

ISSN 1816-210X

# ТРУДЫ НГТУ

ИМ. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА

Нижний Новгород

**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*

**№ 2 (121)**

**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. №2(121).  
– 209 с.

*Выходит 4 раза в год*

**Журнал включен ВАК при Минобрнауки России**

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

**Главный редактор С.М. Дмитриев**

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ**

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

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

**РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ**

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

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

**ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОГО СОВЕТА**

***Пелиновский Дмитрий Ефимович***

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

***Палкович Ласло***

Проф. Сечени Иштван Университет, Дьёр, Венгрия

***Варлаки Петер***

Проф. Сечени Иштван Университет, Дьёр, Венгрия

***Виджай Кумар Чакка***

PhD, проф., Университет Шив Надар, Индия

***Ялцинер Ахмет Джевдет***

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

*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*

**№ 2 (121)**

**Nizhny Novgorod 2018**



*The journal is issued 4 times a year*

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

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

**Editor-in-Chief S.M. Dmitriev**

**EDITORIAL BOARD**

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

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

**EDITORIAL COUNCIL**

**Acting Chairman,  
Vice-chairman**

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

**Members of Editorial Council**

***Pelenovski Dmitri Efimovich***

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

***László Palkovics***

The Széchenyi István University (Győr, Hungary)

***Péter Várlaki***

The Széchenyi István University (Győr, Hungary)

***Vijay Kumar Chakka***

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

***Yalciner Akhmet Cevdet.***

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

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

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ.....</b>	<b>9</b>
Гусев Р.С., Федосова Л. О., Цапаев А.П. Анализ методов обработки изображений внутренней поверхности труб.....	9
Евдокимова Т. С., Синодкин А. А., Федосова Л. О., Тюриков М. И. Система позиционирования и идентификации мобильной робототехнической платформы в ограниченном и открытом пространстве.....	16
Ерофеев В.И., Иляхинский А.В., Хлыбов А. А. Распределение дирижле как статистическая модель трибосистемы.....	26
Китаев А. Е. Использование метода наименьших квадратов для подбора параметров вольт-амперной характеристики диода.....	30
Корелин О.Н., Кобляков Д.А., Тимофеева О.П. Исследование программно-аппаратных решений для системы помощи водителю «интеллектуальные прозрачные стойки».....	35
Мусарский Р.А. Вероятностное исследование динамических систем на основе соотношения между старшими определителями Гурвица .....	41
Сачков А.Д., Кобляков Д.А., Соколова Э.С. Разработка программно-аппаратного комплекса извлечения и анализа видеопотока данных с сенсорных устройств.....	46
Тюгин Д.Ю., Куркин А.А., Куркина О.Е. Проблемно-ориентированный программный комплекс для моделирования динамики внутренних волн в стратифицированном океане.....	52
Шмелева А.Г., Ладынин А.И., Таланова Ю.В., Наумов В.В. Когнитивное моделирование в информационной системе поддержки принятия решений.....	60
<b>ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ.....</b>	<b>68</b>
Андреева А.В., Власичев Г.Н. Расчетный анализ аварии с блокировкой отдельной твс реактора бн в различных режимах работы.....	68
Власичев Г.Н., Ситникова Е.В. Аналитическая модель термического состояния насыпного слоя из фрагментов разрушенной активной зоны при тяжелой аварии ядерного реактора.....	76
Гордеев Б.А., Охулков С.Н., Плехов А.С., Титов Д.Ю. Стабилизация работы магнитоуправляемых демпферов ударных нагрузок контурной тепловой трубой	86
Калинин Е.В. Магнитное поле в анизотропном шихтованном сердечнике. Рекомендации к определению степени магнитной анизотропии холоднокатаных электротехнических сталей.....	96
Кожевников С.В., Пименов С.А. Применение по аркон reliability solver для оценки вероятности безотказной работы программно-технических средств автоматизированных систем управления технологическими процессами атомных электростанций.....	106
Мухряков Ю.А., Дунцев А.В., Андреев В.В., Кучеров Ю.В., Хохлов В.Н. Анализ влияния на частоту повреждения активной зоны от внедрения мобильных насосных установок и дизель-генераторов на АЭС.....	117
Семёнов А.С., Харитонов Я.С., Егоров А.Н. Разработка математической модели электромагнитного привода с системой управления стабилизации производительности питателя.....	123

---

<b>Серебряков А.В.</b> Прогнозирование технического состояния автономных генераторных комплексов.....	132
<b>МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО .....</b>	<b>138</b>
<b>Гагунов С.А.</b> Проектирование легких коммерческих автомобилей с учетом требований утилизации в конце жизненного цикла.....	138
<b>Иванов А.М., Кристальный С.Р., Попов Н.В., Топорков М.А., Исакова М.И.</b> Новые методы испытаний систем автоматического экстренного торможения и опыт их применения.....	146
<b>Кочеров А.В., Курмакаев Д.Р., Сизов А.Ю., Туманов А.А., Федосова Л.О.</b> Выбор типа электрохимической системы аккумулятора электромобиля LCV-сегмента	156
<b>Мавлеев И.Р., Салахов И.И., Волошко В.В.</b> Модульная трансмиссия тяжелых грузовых автомобилей.....	162
<b>Плотников С.А., Кантор П.Я., Козлов И.С., Втюрина М.Н.</b> Исследование моторных свойств смесей дизельного топлива с рапсовым маслом.....	169
<b>Савельев В.А.</b> Критическая частота вращения карданного вала и эффект принудительной синхронизации в трансмиссии с рядным четырехцилиндровым двигателем	175
<b>Савченко В.В., Поддубко С.Н.</b> Подход к разработке метода передачи управления транспортным средством водителю бортовыми системами в автоматическом режиме.....	181
<b>Стахин Д.Р., Гончаров К.О.</b> Особенности выбора силовой установки трицикла класса shell eco-marathon.....	188
<b>Тихомиров А.Н., Щербаков В.В.</b> Вопросы выбора мощности вспомогательной энергоустановки транспортной электроплатформы.....	196

## CONTENTS

<b>INFORMATICS AND MANAGEMENT IN TECHNICAL AND SOCIAL SYSTEMS....</b>	<b>9</b>
<b>Gusev R.S., Fedosova L. O., Tsapaev A.P.</b> Analysis of image processing methods for the inner surface of pipes.....	9
<b>Evdokimova T. S., Sinodkin A.A., Fedosova L.O., Sizov A.Y.</b> The impact of equipment on quality and efficiency of production of plastic products.....	16
<b>Erofeev V.I., Ilyahinskii A.V., Khlybov A.A.</b> Dirichlet distribution as a statistical model of the tribosystem.....	26
<b>Kitaev A. E.</b> Using of the least-squares method for diode parameters fitting.....	30
<b>Korelin O.N., Koblyakov D.A., Timofeeva O.P.</b> Investigation of software-driver solutions for assistance system "smart transparent stands".....	35
<b>Musarsky R.A.</b> Probabilistic investigation of dynamic systems on the basis of the relation between leading Hurvitz determinants.....	41
<b>Sachkov A.D., Koblyakov D.A., Sokolova E.S.</b> Development of software and hardware complex of extraction and analysis of video data from sensory devices.....	46
<b>Tyugin D. Y., Kurkin A.A., Kurkina O.E.</b> Problem-oriented software package for modeling dynamic of internal waves in the stratified ocean.....	52
<b>Shmeleva A.G., Ladynin A.I., Talanova Yu.V., Naumov V.V.</b> Cognitive modeling in the decision support system.....	60
<b>ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES.....</b>	<b>68</b>
<b>Vlasichev G.N., Andreeva A.V.</b> Analysis of the design-basis accident with blockage of liquid metal fast reactor individual fuel assembly in various operation modes.....	68
<b>Vlasichev G.N., Sitnikova E.V.</b> Analytical model of the thermal state of the bulk layer from fragments of the destroyed core in the event of a severe nuclear reactor accident	76
<b>Gordeev B.A., Okhulkov S.N., Titov D. Yu., Plekhov A.S.</b> Stabilization of controllable shock load dampers operation with a loop heat pipe.....	86
<b>Kalinin E. V.</b> Magnetic field in an anisotropic laminated magnetic core. Recommendations for determining the degree of magnetic anisotropy of cold-rolled electrical steels.....	96
<b>Kozhevnikov S.V., Pimenov S.A.</b> Application software arcon reliability solver for assessment of reliability of soft-and-hardware automated process control system of nuclear power plants.....	106
<b>Mukhryakov Y.A., Ducev A.V., Andreev V.V., Kucherov Y.V., Khokhlov V.N.</b> The analysis of influence on the frequency of damage of the active zone from implementation of mobile pumping installations and diesel generators on the NPP.....	117
<b>Semenov A.S., Kharitonov Ya.S., Egorov A.N.</b> Development of mathematical model of electromagnetic drivewith a control system to stabilize the performance of the feeder	123
<b>Serebryakov A.V.</b> Forecasting the technical condition of autonomic generator complexes.....	132

---

<b>MECHANICAL AND TRANSPORT: THEORY, TECHNOLOGY, PRODUCTION...</b>	138
<b>Gagunov S.A.</b> Light commercial vehicles designing with considering end-of-life vehicles recycling requirements.....	138
<b>Ivanov A M., Kristalnyi S.R., Popov N.V., Toporkov M.A., Isakova M.I.</b> New methods of testing automatic emergency braking systems and their application.....	146
<b>Kocherov A.V., Kurmakaev D.R., Sizov A.Y., Tumanov A.A., Fedosova L.O.</b> Selecting of the electrochemical system type for the electric LCV .....	156
<b>Mavleev I.R., Salakhov I.I., Voloshko V.V.</b> Modular heavy duty truck transmission	162
<b>Plotnikov S.A., Kantor P.Y., Kozlov I.S., Vtyurina M.N.</b> Research of motor properties of mixes of diesel fuel with rape seed oil.....	169
<b>Saveliev V.A.</b> Critical speed of the driveshaft and the effect of forced synchronization in the transmission with a four-cylinder inline engine.....	175
<b>Savchenko V.V., Poddubko S.N.</b> An approach to development of a method for transfer of vehicle control from on-board systems to the driver in automatic mode.....	181
<b>Stakhin D. R., Goncharov K. O.</b> The peculiarities of selection of the power unit tricycle class shell eco-marathon.....	188
<b>Tikhomirov A.N., Scherbakov V.V.</b> The issue of selecting power of auxiliary power system of transport electric platform.....	196



# ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

УДК 004.89

Р.С. Гусев, Л. О. Федосова, А.П. Цапаев

## АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ТРУБ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Обеспечение качества труб в технологическом процессе производства изделий для энергетики существенно зависит от системы управления качеством. Система управления качеством нераздельно связана с системой неразрушающего контроля, включающего в себя операцию по визуальному контролю внутренней поверхности труб. Поэтому одной из наиболее важных задач, направленных на обеспечение технической надежной эксплуатации трубопроводов различных отраслей народного хозяйства, является внедрение прогрессивных методов диагностики внутренней и внешней поверхности трубы на всех этапах - от производства до использования в промышленных масштабах.

*Ключевые слова:* обработка изображения, внутренняя поверхность трубы, каскад сверточной нейронной сеть, дефект, метод оценки изменения формы спектра, метод ориентированных фильтров, метод матрицы вхождений коэффициентов вейвлет-преобразования.

### Введение

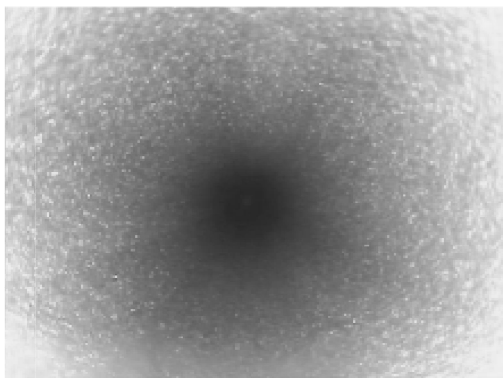
В соответствии с маршрутом производства труб операция визуального контроля внутренней поверхности доходит до пяти раз за технологический цикл. В настоящее время на многих промышленных предприятиях в процессе визуального контроля внутренней поверхности труб участвует оператор, поэтому результаты контроля включают в себя элементы субъективности и во многом зависят от опыта оператора, его усталости и физиологических особенностей, поэтому автоматизация визуального контроля, как средство исключения субъективности, является актуальной задачей. В условиях субъективности визуального контроля, в качестве фактора риска выступает человеческий фактор, исключить который позволит автоматизация операции контроля. Кроме того, автоматизация визуального контроля откроет возможность для включения данной операции в автоматизированную систему управления технологическими процессами, что позволит повысить качество и сократить брак.

Целью настоящей статьи является обзор существующих методов обработки изображения внутренней поверхности труб малых диаметров и предложение нового алгоритма поиска дефектов.

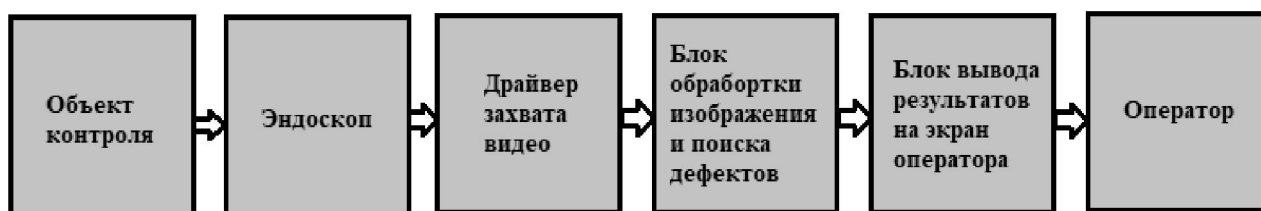
На рис. 1 показана фотография внутренней поверхности трубы малого диаметра, полученная с помощью эндоскопа. Рассмотрим схему программной части автоматизированной системы визуального осмотра внутренней поверхности труб, представленную на рис. 2. Согласно ей информация передается от объекта контроля к оператору. В нашем случае объектом контроля является труба малого диаметра.

Первоначально в качестве устройства сбора информации выступает эндоскоп, который получает изображение внутренней поверхности с помощью драйвера захвата видео. Да-

лее данное изображение подается на блок обработки изображения, который осуществляет над ним определенные операции, такие, как поиск дефектов. В результате выполнения операции обнаружения дефектов получается следующая информация: факт наличия/отсутствия дефекта, местоположение дефекта и его вид. Все эти данные передаются в блок вывода изображения и результатов на экран оператора, который в свою очередь является конечным звеном данной цепи. Таким образом, в результате прохождения через систему информация перерабатывается из изображения внутренней поверхности в данные о наличии и расположении дефекта.



**Рис. 1. Фотография внутренней поверхности трубы**



**Рис. 2. Схема программной части автоматизированной системы**

Главную роль в автоматизированной системе визуального контроля играет обработка изображений. Основной задачей в области обработки изображения внутренней поверхности трубы является повышение эффективности методов распознавания при обнаружении дефектов внутренней поверхности труб и усовершенствование способа использования визуального и измерительного метода контроля поверхности труб, позволяющих снизить затраты и минимизировать влияние человеческого фактора на результативность выполняемого контроля.

### **Методы поиска дефектов**

В настоящее время существует множество методов поиска дефектов на изображении, которые отличаются своим многообразием как по математическому обеспечению, так и областям применения. Рассмотреть все из них не представляется возможным, поэтому для обзора выбраны три метода: метод, основанный на ориентированных фильтрах, метод, основанный на матрице вхождений коэффициентов вейвлет-преобразования и метод оценки изменения формы спектра.

