Компания «Биокомплекс». Информационный портал. [Электронный ресурс]. URL: [biogaz-russia.ru/proekt-biogazovojj-ustanovki](http://biogaz-russia.ru/proekt-biogazovojj-ustanovki).
  16. **Веднев, А.Г.** ОФ «Флюид». Биогазовые технологии в Кыргызской Республике / А.Г. Веднев, Т.А. Веденева. – Астана: Евро, 2006. – 90 с.
  17. Официальный интернет ресурс компании ООО «Фасэнергомаш» [Электронный ресурс]. URL: [fasenergo.ru](http://fasenergo.ru).
  18. ГОСТ № 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Изд-во стандартов, 2014.

*Дата поступления  
в редакцию 05.02.2018*

**E.N. Sosnina, L.E. Veselov**

## **SOFC-BASED POWER PLANTS FOR REMOTE CONSUMERS POWER SUPPLY**

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

**Purpose:** The article considers the problem how to supply remote consumer's offline by employing SOFC-based power plant, which run on biogas. Issues concerning the integration of SOFC-based power plant into agricultural enterprises power supply system are also considered here.

**Design/methodology/approach:** The authors have developed the method of SOFC-based power plant's selection for small factories, which have ability to generate biogas. The method of computer simulation modeling in the software package "MatLab" (appendix "Simulink"), as well as well-known methods of electrical loads calculation are applied.

**Findings:** The paper determines the most promising types of power plants and fuel cells. The authors have developed the algorithm and Simulink-model of SOFC-based power plant power supply system which makes it possible to investigate power supply system energy characteristics.

**Research limitations/implications:** The present study provides a starting-point for further research in the field of application SOFC-based power plant to power supply low-capacity remote consumers. For instance, one of the necessary needs is to develop a computer simulation model in more detail.

**Originality/value:** The study first tested the computer Simulink-model of SOFC-based power plant to power supply system for agricultural enterprises power supply. The paper also provides the method of SOFC-based power plant's selection, which can be further used to power supply low-capacity agricultural enterprises.

*Key words:* SOFC-based power plant, solid oxide fuel cell, power supply system, remote consumer, biogas, agricultural enterprise, Simulink model.

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

---

УДК 629.1+621.31

С.А. Горожанкин, А.Я. Бабанин, Н.В. Савенков, В.В. Понякин

## ИЗМЕРЕНИЕ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА ПОРШНЕВОГО ДВС КОЛЕСНОЙ МАШИНЫ ПРИ ЕГО РАБОТЕ НА НЕУСТАНОВИВШЕМСЯ РЕЖИМЕ С ПОМОЩЬЮ ТОРСИОННОГО КРУТИЛЬНОГО ДИНАМОМЕТРА

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, г. Макеевка

Приведены теоретические основы, конструкция и опыт практического применения торсионного крутильного динамометра для измерения крутящего момента поршневого ДВС колесной машины при его работе на неустановившемся режиме. Рассмотрены вопросы компоновки, градуировки, относительной погрешности, чувствительности и динамических характеристик прибора. Также предложены рациональные параметры механики, электроники и программного обеспечения.

*Ключевые слова:* крутящий момент, двигатель внутреннего сгорания, торсионный крутильный динамометр, неустановившийся режим, калибровочный параметр, относительная погрешность, оптический датчик, система сбора данных.

### Введение

В настоящее время численное моделирование играет весомую роль в процессах расчетного определения тягово-скоростных и топливно-экономических эксплуатационных свойств автотранспортного средства, а также его экологичности. Полученные данные широко используются при анализе комплексной эффективности, в также в процессах синтеза конструкционных и режимных параметров перспективных силовых установок.

При этом степень достоверности математической модели нагрузочно-скоростных характеристик ДВС имеет особую важность, так как преимущественно его работой определяются рассмотренные эксплуатационные свойства колесной машины. Приоритетность экспериментального исследования зависимостей эффективных показателей современного транспортного ДВС в виде функций от его параметров регулирования обуславливается сложностью как самой конструкции двигателя, так и протекающих в его агрегатах и системах физико-химических процессов.

В современных условиях наблюдается увеличение эксплуатационных скоростей движения и ускорений транспортных средств, о чем также свидетельствуют параметры Всемирного гармонизированного ездового цикла (WLTC). Рост интенсивности дорожного движения приводит к увеличению продолжительности работы автомобильных ДВС на неустановившемся режиме. Эффективные показатели двигателя при этом могут в существенной степени отличаться от значений, полученных на соответствующих установившихся режимах, и требуют разработки других, преимущественно экспериментальных, методов оценки [1, 2].

Первоочередной задачей при опытно-определении развиваемой эффективной мощности и удельного расхода топлива является измерение величины эффективного крутящего момента ДВС.

**Теоретический анализ.** Устройства, предназначенные для измерения крутящего момента, по принципу работы можно разделить на четыре класса: балансирные динамометры,

торсионные приборы, трансмиссионные динамометры и преобразователи для измерения по вторичным параметрам [3]. В соответствии со стандартом [4], эффективный крутящий момент ДВС на установившемся режиме определяется весовым устройством балансирного тормозного динамометра с учетом потерь на трение в системе. Вследствие большой инерционности и невозможности ввиду этого регистрировать переменные значения крутящего момента, применение тормозных динамометров при исследовании неустановившихся режимов ограничивается только целями градуировки относительно безынерционных приборов, а также созданием нагрузки на двигатель при стендовых испытаниях. В отличие от тормозных, торсионные динамометры являются обычно безынерционными приборами и выполняют только измерительную функцию, позволяя регистрировать как средние во времени, так и непрерывно изменяющиеся значения крутящего момента двигателя при его работе на любых режимах [1].

Торсионные динамометры подразделяются на тензометрические и крутильные. В настоящее время интенсивно развиваются тензометрические приборы, принцип действия которых основан на зависимости между растяжением проводника и его электрическим сопротивлением. Благодаря постоянно уменьшающимся размерам и улучшающейся стабильности электроники, возможно конструировать датчики с увеличенной точностью и лучшими динамическими характеристиками [5]. Современные тензометрические приборы компактны, обладают наиболее высокой точностью относительно других типов динамометров, предназначенных для измерения крутящего момента, а также могут быть размещены непосредственно на трансмиссионном валу, не требуя установки вспомогательных устройств между двигателем и нагрузкой [6].

Рабочий процесс торсионного крутильного динамометра, в отличие от торсионного тензометрического, основан на прямом либо косвенном измерении угла скручивания торсионного вала. Этот угол, в соответствии с законом Гука, пропорционален передаваемому крутящему моменту [3]:

$$M = f(\varphi_C) = \frac{10^6 \pi \varphi_C G_P J}{180L}, \text{ Нм}, \quad (1)$$

где  $\varphi_C$  – угол скручивания торсионного вала, град.;  $G_P$  – модуль упругости для материала вала, МПа;  $J$  – полярный момент инерции поперечного сечения вала, м<sup>4</sup>;  $L$  – рабочая длина торсионного вала, м.

Торсионные крутильные динамометры были изобретены значительно раньше тензометрических. Они существенно уступают последним в размерах и точности, однако обладают простотой конструкции, надежностью, более низкой стоимостью и меньшей чувствительностью к вибрациям, что обуславливает рациональность их применения для решения соответствующих научно-производственных задач. Назначение этих приборов в значительной мере определяется параметрами конструкции, которая у данного типа устройств в значительной мере дифференцирована.

Крутильные торсионные динамометры подразделяются на две группы: контактные и бесконтактные приборы [3]. Последние имеют меньшую чувствительность к вибрациям и большую стабильностью показаний, а также менее требовательны к обслуживанию. По принципу измерения величины  $\varphi_C$  бесконтактные торсионные динамометры подразделяются на временные, фазовые, нониусные, разностные и фотоэлектрические. В настоящей статье рассмотрен процесс определения крутящего момента автомобильного ДВС с помощью бесконтактного торсионного крутильного динамометра, работающего по временному принципу.

*Конструкция.* Кинематическая принципиальная схема приведена на рис. 1. Устройство является типовым для приборов этого класса. Ведущий вал 8 передает вращение ведомому фланцу 9 через торсионный вал 4. На нем неподвижно установлены одинаковые измерительные диски 5. Эти детали образуют ротор прибора, который свободно вращается в подшипниковых узлах 7, установленных в корпусе 6. Корпус жестко связан с блок-картером испытуе-

мого ДВС. Коленчатый вал с частотой  $n$ ,  $\text{мин}^{-1}$ , приводит вал 8 через фрикционную муфту сцепления, имеющую ведомый диск без демпфера крутильных колебаний.

**Принцип действия.** При вращении ротора прорези 10 на периферии измерительных дисков обуславливают создание на информационных каналах оптических датчиков №1, №2 и №3 частотно-широотно-модулированных сигналов. Как было отмечено ранее, процесс определения крутящего момента  $M$  основан на временном принципе [7]:

$$M = f(A), \quad A = \frac{t_{12}}{t_{13}} = \frac{\varphi_C + \varphi_{12}}{\varphi_C + \varphi_{13}}, \quad (2)$$

где  $A$  – безразмерный калибровочный параметр динамометра;  $t_{12}$  – время между прохождением прорези переднего измерительного диска (со стороны ДВС) через датчик №1 и прорези заднего измерительного диска (со стороны нагрузки) через датчик №2;  $t_{13}$  – время между прохождением прорези переднего измерительного диска через датчик №1 и прорези заднего измерительного диска через датчик №3;  $\varphi_{12}$  – угол между датчиками №1 и №2, град;  $\varphi_{13}$  – угол между датчиками №1 и №3, град.

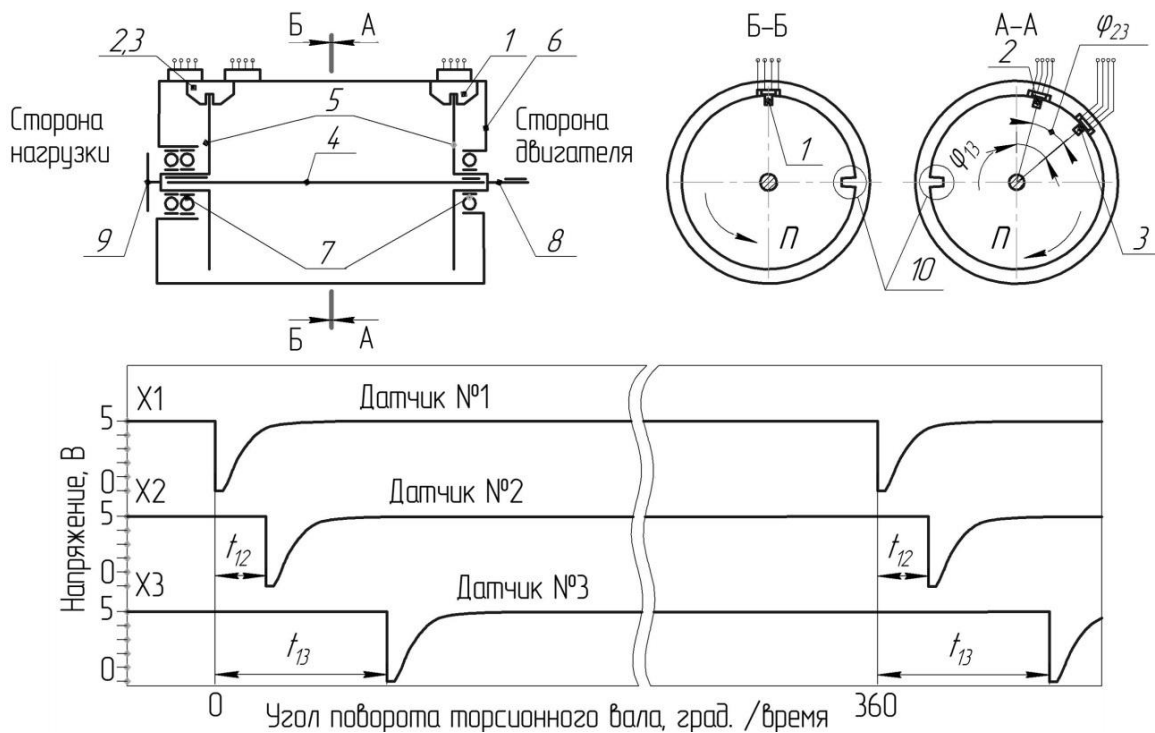


Рис. 1. Схема динамометра и осциллограмма напряжений на датчиках

С изменением частоты вращения ротора величины  $t_{12}$  и  $t_{13}$  изменяются пропорционально. При этом значение калибровочного параметра  $A$  остается неизменным, что поясняет правая часть уравнения (2): при отсутствии передаваемого крутящего момента, угол  $\varphi_C$  также равен нулю, и параметр  $A$  зависит только от углов  $\varphi_{12}$  и  $\varphi_{13}$ , которые не изменяют своего значения при отсутствии деформации на торсионном валу. Соответственно при  $A(n \neq \text{const}, M = 0) = \text{const}$ .

При передаче крутящего момента торсионный вал испытывает упругую деформацию и угол  $\varphi_C$  изменяет свое значение. Вслед за ним происходит нарушение пропорциональности между величинами  $t_{12}$  и  $t_{13}$ . Это вызывает изменение калибровочного параметра  $A$ . Таким образом, при  $A(n \neq \text{const}, M \neq 0) \neq \text{const}$ .

Одним из возможных вариантов представления искомой функциональной зависимости  $M=f(A)$  в аналитическом виде является совместное решение уравнений (1) и (2):

$$M = f(A) = \frac{10^6 \eta \cdot \pi G_p I_p (A \varphi_{12} + A \varphi_{23} - \varphi_{12})}{180L(1 - A)}, \text{ Нм}, \quad A = \frac{t_{12}}{t_{13}}, \quad (3)$$

где  $\varphi_{23}$  - угол между датчиками №2 и №3, град, ( $\varphi_{23} = \varphi_{13} - \varphi_{12}$ );  $\eta$  – КПД подшипников.

Рассмотренная конструкция позволяет измерять условно-мгновенные (за один оборот коленчатого вала) значения крутящего момента.

*Градуировка.* Точное определение значений констант функции (3) представляет собой определенную практическую сложность. Это, в частности, объясняется сложной формой и структурой материала торсионного вала. Поэтому градуировку такого прибора, как правило, выполняют опытным путем. В начале процесса градуировки динамометра величины  $\eta$ ,  $G_p$ ,  $I_p$ ,  $L$ ,  $\varphi_{12}$  и  $\varphi_{13}$  принимаются приближенно. Затем на любом установившемся нагрузочно-скоростном режиме ( $n = \text{const}$ ,  $M = \text{const}$ ,  $M > 0$ ) определяется уточненное значение угла  $\varphi_{23}$ :

$$\varphi_{23} = 6n (t_{13} - t_{12}). \quad (4)$$

Соответствующие значения величин  $n$ ,  $t_{13}$  и  $t_{12}$  на этом режиме определяются программным комплексом динамометра на основании сигналов с датчиков.

Уточненное значение угла  $\varphi_{12}$  возможно получить путем его выражения из функции (3) аналогичным образом на любом нагрузочно-скоростном режиме, для которого известен крутящий момент  $M$  (например, по показаниям балансирного силоизмерительного механизма тормозного устройства, создающий нагрузку на испытуемый ДВС).

Параметры  $\eta$ ,  $G_p$ ,  $I_p$ ,  $L$  в одинаковой мере влияют на значение  $M$ , зависимость (3), таким образом, в качестве тарировочного допустимо выбрать один из них. Например, рабочую длину торсионного вала. В процессе градуировки подбирается такое ее значение, при котором величина крутящего момента, определенного программным комплексом динамометра, во всем диапазоне установившихся нагрузочно-скоростных режимов будут соответствовать значениям крутящего момента балансирного силоизмерительного механизма.

*Погрешность и чувствительность.* Так как рассматриваемая конструкция является прибором, предназначенным для измерений в условиях нестационарных процессов, то к нему (как к средству измерения) предъявляются соответствующие метрологические требования в отношении характеристики погрешностей, чувствительности и динамических характеристик.

Относительная погрешность динамометра определяется выражением [3]

$$\delta_M = \delta_\varepsilon + \delta_{nM} + \delta_D + \delta_B, \quad (5)$$

где  $\delta_\varepsilon$  – составляющая относительная погрешности, вызванная влиянием углового ускорения торсионного вала  $\varepsilon$ , рад/с<sup>2</sup> (6);  $\delta_{nM}$  – относительная погрешность, вызванная неравномерностью крутящего момента и частоты вращения коленчатого вала ДВС (7);  $\delta_D$  – относительная погрешность дискретизации (8);  $\delta_B$  – относительная погрешность весового механизма балансирного динамометра, применяемого в процессе градуировки.

$$\delta_\varepsilon = \frac{\frac{1}{6n} (\varphi_c + \varphi_{12} + \varphi_{23}) - \frac{1}{\varepsilon} \left( -\frac{\pi n}{30} + \sqrt{\left(\frac{\pi n}{30}\right)^2 + \frac{\varepsilon \pi}{90} (\varphi_c + \varphi_{12} + \varphi_{23})} \right)}{\frac{1}{6n} (\varphi_c + \varphi_{12} + \varphi_{23})}, \quad (6)$$

$$\delta_{nM} = \frac{0,5n_{ц} (\gamma_{дв} (\varphi_c + \varphi_{12} + \varphi_{23}) + \mu \varphi_c)}{180 + n_{ц} (\varphi_c + \varphi_{12} + \varphi_{23})}, \quad (7)$$

где  $\gamma_{дв}$  – коэффициент неравномерности частоты вращения ДВС [8];  $\mu$  – коэффициент неравномерности крутящего момента ДВС [8];  $n_{ц}$  – количество цилиндров в ДВС.

$$\delta_D = \frac{\delta_\phi}{m_\phi \phi_c}, \quad \delta_\phi = \frac{60n}{\nu}, \quad (8)$$

где  $\delta_\phi$  – разрешающая способность (дискретность) динамометра;  $m_\phi$  – кратность интегрирующего звена (программного фильтра);  $\nu$  – частота дискретизации каждого информационного канала датчиков динамометра, Гц.

Чувствительность динамометра  $S_{\text{град}}$  определена выражением

$$S_{\text{град}} = \frac{\Delta A}{\phi_{C \max}} = \frac{1}{\phi_{C \max}} \cdot \left( \frac{\phi_{C \max} + \phi_{12}}{\phi_{C \max} + \phi_{12} + \phi_{23}} - \frac{\phi_{12}}{\phi_{12} + \phi_{23}} \right), \text{ 1/град.}, \quad (9)$$

где  $\Delta A$  – изменение калибровочного параметра за рабочий диапазон угла скручивания  $\phi_{C \max}$ .

**Экспериментальная часть.** На рис. 2 приведен продольный разрез и модель инженерного решения динамометра, рабочий процесс которого рассмотрен в настоящей статье. Устройство является бесконтактным электронно-оптическим торсионным крутильным динамометром.

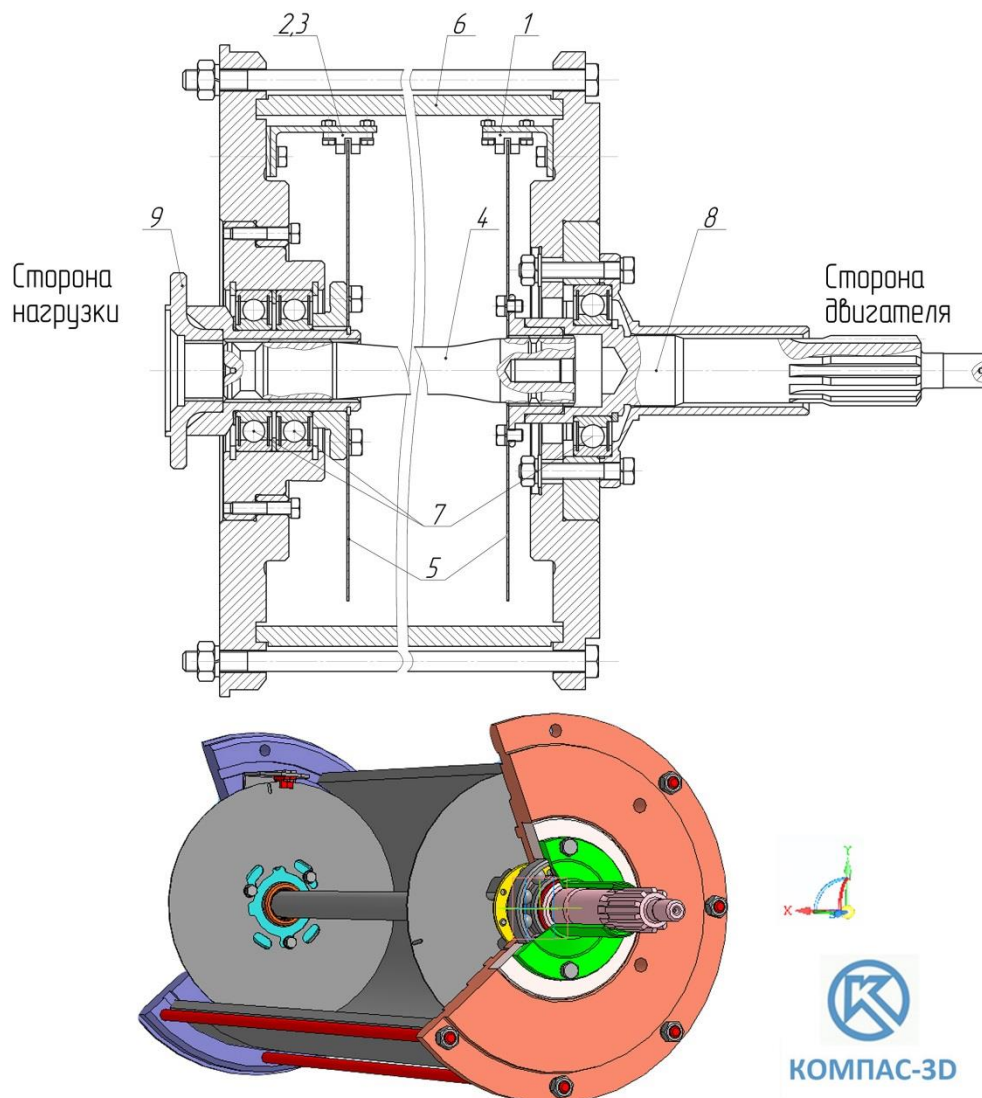


Рис. 2. Продольный разрез динамометра и его графическая модель

Цифровые позиции соответствуют таковым на рис. 1. Прибор разработан и внедрен в лаборатории автомобильных двигателей кафедры «Техническая эксплуатация и сервис автомобилей, технологических машин и оборудования» ГОУ ВПО «Донбасская национальная

академия строительства и архитектуры» с целью определения эффективных показателей автомобильного ДВС, оснащенного комплексной микропроцессорной системой управления впрыском топлива и зажиганием, на неустановившихся режимах работы [2].

*Механика.* Торсионный вал имеет рабочую длину 462 мм (уточненное значение получено в процессе калибровки) и диаметр 23,4 мм (изготовлен из стали марки 50 ХГА, в качестве термообработки применено заневоливание, поверхностное упрочнение – накатка). Измерительные диски дюралюминовые, рабочий диаметр 224 мм. Датчики представляют собой оптопары модели KTIK 0221DS. Диапазон измерений динамометра:  $M = -40 \dots 300$  Нм,  $n = 100 \dots 10^4$  мин<sup>-1</sup>; предельная допустимая нагрузка 500 Нм, разрушающая 1000 Нм.

Экспериментально установлено, что ключевое влияние на качество работы прибора – его относительную погрешность, чувствительность и динамические характеристики оказывают параметры  $\varphi_{Cmax}$ ,  $\varphi_{12}$ ,  $\varphi_{23}$ ,  $m_\Phi$  и  $\nu$ .

Рабочий диапазон угла скручивания  $\varphi_{Cmax}$  подобран опытным путем и составляет 3 град. Большие значения  $\varphi_{Cmax}$ , хотя и приводят к росту чувствительности прибора (9), но вызывают значительное влияние крутильных колебаний торсионного вала (обусловленных неустановившимся режимом работы ДВС, а также неравномерностью крутящего момента и частоты вращения коленчатого вала) на результаты измерений. Именно этот параметр и определяет конструкцию торсионного вала.

Немаловажное влияние на чувствительность динамометра  $S_{град}$  оказывают углы  $\varphi_{12}$  и  $\varphi_{23}$ . Соответствующие значения подбираются опытным путем. В общем случае, уменьшение  $\varphi_{12}$  и  $\varphi_{23}$  приводит к снижению составляющей  $\delta_\epsilon$ . Угол  $\varphi_{12}$  рекомендуется принимать таким, чтобы возможно было измерять отрицательный крутящий момент ДВС (например, при стендовом определении величины механических потерь в режиме холодной обкатки [2]). Максимальная чувствительность прибора обеспечивается при значении  $\varphi_{23}$  примерно в два раза большем, чем угол  $\varphi_{12}$ .

Таким образом, в процессе калибровки прибора были получены рациональные с позиции выполненного исследования значения углов:  $\varphi_{12} = 1,425^\circ$ ;  $\varphi_{23} = 2,723^\circ$ . На рис. 3 показан процесс выбора соответствующих параметров, а также зависимость крутящего момента  $M$  и угла скручивания торсиона  $\varphi_C$  от калибровочного параметра  $A$ .

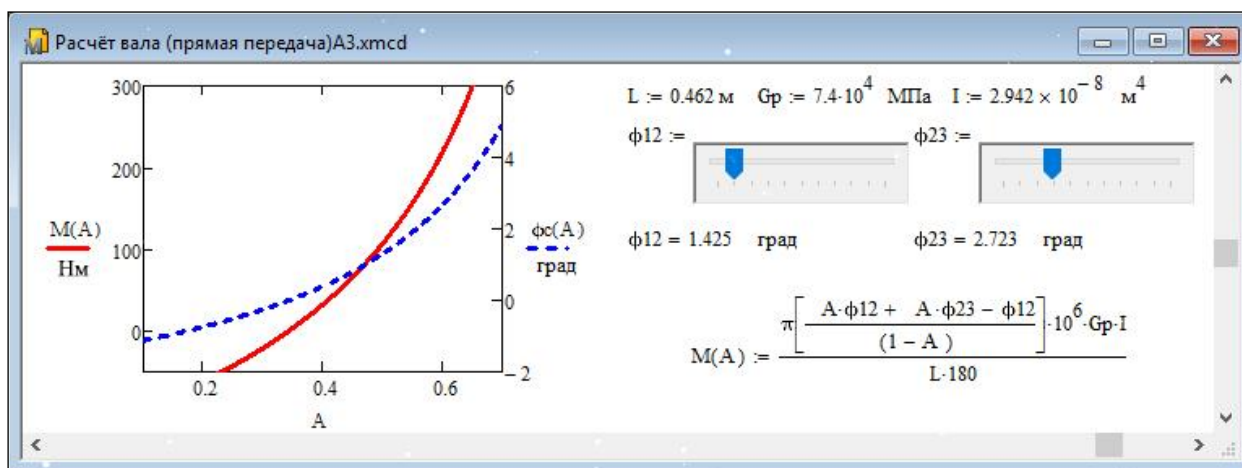


Рис. 3 Фрагмент листинга программы для подбора конструктивных параметров прибора (система компьютерной алгебры Mathcad)

На левом изображении рис. 4 показан динамометр, расположенный в трансмиссии модернизированного обкаточно-тормозного стенда КИ-5543 ГОСНИТИ [9] при испытаниях двигателя УМЗ-4216 автомобиля «ГАЗель Бизнес». На правом верхнем изображении рис. 4 приведены передний сборочный узел динамометра с торсионным валом, установленные на испытуемом ДВС. Фрагмент заднего сборочного узла с расположенными около измерительного диска датчиками №2 и №3 приведен на правом нижнем рисунке.

*Электроника.* Первичной задачей электронного измерительного комплекса прибора является регистрация двух периодов времени: между спадами напряжений датчиков №1 и №2 ( $t_{12}$ ), а также между спадами напряжений датчиков №1 и №3 ( $t_{13}$ ). На рис. 5 показана схема подключения датчиков динамометра к автоматизированной системе сбора данных (АССД) модели Е-14-140-М фирмы L-Card (поз. 5, б) через монтажный блок (поз. а).

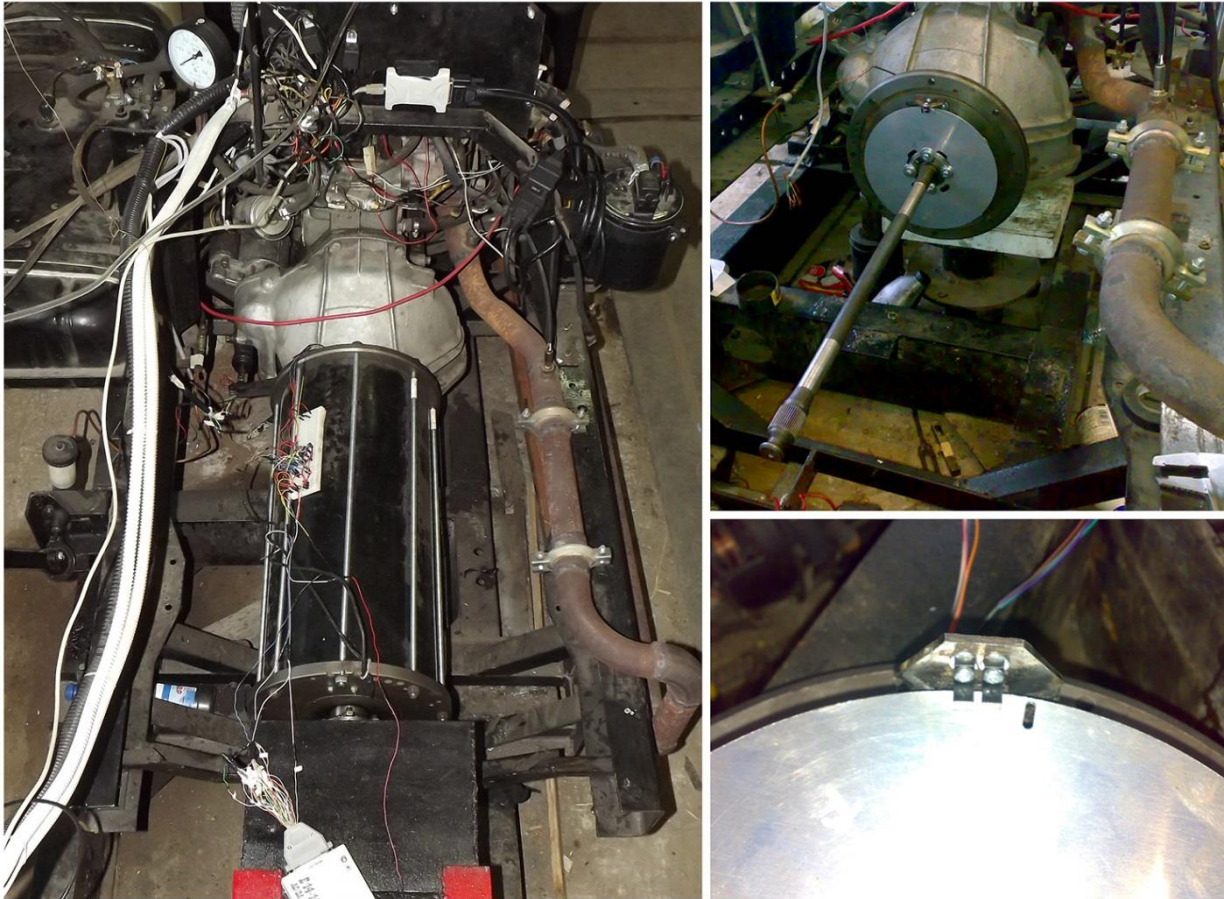


Рис. 4. Лабораторный образец динамометра и его применение при испытаниях УМЗ-4216

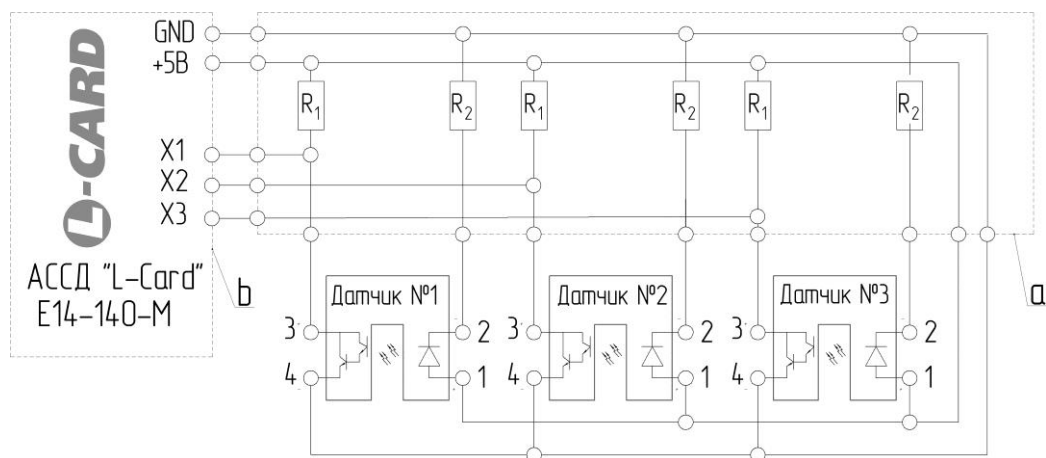


Рис. 5. Электрическая принципиальная схема подключения датчиков:  
а – монтажный блок; б – автоматизированная система сбора данных

Частотно-широотно-модулированный сигнал, формируемый на клеммах 3 и 4 оптической пары, поступает на соответствующий аналоговый вход АССД (от X1 до X3), в которой осу-



ществляется аналого-цифровое преобразование. АССД имеет подключение к персональному компьютеру через USB-интерфейс и активный усилитель. Сопротивления резисторов монтажного блока: 1 кОм для группы  $R_1$  и 0,56 кОм для группы  $R_2$ . Неиспользуемые аналоговые входы АССД, а также «цифровая земля» соединены с цепью GND.

*Программное обеспечение.* Расчет параметра  $A$  и соответствующей ему величины  $M$  на основе функции (3) выполнен компьютерной программой, созданной на языке «G» в среде LabVIEW National Instruments. На рис. 6 приведено изображение лицевого окна программы и участка расчета параметров потока передаваемой динамометром механической мощности.

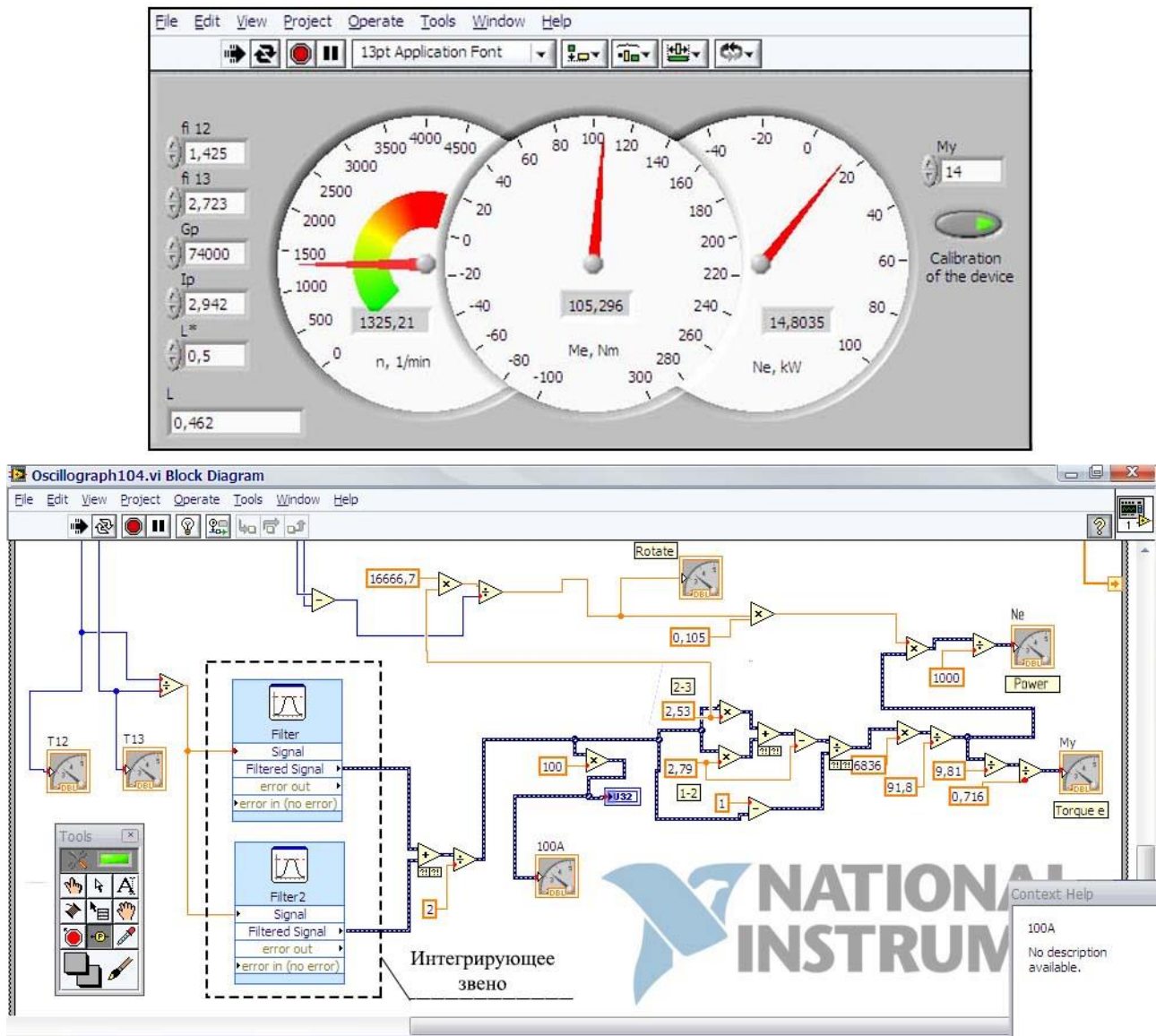


Рис. 6. Виртуальные приборы динамометра и фрагмент алгоритма расчета частоты вращения, крутящего момента и мощности (среда LabVIEW National Instruments)

Применение интегрирующего звена в процессе расчета  $A$  является вынужденной мерой с увеличением коэффициентов неравномерности частоты вращения и крутящего момента ДВС, а также с уменьшением частоты дискретизации  $\nu$ . Примененная в настоящем исследовании АССД имеет частоту дискретизации 200 кГц. Соответственно для сигнального канала каждого датчика  $\nu = 200/3 = 66,7$  кГц. Так как частота  $\nu$  значительно превышает частоту вращения ротора, то имеет место взаимное скольжение этих частот и, как следствие, значения  $t_{12}$  и  $t_{13}$  постоянно колеблются в пределах величины  $1/\nu$ . Следовательно, применение интегрирующего звена позволяет уменьшить погрешность дискретизации прибора  $\delta_d$  (8). Экс-

периментально установлено, что при испытании четырехцилиндрового четырехтактного ДВС и имеющемся значении  $\nu$  приемлемые значения  $\delta_d$  и инерционности прибора обеспечивает кратность фильтра интегрирующего звена  $m_\phi$ , равная 2,5. В этом случае параметр  $A$  определяет зависимость

$$A = \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{2} \int_{i-1}^i A_i di + \frac{1}{3} \int_{i-2}^i A_i di \right], \quad (10)$$

где  $A_i$  – калибровочный параметр для  $i$ -й точки потока данных определяется формулой (3).

Дальнейшее увеличение  $m_\phi$  ведет к ухудшению динамических характеристик прибора. Это отрицательно сказывается при измерении  $M$  на неустановившихся режимах работы ДВС. При  $m_\phi=2,5$  дискретность измерения величины  $M$  входит в рекомендованный диапазон (не менее  $4 \text{ с}^{-1}$ ) [1]. Также установлено, что угловое ускорение ротора  $\varepsilon$  существенно не влияет на относительную погрешность прибора. Качество работы устройства определяется его чувствительностью  $S_{\text{град}}$  и составляющими относительной погрешности  $\delta_d$  и  $\delta_{mM}$  (5).

В табл. 1 приведены рекомендации для выбора величины  $m_\phi$  при измерении среднего интегрального значения крутящего момента различных типов двигателей колесных машин – указанные значения обусловлены коэффициентом внешней динамической нагрузки [10].

Таблица 1

**Рекомендации по выбору кратности программного фильтра интегрирующего звена торсионного крутильного динамометра в зависимости от типа двигателя колесной машины**

Тип двигателя	Электродвигатель	Гидравлический двигатель	Многоцилиндровый ДВС	Одноцилиндровый ДВС
Кратность фильтра, $m_\phi$	1	1,5...2	2,5	3

### Выводы

В статье выполнен теоретический анализ и приведены результаты практического применения бесконтактного опто-электрического крутильного динамометра, предназначенного для измерения крутящего момента автомобильного поршневого двигателя внутреннего сгорания при его работе на неустановившемся режиме в условиях стендовых или дорожных испытаний. Данная задача актуальна в связи с приоритетностью экспериментального изучения и последующего моделирования характеристик эффективных показателей автомобильных силовых установок с учетом динамики современных режимов движения автотранспортных средств.

Рассмотрены вопросы градуировки, относительной погрешности измерений и чувствительности прибора. Также в работе даны рекомендации по рациональному выбору конструкционных и программных параметров динамометра, а именно: рабочий диапазон скручивания торсионного вала  $3^\circ$ ; углы  $\varphi_{12}$  и  $\varphi_{23}$  равны соответственно  $1,425^\circ$  и  $2,723^\circ$ ; при испытаниях четырехцилиндровых четырехтактных ДВС предпочтительно выбирать кратность программного фильтра интегрирующего звена, равную 2,5. Динамическая погрешность измерений прибора предлагаемой конструкции, согласно формул (5)–(8), в рабочем диапазоне режимных параметров составляет  $0,02...0,04$ . Точность можно улучшить за счет применения АССД с большей рабочей частотой либо с возможностью выполнения синхронного сбора данных с цифровых входов, а также большим количеством прорезей на измерительных дисках.