#### **Метод оценки изменения формы спектра (ОИФС)**

В основе данного метода лежит сравнение формы эталонного спектра со спектром исследуемого изображения посредством вычисления взвешенного евклидова расстояния. Применение метода ОИФС для обнаружения дефектов на изображении поверхности разделяется на два этапа:

- 1) настройка метода ОИФС на конкретную поверхность;

2) классификация изображения поверхности на дефектное/не дефектное с применением метода ОИФС.

Рассмотрим каждый этап более детально.

#### *Настройка метода ОИФС*

Целью данного этапа является определение пара метров эталонной поверхности и порога дефектности  $P$ . В качестве параметров выступают два массива данных:

- значения интенсивности спектра  $s_{ij}$  на конкретных пространственных частотах, которые выступают в качестве признаков;
- весовые коэффициенты для каждого признака  $\alpha_{ij}$ , которые характеризуют степень значимости каждого признака. В качестве исходных данных для определения параметров эталона выступает набор изображений эталонной поверхности.

#### *Классификация методом ОИФС*

При классификации с помощью метода ОИФС на вход алгоритма подается изображение внутренней поверхности трубы, а также параметры эталонной поверхности, вычисленные на этапе настройки. Вначале происходит вычисление спектра данного изображения, далее определяется взвешенное евклидово расстояние от данного спектра до эталонного [1].

#### **Метод обнаружения дефектов основанный на использовании матрицы вхождений коэффициентов вейвлет-преобразования (МВКВ)**

Применение метода МВКВ для обнаружения дефектов на изображении поверхности разделяется на два этапа:

- 1) настройка метода МВКВ на конкретную поверхность;
- 2) классификация изображения поверхности на дефектное/не дефектное с применением метода МВКВ.

#### *Настройка метода МВКВ*

Целью данного этапа является определение параметров эталонной поверхности и порога дефектности. В качестве параметров выступают два массива данных:

- 1) вектор признаков, в качестве которых выступают свойства МВКВ;
- 2) весовые коэффициенты для каждого признака, которые характеризуют степень значимости каждого признака. В качестве исходных данных для определения параметров эталона выступает набор изображений эталонной поверхности.

#### *Классификация (да/нет) методом МВКВ*

При классификации с помощью метода МСВКВ на вход алгоритма подается изображение внутренней поверхности трубы, а также параметры эталонной поверхности (Features,  $\alpha$  и  $P$ ).

1. Вычислить вейвлет-преобразование изображения. В качестве порождающего вейвлета выбран вейвлет Добеши. Преобразование выполняется на один уровень. На выходе данного перехода алгоритма получаются четыре матрицы:

- матрица коэффициентов приближения  $A$ ;
- матрицы коэффициентов деталей по горизонтали  $H$ , вертикали  $V$ , диагонали  $D$ ;

2. Вычислить матрицы вхождений (МВ) для матриц  $A$ ,  $H$ ,  $V$ ,  $D$ . Для каждой из матриц  $A$ ,  $H$ ,  $V$ ,  $D$  вычисляются четыре МВ по числу схем взаимного расположения пикселей:

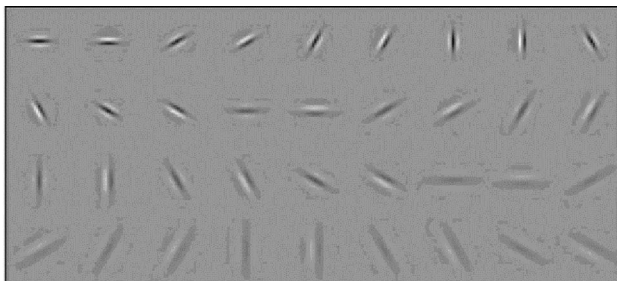
3. Определить свойства МВ (контраст, энергия, корреляция, однородность) для каждой из матриц  $A$ ,  $H$ ,  $V$ ,  $D$  при каждой схеме расположения пикселей.

4. Вычислить среднее и свойства каждого (контраст, энергия, корреляция, однородность) по четырем схемам расположения пикселей для каждой матрицы  $A$ ,  $H$ ,  $V$ ,  $D$ .

### Метод обнаружения дефектов, основанный на применении ориентированных фильтров (ОРФ)

Подобно методу МВКВ применение метода ориентированных фильтров (ОРФ) можно разделить на два: настройка, классификация.

Для вычисления признаков формируется набор четно и нечетно симметричных фильтров при различных ориентациях и масштабах (рис. 3).



**Рис. 3. Набор фильтров, состоящий из двух фаз (четная, нечетная), трех шкал и 6 ориентаций**

Результатом настройки метода ОРФ являются матрица признаков, матрица весовых коэффициентов и порог дефектности. В качестве исходных данных используется набор изображений, формирование которого показано в описании метода МВКВ. Рассмотрим алгоритм определения матрицы признаков.

1. Сформировать ядра фильтров. В данном исследовании применяются следующие фильтры:

- нечетные фильтры ориентированных полос трех шкал и шести ориентаций;
- четный фильтр ориентированных полос;
- фильтр пятен.

2. Для всех изображений набора выполнить п. 3-5.

3. Выполнить фильтрацию изображения набора. Результатом работы данного перехода алгоритма является набор из 20 отфильтрованных изображений.

4. Для каждого из отфильтрованных изображений вычислить свойства.

5. Сформировать матрицу признаков для данного изображения набора Features ( $n$ ).

Матрица имеет размер  $20 \times 2$ , где строки характеризуют индекс ядра фильтра, а столбцы индекс свойства.

6. Вычислить среднее значение признаков Features по всему набору изображений из 100, каждый элемент которого  $f_{ij}$  вычисляется, где  $f_{ij}(n)$  – элемент вектора признаков Features ( $n$ ), вычисленный по  $n$ -му изображению исходного набора.

Все три метода были протестированы на модельных изображениях. Эксперимент по определению ограничений методов обнаружения дефектов проходил в несколько этапов. На первом этапе происходила настройка методов обнаружения на конкретную поверхность. Настройка проводилась по 100 изображениям внутренней поверхности труб. В результате выполнения данного этапа для каждого метода определяются параметры его настройки: матрица признаков эталона, матрица весовых коэффициентов эталона и порог дефектности. На втором этапе оценивалась работа методов на модельных изображениях. Вначале определялась ошибка ложного обнаружения. Эксперимент проводится по 100 изображениям качественной поверхности и оценивался процент ложного определения дефекта. Далее проводился анализ работы метода на моделях изображений с дефектами. Для каждого типа дефекта при каждом параметре создается 100 модельных изображений и определяется процент обнаружения дефекта соответствующим методом. Кроме того, на этом этапе происходит оценка времени работы алгоритма [3].

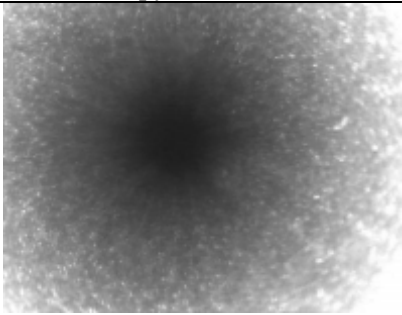
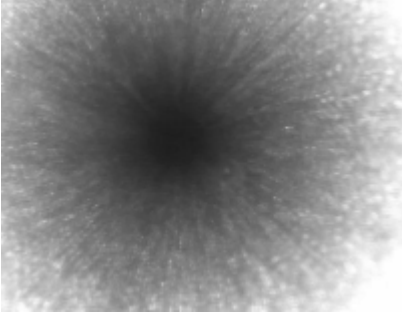
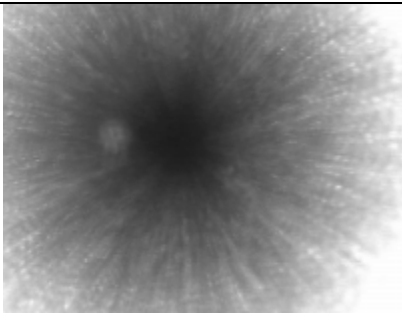
### Проблемы, возникшие при практической реализации методов

При практической реализации системы обнаружения дефектов для внутренней поверхности труб в лабораторных условиях возникли следующие проблемы:

1. При движении эндоскопа в трубе на больших скоростях в процессе видео-захвата возникает эффект «смаза» изображения.

*Таблица 1*

**Возникновение «смаза» изображения при движении на различных скоростях**

Фотография внутренней поверхности трубы	Скорость движения эндоскопа в трубе
	25 м/час
	35 м/час
	45 м/час

На снимках, представленных в табл. 1, видно, чем больше скорость, тем более размытыми и нечеткими получаются изображения. В свою очередь, система обнаружения дефектов распознаёт смазанное изображение как дефект, хотя дефекта на нем нет.

2. Дефекты имеют различные характеристики: цвет, текстуру и другие. Методы не обнаруживают темные дефекты с нечеткой границей.

3. Невысокая скорость обработки изображений, которая снижает производительность системы

Решение первой проблемы возможно несколькими путями:

1) аппаратное решение – применение более дорогостоящих плат видео-захвата с частотой захвата кадров до 100 fps;

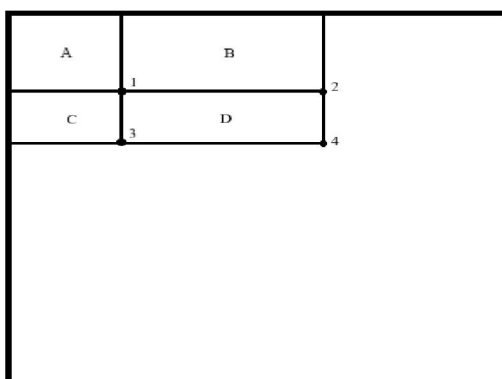
2) программное решение – существуют математические методы реконструкции изо-



бражения, позволяющие точно или даже полностью восстановить резкость смазанного изображения, однако такую фильтрацию достаточно сложно осуществить в реальном времени.

Вторая проблема решается дополнением набора признаков дефектов и, в частности, использованием признаков из теории активного восприятия, которая посвящена раскрытию априорной неопределённости изображения [4].

В качестве решения третьей проблемы решено перейти от исходного изображения к интегральному, которое в своей статье приводят Пол Виола и Майкл Джонсон [5]. Интегральное изображение помогает очень быстро рассчитывать суммарную яркость произвольного прямоугольника на данном изображении, причем какой бы прямоугольник не был, время расчета неизменно. Интегральное представление изображения – это матрица, совпадающая по размерам с исходным изображением. В каждом элементе ее хранится сумма интенсивностей всех пикселей, находящихся левее и выше данного элемента. Например, исходя из рис. 4, чтобы посчитать сумму пикселей в прямоугольнике D достаточно выполнить несложное действие  $4 + 1 - (2 + 3)$ .



**Рис. 4. Схема к расчету суммарной яркости по интегральному изображению**

Еще одно решение третьей проблемы – это использование каскада сверточных нейронных сетей (СНС). В настоящее время СНС демонстрируют выдающиеся результаты в решении задач распознавания образов. Сегодня они позволяют идентифицировать на фотографиях тысячи различных классов объектов, при этом точность распознавания отдельных классов сравнима со средними возможностями человека. Одной из причин такого успеха является наращивание количества нейронов и связей в сетях. Анализ звука или изображений с помощью СНС, содержащих миллиарды параметров, не представляется сложной проблемой ввиду роста объемов вычислительных ресурсов облачных платформ. Способность к тонкой настройке признаков, извлекаемых на каждом слое, при обучении распознаванию одного класса объектов позволяет СНС достигать высоких показателей точности при поиске объектов на сильно неоднородном фоне. Необходимо учитывать, что возможности нейронной сети к обобщению предъявляемых образов снижаются с уменьшением числа параметров, вследствие чего частота ошибок первого рода (ложное обнаружение) растёт. Но данная проблема может быть решена с помощью дополнительной проверки детекций более сложными сетями (т.е. способными обеспечить большую точность классификации), аналогично структуре классификатора Виолы–Джонса [6].

### Заключение

В статье рассмотрена задача обнаружения дефектов внутренней поверхности труб малых диаметров. Описаны существующие методы распознавания: метод оценки изменения формы спектра, метод ориентированных фильтров, метод матрицы коэффициентов вейвлет-преобразования. Раскрыты трудности, возникшие при реализации лабораторного стенда, и

намечены пути устранения проблем, в частности, путем применения теории активного восприятия, интегрального изображения, алгоритмов устранения «смаза», сверточных нейронных сетей.

### Библиографический список

1. **Кретинин, О.В.** Методы сегментации изображений в задачах обнаружения дефектов поверхности / О.В. Кретинин, А.П. Цапаев // Компьютерная оптика. – 2012. – Т. 36. – №3. – С. 448–452.
2. **Цапаев, А.П.** Автоматизированная система визуального контроля внутренней поверхности труб / О.В. Кретинин, А.П. Цапаев // Автоматизация в промышленности. – 2013. – №5. – С. 48–50.
3. **Цапаев, А.П.** Методы и алгоритмы распознавания изображений для обнаружения дефектов внутренней поверхности труб с целью автоматизации визуального контроля: дисс. ... канд. техн. наук: 05.13.17 / Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева. Нижний Новгород, 2013.
4. **Десятников, И.Е.** Алгоритмы поиска изображений в базах видеоданных / И.Е. Десятников, В.А. Утробин // Компьютерная оптика. – 2011. – Т. 35. – № 3. – С. 416–422.
5. **Viola, P.** Rapid object detection using a boosted cascade of simple features / P. Viola, M.J. Jones // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2001. – V. 1. – P. 511–518.
6. **Калиновский, И.А.** Обзор и тестирование детекторов фронтальных лиц / И.А. Калиновский, В.Г. Спицын / КО, 40:1. – 2016. – С. 99–111.

*Дата поступления  
в редакцию 05.04.2018*

**R.S. Gusev, L. O. Fedosova, A.P. Tsapaev**

### ANALYSIS OF IMAGE PROCESSING METHODS FOR THE INNER SURFACE OF PIPES

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

**Purpose:** The purpose of this article is to review the methods for processing the image of the inner surface of a pipe, as well as their verification on image models on a laboratory bench

**Methods:** Method for estimating the shape change of a spectrum, the defect detection method based on the use of the matrix of occurrences of the wavelet transform coefficients, the defect detection method based on the application of oriented filters.

**Results:** The difficulties encountered in the implementation of the laboratory stand are revealed, and ways of eliminating problems are outlined, in particular, by applying the theory of active perception, integral imaging, algorithms for eliminating "smear", convolutional neural networks.

**Conclusion:** Ensuring the quality of pipes in the technological process for the production of products for the power industry depends on the quality management system. The quality management system is inseparably linked with a non-destructive testing system, which includes an operation for visual inspection of the internal surface of the pipes.

*Key words:* Image processing, inner tube surface, convolutional neural network cascade, defect, spectral shape change estimation method, oriented filters method, matrix method of occurrence of wavelet transformation coefficients.