### Библиографический список

1. Работа автомобильного двигателя на неустановившемся режиме / Е.М. Акатов [и др.]. – М-Л.: Машгиз, 1960. – 282 с.
2. Савенков, Н.В. Метод выбора передаточных чисел силовой установки автомобиля категории

- $N_1$  на основе ездового цикла: дис. ... канд. тех. наук: 05.05.03: защищена 06.06.17 / Н.В. Савенков. – М.: МАДИ 2017. – 206 с.
3. **Фролов, Л.Б.** Измерение крутящего момента / Л.Б. Фролов. – М.: Энергия, 1967. – 176 с.
  4. ГОСТ 14846-81. Двигатели автомобильные. Методы стендовых испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 2003. – 42 с.
  5. **Krimmel, W.** Evolution and future of torque measurement technology // Sensors & Transducers Magazine. – 2006. – № 65(3). – P. 500–508.
  6. **Гуринов, А.С.** Измерение крутящего момента на вращающихся валах / А.С. Гуринов[и др.] // Инженерный вестник Дона, СКНЦ ВШ ЮФУ. – 2012. – №2. – С. 9–14.
  7. **Пат. №72893** Україна, МПК G 01 L 3/10. Пристрій для виміру крутного моменту на обертовому валу з мінливою частотою / заявники та патентовласники: Горожанкін С.А., Криволап В.В., Савенков М.В., Валевач А.С. (Україна); заявл. 03.04.12; опубл. 27.08.12, Бюл. № 4. – 4 с.
  8. **Ховах, М.С.** Автомобильные двигатели: учебник / М.С. Ховах, Г.С. Маслов. – М.: Машиностроение, 1971. – 456 с.
  9. **Горожанкин, С.А.** Установка для стендовых испытаний автомобильных ДВС на неустановившихся режимах работы / С.А. Горожанкин, Н.В. Савенков, Т.И. Степаненко // Вестник СевНТУ: сб. научн. работ. Вып. 152/2014. Сер.: Машиностроение и транспорт. – Севастополь, 2014. – С. 119–122.
  10. **Курмаз, Л.В.** Детали машин. Проектирование: справочное учебно-метод. пособие / Л.В. Курмаз, А.Т. Скобейда. – М.: Высш. шк., 2007. – 456 с.

*Дата поступления  
в редакцию 08.02.2018*

**S.A. Gorozhankin, A.Ya. Babanin, N.V. Savenkov, V.V. Ponyakin**

## **MEASUREMENT THE TORQUE OF PISTON ENGINE OF THE WHEEL VEHICLE AT OPERATION ON THE TRANSIENT MODE BY USING THE TORSION TWISTING DYNAMOMETER**

Donbass national academy of civil engineering and architecture, Makeevka

**Purpose:** The specific challenges the theoretical and practical foundations of the operation of torsion twisting dynamometers for testing internal combustion engine at operation on the transient mode.

**Design/methodology/approach:** A theoretical based for choosing the rational parameters of the dynamometer and the corresponding engineering solution are proposed. The relative error, sensitivity and inertia of the instrument were evaluated.

**Findings:** It is possible, for example, to apply the recommended design of a torsion twisting dynamometer instead of a torsion tensometric dynamometer.

**Research limitations/implications:** The present study provides a starting-point for further research in the improvement of the design and working process of the dynamometer in accordance with operating modes in the modern conditions of the state transport network

**Originality/value:** Moreover, a theoretical basis for the creation and introduction of torsion twisting dynamometers in the process of testing ICE and power plants of modern wheeled vehicles have been developed in the research process.

*Key words:* torque, internal combustion engine, torsion twisting dynamometer, transient mode, calibration parameter, relative error, optical sensor, data acquisition system.

## УДК 629.3.018.7

А. С. Дьяков, Е. Е. Клубничкин, В. Е. Клубничкин, А. Ю. Захаров, А. Б. Карташов

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ И УПРАВЛЯЕМОСТИ СНЕГОХОДОВ ОТЕЧЕСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Проведение экспериментальной оценки устойчивости и управляемости снегоходной мототехники позволяет оценить ее технический уровень и эксплуатационные свойства.

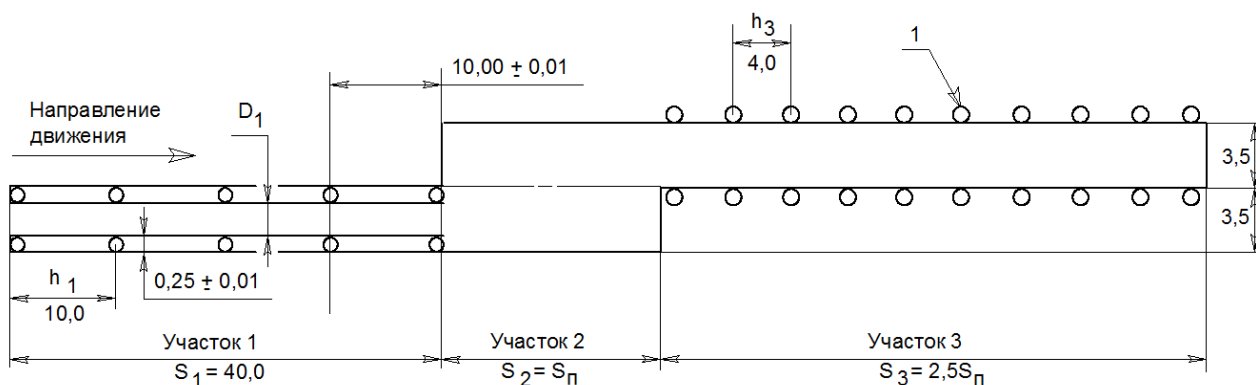
В данной работе представлены результаты экспериментальной оценки устойчивости и управляемости снегоходов отечественного производства моделей «Буран Лидер», «Тайга Варяг 550» и «Тайга Патруль 800 SWT» производства АО «Русская механика».

*Ключевые слова:* снегоход, устойчивость, управляемость, испытания, поворот, переставка.

Испытания снегоходной мототехники проводились для определения показателей, характеризующих управляемость и устойчивость снегоходов в критических режимах движения [1]. Испытания «Поворот с заданным радиусом  $Rn = 25$  м» предназначены для определения максимальной скорости маневра при входе в поворот. Испытания «Переставка  $Sn = 16$  м» предназначены для определения максимальной скорости выполнения маневра при смене траектории движения на ограниченном участке пути.

Максимальная скорость снегоходов при выполнении маневра определялась как среднее арифметическое значение скоростей трех заездов с наибольшей скоростью, при которой не было выхода за пределы разметки [2].

Разметка участков для испытаний «Поворот с заданным радиусом  $Rn = 25$  м» и «Переставка  $Sn = 16$  м» осуществлялась в соответствии со схемами, приведенными на рис. 1 и рис. 2 [3].



**Рис. 1. Разметка участка испытаний «Переставка  $Sn = 16$  м»:**

$l$  - вертикальные ограничители разметки коридоров движения;

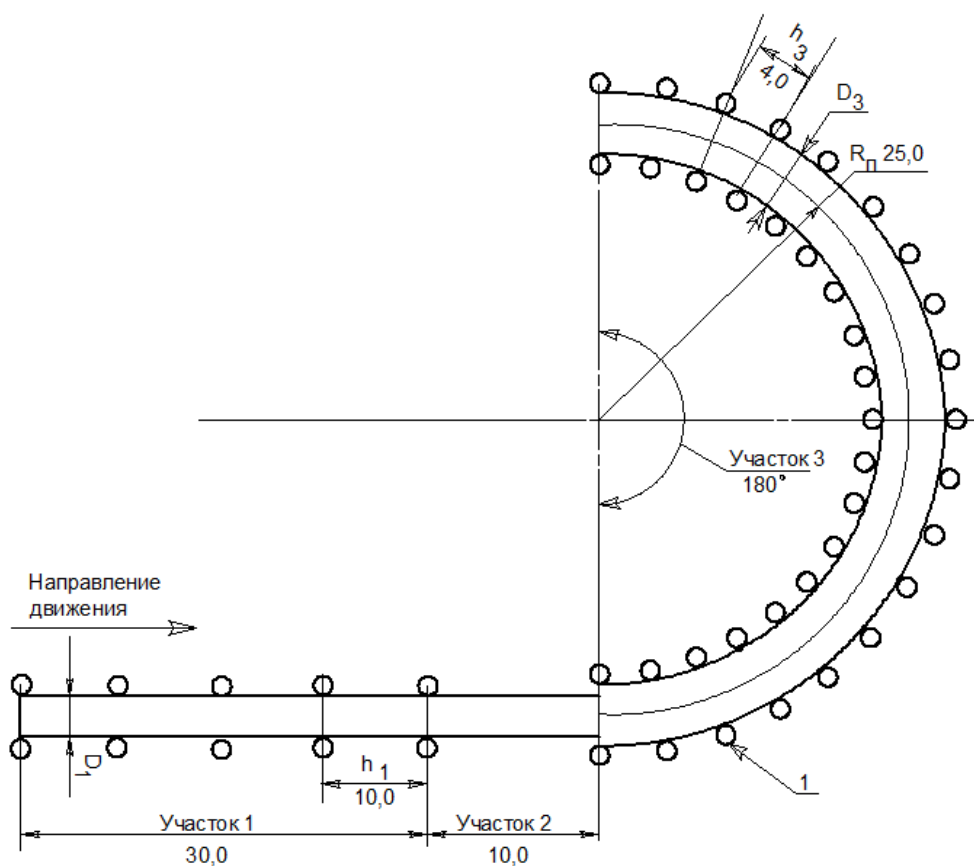
$h_1$  - шаг установки вертикальных ограничителей на участке 1 ( $h_1 = 10$  м);

$h_3$  - шаг установки вертикальных ограничителей на участке 3 ( $h_3 = 4$  м);

$D_1$  - ширина коридора на участке 1 ( $D_1 = 3$  м)

Снегоходы для испытаний прошли подготовку к нормальной эксплуатации, проведены проверки уровня топлива и других технических жидкостей. Масса водителя испытателя 80 кг и масса измерительного оборудования 3 кг.

Объектом для испытаний были определены снегоходы отечественного производства моделей «Буран Лидер», «Тайга Варяг 550» и «Тайга Патруль 800 SWT» производства АО «Русская механика», основные технические характеристики которых представлены в табл. 1.



**Рис. 2. Разметка участка испытаний «Поворот с заданным радиусом  $R_p = 25$  м»:**

- 1 - вертикальные ограничители разметки коридоров движения;
- $h_1$  - шаг установки вертикальных ограничителей на участке 1 ( $h_1 = 10$  м);
- $h_2$  - шаг установки вертикальных ограничителей на участке ( $h_2 = 4$  м);
- $D_1$  - ширина коридора на участке 1 ( $D_1 = 1,7$  м);
- $D_3$  - ширина коридора на участке 3 ( $D_3 = 3,9$  м)

**Таблица 1**

**Основные технические характеристики снегоходов**

	<b>Тайга Патруль 800 SWT</b>	<b>Буран Лидер</b>	<b>Тайга Варяг 550</b>
1	2	3	4
<b>ДВИГАТЕЛЬ</b>			
Модель	ODES V800	PM3-640	PM3-550
Объем, см <sup>3</sup> / Цилиндры	800 / 2	635 / 2	553 / 2
Мощность, л.с.	60	34	55
<b>ШАССИ</b>			
Трансмиссия	Вариатор, пониженная, повышенная, реверс, нейтраль	Вариатор, передача вперед, реверс, нейтраль	Вариатор, пониженная, повышенная, реверс, нейтраль
Тормозной механизм	Гидравлический, дисковый	Механический, дисковый	Гидравлический (либо механический по требованию Заказчика), дисковый
<b>ПОДВЕСКА</b>			
Тип передней подвески	телескопическая	эллиптическая рессора	телескопическая

Окончание табл. 1

1	2	3	4
Ход передней подвески, мм	150	50	150
Амортизатор передней подвески	Гидропневматический однотрубный	–	Гидропневматический однотрубный
Передний амортизатор движителя	–	–	Гидропневматический двухтрубный
Тип задней подвески	склизовая	независ., пруж.-балансир.	склизовая
Ход задней подвески, мм	190	50	385
Задний амортизатор движителя	Гидропневматический однотрубный	–	Гидропневматический однотрубный
Колея лыж (между центрами), мм	960	–	960
Гусеница, Д×Ш×В, мм	3968х600х30	2х (2878х380х17.5) // 2х (3685х380х17.5)	3968х508х35
<b>ГАБАРИТЫ</b>			
Габариты снегохода, Д×Ш×В, мм	2990±30х1130±30х1400±30	2700±30х910±30х133 5±30 // 3100±30х910±30х133 5±30	2990±30х1050±30х1380±30
Сухая* масса, кг	350	285 // 310	280/285

Экспериментальная оценка устойчивости и управляемости снегоходов проводилась в г. Рыбинск, Ярославской области на горизонтальных участках местности с уклоном не более 1% в сухую безветренную погоду при температуре окружающего воздуха минус 6°С, атмосферном давлении 748 мм рт. ст. и относительной влажности воздуха 86 %. Покрытие мерного участка – рыхлый снег глубиной 10–13 см, снег однородный по всей глубине, с температурой минус 6 °С [4–7].

При проведении экспериментальной оценки снегоходов отечественного производства на определение устойчивости и управляемости использовался измерительный комплекс *Racelogic*, поставляющийся с программным обеспечением *VBOXTools* [8, 9]. Этот комплекс с программным обеспечением позволяет собирать и хранить полученные данные о скоростях, ускорениях, пройденном пути, траектории движения снегохода и т.д. Программное обеспечение *VBOXTools* базируется на ядре обработки данных «Report Generator» со ссылками на инструменты графического отображения, картографические инструменты и инструменты настройки *VBOX*.

Измерительный комплекс *Racelogic* устанавливался на снегоходы отечественного производства «Буря Лидер», «Тайга Варяг 550» и «Тайга Патруль 800 SWT» и включал в себя датчики *GPS*, торможения и сам блок обработки сигналов *Racelogic*.

При выполнении маневра «Поворот с заданным радиусом  $R_n = 25$  м» замерялась максимальная скорость снегоходов на входе, выходе и во время выполнения маневра. На рис. 3 – рис. 5 представлены результаты характеристик максимальной скорости снегоходов «Буря Лидер», «Тайга Варяг 550» и «Тайга Патруль 800 SWT», где на входе маневра - штриховая линия, на выходе из маневра - сплошная линия, середина участка маневра - штрихпунктирная линия. В окне «Map» показана траектория движения снегохода во время выполнения маневра «Поворот с заданным радиусом  $R_n = 25$  м», где вход перед маневром отмечен - х, выход из маневра отмечен - о, середина участка маневра отмечена - ■.

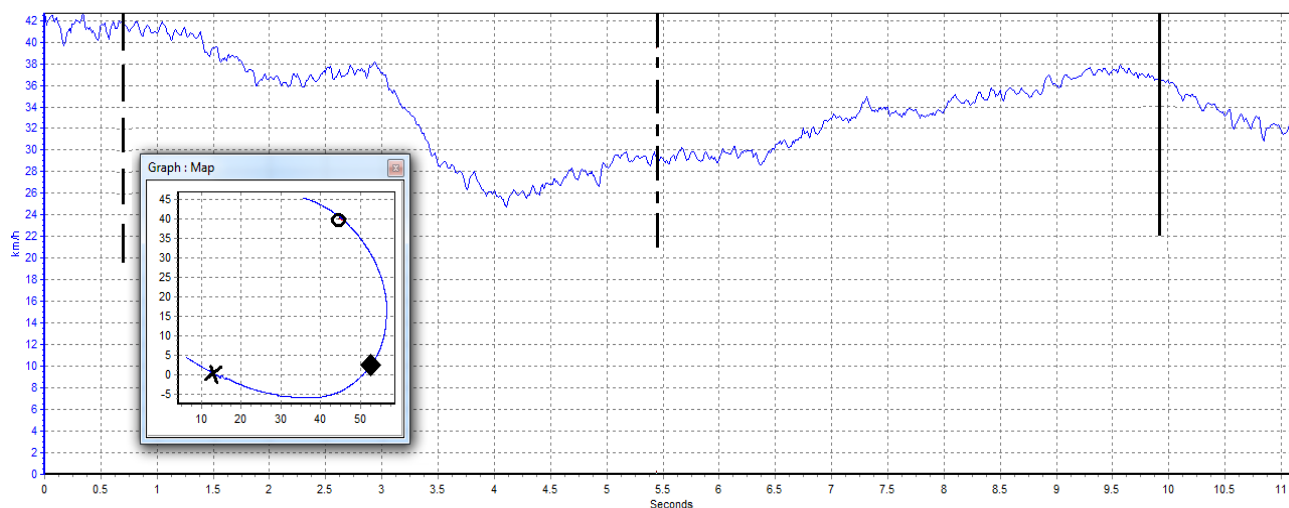


Рис. 3. Характеристика максимальной скорости снегохода «Буря Лидер» при выполнении маневра «Поворот с заданным радиусом  $R = 25$  м»

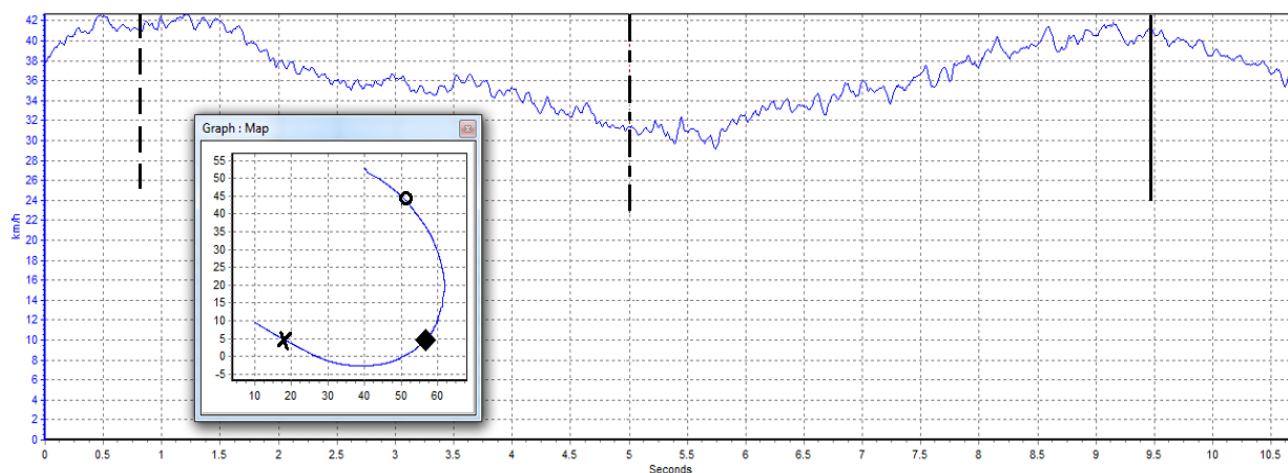


Рис. 4. Характеристика максимальной скорости снегохода «Тайга Варяг 550» при выполнении маневра «Поворот с заданным радиусом  $R = 25$  м»

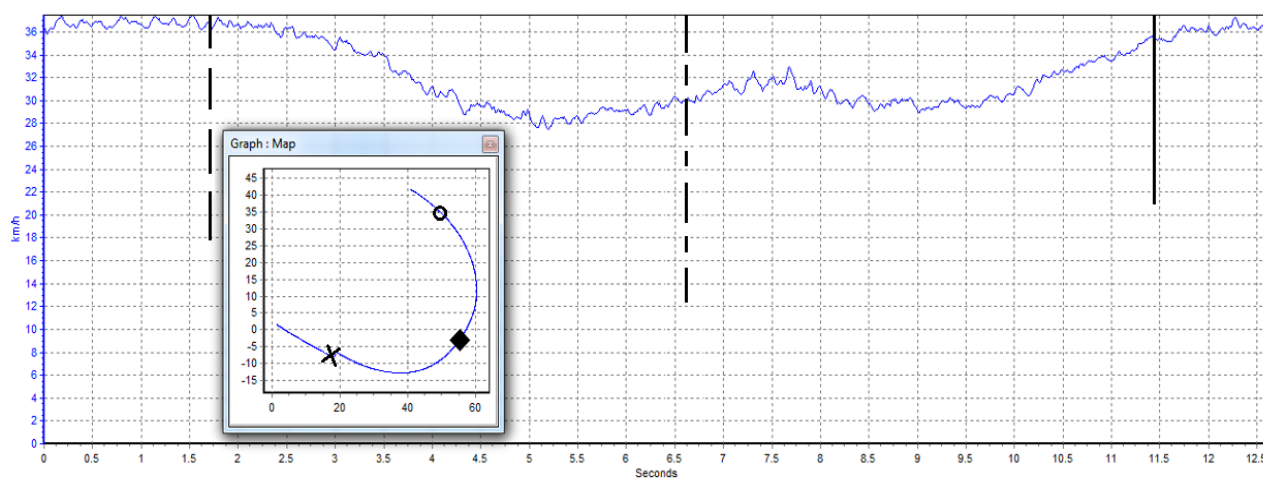


Рис. 5. Характеристика максимальной скорости снегохода «Тайга Патруль 800 SWT» при выполнении маневра «Поворот с заданным радиусом  $R = 25$  м»

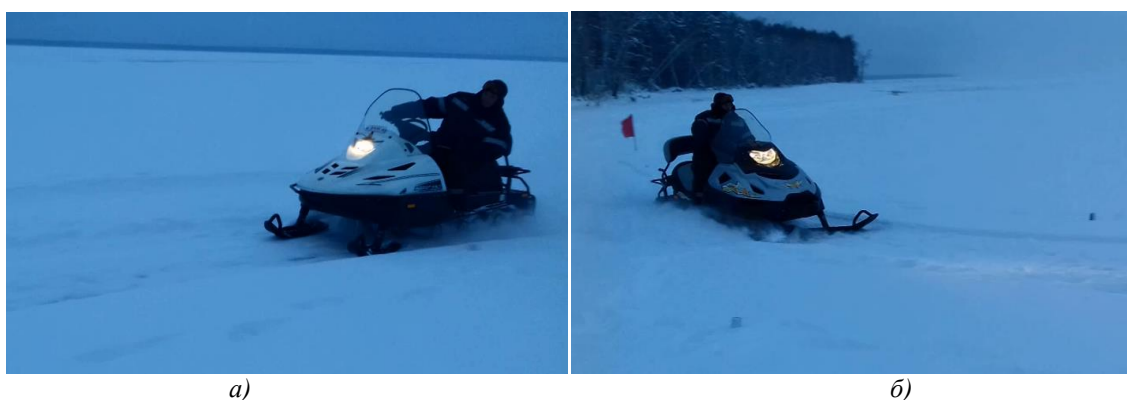
Результаты измерений скорости снегоходов при выполнении маневра «Поворот с заданным радиусом» представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Результаты измерений скорости снегоходов при выполнении маневра «Поворот с заданным радиусом  $R = 25$  м»**

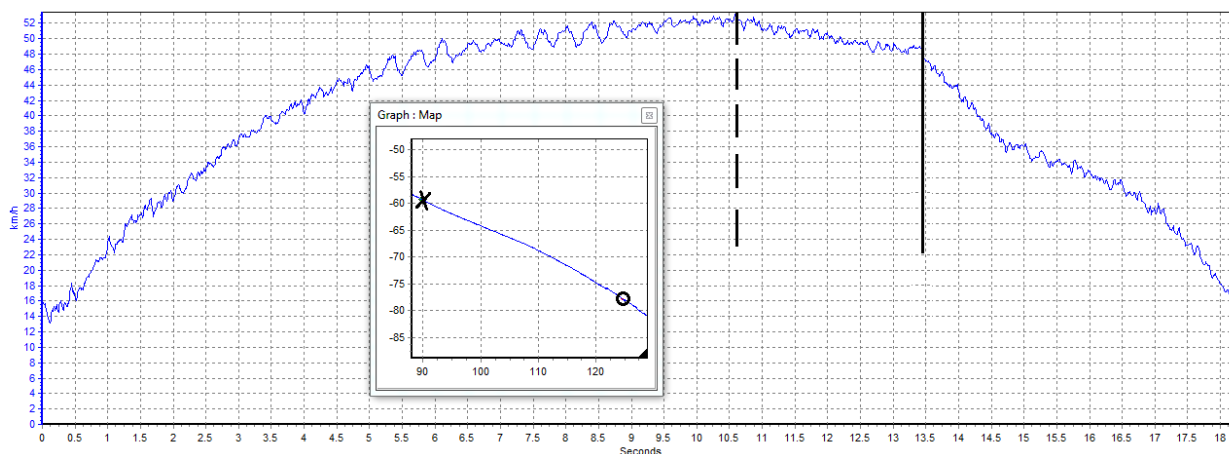
Модель снегохода	Максимальная скорость на участках маневра «Поворот», км/ч		
	На входе	Середина маневра	На выходе
Буран Лидер	41,76	29,52	36,53
Тайга Варяг 550	41	31,4	41,17
Тайга Патруль 800 SWT	36,7	35,4	30,14

Фрагменты проведения сравнительных испытаний снегоходов при выполнении маневра «Поворот с заданным радиусом  $R_n = 25$  м» представлены на рис. 6.



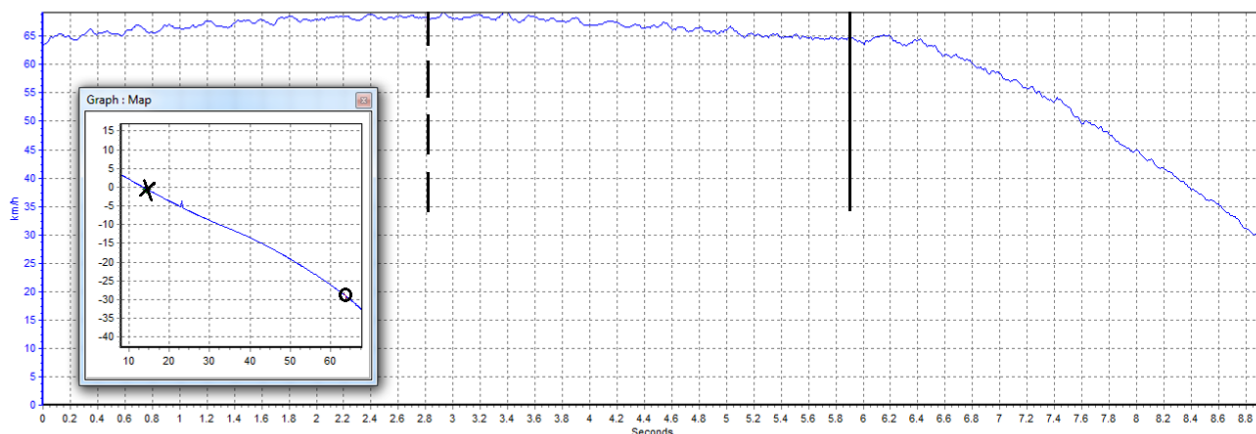
**Рис. 6. Фрагмент проведения испытаний снегоходов при выполнении маневра «Поворот с заданным радиусом  $R_n = 25$  м»:**  
 а - снегоход «Тайга Варяг 550»; б - снегоход «Тайга Патруль 800 SWT»

При выполнении маневра «Переставка» замерялась максимальная скорость снегоходов на входе и выходе из маневра. На рис. 7 – рис. 9 представлены результаты характеристик максимальной скорости снегоходов «Буран Лидер», «Тайга Варяг 550» и «Тайга Патруль 800 SWT» во время выполнения маневра «Переставка», где на графике штриховой линией отмечен вход перед маневром, сплошной линией отмечен выход из маневра. В окне «Map» показана траектория движения снегохода во время выполнения маневра «Переставка», где вход перед маневром отмечен - **x**, выход из маневра отмечен - **o**.

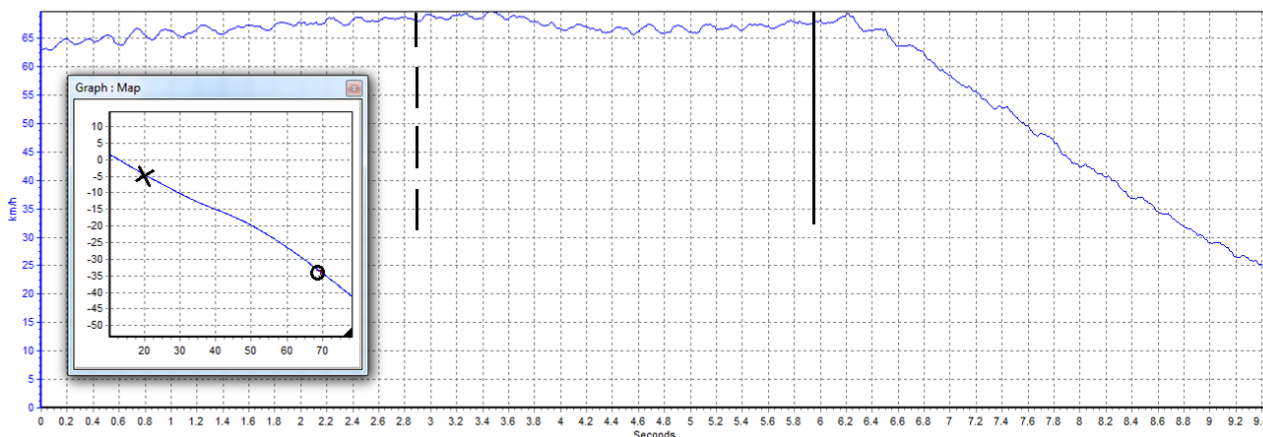


**Рис. 7. Характеристика максимальной скорости снегохода «Буран Лидер» при выполнении маневра «Переставка»**





**Рис. 8. Характеристика максимальной скорости снегохода «Тайга Варяг 550» при выполнении маневра «Переставка»**



**Рис. 9. Характеристика максимальной скорости снегохода «Тайга Патруль 800 SWT» при выполнении маневра «Переставка»**

Результаты измерений скорости снегоходов при выполнении маневра «Переставка» представлены в табл. 3

*Таблица 3*

**Результаты измерений скорости при выполнении маневра «Переставка»**

Модель снегохода	Максимальная скорость на участках маневра «Переставка», км/ч	
	На входе	На выходе
Буран Лидер	53,4	48,7
Тайга Варяг 550	68,1	64,65
Тайга Патруль 800 SWT	68,16	68,03

Фрагменты проведения сравнительных испытаний снегоходов при выполнении маневра «Переставка» представлены на рис. 10.



**Рис. 10. Фрагмент проведения испытаний снегоходов при выполнении маневра «Переставка»:**

*a* - снегоход «Тайга Варяг 550»;  
*б* - снегоход «Тайга Патруль 800 SWT»

### Выводы

Максимальная скорость снегохода «Буран Лидер» при выполнении маневра «Поворот с заданным радиусом» ( $Rn = 25$  м) составила на входе 41,76 км/ч (штриховая линия), на выходе 36,53 км/ч (сплошная линия), середина участка маневра 29,52 км/ч (штрихпунктирная линия).

Максимальная скорость снегохода «Тайга Варяг 550» при выполнении маневра «Поворот с заданным радиусом» ( $Rn = 25$  м) составила на входе 41 км/ч (штриховая линия), на выходе 41,17 км/ч (сплошная линия), середина участка маневра 31,4 км/ч (штрихпунктирная линия).

Максимальная скорость снегохода «Тайга Патруль 800 SWT» при выполнении маневра «Поворот с заданным радиусом» ( $Rn = 25$  м) составила на входе 36,7 км/ч (штриховая линия), на выходе 35,4 км/ч (сплошная линия), середина участка маневра 30,14 км/ч (штрихпунктирная линия).

Максимальная скорость снегохода «Буран Лидер» при выполнении маневра «Переставка» на входе перед маневром 53,4 км/ч (штриховая линия), на выходе из маневра 48,7 км/ч (сплошная линия).

Максимальная скорость снегохода «Тайга Варяг 550» при выполнении маневра «Переставка» на входе перед маневром 68,1 км/ч (штриховая линия), на выходе из маневра 64,65 км/ч (сплошная линия).

Максимальная скорость снегохода «Тайга Патруль 800 SWT» при выполнении маневра «Переставка» на входе перед маневром 68,16 км/ч (штриховая линия), на выходе из маневра 68,03 км/ч (сплошная линия).

*Работа выполнена в МГТУ им. Н.Э. Баумана при финансовой поддержке Минобрнауки России по Соглашению №14.577.21.0272 (Уникальный идентификатор работ: RFMEFI57717X0272).*

### Библиографический список

1. Мухамадьяров, Ф.Ф. Конструкция снегоходов: учеб. пособие / Ф.Ф. Мухамадьяров, А.И. Чупраков, С.А. Романов. – Киров, 2016.
2. ГОСТ Р 50944-2011 Снегоходы. Технические требования и методы испытаний. – М., 2011.
3. ГОСТ Р 52302-2004 Автотранспортные средства. Управляемость и устойчивость. Технические требования. Методы испытаний. – М., 2004.

4. **Макаров, В.С.** Снег как полотно пути для транспортных средств / В.С. Макаров, Д.В. Зезюлин, В.В. Беляков // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 4. – С. 21–24.
5. **Беляков, В.В.** Полотно пути транспортно-технологических машин (справочные материалы к теории «машина-местность»): учебник / В.В. Беляков, А.А. Куркин; Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2014. – 447 с.
6. **Беляков, В.В.** Подвижность наземных транспортно-технологических машин / В.В. Беляков [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2013. – № 4. – С. 72–77.
7. **Береснев, П.О.** Обеспечение экологической безопасности движения вездеходных машин на местности / П.О. Береснев [и др.] // Экологические системы и приборы. – 2016. – №12. – С. 24–35.
8. **Obertov, D.** Vehicle speed estimation using roadside sensors / D. Obertov, V. Bardov, B. Andrievsky // В сборнике: International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops 6. Сеп. "2014 6th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops, ICUMT 2014." 2015. – С. 111–117.
9. **Plueddeman, C.** Snowmobiles winter warriors chill out // Popular Mechanics. – 1991. – Т. 168. – №3. – С. 86–87.

*Дата поступления  
в редакцию 14.02.2018*

**A.S. Dyakov, E.E. Klubnichkin, V.E. Kubnichkin, A.Yu. Zakharov, A.B. Kartashov**

## **EXPERIMENTAL ESTIMATION OF STABILITY AND CONTROL OF SNOWMOBILES OF DOMESTIC PRODUCTION**

Bauman Moscow state technical university

**Purpose:** To assess experimentally the stability and controllability of domestic production of snowmobiles.

**Objectives:** Conducting a test to determine the stability and controllability of snowmobile motor vehicles of domestic production.

**Conclusions:** The results of the assessment of the stability and controllability of snowmobile motor vehicles of the domestic manufacturer JSC "Russian mechanics" models: "Buran Leader", "Taiga Varyag 550" and "Taiga Patrol 800 SWT" allowing to assess its technical level and operational properties.

**Research limitations/implications:** This study is the starting point for continuing experimental studies of snowmobile motor vehicles.

*Key words:* snowmobile, stability, controllability, tests, rotation, rearrangement.

УДК 629.3.018.7

А. С. Дьяков, А. Ю. Захаров, В. Е. Клубничкин, Е. Е. Клубничкин, А. Б. Карташов

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА СКОРОСТНЫХ И ТОРМОЗНЫХ СВОЙСТВ СНЕГОХОДОВ ОТЕЧЕСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Проведение экспериментальной оценки скоростных и нагрузочных режимов, а также эксплуатационных свойств снегоходной мототехники, в ходе которой определяется большое количество параметров и показателей, позволяющих использовать их при проектировании снегоходов нового поколения.

В данной работе представлены результаты испытаний по определению скоростных и тормозных свойств снегоходов отечественного производителя АО «Русская механика»: «Буран Лидер», «Тайга Варяг 550» и «Тайга Патруль 800 SWT».

*Ключевые слова:* снегоход, тяговая динамика, тормозная динамика, испытания.

*Снегоход* – механическое транспортное средство, предназначенное для движения по снегу [4, 6]. Такие транспортные средства наиболее востребованы населением Арктических зон РФ. Лидером производства снегоходной мототехники в нашей стране является АО «Русская механика».

Методика проведения экспериментальных исследований объединяла два типа испытаний, по оценке скоростных и тормозных свойств.



**Рис. 1. Общий вид снегохода:**

*а* - Буран Лидер; *б* - Тайга Патруль 800 SWT; *в* - Тайга Варяг 550

Скоростные свойства включают в себя следующие показатели: максимальную скорость; интенсивность разгона до максимальной скорости, до скорости 60 км/ч и до скорости 30 км/ч. Заезд осуществлялся на ровном заснеженном основании, испытатель осуществлял разгон до максимальной скорости со 100%-ным использованием мощности. Испытания для каждого снегохода состояли из четырех заездов на одной и той же трассе с разным направлениями движения на парных заездах [2]. Максимальная скорость снегохода определялась как среднее арифметическое от проведенных измерений.

Тормозной путь снегоходов определялся по результатам четырех замеров (заездов), осуществляемых в двух взаимно противоположных направлениях.

Скорость движения в момент начала торможения устанавливалась по штатному спидометру. Дополнительный контроль результатов измерений в каждом заезде осуществлялся с помощью системы регистрации данных на основе GPS третьего поколения VBOX 3i [9,10].

Испытаниям по оценке скоростных и тормозных свойств подвергались образцы с массой, включающей массу образца, подготовленного к нормальной эксплуатации, заправленного топливом и другими техническими жидкостями, с инструментом, массу водителя испытателя 80 кг и массу измерительного оборудования.

Объектом для испытаний были выбраны снегоходы отечественного производства: «Буран Лидер», «Тайга Варяг 550» и «Тайга Патруль 800 SWT» (рис. 1, а, б, в).

*Цель испытаний:*

- экспериментально определить скоростные и тормозные свойства снегоходной мототехники отечественного производства;
- провести сравнительную оценку скоростных и тормозных свойств снегоходной мототехники отечественного производства.

Основные технические характеристики испытываемых отечественных снегоходов представлены в табл. 1.

*Таблица 1*

**Основные технические характеристики отечественных снегоходов**

	<b>Тайга Патруль 800 SWT</b>	<b>Буран Лидер</b>	<b>Тайга Варяг 550</b>
1	2	3	4
<b>ДВИГАТЕЛЬ</b>			
Модель	ODES V800	PM3-640	PM3-550
Объем, см <sup>3</sup> / Цилиндры	800 / 2	635 / 2	553 / 2
Мощность, л.с.	60	34	55
Тип	4-тактный	2-тактный	2-тактный
Диаметр цилиндра × ход поршня, мм	91x61,5	76x70	76x61
Топливная система	инжектор	карбюратор	2-карбюраторная
Карбюратор / тип	-	Mikuni / поплавковый	Mikuni / поплавковый
Охлаждение	жидкостное	воздушное	воздушное
<b>ШАССИ</b>			
Трансмиссия	Вариатор, пониженная, повышенная, реверс, нейтраль	Вариатор, передача вперед, реверс, нейтраль	Вариатор, пониженная, повышенная, реверс, нейтраль
Тормозной механизм	Гидравлический, дисковый	Механический, дисковый	Гидравлический (либо механический по требованию Заказчика), дисковый
<b>ПОДВЕСКА</b>			
Тип передней подвески	телескопическая	эллиптическая рессора	телескопическая

Окончание табл. 1

1	2	3	4
Ход передней подвески, мм	150	50	150
Амортизатор передней подвески	Гидропневматический однотрубный	–	Гидропневматический однотрубный
Передний амортизатор движителя	–	–	Гидропневматический двухтрубный
Тип задней подвески	склизовая	независ., пруж.-балансир.	склизовая
Ход задней подвески, мм	190	50	385
Задний амортизатор движителя	Гидропневматический однотрубный	–	Гидропневматический однотрубный
Колея лыж (между центрами), мм	960	–	960
Гусеница, Д×Ш×В, мм	3968х600х30	2х (2878х380х17.5) // 2х (3685х380х17.5)	3968х508х35
<b>ГАБАРИТЫ</b>			
Количество мест	2	2	2
Габариты снегохода, Д×Ш×В, мм	2990±30х1130±30х1400±30	2700±30х910±30х1335±30 // 3100±30х910±30х1335±30	2990±30х1050±30х1380±30
Сухая* масса, кг	350	285 // 310	280/285



а)



б)



в)



з)

**Рис. 2. Установка измерительного комплекса Racelogic на снегоход «Буран Лидер», «Тайга Варяг 550» и «Тайга Патруль 800 SWT»:**

а - установка измерительного комплекса *Racelogic* на снегоход под сиденьем водителя;  
 б - установка датчика торможения *Racelogic* на снегоход; в - установка *GPS* датчика *Racelogic* на снегоход; з - общий вид комплекса *Racelogic*, с подключенным электропитанием

Сравнительные испытания по определению тяговой и тормозной динамики отечественных снегоходов проводились в г. Рыбинск, Ярославской области на горизонтальных участках местности с уклоном не более 1%. Покрытие мерного участка – рыхлый снег глубиной 10-13 см, снег однородный по всей глубине, с температурой минус 6°C [1, 3, 5, 8].

Испытания проводились в сухую безветренную погоду при температуре окружающего воздуха минус 6 °С, атмосферном давлении 748 мм рт. ст. и относительной влажности воздуха 86 %.

При сравнительных испытаниях снегоходов отечественного производства по определению скоростных и тормозных свойств использовался измерительный комплекс *Racelogic*, с программным обеспечением *VBOXTools* [7, 11]. Данный комплекс с программным обеспечением позволяет фиксировать и хранить полученные данные о скоростях, ускорениях, пройденном пути, траектории движения снегохода и т.д. Программное обеспечение *VBOXTools* базируется на ядре обработки данных «ReportGenerator» со ссылками на инструменты графического отображения, картографические инструменты и инструменты настройки VBOX.

На рис. 2 показана установка измерительного комплекса *Racelogic* на снегоходы отечественного производства «Буран Лидер», «Тайга Варяг 550» и «Тайга Патруль 800 SWT».

Сравнительные испытания по определению скоростных свойств снегоходов отечественного производства проводились для следующих случаев:

- разгон с места до скорости 30 км/ч;
- разгон с места до скорости 60 км/ч;
- разгон с места до максимальной скорости (рис. 3 – рис. 5).

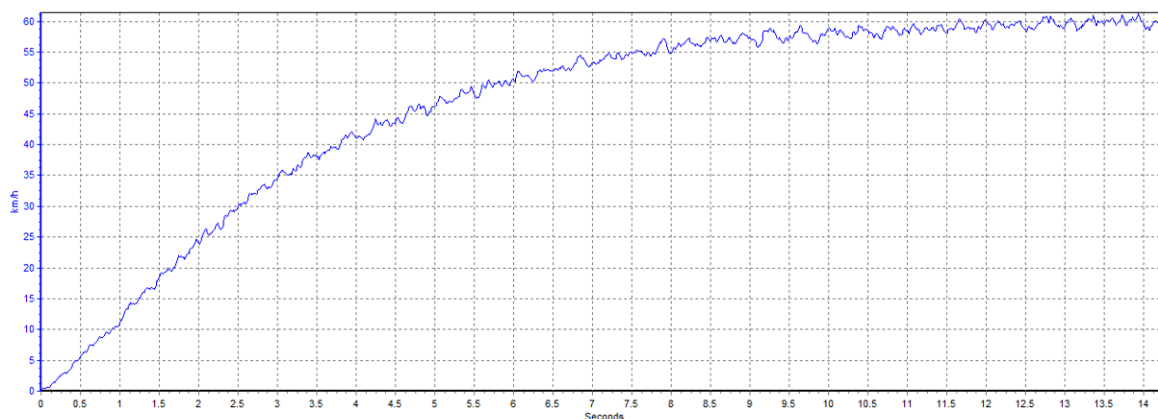


Рис. 3. Разгонная характеристика снегохода "Буран Лидер" до максимальной скорости

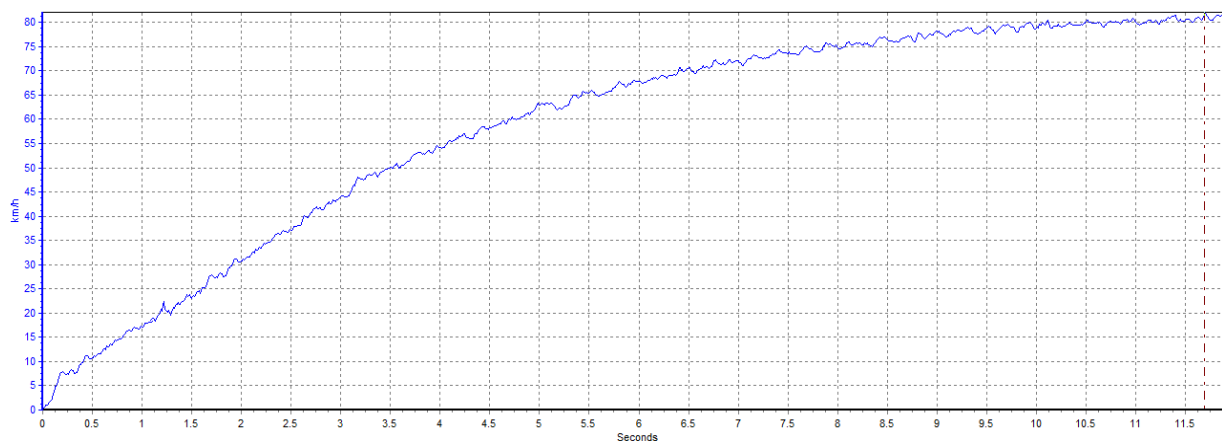
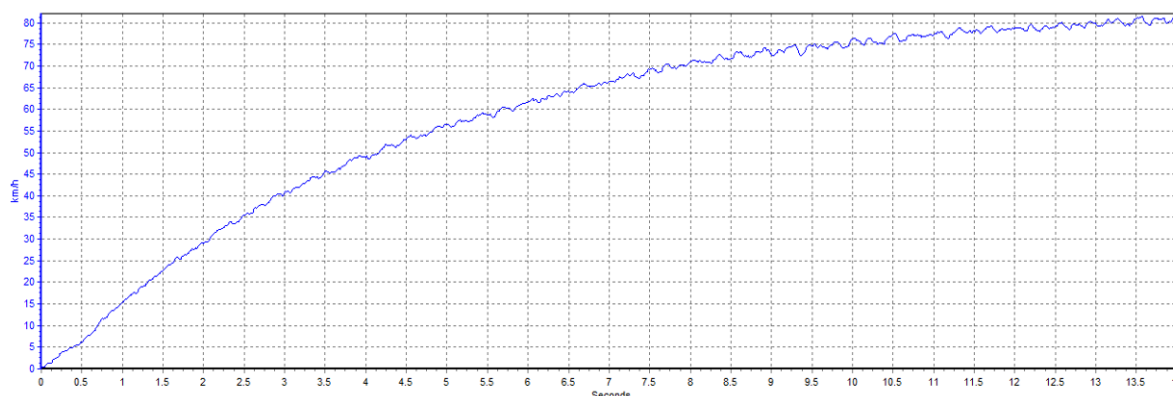


Рис. 4. Разгонная характеристика снегохода "Тайга Варяг 550" до максимальной скорости



**Рис. 5. Разгонная характеристика снегохода "Тайга Патруль 800 SWT" до максимальной скорости**

Результаты измерений тяговой динамики для снегоходов отечественного производства, моделей «Буран Лидер», «Тайга Варяг 550» и «Тайга Патруль 800 SWT» представлены в табл. 2.

**Таблица 2**

**Результаты измерений тяговой динамики снегоходов**

Модель снегохода	Параметры						
	Максимальная скорость, км/ч	Время разгона до, с			Путь разгона с места до набора скорости, м.		
		30 км/ч	60 км/ч	Максимальная скорость	30 км/ч	60 км/ч	Максимальная скорость
Буран Лидер	61,42	2,59	11,74	14,27	10,53	139,5	182,92
Тайга Варяг 550	81,45	1,95	4,86	12	8,66	53,7	206,5
Тайга Патруль 800 SWT	82,08	2,07	5,66	14,01	8,84	55,87	226,62

Фрагменты проведения сравнительных испытаний снегоходов на тяговую динамику представлены на рис. 6.

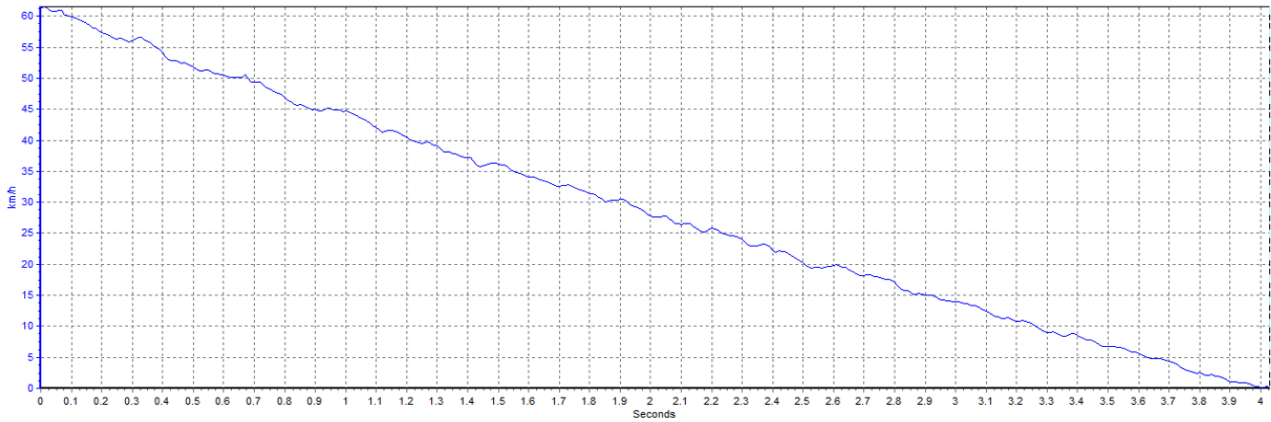


**Рис. 6. Фрагмент проведения испытаний тяговой динамики снегоходов:**  
*а* - снегоход «Тайга Варяг 550»;  
*б* - снегоход «Тайга Патруль 800 SWT»

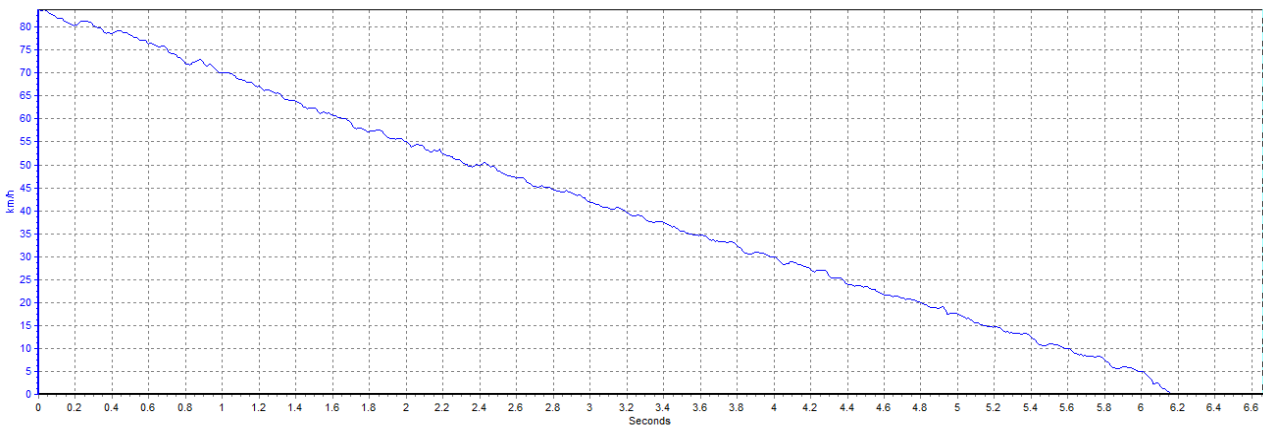
Сравнительные испытания по оценке тормозных свойств снегоходов отечественного производства проводились для следующих случаев:



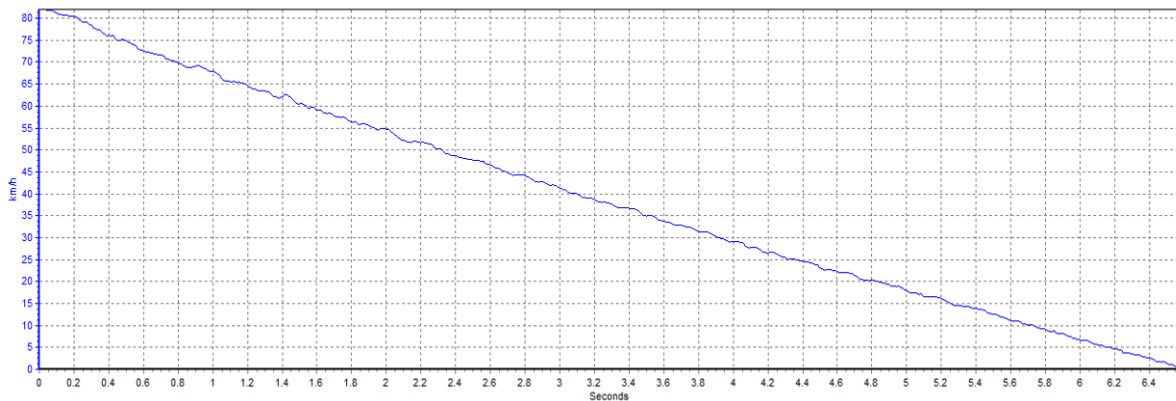
- торможение с начальной скорости 30 км/ч;
- торможение с начальной скорости 60 км/ч;
- торможение с максимальной начальной скорости (рис. 7 – рис. 9).



**Рис. 7. Характеристика торможения с максимальной начальной скорости 61,42 км/ч до полной остановки снегохода "Буран Лидер"**



**Рис. 8. Характеристика торможения с максимальной начальной скорости 81,45 км/ч до полной остановки снегохода "Тайга Варяг 550"**



**Рис. 9. Характеристика торможения с максимальной начальной скорости 82,08 км/ч до полной остановки снегохода "Тайга Патруль 800 SWT"**

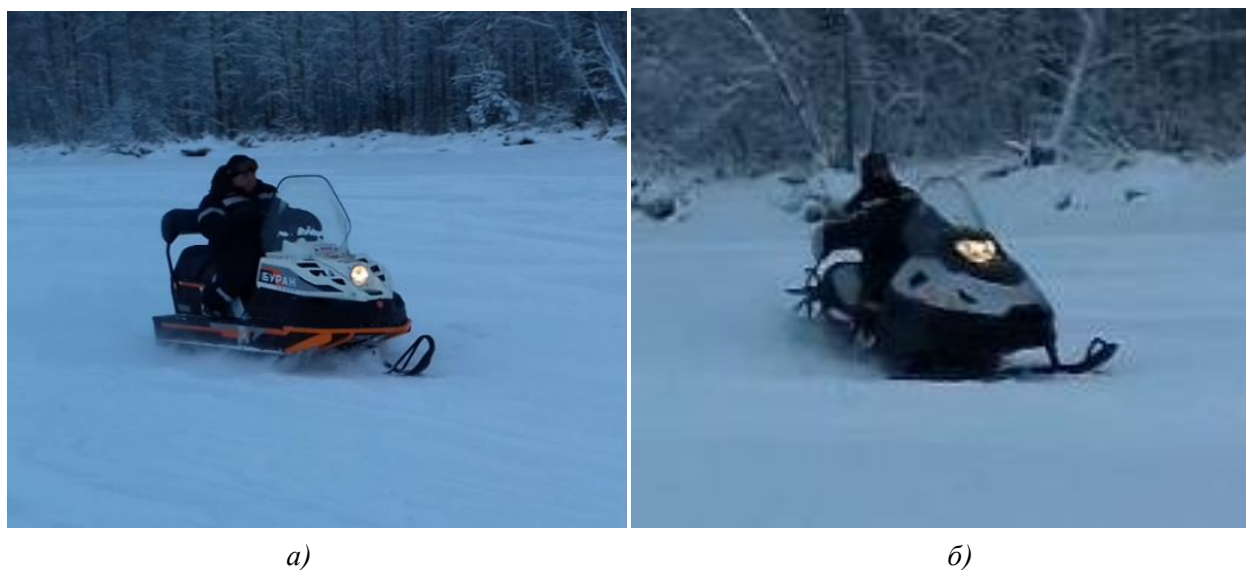
Результаты измерений тормозной динамики снегоходов отечественного производства, моделей «Буран Лидер», «Тайга Варяг 550» и «Тайга Патруль 800 SWT» представлены в табл. 3.

Таблица 3

## Результаты измерений тормозной динамики снегоходов

Модель снегохода	Параметры					
	Время торможения со скорости, с			Тормозной путь при торможении со скорости, м.		
	30 км/ч	60 км/ч	Максимальная скорость	30 км/ч	60 км/ч	Максимальная скорость
Буран Лидер	2,1	3,94	4,02	8,36	30,92	33,49
Тайга Варяг 550	2,2	4,61	6,18	8,93	38,4	68,44
Тайга Патруль 800 SWT	2,68	5,05	6,58	11,37	40,98	71,15

Фрагменты проведения сравнительных испытаний снегоходов на тормозную динамику представлены на рис. 10.



**Рис. 10. Фрагмент проведения испытаний тормозной динамики снегоходов:**

*а* - снегоход «Буран Лидер»;  
*б* - снегоход «Тайга Патруль 800 SWT»

### Выводы

Разгон снегохода "Буран Лидер" до скорости 30 км/ч составил 2,59 с, пройденный путь 10,53 м. Разгон снегохода "Тайга Варяг 550" до скорости 30 км/ч составил 1,95 с, пройденный путь 8,66 м. Разгон снегохода "Тайга Патруль 800 SWT" до скорости 30 км/ч составил 2,07 с, пройденный путь 8,84 м.

Разгона снегохода "Буран Лидер" до скорости 60 км/ч составил 11,74 с, пройденный путь 139,5 м. Разгон снегохода "Тайга Варяг 550" до скорости 60 км/ч составил 4,86 с, пройденный путь 53,7 м. Разгон снегохода "Тайга Патруль 800 SWT" до скорости 60 км/ч составил 5,66 с, пройденный путь 55,87 м.

Разгон снегохода "Буран Лидер" до максимальной скорости 61,42 км/ч составил 14,27 с, пройденный путь 182,92 м. Разгон снегохода "Тайга Варяг 550" до максимальной скорости

81,45 км/ч составил 12 с, пройденный путь 206,5 м. Разгон снегохода "Тайга Патруль 800 SWT" до максимальной скорости 82,08 км/ч составил 14,01 с, пройденный путь 226,62 м.

Торможение с начальной скорости 30 км/ч до полной остановки снегохода "Буран Лидер" составило 2,1 с, тормозной путь 8,36 м. Торможение с начальной скорости 30 км/ч до полной остановки снегохода "Тайга Варяг 550" составило 2,2 с, тормозной путь 8,93 м. Торможение с начальной скорости 30 км/ч до полной остановки снегохода "Тайга Патруль 800 SWT" составило 2,68 с, тормозной путь 11,37 м.

Торможение с начальной скорости 60 км/ч до полной остановки снегохода "Буран Лидер" составило 3,94 с, тормозной путь 30,92 м. Торможение с начальной скорости 60 км/ч до полной остановки снегохода "Тайга Варяг 550" составило 4,61 с, тормозной путь 38,4 м. Торможение с начальной скорости 60 км/ч до полной остановки снегохода "Тайга Патруль 800 SWT" составило 5,05 с, тормозной путь 40,98 м.

Торможение с максимальной начальной скорости 61,42 км/ч до полной остановки снегохода "Буран Лидер" составило 4,02 с, тормозной путь 33,49 м. Торможение с максимальной начальной скорости 81,45 км/ч до полной остановки снегохода "Тайга Варяг 550" составило 6,18 с, тормозной путь 68,44 м. Торможение с максимальной начальной скорости 82,08 км/ч до полной остановки снегохода "Тайга Патруль 800 SWT" составило 6,58 с, тормозной путь 71,15 м.

*Работа выполнена в МГТУ им. Н.Э. Баумана при финансовой поддержке Минобрнауки России по Соглашению №14.577.21.0272 (Уникальный идентификатор работ: RFMEFI57717X0272).*

#### Библиографический список

1. **Макаров, В.С.** Снег как полотно пути для транспортных средств / В.С. Макаров, Д.В. Зезюлин, В.В. Беляков // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 4. – С. 21–24.
2. **ГОСТ Р 50944-2011** Снегоходы. Технические требования и методы испытаний.
3. **Беляков, В.В.** Полотно пути транспортно-технологических машин (справочные материалы к теории «машина-местность»): учебник / В.В. Беляков, А.А. Куркин; Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2014. – 447 с.
4. **Мухамадьяров, Ф.Ф.** Конструкция снегоходов: учеб. пособие / Ф.Ф. Мухамадьяров, А.И. Чупраков, С.А. Романов. – Киров, 2016.
5. **Беляков, В.В.** Подвижность наземных транспортно-технологических машин / В.В. Беляков [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2013. – № 4. – С. 72–77.
6. **Грушников, В.А.** Использование снегоходов в России // Автотранспортное предприятие. – 2006. – № 2. – С. 49–52.
7. **Obertov, D.** Vehicle speed estimation using roadside sensors / D. Obertov, V. Bardov, B. Andrievsky // International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops 6. Sep. "2014 6th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops, ICUMT 2014" 2015. – С. 111–117.
8. **Береснев, П.О.** Обеспечение экологической безопасности движения вездеходных машин на местности / П.О. Береснев [и др.] // Экологические системы и приборы. – 2016. – №12. – С. 24–35.
9. **Plueddeman, C.** Snowmobiles winter warriors chill out // Popular Mechanics. – 1991. – Т. 168. – № 3. – С. 86–87.
10. **Vail, D.** Governing snowmobilers in multiple-use landscapes: Swedish and Maine (USA) cases / David Vail, Tobias Heldt // Ecological Economics. – 2004. – Vol. 48. – Issue 4. – P. 469–483.
11. **Котиев, Г.О.** Метод разработки ходовых систем высокоподвижных безэкипажных наземных транспортных средств / Г.О. Котиев, А.С. Дьяков // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2016. – Т. 174. – № 1. – С. 186–197.

*Дата поступления  
в редакцию 14.02.2018*

**A.S. Dyakov, A.Yu. Zakharov, V.E. Kubnichkin, E.E. Klubnichkin, A.B. Kartashov**

**EXPERIMENTAL ESTIMATION OF SPEED AND BRAKE PROPERTIES  
OF SNOWMOBILES OF DOMESTIC PRODUCTION**

Bauman Moscow State Technical University, Moscow

**Purpose:** To experimentally determine the speed and braking properties of snowmobile motor vehicles of domestic production.

**Objectives:** 1. Conducting tests to determine the traction dynamics of snowmobile motor vehicles of domestic production.

2. Conducting tests to determine the braking dynamics of snowmobile motor vehicles of domestic production.

**Conclusions:** The results of comparative characteristics of the traction and braking dynamics of snowmobile motor vehicles of the domestic manufacturer JSC "Russian mechanics" were obtained: "Buran Leader", "Taiga Varyag 550" and "Taiga Patrol 800 SWT".

**Research limitations/implications:** This study is the starting point for continuing experimental studies of snowmobile motor vehicles.

*Key words:* snowmobile, traction dynamics, braking dynamics, tests.

УДК 629.113

Д.В. Зезюлин, Д.Ю. Тюгин, А.В. Тумасов, А.М. Грошев, В.В. Беляков, Д.М. Порубов,  
В.И. Филатов, П.О Береснев

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ БЕСПИЛОТНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА С ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Нижегородский государственный технический университет им Р.Е.Алексеева

Представлены предпосылки и первые шаги в разработке систем беспилотного управления движением транспортного средства коллективом НГТУ им. Р. Е. Алексеева при поддержке инженеров Объединенного инженерного центра Группы ГАЗ и специалистов ПАО «ГАЗ». Данная система разрабатывается для функционирования в сложных дорожно-климатических условиях на территории РФ. Предложен компонентный состав системы беспилотного управления движением транспортного средства, определены месторасположение и зоны действия оборудования. Представлена разработка рулевого управления с электромеханическим усилителем, установленного на электроплатформу.

*Ключевые слова:* беспилотное транспортное средство, система помощи водителю, электроплатформа, электромеханическое рулевое управление.

Рыночный сектор систем беспилотного управления движением транспортных средств является новым и быстрорастущим как в мире, так и в РФ. В течение многих лет для повышения безопасности дорожного движения проводятся исследования, связанные с разработкой систем помощи водителю. Данные системы обозначаются мировым инженерным сообществом термином ADAS (Advanced Driver Assistance Systems).

Крупные автопроизводители ведут разработки в области создания систем беспилотного управления движением (СБУД) ТС на базе систем ADAS. Также разработкой СБУД успешно занимаются IT-компании и производители военной техники, такие как Google [1], Nvidia [2], Tesla[3]; DARPA[4]; Armament Research; Development and Engineering Center; Oshkosh Defense; Lockheed Martin; Mira Autonomous Control Equipment; Ruag Defence; Torc Robotics; Kairos Autonomi; Selex ES; Oto Melara; G-Nius и т.д.

### Зарубежный опыт разработки систем беспилотного управления движением транспортных средств

Для оценки работоспособности и повышения уровня конкуренции среди разработчиков систем беспилотного управления движением при поддержке правительства США были организованы соревнования беспилотных транспортных средств (БПТС) – DARPA Grand Challenge [4]. Проведение данных соревнований выявило все недостатки беспилотных транспортных средств и существенно повлияло на развитие беспилотной отрасли. Следует отметить, что большинство команд – участников являлось связкой крупного автопроизводителя, предоставившего ТС, и университета, занимавшегося реализацией беспилотных функций на данном транспортном средстве.

В 2014 г. в США был утвержден первый национальный стандарт в сфере автономных АТС – SAE J3016 «Системы автоматизированного управления движением АТС. Классификация, термины и определения» (SAE J3016 Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems) [5]. Стандарт разрабатывался вновь созданным комитетом On-Road Automated Vehicle Standards Committee и содержит определения, терминологию и классификацию уровней автоматизации дорожных АТС. Рассматриваемый документ является основой для последующей разработки стандартов и определяет будущий язык общения сообщества, занимающегося вопросами автоматизированных и автономных АТС.

В классификации SAE J3016 [5] даны следующие определения уровням автоматизации:

- уровень 0 – без автоматизации;
- уровень 1 – помощь водителю;
- уровень 2 – частичная автоматизация;
- уровень 3 – условная автоматизация.
- уровень 4 – повышенная автоматизация (например Model S фирмы Tesla (Hardware version 2), успешно прошедший тесты автопилота в Калифорнии [3]);
- уровень 5 – полная автоматизация (проект по разработке технологии беспилотного движения, начатый компанией Google [1]).

Основное отличие разработок компании Google от остальных разработчиков БПТС в том, что в процессе движения данные, получаемые с ЛИДАРа, верифицируются с трехмерными картами высокого разрешения, записанными ранее. Благодаря этому возможно обнаружение препятствия на пути следования методом сравнения. Поэтому на данном этапе развития технологий автономного вождения автомобиля Google двигаются не по всем дорогам общего пользования, а только по тем, где уже записаны подробные трехмерные карты.

### **Отечественный опыт разработки беспилотных транспортных средств**

В РФ направление разработок систем беспилотного управления движением ТС развивается менее успешно, однако большой задел имеют ряд компаний: Яндекс [6], Cognitive technologies [7], ФГУП НАМИ [8], ПАО «КамАЗ» [9], Avrota robotics [10] и др.

Среди российских разработчиков беспилотных автомобилей одной из наиболее успешных компаний является Яндекс [6]. Цель разработки, как и у компании Uber [11], использовать в будущем беспилотные автомобили в сфере транспортных услуг (пассажирские такси, грузоперевозки и т.д.). К настоящему времени компанией Яндекс разработано два прототипа беспилотных автомобилей на базе Toyota Prius и Kia Soul.

Аппаратная часть состоит из следующих типов сенсоров. Внутри автомобиля располагаются камеры переднего и заднего обзора, по изображению с которых происходит распознавание автомобилей, пешеходов, дорожных знаков и разметки, а также границ проезжей части. На крыше автомобиля установлены три ЛИДАРа: Velodyne HDL-32 и два Velodyne VLP-16. Данные приборы с помощью лазерного излучателя сканируют окружающее пространство. На основе информации об отражениях лучей составляется трёхмерная карта, с помощью которой вычисляются точные расстояния до тех или иных объектов вокруг машины. Машина также оборудована датчиками, определяющими её местоположение, скорость и направление движения. Это приёмники GPS/GLONASS, блок инерциальных измерителей и сенсоры, измеряющие одометрические данные машины, например, скорость вращения отдельных колёс.

Для сокращения разрыва в технологическом развитии систем беспилотного управления движением ТС и развития технологий автоматического управления БПТС, адаптированных к использованию в российских климатических дорожных условиях, в России ежегодно проводятся соревнования БПТС [12].

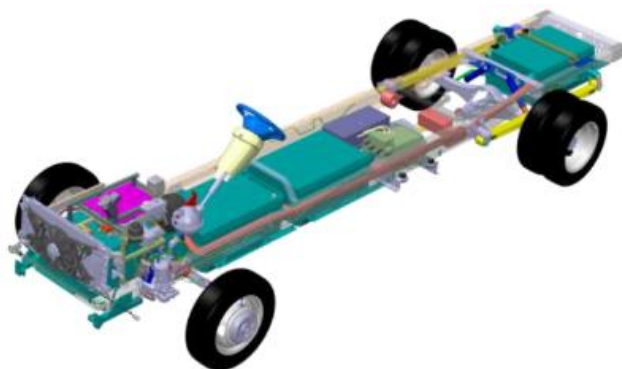
В настоящий момент масштабным соревнованием на территории РФ является технологический конкурс «Зимняя трасса» от Национальной технологической инициативы [13].

### **Электроплатформа разрабатываемого беспилотного транспортного средства**

В качестве шасси для установки системы беспилотного управления движением транспортного средства была выбрана электроплатформа (рис. 1).

Данный выбор обосновывается рядом преимуществ электротранспорта над традиционными типами ТС. Развитие электротранспорта является общемировым трендом. Практически все крупные автопроизводители ведут разработки в этой области, а передовые страны мира (США, Китай, Япония, Германия, Великобритания) имеют долгосрочные программы

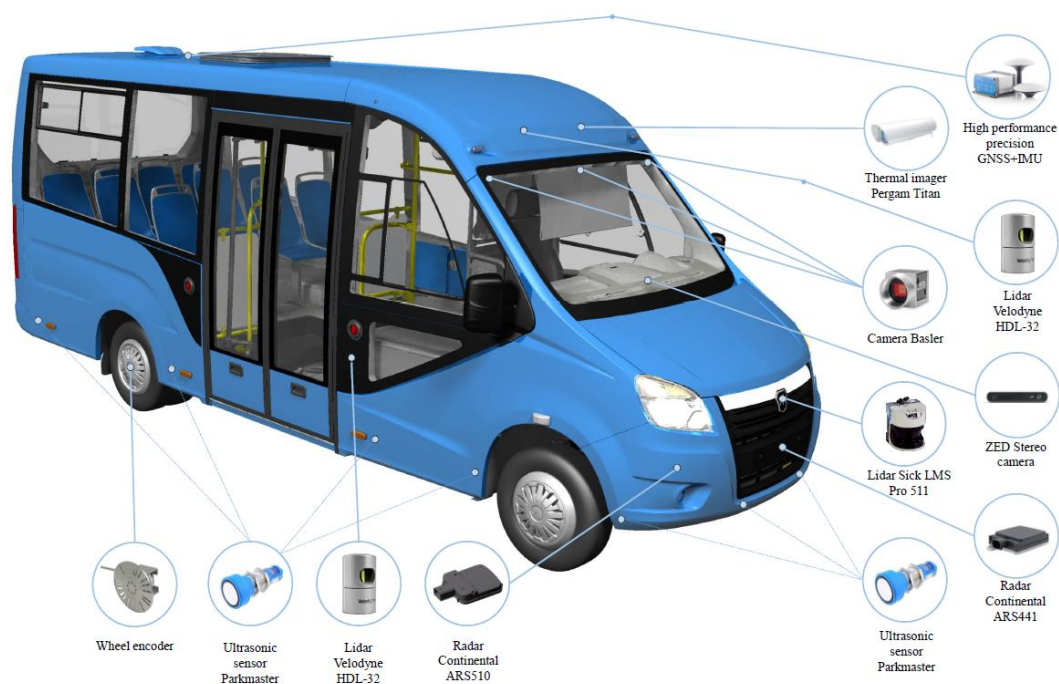
поддержки развития электротранспорта и стимулирования потребителей. В настоящее время ожидается поддержка и со стороны правительства РФ.



**Рис. 3. Внешний вид электроплатформы**

Управление электроагрегатами шасси не требует установки актуаторов и приводов в случае механических, гидравлических и пневматических агрегатов, что способствует увеличению безопасности и надежности систем ТС, а также увеличения быстродействия и уменьшения стоимости различных его систем.

Данная электроплатформа – основа электробуса (рис. 2). Использование маршрутного транспорта в качестве объекта, на котором будут применены решения беспилотного функционирования, объясняется рядом причин: заранее определен основной маршрут ТС, возможность передвигаться по выделенным полосам для общественного транспорта, возможность зарядки аккумуляторных батарей в конечных точках маршрута. Указанные причины использования электробуса в качестве объекта беспилотного функционирования актуальны в том случае, когда будет сформирована нормативная и законодательная база по беспилотным ТС в РФ, по которой возможна будет эксплуатация БПТС на дорогах общего пользования.



**Рис. 2. Внешний вид разработанного электробуса и аппаратная часть системы определения обстановки вокруг ТС**

Что касается технологического конкурса «Зимняя трасса», то подготовка БПТС для данного соревнования достаточно сложная и наукоемкая задача. Одна из основных проблем

– большие габариты ТС. Для получения актуальной информации об обстановке, окружающей БПТС, необходимо большое количество сенсоров разнородного типа действия. Высота электробуса также осложняет установку некоторых сенсоров ввиду их ограниченного по вертикали сектора функционирования.

Аппаратная часть системы определения обстановки вокруг ТС представлена на рис. 2 и состоит из нескольких типов сенсоров.

Для обнаружения других объектов движения и препятствий на пути следования, а также построения виртуальной карты маршрута будут использоваться 4 ЛИДАРа Velodyne HDL-32, расположенные по периметру автомобиля. Также в системе будет задействован планарный ЛИДАР Sick LMS Pro 511, установленный на уровне бампера. Данный ЛИДАР имеет более высокую частоту и защиту от воздействия окружающей среды и будет использован для определения препятствий впереди автомобиля на более дальних расстояниях.

Важным аспектом при проектировании СБУД является надежность всей системы управления в целом. Особенно данный вопрос актуален в экстремальных дорожных и климатических условиях.

Для повышения надежности системы обнаружения препятствий на БПТС, помимо лидарной системы, планируется применение системы радаров ближнего и дальнего действия. Подходящими по характеристикам являются радары Continental ARS441 и SRR510. Применение данной системы из нескольких радаров позволит оценивать ситуацию впереди автомобиля, измерять расстояние до препятствий на больших дальностях (до 250 м). На работу радаров меньше влияют погодные условия, цвет объектов и освещенность. Также радары имеют хорошую разрешающую способность по дальности и скорости, мгновенную обработку данных, что особенно важно для высоких скоростей движения. Стоит отметить, что системы с различными типами радаров уже серийно применяются крупными автопроизводителями при разработке ADAS систем.

В ближней зоне (до 3 м) контроль обстановки вокруг БПТС будет осуществляться с помощью системы, состоящей из 16 ультразвуковых датчиков.

Соблюдение правил дорожного движения – обязательное условие эксплуатации БПТС на дорогах общего пользования. Распознавание участников дорожной сцены, в частности, других автомобилей, пешеходов, дорожных знаков, разметки и т.д. осуществляется с помощью системы технического зрения, аппаратной частью которой служат видеокамеры Basler [14]. В системе беспилотного управления движением ТС применены три видеокамеры, полностью охватывающие передний обзор.

Для повышения эффективности, надежности и безопасности работы систем обнаружения препятствий и других участников дорожного движения будет применен тепловизор. Получаемое с него тепловое изображение, после обработки вычислительным комплексом, позволит улучшить распознавание границ дорожного полотна, заранее оценивать приближающиеся повороты и искривления на маршруте. Тепловизор, в отличие от видеокамер, функционирует при засвечивании фарами встречных автомобилей, сквозь дым, пыль, туман и дождь.

Для точного позиционирования БПТС на местности предполагается применить комплексную слабосвязанную навигационную системы, состоящую из высокоточной GNSS навигации и инерциального блока с одомером.

### **Экспериментальные исследования компонентов СБУД планируемых к установке на электробус**

Перед установкой аппаратной части на электробус был реализован и имплементирован функционал системы помощи водителю, направленный на распознавание дорожной сцены, объектов дорожного движения и предупреждения о возможной критической ситуации.

Для работы системы распознавания параметров дорожной сцены и объектов дорожного



движения было предложено использовать стереокамеру ZED [15] с вычислительным модулем Nvidia Jetson TX2. Данное сочетание оборудования должно обеспечить непрерывный сбор данных при движении и построение 3D-модели дорожной сцены, с дальнейшим сохранением и загрузкой в общую базу данных. Система позволяет производить постоянный сбор данных об окружающей обстановке и прорисовывать траекторию движения, что поможет прокладывать наиболее благоприятный маршрут передвижения (рис. 3).

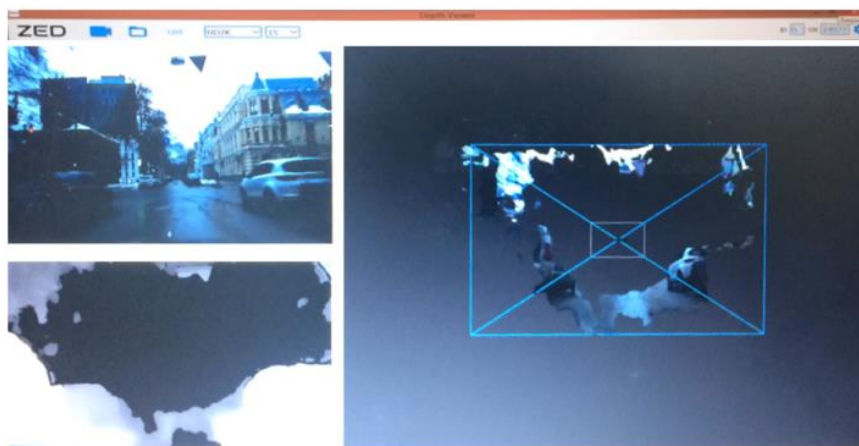


Рис. 3. Построение карты глубины со стереокамерой ZED

Для работы камеры требуется интерфейс USB 3.0, высокопроизводительная видеокарта Nvidia или платформа для разработки от Nvidia Jetson TX 1-й или 2-й серии, а также установленная библиотека Cuda 7.5 (данный драйвер находится в открытом доступе).

По результатам исследований стереокамеры была проведена оценка дальности действия системы. Среднее значение дальности действия составляет 11,65 м, что удовлетворяет поставленным требованиям и позволяет на базе стереокамеры вести построение карт глубины, которые в дальнейшем могут быть использованы в работе.

Параллельно с экспериментальными исследованиями стереокамер проводились работы с ЛИДАРами. Цель – оценка возможности генерации облака точек дорожной сцены и целесообразность дальнейшей локализации БПТС внутри облака точек. В рамках испытаний применялся ЛИДАР Velodyne VLP 16, механизм сканирования которого использует вращающееся зеркало. Если ось вращения зеркала находится почти перпендикулярно к поверхности зеркала, развертка отраженного лазерного луча будет представлять собой эллиптическую кривую. Неоспоримым преимуществом такого подхода является то, что дважды сканируется каждая точка окружающего пространства. Но в то же время такая развертка в несколько раз усложняет обработку самих результатов сканирования, так как, кроме увеличения объема выходных данных, в связи с тем, что точки одной и той же области получены не с одной, а с разных позиций (если рассматривать движущуюся систему), полученное облако точек содержит «шумы».

На рис. 4 показан пример облака точек, полученных с помощью ЛИДАРа Velodyne VLP 16 [16] на участке Нижне-Волжской набережной (г. Нижний Новгород). Вблизи центра изображения различима голубая точка. Она указывает на положение ЛИДАРа в пространстве. Представление данных в пространстве осуществляется объединением двухмерных облаков точек. При вращении модуля массив точек от каждой пары излучатель-детектор образует на ровной поверхности непрерывную окружность.

В приведенном примере ЛИДАР был установлен на крыше автомобиля, поэтому на изображении ниже голубой точки имеется темная область – кузов автомобиля. На изображении видны дорожное ограждение, земля и деревья.

Если на оптическом пути находятся препятствия, не позволяющие получить данные о

том, что находится за ними, на рисунке такие области остаются пустыми. Также возможно крепление ЛИДАРА под углом  $90^\circ$  к вертикальной оси для изменения области обзора.

Рассмотренный ЛИДАР Velodyne VLP 16 относится к классу 1, то есть считается безопасным для глаз. Сенсор находится в водонепроницаемом корпусе, сохраняющем работоспособность при температурах от  $-10$  до  $+60$   $^\circ\text{C}$ , и оптимален для использования в автомобилях.

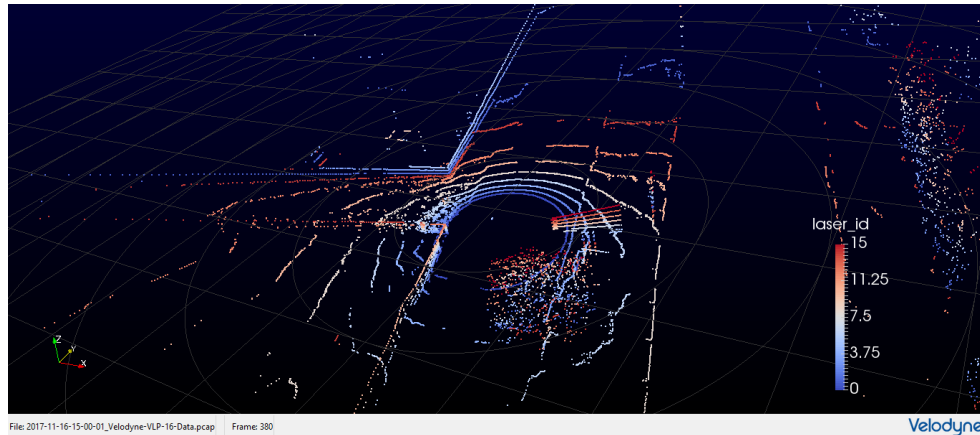


Рис. 4. Облако точек

По результатам исследований ЛИДАРА подтверждена целесообразность использования данного способа локализации ТС в пространстве по границам проезжей части. Качество работы алгоритма составляет 78%. Следует отметить, что проверка способа определения полосы движения является частью локализации автомобиля в пространстве. В дальнейшем при движении беспилотной электроплатформы заранее составленная карта будет сравниваться с получаемой в реальном времени картой, формирующейся также с помощью ЛИДАРОВ. По результатам сравнения будет происходить локализация БПТС в относительной системе координат, где центром является ЛИДАР.