УДК 004.896:004.93

Т. С. Евдокимова, А. А. Синодкин, Л. О. Федосова, М. И. Тюриков

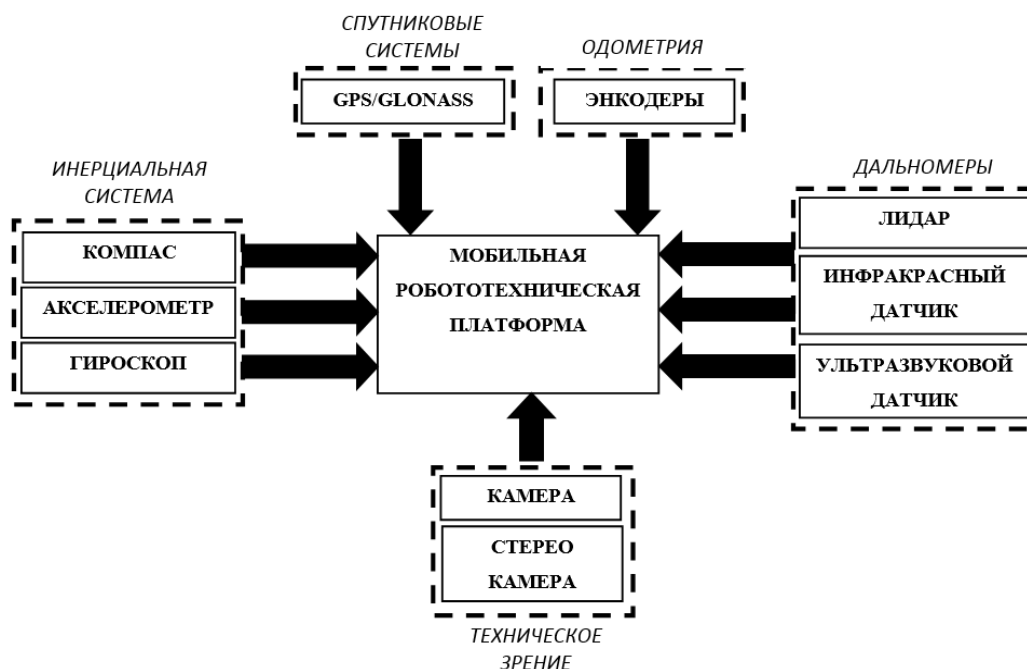
## СИСТЕМА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ И ИДЕНТИФИКАЦИИ МОБИЛЬНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЫ В ОГРАНИЧЕННОМ И ОТКРЫТОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Приведены методы построения карт местности с использованием мобильных робототехнических платформ и методы локализации мобильных роботов на карте. В статье показана структурная схема мобильной робототехнической платформы и рассмотрены отдельные компоненты, позволяющие решить задачу построения карты местности и локализации интересующего объекта на нем. В статье описаны методы FastSLAM, EKF-SLAM, Graph-Based SLAM и приведен их сравнительный анализ. Приведен пример практического использования SLAM – метода для ориентирования робототехнической платформы в пространстве.

*Ключевые слова:* FastSLAM, EKF-SLAM, Graph-Based SLAM, мобильная робототехническая платформа, системы навигации, техническое зрение, информационно-измерительные устройства.

Одной из самых активно развивающихся областей робототехники являются автономные мобильные робототехнические системы. Важной чертой таких платформ является возможность самостоятельно осуществлять навигацию в пространстве. Чаще всего точная и подробная карта местности отсутствует, поэтому активно развивающейся областью прикладной науки является построение роботом карты неизвестной местности самостоятельно. При этом роботу необходимо сохранить всю требуемую информацию об объектах сцены. Впоследствии эта информация может быть использована для решения роботом всевозможных задач на исследуемой области пространства. Второй актуальной задачей является идентификация положения робота в ограниченном пространстве, для которого уже построена карта, при этом необходимо наносить на карту вновь распознанные объекты при движении робота.



**Рис. 1.** Структурная схема мобильной робототехнической платформы для решения задач позиционирования в пространстве

Для решения описанных задач необходимо оснащение платформы определенными информационно-измерительными устройствами, позволяющими определить и отследить местоположение робота на карте. На рис. 1 представлено аппаратное обеспечение мобильной робототехнической платформы для решения задачи позиционирования в пространстве. Рассмотрим компоненты и назначение каждого модуля отдельно.

### Инерциальная система навигации

Инерциальная система навигации позволяет определить ускорения объекта и его угловых скоростей с помощью установленных на движущемся объекте приборов и устройств. С помощью этих данных определяется местоположения объекта, его скорость и направление движения. Каждое инерциальное измерительное устройство включает в себя, как минимум, акселерометр и гироскоп. Зная ориентацию одной системы координат относительно другой становится возможным переводить измерения из системы координат устройства в глобальную. А знания об ускорениях в глобальной системе координат позволят путем интегрирования восстановить скорость и получить информацию об относительном местоположении мобильной робототехнической платформы.

### Одометрия

С помощью одометрических данных мы имеем возможность рассчитать пройденный путь на основании данных полученных от приводов. В реальных условиях одометры подвержены негативному влиянию, такому как люфт, пробуксовка колес. Если при оценке пройденного расстояния полагаться исключительно на данные с энкодера, то накопленные ошибки могут не только затруднить определение местоположения, но и сделать эту задачу невыполнимой. Поэтому, как правило, одометр используют как вспомогательный датчик в комбинации с другими датчиками.

### Дальномеры

Дальномеры для мобильных робототехнических платформ используются для определения расстояния до целей, при этом сканирующие лидары позволяют совместно с системой технического зрения сформировать двумерную или трехмерную картину окружающего пространства. В представленной далее табл. 1 приведены типы дальномеров, которые используются в мобильных роботах.

Таким образом, применение лидаров позволяет получать более полную и точную картину окружающего пространства, в то время как применение ультразвуковых дальномеров целесообразно в условиях, когда оптические методы определения расстояния работают плохо, например, в условиях густого тумана, задымленности, поэтому на практике применяют совмещенные системы, дополняя данные с лидаров информацией с ультразвуковых датчиков.

Таблица 1

#### Типы дальномеров

Тип дальномера	Описание	Преимущества	Недостатки
1	2	3	4
2D/3D сканирующие лидары. Диапазон измерения: 0,01-50 метров	Объект освещается коротким световым импульсом и измеряется время, через которое сигнал вернется к источнику. Чаще всего работают на длинах волн: 1064 нм, 532 нм, 600–1000 нм, ~1500 нм	<ul style="list-style-type: none"> <li>• быстрота сбора данных;</li> <li>• использование в любое время суток</li> <li>• большое разрешение</li> <li>• дальность измерений</li> <li>• высокая точность;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• высокая стоимость</li> </ul>

Окончание табл. 1

1	2	3	4
Ультразвуковой датчик. Диапазон измерения: 0,03-6 метров	Ультразвуковые волны с частотой 65-400 кГц в виде кратковременного импульса излучаются в направлении контролируемой зоны 10-200 раз в секунду.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• относительно высокая скорость измерений</li> <li>• небольшая стоимость.</li> <li>• эффективность работы в условиях густого тумана, задымленности</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• плохо воспринимает сигналы от звукопоглощающих объектов</li> <li>• неточность измерения</li> <li>• ограниченный диапазон измерений</li> </ul>
Инфракрасный датчик. Диапазон измерения: 0,03-1,5 метров	Излучение с длиной волны $850 \pm 70$ нм распространяется и отражается от объектов, находящихся в поле зрения сенсора. Возвращается на приемник. Испускаемый и отраженный луч образует треугольник «излучатель – объект отражения – приемник».	<ul style="list-style-type: none"> <li>• простота в использовании</li> <li>• небольшая стоимость</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ограниченный диапазон измерений</li> <li>• не воспринимает прозрачную поверхность</li> <li>• засветы от солнца</li> <li>• некорректно определяет расстояния до светопоглощающих объектов</li> </ul>

### Модуль технического зрения

Теория машинного зрения предлагает целый ряд различных модельных описаний наблюдаемых объектов, которые могут быть использованы для их обнаружения и измерения. Видеокамеры способны дать больше информации об окружающем пространстве, нежели прочие датчики. В настоящее время для решения задач технического зрения широко применяются системы стереозрения, состоящие из двух сопряженных видеокамер. Такая система дает возможность не только рассчитывать расстояние до препятствий, но и построить 3D-модель окружающего мира. Наиболее распространенными проблемами при использовании видеокамер являются: высокая вычислительная сложность, оптические искажения, вносимые линзами в изображения, зависимость от освещения, ошибочные данные при работе с отражающими поверхностями, однородное окружение [8].

### Спутниковые системы навигации

Суть работы любого навигационного устройства заключается в том, что на него отправляется сообщение о местонахождении спутника с точным указанием времени. Приемник сигнала сравнивает время отправки и получения и определяет свое расстояние до спутника. Благодаря сравнению таких данных определяется местоположение объекта. Но при этом нельзя сказать, что получаемые данные абсолютно точны, кроме того погрешность может варьироваться от 10 до 100 метров, но можно сократить это значение до 1-2 метров, также отметим, что с такой погрешностью нет смысла использовать данную систему в закрытых помещениях. На точность влияют следующие факторы: расположение объектов относительно друг друга, сигнал может отражаться от других объектов и др.

В зависимости от решаемой задачи или материального обеспечения выбирается определенный набор информационно-измерительных средств. Например, для ограниченного пространства (квартиры) нет необходимости устанавливать модуль навигации, т.к. это значительно увеличивает стоимость работы, а также дает слишком большую погрешность позиционирования [1].



## Метод одновременной навигации и построения карты

Решение задачи навигации мобильной робототехнической платформы в пространстве требует одновременного решения проблемы локализации и построения карты или ее дополнения вновь обнаруженными объектами в условиях несовершенных информационно-измерительных средств [3]. Большинство современных реализаций делит поставленную задачу на две основные подзадачи: задача последовательного уточнения карты и задача пере-счёта своего положения в пространстве. Эти задачи должна решать мобильная робототехническая платформа, которая получает информацию о внешнем мире посредством датчиков и строит гипотезу о своём местоположении на основе обработки полученных данных. В результате решение обеих поставленных подзадач заметно усложняется из-за того, что датчики имеют некоторую модель ошибки, точно вычислить и скорректировать которую в общем случае не представляется возможным. Поэтому роботу необходимо постоянно корректировать данные о своём положении. Уточнение собственных координат осуществляется за счёт вычисления своего положения относительно некоторых выделенных ориентиров. Каждому выделенному ориентиру сопоставляется описание, позволяющее идентифицировать его в каждый момент времени. Методики и технологии для решения описанных задач получили общее название SLAM (Simultaneous Localization And Mapping). На данный момент существует довольно большое количество реализаций и подходов, опирающиеся на аппаратные и программные возможности платформ, наиболее распространёнными алгоритмами SLAM являются:

- расширенный фильтр Калмана (Extended Kalman Filter) для SLAM (EKF-SLAM);
- частичный фильтр SLAM (FAST SLAM);
- основанный на графах SLAM (Graph-Based SLAM).

### Описание метода EKF-SLAM

EKF-SLAM основан на применении расширенного фильтра Калмана, применяемого при решении задачи локализации.

Расширенный фильтр Калмана является нелинейной версией фильтра Калмана, рекурсивного фильтра, оценивающего вектор состояния динамической системы, используя серию неполных и зашумленных измерений. Фильтр Калмана выполняет вычисления с помощью значений предшествующих аргументов, переоценки вектора состояния заранее известной динамической системы, т.е. для расчёта текущего состояния системы необходимо знать текущее измерение, а также предыдущее состояние самого фильтра. Однако расширенный фильтр Калмана (EKF) отличается от простого фильтра Калмана тем, что он может быть использован для оценки состояния нелинейных систем [5].

Расширенный фильтр Калмана используется для оценки состояния (положения) робота от данных одометрии и ориентиров. Стоит заметить, что у него нет обновления карты, которое необходимо при использовании EKF-SLAM [4]. Кроме этого, метод EKF-SLAM использует расширенный вектор состояния  $y_t$ , который включает положение робота  $x_t$  и положение всех элементов карты  $m_i$ :

$$y_t = [x_t, m_1, \dots, m_{n-1}]^T.$$

Для расчёта текущего состояния системы необходимо знать текущее измерение, а также предыдущее состояние самого фильтра. Состояние фильтра находится в двух переменных:

$y_t$  – оценка вектора состояния динамической системы в момент времени  $t$ ;

$P$  – ковариационная матрица ошибок (мера точности оценивания вектора состояния) в момент времени  $t$ .

В самом начале, когда робот производит первые измерения, заполняется ковариационная матрица. Делается предположение, что эти элементы не взаимосвязаны. Это означает, что недиагональные элементы нулевые (1).

$$P_0 = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{m_0}^2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{m_1}^2 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \sigma_{m_{n-2}}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \sigma_{m_{n-1}}^2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Тем не менее, когда робот начинает движение и производит новые измерения, местоположение робота и ориентиры начинают коррелировать. Соответственно, ковариационная матрица (1) перестает быть разреженной (2).

$$P_0 = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xm_0}^2 & \sigma_{xm_1}^2 & \dots & \sigma_{xm_{n-2}}^2 & \sigma_{xm_{n-1}}^2 \\ \sigma_{xm_0}^2 & \sigma_{m_0}^2 & \sigma_{m_0m_1}^2 & \dots & \sigma_{m_0m_{n-2}}^2 & \sigma_{m_0m_{n-1}}^2 \\ \sigma_{xm_1}^2 & \sigma_{m_0m_1}^2 & \sigma_{m_1}^2 & \dots & \sigma_{m_1m_{n-2}}^2 & \sigma_{m_1m_{n-1}}^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sigma_{xm_{n-2}}^2 & \sigma_{m_0m_{n-2}}^2 & \sigma_{m_1m_{n-2}}^2 & \dots & \sigma_{m_{n-2}}^2 & \sigma_{m_1m_{n-1}}^2 \\ \sigma_{xm_{n-1}}^2 & \sigma_{m_0m_{n-1}}^2 & \sigma_{m_1m_{n-1}}^2 & \dots & \sigma_{m_{n-2}m_{n-1}}^2 & \sigma_{m_{n-1}}^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

На рис. 2 показан упрощенный алгоритм работы EKF-SLAM метода.

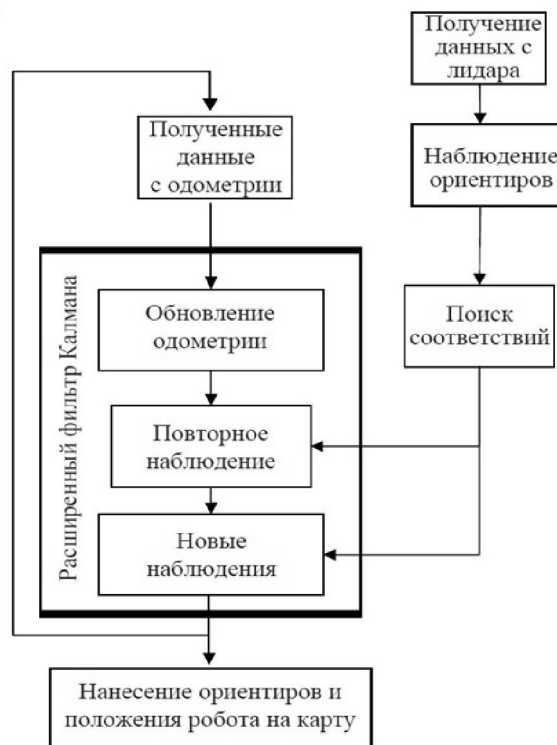
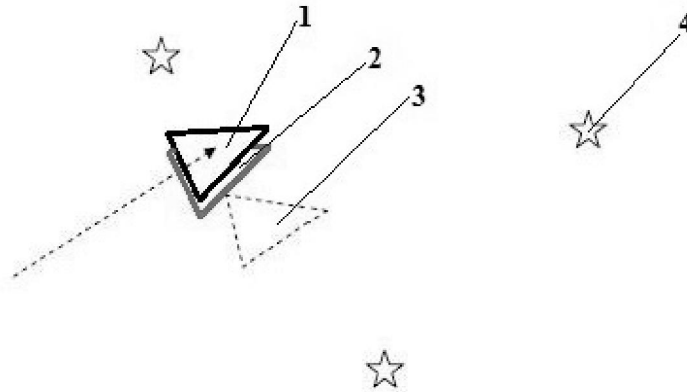


Рис. 2. Упрощенный алгоритм работы EKF-SLAM

Когда одометрия изменяется, новая позиция обновляется в расширенном фильтре Калмана с использованием обновления одометрии. Затем ориентиры извлекаются из окружающей среды, исходя из нового положения робота и определяются их описания, необходимые для поиска соответствий. Затем робот пытается связать эти ориентиры с ориентирами, которые были ранее. Повторно наблюдаемые ориентиры используются для обновления позиции робота в фильтре. Ориентиры, которые не были замечены, будут

добавлены в фильтр в качестве новых наблюдений. Принцип конечной работы метода представлен на рис. 3.