Также проводились экспериментальные исследования системы позиционирования на маршруте, в составе:

- двухантенный ГНСС приемник ОС-203-GSM [17];
- две ГНСС антенны АТ330;
- инерциальный блок Гиролаб ГЛ-ВГ109.

Система выполнена по отдельной схеме интеграции данных ГНСС приемника и IMU, т.е. они работают независимо друг от друга. Периодически проводится корректировка IMU по данным ГНСС.

Всего после монтажа оборудования на ТС было проведено 10 заездов по маршруту. Выбранный маршрут имитировал городскую среду, состоящую из близкостоящих друг к другу зданий, расположенных вдоль дороги деревьев, металлических сооружений, ферм и труб. Анализ работы навигационной системы производился после заездов и заключался в сравнении координат от ГНСС приемника и блока IMU.

Во время заездов определялась целостность и плавность траектории, качество GSM-связи на всей длине маршрута, возможность интеграции системы позиционирования с бортовым компьютером, необходимость и качество работы инерциального блока. Фрагмент проведения испытаний представлен на рис. 5.

Качество слежения за навигационными спутниками на всем протяжении траектории соответствовало нормальному. Исключение составляли только места пересечения с железными фермами и трубами, которые вызывали смещение траектории на 1-3 с.

Качество сигнала GSM-сети являлось удовлетворительным, однако в начале маршрута были замечены срывы связи (нерегулярные). Следует рекомендовать использование Wi-Fi для передачи корректирующей информации от базовой станции на ТС.

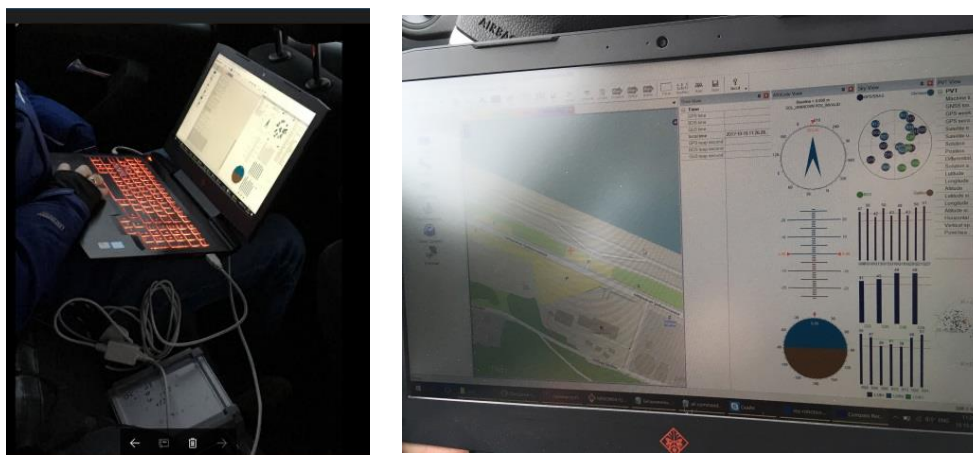


Рис. 5. Работа с навигационным оборудованием во время испытаний

Применение инерциального блока вызвало ухудшение гладкости траектории, однако использование инерциальной системы желательно для предотвращения резких скачков траектории при ухудшении слежения за навигационными спутниками. Расстояние между точками при оптимальной работе составляло порядка 2 м на всем маршруте. Необходимо отметить, что навигационная траектория не может рассматриваться как абсолютно надежный источник информации о позиционировании.

Таким образом, данную навигационную систему можно применять в городских условиях, но без наличия туннелей и прочих длительных разрывов связи со спутниками ГНСС. Для повышения точности позиционирования ТС в пространстве в дальнейшем необходимо обеспечить совместную работу с системами диверсификации для повышения надежности работы системы (техническое зрение, работа с лазерными сканерами и т.д.). Также будет произведена работа над улучшением качества выходной траектории инерциальной системы, запланировано повторное проведение испытаний.

По результатам исследований навигационной системы отклонение траектории движения ИНС от траектории движения ГНСС не превышало 3 м. Минимальное значение отклонения составляет 1,334 м, максимальное – 2,647 м. Широкий интервал между минимальным и максимальным значением возник ввиду того, что была потеряна связь со спутниками ГНСС на длительное время (более 10 с) ввиду помех на участке движения (металлические фермы и трубы) и низкой скорости движения ТС. В дальнейшем требуется произвести улучшение качества выходной траектории ИНС, а также обеспечить совместную работу с системами диверсификации для повышения надежности работы системы.

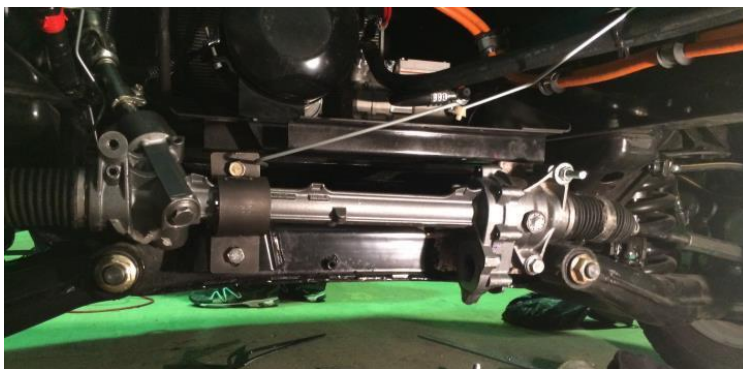
### Техническая реализация беспилотного ТС

Подготовка к установке систем беспилотного управления как электроплатформы в целом, так и отдельных ее узлов и агрегатов является одной из важнейших задач. Некоторые узлы, заимствованные с серийно выпускаемых автомобилей, не подходят для интеграции системы беспилотного управления. Так, в настоящий момент на электроплатформе устанавливается гидравлический усилитель рулевого управления с электрическим гидронасосом. Данное решение осложняет реализацию контроля рулевого управления в беспилотном режиме, приводит к удорожанию конструкции, повышению ее сложности и уменьшению надежности в случае использования дополнительных актуаторов и приводов. В дальнейшем данное конструктивное решение невозможно применить на серийном образце.

Во избежание указанных проблем было принято решение о реализации рулевого механизма с электромеханическим усилителем. Разработка собственного механического узла рейки нецелесообразно ввиду больших финансовых и временных затрат. Для ускорения разработки рулевого управления с электромеханическим усилителем был выбран аналог, свободно распространяющийся на российском рынке, который в полной мере отвечает постав-

ленным в техническом задании требованиям. По техническому заданию Объединенного инженерного центра группы ГАЗ был подобран и реализован рулевой механизм с электромеханическим усилителем. Данное рулевое управление реечного типа с датчиком момента на входном валу, электромотором, расположенным параллельно оси рейки (привод от электромотора на рейку за счет ременной передачи и шарико-винтовой передачи) и блоком управления электромеханическим усилителем соответствует параметрам.

Планируемый переход к системе рулевого управления с возможностью внешнего воздействия и подключения к системам ADAS с функцией автопилота в дальнейшем заключается в использовании для управления поворотом ТС электромеханического рулевого механизма выбранного типа. Данный тип рулевого механизма отвечает требованиям по нагруженности, долговечности и не нарушает углов установки колес. На рис. 6 представлены фотографии поле монтажа электромеханической рейки на штатные места подрамника разрабатываемого в НГТУ беспилотного электробуса с минимальными доработками.



**Рис. 6. Электромеханическая рейка, установленная на штатное место в электробус**

Контроль рулевого управления будет осуществляться за счет изменения параметров вращения трехфазного синхронного электродвигателя, установленного на рулевой рейке. Управляющие сигналы будут передаваться посредством CAN-шины. Данное решение обеспечивает интеграцию рулевого управления в общую архитектуру CAN-шины автомобиля, быструю реакцию на управляющее воздействие и надежность срабатывания рулевого управления в целом.

Для реализации рулевого механизма на опытный образец БПТС необходимо было решить несколько основных задач:

- выбор и настройка контроллера электродвигателя рулевого механизма, передача управляющих команд через CAN-шину;
- разработка ПО управления электродвигателем;
- компоновка рулевого механизма с электромеханическим усилителем на штатные места автомобиля.

При выборе контроллера для электродвигателя возникли трудности из-за отсутствия продукта, либо характеристики имеющихся не удовлетворяли требованиям. К тому же все технические решения на рынке направлены на компании, ведущие свою деятельность в больших промышленных масштабах.

Выбранный модуль [18] позволяет регулировать положение, скорость и момент электродвигателя. К тому же данный модуль является одновременно и контроллером, с помощью которого возможна прием и передача сообщений в CAN-шину.

### **Выводы**

Разработана структура системы беспилотного управления движением ТС, подобрана аппаратная часть, преодолены барьеры в области технической реализации системы рулевого управления с возможностью внешнего воздействия. Производится разработка конструктор-

ской документации на различные системы СБУД, программного обеспечения и сети передачи данных, объединяющих все подсистемы в единую сеть на бортовой вычислительной системе, подготовка электроплатформы для установки систем беспилотного управления движением. Также были произведены экспериментальные исследования планируемых к установке на электробус компонентов. Результаты исследований подтвердили целесообразность применения выбранных компонентов на БПТС.

На данный момент опытный образец электробуса оборудован электромеханической рейкой рулевого управления с возможностью внешнего управления. Было проведено тестирование системы. После монтажа и отладки технологического оборудования опытный образец БПТС будет протестирован на специализированном полигоне для проверки и отладки всех систем.

Реализация данной системы беспилотного управления движением ТС, а также задел, наработанный в ходе её разработки, позволит не только принять участие в технологическом конкурсе «Зимняя трасса», но и в дальнейшем будет способствовать развитию направления разработки беспилотных автобусов для маршрутов общественного транспорта. Это значительно снизит затраты на транспортировку пассажиров и временные ресурсы, повысит экономическую эффективность, а также минимизирует число дорожно-транспортных происшествий.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках проекта «Создание высокотехнологичного производства безопасных экспортоориентированных автомобилей ГАЗ с элементами автономного управления и возможностью интеграции с электроплатформой на базовых компонентах российского производства» по договору №03.G25.31.0270 от 29.05.2017 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. Autonomous car development company Waymo [Электронный ресурс] URL: <https://waymo.com>, свободный.
2. The Official NVIDIA Blog [Электронный ресурс] URL: <https://blogs.nvidia.com/>, свободный
3. Tesla motors [Электронный ресурс] URL: <https://www.tesla.com>, свободный.
4. DARPA [Электронный ресурс] URL: <https://www.darpa.mil/>, свободный
5. **Шадрин, С.С.** Методология создания систем управления движением автономных колесных транспортных средств, интегрированных в интеллектуальную транспортную среду: автореф. дисс. ... д-ра технич. наук. – М., 2017. – 34 с.
6. Yandex Taxi Unveils Self-Driving Car Project [Электронный ресурс] URL: <https://yandex.com/company/blog/yandex-taxi-unveils-self-driving-car-project/>
7. Cognitive Technology [Электронный ресурс] URL: <https://www.cognitive.ru>
8. ГИЦ РФ ФГУП «НАМИ» [Электронный ресурс] URL: <http://nami.ru/>
9. Официальный сайт ПАО «КАМАЗ» [Электронный ресурс]: URL: <https://kamaz.ru/>
10. Aurora Robotics [Электронный ресурс] URL: <http://aurora-robotics.ru/>
11. Uber Blog [Электронный ресурс] URL: <https://www.uber.com/blog/our-road-to-self-driving-vehicles>
12. Робототехника Инженерно-технические кадры инновационной России [Электронный ресурс] URL: <http://russianrobotics.ru/>
13. Национальная технологическая инициатива [Электронный ресурс] URL: <http://www.nti2035.ru/>
14. Basler the power of sight [Электронный ресурс] URL: <https://www.baslerweb.com/ru>
15. STEREO LABS [Электронный ресурс] URL: <https://www.stereolabs.com>
16. Velodyne LiDAR [Электронный ресурс] URL: <http://velodynelidar.com>
17. Orient Systems [Электронный ресурс]: [URL: <http://www.orsyst.ru>

18. HIGH PERFORMANCE MOTOR CONTROL [Электронный ресурс] URL: <https://odriverobotics.com/>

*Дата поступления  
в редакцию 14.02.2018*

**D.V. Zeziulin, D.Y. Tyugin, A.V. Tumasov, A.M. Groshev, V.V. Belyakov, D.M. Porubov,  
V.I. Filatov, P.O. Beresnev,**

**DEVELOPMENT OF A MOVEMENT CONTROL SYSTEM FOR AN UNMANNED  
GROUND VEHICLE WITH ELECTRIC DRIVE**

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

**Purpose:** Development of unmanned ground vehicles for moving in difficult weather conditions in the Russian Federation.

**Design/methodology/approach:** The approach is based on the study of foreign experience in the development of unmanned vehicles. Technological equipment, capable to work in severe climatic conditions of the Russian Federation is studied.

**Findings:** The component composition of the system was proposed. Experimental studies of systems for detecting objects of the road scene, obstacles on the route and positioning on the route were carried out. It was proposed to use a system of duplication to increase traffic safety in adverse weather conditions.

**Research limitations/implications:** This study is the starting point for continuing experimental studies of unmanned functions on a vehicle

**Originality/value:** The implementation of this unmanned vehicle, as well as the backlog gained in the course of its development, will allow not only to participate in the technological competition "Winter Track", but will further promote the development of the field of unmanned buses for public transport routes.

*Key words:* unmanned ground vehicle, ADAS, electrical platform, electromechanical steering system.

УДК 629.113.01-585

В.Н. Кравец, Р.А. Мусарский, С.А. Волков

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОРОБОК ПЕРЕДАЧ СОВРЕМЕННЫХ ЛЕГКОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Приведены результаты статистического анализа применения различных конструкций коробок передач на современных легковых автомобилях классов А, В, С, D, E, F и установлена зависимость между количеством ступеней и диапазоном передаточных чисел коробок передач с непосредственным и автоматическим управлением, которыми оснащают современные легковые автомобили.

*Ключевые слова:* легковой автомобиль, коробка передач с непосредственным управлением, коробка передач с автоматическим управлением, вариатор, количество ступеней коробки передач, диапазон передаточных чисел коробки передач.

При проектировании трансмиссии автомобиля возникает необходимость выбора количества ступеней коробки передач [1, 2]. На основании статистической обработки многих марок и моделей автомобилей отечественных и зарубежных производителей установлено, что количество ступеней коробки передач находится в прямой зависимости от диапазона её передаточных чисел [3, 4].

В работе [5] приведена методика определения количества ступеней коробок передач легковых автомобилей 80-х годов выпуска прошлого столетия. За прошедший с тех пор более чем 30-летний период прогресс автомобильной техники характеризовался созданием легковых автомобилей, отличающихся большим разнообразием конструкций трансмиссий. Современные легковые автомобили оснащают механическими ступенчатыми коробками передач с непосредственным (ручным) и автоматическим (роботизированным) управлением, бесступенчатыми передачами – вариаторами, комбинированными передачами, состоящими из гидротрннсформатора и ступенчатой коробки передач с автоматическим управлением [6]. Для каждого типа коробки передач необходимо иметь отдельную методику выбора количества ступеней.

Для систематизации большого количества разнообразных моделей легковых автомобилей были разработаны системы их классификации в СССР, ЕС, США, Японии. В настоящее время в Российской Федерации в законодательном порядке принята и действует европейская система классификации легковых автомобилей [1, 2, 7], в которой в качестве главного параметра принята их габаритная длина. По габаритной длине автомобили разделены на шесть классов А, В, С, D, E, F.

В связи с изложенным были сформулированы следующие цели исследования:

- 1) выявить варианты конструкций и установить процентное соотношение между объёмами их выпуска в каждом из шести классов легковых автомобилей;
- 2) установить связь между количеством ступеней и диапазоном передаточных чисел ступенчатых коробок передач с непосредственным и автоматическим управлением.

Авторы статьи выполнили обзор конструкций и параметров коробок передач, установленных на легковых автомобилях, произведённых и выпущенных в обращение с 2010 г. по 2015 г. ведущими мировыми производителями [8–15]. Всего было проанализировано 1343 конструкции коробок передач 291 модели легковых автомобилей, которые сошли с конвейеров около 80 производителей автомобильной техники в странах ЕС, США, Японии, Китае, Южной Кореи, России и др.

Все проанализированные модели легковых автомобилей были распределены по классам А, В, С, D, E, F. С использованием программы Microsoft Exel в каждом из шести классов были сформированы таблицы, включающие наименование легковых автомобилей, варианты

конструкций коробок передач, устанавливаемых на каждом из них, а для ступенчатых коробок передач – количество ступеней и передаточные числа всех ступеней.

При анализе все возможные варианты конструкций коробок передач были разделены на три типа:

1) механические коробки передач с непосредственным управлением и указанием количества ступеней прямого хода МКП4, МКП5, МКП6, МКП7;

2) коробки передач с автоматическим управлением, включающие гидромеханические передачи с указанием количества ступеней прямого хода: АКП4, АКП5, АКП6, АКП7, АКП8, АКП9;

3) вариаторы, представляющие бесступенчатые преобразователи крутящего момента и частоты вращения.

Для каждой конструкции ступенчатой коробки передач был подсчитан диапазон передаточных чисел

$$D_k = \frac{u_{k\max}}{u_{k\min}},$$

где  $u_{k\max}$  и  $u_{k\min}$  – максимальное и минимальное передаточные числа коробки передач соответственно.

## Результаты исследования

### 1. Автомобили класса А (особо малого класса)

Всего проанализировано 47 конструкций коробок передач, устанавливаемых на 27 моделях легковых автомобилей класса А. Результаты статистической обработки представлены на рис. 1.

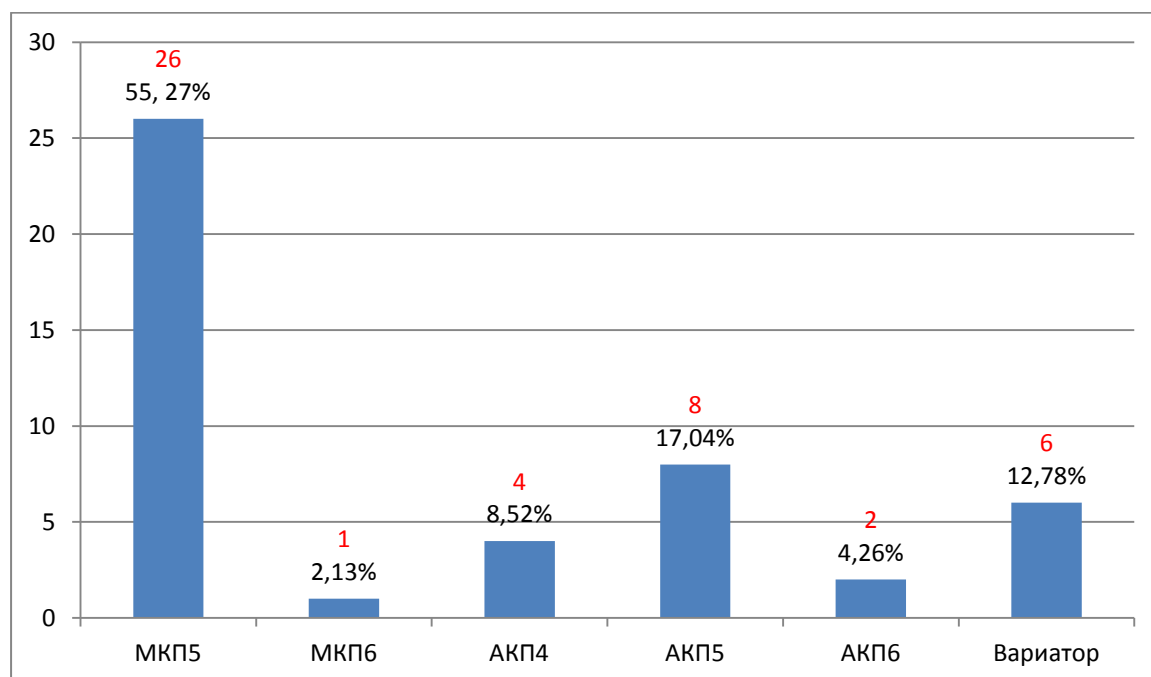


Рис. 1. Типы коробок передач, устанавливаемых на легковых автомобилях класса А

Из рис. 1 следует, что наибольшее применение на легковых автомобилях особо малого класса находят пятиступенчатые коробки передач с непосредственным управлением, наименьшее – такие же шестиступенчатые коробки. Обращает на себя внимание довольно частое применение вариаторов на автомобилях данного класса, доля которых составляет около 13%.

### 2. Автомобили класса В (малого класса)

Проанализировано 59 конструкций коробок передач, устанавливаемых на 42 моделях легковых автомобилей класса В. Результаты анализа приведены на рис. 2.



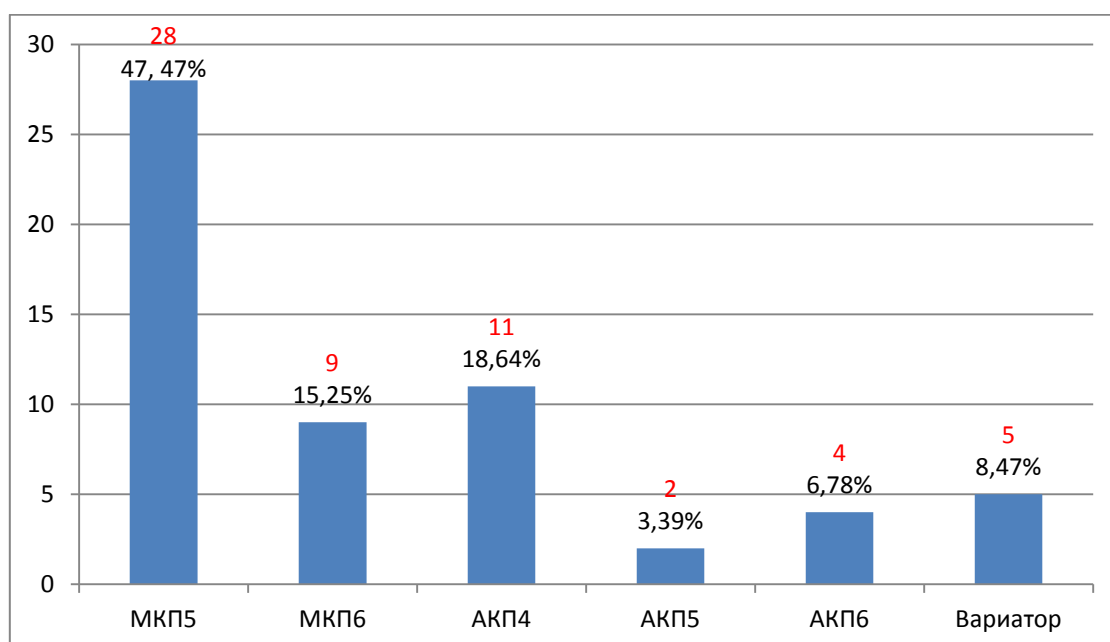


Рис. 2. Типы коробок передач, устанавливаемых на легковых автомобилях класса В

Как видно из рис. 2, на легковых автомобилях малого класса больше всего применяются пятиступенчатые коробки передач с непосредственным управлением – около 50%, затем четырёхступенчатые коробки передач с автоматическим управлением – около 20% и шестиступенчатые коробки передач с непосредственным управлением – более 15% и меньше всего пятиступенчатые коробки передач с автоматическим управлением – около 3 %.

### 3. Автомобили класса С (среднего класса)

Предметом анализа стали 437 конструкций коробок передач, которые были установлены на 216 моделях легковых автомобилей класса С. Результаты статистической обработки представлены на рис. 3.

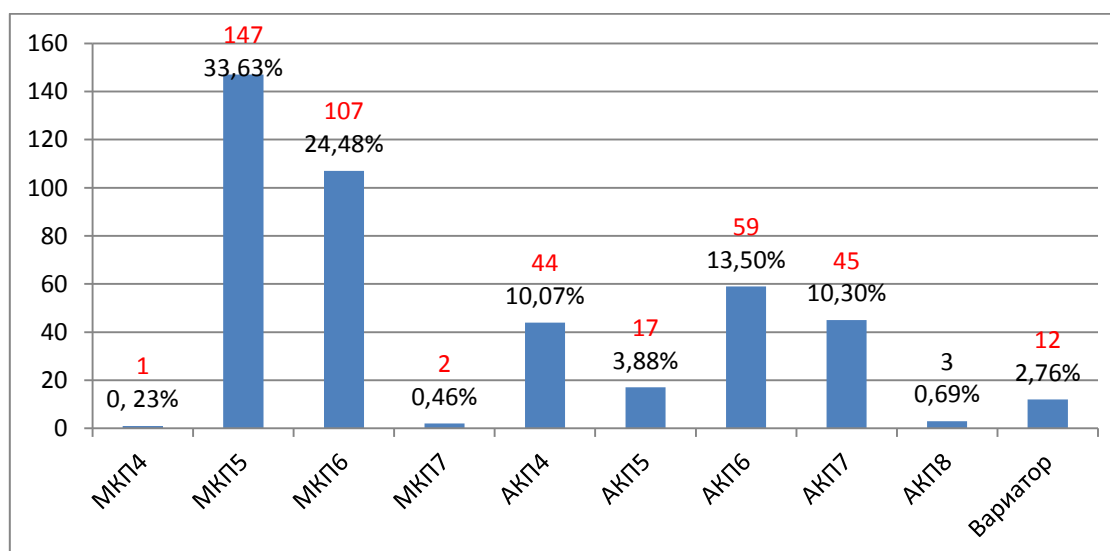


Рис. 3. Типы коробок передач, устанавливаемых на легковых автомобилях класса С

Приведённые на рис. 3 данные свидетельствуют о том, что среди коробок передач, устанавливаемых на легковых автомобилях среднего класса, более половины – пяти- и шестиступенчатые коробки передач с непосредственным управлением (около 34 и 24% соответственно) и более 13% – шестиступенчатые автоматические коробки передач. Единичные образцы легковых

автомобилей оснащают четырёх- и семиступенчатыми коробками передач с непосредственным управлением, восьмиступенчатыми с автоматическим управлением, а также вариаторами.

#### 4. Автомобили класса D (большого класса)

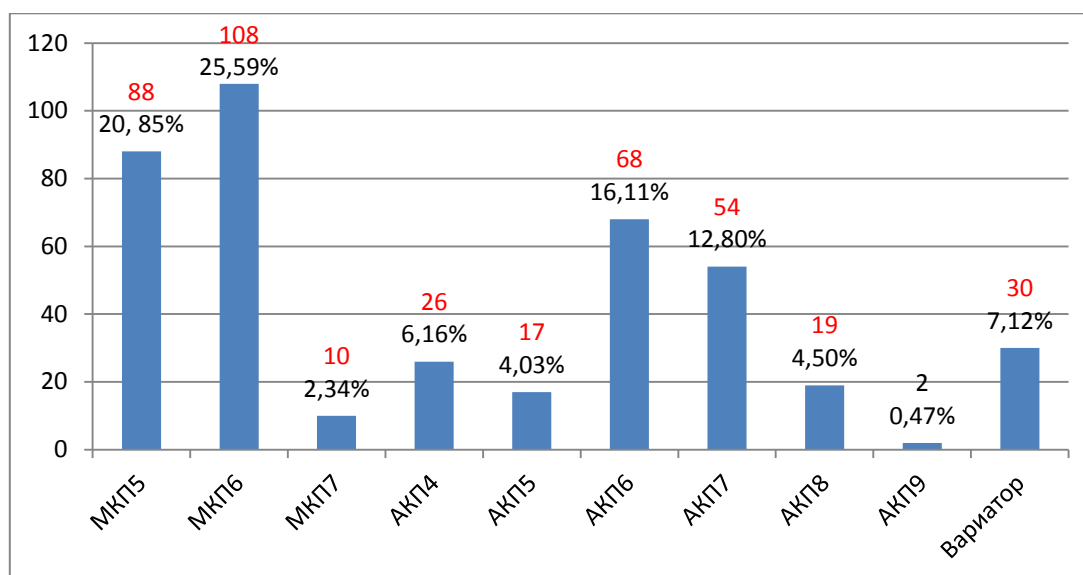


Рис. 4. Типы коробок передач, устанавливаемых на легковых автомобилях класса D

Содержащиеся на рис. 4 данные позволяют сделать вывод о том, что на легковых автомобилях большого класса наибольшее применение нашли пяти- и шестиступенчатые коробки передач с непосредственным управлением (более 25 и 20% соответственно), а также шести- и семиступенчатые коробки передач с автоматическим управлением (более 16 и 12% соответственно). На двух моделях устанавливают девятиступенчатые коробки передач с непосредственным управлением.

#### 5. Автомобили класса E (бизнес-класса)

Выполнено исследование 237 конструкций коробок передач, нашедших применение на 119 моделях легковых автомобилей класса E. Результаты статистической обработки сведены на рис. 5.

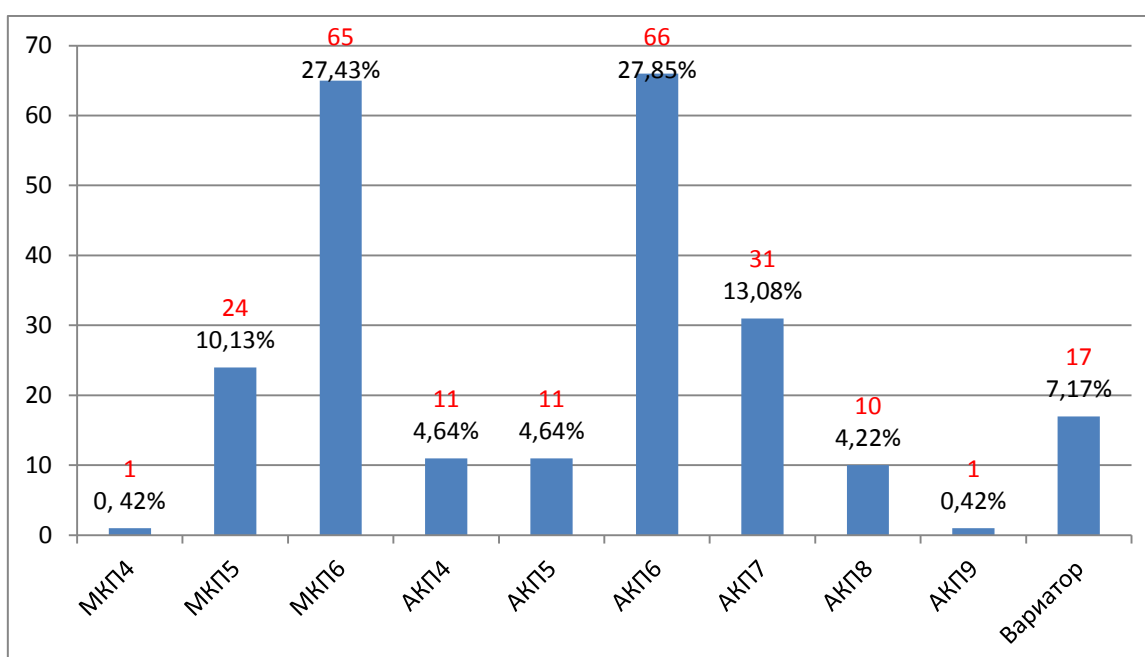


Рис. 5. Типы коробок передач, устанавливаемых на легковых автомобилях класса E

Данные, приведённые на рис. 5, подтверждают, что большинство легковых автомобилей бизнес-класса оснащено тремя типами коробок передач: шестиступенчатыми с автоматическим и непосредственным управлением и семиступенчатыми с автоматическим управлением (27,85, 27,43 и 13,08% соответственно. Доля каждого из остальных типов коробок передач не превышает 10%.

### 6. Автомобили класса F (представительского класса)

Выполнен анализ 141 конструкции коробок передач, которыми были оснащены 95 моделей легковых автомобилей класса F. Результаты статистической обработки параметров коробок передач представлены на рис. 6.

Согласно данным рис. 6, конструкторы коробок передач, предназначенных для легковых автомобилей представительского класса, явное предпочтение отдали автоматическим коробкам передач с восемью, шестью и семью ступенями (более 28, 24 и около 20% соответственно). По одной модели автомобиля оснащены четырёхступенчатой коробкой передач с непосредственным управлением и девятиступенчатой с автоматическим управлением.

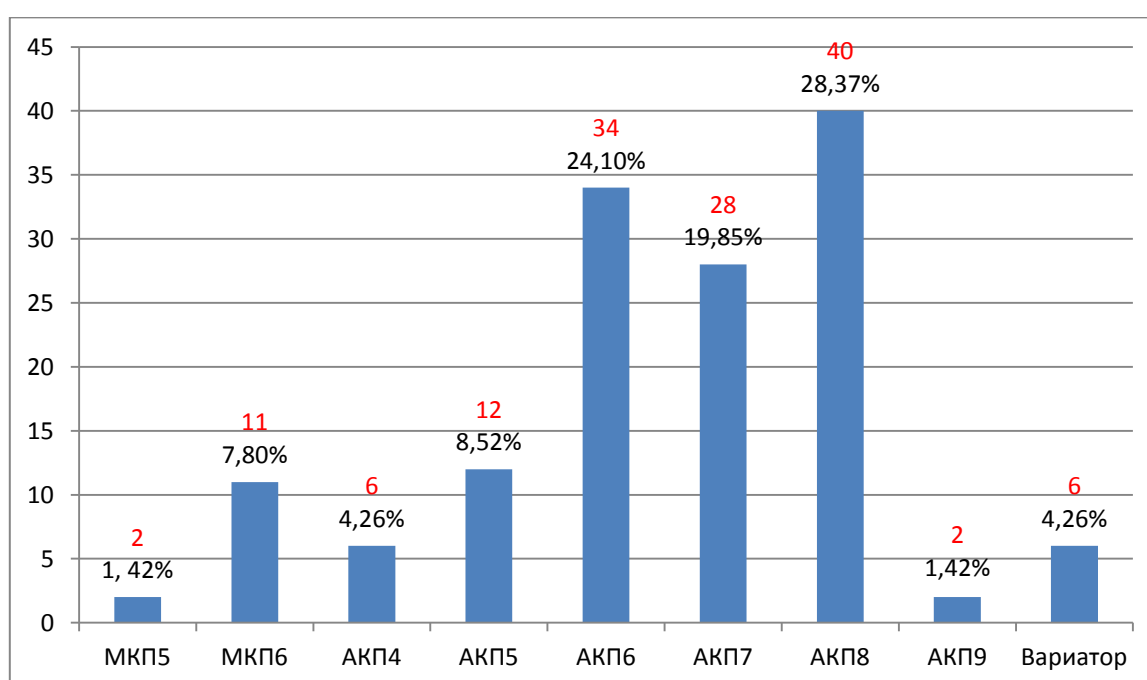


Рис. 6. Типы коробок передач, устанавливаемых на легковых автомобилях класса F

Из 1343 конструкций коробок передач, сведения о которых приведены на рис. 1–6, были отобраны 460 образцов ступенчатых коробок передач, принадлежащих всем шести классам, для которых, помимо количества ступеней, были рассчитаны диапазоны передаточных чисел. Отобранные образцы были разделены на два типа: с непосредственным (ручным) и автоматическим управлением. Для обоих типов коробок передач установлены зависимости между количеством ступеней и диапазоном передаточных чисел (табл. 1 и 2).

Таблица 1

Зависимость между количеством ступеней и диапазоном передаточных чисел коробок передач с непосредственным управлением

Количество ступеней	Диапазон передаточных чисел
4	3,922...4,105
5	3,181...5,724
6	3,292...6,453

Таблица 2

**Зависимость между количеством ступеней и диапазоном  
передаточных чисел коробок передач с автоматическим управлением**

Количество ступеней	Диапазон передаточных чисел
4	2,784...4,171
5	3,528...5,609
6	3,759...6,816
7	3,660...7,991
8	6,592...7,045

### Выводы

1. На легковых автомобилях классов А и В устанавливают шесть типов, классов С, D, E и F – 9–10 типов коробок передач. По мере перехода к более высоким классам легковых автомобилей количество устанавливаемых на них типов коробок передач возрастает.

2. На легковых автомобилях классов А, В и С наибольшее применение нашли механические коробки передач с непосредственным управлением, классов E и F – коробки передач с автоматическим управлением. В классе D оба типа коробок передач применяют примерно поровну. Вариаторы устанавливают на легковых автомобилях всех шести классов, причём их доля составляет от 3% в среднем классе до 13% в особо малом классе.

3. С переходом к более высоким классам легковых автомобилей количество ступеней увеличивается с четырёх до семи в коробках передач с непосредственным управлением, с четырёх до девяти в коробках передач с автоматическим управлением.

4. С увеличением количества ступеней верхний предел диапазона передаточных чисел возрастает как у коробок передач с непосредственным, так и с автоматическим управлением. Исключение составляют восьмиступенчатые коробки передач с автоматическим управлением.

5. Результаты исследования рекомендуется использовать в проектно-конструкторских организациях автомобильных предприятий для обоснованного выбора типов конструкций коробок передач и количества ступеней ступенчатых коробок передач для проектируемых легковых автомобилей.

### Библиографический список

1. **Тарасик, В.П.** Теория движения автомобиля: учеб. для вузов / В.П. Тарасик. – СПб: БХВ – Перербург, 2006. – 478 с.
2. **Кравец, В.Н.** Теория автомобиля: учеб. для вузов / В.Н. Кравец, В.В. Селифонов. – М.: Гринлайт+, 2011. – 884 с.
3. **Гришкевич, А.И.** Автомобили: теория: учеб. для вузов / А.И. Гришкевич. – Мн.: Вышэйш. шк., 1986. – 208 с.
4. **Литвинов, А.С.** Автомобиль: теория эксплуатационных свойств: учеб. для вузов по специальности «Автомобили и автомобил. хоз-во. – М.: Машиностроение, 1989. – 240 с.
5. Проектирование трансмиссий автомобилей: справ. / А.И. Гришкевич [и др.]; под общ. ред. А.И. Гришкевича. – М.: Машиностроение, 1984. – 268 с.
6. Основы конструкции современного автомобиля: учеб. пособие для вузов / А.М. Иванов [и др.]. – М.: За рулём, 2012. – 336 с.
7. **Кравец, В.Н.** Классификация транспортных средств: учеб. пособие / В.Н. Кравец, А.А. Хорычев. – Н. Новгород: НГТУ им Р.Е. Алексеева, 2008. – 96 с.
8. Характеристики автомобилей. [Электронный ресурс] URL: <http://www.autonet.ru>
9. Автокаталог (справочник автомобилей). [Электронный ресурс] URL: <http://www.drivernotes.net>
10. Технические характеристики автомобилей. [Электронный ресурс] URL: <http://www.avtomarket.ru>
11. Новости автомира. [Электронный ресурс] URL: <http://www.avnjrussia.ru>.

12. Каталог автомобилей. [Электронный ресурс] URL: <http://www.wroom.ru/cars>
13. Поисковая система. [Электронный ресурс] URL: <http://www.nizhniynovgorod/carsguru.net>
14. Энциклопедия автомобилей. [Электронный ресурс] URL: <http://www.autowp.ru>
15. Автомобильная социальная сеть. [Электронный ресурс] URL: <http://www.beamper.ru>

*Дата поступления  
в редакцию 09.01.2018*

**V.N. Kravets, R.A Musarsky, S.A. Volkov**

## **DEFINITION OF THE GEARBOXES PARAMETERS OF MODERN CARS**

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

**Purpose:** The purpose of the study was to identify design options and to establish the ratio of the volumes of cars in each of the six class's vehicles under investigation and the ratio between the number of stages and the range of transmission.

**Design/methodology/approach:** A theoretical framework is proposed based on the result of statistical analysis of the application of various gearbox designs on modern passenger cars of classes A, B, C, D, T, F.

**Findings:** The results of the study can be used in the design and engineering organizations of automobile enterprises for an informed choice of the types of gearbox designs and the number of stages of stepped gearboxes for the designed passenger cars.

**Research limitations/implications:** The results of the study are recommended to be used in the design organizations of automobile enterprises for an informed choice of the types of gearbox designs and the number of stages of stepped gearboxes for the designed passenger cars.

**Originality/value:** The study of models of cars produced in 2010-2015, while in published sources, there are data on cars produced in the 80-ies of the 19th century.

*Key words:* passenger car, gearbox with direct control, gearbox with automatic control, variator, number of steps of gearbox, range of gear transmission numbers.

УДК 629.3

С.М. Огороднов, П.С. Рогов, С.И. Малеев

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ  
ЧАСТНЫХ СКОРОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ**

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева

Проведен обзор существующих методов определения механической карты двигателей внутреннего сгорания, а именно, зависимостей крутящего момента от оборотов двигателя при различном уровне подачи топлива. Рассмотрены экспериментальные и расчетные методы. Перечислены основные достоинства и недостатки этих методов.

*Ключевые слова:* двигатель внутреннего сгорания, механическая карта, эксперимент, аппроксимация, крутящий момент.

В настоящее время подавляющее количество современных автомобилей оснащается двигателями внутреннего сгорания (ДВС) в основном двух типов – бензиновых и дизельных. Именно ДВС во многом определяют эксплуатационные свойства автомобиля (тягово-скоростные, топливной эффективности, количество выбросов вредных веществ).