Несмотря на все свои преимущества, EKF-SLAM имеет ограничения на количество используемых ориентиров в системе. Связанно это с тем, что при появлении новых элементов в наблюдении они добавляются в вектор состояния. Таким образом, шум ковариационной матрицы растет квадратично, что приводит к увеличению времени обработки.

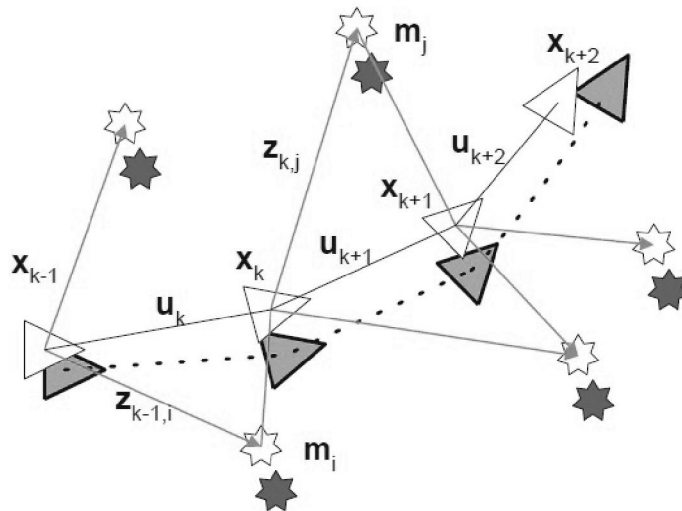


**Рис. 3. Наглядный пример работы метода EKF-SLAM:**

1 - показывает, где робот находится на самом деле; 2 - обозначен треугольник, показывающий работу алгоритма; 3 - треугольник показывает измерения положения от одометрии; 4 - ориентиры

### Описание метода FastSLAM

FastSLAM разделяет задачу локализации и картографии на множество подзадач, используя независимость состояния отдельных элементов модели SLAM. Алгоритм FastSLAM основан на фильтре частиц и применении байесовской сети. Все наблюдения независимы друг от друга. В действительности, единственное, что их связывает – это ошибка определения положения робота [4]. Таким образом, если положение робота определено абсолютно точно, тогда в этом случае не должно быть зависимостей между отдельными наблюдениями. Естественно, в реальности положение робота никогда не известно абсолютно точно, в этом и заключается проблема SLAM метода, но, тем не менее, независимость ориентиров друг от друга в методе FastSLAM позволяет обрабатывать каждый ориентир по отдельности. Такое упрощение приводит к падению точности, связанному с игнорированием взаимосвязи ошибок оценки положений ориентиров, приводит к увеличению скорости обработки данных [7].



**Рис. 4. Принцип работы FastSLAM**

На рис. 4 изображен принцип работы метода. Вектор состояния  $x_k$ , описывающий местоположение и ориентацию транспортного средства; управляющий вектор  $u_k$ , примененный в момент времени  $k-1$  для приведения транспортного средства в состояние  $x_k$  в момент  $k$ ; вектор, описывающий местоположение  $i$ -го ориентира представлен как  $m_i$ . Наблюдение  $z_{k,i}$ , взятое с носителя местоположения  $i$ -го ориентира в момент  $k$ . На рисунке наглядно показано, что ориентиры на карте независимы друг от друга. Это является ключевой особенностью FastSLAM и причиной его скорости вычисления [2].

### Описание метода Graph-Based SLAM

Предпосылкой к появлению этого метода была возможность представления задачи SLAM в виде разреженного графа и связей между его узлами. В данном методе узлы графа представляют собой позицию робота  $x_i$  и ориентиры  $m_j$ , а ребра — это связи между соответствующими узлами, они представляют информацию об ошибке позиции, измеряемую датчиком. Связи в Graph-Based SLAM являются подвижными. Информация о позиции робота будет получена при решении графа. Граф выглядит, как показано на рис. 5. Поскольку метод оптимизации графа использует всю доступную информацию, ее точность намного выше, чем у метода фильтрации, таким образом, он может достичь лучшего эффекта построения.

Существенное преимущество Graph-Based SLAM состоит в том, что по сравнению с методом EKF-SLAM количество вычислений и памяти, которые требуются для обновления и сохранения ковариационной матрицы, не растет квадратично с числом элементов. Однако в Graph-Based SLAM требуются большие затрат на вычисление, если робот прошел достаточно длинный путь.

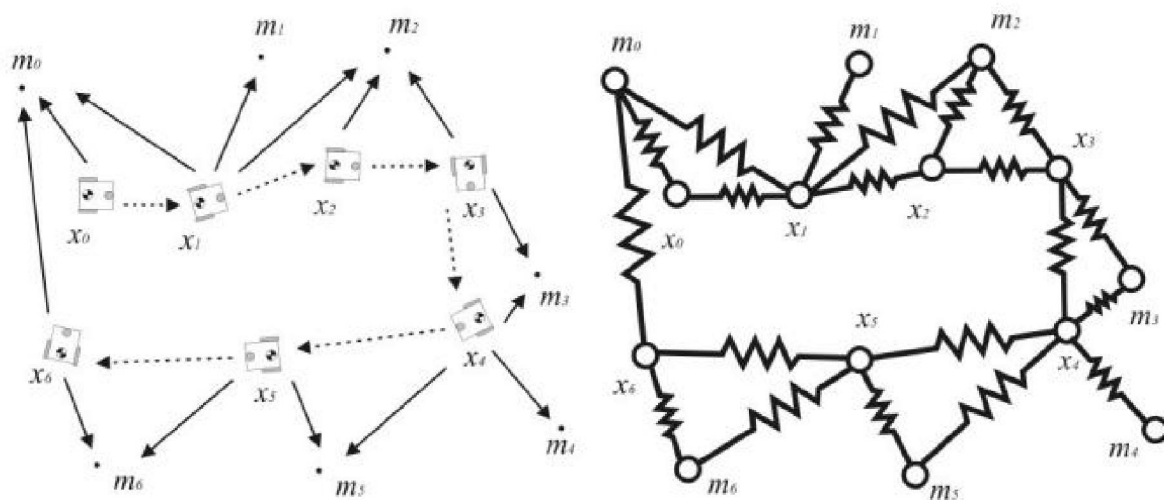


Рис. 5. Изображение графа построенного на примере движения робота

В настоящее время для построения систем локальной навигации и картографии применяется как подход на основе расширенного фильтра Калмана, так и на основе FastSLAM и Graph-Based SLAM. Выбор того или иного метода зависит от требуемой точности системы и ее скорости, от параметров среды, таких как наличие, количество и физические характеристики ориентиров и от многих других факторов.

### Практическое использование SLAM – метода для ориентирования робототехнической платформы в пространстве

В качестве практической задачи для тестирования SLAM метода были выбраны Всероссийские робототехнические соревнования «AutoNet 18+». Задание соревнований заключается в том, чтобы робот в автономном режиме перемещался с соблюдением правил дорожного движения по заранее известному игровому полю, в которое входит скоростной участок

и территория города, которая представляет собой зону городских кварталов. При этом предусматривается решение роботом задач движения с учетом элементов дорожной разметки, правильного реагирования на знаки светофора и знаков дорожного движения. Стоит отметить, что расположение некоторых дорожных знаков и светофора заранее неизвестно и может меняться. Для тестирования был выбран метод EKF-SLAM, так как по сравнению с методом FastSLAM, метод SLAM использующий расширенный фильтр Калмана эффективней работает в пространстве с меньшим количеством ориентиров, а в отличие от Graph-Based SLAM его точность не зависит от пройденного роботом расстояния. В дополнении к этому EKF-SLAM превосходит метод FastSLAM в точности построения карты и локализации робота.

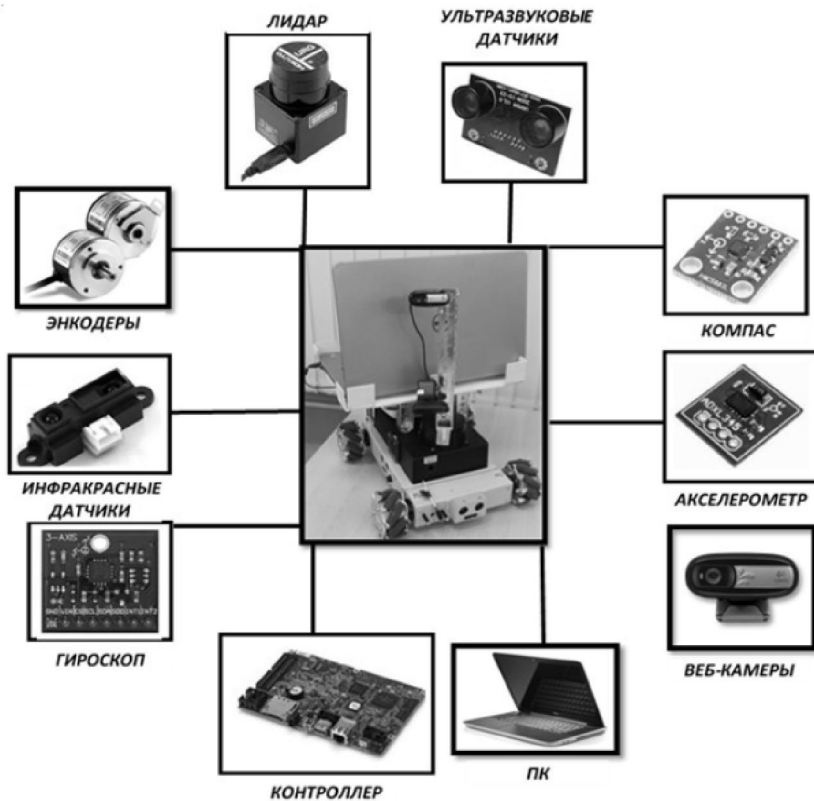


Рис. 6. Аппаратное обеспечение робота для соревнований

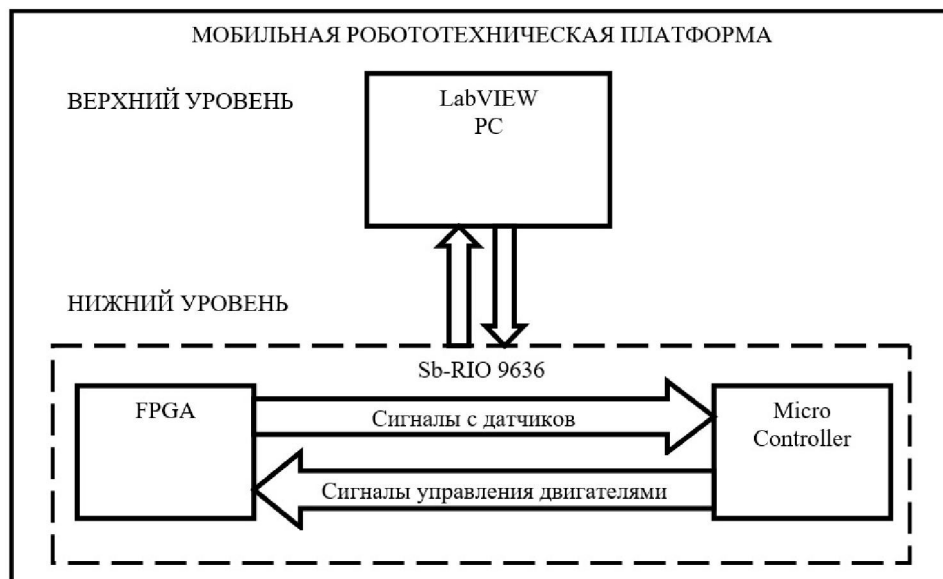


Рис. 7. Структура программного обеспечения МРТП



Для участия в данных соревнованиях была выбрана мобильная робототехническая платформа, на базе контроллера NI sb-RIO 9636, представленная на рис. 6. В качестве программного обеспечения выбрана среда программирования LabVIEW (рис. 7). Нужно отметить, что задача по распознаванию знаков, разметки, стоп-линии и светофора осуществлялась с использованием модуля NI Vision. Данные, полученные с одометрии и лидара, были объединены, обработаны и выделены ориентиры в виде углов стен игрового поля [8]. После обработки данных с использованием метода EKF-SLAM на операторскую карту, которая организована в виде сетки, были нанесены: путь, пройденный роботом и обнаруженные препятствия (рис. 8).

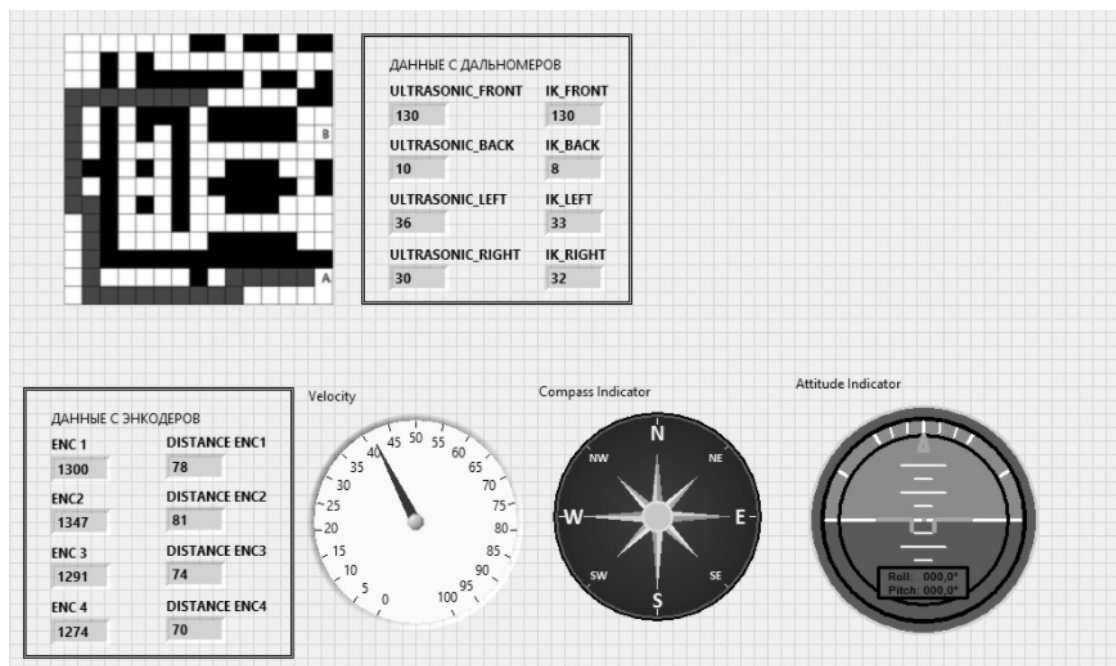


Рис. 8. Интерфейс программного обеспечения мобильной робототехнической платформы

В результате практических испытаний мобильной платформы метод EKF-SLAM доказал свою эффективность при дополнении карты объектами и позиционировании робота в условиях несовершенных информационно-измерительных средств и карты с ограниченными ориентирами.

#### Библиографический список

1. **Войтович, И. Д.** Интеллектуальные сенсоры / И.Д. Войтович, В.М. Корсунский // Издательство: "Бином. Лаборатория знаний" 2009. – С. 51–53.
2. **Дергачев, В. В.** Способы оценки и снижения вычислительной сложности алгоритмов принятия решений в задачах одновременной локализации и картографирования / В. В. Дергачев, О.О. Карташов // Инженерный вестник Дона. – 2017. – №4.
3. **Thrun, S.** FastSLAM: An Efficient Solution to the Simultaneous Localization And Mapping Problem with Unknown Data Association / S. Thrun [et al.] // Journal of Machine Learning Research, 2004.
4. **Кучерский, Р.В.** Алгоритмы локальной навигации и картографии для бортовой системы управления автономного мобильного робота / Р.В. Кучерский, С.В. Манько // Известия ЮФУ. Технические науки, 2012.
5. **Michael Calonder** EKF SLAM vs. FastSLAM-A Comparison // Article Computer Vision Lab.
6. Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne (EPFL), 2006.
7. **Michael Montemerlo, Sebastian Thrun** A Scalable Method for the Simultaneous Localization and Mapping Problem in Robotics / FastSLAM. – 2007.

8. **Визильтер, Ю. В.** Обработка и анализ цифровых изображений с примерами на LabVIEW IMAQ Vision / Ю. В. Визильтер // ДМК Пресс, 2007.

*Дата поступления  
в редакцию 05.04.2018*

**T. S. Evdokimova, A.A. Sinodkin, L.O. Fedosova, A.Y. Sizov**

## **THE IMPACT OF EQUIPMENT ON QUALITY AND EFFICIENCY OF PRODUCTION OF PLASTIC PRODUCTS**

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

**Introduction:** One of the most actively developing areas of robotics are autonomous mobile robotic systems. An important feature of such platforms is the ability to independently navigate in space. Most often, there is no exact and detailed map of the area, so an actively developing field of applied science is the construction of a map of an unknown terrain by the robot on its own. The second actual task is to identify the position of the robot in a confined space for which a map has already been built, and it is necessary to map the newly recognized objects to the map when the robot moves.

**Methods:** The work methods are applied: Extended Kalman Filter SLAM, FastSLAM, Graph-Based SLAM.

**Results:** Methods were given for constructing terrain maps using mobile robotic platforms, and methods for localizing mobile robots on the map. The structural diagram of the mobile robotic platform was shown and separate components were considered that allow solving the task of constructing a map of the locality and localizing the object of interest on it. In the article methods FastSLAM, EKF-SLAM, Graph-Based SLAM were described and their comparative analysis is given. An example of the practical use of the SLAM method for orienting the robotic platform in space is given.

**Conclusions:** As a result of practical testing of the mobile platform, the EKF-SLAM method proved effective when the map was added with objects and the positioning of the robot, in the conditions of imperfect information measuring tools and maps with limited reference points.

*Key words:* FastSLAM, EKF-SLAM, Graph-Based SLAM, mobile robotic platform, navigation systems, technical vision, information-measuring devices.

УДК 519.24:004.67

**В.И. Ерофеев<sup>1</sup>, А.В. Иляхинский<sup>1</sup>, А. А. Хлыбов<sup>2</sup>****РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДИРИХЛЕ КАК СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ  
ТРИБОСИСТЕМЫ**

Институт проблем машиностроения РАН филиал федерального государственного бюджетного научного учреждения "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук"<sup>1</sup>,  
Нижегородский Государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>2</sup>

На примере анализа состояния триботехнической системы показана возможность применения распределения Дирихле в качестве модели процессов, определяющих состояние сложных систем. Такое представление позволяет рассматривать моделируемую систему как единое целое, что значительно повышает эффективность управления с целью достижения поставленных целей.

*Ключевые слова:* системный анализ, функция плотности вероятности, распределение Дирихле, энтропия, триботехническая система.

**Введение**

Основная проблема системного анализа – обоснованная оценка состояния исследуемых систем, учитывающая сложный характер взаимодействия их составляющих и особенность поведения в результате внешнего воздействия. Одним из перспективных подходов к исследованиям сложных систем является представление процессов, определяющих состояние системы моделью, отражающей наиболее существенные закономерности ее структуры и процессы функционирования [1, 2]. Преимущество модели – выделение наиболее важных факторов реальной системы, которые подлежат изучению в данном конкретном исследовании. Эти факторы должны быть отражены в модели с наибольшей полнотой и детализацией, их характеристики в модели должны совпадать с реальными с точностью, определяемой требованиями данного исследования. Однако среди множества сложившихся к настоящему времени классических методов решения задачи построения математических моделей (аналитических и статистических) в основном используются модели данных и не используются вовсе или используются в ограниченном объеме гипотезы о структуре и процессах моделируемой системы – модели систем. Существующие методы непрерывного контроля параметров испытываемых трибосопряжений, как правило, оценивают интегральные характеристики фрикционных процессов, оставляя за кадром такие фундаментальные, основанные на термодинамике неравновесных процессов особенности изнашивания, как формирование в поверхностном слое фрактальных пространственных и временных структур. Поэтому, естественно, представляет научный и практический интерес рассмотрение механизма трения и изнашивания с термодинамической точки зрения. [3. 4].

**Математическая модель**

Если подходить к выбору модели исходя из принципов и гипотез, лежащих в основе функционирования анализируемой системы, то процессы, определяющие состояние анализируемой системы, можно представить статистической моделью в виде функции плотности вероятностей. Такое представление, согласно предложенной Клодом Шенноном [5] термодинамической концепции информации, позволяет рассматривать процессы, протекающие в анализируемой системе, с позиции термодинамики и одного из важнейших ее понятий - энтропии. Для нашего обсуждения важно, что энтропия, как универсальная функция состояния

материи, состоит из производства и потока [6]. Поток характеризует обмен объекта веществом или энергией с внешней средой, а производство - часть энтропии, обусловленная протеканием необратимых процессов.

Было показано [7, 8], что, если состояние объекта отражает результат совместной реализации  $n-1$  независимых процессов  $x_j$ , протекающих со скоростями (интенсивностями)  $v_j$  и противоположного им по смыслу процесса, протекающего со скоростью  $v_n$ , то статистическая модель, информационно эквивалентная объекту любой природы и степени сложности, может быть представлена распределением Дирихле. Функция плотности вероятности этого распределения, определенная на  $k$ -мерном симплексе, равна

$$D(x_1, \dots, x_k) = \frac{\Gamma(a_n)}{\prod_{i=1}^n \Gamma(v_i)} \prod_{i=1}^k x_i^{v_i-1} (1 - \sum_{i=1}^k x_i)^{v_n-1}, \quad (1)$$

где  $x_i \geq 0$  относительное ( $\sum_{i=1}^k x_i \leq 1$ ) значение измеряемой величины (*измеряемых параметров анализируемой системы*);  $v_i \geq 0, \dots, v_n \geq 0$  - параметры формы, имеющие смысл скоростей противоположно направленных процессов взаимодействия трущихся тел,  $\sum_{i=1}^n v_i = a_n; n = k + 1$  число процессов, определяющих состояние анализируемой системы.

Энтропия распределения Дирихле может быть представлена в виде суммы

$$H(D) = H_i(v_1, \dots, v_n) + H_e(a_n), \quad (2)$$

в которой всегда положительное слагаемое

$$H_i(v_1, \dots, v_n) = \ln \prod_{i=1}^n \Gamma(v_i) - \sum_{i=1}^n (v_i - 1) \psi(v_i) \quad (3)$$

представляет собой отвечающее второму закону термодинамики производство энтропии обусловленное протеканием необратимых процессов, а слагаемое

$$H_e(a_n) = -\ln \Gamma(a_n) + (a_n - n) \psi(a_n) \quad (4)$$

может принимать как положительные, так и отрицательные значения, что соответствует потоку энтропии, отвечающему за процессы взаимодействия с внешней средой. Здесь  $\Gamma(x)$  - гамма функция, а  $\psi(x) = \frac{d}{dx} \ln \Gamma(x)$  - логарифмическая производная гамма функции.

### Результаты исследования и их обсуждение

В качестве примера применения распределения Дирихле было проанализировано состояние триботехнической системы, которая представляет собой совокупность твердотельных и жидкофазных объектов, взаимодействующих контактно-механическим способом.

Были выбраны два режима эксплуатации трибосистемы, параметры которых по величине момента трения составили 906 (режим 1) и 1072 (режим 2) условных единиц.

Параметры испытания	Режимы испытания	
	Режим 1	Режим 2
	M±σ	
Момент силы трения - у.е.	906±4.8	1072±13.66

В качестве информативного параметра состояния трибосистемы было выбрано отношение

$$K_{TC} = \frac{\sum K_{D-}^i}{\sum K_{D+}^i}, \quad (5)$$

в котором  $\sum K_{D-}^i$  - суммарное количество выявленных за анализируемый период во временном ряде регистрируемого момента трения двухмерных, трехмерных, четырехмерных, пяти-

мерных и т.д. моделей Дирихле, имеющих отрицательное значение внешней энтропии, а  $\sum K_{D+}^i$  - суммарное количество выявленных за анализируемый период двухмерных, трехмерных, четырехмерных, пятимерных и т.д. моделей Дирихле, имеющих положительное значение внешней энтропии [9].

Вычисление параметра  $K_{TC}$  для каждого из режимов испытаний показало, что при изменении величины момента трения при переходе от режима 1 (906 у.е.) к режиму 2 (1072 у.е.) в пределах 10% приводит к изменению величины параметра  $K_{TC}$  с 3.7 у.е до 1.01 у.е., соответственно, т.е. в три раза.

Диагностический параметр	Режимы испытания	
	Режим 1	Режим 2
	M±σ	
Коэффициент самоорганизации трибосистемы $K_{TC}$	3.71±0.96	1.01±0.31

При этом следует отметить, что, если такая интегральная характеристика как момент трения позволяет судить только о необратимых процессах, то диагностический параметр состояния трибосопряжения  $K_{TC}$  позволяет судить о неравновесных (*обратимых*) процессах, когда внешнее энергетическое воздействие превышает производство тепла и часть поглощенной энергии начинает накапливаться в контактных слоях и трансформироваться в другие недиссипативные формы.

### Выводы

Таким образом, применение для математического моделирования процессов и явлений статистической модели распределения Дирихле является дальнейшим развитием направления системного анализа, позволяющим рассматривать анализ системы с позиции о структурно-функциональной организации моделируемого объекта и возможных механизмах, лежащих в основе его функционирования. Представление процессов, определяющих состояние моделируемой системы распределением Дирихле, дает возможность рассматривать моделируемый объект как единое целое, что значительно повышает эффективность управления с целью достижения поставленных целей.

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-08 -00715).*

### Библиографический список

1. **Качала, В.В.** Основы теории систем и системного анализа / В. В. Качала. – 2-е изд. испр. – М.: Горячая линия – Телеком, 2012. – 210 с.
2. **Чихос Х.** Системный анализ в трибонике: [пер. с англ.] / Х. Чихос. – М.: Мир, 1982. – 352 с.
3. **Бершадский, Л.И.** Структурная термодинамика трибосистем / Л.И. Бершадский. – Киев: Знание, 1990. – 38 с.
4. **Гершман, И.С.** Синергетика процессов трения // Трение, износ, смазка. – 2006. – Т. 8. – № 4(29). – С. 71–80.
5. **Шеннон, К.** Статистическая теория передачи электрических сигналов при наличии помех / К. Шеннон // Сборник переводов. – М.: Изд. иностранной литературы, 1953. – С. 7–87.
6. **Пригожин, И.** Время, структура и флуктуации // Успехи физических наук, 1980. – Т. 131. – Вып. 2. – С. 185–207.
7. **Иляхинский А.В.** Статистические модели в задачах зондирования / А.В. Иляхинский, Ю.С. Серeda // Известия ВУЗов, Радиофизика, 1989. – Т. 32, 12. – С. 1502–1505.
8. **Серeda, Ю.С.** Проблемы информационно-статистической теории / Ю.С. Серeda. – М.: Космосинформ, 1998. – 121 с.

9. **Иляхинский, А.В.** Распределение Дирихле в задаче оценки состояния металла методом акустического зондирования / А.В. Иляхинский, В.М. Родюшкин // Дефектоскопия. – 2015. – № 7. – С. 13–17.

*Дата поступления  
в редакцию 10.05.2018*

**V.I. Erofeev<sup>1</sup>, A.V. Ilyahinskii<sup>1</sup>, A.A. Khlybov<sup>2</sup>**

**DIRICHLET DISTRIBUTION AS A STATISTICAL MODEL  
OF THE TRIBOSYSTEM**

Mechanical Engineering Research Institute, Russian Academy of Sciences,  
Nizhny Novgorod, 603024 Russia<sup>1</sup>,  
<sup>2</sup>Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev<sup>2</sup>

**Purpose:** Reviewed the status of the tribological system from a thermodynamic point of view.

**Design/methodology/approach:** In analyzing the processes view lies the determinants for the tribological system statistical model as a probability density function

**Findings:** Examination of the tribological system state shows possible application of Dirichlet distribution as a model of the processes that govern the state of sophisticated systems.

*Key words:* System analysis, probability density function, Dirichlet distribution, entropy, tribotekhnicheskaja system.

УДК 621.382.2/3

А. Е. Китаев

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ ДЛЯ ПОДБОРА ПАРАМЕТРОВ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИОДА

АО «ННПО имени М.В. Фрунзе»

В данной работе метод наименьших квадратов применен для подбора параметров нелинейной модели полупроводникового диода: тока насыщения, температурного потенциала и внутреннего сопротивления диода (омического сопротивления области с меньшей концентрацией примесей). Последний параметр применяется в уравнении, уточняющем экспоненциальную формулу Шокли в области больших прямых токов, но рассмотренный метод применим и в случае равенства этого параметра нулю (когда уточненное выражение переходит в формулу Шокли).

*Ключевые слова:* метод наименьших квадратов.

### Введение

Целью данной работы является разработка методики подбора параметров для нелинейной модели полупроводникового диода, уточняющей формулу Шокли. Именно формула Шокли обычно применяется для описания вольт-амперной характеристики  $p$ - $n$  перехода, но при больших прямых токах в реальных полупроводниковых диодах наблюдаются отклонения от этой формулы. Известно, что ток диода можно неявным образом выразить через напряжение с помощью следующего более точного выражения [1]:

$$I = I_s \left( e^{\frac{U - IR}{\varphi}} - 1 \right). \quad (1)$$

Здесь  $I_s$  – это ток насыщения,  $\varphi$  – температурный потенциал,  $R$  – омическое сопротивление области диода с меньшей концентрацией примесей (фактически этот параметр является внутренним сопротивлением диода). Формула (1) отличается от формулы Шокли именно учетом этого внутреннего сопротивления  $R$ . Явное выражение для тока [2], учитывающее ненулевое значение параметра  $R$ , записывается через специальную функцию Ламберта  $W(x)$  [3]:

$$I = -I_s + \frac{\varphi}{R} W \left( e^{\frac{U}{\varphi}} I_s \frac{R}{\varphi} e^{I_s \frac{R}{\varphi}} \right). \quad (2)$$

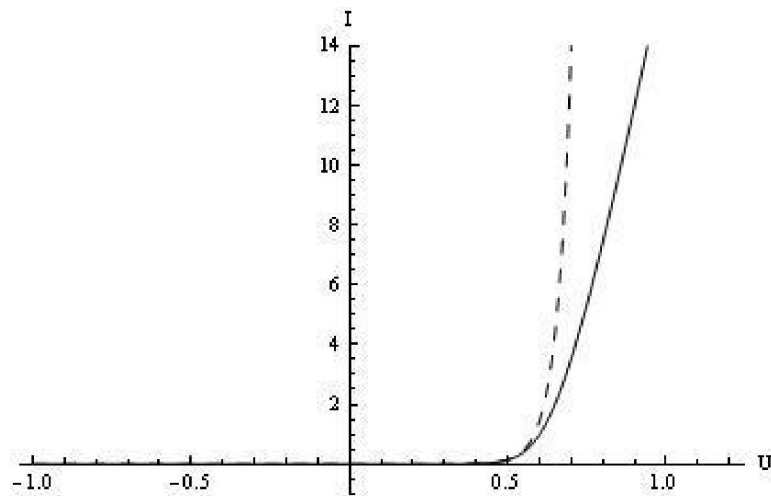
График, соответствующий этой кривой, обозначен на рис. 1 сплошной линией (пунктирная линия соответствует формуле Шокли). Из графика видно, что экспоненциальная кривая Шокли имеет более резкий рост. Кривая (2), соответствующая учету ненулевого внутреннего сопротивления  $R$ , при больших значениях прямого напряжения асимптотически приближается к прямой линии:

$$I \approx \frac{U}{R} + \frac{\varphi}{R} \ln \left( I_s \frac{R}{\varphi} \right).$$

Явная формула для напряжения, следующая из (1), записывается с использованием логарифмической функции:

$$U = \varphi \ln \left( \frac{I}{I_s} + 1 \right) + IR. \quad (3)$$

Именно эту формулу из-за ее простоты целесообразно положить в основу дальнейших расчетов. Для подбора параметров  $I_s$ ,  $\varphi$  и  $R$  будет использован метод наименьших квадратов, адаптированный к данному нелинейному случаю.