Кроме того, современные представления о характере движения автомобиля в реальных условиях, основанные на вероятностном представлении параметров продольного макропрофиля дорог, распределениях скоростей движения на разных передачах в пределах маршрута движения по дороге с определенным типом продольного макропрофиля позволяют на ранних этапах проектирования определить возможные средние скорости движения по различным маршрутам, оптимальные скорости движения по критерию топливной эффективности, максимальную скорость движения и другие не менее значимые показатели эксплуатационных свойств.

Выбор ДВС для конкретной модели автомобиля и последующая оптимизация передаточных чисел трансмиссии с целью получения оптимальных показателей некоторых эксплуатационных свойств основан на исследовании определенных параметров и характеристик ДВС.

Одна из наиболее важных характеристик ДВС – его механическая карта, а именно, зависимость крутящего момента от оборотов двигателя при различных уровнях подачи топлива. Особенностью этой характеристики двигателя является возможность выполнения в дальнейшем аналитических исследований для определения эксплуатационных свойств автомобиля, основанных на использовании «частичных» характеристик ДВС, определяемых в настоящей работе как зависимости крутящего момента, мощности и некоторых других параметров от частоты вращения коленчатого вала при ограничении подачи топлива на определенном уровне.

Наиболее традиционным инструментом получения механической карты в процессе экспериментальных исследований является динамометрический стенд для испытаний двигателя. Так, в статье [1] приведена методика построения механической карты, с применением динамометрического стенда для испытаний двигателя. На основе полученных данных производится калибровка и оптимизация параметров двигателя для достижения улучшенных показателей топливной экономичности при соответствии требованиям к выбросам вредных веществ. При несомненных достоинствах такого метода на результаты эксперимента могут оказывать влияние особенности выполнения его циклов.

В некоторых случаях для получения необходимых характеристик могут применяться и другие, достаточно сложные способы проведения экспериментальных исследований. Например, в работе [2] для определения параметров механической карты ДВС используется стенд с беговыми барабанами, на которые устанавливается автомобиль (автотранс-

портная система, АТС). Этот способ позволяет получать в процессе испытаний фактические параметры. Испытание АТС с приводом от собственного двигателя при существенном упрощении конструкции стенда требует поддержки компьютерной системой обработки результатов. В работе отмечается, что при выполнении динамических испытаний (при резком нагружении дополнительным динамическим моментом) искажаются частичные характеристики. Искажение характеристики возможно и при статических испытаниях, также осуществляемых с использованием тормозных механизмов с фиксацией величины тормозного момента не менее 5 с. В этом случае в работе [2] предлагается методика расчета внешней и частичных характеристик двигателя, основанная на использовании экспериментально полученных величин максимальной мощности и соответствующей максимальной мощности частоте вращения коленчатого вала двигателя.

В работе предлагается методика расчета указанных характеристик, основанная на произвольной градации частичных режимов. Ступени градации принимаются в диапазоне  $0,3 \leq r \leq 1$ , причем  $r = 1$  соответствует внешней скоростной характеристике, а показатель частичной характеристики определяется выражением

$$r = \frac{n_r - n_x}{n_N - n_x} = \frac{N_r}{N_{\max}}, \quad (1)$$

где  $n_N, n_r$  – частоты вращения коленчатого вала двигателя при максимальной мощности ( $r = 1$ ) и при максимальной мощности на частичном режиме ( $r < 1$ ) соответственно;  $n_x$  – частота вращения коленчатого вала при холостом ходе.

Следующим шагом определяется максимальная частота холостого хода. При этом допускается ряд предположений, касающихся линейности вводимых коэффициентов коррекции максимальных оборотов холостого хода. В результате значения этих коэффициентов принимаются ориентировочно и в последующем уточняются по результатам фактических замеров, полученных в процессе испытаний. Зависимость мощности  $N(n, r)$  в режиме работы двигателя на частичных характеристиках и в диапазоне  $n_x \leq n \leq n_r$  строится на основании известной формулы Лейдермана. Для расчета характеристики мощности  $N(n, r)$  на участке  $n_r \leq n \leq n_{rxx}$  в анализируемой работе предлагается формула Лейдермана – Ходеса, подобная формуле Лейдермана, но позволяющая корректировать коэффициенты  $C_1$  и  $C_2$  дополнительно вводимыми коэффициентами, учитывающими параметры

$$\frac{n - n_x}{n_r - n_x}. \quad (2)$$

В результате предлагается, в соответствии с выражением

$$M = 9554 \frac{N}{n}, \quad (3)$$

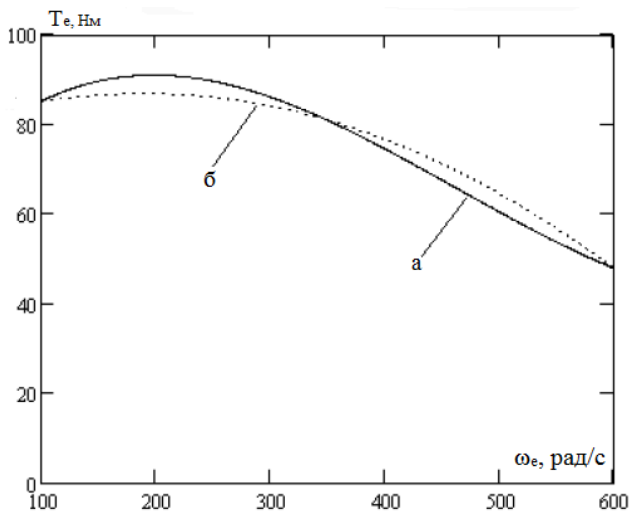
рассчитать параметры частичных характеристик, уточнив их в процессе дополнительных стендовых испытаний. Сложность и неоднозначность результатов вычисления частичных характеристик в этом случае очевидна. Описанный в указанной статье метод также подразумевает определенные аналитические вычисления.

В статье [3] приводится методика экспериментального определения параметров механической карты двигателя при движении автомобиля по смешанному циклу. Для этой цели используются средства бортовой диагностики автомобиля (OBD).

Для методов, указанных в работах [1] и [2], необходимо наличие специального динамометрического стенда. Кроме того, для методов, указанных в [2] и [3], необходимо, чтобы двигатель был установлен в существующий автомобиль. Во многих случаях при проектировании прорабатывается возможность установки на автомобиль нескольких конструктивных вариантов двигателей и выбор наиболее оптимального по заданным критериям для объекта проектирования. Таким образом, применение экспериментальных методов определения параметров механической карты ДВС, несмотря на значительные материальные затраты, является необходимой процедурой.

Существенное достоинство экспериментальных методов в достоверности получаемых результатов. Из недостатков следует отметить, что во всех трех указанных выше методах для проведения исследований необходимо присутствие объекта исследования, причем для достижения достоверности результатов проводить испытания для выборки, состоящей из нескольких двигателей. В этом случае достоверность результатов тем выше, чем больше объем выборки, т. е. достоверность результатов испытаний должна быть обеспечена увеличением их объемов и стоимости. Другой особенностью полученных результатов является существенная нелинейность экспериментальных характеристик. Во многих случаях использование характеристик двигателя в виде массива данных ограничено определенными соображениями. В этих случаях могут использоваться известные методики, позволяющие корректировать экспериментальные характеристики (методы аппроксимации).

Кроме экспериментальных и экспериментально-аналитических методов, предполагающих достаточно сложный и материально затратный процесс получения необходимых характеристик, в настоящее время существуют аналитические методы построения частичных характеристик. Их трудоемкость и затраты, связанные с реализацией невелики, поэтому развитие аналитических методов расчетов, указанных характеристик ДВС представляется целесообразным.



**Рис. 1. Частичные скоростные характеристики двигателя при 50%-ной подаче топлива:**  
а — полином 3-й степени, б — полином 2-й степени

нию поверхности  $T_e(\omega_e, \beta)$ , где  $\omega_e$  — обороты коленчатого вала;  $\beta$  — уровень подачи топлива, проходящий через массив точек, описывающий поверхность в координатах  $(T_e, \omega_e, \beta)$ . Поверхность создается участками двумерных сплайнов, являющихся функциями  $(\omega_e, \beta)$ , и имеющих непрерывные первые производные по обеим координатам. Это, по утверждению авторов, позволяет достаточно точно определять значение эффективного крутящего момента при любых уровнях подачи топлива и угловой скорости коленчатого вала.

Для большей наглядности сплайн-поверхность можно представлять в виде модели упругой пластины бесконечной протяженности деформируемой изгибом. Для построения поверхности, показанной на рис. 2, записываются достаточно сложные выражения функционалов гладкости, выражения для сплайн-функции в частных производных и из системы линейных выражений определяются значения коэффициентов  $c_i$  и  $C_N$  для уравнения (4), которое является полиномом аппроксимации частичных характеристик ДВС.

$$T_e(\omega_e, \beta) = \sum_{i=1}^N c_i r_i^2 \ln r_i^2 + C_{N+1} + C_{N+2} \omega_e + C_{N+3} \beta, \quad (4)$$

$$r^2 = (\omega_e - \omega_{e_i})^2 + (\beta - \beta_i)^2,$$

В работе [4] предложено математическое описание экспериментально полученных частичных скоростных характеристик двигателя с помощью интерполяционного полинома Лагранжа второго и третьего порядков, обеспечивающих высокую точность результатов. Режимы подачи топлива от 50 до 100% в этом случае описываются полиномом второго порядка, менее 50% — третьего порядка (рис. 1). Отмечено, что способ формирования возмущающего воздействия при исследовании динамических процессов в трансмиссии автомобиля, а именно, определение значения эффективного крутящего момента имеет большое значение.

В работе [5] предлагается способ определения частичных скоростных характеристик двигателей с помощью многомерной интерполяции, приводящей к построению



где  $T_e$  - текущее значение крутящего момента двигателя;  $C$  - аппроксимирующие коэффициенты;  $\omega_e$  - обороты коленчатого вала, соответствующие текущему значению крутящего момента;  $\omega_{ei}$  - обороты коленчатого вала, соответствующие значениям крутящего момента точек кривой частичной характеристики от 1 до  $N$ ;  $\beta$  - уровень подачи топлива, соответствующий текущему значению крутящего момента;  $\beta_i$  - уровень подачи топлива, соответствующий значениям крутящего момента точек кривой частичной характеристики от 1 до  $N$ .

Интерполяция сплайнами позволяет облегчить процесс численного интегрирования. По полученным экспериментальным данным функция интерполируется и строится функциональная зависимость описывающая поверхность, соответствующая различным значениям эффективного крутящего момента двигателя, в зависимости от уровня подачи топлива и оборотов коленчатого вала (рис. 2).

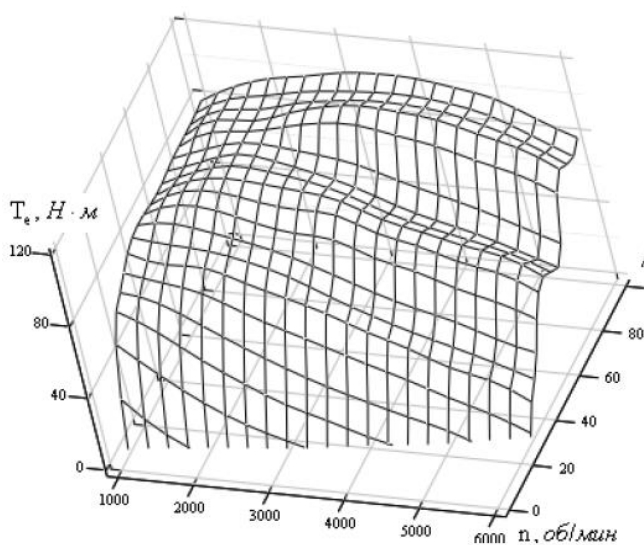


Рис. 2. Частичные скоростные характеристики двигателя

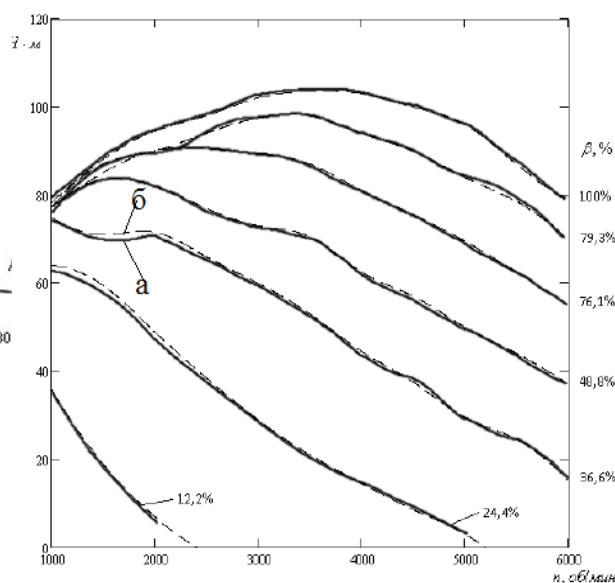


Рис. 3. Экспериментальные и расчетные частичные характеристики двигателя: а – экспериментальные; б – расчетные

Отмечено, что полученная аппроксимация частичных скоростных характеристик ДВС достаточно точно совпадает с экспериментально полученными зависимостями (рис. 3).

В работе [6] предлагается поиск номинальных значений крутящих моментов частичных характеристик двигателя по формуле

$$M_{eNi} = M_{eH} \frac{n_{Xi} - n_H}{n_X - n_H}, \tag{5}$$

где  $M_{eNi}$  - номинальные эффективные крутящие моменты частичных характеристик двигателя;  $M_{eH}$  - номинальный эффективный крутящий момент внешней скоростной характеристики двигателя;  $n_X$  - максимальная частота вращения вала двигателя;  $n_{Xi}$  - максимальная частота вращения вала двигателя на частичных характеристиках;  $n_H$  - номинальная частота вращения двигателя.

Определение промежуточных значений крутящих моментов частичных характеристик предлагается выполнять в соответствии с выражением

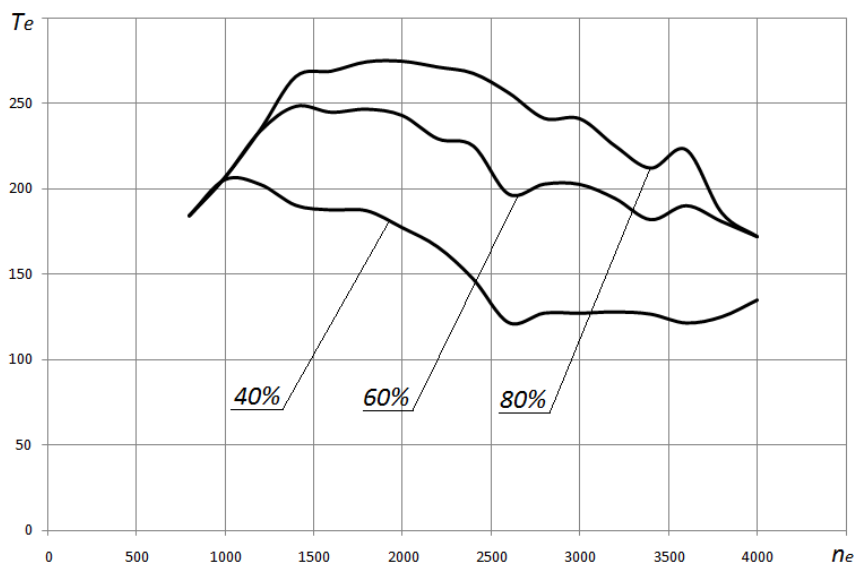
$$M_{ei}(n) = M_{eNi} \left( \frac{n_{Xi} - n}{n_{Xi} - n_H} \right), \tag{6}$$

где  $M_{ei}(n)$  - промежуточное значение крутящего момента частичных характеристик ДВС;  $n$  - частота вращения двигателя, соответствующая промежуточному значению крутящего момента.

Очевидно, что рассматриваемый метод [6] предполагает масштабирование кривой

внешней скоростной характеристики двигателя и использование характера кривой изменения крутящего момента при построении частичных характеристик.

В современных ДВС с электронной системой управления подачей топлива частичные характеристики крутящего момента имеют достаточно сложный аналитически предсказуемый вид. При различном уровне подачи топлива характер кривой зависимости момента от оборотов двигателя изменяется сложным образом. Вид реальных частичных характеристик современного дизельного ДВС показан на рис. 4. Поэтому при аналитическом определении параметров механической карты современных ДВС аппроксимация кривых полиномами третьего порядка или их масштабирование с большой долей вероятности не позволит получить достоверный результат.



**Рис. 4. Частичные характеристики современного дизельного ДВС при 40, 60 и 80%-ном уровне подачи топлива**

В данной статье будет проведен общий вероятностный анализ механической карты дизельного двигателя с целью поиска новых подходов к аналитическому определению частичных характеристик современных двигателей.

В результате исследования методов моделирования частичных скоростных характеристик установлено, что существующие методы можно разделить на экспериментальные (исследовательские) и расчетно-экспериментальные. В первом случае скоростные характеристики строятся по результатам испытаний двигателя на стенде, а затем аппроксимируются с применением известных методов. Во втором в процессе лабораторного эксперимента определяются значения нескольких точек внешней скоростной характеристики, по которым, в соответствии с некоторыми аналитическими зависимостями, строятся частичные характеристики.

Аналитические методы построения частичных характеристик во многих случаях требуют определения коэффициентов с неопределенным физическим смыслом, что делает их использование затруднительным при проведении инженерных расчетов. К тому же экспериментальное определение нескольких точек внешней скоростной характеристики требует полноценной подготовки эксперимента, а невозможность получения частичных характеристик в необходимом количестве, скорее всего, объясняется техническими особенностями стенда и оборудования.

Наиболее оптимальным способом получения частичных характеристик, по мнению авторов настоящей статьи, является полноценный натурный эксперимент. В этом случае наиболее сложный момент – аппроксимация полученных характеристик методом, обеспечивающим использование аппроксимирующих зависимостей для решения некоторых конкретных задач исследования динамики автомобиля.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках проекта "Создание высокотехнологичного производства безопасных экспортоориентированных автомобилей ГАЗ с элементами автономного управления и возможностью интеграции с электроплатформой на базовых компонентах российского производства" по договору №03.G25.31.0270 от 29.05.2017 г. (постановление Правительства Российской Федерации от 09 апреля 2010 года №218).

#### Библиографический список

1. **Barker, T.D.** Engine mapping techniques // Int. J. of Vehicle Design. – 1982. – V. 2. – № 3. – P. 142–152.
2. **Ходес, И.В.** Расчетно-экспериментальное определение внешней и частичных характеристик двигателя при испытании на стенде с приводом от собственного двигателя автотранспортной системы / И.В. Ходес, О.А. Бажин, С.В. Шелухин // Вестник СибАДИ. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2010. – С. 30–32.
3. **Bishop, J.** Engine maps of fuel use and emissions from transient driving cycles / J. Bishop [et al.] // Applied Energy. – 2016. – №183. – P. 202–217.
4. **Лукин, П. П.** К гармоническому анализу частичных скоростных характеристик карбюраторного двигателя / П. П. Лукин, Н. С. Соломатин // Надежность и активная безопасность автомобиля: сб. научных трудов МАМИ. – М.: МАМИ, 1985. – С. 270–282.
5. **Соломатин, Н. С.** Аппроксимация частичных скоростных характеристик двигателя внутреннего сгорания / Н. С. Соломатин, А. Г. Заморин, Е. М. Зотов // Изв. МГТУ МАМИ. – 2010. – №1. – С. 66–72.
6. **Бояркина, И. В.** Методика аналитического расчета частичных скоростных характеристик крутящего момента и часового расхода топлива двигателей внутреннего сгорания // Ориентированные фундаментальные и прикладные исследования - основа модернизации и инновационного развития архитектурно-строительного и дорожно-транспортного комплексов России: Всерос. научно-технич. конф. – Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2011. – С. 481–485.

*Дата поступления  
в редакцию 30.01.2018*

**S.M. Ogorodnov, P.S. Rogov, S.I. Maleev**

#### EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL METHODS FOR DETERMINATION OF PARTIAL VELOCITY CHARACTERISTICS OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES

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

**Purpose:** Analysis of known experimental and analytical methods for determination of the parameters of an internal combustion (IC) engine mechanical map.

**Design/methodology/approach:** Comparison of the effectiveness of the methods was carried out taking into account the reliability of the results, complexity of the approaches, necessary initial data and costs of experimental equipment.

**Findings:** Existing analytical methods for determination of the parameters of an IC engine mechanical map are not accurate enough to determine the characteristics of modern IC engines equipped with an electronic fuel control system.

**Research limitations/implications:** The present study provides a starting-point for further research in the field of analytical determination of the parameters of an internal combustion (IC) engine mechanical map.

**Originality/value:** The study can be useful for choosing the most suitable method of an internal combustion (IC) engine mechanical map parameters determination and for assessing of the accuracy of the calculation of the traction and speed properties of vehicles.

*Key words:* internal combustion engine, mechanical map, experiment, approximation, torque.

УДК 629.5.06

В.И. Рудницкий, А.В. Рудницкий

**СТОХАСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ЗНАЧИМОСТИ НАДЁЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ СУДОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева

Изложен метод оценки значимости надёжности элементов судового оборудования с помощью математического моделирования.

*Ключевые слова:* стохастическая модель, надёжность, судовое оборудование, вероятность безопасности плавания, вероятность обитаемости.

Эксплуатационная готовность судна, то есть возможность использовать его по назначению, зависит от уровня надёжности судового оборудования (энергетической установки, судовых устройств, вспомогательных механизмов). Эксплуатационную готовность будем рассматривать с позиций обеспечения безопасности плавания и обитаемости судна [1]. Элементы судового оборудования не все равнозначны по своей безотказности. Уровень безотказности в значительной степени определяет объём информации (состав и количество контролируемых параметров), которые необходимо получить от каждого элемента судового оборудования для оценки технического состояния в целях прогнозирования технических обслуживания и ремонтов, а, в конечном итоге, в целях обеспечения эксплуатационной готовности судна. Кроме того, рассматривая значимость какого-либо элемента судового оборудования в обеспечении безопасности плавания или обитаемости судна (с позиций надёжности-безотказности), можно также оценить объём необходимой информации о его работе.

Таким образом, чёткое знание значения каждого элемента судового оборудования для достижения главных целей функционирования (безопасность плавания и обитаемость судна) позволит, с одной стороны, сформулировать требования к надёжности (безотказности) каждого элемента, а с другой – определить для каждого элемента, исходя из его значимости, необходимый объём информации о работе и техническом состоянии, который явится основанием для разработки систем управления, контроля и определения степени их автоматизации в зависимости от продолжительности периода безвахтенной работы, то есть без постоянного присутствия персонала.

Для оценки значимости элементов судового оборудования могут быть использованы различные критерии, например, экономичности, функциональности, надёжности. Однако принципиально необходим один подход - измеряется влияние частного на общее.

**Стохастическая модель функционирования элементов судового оборудования**

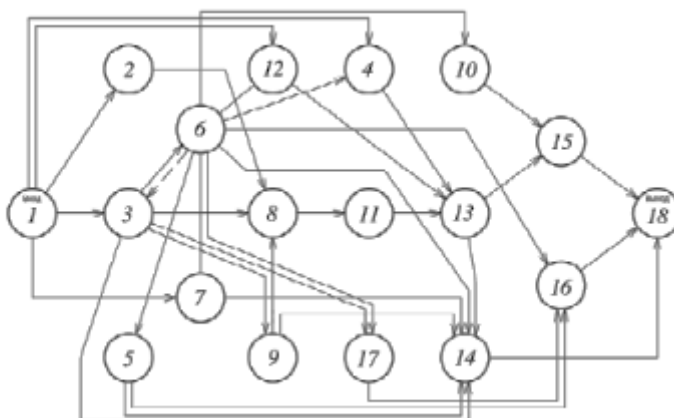
Функциональную значимость каждого элемента судового оборудования будем определять с помощью разработанной нами стохастической модели [1–3]. Термин «судовое оборудование» конкретизируем – судовая энергетическая установка.

Модель функционирования судовой энергетической установки (СЭУ) разработана по таким параметрам, как интенсивность отказов и период безвахтенной работы с использованием теории графов. На рис. 1 представлен граф функционирования СЭУ, ориентированный относительно двух главных целей: безопасность плавания 15 и обитаемость судна 16.

Граф функционирования СЭУ описывает реальный состав элементов установки с частичным резервированием. Система сжатого воздуха 3 и судовая электростанция 6 имеют внутреннее резервирование, которое может учитываться при разработке модели на более низкой ступени иерархии СЭУ.

Модель разработана на уровне целых комплексов механизмов, устройств и систем,

что сделано для упрощения математического описания и допустимо при рассмотрении в СЭУ в целом.



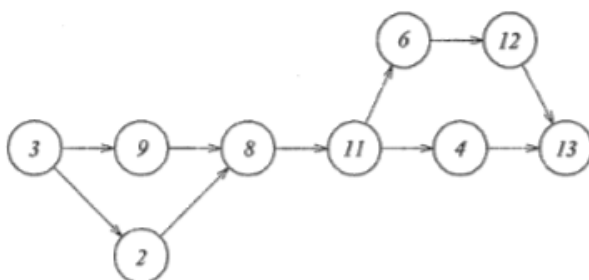
**Рис. 1. Граф функционирования СЭУ:**

1 – входной элемент графа; 2 – ручное управление главным двигателем; 3 – система сжатого воздуха; 4 – система управления ДРК; 5 – котельная установка; 6 – судовая электростанция; 7 – противопожарная система; 8 – главный двигатель; 9 – система дистанционно-автоматизированного управления (ДАУ) главного двигателя; 10 – балластно-осушительная система; 11 – передача мощности от главного двигателя к движителю; 12 – аварийный привод ДРК; 13 – движительно-рулевой комплекс (ДРК); 14 – система контрольно-измерительных приборов; 15 – безопасность плавания; 16 – обитаемость судна; 17 – система санитарной водоподготовки; 18 – выходной элемент графа

При необходимости моделирования СЭУ более подробно представленная модель может быть дополнена отдельными моделями (графами), ориентированными относительно целей, которые стоят перед каждым отдельным комплексом устройств и систем. В этом случае предлагаемый принцип моделирования будет сохранен.

Для количественной оценки функционирования СЭУ взят вероятностный показатель. Вероятность обеспечения хода и маневрирования судна, исходя из рис. 2 будет иметь вид

$$P_{х.м} = P_3 P_8 P_{11} [1 - q_4 (1 - P_6 P_{12})] P_{13} [1 - q_2 q_9].$$



**Рис. 2. Граф обеспечения хода и маневрирования судна**

Вероятность обеспечения непотопляемости, исходя из рис. 3, получим в виде

$$P_n = P_3 P_6 P_{10}.$$



**Рис. 3. Граф обеспечения безопасности плавания судна**

Вероятность обеспечения безопасности плавания судна в целом будет

$$P_{об.п} = P_{х.м}P_n = P_3^2 P_6 P_{10} P_8 P_{11} P_{13} (P_4 + P_6 P_{12} - P_4 P_6 P_{12}) (P_2 + P_9 - P_2 P_9). \quad (1)$$

Согласно рис. 4, вероятность обеспечения нормальной обитаемости судна будет иметь вид

$$P_{об} = P_3 P_6 (1 - q_5 q_{17}) = P_3 P_6 (P_5 + P_{17} - P_5 P_{17}). \quad (2)$$

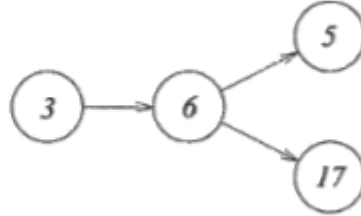


Рис. 4. Граф обеспечения нормальной обитаемости судна

Учитывая постоянство интенсивности отказов элементов СЭУ в период установившейся эксплуатации, выражения (1) и (2) для вероятности безопасности плавания и обитаемости судна будут определяться следующим образом:

$$P_{об.п} = e^{-(2\lambda_3 + \lambda_6 + \lambda_{10} + \lambda_8 + \lambda_{11} + \lambda_{13})t} [e^{-\lambda_4 t} + e^{-(\lambda_6 + \lambda_{12})t} - e^{-(\lambda_4 + \lambda_6 + \lambda_{12})t}] [e^{-\lambda_2 t} + e^{-\lambda_3 t} - e^{-(\lambda_2 + \lambda_4)t}], \quad (3)$$

$$P_{об} = e^{-(\lambda_3 + \lambda_6)t} [e^{-\lambda_5 t} + e^{-\lambda_{17} t} - e^{-(\lambda_5 + \lambda_{17})t}], \quad (4)$$

где  $\lambda = 1/T_{ср}$  — интенсивность отказа элемента СЭУ (индексы при  $\lambda$  соответствуют цифрам вершин графа на рисунках);  $T_{ср}$  — средняя наработка между отказами;  $t$  — период безвахтенной работы СЭУ (необслуживаемого периода).

Под отказом в данном случае (при решении поставленной задачи) мы понимаем отклонение от нормальной работы, требующее вмешательства экипажа.

Из приведённых выражений  $P_{об.п}(t)$  и  $P_{об}(t)$  видно, что математическая модель функционирования СЭУ представляет собой зависимость вероятности достижения главных целей, для которых предназначена установка, от безотказности её элементов и периода её безвахтенной работы.

### Метод исследования значимости надёжности элементов судового оборудования

Для определения функциональной значимости каждого элемента в отдельности используем разработанную нами модель функционирования СЭУ. Исследования заключаются в получении зависимостей  $P_{об.п} = f(\lambda_i)$  и  $P_{об} = f(\lambda_i)$  для того элемента, значимость которого определяется.

Приведем алгоритм исследования значимости:

1. Для каждого элемента берутся характеристики надёжности: средняя наработка между отказами  $T_{ср}$  или интенсивность отказов  $\lambda = 1/T_{ср}$ . При проектировании СЭУ количественные значения этих характеристик берутся для оборудования, которое находится в эксплуатации и по нему накоплена статистика по надёжности. Если же оборудование спроектировано специально для разрабатываемого судна, то используются данные по надёжности оборудования, находящегося в эксплуатации и близкого к спроектированному по основным параметрам и условиям эксплуатации.

2. Для всех элементов количественные значения интенсивности отказов берутся постоянными.

3. Для элемента, значимость которого исследуется, задаются несколькими количественными значениями интенсивности отказов  $\lambda_i$ , варьируя от вычисленного ранее его значения в большую или меньшую сторону.

4. Время периода безвахтенной работы  $t$  принимается постоянной величиной.

5. Исследование значимости для каждого элемента проводится для нескольких значений времени периода безвахтенной работы  $t$ .

6. Исследования значимости проводится в указанной ранее последовательности для всех элементов СЭУ.

В результате исследований для каждого элемента получают зависимости  $P_{б.п} = f(\lambda_i)$  и  $P_{об} = f(\lambda_i)$  при нескольких значениях  $t$ . Из анализа выражений (3) и (4) видно, что указанные зависимости представляют собой убывающую функцию типа  $y = e^{-x}$ .

### Результаты оценки значимости надёжности элементов судового оборудования

На рис. 5 – рис. 8 представлены результаты исследования значимости элементов энергетической установки в обеспечении безопасности плавания и обитаемости судна. Исследования выполнены применительно к составу оборудования речного сухогрузного судна типа «Волго-Дон» (рис. 1). При этом использовались известные за длительную эксплуатацию статистические данные по надёжности основного энергетического оборудования, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Наименование элемента СЭУ	$T_{ср}, ч$
Главный двигатель	150-500
Передача мощности	150-200
Двигательно - рулевой комплекс (ДРК)	2400-7200
Ручное управление главным двигателем	2400-7200
Система ДАУ главного двигателя	350-600
Система управления ДРК	100-300
Аварийный привод ДРК	100-300
Судовая электростанция	400-500
Система сжатого воздуха	300-600
Котельная установка	100-150
Противопожарная система	2400-7200
Балластно – осушительная система	2400-7200
Система контрольно измерительных приборов	300-600
Система санитарной водоподготовки	2400-7200

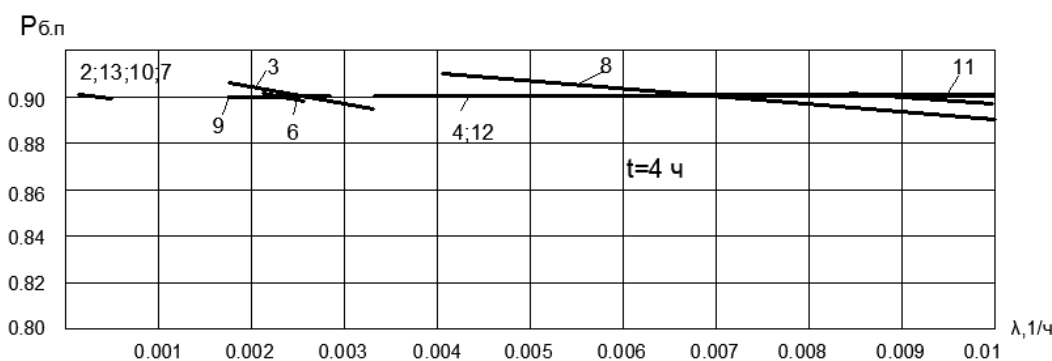


Рис. 5. К исследованию значимости элементов СЭУ в обеспечении безопасности плавания периода безвахтенной работы 4 ч

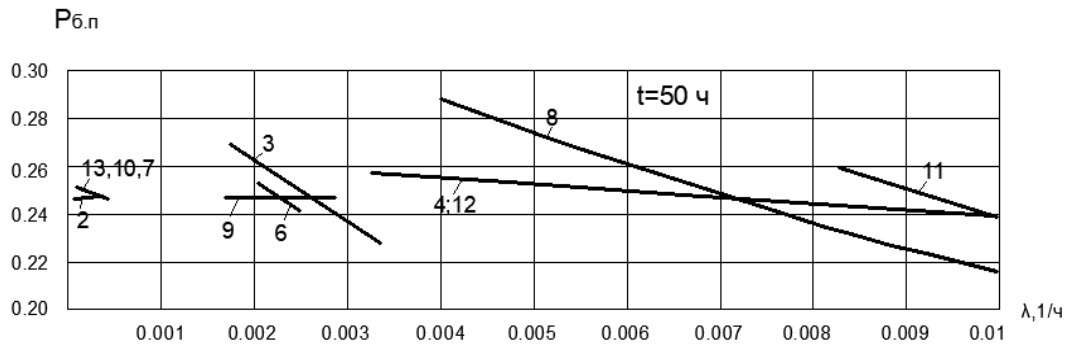


Рис. 6. К исследованию значимости элементов СЭУ в обеспечении безопасности плавания периода безвахтенной работы 50 ч

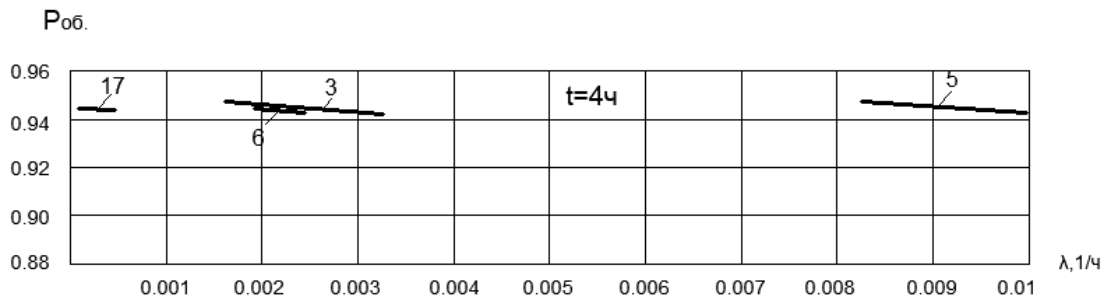


Рис. 7. К исследованию значимости элементов СЭУ в обеспечении обитаемости периода безвахтенной работы 4 ч

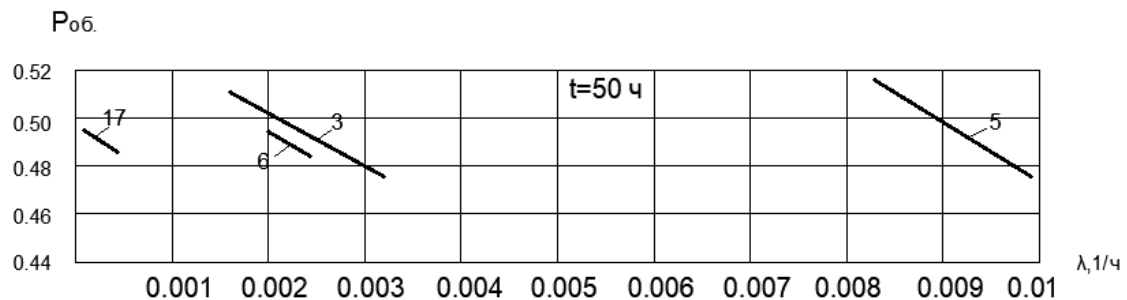


Рис. 8. К исследованию значимости элементов СЭУ в обеспечении обитаемости периода безвахтенной работы 50 ч

Характер полученных зависимостей показывает, что с увеличением интенсивности отказов каждого элемента вероятность безопасности плавания или обитаемости судна уменьшается в большей или меньшей степени. Для некоторых элементов, как видно из рис. 5, эти вероятности практически остаются постоянной величиной. Отмеченная закономерность наблюдается при разном времени периода безвахтенной работы, но только проявляется в большей или меньшей степени, т.е. значимость элементов изменяется с изменением периода безвахтенной работы.

Отмеченные свойства функций  $P_{б.п} = f(\lambda_i)$  и  $P_{об} = f(\lambda_i)$  позволяют в качестве критерия оценки значимости  $i$ -го элемента принять производную вероятности безопасности плавания судна (или вероятности обитаемости судна) по его интенсивности отказов, т.е.

$$P_{б.п} = f(\lambda_i) = \lim_{\Delta\lambda_i \rightarrow 0} \frac{\Delta P_{б.п}}{\Delta\lambda_i}. \quad (5)$$

Этот критерий оценки будем называть коэффициентом значимости  $i$ -го элемента СЭУ и обозначим его

$$K_{3i}^{б.п} = \frac{dP_{б.п}}{d\lambda_i} \quad (6)$$



для случая, когда исследуется значимость  $i$ -го элемента для обеспечения безопасности плавания судна, и для обеспечения обитаемости судна.

$$k_{zi}^{об} = \frac{dP_{об}}{d\lambda_i}. \quad (7)$$

Рассмотрим свойства коэффициента значимости.

- при  $\Delta\lambda_i = 0$   $k_{zi} = \frac{dP}{d\lambda_i} = \infty$ ;
- при  $\Delta P = 0$   $k_{zi} = \frac{dP}{d\lambda_i} = 0$ .

Таким образом, для экстремальных условий, когда, например, вероятность безопасности плавания или обитаемости судна не зависит от надежности какого-то  $i$ -го элемента, его  $k_{zi} = 0$ .

Случай, когда вероятность безопасности плавания или обитаемости судна увеличивается без изменения надежности  $i$ -го элемента ( $\Delta\lambda=0$ ), практически не имеет смысла, т.е.  $k_{zi} = \infty$ .

Для практического вычисления коэффициентов значимости каждого элемента по результатам исследований можно пользоваться выражениями:

$$k_{zi}^{б,п} = \left| \frac{P_{б,п}^{(1)} - P_{б,п}^{(2)}}{\lambda_i^{(1)} - \lambda_i^{(2)}} \right|; \quad (8)$$

$$k_{zi}^{об} = \left| \frac{P_{об}^{(1)} - P_{об}^{(2)}}{\lambda_i^{(1)} - \lambda_i^{(2)}} \right|. \quad (9)$$

Такая запись выражений (8) и (9) принята ввиду того, что для оценки значимости нас интересует абсолютная величина  $k_{zi}^{б,п}$  и  $k_{zi}^{об}$ .

По результатам вычисления  $k_{zi}^{б,п}$  и  $k_{zi}^{об}$  можно сделать выводы о значимости элементов СЭУ, проводя их сравнению. Чем больше  $k_{zi}^{б,п}$  и  $k_{zi}^{об}$ , тем более значим  $i$ -й элемент СЭУ в обеспечении безопасности плавания или обитаемости судна. Анализ результатов исследования значимости элементов СЭУ в обеспечении безопасности плавания судна типа "Волго-Дон" (рис. 5–6) показывает, что наибольшее влияние оказывает: комплекс главный двигатель 8 – передача мощности 11 – ДРК 13,; судовая электростанция 6; система сжатого воздуха 3.

Для перечисленных элементов определены коэффициенты значимости в зависимости от периода безвахтенной работы, величины которых даны в табл. 2.

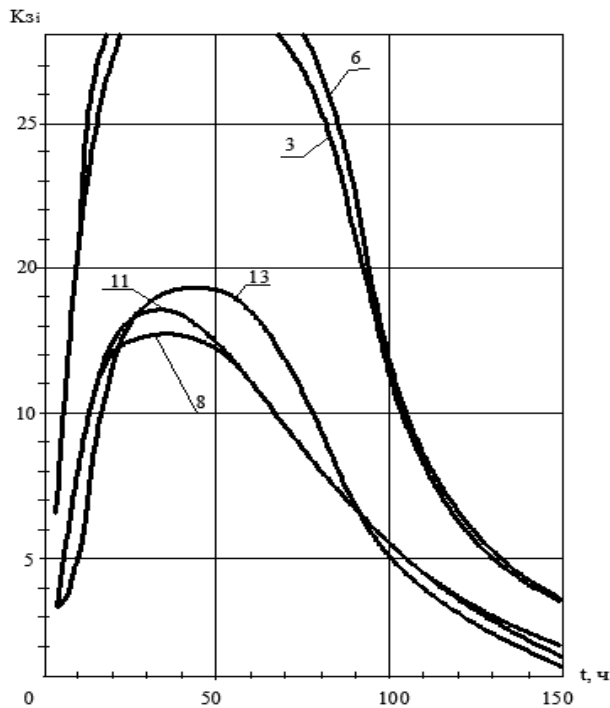
Таблица 2

Наименование элемента СЭУ	$k_{zi}^{б,п}$					
	4 ч	8 ч	25 ч	50 ч	100 ч	150 ч
Главный двигатель	3,38	6,40	12,50	12,30	5,50	2,04
Передача мощности	3,40	6,25	13,40	12,30	5,60	1,65
Двигательно-рулевой комплекс	3,30	4,34	13,30	14,30	5,00	1,33
Судовая электростанция	6,60	12,60	25,40	25,60	11,60	3,60
Система сжатого воздуха	7,30	12,20	24,80	24,60	11,00	3,56

По данным этой таблицы построены зависимости коэффициентов значимости от периода безвахтенной работы (рис. 9).