**Рис. 1. Графики вольт-амперных характеристик диода (сплошная линия – с учетом ненулевого внутреннего сопротивления  $R$ , пунктир – без учета  $R$ , в соответствии с формулой Шокли)**

### Методика

Если напрямую применить метод наименьших квадратов к соотношению (3), мы получим достаточно сложную систему из трех уравнений относительно трех неизвестных величин ( $I_s$ ,  $\varphi$ ,  $R$ ). Можно упростить задачу, если использовать тот факт, что при больших прямых токах вольт-амперная характеристика, описываемая формулой (3), почти линейна. Ее наклон определяется параметром  $R$ . Это позволяет произвести оценку данного параметра, взяв несколько экспериментальных значений тока и напряжения, находящихся на квазилинейном участке характеристики, и применив обычный метод наименьших квадратов [4], предназначенный для поиска параметров  $R$  и  $b$  кривой  $y=xR+b$ . Значение  $R$  определяется следующей формулой:

$$R = \frac{L \sum_{i=1}^L x_i y_i - \sum_{i=1}^L y_i \sum_{i=1}^L x_i}{L \sum_{i=1}^L (x_i)^2 - (\sum_{i=1}^L x_i)^2}.$$

Здесь  $x_i$  – это набор из  $L$  экспериментальных значений тока (приходящихся на квазилинейный участок), а  $y_i$  – набор из  $L$  соответствующих им экспериментальных значений напряжения ( $L < N$ , где  $N$  – полное число экспериментальных отсчетов, приходящихся не только на квазилинейный, но и на нелинейный участок).

После этого получим формулу для параметров  $I_s$  и  $\varphi$ , считая, что третий параметр  $R$  нам уже известен. Для этого построим выражение для суммы квадратов разностей экспериментальных значений  $y$  и вычисленных по формуле (3).

$$S = \sum_{i=1}^N \left( \varphi \ln\left(\frac{x_i}{I_s} + 1\right) + x_i R - y_i \right)^2. \quad (4)$$

Здесь берется уже полное число отсчетов тока и напряжения ( $N$ ).

Найдем частные производные величины  $S$  по  $\varphi$  и по  $I_s$ .



$$\frac{\partial S}{\partial \varphi} = 2 \sum_{i=1}^N (\varphi \ln(\frac{x_i}{I_s} + 1) + x_i R - y_i) \ln(\frac{x_i}{I_s} + 1),$$

$$\frac{\partial S}{\partial I_s} = -2 \sum_{i=1}^N (\varphi \ln(\frac{x_i}{I_s} + 1) + x_i R - y_i) \frac{\varphi x_i}{I_s (x_i + I_s)}.$$

Приравнявая эти частные производные нулю, мы получим систему двух уравнений для  $\varphi$  и  $I_s$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi = - \frac{\sum_{i=1}^N (x_i R - y_i) \ln(\frac{x_i}{I_s} + 1)}{\sum_{k=1}^N (\ln(\frac{x_k}{I_s} + 1))^2}, \\ \sum_{i=1}^N (\varphi \ln(\frac{x_i}{I_s} + 1) + x_i R - y_i) \frac{x_i}{x_i + I_s} = 0. \end{array} \right. \quad (5)$$

Если  $\varphi$  из первого уравнения (5) подставить во второе (переименовав для удобства индексы суммирования), мы получим уравнение, куда входит лишь  $I_s$ :

$$\sum_{i=1}^N \left( \left[ - \frac{\sum_{m=1}^N (x_m R - y_m) \ln(\frac{x_m}{I_s} + 1)}{\sum_{k=1}^N (\ln(\frac{x_k}{I_s} + 1))^2} \right] \ln(\frac{x_i}{I_s} + 1) + x_i R - y_i \right) \frac{x_i}{x_i + I_s} = 0.$$

Это уравнение можно решить численно (например, средствами пакета «Wolfram Mathematica») и найти значение  $I_s$ . После этого из первого уравнения системы (5) можно найти значение  $\varphi$ . Параметр  $R$  здесь считается уже известным но его, возможно, придется изменить, чтоб добиться лучшего совпадения данных, вычисленных по формуле (3), с экспериментальными значениями. Например, можно провести расчет для нескольких значений  $R$ , построить график, отображающий зависимость квадратичного отклонения  $S$  в зависимости от  $R$ , и после этого подобрать значение  $R$ , при котором отклонение  $S$  минимально.

Отметим также, что система (5) пригодна и для случая формулы Шокли (когда в соотношениях (1) и (3)  $R=0$ ).

В заключение статьи приведем график, где точками показаны экспериментальные данные, а сплошной линией – значения, вычисленные по формуле (3).

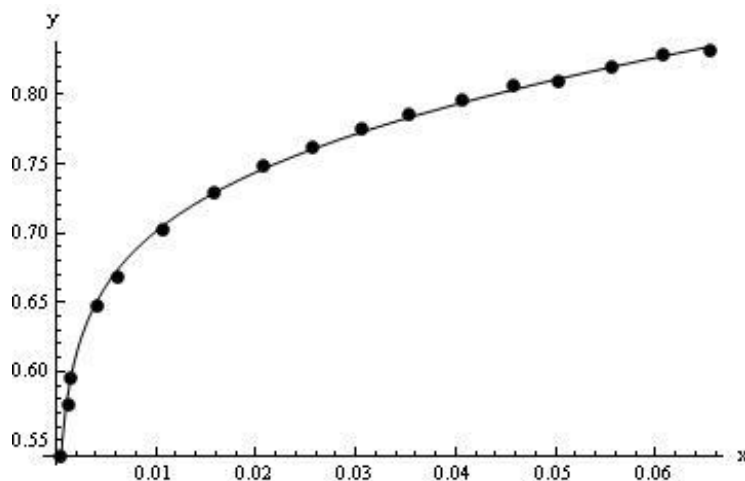


Рис. 2. Координата  $x$  – это ток (А),  $y$  – напряжение (В).  $R=0.63$  Ом

Если принять  $R=0$ , кривая, полученная таким способом, дает худшую аппроксимацию.

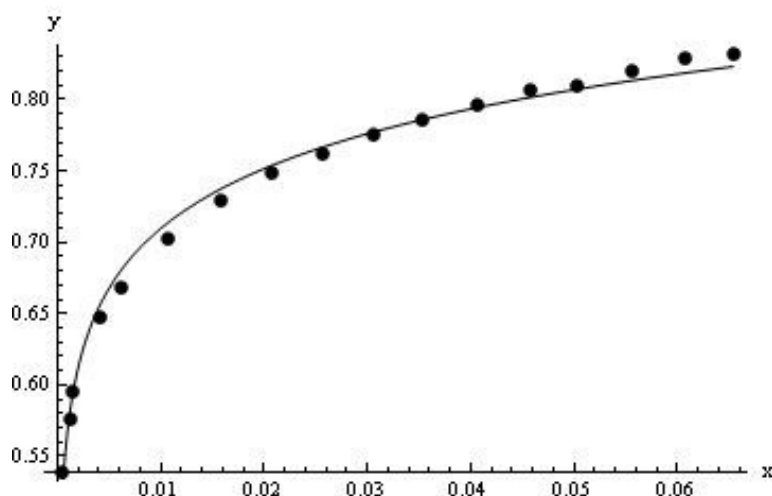


Рис. 3. График при  $R=0$

### Выводы

Фактически для подбора параметров уточненной вольт-амперной характеристики диода используется следующий алгоритм:

1. Отбираются несколько точек, лежащих на квазилинейном участке характеристики, после чего делается оценка внутреннего сопротивления диода  $R$  (с помощью метода наименьших квадратов, примененного к поиску параметров прямой линии).

2. Далее метод наименьших квадратов адаптируется для поиска параметров обобщенной кривой, описывающей вольт-амперную характеристику. После этого ищутся оставшиеся два параметра  $\phi$  и  $I_s$  (в предположении, что внутреннее сопротивление  $R$  задано).

3. Возможно варьирование значения  $R$  и повторение действий пункта 2 для лучшей аппроксимации экспериментальных данных теоретической кривой.

Полученная кривая довольно точно приближает массив экспериментальных данных. Приравнение внутреннего сопротивления диода  $R$  нулю приводит к ухудшению соответствия.

### Библиографический список

1. Степаненко, И.П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем / И.П. Степаненко. – М.: Энергия, 1977.
2. Китаев А.Е. / Материалы международной научно-технической конференции «Интерматик-2016», Часть 3. – М.: Галлея-Принт, 2016.
3. Дубинов, А. Е. W-функция Ламберта и ее применение в математических задачах физики / А. Е. Дубинов, И. Д. Дубинова, С. К. Сайков. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2006.
4. Зельдович, Я.Б. Элементы прикладной математики / Я.Б. Зельдович, А.Д. Мышкис. – М.: Наука, 1972.
5. Китаев, А.Е. Аналитическое представление характеристик биполярных транзисторов // Радиотехника 2017 N10 С.189-194.
6. Труды XX Научной конференции по радиофизике. – Н.Новгород: ННГУ, 2016.

Дата поступления  
в редакцию 23.03.2018

**A. E. Kitaev**

## **USING OF THE LEAST-SQUARES METHOD FOR DIODE PARAMETERS FITTING**

### **NNPO named after M.V. Frunze**

**Purpose:** The purpose of this work is the algorithm design of parameter fitting for the nonlinear characteristics of semiconductor diode.

**Methodology:** In this paper the least-squares method is applied to the parameters fitting for the volt-ampere characteristic of semiconductor diode. These parameters are  $I_s$ ,  $\varphi$  and  $R$ .  $I_s$  is saturation current,  $\varphi$  is temperature voltage and  $R$  is the pure resistance of diode area with little impurity density. The third parameter is used in improved formula of characteristic that is more exact than the exponential Shockley formula. If this parameter is equal to zero this method can be applied to the original Shockley formula.

**Findings:** The least-squares method is adapted for application to this task. The calculations show that the accounting of third parameter  $R$  makes the approximation more exact.

*Key words:* least squares method, volt-ampere characteristic.

УДК 629.054

О.Н. Корелин, Д.А. Кобляков, О.П. Тимофеева

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ СИСТЕМЫ ПОМОЩИ ВОДИТЕЛЮ «ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ПРОЗРАЧНЫЕ СТОЙКИ»**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрены различные программно-аппаратные решения для реализации систем расширения зоны видимости водителя автомобиля. Такие системы являются составной частью ADAS систем.

*Ключевые слова:* системы ADAS, расширение зоны видимости, система “прозрачные стойки”, использование одноплатных компьютеров, интерфейсы камер и дисплеев.

В работе рассматривается система “интеллектуальные прозрачные стойки”, являющаяся составной частью системы помощи водителю автомобиля - ADAS.

Одой из главных задач таких систем является расширение зоны видимости водителя. Сегодня, при быстро растущей интенсивности движения, проблема слепых зон как никогда актуальна, и при этом не существует каких-либо стандартных решений. Ведущие автопроизводители на серийно выпускаемых автомобилях решают данную проблему лишь частично, устанавливая камеру заднего вида и тем самым избавляясь от задней слепой зоны. Комплексное решение проблемы, покрывающее все слепые зоны, не выходит за пределы концептов представленных на выставках и рекламных видеороликов. Возможным решением проблемы слепых зон в передней части автомобиля является система «прозрачных стоек ветрового стекла» и замена зеркал заднего вида.

Эту задачу предлагается решать с помощью дополнительных видеокамер высокого разрешения и двух дисплеев, размещённых в стойках ветрового стекла. Пример конструктивного исполнения представлен на рис. 1.



**Рис. 1. Пример конструктивного исполнения “прозрачные стойки”**

Промежуточным звеном между камерой и дисплеем является одноплатный компьютер (ОК). Он осуществляет приём видео-потока с видеокамеры, обработку и отображение необходимой информации на дисплее. ОК – это полноценный компьютер, собранный на одной печатной плате, где размещены процессор, память, системы ввода-вывода и прочие про-

граммно-аппаратные модули. Подключение дополнительных модулей для расширения функционала возможно через интерфейс ввода-вывода общего назначения (GPIO General Purpose Input Output) или через блоки согласования интерфейсов. Данное решение позволяет получить видеоизображение с минимальными задержками для картины, наиболее приближенной к реальности (real time режим). Выбор именно ОК связан с их миниатюрными размерами и достаточной вычислительной мощностью.

Второй задачей, которая решается с использованием комбинации «камера-одноплатный компьютер-дисплей», является отображение различной информации поверх real time картинки. Любая ADAS система, как правило, решает следующие задачи: определение препятствия или пешехода перед автомобилем, распознавание дорожных знаков, сход с полосы движения и т.д. Проблема заключается в том, что насколько бы скоростным и мощным не был процессор центрального компьютера (ЦК), обрабатывающий информацию для определения ситуации на дороге, он не в состоянии одновременно и отображать и оценивать дорожную ситуацию. Центральный компьютер связан с одноплатным компьютером по одному из последовательных интерфейсов для передачи информации, отображаемой на дисплеях. Блок схема такой системы представлена на рис. 2.

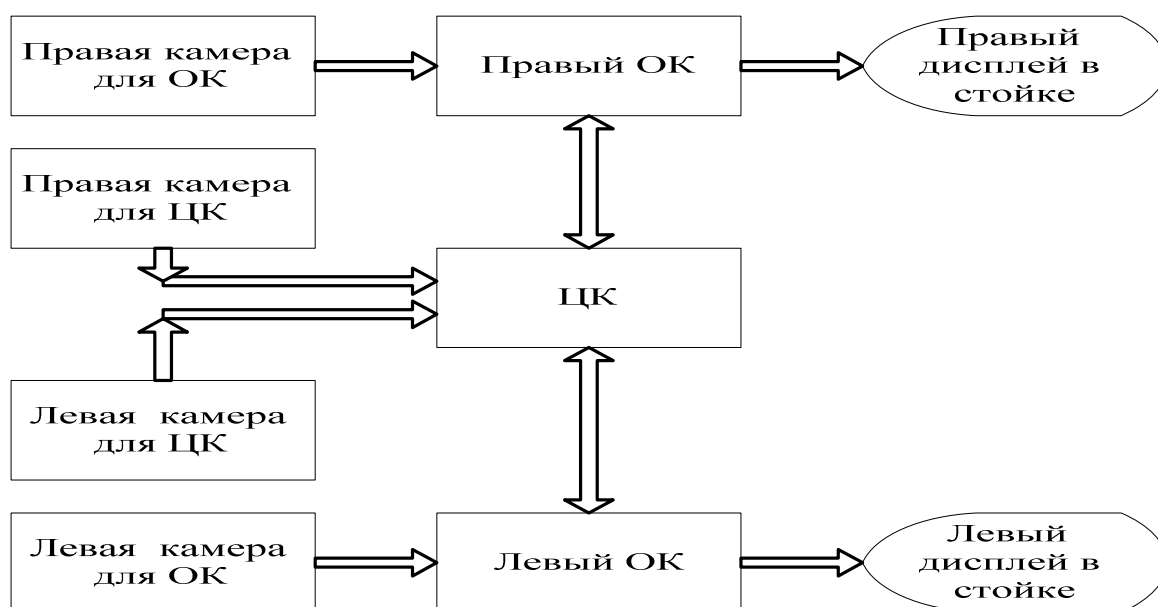


Рис. 2. Блок-схема системы «Интеллектуальные прозрачные стойки»

ЦК производит соответствующие вычисления на основе видеопотока со своих камер, а ОК обеспечивает изображение с минимальными временными задержками со своих. Объединение результатов работы ЦК и ОК производится на дисплеях в стойках ветрового стекла.