Анализируя представленные зависимости, нужно еще раз подчеркнуть, что значи-

мость элементов СЭУ изменяется с изменением периода безвахтенной работы. Характер зависимостей  $k_{zi} = f(t)$  показывает, что для определенного периода безвахтенной работы значимость некоторых элементов СЭУ проявляется в наибольшей степени. Так, для периодов безвахтенной работы 25 и 50 ч наибольшую значимость в обеспечении безопасности плавания имеют судовая электростанция и система сжатого воздуха.



**Рис. 9. Зависимость коэффициента значимости элемента СЭУ от периода безвахтенной работы.**

Таким образом, вспомогательные элементы, от которых зависит функционирование средств управления, контроля и автоматизации и, следовательно, возможность обеспечить безопасность плавания судна при малочисленном экипаже, играют решающую роль при увеличении периода безвахтенной работы. Поэтому обоснованным будет вывод о том, что при создании речного судна с периодом безвахтенной работы энергетической установки более 8 ч необходима развитая система автоматизированного управления и контроля за работой судовой электростанции и системы сжатого воздуха.

Сравнение  $k_{zi}$  разных элементов дает возможность выделить главные и провести обоснованную классификацию, т.е. построить иерархию значимостей элементов СЭУ. Это позволяет обосновать требования к информативности (количеству и составу контролируемых параметров) каждого элемента СЭУ для разработки судовых систем контроля с различной степенью автоматизации в зависимости от времени периода безвахтенной работы и количества экипажа.

### Выводы

Предлагаемый метод оценки значимости надёжности элементов судового оборудования позволяет:

- обосновать объем необходимой информативности каждого элемента и по экономическим показателям проводить сравнение вариантов, соответствующих разным периодам безвахтенной работы (при разном составе экипажей). Период безвахтенной работы фактически определяет степень автоматизации судовых систем контроля;

- обосновать требования к надежности (безотказности) судового оборудования на этапе проектирования при известном  $k_{zi}$  для каждого  $i$ -го элемента.

Разработанный метод может быть реализован при оптимизации и нормировании надежности и разработке средств оценки технического состояния судового оборудования.

#### Библиографический список

1. Рудницкий, А.В. Моделирование функционирования судового оборудования с позиций надёжности (безотказности) // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер. Морская техника и технология. – Астрахань: АГТУ, 2011. – С. 63–66.
2. Клейнрок, Л. Теория массового обслуживания / Л. Клейнрок. – М.: Книга по требованию, 2013. – 429 с.
3. Половко, А.М. Основы теории надёжности / А.М. Половко, С.В. Гуров. – М.: BHV, 2008. – 704 с.

*Дата поступления  
в редакцию 31.01.2018*

**V.I. Rudnitsky, A.V. Rudnitsky**

### **STOCHASTIC MODELS FOR ASSESSING THE SIGNIFICANCE OF THE RELIABILITY OF ELEMENTS OF SHIP EQUIPMENT**

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

**Subject:** The method for assessing the significance of the reliability of ship equipment elements using mathematical modeling is described.

**Methods:** The development of the model of the functioning of ship equipment from the viewpoint of ensuring the safety of the vessel's navigation and ensuring the habitation of the vessel uses graph theory. Assessment of the importance of elements of ship equipment to ensure the safety of the vessel's navigation and ensure the dwelling of the vessel is carried out from the standpoint of the reliability (safety) of each element. The general theory of reliability and queuing theory are used.

**Results:** It is shown that with sufficient accuracy for engineering calculations it is possible to consider the flow of failures of elements of ship equipment as the simplest. The developed method for assessing the significance of the reliability of elements of ship equipment can be implemented in the optimization and normalization of reliability and the development of means for assessing the technical condition of ship equipment.

*Key words:* stochastic model, reliability, ship equipment, probability of safe navigation, probability of habitation.

УДК 621.785

Д.А. Рябов<sup>1</sup>, А.А. Хлыбов<sup>1</sup>, К.А. Минков<sup>2</sup>**О ПЕРСПЕКТИВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ВОДО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ  
ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ МОЛОТОВЫХ ШТАМПОВ**Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева<sup>1</sup>,  
ПАО «Русполимет»<sup>2</sup>

Представлены результаты анализа водо-воздушного метода охлаждения молотовых штампов при термической обработке. Показана необходимость применения контролируемой охлаждающей среды с целью получения однородных структурных составляющих штамповых сталей по всему объему изделий, а также уменьшения остаточных напряжений и деформаций, образовавшихся из-за температурных градиентов при охлаждении.

*Ключевые слова:* водо-воздушное охлаждение, термическая обработка, молотовые штампы, 5ХНМ.

Тенденция развития современного машиностроительного комплекса связана с поиском путей оптимизации и совершенствования технологических процессов, направленных на экономическую минимизацию затрат при повышении качества выпускаемой продукции. Промышленное производство штампового инструмента не стало исключением. Штампы для горячей объемной штамповки (т.е. деформирующие металл в горячем состоянии при ударном нагружении) работают в тяжелых условиях многократного воздействия высоких нагрузок и температур. Основные причины выхода из строя штампового инструмента: пластическая деформация, хрупкое разрушение, растрескивание и износ рабочей поверхности, образование разгарных трещин. При выборе материалов необходимо учитывать, что штамповые стали должны отличаться высокими физико-механическими свойствами, сочетая прочность с ударной вязкостью, износостойкостью, прокаливаемостью, теплостойкостью, теплопроводностью. Кроме того, они должны обладать высокой разгаростойкостью, т.е. способностью выдерживать многократные нагревы и охлаждения без образования сетки трещин (сетки разгара) и сохранять эти свойства при повышенных температурах [1]. Достижение указанных свойств – повышение качества штампов, снижение производственных затрат, решение задач экологии – возможно созданием новых технологий и технических решений является актуальной задачей.

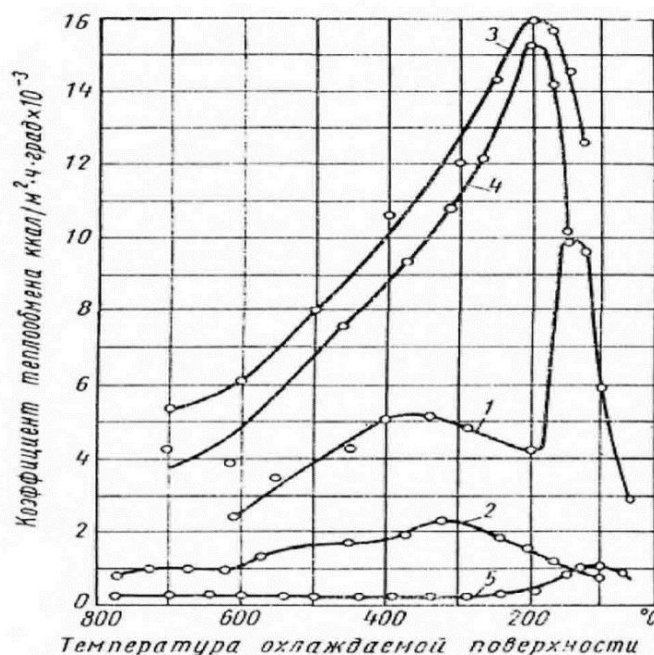
К числу наиболее распространенных сталей, используемых для изготовления штампов, относятся теплостойкие легированные инструментальные стали марок 5ХНМ и 4Х5МФС. Эти стали должны удовлетворять следующим характеристикам: твердость HRC 40...45, KCU = 30...45 Дж/см<sup>2</sup>, что достигается получением структуры тросто-сорбита, упрочненной карбидами с карбидной неоднородностью не более 4 балла по шкале 5 ГОСТ 801 [5; 6].

Для достижения требуемых свойств выполняется закалка с последующим отпуском [2-5]. Наиболее сложная задача – выбор охлаждающих сред при закалке, так как при охлаждении штампов требуется создание температурных полей, отличающихся для разных температурных диапазонов и для различных частей штампов.

На рис. 1 показано изменение коэффициента теплообмена для некоторых наиболее распространенных охлаждающих сред в различных температурных диапазонах.

При охлаждении в воде из-за ее кипением на горячей поверхности интенсивность охлаждения изменяется с понижением температуры поверхности изделий. Процесс охлаждения характеризуется наличием нескольких периодов (стадий): пленочное кипение, пузырьковое кипение, конвективный теплообмен. Для высоких температур, когда требуется более высокая скорость охлаждения штампов, образуется тонкая газовая пленка, препятствующая теплообмену, и скорость охлаждения изделий невелика. Высокая охлаждающая способность в интервале температур мартенситного превращения характеризуется большой вероятностью

возникновения трещин и деформаций, что ограничивает применение воды в качестве охлаждающей среды при закалке штампов.



**Рис. 1. Зависимость коэффициента теплообмена от температуры охлаждаемой поверхности:**

- 1 – вода 15°C; 2 – масло 20°C; 3 – спрейерное охлаждение,  $P_{\text{вод}} = 1,0$  ат,  $Q = 350 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; 4 – водо-воздушное охлаждение,  $P_{\text{вод}} = 2,5$  ат,  $P_{\text{возд}} = 1,5$  ат; 5 – водо-воздушное охлаждение,  $P_{\text{вод}} = 0,5$  ат,  $P_{\text{возд}} = 4$  ат

При закалке штампов в качестве охлаждающей среды обычно используется масло. Несмотря на широкое применение традиционных термических операций, закалка в масло имеет значительные недостатки: недостаточная охлаждающая способность в интервале температур перлитного превращения, высокая стоимость, пожароопасность, загазованность помещений и т.д. Закалка в масле не позволяет получить высокую твердость и прокаливаемость для штампов массой более 1 т [2].

В процессе работы масло окисляется, густеет и его охлаждающая способность снижается. При повышении вязкости более 40 % от первоначального значения масло следует заменить свежим. Требуется регулярно контролировать вязкость масла и наличие смол. Кроме того, после закалки в масле требуется промывка. Этот метод трудоемкий и дорогой, наносит вред экологии. А возникающие в объеме изделия при охлаждении в масле значительные температурные и структурные градиенты приводят к появлению остаточных напряжений и деформаций.

Попытки заменить масло привели к разработке весьма большого числа новых закалочных сред, представляющих водные растворы различных веществ с регулируемой в широком диапазоне охлаждающей способностью.

Решение задачи поиска новых технологий и конструкторских исполнений, необходимых для устранения проблем при изготовлении штампов, было предложено Д. В. Будриным и В. М. Кондратовым еще в 60-х годах прошлого столетия [7]. Особенность предложенной технологии заключается в использовании в качестве закалочной среды водо-воздушной смеси, позволяющей осуществлять контролируемое охлаждение на разных температурных этапах термического процесса.

Применение систем водо-воздушного охлаждения дает следующие преимущества:

- получать уровень свойств в стальных изделиях существенно выше, чем при охлаждении в ранее используемых охладителях, за счет регулируемого охлаждения в опреде-

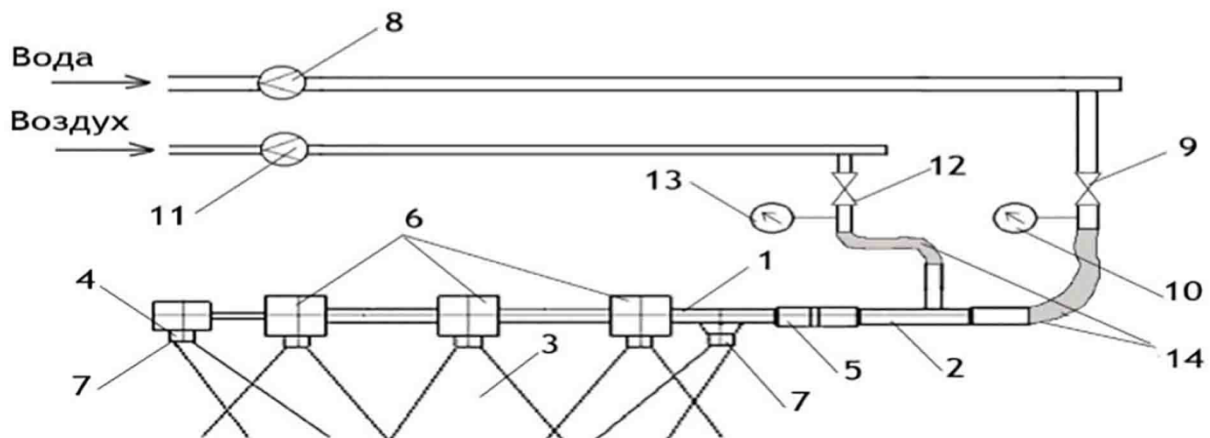
ленных температурно-временных условиях, минимизируя остаточные и временные напряжения;

- устранять вероятность трещинообразования и коробления;
- решать все экологические проблемы;
- получать более значительную экономическую эффективность в результате уменьшения капитальных и эксплуатационных затрат;
- снижать существенно себестоимость термообработки [8].

Конструкция и параметры устройства водо-воздушного охлаждения позволяют осуществить обработку по стандартной технологии закалки с отпуском с интенсивностью охлаждения как в существующих закалочных средах (масло, вода), так и реализовать новые, высокоэффективные технологии, такие как:

- закалка на режимах дифференцированного охлаждения. Такая технология обеспечивает существенно более высокий уровень механических и служебных характеристик;
- закалка с самоотпуском (охлаждение деталей прерывается при температуре самоотпуска). При такой технологии исключается из технологической цепочки необходимость проведения достаточно энерго- и финансовозатратной операции отпуска деталей после закалки. Это существенное снижение себестоимости при сохранении высокого качества деталей. При проведении закалки с самоотпуском на режимах дифференцированного охлаждения также будет иметь место и более высокий по сравнению с существующими технологиями уровень механических свойств [9].

Пример конструктивной реализации процесса управляемого охлаждения приведен на рис. 2. Для подачи смесей на охлаждаемую поверхность используют форсунки высокого и низкого давления. Такое охлаждение по своей закалывающей способности близко к охлаждению в масле, но в ряде случаев удобнее, например, для закалки изделий из легированных сталей при индукционном нагреве, когда охлаждение погружением в ванну в большинстве случаев невозможно. При водо-воздушном охлаждении поверхность изделия омывается водяной пылью, что исключает перегрев жидкости и образование паровой рубашки.



**Рис. 2. Схема установки водовоздушного охлаждения:**

- 1 – корпус; 2 – смеситель; 3 – водо-воздушный факел; 4 – форсунка; 5 – соединитель для изменения длины и/или вставки диффузора разных диаметров; 6 – форсунки с центральной выдачей; 7 – форсунки с боковой выдачей; 8 – расходомер для воды; 9 – вентиль для воды; 10 – манометр для воды; 11 – диафрагма для воздуха; 12 – вентиль для воздуха; 13 – манометр для воздуха; 14 – гибкие подводки

Такая установка позволяет проводить объемную закалку при различных параметрах времени закалки и состава смеси. Получение необходимой в требуемый момент скорости охлаждения основано на варьировании водо-воздушным качеством охлаждающей струи, а также её направлением [10-13]. Меняя соотношение вода-воздух, можно осуществлять в этих

установках режим охлаждения с интенсивностью, более высокой, чем в водяном баке, а если необходимо, менее интенсивной, чем в масле (рис. 3) [9].

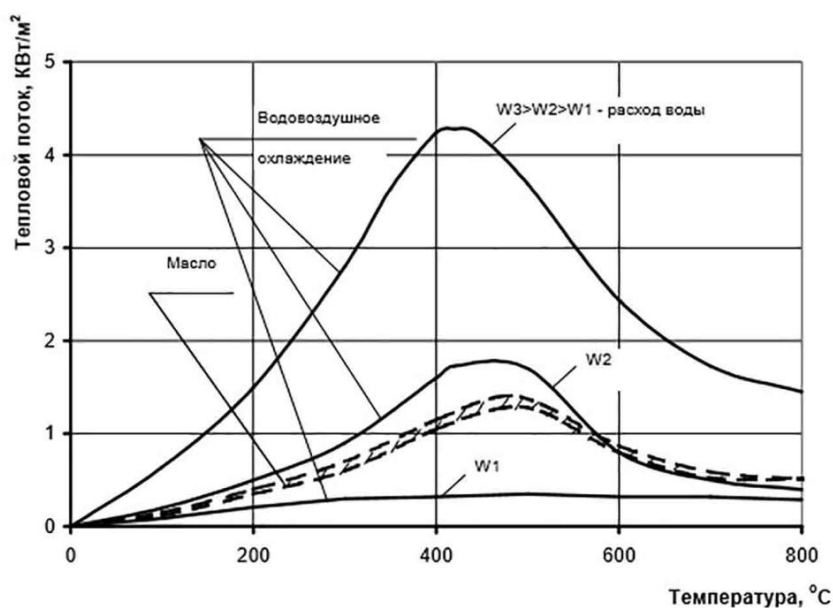


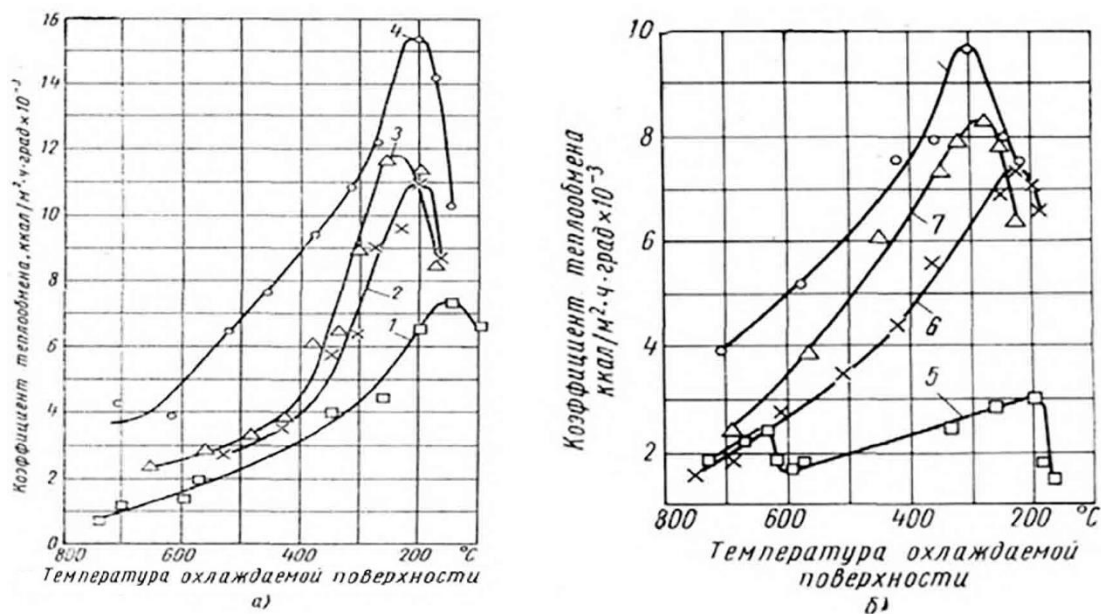
Рис. 3. Охлаждающая способность систем водовоздушного охлаждения

Охлаждающая способность водо-воздушной смеси зависит от соотношения давления воды и воздуха, в зависимости от которого для определенной конструкции форсунки могут быть два состава предельных смесей. Первый состав: расход воды такой, при котором давление воздуха не распыляет воду до частиц размером меньше критической величины. В этом случае частицы воды не успевают полностью испариться, отвод пара затруднен и охлаждающая способность смеси снижается. Второй состав: расход воды незначителен, и давление воздуха настолько увеличивает кинетическую энергию частиц воды, что приводит, как указано в работе [14], к сокращению времени контакта частиц воды с раскаленной поверхностью, поэтому охлаждающая способность водо-воздушной смеси также снижается. Таким образом, правильным подбором соотношения давления воды и воздуха можно обеспечить рациональный расход воды.

Пленочное кипение при водо-воздушном охлаждении отчетливо не наблюдается, коэффициент теплообмена возрастает плавно до максимума, который соответствует пузырьковому кипению. Отсутствие пленочного кипения, по-видимому, можно объяснить тем, что частицы водо-воздушной смеси сильно диспергированы и при соприкосновении с нагретой поверхностью мгновенно испаряются, причем устойчивая паровая пленка не успевает образоваться в связи с большой скоростью отвода пара. На рис. 3, б видно, что уменьшение давления воды влияет на охлаждающую способность водо-воздушной смеси так же, как и увеличение давления воздуха. Максимум коэффициента соответствует кипению при 300–170°C. С уменьшением коэффициента (разные соотношения  $P_{\text{вод}}$  и  $P_{\text{возд}}$ ) кривые на рис. 4 располагаются при более низких температурах.

Влияние расстояния от форсунки до охлаждаемой поверхности на поверхность активного охлаждения подробно рассматривается в работе [7]. Выбор оптимального расстояния зависит от конструкции форсунки и соотношения расхода воды и воздуха.

Технология водо-воздушного охлаждения нашла широкое применение при изготовлении штампов. Поскольку крупногабаритные молотовые штампы обладают большой массой и, следовательно, теплоемкостью, возможно импульсное охлаждение детали водо-воздушная смесь подается периодически. При этом поверхностный слой детали охлаждается с требуемой скоростью до температуры конца закалки, затем за счет внутренней теплоты происходит самоотпуск.

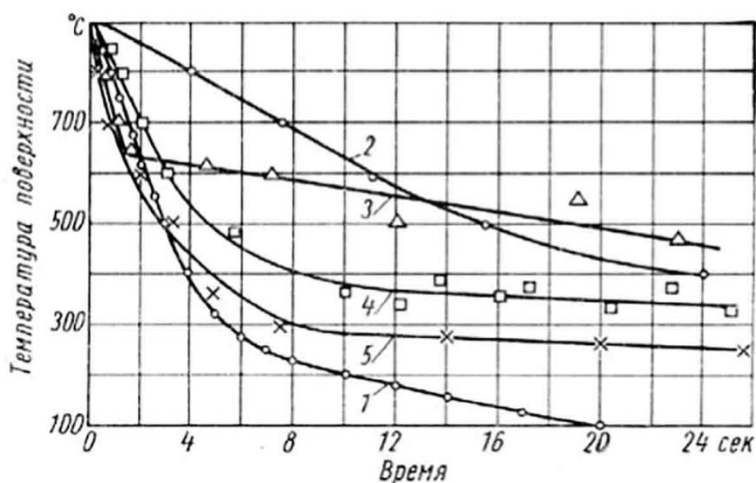


**Рис. 4. Зависимость коэффициента теплообмена от температуры охлаждаемой поверхности:**

$a - P_{\text{вод}} = \text{const} = 2,5 \text{ ат}$ ;  $b - P_{\text{возд}} = \text{const} = 2,0 \text{ ат}$ ;  $1 - P_{\text{возд}} = 4,0 \text{ ат}$ ;  
 $2 - P_{\text{возд}} = 3 \text{ ат}$ ;  $3 - P_{\text{возд}} = 2 \text{ ат}$ ;  $4 - P_{\text{возд}} = 1,5 \text{ ат}$ ;  $5 - P_{\text{вод}} = 0,2 \text{ ат}$ ;  $6 - P_{\text{вод}} = 0,5 \text{ ат}$ ;  
 $7 - P_{\text{вод}} = 1,0 \text{ ат}$ ;  $8 - P_{\text{вод}} = 2 \text{ ат}$

По сравнению с вариантом объемной закалки данный принцип позволяет исключить отпуск штампа, что дает возможность уменьшить время проведения технологического процесса практически вдвое. Это экономит расход энергии на каждом штампе. Еще одним положительным эффектом является отсутствие расхода минерального масла в процессе закалки (экономия сырой нефти составляет 0,25 т на одну закалку штампа массой 1,5 т). Дополнительный экономический эффект – полная пожаробезопасность технологического процесса с использованием водо-воздушной смеси.

Закалка в водо-воздушной смеси позволяет обеспечить требуемые прокаливаемость и твердость крупногабаритных штампов [3].



**Рис. 5. Кривые охлаждения поверхности стали 5XNM в воде, масле и водо-воздушной смеси различного состава:**

$1 - \text{вода } 20^\circ\text{C}$ ;  $2 - \text{масло } 20^\circ\text{C}$ ;  $3 - P_{\text{вод}} = 2 \text{ ат}$ ,  
 $P_{\text{возд}} = 2 \text{ ат до } 600^\circ\text{C}$  и  $P_{\text{возд}} = 4 \text{ ат ниже } 600^\circ\text{C}$ ;  $4 - P_{\text{вод}} = 2 \text{ ат}$ ,  $P_{\text{возд}} = 2 \text{ ат до } 400^\circ\text{C}$  и  
 $P_{\text{возд}} = 4 \text{ ат ниже } 400^\circ\text{C}$ ;  $5 - P_{\text{вод}} = 2 \text{ ат}$ ,  $P_{\text{возд}} = 2 \text{ ат до } 300^\circ\text{C}$  и  $P_{\text{возд}} = 4 \text{ ат ниже } 300^\circ\text{C}$



Штампы охлаждают водо-воздушной смесью до потемнения поверхности (400–500°C), а затем охлаждение проводят только под воздействием сжатого воздуха до 300°C, и после этого сразу подогревают для создания необходимых условий отпуска.

Авторами [7] были получены кривые водо-воздушного охлаждения поверхности штамповой стали 5ХНМ в зависимости от разного соотношения воды и воздуха (рис. 5).

При водо-воздушном охлаждении штамповой стали на начальном этапе охлаждения, когда нужно миновать зону наименьшей устойчивости аустенита, скорости охлаждения близки к скоростям охлаждения в воде. При 600, 400 и 300°C за счет повышения давления воздуха от 2 до 4 ат скорость охлаждения резко уменьшается и становится равной скорости охлаждения в масле.

С применением описанного способа закалки крупных молотовых штампов из стали 5ХНМ размером 1400x710x500 мм [11] было получено оптимальное распределение структурных составляющих по сечению (на поверхности штампа 75 % мартенсита и 25 % бейнита, в сердцевине 10 % бейнита и 90% сорбита), что привело как к повышению сопротивления поверхности штампа пластической деформации, так и увеличению демпфирующей способности сердцевины. Рассмотренный технологический процесс состоит из следующих операций: загрузка при температуре 450 °С (время выдержки 2,5 ч), подогрев до температуры 650-700 °С (4-5 ч), нагрев до температуры 860 °С в течение 8-10 ч. Закалка осуществляется с помощью водо-воздушной смеси на специальной установке по ранее введенной программе в течение 20-60 мин. Выравнивание (осреднение) температуры производится в два перехода: после извлечения детали из установки ее устанавливают в теплоизолирующий кожух-экран или печь, имеющую температуру окружающей среды, и выдерживают в течение 1,5-3,0 ч; далее деталь выдерживается 15-20 ч на спокойном воздухе (без сквозняков).

Так, образцы из штамповых сталей, термообработанные с помощью водо-воздушной смеси, имели ту же структуру, что и закаленные в минеральном масле, но процесс водо-воздушного охлаждения более экологичен и не требует значительных расходов на восстановление охлаждающей среды, что характерно для закалки в масле.

Изложенное позволяет сделать вывод о возможности применения водо-воздушных смесей при термической обработке штампов из сталей 5ХНМ и 4Х5МФС. Режим охлаждения (состав смеси, скорость подачи, прерывность или непрерывность) должен подбираться для каждого типоразмера после проведения соответствующих исследований и анализа номенклатуры штампов.

Срок окупаемости [11] технологического процесса, использующего водо-воздушное охлаждение, 1,5-2,0 г. (зависит от напряженности производственной программы).

В настоящее время водо-воздушная технология термической обработки крупных поковок успешно реализована на предприятиях России (ОАО «Челябинский металлургический комбинат» [12]) и Республики Беларусь (МЗ СИиТО). Срок службы штампов при изготовлении поковок в кузнечном цехе Минского завода увеличился в 2–6 раз по сравнению с упрочненными традиционной закалкой в минеральном масле. Одновременно стоимость затрат на термообработку снизилась в 1,5–2 раза.

На данный момент проводятся исследования и изготовление установок водо-воздушного охлаждения на других металлургических предприятиях

## Выводы

1. Применение водо-воздушного охлаждения для закалки крупногабаритных изделий из инструментальной стали позволяет получить следующие преимущества в сравнении с традиционной термической обработкой (закалка в масле и отпуск):

◇ *Технические:*

- достигается стабильная оптимальная структура изделия различного сортамента и химического состава при минимальных термических напряжениях и отсутствии трещин, что позволяет повысить уровень механических и служебных характеристик изделий;

- реализуется возможность внедрения новых, эффективных и экономичных технологий;
  - обеспечивается получение деталей после закалки со светлой поверхностью.
- ◇ *Экологические:*
- вода (как охладитель) экологически чиста;
- ◇ *Экономические:* при встройке установки в существующую линию:
- исключение из технологической цепочки закалочного бака и моечной машины;
  - исключения расходов на приобретение, подготовку масла и моечных смесей;
  - при реализации технологии закалки с самоотпуском за счет исключения из технологической цепочки отпускной печи;
  - уменьшения производственных площадей, занимаемых оборудованием, до двух раз.
2. Правильный выбор конструкции форсунки, расстояния до охлаждаемой поверхности и качества водо-воздушной смеси позволяет достичь требуемых физико-механических свойств по всей толщине закаленного слоя.
3. Установка для закалки крупногабаритных штампов водо-воздушной смесью позволяет получать штампы нужной прокаливаемости и стойкости, улучшать экологическую обстановку в термическом цехе.
4. Охлаждающую способность водо-воздушной смеси обычно регулируют степенью увлажнения (расходом воды), но также возможно изменение давления воздуха или расстояния охлаждаемой поверхности от распылителя.
5. Водо-воздушная установка позволяет изменять охлаждающую способность смеси на любом этапе технологического процесса.

#### Библиографический список

1. Штампы для горячего деформирования металлов / под ред. М. А. Тылкина. – М.: Высш. шк., 1977. – 496 с.
2. **Башнин, Ю. А.** Технология термической обработки / Ю. А. Башнин, Б. К. Ушаков, А. Г. Секей. – М.: Metallurgy, 1986.
3. **Геллер, Ю. А.** Инструментальные стали / Ю. А. Геллер. – М.: Metallurgy, 1975. – 584 с.
4. Инструментальные стали: справочник / Л. А. Позняк [и др.]. – М.: Metallurgy, 1977. – 420 с.
5. **Перебоева, А. А.** / А. А. Перебоева, Г. П. Усынина, Н. В. Окладникова [и др.] // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1999. – № 3. – С. 41–44.
6. **Богданова, Т. А.** Разработка технологии получения поковок из инструментальных сталей для прессовых матриц / Т. А. Богданова [и др.] // Вестник СибГАУ. – 2008. – Вып. 2 (19). – С. 156–159.
7. **Будрин, Д.В.** Водо-воздушное охлаждение при закалке / Д.В. Будрин, В. М. Кондратов // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1965. – №6. – С. 22–25.
8. **Ярошенко, Ю. Г.** Разработка режимных параметров водо-водовоздушного охлаждения при закалке / Ю. Г. Ярошенко [и др.] // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве: сб. докл. V Всерос. научно-практич. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных (ТИМ'2016) (Екатеринбург, 12–13 мая 2016 г.). – Екатеринбург: УрФУ, 2016. – С. 137–142.
9. **Липунов, Ю.И.** Регулируемое охлаждение – как один из способов повышения прочностных характеристик стального проката и изделий из него // Металлургическая теплотехника как основа энерго- и ресурсосбережения в металлургии: сб. докл. сотрудников ОАО ВНИИМТ. – Екатеринбург, 2010. – 415 с.
10. **Борисов, И. А.** Разработка технологии спреерной закалки опорных валков прокатных станов / И. А. Борисов, А. И. Борисов // МиТОМ. – 1997. – №8. – С. 2–4.
11. **Борисов, И. А.** Охлаждение крупных поковок в водно-воздушной смеси / И. А. Борисов, Л. Ф. Галанд // МиТОМ. – 1988. – № 10. – С. 17–22.
12. **Пышминцев, И. Ю.** Закалка крупных поковок в водно-воздушной смеси / И. Ю. Пышминцев [и др.] // МиТОМ. – 2003. – № 3. – С. 24–28.

13. **Захаров, В. Б.** Выбор водовоздушных сред для закалки крупных поковок / В. Б. Захаров [и др.] // Сталь. – 2003. – №3. – С. 60–62.
14. **Майсурадзе, М. В.** Характеристики водокапельных форсунок центробежно-струйного типа, используемых для закалки сталей / М. В. Майсурадзе, Ю. В. Юдин // Изв. вузов. Черная Металлургия. – 2008. – № 8. – С. 45–48.

*Дата поступления  
в редакцию 25.12.2017*

**D.A. Ryabov<sup>1</sup>, A.A. Khlybov<sup>1</sup>, K.A. Minkov<sup>2</sup>,**

**ON THE PERSPECTIVE OF APPLICATION OF WATER-AIR MIXTURE  
FOR COOLING HAMMER STAMPS**

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alekseev<sup>1</sup>,  
PJSC «Ruspolymet»<sup>2</sup>

The results of an analysis of the water-air method for cooling the hammer stamps during heat treatment are presented. The necessity of using a controlled cooling medium for the purpose of obtaining homogeneous structural components of stamping steels throughout the whole volume of articles is shown, as well as the reduction of residual stresses and deformations formed as a result of temperature gradients during cooling.

*Key words:* water-air cooling, heat treatment, hammer stamps, 5XHM.

УДК 621.791.754

А.С. Павлов

## РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПЕРАТИВНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ГЛУБИНЫ ПРОПЛАВЛЕНИЯ СЛОЯ ШВА ПО ТОЛЩИНЕ ЖИДКОЙ ПРОСЛОЙКИ ПРИ СВАРКЕ В ЩЕЛЕВУЮ РАЗДЕЛКУ КРОМОК

Нижегородский государственный технический университет им.Р.Е. Алексеева

Проведен анализ существующих методик определения толщины жидкой прослойки в сварочной ванне. Показано влияние основных параметров режима сварки, а также величины жидкой прослойки в сварочной ванне на глубину проплавления слоёв шва.

*Ключевые слова:* щелевая разделка, глубина проплавления, толщина жидкой прослойки, автоматическая сварка в защитных газах.

Толщина жидкой под дугой в сварочной ванне  $\delta_{ж}$  является главным параметром, определяющим стабильность проплавления слоя шва. В этой связи приобретает вопрос определения толщины  $\delta_{ж}$  расчетным или экспериментальным методами.

Известны расчетные методы определения толщины  $\delta_{ж}$ , полученные на основании решения тепловой или гидродинамической задач [1, 2]. Совместное решение этих задач с учетом факторов, обуславливающих тепломассоперенос в сварочной ванне, не представляется возможным.

Толщину  $\delta_{ж}$  при сварке мощным концентрированным источником нагрева (электронным лучем) находят из условия квазистационарного процесса переноса за счет теплопроводности. В работе [3] наряду со сложной аналитической зависимостью между толщиной  $\delta_{ж}$  и скоростью переноса жидкого металла, включающей большое количество теплофизических коэффициентов, определение которых, как и расчет  $\delta_{ж}$  затруднителен, для практических целей предложена приближительная формула

$$\delta_{ж} = 1/2(2l_n - d), \quad (1)$$

где  $d$  - диаметр кратера, см;  $2l_n$  - ширина зоны, нагреваемой выше температуры плавления, см.

Ширина зоны нагрева для мощного быстродвижущегося линейного  $l_n$  определяется по формуле, приведенной в [3]:

$$2l_n = \frac{q\sqrt{2}}{\sqrt{\pi e} \delta T_{пл} V_{св} S}, \quad (2)$$

где  $q$  - тепловая мощность источника нагрева, Вт;  $S$  - теплосодержание расплавленного металла, Вт/см;  $T_{пл}$  - температура плавления, °С;  $V_{св}$  - скорость сварки, см/с.

Следует заметить, что эта расчетная зависимость может быть использована при наличии глубокого цилиндрического канала минимальной толщины  $\delta_{ж}$  на его стенках. Однако в большинстве сварочных процессов форма ванны вытянута в хвостовой её части, поэтому в расчетных формулах, представленных в работах [4, 5], учитывается площадь проплавления на переднем фронте плавления сварочной ванны, форма которой близка к сферической. Используя геометрическую модель, в которой форма передней стенки сварочной ванны принималась сферической [2] или цилиндрической [3], а также основании решения тепловой задачи и ряда допущений выполнен расчет толщины  $\delta_{ж}$ , размер которой принят усредненным.

В этой модели принято:

1. Плавление металла заканчивается в передней части сварочной ванны; подогрев металла за счет тепла, выделяющегося в хвостовой части сварочной ванны не учитывается.

2. Поверхность жидкой прослойки  $\delta_{ж}$ , граничащая с дугой, имеет температуру кипения жидкого металла  $T_{кип}$ , а поверхность, граничащая с нерасплавленным металлом, имеет температуру плавления  $T_{пл}$ .

Толщину жидкой прослойки находят по формуле

$$\delta_{ж} = \frac{r_{п}}{F\chi(T_{к}-T_{п})} + 1 \quad (3)$$

где  $r_{п}$  - радиус изотермы плавления, см;  $q_{э}$  - эффективная тепловая мощность сварочной дуги, Вт;  $\chi$  - коэффициент теплопроводности, Вт/см;  $F$  - площадь проплавления, см<sup>2</sup>;  $T_{к}$  - температура кипения жидкого металла, °С;  $T_{п}$  - температура плавления жидкого металла, °С.

В [6] величину прослойки жидкого металла под дугой  $\delta_{ж}$  предлагается определять по формуле (2), вводя вместо  $\chi$  эффективный коэффициент теплопроводности  $\chi_{э}$ , учитывающий тепломассоперенос в сварочной ванне, что, по мнению авторов, повышает точность полученного решения. Однако для определения  $\chi_{э}$  необходимо решить критерияльное уравнение при движении жидкости, имеющее вид:

$$N_{и} = f(Rl Rr) , \quad (4)$$

где  $N_{и}$ ,  $Rl$ ,  $Rr$  – критерии Нуссельта, Рейнольдса и Прандля соответственно.

Находить значения этих критериев применительно к расплаву сварочной ванны, имеющему различную температуру на поверхности и на границе с твердым металлом, затруднительно, так как необходимо знать изменения температуры.

В расчетную формулу (3) авторами работы [2] вводится значение полного теплового потока, включающего две составляющие: тепловой поток, необходимый для проплавления основного металла  $q_{пр}$ , и тепловой поток, идущий на подогрев  $q_{п}$ .

Значения  $q_{пр}$  и  $q_{п}$  определяются по формулам

$$q_{п} = F_{п} \gamma_{т} S_{п} V_{св} ; \quad (5)$$

$$q_{пр} = F_{пр} \gamma_{ж} S_{ж} V_{св},$$

где  $F_{п}$  и  $F_{пр}$  - площадь проплавления и подогрева, см<sup>2</sup>;  $\gamma_{т}$  и  $\gamma_{ж}$  - удельный вес твердого и жидкого металла, г/см<sup>3</sup>;  $S_{п}$  и  $S_{ж}$  - теплосодержание расплавленного и подогретого металла, Вт/см<sup>2</sup>.

Следует отметить некоторое несоответствие расчетных и экспериментальных значений толщины жидкого слоя, определяемого по известной методике [2]. Для устранения этого несоответствия используют поправочные коэффициенты [4].

На интенсивность теплопередачи влияет величина скорости движения металла  $V_{м}$ , определяемая геометрическими размерами жидкой прослойки ( $\delta_{ж}$ ).

В [7] расчет  $\delta_{ж}$  и  $V_{м}$  ведется решением гидродинамической задачи. Для этого также рассматривается движение расплава у передней стенки сварочной ванны. Толщина  $\delta_{ж}$  определяется из решения системы уравнения количества движения жидкости и неразрывности потока. Для решения этих уравнений приходится задавать определенную форму переднего фронта ванны в виде сферы [7].

В [1] принято, что на одном уровне каждого сечения ванны толщина  $\delta_{ж}$  постоянна. Показано, что значения  $\delta_{ж}$  максимальны под дугой в осевой зоне шва, в которой скорость движения расплава минимальна. Значение  $\delta_{ж}$  существенным образом определя-

ется конфигурацией и размерами сварочной ванны, зависящими от тепловой мощности дуги и положения её активного анодного пятна, в центре которого газодинамическое давление максимально и, следовательно, максимальный прогиб поверхности ванны и минимальная толщина  $\delta_{ж}$ . Другим фактором, от которого зависит толщина  $\delta_{ж}$ , является угол наклона электрода.

Именно этими обстоятельствами и наличием конвективных потоков объясняются различные значения  $\delta_{ж}$  в [1, 2, 7, 8]. В [8] указывается на активную роль жидкой прослойки под дугой, определяющей передачу тепла от нагрева к фронту плавления. В этой работе значения  $\delta_{ж}$  определяются по следующей зависимости:

$$\delta_{ж} = h_{пр} + a - l, \quad (6)$$

где  $h_{пр}$  - глубина проплавления, см;  $a$  - расстояние от конца электрода до поверхности детали, см;  $l$  - длина дуги, см.

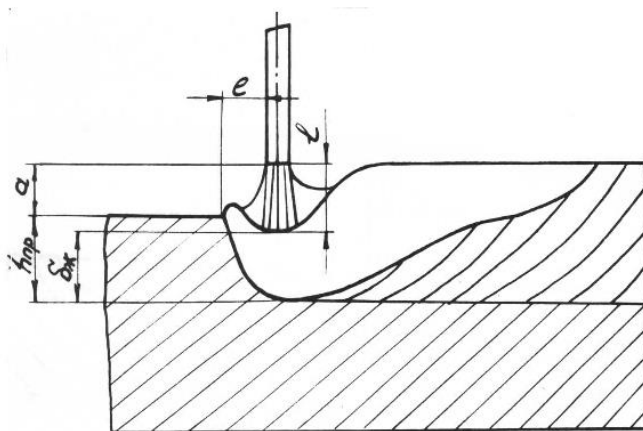


Рис. 1. Схема определения  $\delta_{ж}$

Значение  $\delta_{ж}$  по предлагаемой формуле значительно превышает полученное в работах [7, 8]. Существенные различия  $\delta_{ж}$  можно объяснить подтеканием расплавленного металла сварочной под дугу и перед дугой, что может вызвать изменения толщины  $\delta_{ж}$  под дугой. Это связано, по-видимому, с колебательными движениями жидкого металла в сварочной ванне (гидродинамическими возмущениями), в результате которых изменяются условия вытеснения расплавленного металла. Следует заметить, что наиболее значительные изменения толщины  $\delta_{ж}$  на переднем фронте плавления сварочной ванны происходят при сварке мощным быстродействующим источником нагрева.

Процесс в щелевую разделку, как показывает практика, целесообразно вести при небольшой мощности дуги. При поперечных её колебаниях можно достичь более равномерного распределения жидкой прослойки под дугой и получения формы сварочной ванны близкой к сферической. Это может быть выполнено при условии оптимизации параметров режима сварки. При этом условии представляется возможным расчетное определение толщины  $\delta_{ж}$  производить по формуле (3), полученной решением тепловой задачи. В процессе сварки необходимо производить оперативное изменение и контроль толщины  $\delta_{ж}$ .

Экспериментальное определение толщины жидкой прослойки под дугой по известной методике производят с помощью тугоплавкого (танталового или вольфрамового) зонда, располагаемого по центру свариваемого стыка. В процессе сварки зонд, находящийся выше уровня жидкого металла, оплавляется под действием дуги и по величине оставшейся нерасплавленной части зонда в подготовленном шлифе определяют толщину  $\delta_{ж}$  [1] по схеме (рис. 2).

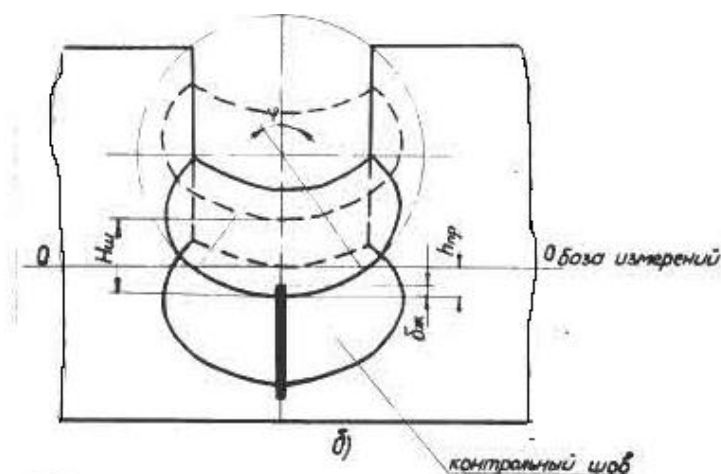


Рис. 2. Схема измерения толщины жидкой прослойки  $\delta_{ж}$  и глубины проплавления  $h_{пр}$

Указанная методика имеет следующие существенные недостатки:

- 1) отсутствие гарантии полного оплавления конца зонда до границы кратер-жидкая прослойка. Вследствие этого, а также из-за возникающих погрешностей при выставлении зонда по оси свариваемого стыка при колебаниях дуги точность определения  $\delta_{ж}$  низкая;
- 2) некоторое приближенное представление о толщине  $\delta_{ж}$  в осевой зоне и у кромки можно получать при измерении двумя зондами;
- 3) значительная трудоёмкость изготовления макрошлифов сварных соединений;
- 4) наличие конвективных потоков оказывает влияние на точность измерения значений  $\delta_{ж}$ ;
- 5) нет возможности производить измерение и контроль толщины  $\delta_{ж}$  в процессе сварки.

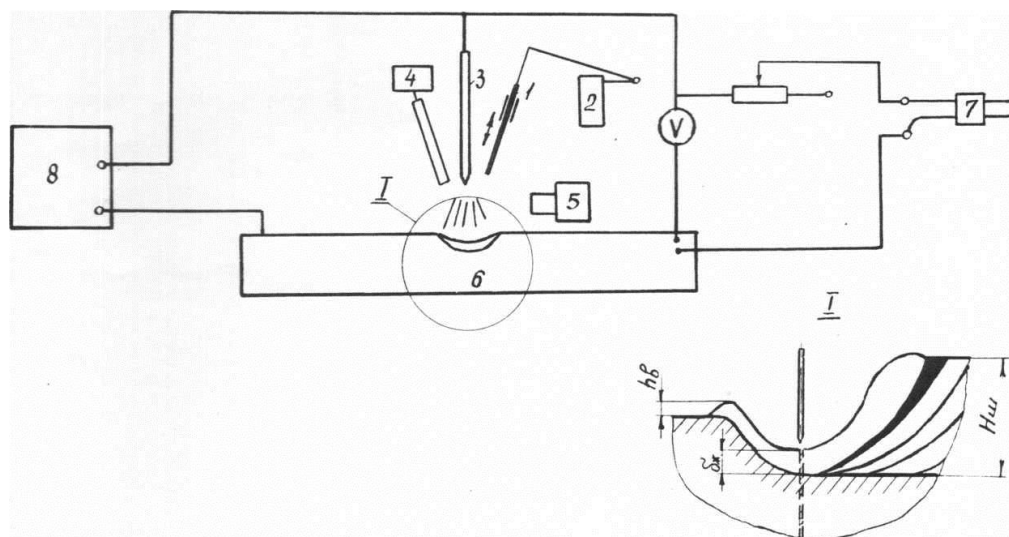
В основу новой методики положен принцип зондирования сварочной ванны погружением тугоплавкого зонда и смачивание его конца жидким металлом. Измерение толщины  $\delta_{ж}$  производилось на основе использования различной проводимости плазмы дуги и жидкого металла. Известно [8], что проводимость плазмы аргоновой дуги  $j_{п} = 0,2-1,0 \text{ ом}^{-1}\text{м}^{-1}$  при токе в интервале 20 до 300 А, а проводимость жидкой стали с содержанием 0,2-0,4 % С при температуре  $T = 1500^{\circ} - 1700^{\circ}$  составляет  $\delta_{ж} = 7 \cdot 10^5 \text{ ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ .

Изучение процесса зондирования сварочной ванны производили в ходе экспериментальных исследований с помощью установки, схема которой приведена на рис. 3.

Измерение толщины  $\delta_{ж}$  проводили в процессе автоматической сварки в щелевую разделку неплавящимся электродом труб сечением  $\Phi 200 \times 15$  мм из стали 30 ХГСН2А. Параметры режима сварки: сварочный ток  $I_{св} = 150$  А, напряжение дуги  $U_{д} = 9-10$  В, скорость сварки  $V_{св} = 5-6$  м/ч, скорость подачи присадочной проволоки  $\Phi 1,6$  мм составляла  $V_{пн} = 20-25$  м/ч. Зондом являлась вольфрамовая проволока диаметром  $\Phi 0,5$  мм, размещенная в кварцевой трубочке диаметром  $\Phi 1,3$  мм. Скорость перемещения зонда  $V = 0,5$  м/с. Частота погружения зонда составляла 3 опускания в минуту.

Процесс зондирования осуществляли следующим образом. Ориентировали тугоплавкий зонд в положение, приближенное к перпендикулярному к поверхности сварочной ванны. Затем включали источник питания и устанавливали параметры режима сварки. После образования расплавленной сварочной ванны на изделии б включали электромагнит, перемещающий зонд в зону дуги (в непосредственной близости от конца электрода) и производили его погружение в ванну при одновременном осциллографи-

ровании и киносъёмке процесса до момента достижения зондом стенки твердого металла. При упоре зонда в твердую стенку включался электропневмоклапан и начиналось выдувание расплавленного металла сварочной ванны струёй защитного газа (аргона), синхронно с процессом выдувания выключали источник питания и гасили дугу.



**Рис. 3. Принципиальная схема установки для зондирования сварочной ванны:**

1 - зонд; 2 - электромагнит; 3 - электрод; 4 - электропневмоклапан; 5 - кинокамера; 6 - свариваемое изделие; 7 - шлейфовый осциллограф; 8 - источник питания;  $H_{ш}$  - толщина наплавленного металла шва;  $h_{в}$  - высота гребня вытесненного металла сварочной ванны давлением дуги;  $\delta_{ж}$  - толщина прослойки жидкого металла

Тугоплавкий зонд после смачивания мог возвратиться с помощью электромагнита в исходное положение без выплескивания сварочной ванны и гашения дуги. В этом случае процесс сварки не прекращался, но и не фиксировалась точка касания дна зондом.

Толщину  $\delta_{ж}$  определяли по длине смоченной расплавленным металлом части зонда. Для облегчения смачивания зонда на одну из его сторон, обращенную противоположно дуге, предварительно наносили медное покрытие.

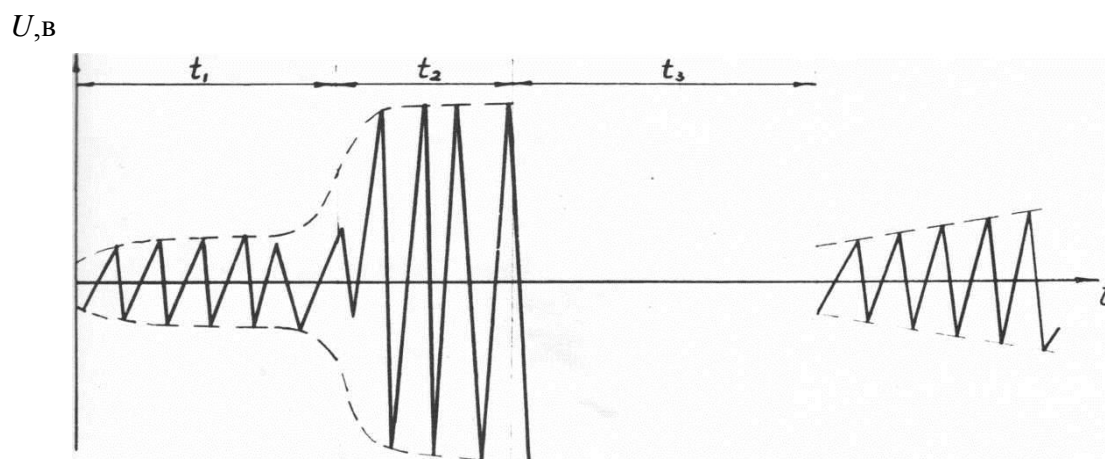
При измерениях с наклоном зонда по отношению к электроду вводился поправочный коэффициент, учитывающий значение угла наклона. По кинограммам строили зависимости перемещения зонда во времени и, совмещая с осциллограммой напряжения, строили зависимость распределения потенциала по длине дуги, определяли положение зонда в момент ввода в сварочную ванну и место соприкосновения с твердым металлом.

После серии проведенных замеров  $\delta_{ж}$  в процессе сварки в продольном и поперечном направлении сварочной ванны удается с достаточно высокой точностью определить конфигурацию распределения жидкой прослойки в сварочной ванне без использования целого ряда зондов, согласно методике, приведенной в [1].

Форма сварочной ванны, полученная на основании замеров, близка к реальной форме, полученной после выдувания. Точность измерения толщины  $\delta_{ж}$  за счёт смачивания была сравнительно невысокой (10-20%), имел место разброс значений  $\delta_{ж}$ , вызванный неравномерной смачиваемостью конца зонда. Для повышения точности измерений использовался сигнал, снимаемый с зонда (датчика) при его погружении в сварочную ванну. При касании зондом сначала поверхности расплавленного металла сварочной ванны и далее твердого металла (дна ванны) изменяется сигнал в цепи датчика, величина которого фиксируется в блоке измерения толщины слоя жидкого металла ( $\delta_{ж}$ ). На выходе этого блока фиксируется пропорциональный  $\delta_{ж}$  в виде напряжения.



Процесс регистрации параметров датчика (длины дуги и толщины  $\delta_{ж}$ ) иллюстрирован осциллограммой напряжения (рис. 4).



**Рис. 4. Изменение напряжения при зондировании сварочной ванны:**

$t_1$  - время прохождения зондом дуги;  $t_2$  - время погружения зонда в слой жидкого металла;  $t_3$  - время регулирования глубины проплавления

Абсолютное значение длины дуги  $l_d$  и толщины слоя жидкого металла  $\delta_{ж}$  определяли по следующим зависимостям:  $l_d = Vt_1$  и  $\delta_{ж} = Vt_2$ , где  $V$  - скорость погружения, м/с. Проводилась серия замеров по предлагаемой и известной методикам определения  $\delta_{ж}$ , по результатам которых установлено, что величина отклонений значений по предлагаемой методике составляла не более 5%, а по известной - 20% (табл. 1).

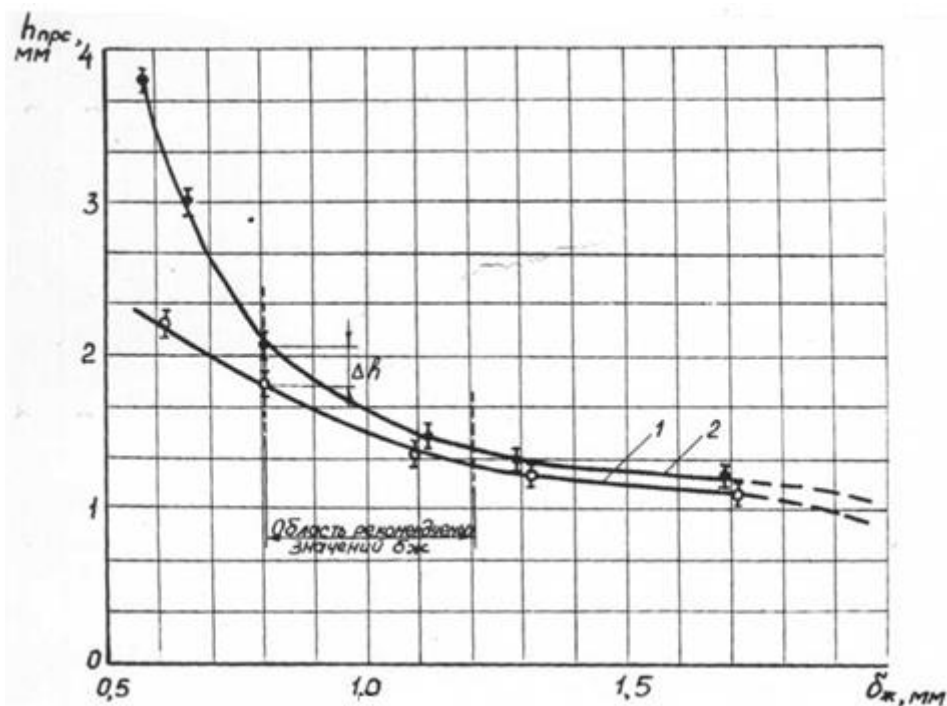
Измерение толщины  $\delta_{ж}$  производили в зонах, отстоящих от оси щелевого шириной  $b_{щ} = 8 +^2$  на расстоянии  $0,1-0,15 \delta_{ж}$ . Зависимость между глубиной проплавления слоя шва  $h_{прс}$  и толщиной жидкой прослойки  $\delta_{ж}$  показана на рис. 5. Параметры режима изменяли в следующих пределах: сварочный ток  $J_{св} = 150-600$  А, скорость сварки  $V_{св} = 4-15$  м/ч, скорость подачи присадочной проволоки  $V_{пп} = 4-50$  м/ч. Расчетные и экспериментальные данные толщины жидкой прослойки под дугой приведены в табл. 2.

**Таблица 1**

№ серии опытов	Размер толщины $\delta_{ж}$ , мм	
	по известной методике	по предлагаемой методике
1	1,15	1,0
2	0,94	1,01
3	0,96	1,02
4	1,1	1,0
5	0,8	0,99

**Таблица 2**

Эффективная тепловая мощность источника $q_э$ , Вт	Площадь проплавления $F_{пр}$ , см <sup>2</sup>	Глубина проплавления $h_{прс}$	Толщина жидкой прослойки $\delta_{ж}$ , см	
			расчетные данные	экспериментальные данные
33	0,012	0,092	0,072	0,078
64,5	0,0194	0,19	0,126	0,119
94,5	0,024	0,183	0,152	0,159



**Рис. 5. Зависимость глубины проплавления слоя шва  $h_{\text{прс}}$  от толщины жидкой прослойки  $\delta_{\text{ж}}$  (минимальные 1 и максимальные 2 значения  $h_{\text{прс}}$ )**

Экспериментально установлена корреляционная зависимость между значениями  $h_{\text{прс}}$  и  $\delta_{\text{ж}}$  вида  $h_{\text{прс}} = 1,2 \delta_{\text{ж}}^2 - 6,5 \delta_{\text{ж}} + 6,9$ .

Таким образом, применение данной методики позволяет определять не только толщину  $\delta_{\text{ж}}$ , но и с высокой достоверностью фиксировать профиль поверхности сварочной ванны, что, в свою очередь, позволит использовать её при создании устройства для автоматического регулирования глубиной проплавления слоя шва при многослойной сварке в щелевую разделку кромок.

#### Библиографический список

1. Чернышов, Г.Г. Определение толщины слоя жидкого металла на переднем фронте сварочной ванны / Г.Г. Чернышов, А.М. Рыбачук // Сварочное производство. – 1979. – №10. – С. 9–10.
2. Размышляев, А.Д. Гидродинамические параметры пленки жидкого металла на передней стенке кратера ванны при дуговой сварке // Автоматическая сварка. – 1982. – №1. – С. 20–25.
3. Ольшанский, Н.А. Перемещение расплавленного металла в процессе электроннолучевой сварки / Н.А. Ольшанский, А.М. Гуткин, Г.Д. Гириманджи // Сварочное производство. – 1974. – №9. – С. 12–14.
4. Размышляев, А.Д. О толщине прослойки жидкого металла под дугой при наплавке под флюсом // Автоматическая сварка. – 2003. – №9. – С. 18–21.
5. Суздаев, И.В. Влияние параметров режима сварки на форму и размеры кратера сварочной ванны и толщину жидкой прослойки под дугой / И.В. Суздаев, Б.М. Березовский, В.К. Прохоров // Сварочное производство. – 1988. – №8. – С. 35–36.
6. Чернов, А.В. Определение толщины жидкой прослойки под дугой / А.В. Чернов [и др.] // Известия вузов. – Машиностроение. – 1978. – №9. – С. 131–134.
7. Гулаков, С.В. Влияние переноса тепла потоком жидкого металла на форму сварочной ванны / С.В. Гулаков, Б.И. Носовский // Сварочное производство. – 1982. №11. – С. 2–3.

8. **Чернышов, Г.Г.** Распределение тока в сварочной ванне / Г.Г. Чернышов [и др.] // Автоматическая сварка. – 1979. – №11. – С. 27–29.
9. **Савинов, А.В.** Определение профиля свободной поверхности сварочной ванны при дуговой сварке // А.В. Савинов [и др.] // Сварка и диагностика. – 2010. – №1. – С. 24–27.

*Дата поступления  
в редакцию 30.01.2018*

**A.S. Pavlov**

**DEVELOPMENT OF METHODS OF OPERATIONAL CONTROL  
OF THE PENETRATION LAYER OF THE WELD THROUGH THE THICKNESS  
OF THE LIQUID LAYER WHEN WELDING IN A NARROW GROOVE**

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

**Purpose:** To produce high-quality layer in weld pool by multilayer welding in slotted hums ensuring a stable penetration depth and desired shape of each later with the optimal thickness of the liquid layer the weld pool.

**Approach:** An experimental studying the process of obtaining quality multilayer connection in clotted hums using the device for determine the depth of penetration.

**Findings:** The development of a technique for determining the thickness of the liquid layer the weld pool. Carried out processing of experimental results using metallographic studies.

**Research implications:** Comparative studies have shown that thickness of the liquid layer in weld pool performing by experimental and computational methods are similar.

**Adventure:** The proposed method for measure thickness of the liquid layer in the weld pool is easier then existing methods. New method realized the high quality of connection

*Key words:* slit edge preparation, deph of penetration, thickness interlayer liquid metal, automatic welding in shielded gas.

УДК 65.011:678

А.Ю. Панов<sup>1</sup>, Д.М. Сатаева<sup>2</sup>, А.А. Брехова<sup>3</sup>**ВЛИЯНИЕ РАБОТЫ ОБОРУДОВАНИЯ НА КАЧЕСТВО И ЭФФЕКТИВНОСТЬ  
ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПЛАСТМАСС**

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева<sup>1</sup>,  
Нижегородский государственный инженерно-экономический университет<sup>2</sup>,  
Дзержинская производственная компания, г. Дзержинск<sup>3</sup>

Основным предметом анализа является влияние работы технологического оборудования на качество автомобильных компонентов, изготавливаемых методом литья пластмасс под давлением. В работе применены методы: фасетный метод классификации; диаграмма Исикавы, анализ экономических рисков. Разработана классификация несоответствий изделий из пластмасс. Определены причины появления несоответствий изделий. Установлено влияние работы оборудования на появление дефектов литьевых деталей. Проведен прогнозный экономический расчет потерь, возникающих вследствие изготовления некачественной продукции, и возможных срывов поставок по причине сбоев в работе оборудования. Выявлена необходимость разработки системы прогнозирования технического состояния оборудования, позволяющей предотвращать сбои в работе и обеспечивающей реализацию требований стандарта IATF 16949:2016 в отношении проведения анализа существующих рисков и выполнения предупреждающих действий.

*Ключевые слова:* IATF 16949:2016, автомобильный компонент, анализ рисков, дефект, контроль качества, литье под давлением, несоответствие, оборудование, предупреждающие действия, производство, термопластавтомат, финансовые риски.

В автомобильной промышленности вопросы безопасности, качества и конкурентоспособности выпускаемой продукции становятся все более актуальными в связи с растущими требованиями рынка и необходимостью следования тенденции постоянного совершенствования как самих транспортных средств, так и входящих в их состав автомобильных компонентов.

На сегодняшний день ассортимент автокомпонентов чрезвычайно широк. Они имеют различное функциональное назначение и изготавливаются из самых разных материалов. Достаточно широкое распространение среди них получили изделия из пластмасс: это детали интерьера и экстерьера транспортных средств (включая крупногабаритные корпусные детали), детали панелей приборов и прочие изделия, входящие в состав других узлов автомобиля.

Одним из самых распространенных и прогрессивных методов производства этих деталей является литье пластмасс под давлением. Его главные достоинства: высокая производительность, высокая точность получаемых изделий, возможность изготовления деталей весьма сложной геометрической формы, возможность изготовления армированных изделий, деталей из вспенивающихся пластиков и др. Кроме того, при массовом производстве продукции методом литья под давлением её цена может быть значительно ниже по сравнению с аналогичным производством деталей другими методами.

Вопросы, связанные с применением данной технологии, рассматривались такими авторами, как Т. Освальд [1], М. Бихлер [2], Э.Л. Калинин [3], В.Г. Бортников [4] и др. В их работах описаны основные аспекты литья под давлением: особенности технологического процесса и используемых материалов, правила конструирования литьевых форм и самих изделий, а также методы оценки их стоимости, рассмотрены вопросы управления технологическим процессом, в частности, способы выявления и устранения дефектов, но без учета возможных отказов технологического оборудования и прогнозирования его состояния в процессе работы.

Целью настоящей статьи является оценка влияния работы оборудования на качество и эффективность производства изделий из пластмасс, а также анализ возможности предупреждения сбоев в его работе для исключения возникающих по этой причине несоответствий и, следовательно, снижения затрат предприятия-производителя.

В общем виде весь процесс производства литьевых изделий из пластмасс может быть описан схемой, представленной на рис. 1.

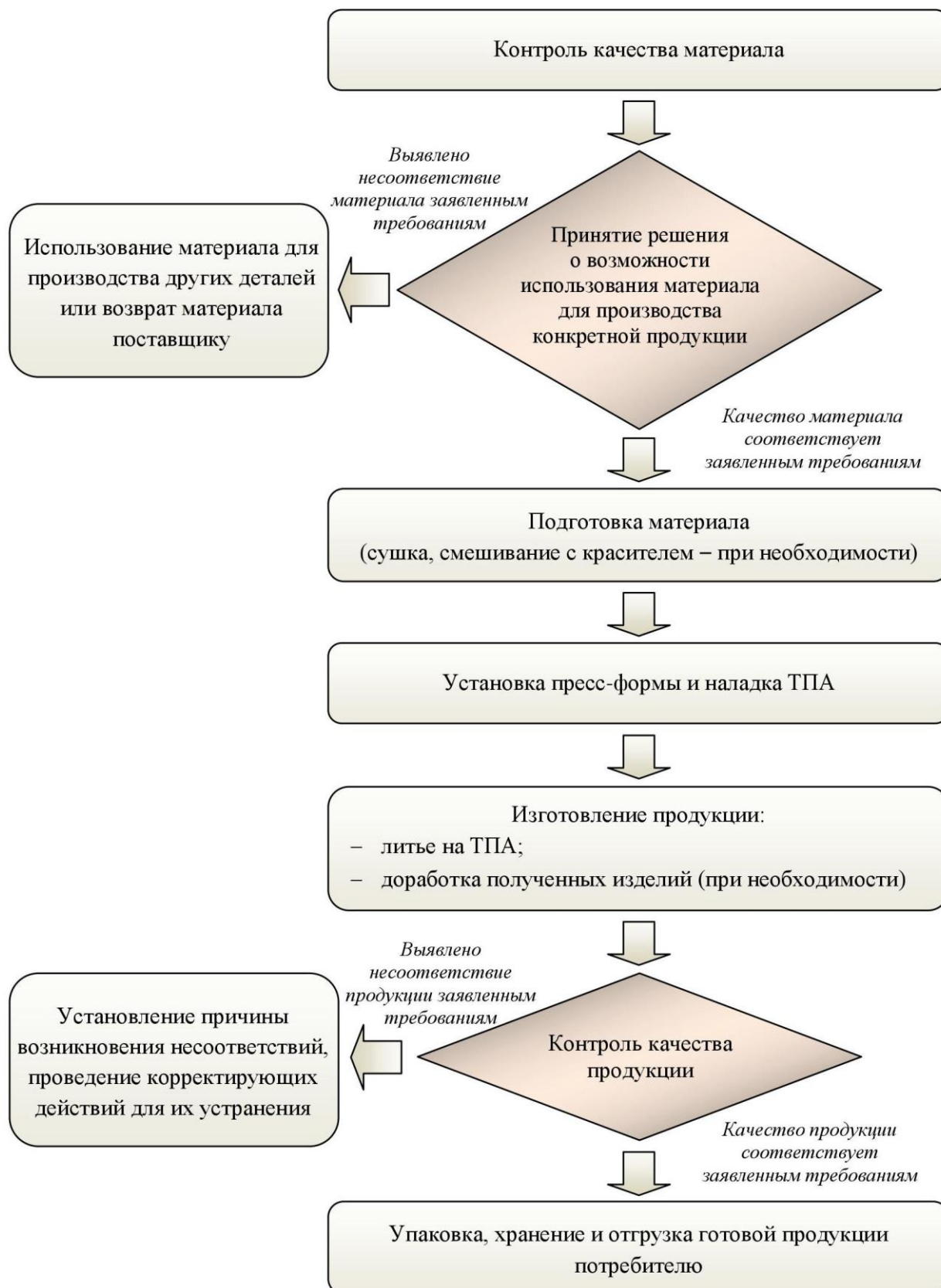
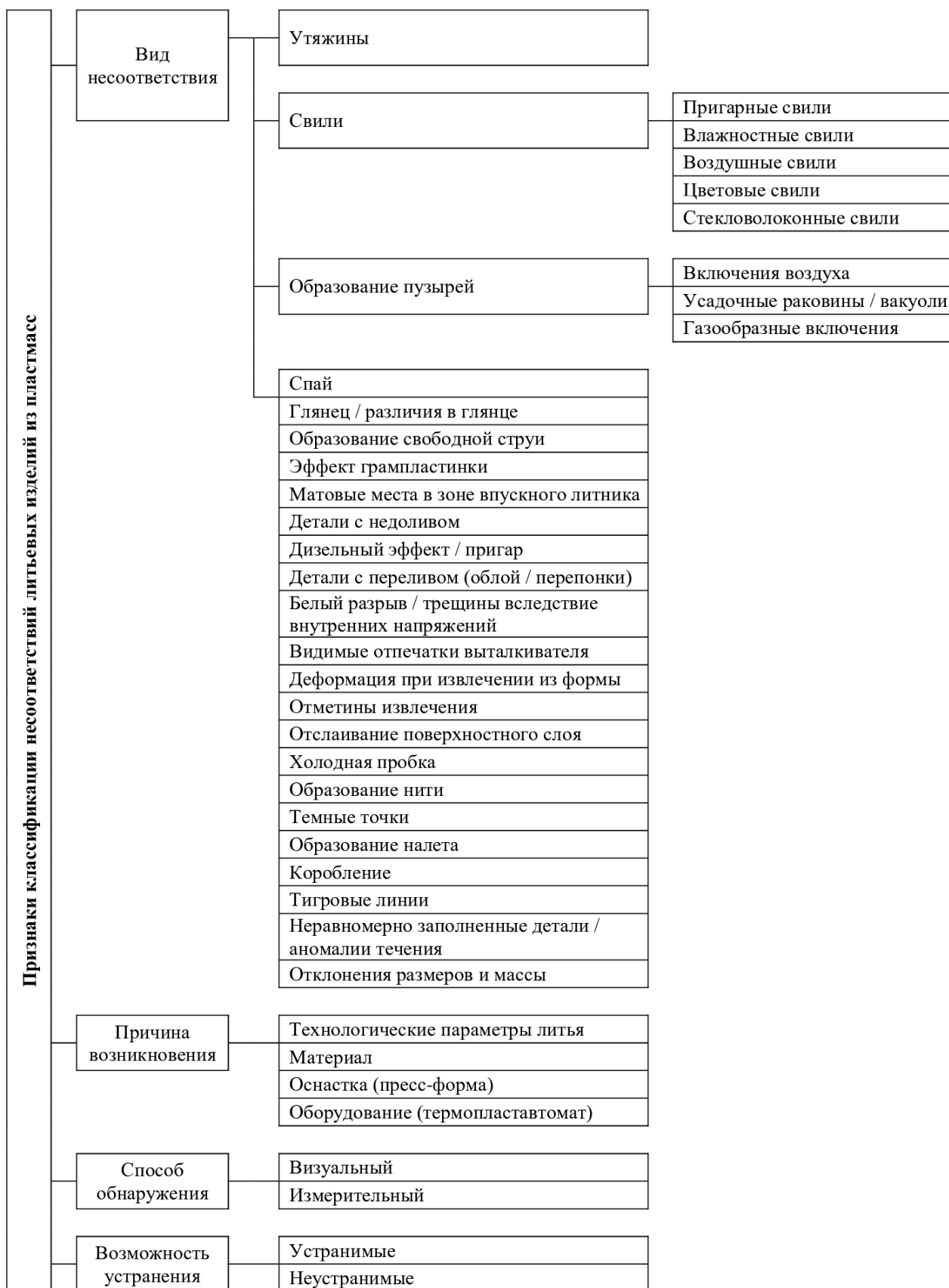


Рис. 1. Этапы производства деталей из пластмасс методом литья под давлением: ТПА – термопластавтомат



**Рис. 2. Классификация несоответствий изделий из пластмасс, изготавливаемых методом литья под давлением**

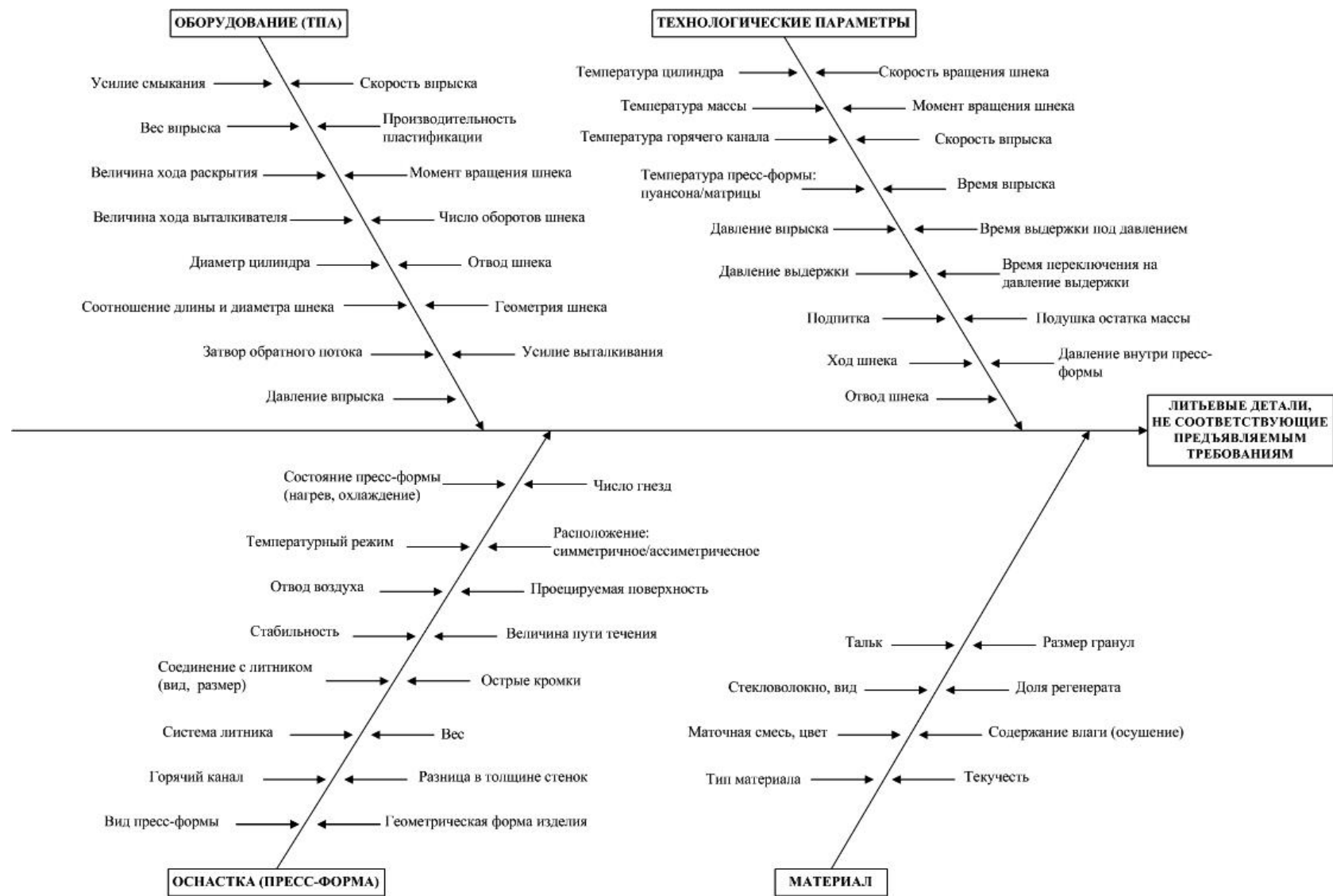


Рис. 3. Возможные причины несоответствий, возникающих при литье под давлением

Фактически изготовление детали представляет собой одноступенчатую операцию: за один единственный рабочий шаг в процессе литья под давлением формованная масса преобразуется в готовое изделие. И качество этого изделия может быть оценено уже только по окончании технологического цикла (совокупности согласованных друг с другом рабочих операций, выполняемых машиной для изготовления каждой отливки). Таким образом, о необходимости каких-либо корректирующих действий свидетельствует именно качество продукции на выходе.

Несоответствия изделий, изготавливаемых данным методом, могут быть сгруппированы по различным признакам:

- видам несоответствий;
- причинам возникновения;
- способам обнаружения;
- возможности устранения.

Оптимальным способом систематизации информации о несоответствиях в данном случае является классификация с применением фасетного метода: согласно РД 50-699-90 именно он применяется для классификации данных о несоответствиях, а в качестве фасетов рассматривается набор признаков.

Данный метод обеспечивает образование соответствующих классификационных группировок путем комбинации значений, взятых из определенных фасетов. Набор фасетов при этом представляет собой группу признаков, по которым многократно и независимо делится классифицируемая информация. Фасетный метод обладает большой гибкостью, позволяя образовывать новые классификационные группировки, включать новые и исключать старые фасеты, хорошо приспособлен к машинной обработке [5].

Предлагаемая классификация несоответствий литьевых изделий из пластмасс представлена на рис. 2.

Проблемы в процессе литья под давлением или дефекты отливки могут быть вызваны многочисленными причинами, которые могут зависеть от машины, пресс-формы, материала и технологических режимов (рис. 3) [1]. Поэтому важнейшую роль играет установление связи между самим несоответствием и причиной его появления, то есть сопоставление первых двух признаков представленной классификации.

Результаты анализа влияния работы оборудования, оснастки, используемого сырья и технологических параметров литья на возникновение того или иного дефекта приведены в табл. 1.

На возникновение каждого вида несоответствия может оказывать влияние не один, а сразу несколько факторов. Причем, как показывает практика, большинство дефектов может быть устранено в первую очередь регулировкой технологических параметров литья или заменой перерабатываемого материала. Реже причиной возникающих несоответствий являются ошибки при проектировании пресс-формы, необходимость доработки которой связана с определенными затратами, зависящими от сложности производимых работ.

Наименее вероятной причиной несоответствий, возникающих при литье под давлением, является сбой в работе термопластавтомата (табл.1). Однако в случае возникновения подобных сбоев они влекут за собой самые большие временные и материальные затраты, связанные с ремонтом (как правило, дорогостоящим) и простым оборудования, влекущим за собой риск невыполнения производственного плана и соответственно срыв поставки продукции в адрес потребителя.

В табл. 2 представлена информация о том, какие неисправности в работе оборудования могут приводить к тем или иным дефектам литьевых деталей.




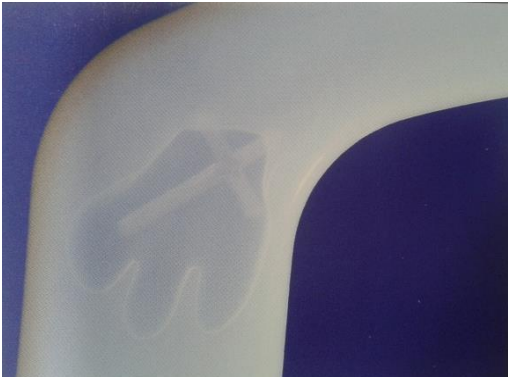


Таблица 1

## Сопоставление дефектов литьевых изделий и их возможных причин

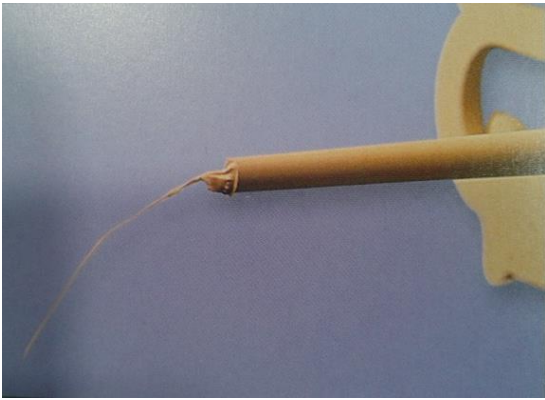

Вид несоответствия	Возможные причины возникновения несоответствия			
	Технологические параметры литья	Материал	Оснастка (пресс-форма)	Оборудование (ТПА)
Утяжины	+	+	+	–
Пригарные свиля	+	+	+	+
Влажностные свиля	–	+	+	–
Воздушные свиля	+	–	+	–
Цветовые свиля	+	+	–	–
Стекловолоконные свиля	+	+	–	–
Включения воздуха	+	–	+	+
Усадочные раковины / вакуоли	+	–	+	–
Газообразные включения	+	+	–	+
Спай	+	+	+	–
Глянec / различия в глянecе	+	+	+	–
Образование свободной струи	+	–	+	–
Эффект грампластинки	+	–	–	–
Матовые места в зоне впускного литника	+	–	+	–
Детали с недоливом	+	–	+	+
Дизельный эффект / пригар	+	–	+	–
Детали с переливом (облой / перепонки)	+	–	+	–
Белый разрыв / трещины вследствие внутренних напряжений	+	–	+	–
Видимые отпечатки выталкивателя	+	–	+	–
Деформация при извлечении из формы	+	+	+	–
Отметины извлечения	+	–	+	–
Отслаивание поверхностного слоя	+	+	–	–
Холодная пробка	+	–	+	–
Образование нити	+	–	+	+
Темные точки	+	+	+	+
Образование налета	+	+	–	–
Коробление	+	+	+	–
Тигровые линии	+	+	–	–
Неравномерно заполненные детали / аномалии течения	+	–	+	–
Отклонения размеров и массы	+	–	–	+

Таблица 2

## Дефекты, возникающие вследствие неисправности оборудования

Вид дефекта	Влияние работы оборудования на возможность появления дефекта
1	2
<p data-bbox="443 434 671 465">Пригарные свили</p> 	<p data-bbox="900 434 1209 465">Износ узла пластикации</p>
<p data-bbox="435 880 687 911">Включения воздуха</p> 	<p data-bbox="900 880 1353 943">Сбои в функционировании / загрязнение / износ узла пластикации</p>
<p data-bbox="400 1308 722 1339">Газообразные включения</p> 	<p data-bbox="900 1308 1353 1370">Сбои в функционировании / загрязнение / износ узла пластикации</p>
<p data-bbox="440 1666 683 1697">Детали с недоливом</p> 	<p data-bbox="900 1666 1209 1697">Износ узла пластикации</p>

Окончание табл. 2

1	2
<p data-bbox="453 280 676 309">Образование нити</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="906 280 1353 347">– Нарушение функционирования датчика температуры;</li> <li data-bbox="906 347 1107 376">– Износ сопла</li> </ul>
<p data-bbox="478 743 651 772">Темные точки</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="906 743 1353 846">– Загрязнения или износ узла пластикации, литниковой системы и горячего канала;</li> <li data-bbox="906 846 1267 875">– Износ шнека и цилиндра</li> </ul>
<p data-bbox="252 1214 868 1281">Недостаточное уплотнение материала при литье деталей (отклонения массы / размеров)</p>	<p data-bbox="906 1214 1212 1243">Износ узла пластикации</p>

Главная сложность заключается в том, что отказы в работе оборудования, чаще всего, выявляются только по факту обнаружения несоответствующей продукции в процессе литья. Из всех перечисленных в табл. 2 неисправностей литьевой машины предвидеть заранее, как правило, удастся только износ шнека (то есть постепенное уменьшение его диаметра). О его состоянии в процессе работы термопластавтомата можно судить по величине так называемой «подушки» расплава: чем менее стабилен данный параметр при литье, тем больше степень износа шнека.