Существует большой выбор видеокамер высокого разрешения с различными интерфейсами. В процессе исследований проводилась оценка и сравнение различных решений. Основными требованиями являлись разрешение камер HD 720 или Full HD 1080 и частота кадров 30 к/с. Очевидно, что камеры должны иметь небольшие габариты для возможности встраивания их в стойки.

Интересное решение предлагает фирма Texas Instruments ([www.ti.com](http://www.ti.com)). На стороне камеры расположен так называемый сериалайзер (Serializer), который преобразует интерфейс камеры в последовательный интерфейс FPD-Link III. На противоположной стороне расположен десериалайзер (Deserializer), к выводам которого подключается LCD дисплей. Достоинством этого решения является возможность передачи видео в пределах автомобиля. К недостаткам можно отнести невозможность обработки и внесение изменений в отображаемую картинку.

Другое решение предполагает использование портативных камер с интерфейсом AHD (Analog High Definition) или аналог HD-TVI (High Definition Transport Video Interface). По качеству картинки эти камеры не уступают IP камерам, но значительно дешевле. Камеры такого типа получили широкое распространение в системах безопасности. Преимущество их – в возможности передачи видео в виде низкочастотного сигнала по коаксиальному кабелю на расстояние до 500 м. Это расширенный телевизионный формат PAL, который позволяет передавать изображение с HD (720) и FullHD (1080) разрешением. При стандартном использовании сигнал оцифровывается либо в плате видеозахвата, установленной в слоте ПК, либо в видеорегистраторе системы наблюдения, что вносит значительные задержки и затормаживает процесс отображения. В доступной продаже удалось найти четырёх-канальную плату видеозахвата, но только для HD формата. Использование таких камер с однокристальным компьютером затруднительно в виду отсутствия соответствующего интерфейса для AHD камер. Выход может быть найден в использовании микросхем фирмы Nextchip ([nextchip.com](http://nextchip.com)). Эти микросхемы позволяют получить на выходе цифровой сигнал в параллельном коде в стандарте VT601.

Камеры с интерфейсом SDI-TVI (Serial Digital Interface) обладают всеми ранее перечисленными свойствами. Этот интерфейс предполагает передачу цифрового сигнала, что, по сравнению с AHD, требует более высококачественного канала передачи данных, так как передаётся более высокая частота.

Обзор камер показал, что перспективными являются Web камеры с интерфейсом USB 3.0. Эти камеры позволяют получать разрешение до 4K с частотой кадров до 60 к/сек. Примером такой камеры может быть Logitech BR10. К сожалению, далеко не все одноплатные компьютеры содержат интерфейс USB 3.0.

Наибольший интерес представляют камеры с интерфейсом CSI-2 (Camera Serial Interface). По этому интерфейсу работают большинство камер портативной электроники, современных смартфонов и планшетов. Поэтому выбор по разрешению матриц камер и объективов к ним практически неограничен. Из описания стандарта на CSI-2 известно, что это однонаправленный, дифференциальный последовательный интерфейс с сигналами данных и синхронизации. Физический уровень (PHY) интерфейса описан в стандарте “MIPI Alliance Specification for D-PHY”(MIPI - Mobile Industry Processor Interface). Максимальная частота 1.33ГГц. Как правило, шина содержит одну линию тактовой частоты и несколько каналов данных. Данные передаются одновременно по всем каналам. Вместе с каналами данных стандарт включает низкочастотный последовательный интерфейс управления, совместимый с I2C (Inter-Integrated Circuit). По этому управляющему интерфейсу передаётся набор команд, определённый конкретным производителем. Набор команд управляющего пакета может быть коротким 4-байта или длинным любой длины до  $2^{16}$ .

Этот интерфейс интересен также тем, что устроен аналогично интерфейсу DSI (Display Serial Interface), который предназначен для вывода картинки на LCD дисплей.

Оба этих интерфейса (CSI и DSI) присутствуют на одноплатном компьютере Raspberry Pi 3 Model B. При использовании таких камер и дисплеев в других, более ранних версиях одноплатных компьютеров, необходимо использовать мосты-преобразователи (Bridge CSI – GPIO), которые преобразуют последовательный интерфейс в параллельный 8-ми или 16-ти битный. GPIO – это набор ножек процессора, предназначенных для ввода-вывода цифровой информации. Такие преобразователи выпускает фирма Lattice ([latticesemi.com](http://latticesemi.com)). Их работа основана на использовании FPGA низкой интеграции.

Особый интерес представляет Lattice Embedded Vision Kit. Это практически готовое конструктивное решение для задачи “прозрачные стойки”. Он состоит из трёх плат, которые представляют собой законченные функциональные модули. Первая плата содержит две 13-ти мегапиксельные камеры Sony IMX214, которые поддерживают видео 1080 p с частотой кад-

ров 60 FPS. Вместе с этим на первой плате установлен преобразователь интерфейсов. Вторая плата содержит процессорный блок для обработки изображений и видеопотока. Третья плата предназначена для вывода картинки на дисплей с HDMI интерфейсом.

Запуск теста на Vision Kit показал очень хорошие результаты. Оценка задержки отображения составила около 20 мкс. Недостаток такого подхода заключается в ограниченном наборе функций по обработке видеоданных и сложности отладки FPGA.

Выбор одноплатных компьютеров на сегодняшний день огромен, при этом их разнообразие на самом деле является кажущимся. На рынке представлено более сотни моделей ОК разных производителей. Однако при изучении их характеристик становится понятно, что подавляющее большинство устройств являются копиями (клонами) основных наиболее популярных компьютеров.

Одними из самых известных на сегодняшний момент являются одноплатные компьютеры фирмы Raspberry. Самый мощный в линейке "одноплатник" RASPBERRY PI 3 MODEL B имеет 64-битный четырехъядерный ARM v8 Cortex-A53 процессор компании Broadcom BCM2837 с тактовой частотой 1.2 ГГц, 1 ГБ оперативной памяти DDR3 и большое количество различных периферийных интерфейсов. Стоит отметить наличие на плате интерфейса видеочасти CSI, интерфейса дисплея DSI, интерфейса HDMI и интерфейса USB 2.0. Недостатком данного компьютера можно назвать отсутствие скоростного интерфейса USB 3.0, что ограничивает его использование с камерами высокого разрешения под данный интерфейс. Но, учитывая наличие специализированных интерфейсов CSI и DSI, популярность данных компьютеров и большое количество информации об использовании их в разработках он может быть использован при разработке программно-аппаратного комплекса «прозрачных стоков» и зеркал заднего вида.

Не менее популярным является одноплатный компьютер Beagle Bone Black, который также использовался в решаемой нами задаче. На нём установлен процессор AM3359 (ti.com). Это ARM контроллер Cortex-A8 с тактовой частотой 1 ГГц. На плате ОК находится 512 Мбайт памяти DDR3, чего вполне хватает для запуска простых приложений под управлением операционной системы. Данный ОК может быть расширен за счет присоединения через GPIO дополнительных модулей, так называемых *cape*. Например, для нашего прототипа мы использовали *cape*, позволяющий выводить информацию на LCD дисплей через LVDS интерфейс.

Его преимуществом является хорошая документация и наличие среды разработки на сайте производителя процессора (ti.com), что позволяет работать с ним не только при помощи операционной системы (ОС), но и напрямую через JTAG и среду разработки Code Composer Studio.

Надо понимать, что, с одной стороны, использование операционной системы ОС значительно ускоряет процесс разработки, но при этом появляются мало контролируемые дополнительные временные задержки при обработке сигнала, связанные с обращением к ядру операционной системы. Эти задержки могут быть преодолены путём использования более производительных процессоров.

При программировании ОК без операционной системы мы можем получить минимальные временные задержки, но значительно усложняется сам процесс разработки программного обеспечения.

Особенностью микропроцессора AM3359 является наличие двух дополнительных процессоров PRU (programmable real-time unit), которые работают независимо от основного ARM ядра. Это 32-ти битные процессоры с тактовой частотой 200 МГц. Они имеют свою память данных, память программ, свою систему прерываний и связаны с основным ядром через общую память. Наличие этих PRU позволяет решать задачи связи с внешними устройствами в реальном масштабе времени, когда основной процессор работает под управлением ОС.

Кроме того, был рассмотрен вариант использования достаточно нового ОК фирмы Pine64 - Rock64 Media Board Computer. Представленная модель имеет 64-битный четырехъ-

дерный ARM v8 Cortex-A53 процессора компании Rockchip RK3328 с тактовой частотой 1.5 ГГц, до 4х ГБ оперативной памяти LPDDR3 и большое количество различных периферийных интерфейсов. Из интересных особенностей можно отметить наличие порта USB 3.0 для подключения камеры, а также наличие аппаратных кодеков, позволяющих декодировать сигнал с камеры. Это позволит разгрузить процессор и добиться минимизации задержек в цепи камера-ОК-монитор.

Таким образом, возможны различные подходы для решения поставленной задачи. Естественно, об оптимальности того или иного решения можно будет судить при реализации программно-аппаратного комплекса системы «прозрачных стоек» и зеркал заднего вида в полном объёме, что требует значительных временных затрат.

В настоящее время предложено и реализовано следующее решение (рис. 3). Используется хорошо известный одноплатный компьютер Beagle Bone Black. Источником видеоданных служит Web камера Logitech C320 высокого разрешения с интерфейсом USB 2.0. Изображение выводится на LCD 7-дюймовый дисплей BBView с LVDS интерфейсом. Этот дисплей выпускается как стандартное расширение, конструктивно совместимое с ОК Beagle Bone Black, и имеет разрешение 480\*700 пикселей.



**Рис. 3. Пример реализации системы «Интеллектуальные прозрачные стойки» с ОК Beagle Bone Black**

На одноплатном компьютере установлена операционная система Linux (Angstrom). Как правило, образ операционной системы располагается на SD карте. В нашем случае операционная система была переписана во внутреннюю ПЗУ память на ОК и автоматически запускалась при включении питания.

Для эксперимента использовалась программа MPlayer, свободный медиаплеер. Стандартная консольная версия медиаплеера не имеет графического интерфейса и всё управление осуществляется с клавиатуры. В таком режиме на LCD дисплее отображается воспроизводимое видео.

Эксперимент показал хорошие результаты по качеству изображения на дисплее. Временная задержка между реальной картинкой и изображением на дисплее составила около 200 мс, что можно расценивать только как первый практический результат, который позволил определить направления дальнейших исследований в этой области.

#### **Библиографический список**

1. Свободная энциклопедия википедия [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://en.wikipedia.org/wiki/Camera\\_Serial\\_Interface](https://en.wikipedia.org/wiki/Camera_Serial_Interface)
2. Сайт фирмы Texas Instruments [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://ti.com>



3. Сайт по одноплатному компьютеру BeagleBone Black [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://beagleboard.org>

*Дата поступления  
в редакцию 15.04.2018*

**O.N. Korelin, D.A. Koblyakov, O.P. Timofeeva**

## **INVESTIGATION OF SOFTWARE-DRIVER SOLUTIONS FOR ASSISTANCE SYSTEM "SMART TRANSPARENT STANDS"**

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

**Purpose:** The specific challenges are considered of ADAS systems, designed to help the driver of the car for expand the visibility zone. Additional technical information is transmitted to the displays via a central computer

**Design/methodology/approach:** Proposed the placement of video cameras - a single-board computer - a display in the car windshield stands for display "blink" areas.

**Findings:** This constructive and software solution makes it possible to see event as much as possible to the real time picture.

**Research limitations/implications:** This solution is affordable and can be integrated into any car without changing the design.

**Originality/value:** "Smart transparent stands" allow you to monitor the traffic situation approximate to real-life conditions and display service information from the central computer.

**Key words:** ADAS systems, visibility expansion, "transparent stands" system, use of single-board computers, camera and display interfaces.

УДК 681.5

Р.А. Мусарский

## ВЕРОЯТНОСТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ СТАРШИМИ ОПРЕДЕЛИТЕЛЯМИ ГУРВИЦА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Приведен результат разработки метода вероятностного исследования линейных динамических систем на основе выявленного соотношения между старшими определителями Гурвица характеристического полинома исследуемой динамической системы и полинома, представляющего произведение характеристического полинома динамической системы на полином, входящий в знаменатель спектральной плотности входного воздействия. Дан иллюстрирующий пример.

*Ключевые слова:* линейная динамическая система, системы автоматического управления, вероятностный анализ, старший определитель Гурвица.

При разработке систем автоматического управления, динамических систем, подвергающихся влиянию случайных воздействий широко применяются как методы численного анализа, так и аналитические методы. Целью данной статьи является разработка аналитического метода исследования линейных динамических систем при случайном воздействии.

Как известно [1], дисперсия выходной координаты  $V(t)$  линейной динамической системы может быть вычислена с помощью интеграла

$$D_V = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |W(i\omega)|^2 S_u(\omega) d\omega, \quad (1)$$

где  $S_u(\omega)$  - спектральная плотность входной координаты  $U(t)$ ;

$W(i\omega) = \frac{\Delta_V(i\omega)}{\Delta(i\omega)}$  - передаточная функция линейной системы.

Функция  $S_u(\omega)$  может быть представлена в виде дробно-рациональной функции

$$S_u(\omega) = \frac{q(i\omega)q(-i\omega)}{r(i\omega)r(-i\omega)}. \quad (2)$$

Интеграл (1) может быть приведён к форме

$$J_n = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{g_n(\omega)}{h_n(i\omega)h_n(-i\omega)} d\omega, \quad (3)$$

где

$$g_n(\omega) = b_0\omega^{2n-2} + b_1\omega^{2n-4} + \dots + b_{n-1}, \quad (4)$$

$$h_n(i\omega) = a_0(i\omega)^n + a_1(i\omega)^{n-1} + \dots + a_n.$$

Так как все корни характеристического уравнения  $h_n(p) = 0$  лежат в левой полуплоскости комплексного аргумента  $p$ , то все коэффициенты  $a_1, a_2, \dots, a_n$  положительны при положительном  $a_0$ . При этом коэффициенты  $b_0, b_1, \dots, b_{n-1}$  могут быть как положительными, так и отрицательными.

Вычисление интеграла (3) приводит к выражению [1]

$$J_n = \frac{\pi}{a_0} \frac{M_n}{D_n}, \quad (5)$$

где  $D_n$  - старший определитель Гурвица, составленный из коэффициентов полинома  $h_n(p)$ . Этот полином обычно представляет произведение характеристического полинома исследуемой динамической системы на полином, представляющий знаменатель спектральной плотности входного воздействия.

$M_n$  - определитель, который получается из  $D_n$  заменой первого столбца на столбец с коэффициентами  $b_0, -b_1, +b_2, \dots, (-1)^{n-1} b_{n-1}$ .