Оценить состояние остальных узлов и элементов литьевой машины в процессе её работы практически не представляется возможным. И если неисправность не будет замечена и устранена при проведении плановой профилактики оборудования, то эта проблема выявится уже в ходе производственного процесса при обнаружении дефектной продукции. И помимо потерь от брака организация понесет ещё и потери, обусловленные простоем вышедшего из строя оборудования.

Практически единственным из перечисленных несоответствий (табл. 2), которое может быть пропущено в процессе литья, является недостаточное уплотнение материала. По внешнему виду и геометрическим параметрам недоуплотненная деталь может соответствовать заявленным требованиям, но на последующих этапах производственного процесса, например, при её обработке на других технологических операциях, полученная в результате продукция может оказаться несоответствующей.

Таблица 3

## Расчет потерь от брака

Наименование изделия	Количество единиц несоответствующей продукции	Наименование материала / комплектующих	Норма расхода на ед.	Цена за кг / шт.	Сумма (руб.) по материалам и комплектующим	Наименование работ	Норма времени работ на ед.	Расценка, руб./ч	Стоимость работ, руб.	Общая стоимость, руб.
Фильтр масляный (в сборе)	480 шт. (9 % от месячного плана производства)	<i>Вторичная переработка</i>								
		-	-	-	-	Демонтаж фильтра	0,05 ч	118	2 832,00	3 312,00
		-	-	-	-	Дробление литевых деталей (для последующей переработки)	0,01 ч	100	480,00	
		<i>Утилизация</i>								
		Полиамид (потери при дроблении)	0,008 кг	140 руб./кг	537,60	Литье	0,03 ч	118	1 699,20	18 220,80
		Фильтрующий элемент	1 шт.	30 руб./шт.	14 400,00	Сборка / сварка	0,03 ч	110	1 584,00	
<b>ИТОГО:</b>					14 937,60				6 595,20	<b>21 532,80</b>

Таблица 4

## Расчет потерь от простоя

Вид потерь, руб.	Время простоя (в часах):																											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23					
Потерянные продажи	18000	36000	54000	72000	90000	108000	126000	144000	162000	180000	198000	216000	234000	252000	270000	288000	306000	324000	342000	360000	378000	396000	414000					
Потери производительности труда (1 чел. – литейщик)	118	236	354	472	590	708	826	944	1062	1180	1298	1416	1534	1652	1770	1888	2006	2124	2242	2360	2478	2596	2714					
Штрафные санкции (в случае срыва поставок)	-																											
	Использование страхового запаса продукции																											
<b>ИТОГО:</b>	18118	36236	54354	72472	90590	108708	126826	144944	163062	181180	199298	217416	235534	253652	271770	289888	503306	716724	930142	1143560	1356978	1570396	1783814					

Так, при производстве масляных фильтров производится сварка трением пластиковых частей корпуса, и недоуплотнение детали в области сварки может привести к такому виду несоответствия, как негерметичность фильтра, которая будет выявлена в ходе проверки только на следующем этапе производства.

Таким образом, в данном случае из-за брака литья одного из полуфабрикатов будет забракована уже готовая продукция, что повлечет за собой соответствующие потери для предприятия-производителя (расчет приведен в табл. 3).

Кроме того, необходимо учитывать ущерб, понесенный предприятием вследствие простоя оборудования, выражающийся в стоимости потерянных продаж, а также в размере штрафных санкций, налагаемых на поставщика в случае срыва поставок: просрочки поставки или недопоставки продукции.

Для рассмотренного примера в табл. 4 приведен прогнозный расчет потерь от простоя термопластавтомата, который, по сути, представляет собой результаты анализа экономических рисков предприятия-поставщика в случае возникновения нештатной ситуации. Подобные риски обязательно должны учитываться организацией в соответствии с требованиями стандарта IATF 16949:2016 [6], который является основным руководящим документом в области системы менеджмента качества для предприятий автомобильной промышленности [5].

Чтобы минимизировать подобные финансовые риски, предприятию необходимо решить задачу по разработке и внедрению эффективной системы оценки и контроля технического состояния оборудования в ходе производственного процесса. Кроме того, осуществление системных корректирующих и предупреждающих действий (так называемой защиты от ошибок) также является требованием стандарта IATF 16949:2016.

Поэтому на сегодняшний день актуальна задача прогнозирования технического состояния литьевых машин в процессе их эксплуатации, которое должно позволить снизить риски изготовления некачественной продукции и предотвратить срывы производственного плана по причине вынужденных простоев оборудования.

Решение данной задачи может быть реализовано посредством применения методов системного анализа: внедрения на предприятии процессов сбора и систематизации данных о текущем состоянии оборудования, а также разработки программного обеспечения для создания автоматизированной системы контроля с целью прогнозирования его технического состояния в процессе работы.

#### Библиографический список

1. **Освальд, Т.** Литье пластмасс под давлением [Электронный ресурс]. – Эл. текстовые данные (11,2 Мб). – Изд-во «Профессия», 2006.
2. **Бихлер, М.** Детали из пластмасс – отлить без дефектов [Электронный ресурс]. – Эл. текстовые данные (1,71 Мб). – Изд-во Demag plastservice, 1999.
3. **Калинчев, Э.Л.** Свойства и переработка термопластов [Электронный ресурс]. – Эл. текстовые данные (32,84 Мб). – Изд-во «Химия», 1983.
4. **Бортников, В.Г.** Основы технологии переработки пластических масс [Электронный ресурс]. – Эл. текстовые данные (5,45 Мб). – Изд-во «Химия», 1983.
5. **Сатаева, Д.М.** Автопром: подготовка специалистов нового уровня / Д.М. Сатаева, А.А. Брехова, Ю.С. Павлов // Стандарты и качество. – 2016. – № 11. – С. 34–38.

*Дата поступления  
в редакцию 30.01.2018*

A.Y. Panov<sup>1</sup>, D.M. Sataeva<sup>2</sup>, A.A. Brekhova<sup>3</sup>

**THE IMPACT OF EQUIPMENT ON QUALITY AND EFFICIENCY OF PRODUCTION  
OF PLASTIC PRODUCTS**

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R. E. Alekseev<sup>1</sup>,  
Nizhny Novgorod state engineering-economic University<sup>2</sup>,  
Dzerzhinsk Production Company<sup>3</sup>, Dzerzhinsk

**Introduction:** The main subject of analysis in the article is the influence of technological equipment on the quality of the automotive components manufactured by plastic molding under pressure.

**Methods:** The work methods are applied: facet classification method; the Ishikawa diagram, analysis of economic risks.

**Results:** The classification of discrepancies of plastic products. Identified causes of nonconforming products. The influence of equipment operation on the appearance of defects of molded parts. Conducted predictive economic calculations of losses arising from the manufacture of defective products and potential supply disruptions due to failures in the equipment.

**Conclusions:** Identified the need to develop system of forecasting of the technical condition of the equipment to prevent failures and ensure the implementation of the requirements of the IATF 16949:2016 in respect of the analysis of existing risks and the relevant preventive actions.

*Key words:* IATF 16949:2016, automotive component, risk analysis, defect, quality control, injection molding, discrepancy, equipment, preventive actions, production, injection molding machine, financial risks.

УДК 621.43.057

С.А. Плотников, А.Н. Карташевич, М.В. Смольников

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ  
ТРАКТОРА «БЕЛАРУС-922» ПРИ РАБОТЕ  
НА ТОПЛИВЕ С ДОБАВКАМИ ЭТАНОЛА**

Вятский государственный университет, г. Киров

Рассмотрены результаты энергетических показателей трактора «Беларус-922» при работе на топливе с добавками этанола. Тяговые испытания проводились в соответствии с ГОСТ 7057-2001. Условия испытаний (метеорологические, характеристики поля и почвы) определялись согласно ГОСТ 20915-2011. Тяговые показатели определялись нагружением движущегося трактора плугом ПЛН-3-35, приложенным к тягово-сцепному устройству ГОСТ 30745-2001. После снятия показателей энергетической оценки машино-тракторного парка (МТА) в процессе испытаний, производился расчёт согласно ГОСТ Р 52777-2007. Энергетическая эффективность трактора оценивалась по методике использования теплового потока, подводимого в двигатель в различных эксплуатационных режимах работы МТА.

Целью работы являлось изучение энергетических показателей МТА, выявление эффективности работы МТА на различных видах топлива, оценка возможности улучшения свойств смесевых топлив и расширение путей использования этанола в качестве альтернативного топлива.

Проведённые экспериментальные исследования выявили возможность использования ЭТЭ в дизельных ДВС и позволили сформулировать следующие выводы: работа трактора на топливах с добавками этанола не снижает энергетический КПД МТА в сравнении с его работой на ДТ; работу трактора «Беларус-922» с плугом ПЛН-3-35 эффективно производить на третьей передаче диапазона I; увеличение глубины вспашки с 20 до 25 см ведёт к повышению энергетического КПД МТА, это справедливо для всех применяемых топлив.

*Ключевые слова:* дизельное топливо, этанола-топливная эмульсия, тяговые испытания, машино-тракторный парк, энергетический показатель.

Объем грузооборота на автомобильном транспорте в России в начале 2017 г. вырос на 11,2% по сравнению с аналогичным периодом прошлого сезона, следует из сообщения на сайте Федерального дорожного агентства Росавтодор. Количество грузов, перевезенных автотранспортом, в январе увеличилось на 5,5%, до 318,7 млн т.

В сельскохозяйственном сезоне 2017 г. Российскую Федерацию ждал рекордный урожай зерновых и зернобобовых агрокультур за всю историю – 130,7 млн т. Скорее всего, будет поставлен рекорд и по экспорту зерновых. Еще несколько месяцев назад виды на урожай были куда более скромными. Такой прогноз был озвучен аналитической компанией «Про-Зерно». Этот рекорд побьет предыдущий максимальный уровень урожая, который был зафиксирован в 1978 г. Тогда было собрано 127,4 млн т. Для сравнения: в 2016 г. урожай составил 120,7 млн т, и это был рекордный сбор для постсоветской России.

Исходя из отмеченного, можно утверждать, что парк автомобилей, тракторов и самоходных машин растет и будет расти. Вся техника, которая существует на рынке продаж, энергоёмкая, позволяющая получать высокие результаты и выполнять поставленные задачи во всех сферах жизни. Большинство транспортных средств, занятых в сельском хозяйстве, промышленности оснащено дизельными двигателями, являющимися перспективными в машиностроении. На сегодняшний день практически весь транспорт зависит от традиционного углеводородного топлива, производящегося из невозобновляемых природных ресурсов. Безусловно, нужно шире исследовать альтернативные топлива, различного состава, применяемые в ДВС. Причиной такого поиска новых решений становится и возможность независимости топливной энергетики России от мировой политики и цен на нефть на мировом рынке.

Биоэтанолом называется этиловый спирт низкой степени очистки, получаемый из возобновляемого источника – биомассы. Основным сырьём для его производства являются крахмало- и сахаросодержащие сельскохозяйственные культуры. В наших широтах к таким

культурам относятся пшеница, картофель, кукуруза. В тропических странах наиболее эффективно использование сахарного тростника. Необходимо отметить, что в процессе производства биоэтанола могут быть получены дополнительные продукты, такие как барда – источник корма для животных, глютен – ценный для пищевой промышленности. Биоэтанол также может производиться из целлюлозосодержащих отходов сельского хозяйства и деревообрабатывающей промышленности. Сейчас себестоимость биоэтанола, изготовленного с использованием данного сырья, выше, чем себестоимость биоэтанола на основе сельхозпродукции. Тем не менее, в ближайшие годы планируется внедрение технологий, позволяющих значительно снизить затраты на производство биоэтанола из целлюлозы. В итоге его себестоимость может стать на порядок ниже себестоимости традиционного углеводородного топлива.

В Вятском государственном университете (ВятГУ) в сотрудничестве с Белорусской государственной сельскохозяйственной академией (БГСХА) длительное время проводятся исследования работы автотракторных дизелей на дизельном топливе с добавками биотоплив [2–12].

Исследования направлены на применение в дизельных двигателях этанола - топливной эмульсии (ЭТЭ). Применение этанола в виде ЭТЭ накладывает некоторые ограничения. Непременным условием является высокая стабильность эмульсии, достаточная для приготовления ее заблаговременно либо непосредственно в топливной системе дизеля. Очевидно, что параметры работы топливного насоса и всей системы в целом должны оставаться неизменными или находиться в пределах допустимых регулировок. Кроме того, такая эмульсия не должна вызывать отказов в работе топливной системы дизеля. Все проблемы, связанные с применением ЭТЭ в дизельных двигателях решаемы, и имеют положительный результат, исходя из проделанных ранее испытаний на двигателе 4ЧН 11,0/12,5 [2–7].

Следующим этапом научных исследований, явилось испытание трактора «Беларус – 922» при работе в полевых условиях с применением ЭТЭ (рис. 1). Тяговые испытания проводились в соответствии с ГОСТ 7057-2001. Условия испытаний (метеорологические, характеристики поля и почвы) определялись согласно ГОСТ 20915-2011. Тяговые показатели определялись нагружением движущегося трактора силой, приложенной к тягово-сцепному устройству.



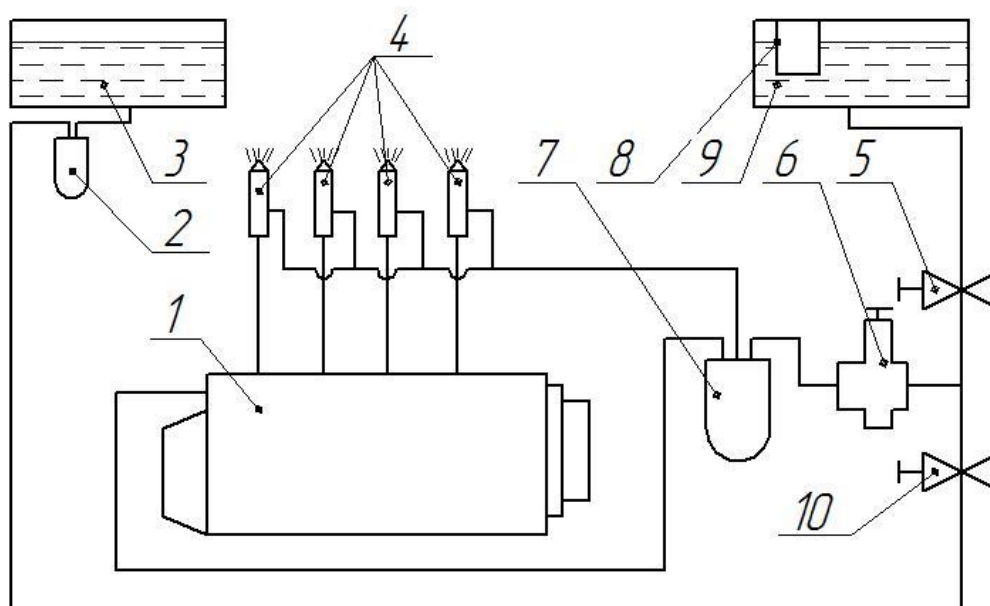
**Рис. 1. Общий вид трактора «Беларус – 922» с плугом ПЛН -3-35 при испытаниях**

Перед испытаниями трактор прошёл обкатку в соответствии с рекомендациями изготовителя в объёме, допускающем его последующую полную загрузку по мощности. Для трактора «Беларус – 922» проводилась 30-часовая обкатка. Комплектация трактора соответствовала указанной изготовителем в руководстве по эксплуатации для использования на ра-



ботах, требующих максимального усилия. Типоразмеры шин соответствовали рекомендациям изготовителя, высота почвозацепов соответствовала 82% от номинальной. Давление воздуха в шинах передних и задних колёс доводилось до значения, установленного в нормативно-технической документации. При этом давление воздуха в шинах замеряли шинным манометром. Применяемое дизельное топливо соответствовало рекомендуемой плотности  $(0,83 \pm 0,01) \text{ т/м}^3$ .

До начала проведения опытов обеспечивался прогрев двигателя. Масло в трансмиссии прогревалось до рабочей температуры при движении трактора холостым ходом к месту испытаний. Также проводился прогрев электроизмерительной аппаратуры. Для работы трактора на смесевом топливе стандартная топливная система переоборудовалась. В неё добавились следующие элементы: дополнительный бак со смесителем и выведенной в кабину трактора кнопкой включения; два крана для регулировки подачи дизельного топлива и смесевого топлива; топливопроводы по схеме рис. 2.



**Рис. 2. Схема топливной системы для приготовления и подачи эмульсии:**

- 1 - топливный насос высокого давления; 2 - фильтр грубой очистки топлива; 3 - бак для основного топлива; 4 - форсунки; 5 - отсечной кран для дополнительного топлива; 6 - подкачивающий насос; 7 - фильтр тонкой очистки; 8 - смеситель; 9 - бак для дополнительного топлива; 10 - отсечной кран для основного топлива

Испытания проводились при атмосферном давлении 748 мм рт. ст. и температуре окружающего воздуха  $17^\circ \text{ С}$ . Данные об условиях испытаний заносили в протокол испытаний. Данные о метеорологических условиях (температура и относительная влажность воздуха, барометрическое давление) брали с ближайшей метеорологической станции, находящейся на территории Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. Плотность топлива определяли ареометром. Рельеф поля описывали визуально с указанием уклонов и отличительных особенностей (характер микронеровностей, наличие борозд, высота стерни, растительный покров и т.д.).

Скорость движения трактора при испытаниях не превышала границ безопасности, указанных изготовителем в руководстве по эксплуатации. Все измерения начинали после обеспечения стабильного режима работы трактора. Положение органов управления регулятором частоты вращения коленчатого вала двигателя соответствовало полной подаче топлива. Максимальное тяговое усилие ограничивали началом неустойчивой работы двигателя или буксованием.

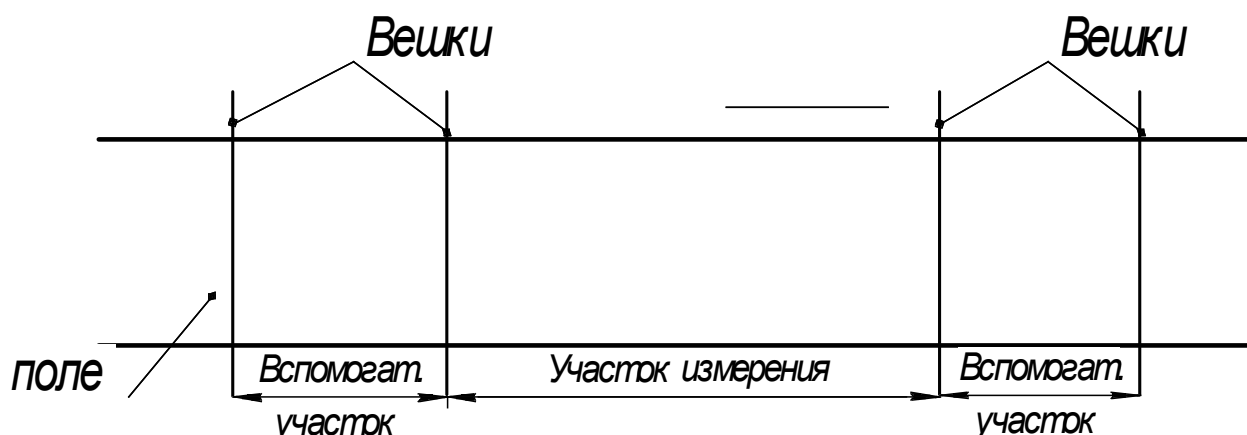


Рис. 3. Схема разметки участка поля

Для испытаний выбирали ровный (без заметных на глаз неровностей), горизонтальный (с продольным и поперечным уклоном не более 1 и 3% соответственно), прямолинейный участок поля длиной не менее 200 м. В средней части участка измеряли расход топлива за время прохождения трактором не менее 100 м.

В начале и в конце участка ставили сдвоенные контрольные вешки высотой 2,0 м. Вспомогательные участки по концам размечали вешками (рис. 3), длина этих участков составляла не менее 50 м. Измерения проводили при поддержании заданного тягового усилия в течение 20 с или времени, необходимого для прохождения расстояния не менее 20 м, в зависимости от того, какое время больше.

Тяговую характеристику трактора снимали на различных включенных передачах и диапазонах. Загрузку испытываемого трактора осуществляли плугом ПЛН-3-35 через динамометрическую автосцепку с многоканальным измерительным усилителем Spider 8.

Опыты проводили в следующем порядке. Перед началом опыта испытываемый трактор останавливался против вешки на внешнем конце первого вспомогательного участка. В трансмиссии трактора включалась выбранная передача. Акселератор устанавливался в положение, соответствующее полной подаче топлива. Затем производился разгон трактора. При прохождении вспомогательного участка скорость движения трактора и тепловой режим двигателя практически стабилизируются, что снижает погрешности измерения параметров при движении по участку измерения. Трактор проходил без остановки участок измерения и следующий за ним второй вспомогательный участок и останавливался против вешки в конце второго участка. В начале участка фиксировались измерения с записью в протокол показаний приборов до конца участка измерения. После записи показаний трактор разворачивался за пределами вспомогательного участка и останавливался у вешки на внешнем конце второго вспомогательного участка. Затем опыт повторялся при движении трактора по участку измерения в обратном направлении и, после записи показаний, трактор разворачивался и останавливался против его на внешнем конце первого вспомогательного участка.

Таким образом, каждый опыт проводился при движении как в прямом, так и в обратном направлении. Измерение расхода топлива за опыт производилось объёмным способом с помощью расходомера ДРТ-5 с терминалом СКРТ 31, включённым в линию низкого давления подачи топлива дизеля. Путь, пройденный за опыт, равнялся длине участка измерения. Он отмерялся с помощью рулетки.

После снятия показателей энергетической оценки машино-тракторного парка (МТА) в процессе испытаний, производился расчёт согласно ГОСТ Р 52777-2007. Энергетическая эффективность трактора оценивалась по методике использования теплового потока, подводимого в двигатель, в различных эксплуатационных режимах работы МТА [1].

Таблица 1

## Показатели энергетической оценки МТА «Беларус – 922» с плугом ПЛН -3-35

№ п/п	Наименование показателя	Вид топлива		
		ДТ	ДТ80%+ Э20%	ДТ60%+ Э40%
при вспашке почвы на глубину 0,2 м (2 передача/ I диапазон)				
1	Скорость движения, км/ч	8,3	8,2	8,1
2	Ширина захвата, м	1,05	1,05	1,05
3	Глубина хода рабочих органов, см	20	20	20
4	Расход топлива, кг/ч	13,2	13,9	14,7
5	Тяговое сопротивление машины, кН	19,1	19,0	18,9
6	Передача/диапазон	2/ I	2/ I	2/ I
7	Энергетический КПД МТА	0,20	0,21	0,21
при вспашке почвы на глубину 0,25 м (2 передача/ I диапазон)				
1	Скорость движения, км/ч	7,8	7,6	7,5
2	Ширина захвата, м	1,05	1,05	1,05
3	Глубина хода рабочих органов, см	25	25	25
4	Расход топлива, кг/ч	13,6	14,1	15,2
5	Тяговое сопротивление машины, кН	18,7	18,6	18,3
6	Передача/диапазон	2/ I	2/ I	2/ I
7	Энергетический КПД МТА	0,21	0,22	0,22
при вспашке почвы на глубину 0,2 м (3 передача/ I диапазон)				
1	Скорость движения, км/ч	9,5	9,6	9,4
2	Ширина захвата, м	1,05	1,05	1,05
3	Глубина хода рабочих органов, см	20	20	20
4	Расход топлива, кг/ч	11,0	12,1	13,8
5	Тяговое сопротивление машины, кН	15,5	15,4	15,6
6	Передача/диапазон	3/ I	3/ I	3/ I
7	Энергетический КПД МТА	0,29	0,30	0,28
при вспашке почвы на глубину 0,25 м (3 передача/ I диапазон)				
1	Скорость движения, км/ч	8,8	8,5	8,7
2	Ширина захвата, м	1,05	1,05	1,05
3	Глубина хода рабочих органов, см	25	25	25
4	Расход топлива, кг/ч	11,4	12,7	14,3
5	Тяговое сопротивление машины, кН	15,2	15,0	15,1
6	Передача/диапазон	3/ I	3/ I	3/ I
7	Энергетический КПД МТА	0,3	0,28	0,29

## Выводы

1. Работа трактора на топливах с добавками этанола не снижает энергетический КПД МТА в сравнении с его работой на ДТ;
2. Работу трактора «Беларус-922» с плугом ПЛН-3-35 эффективно производить на 3-й передаче I диапазона;
3. Увеличение глубины вспашки с 20 до 25 см ведёт к повышению энергетического КПД МТА, это справедливо для всех применяемых топлив.

## Библиографический список

1. **Мухамадьяров, Ф.Ф.** Экологические и энергетические аспекты использования пропашных тракторов / Ф.Ф. Мухамадьяров, А.А. Лопарев, В.И. Судницын. – Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 2004. – 126 с.
2. **Плотников, С.А.** Изучение свойств и разработка возобновляемых источников энергии на основе этанола. Улучшение эксплуатационных показателей сельскохозяйственной энергетики /

- С.А. Плотников [и др.]. // Наука-Технология-Ресурсосбережение: мат. IX межд. науч.-практ. конф. – Киров, 2016.– С. 120–123.
3. **Плотников, С.А.** Создание новых видов альтернативных топлив на основе этанола / С.А.Плотников, М.В. Смольников // Общество. Наука. Инновации. (НПК-2016): сб. ст. Всерос. ежегод. научно-практич. конф.; 18-29 апреля 2016 г. – Киров: Вят. гос. ун-т, 2016. – С. 1358–1362.
  4. **Плотников, С.А.** Стабильность новых видов альтернативных топлив на основе этанола / С.А. Плотников, М.В. Смольников // Общество. Наука. Инновации (НПК-2017): сб. статей: Всерос. ежегод. научно-практич. конф., 1–29 апреля 2017 г. – Киров: Науч. изд-во ВятГУ, 2017. – С. 1869–1874.
  5. **Плотников, С.А.** Исследование свойств новых топлив на основе этанола / С.А. Плотников, А.Н. Карташевич, М.В. Смольников // Вестник Белорус. гос. сельскохоз. академии. – 2017. – № 1. – С. 114–117.
  6. **Плотников, С.А.** Модернизация системы топливоподачи тракторного дизеля, работающего на этаноле-топливной эмульсии / С.А. Плотников, А.Н. Карташевич, М.В. Смольников // Общество. Наука. Инновации (НПК-2017): сб. ст.: Всерос. ежегод. научно-практич. конф., 1–29 апреля 2017. – Киров: Науч. изд-во ВятГУ, 2017. – С. 1835–1840.
  7. **Плотников, С.А.** Модернизация системы питания тракторного дизеля 4ЧН 11,0/12,5 для работы на этаноле-топливной эмульсии / С.А. Плотников [и др.] // Молочнохозяйственный вестник. – 2017. – №2(26). – С. 110–118.
  8. **Плотников, С.А.** Исследование показателей работы дизеля 4Ч 11,0/12,5, работающего на этанолсодержащем топливе / С.А. Плотников, М.В.Смольников // Будущее технической науки: сб. материалов XVI Междунар. молодежной научно-технич. конф. – Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2017. – С. 409–410.
  9. **Плотников, С.А.** Оценка экологической эффективности применения этанола в качестве альтернативного топлива. Актуальные направления научных исследований XXI века: Теория и практика / С.А. Плотников, М.В. Смольников // Сб. науч. тр. по материалам заоч. научно-практич. конф. – Воронеж: Научная книга, 2015. – № 4. – Ч. 1 (15-1) – С. 93–97.
  10. Пат. РФ № 2565383, МКИ<sup>7</sup>F02D 1/04, 1/10. Плотников С.А., Смольников М.В. Система регулирования многотопливного дизеля. – 4 с.
  11. Пат. РФ № 2626524, МКИ<sup>7</sup>F02D 1/04. Плотников С.А., Смольников М.В. Черемисинов П.А. Система регулирования дизеля. – 7 с.
  12. **Смольников, М.В.** Расчет параметров ДВС при работе на альтернативных топливах с использованием программного комплекса / М.В. Смольников, А.А. Князев, П.А.Черемисинов // Общество. Наука. Инновации. (НПК-2016): сб. ст. Всерос. ежегод. научно-практич. конф., 18-29 апреля 2016. – Киров: Вят. гос. ун-т, 2016. – С. 1389–1393.

*Дата поступления  
в редакцию 26.01.2018*

**S.A. Plotnikov, A.N. Kartashevich, M.V. Smolnikov**

## **RESEARCH OF POWER INDICATORS OF TRACTOR «BELARUS-922» AT WORK ON FUEL WITH ETHANOL ADDITIVES**

Vyatka State University

Object of research was the wheel tractor of Belarus-922 in the unit with a plough PLN-3-35 at work on alternative motor fuel.

Research problem was consideration of power indicators mashino-the tractor unit (MTU) at traction tests for various kinds and structures fuel, the analysis of possibility of use ethanol - fuel emulsion (EFE) in quality of motor fuel.

Research objective was the estimation of power efficiency of a tractor on to indicators of use of the thermal stream brought in the engine in the various operational operating modes MTU.

The technique of researches corresponded to requirements of operating standards. Traction tests were spent according to GOST 7057-2001. Test specifications (meteorological, field and soil characteristics) were defined according to GOST 20915-2011. Traction indicators were defined loading a moving tractor by a plough PLN-3-35, enclosed to the tјagovo-drawbar it agree GOST 30745-2001. Calculation of indicators of power estimation MTU in the course of tests was made according to GOST P 52777-2007.

Data of experimental researches has confirmed possibility uses EFE as motor fuel for a diesel engine also have revealed influence of modes works MTU on size of power efficiency (PERFORMANCE).

*Key words:* fuel, ethanol - fuel emulsion, traction tests, mashino-tractor park, a power indicator.

## НАШИ АВТОРЫ

### ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

**Викулова Елена Николаевна** – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; vikelni@mail.ru

**Гай Василий Евгеньевич** - канд. техн. наук, доцент - НГТУ им. Р.Е. Алексеева; iamuser@inbox.ru

**Жевнерчук Дмитрий Валерьевич** – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; zhevnerchuk@yandex.ru

**Захаров Александр Сергеевич** – аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева, старший инженер-программист по разработке ПО ООО "Харман"; lukalex.nnov@gmail.com

**Коган Дмитрий Израилевич** – д-р техн. наук, профессор Московского технологического университета; kdi\_41@mail.ru

**Ломакина Любовь Сергеевна** – д-р техн. наук, профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева; lomakina@list.ru

**Ляхманов Дмитрий Александрович** – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; dm.virger@gmail.com

**Макаров Николай Николаевич** – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; maknik46@yandex.ru

**Митяков Сергей Николаевич** – д-р физ.-мат. наук, профессор, директор ИНЭУ НГТУ им. Р.Е. Алексеева; snmit@mail.ru

**Митяков Евгений Сергеевич** – канд. экон. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; iyao@mail.ru

**Никифоров Николай Андреевич** – студент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; lnikolay1971@gmail.com

**Носков Кирилл Михайлович** – аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева; ksendr@nnov.@gmail.com

**Панкратова Анна Зурабовна** – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; anzupa@mail.ru

**Соловьев Алексей Валерьевич** – канд. техн. наук, доцент ВГУВТ; solovev@rivregnn.ru

**Суркова Анна Сергеевна** – д-р техн. наук, доцент, НГТУ им. Р.Е. Алексеева; ansurkova@yandex.ru

**Федосенко Юрий Семенович** – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой ВГУВТ; fds@vgavt-nn.ru

**Утробин Владимир Александрович** – д-р техн. наук, профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева; utrobin-va@yandex.ru

**Хандурин Дмитрий Александрович** – аспирант Московского технологического университета (МИРЭА – МГУПИ); kdi\_41@mail.ru

**Хоптар Виталий Владимирович** – начальник 489 военного представительства МО РФ в ФНПЦ АО «НПП «Полет»; vhoptar@mail.ru

**Чернобаев Игорь Дмитриевич** – аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева; ichernobnn@gmail.com

### ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

**Абузьяров Тагир Хусаинович** – магистрант НГТУ им. Р.Е. Алексеева; atx888@yandex.ru

**Белов Юрий Георгиевич** – д-р техн. наук, профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева; bel266@nntu.ru

**Безносков Александр Викторович** – д-р техн. наук, профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева; beznosov@nntu.ru

**Бокова Татьяна Александрович** – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; tatabo@bk.ru

**Болонина Алёна Александровна** – магистрант НГТУ им. Р.Е. Алексеева; bolonina.alena2011@yandex.ru

**Веселов Леонид Евгеньевич** – аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева; veselov022@gmail.com

**Власичев Герман Николаевич** – д-р техн. наук, профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева; vlas@mts-nn.ru

**Гадетов Владислав Александрович** – магистрант НГТУ им. Р.Е. Алексеева; vlad-nijakun@mail.ru

**Гуляев Владимир Викторович** – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; eovt@mail.ru

**Добров Александр Алексеевич** – ассистент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; a.a.dobrov@yandex.ru

**Землянкин Максим Александрович** – студент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; raevskaja@forum.nn.ru

**Иванова Кристина Геннадьевна** – магистрант НГТУ им. Р.Е. Алексеева; kristen.iv@yandex.ru

**Кайнова Анастасия Валерьевна** – магистрант НГТУ им. Р.Е. Алексеева; anastasia.d@nstedu.com

**Кочеганов Дамир Михайлович** – магистрант НГТУ им. Р.Е. Алексеева; dk402@yandex.ru

**Кралин Алексей Александрович** – канд. техн. наук, зав. кафедрой НГТУ им. Р.Е. Алексеева; toe@nntu.ru

**Крюков Евгений Валерьевич** – старший преподаватель НГТУ им. Р.Е. Алексеева; e.kryukov@rambler.ru

**Курбатова Наталья Павловна** – магистрант НГТУ им. Р.Е. Алексеева; kurbatova-n@bk.ru

**Легчанов Максим Александрович** – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; legchanov@mail.ru

**Соснина Елена Николаевна** – д-р техн. наук, профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева; sosnyna@yandex.ru

**Сухарев Юрий Петрович** – д-р техн. наук, профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева, главный специалист АО «ОКБМ Африкантов»; sukharev@okbm.nnov.ru

**Лукичев Никита Сергеевич** – магистрант НГТУ им. Р.Е. Алексеева; legchanov@mail.ru

**Ляхов Игорь Юрьевич** – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; i-u-l@bk.ru

**Матюшечкин Николай Алексеевич** – главный конструктор по ВОЛС АО НПП «Полет»; fae\_nir@nntu.ru

**Мелузов Александр Георгиевич** – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; meluzov@mail.ru

**Раевская Юлия Владимировна** – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; raevskaja@forum.nn.ru

## **МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО**

**Бабанин Анатолий Яковлевич** – д-р техн. наук, доцент Донбасской национальной академии строительства и архитектуры; bay1957@mail.ua.

**Беляков Владимир Викторович** – д-р техн. наук, профессор, начальник УНИиР НГТУ им. Р.Е. Алексеева; nauka@nntu.ru

**Береснев Павел Олегович** – аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева; pavel.beresnev@nntu.ru

**Брехова Анна Анатольевна** – инженер по качеству ООО «Дзержинская Производственная Компания»; Pochta792@rambler.ru

**Волков Сергей Александрович** – магистр НГТУ им. Р.Е. Алексеева; факс (+7 831) 462-30-85

**Горожанкин Сергей Андреевич** – д-р техн. наук, профессор Донбасской национальной академии строительства и архитектуры» (ДНРеспублика, г. Макеевка); gormar52@gmail.com.

**Грошев Анатолий Михайлович** – канд. техн. наук, руководитель проекта Региональный научно-образовательный центр транспортного машиностроения НГТУ им. Р.Е. Алексеева; anatoly.groshev@nntu.ru

**Дьяков Алексей Сергеевич** – канд. техн. наук, МГТУ им. Н.Э. Баумана; diakov57@list.ru

**Захаров Александр Юрьевич** – канд. техн. наук, МГТУ им. Н.Э. Баумана; zakharov-al@mail.ru

**Зезюлин Денис Владимирович** – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; denis.zeziulin@nntu.ru

**Карташов Александр Борисович** – канд. техн. наук, МГТУ им. Н.Э. Баумана; kartashov@bmstu.ru

**Карташевич Анатолий Николаевич** – д-р техн. наук, профессор ВятГУ (г. Киров);

Kartashevich@yandex.ru

**Кравец Владислав Николаевич** – д-р техн. наук, профессор, зам. зав. кафедрой НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

vnkravets@yandex.ru

**Клубничкин Владислав Евгеньевич** – канд. техн. наук, МГТУ им. Н.Э. Баумана;

vklubnichkin@gmail.com

**Клубничкин Евгений Евгеньевич** – канд. техн. наук, МГТУ им. Н.Э. Баумана;

klubnichkin@mgul.ac.ru

**Малеев Сергей Игоревич** – ассистент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

anton.tumasov@nntu.ru

**Минков Константин Александрович** – ведущий инженер по спец. изделиям ПАО «Русполимет»;

K.minkov@ruspolymet.ru

**Мусарский Роман Абрамович** – д-р техн. наук, профессор, НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

musarsky@list.ru

**Огороднов Сергей Михайлович** – канд. техн. наук, доцент, зам.директора по НИР ИТС НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

anton.tumasov@nntu.ru

**Павлов Александр Сергеевич** – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е.Алексеева;

as-pavlov @list.ru

**Панов Алексей Юрьевич** – д-р техн. наук, профессор, директор ИПТМ НГТУ им. Р.Е. Алексеева; Fam@nntu.ru

**Понякин Виктор Владиславович** – ассистент Донбасской национальной академии строительства и архитектуры;

PonyakinVV@mail.ru.

**Порубов Дмитрий Михайлович** - аспирант НГТУ им. Р.Е.Алексеева;

dmitry.porubov@nntu.ru

**Плотников Сергей Александрович** – д-р техн. наук, профессор ВятГУ, (г. Киров); Plotnikovsa@bk.ru

**Рогов Петр Сергеевич** – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

anton.tumasov@nntu.ru

**Рудницкий Андрей Вадимович** – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; 436-78-96

**Рудницкий Вадим Игнатьевич** – д-р техн. наук, профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева; 436-78-96

**Рябов Дмитрий Александрович** – магистр НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

ryabovdm1996@gmail.com

**Савенков Никита Владимирович** – канд. техн. наук, ассистент Донбасской национальной академии строительства и архитектуры»; SavenkovNV@ya.ru.

**Смольников Михаил Владимирович** – аспирант ВятГУ (г. Киров);

mihail.mai@mail.ru

**Сатаева Диана Михайловна** – канд. техн. наук, доцент Нижегородского государственного инженерно-экономического ун-та; Smu\_nngasu@mail.ru

**Тумасов Антон Владимирович** – канд. техн. наук, доцент директор ИТС НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

anton.tumasov@nntu.ru

**Тюгин Дмитрий Юрьевич** – канд. физ.-мат. наук, ведущий науч. сотрудник Регионального научно-образовательного центра транспортного машиностроения НГТУ

им. Р.Е.Алексеева; dmitry.tyugin@nntu.ru

**Филатов Валерий Игоревич** – аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

valera.filatov@nntu.ru

**Хлыбов Александр Анатольевич** – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

hlybov\_52@mail.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: aespurance@yandex.ru, rsl@nntu.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, подрисуночная 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**

**№ 1 (120)**

Редакторы: **Е.В. Комарова, Т.В. Третьякова**  
Технический редактор **Т.П. Новикова**

*Редакция:*

603950, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24.  
aesp@yandex.ru, rsl@nntu.ru

Подписано в печать 21.03.2018. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Бумага офсетная.

Печать трафаретная. Усл. печ. л. 29,25. 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**