Например, для  $J_3$

$$J_3 = \frac{\pi M_3}{a_0 D_3} = \frac{\pi}{a_0} \frac{\begin{vmatrix} b_0 & a_0 & 0 \\ -b_1 & a_2 & a_1 \\ b_2 & 0 & a_3 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_1 & a_0 & 0 \\ a_3 & a_2 & a_1 \\ 0 & 0 & a_3 \end{vmatrix}} = \pi \frac{a_2 a_3 b_0 + a_0 a_3 b_1 + a_0 a_1 b_2}{a_0 a_3 (a_1 a_2 - a_0 a_3)}. \quad (6)$$

Дальнейшее улучшение применения формулы (5) может быть сделано на основе следующей теоремы.

*Теорема*

Если характеристический полином системы может быть записан в форме

$$P_n(p) = a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n = (p + \beta) Q_{n-1}(p), \quad (7)$$

где  $Q_{n-1}(p) = d_0 p^{n-1} + d_1 p^{n-2} + \dots + d_{n-1}$ ,

то между старшими определителями Гурвица, составленными для полиномов  $P_n(p)$  и  $Q_{n-1}(p)$  имеет место соотношение

$$H_n^P = \beta Q_{n-1}(\beta) H_{n-1}^Q. \quad (8)$$

Заметим, что запись полинома в виде (7) обычна в статистической динамике. Это следует из факта, что, как правило,  $Q_{n-1}(p)$  представляет характеристический полином системы, а множитель  $(p + \beta)$  появляется в выражении для спектральной плотности внешнего воздействия.

Если подставить (8) в знаменатель выражения (5), то вычисление дисперсии выходной координаты динамической системы сводится к вычислению старшего определителя Гурвица её характеристического полинома и значению этого полинома при  $p = \beta$ .

Вывод формулы (8) в общем случае громоздкий, поэтому ограничимся примером этого вывода для полинома четвёртого порядка  $H_4^P = \beta Q_3(\beta) H_3^Q$ . В этом случае

$$\begin{aligned} P_4(p) &= a_0 p^4 + a_1 p^3 + \dots + a_4 = (p + \beta)(d_0 p^3 + d_1 p^2 + d_2 p + d_3) = \\ &= (p + \beta) Q_3(p) = d_0 p^4 + (d_1 + d_0 \beta) p^3 + (d_2 + d_1 \beta) p^2 + (d_3 + d_2 \beta) p + d_3 \beta \end{aligned}$$

Составим старший определитель Гурвица для этого полинома

$$H_4 = \begin{vmatrix} d_1 + d_0 \beta & d_0 & 0 & 0 \\ d_3 + d_2 \beta & d_2 + d_1 \beta & d_1 + d_0 \beta & d_0 \\ 0 & d_3 \beta & d_3 + d_2 \beta & d_2 + d_1 \beta \\ 0 & 0 & 0 & d_3 \beta \end{vmatrix} = d_3 \beta \begin{vmatrix} d_1 + d_0 \beta & d_0 & 0 \\ d_3 + d_2 \beta & d_2 + d_1 \beta & d_1 + d_0 \beta \\ 0 & d_3 \beta & d_3 + d_2 \beta \end{vmatrix} =$$

Умножим первую строку на  $\beta^2$ , одновременно поделим третью строку на  $\beta^2$  и прибавим вторую и третью строки к первой. В каждом элементе первой строки в качестве сомножителя выделяется полином  $d_0 \beta^3 + d_1 \beta^2 + d_2 \beta + d_3$

$$= \frac{d_3}{\beta} (d_0 \beta^3 + d_1 \beta^2 + d_2 \beta + d_3) \begin{vmatrix} 1 & 1/\beta & 1/\beta^2 \\ d_3 + d_2 \beta & d_2 + d_1 \beta & d_1 + d_0 \beta \\ 0 & d_3 \beta & d_3 + d_2 \beta \end{vmatrix} =$$

Вычтем из второго столбца первый, делённый на  $\beta$  и из третьего столбца второй, делённый на  $\beta$ , получим

$$\frac{d_3}{\beta}(d_0\beta^3 + d_1\beta^2 + d_2\beta + d_3) \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ d_3 + d_2\beta & d_1\beta - d_3/\beta & d_0\beta - d_2/\beta \\ 0 & d_3\beta & d_2\beta \end{vmatrix} = \frac{d_3}{\beta}(d_0\beta^3 + d_1\beta^2 + d_2\beta + d_3) \begin{vmatrix} d_1\beta - d_3/\beta & d_0\beta - d_2/\beta \\ d_3\beta & d_2\beta \end{vmatrix}$$

Прибавим к первой строке вторую, делённую на  $\beta^2$ , получим

$$= d_3\beta(d_0\beta^3 + d_1\beta^2 + d_2\beta + d_3) \begin{vmatrix} d_1 & d_0 \\ d_3 & d_2 \end{vmatrix} = \beta Q_3(\beta) H_3^Q.$$

В случае, если спектральная плотность соответствует корреляционной функции экспоненциально – косинусного типа, характеристический полином системы умножается на два комплексно-сопряжённых сомножителя

$$\gamma = \alpha + i\beta \quad \text{и} \quad \bar{\gamma} = \alpha - i\beta.$$

*Следствие 1.* Если характеристический полином (7) может быть записан в форме

$$P_n(p) = (p + \gamma)(p + \bar{\gamma})R_{n-2}(p)$$

$$\text{где } R_{n-2}(p) = p^{n-2} + c_1p^{n-3} + \dots + c_{n-2},$$

то между старшими определителями Гурвица полиномов  $P_n(p)$  и  $R_{n-2}(p)$  имеет место соотношение

$$H_n^P = 2\alpha |\gamma R_{n-2}(\gamma)|^2 H_{n-2}^R.$$

Если известно два простых действительных корня  $\beta_1$  и  $\beta_2$  характеристического полинома, то из (1.8) имеет место следующее

*Следствие 2.* Если характеристический полином системы может быть записан в форме

$$P_n(p) = a_0p^n + a_1p^{n-1} + \dots + a_n = (p + \beta_1)(p + \beta_2)Q_{n-2}(p),$$

$$\text{где } Q_{n-2}(p) = d_0p^{n-2} + d_1p^{n-3} + \dots + d_{n-2},$$

то между старшими определителями Гурвица, составленными для полиномов

$$S_q(\omega) = \frac{2D_q\beta}{\omega^2 + \beta^2} \quad \text{и} \quad Q_{n-2}(p) \quad \text{имеет место соотношение}$$

$$H_n^P = \beta_1\beta_2(\beta_1 + \beta_2)Q_{n-2}(\beta_1)Q_{n-2}(\beta_2)H_{n-2}^Q.$$

*Пример.* Определим дисперсию ускорений  $\ddot{x}_2$  массы  $m_2$  последовательной цепочки двух механических осцилляторов (рис. 1), если основание подвергается стационарному случайному воздействию со спектральной плотностью  $S_q(\omega) = \frac{2D_q\beta}{\omega^2 + \beta^2}$ .

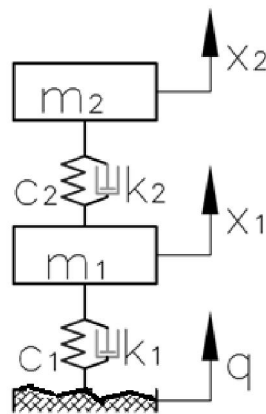


Рис. 1. Двухмассовая математическая модель

Уравнения колебаний этой системы:

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 &= (k_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + c_2(x_2 - x_1) + k_1 \dot{q} + c_1 q - k_1 \dot{x}_1 - c_1 x_1), \\ m_2 \ddot{x}_2 &= -k_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - c_2(x_2 - x_1) \end{aligned} \quad (9)$$

Дисперсия ускорений  $D_a$  верхней массы вычисляется на основе выражения (3), где  $h_5(i\omega) = P_5(p) = a_0 p^5 + a_1 p^4 + \dots + a_5 = (p + \beta)Q_4(p) = (p + \beta)(d_0 p^4 + d_1 p^3 + d_2 p^2 + d_3 p + d_4)$ , где  $(d_0 p^4 + d_1 p^3 + d_2 p^2 + d_3 p + d_4)$  - характеристический полином динамической системы,  $\beta$  - параметр спектральной плотности внешнего воздействия,  $g_n(\omega) = b_0 \omega^8 + b_1 \omega^6 + b_2 \omega^4 + b_3 \omega^2 + b_4$ .

Коэффициенты в этих выражениях выражаются через параметры исследуемой системы:

$$d_0 = m_1 m_2, \quad d_1 = m_1 k_2 + m_2 (k_1 + k_2), \quad d_2 = m_1 c_2 + m_2 (c_1 + c_2) + k_1 k_2, \quad d_3 = k_1 c_2 + k_2 c_1, \quad d_4 = c_1 c_2.$$

$$a_0 = d_0, \quad a_1 = d_1 + \beta d_0, \quad a_2 = d_2 + \beta d_1, \quad a_3 = d_3 + \beta d_2, \quad a_4 = d_4 + \beta d_3, \quad a_5 = \beta d_4$$

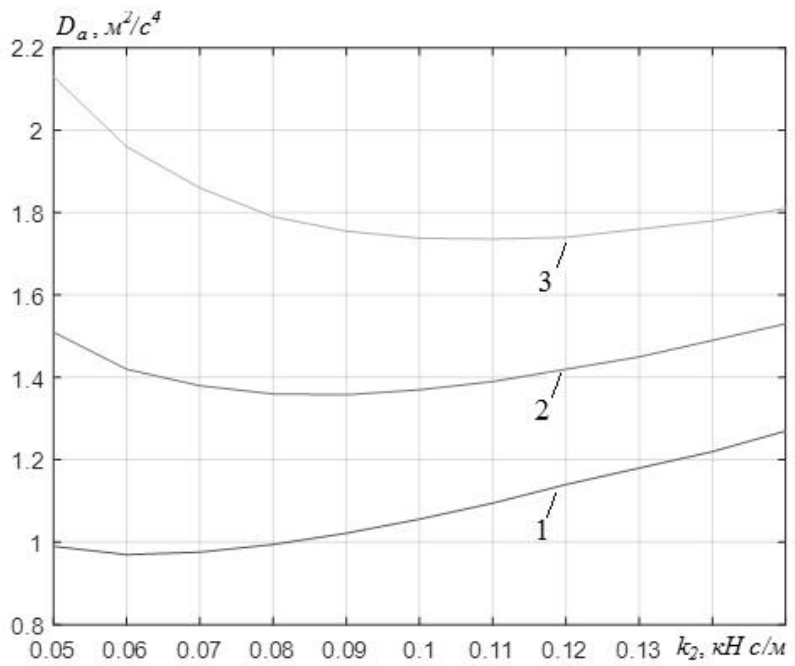
$$b_0 = k_1^2 k_2^2, \quad b_1 = k_1^2 c_2^2 + k_2^2 c_1^2, \quad b_2 = c_1^2 c_2^2, \quad b_3 = b_4 = 0.$$

Откуда на основе формулы (8) получаем выражение для вычисления дисперсии ускорений

$$D_a = \frac{M_5}{a_0 D_5} = \frac{M_5}{d_0 \beta Q_4(\beta) H_4^Q} = \frac{(a_0 a_4 a_5 - a_1 a_4^2 - a_2^2 a_5 + a_2 a_3 a_4) b_0 + (a_2 a_5 + a_3 a_4) b_1 + a_0 (a_1 a_4 - a_0 a_5) b_2}{d_0 \beta (d_0 \beta^4 + d_1 \beta^3 + d_2 \beta^2 + d_3 \beta + d_4) (d_1 d_2 d_3 - d_0 d_3^2 - d_1^2 d_4)}.$$

Заметим, что если параметр спектральной плотности внешнего воздействия  $\beta$  будет приближаться к корню характеристического полинома динамической системы, то дисперсия  $D_a$  будет стремиться к бесконечности, что вызывает «статистический резонанс».

На рис. 2 представлены графики зависимости дисперсии ускорений  $D_a$  массы  $m_2$  от величины коэффициента демпфирования  $k_2$  для трёх значений жёсткости упругого элемента  $c_2 = 15$  кН/м,  $c_2 = 20$  кН/м,  $c_2 = 25$  кН/м.



**Рис. 2.** Зависимость дисперсии ускорений  $D_a$  массы  $m_2$  от коэффициента демпфирования  $k_2$  для трёх значений жёсткости упругого элемента  
1 -  $c_2 = 15$  кН/м; 2 -  $c_2 = 20$  кН/м; 3 -  $c_2 = 25$  кН/м

Из рис. 2 видно, что дисперсия ускорений  $D_a$  имеет минимальное значение в зависимости от величины коэффициента демпфирования  $k_2$  и убывает с уменьшением жёсткости  $c_2$ .

### Выводы

1. Разработан метод вероятностного исследования линейных динамических систем на основе выявленного соотношения между старшими определителями Гурвица характеристического полинома исследуемой динамической системы и полинома, представляющего произведение характеристического полинома динамической системы на полином, входящий в знаменатель спектральной плотности входного воздействия.

2. Дан пример, иллюстрирующий применение метода для вычисления дисперсии ускорения двухмассовой механической системы виброизоляции, находящейся под влиянием случайного воздействия.

### Библиографический список

1. Laning, J.H. and Battin, R.H. Random Processes in Automatic Control. Laning, J.H. and Battin, R.H. Random New York-Toronto-London. Vc. Grawl – Hill, 1956.
2. Лэнинг, Дж. Х. Случайные процессы в задачах автоматического управления: [пер. с англ.] / Дж. Х. Лэнинг, Р. Г. Бэттин [и др.]; под ред. В. С. Пугачева. – М.: Изд-во иностр. лит., 1958. – 387 с.
3. Свешников, А.А. Прикладные методы теории случайных функций / А.А. Свешников. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Наука, 1968. – 464 с.

*Дата поступления  
в редакцию 19.03.2018*

**R.A. Musarsky**

### PROBABILISTIC INVESTIGATION OF DYNAMIC SYSTEMS ON THE BASIS OF THE RELATION BETWEEN LEADING HURVITZ DETERMINANTS

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

**Purpose:** The purpose of the study is to improve the analytical method of probabilistic research of linear dynamic systems.

**Design/methodology/approach:** The method is based on the found relationship between the leading Hurwitz determinants compiled for the characteristic polynomial of the system studied and for this polynomial multiplied by the polynomial that is included in the denominator of the spectral density of random excitation.

**Findings:** The analytically obtained an expression for the dispersion of output coordinates of a dynamic system that contains the denominator of the characteristic polynomial of the system calculated after the substitution of the parameter of the spectral density of the input.

**Research Limitations/Implications:** The method allows associating the dispersion of the output coordinates of a linear dynamic system with the characteristic polynomial of the system.

**Originality/value:** The article presents an original study that is of interest to researchers involved in probabilistic analysis of dynamic systems.

*Key words:* linear dynamical system, automatic control systems, probabilistic analysis, leading Hurwitz determinant.

УДК 004.722

А.Д. Сачков, Д.А. Кобляков, Э.С. Соколова

**РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ИЗВЛЕЧЕНИЯ И АНАЛИЗА ВИДЕОПОТОКА ДАННЫХ С СЕНСОРНЫХ УСТРОЙСТВ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева

На основе выбранных аппаратных средств разработан программно-аппаратный комплекс по извлечению и анализу видеопотока данных с сенсорных устройств. Произведён анализ производительности и применимости полученного комплекса.

*Ключевые слова:* ADAS системы, платы видеозахвата, извлечение видеопотока.

В настоящее время развитие информационных технологий и вычислительной техники подталкивает людей к автоматизации повседневных задач и информатизации мира вокруг. Примерами тому являются различные системы - «умный дом», многочисленные интеллектуальные помощники, такие как Siri, Google Now, Amazon Echo и др.

Одним из передовых направлений является разработка систем помощи водителю, так называемых ADAS (Advanced driving assistance systems) систем: начиная от простых парктроников и заканчивая полноценными автопилотами. Разработка и внедрение в этой области алгоритмов и автоматизированных систем позволит достичь более высокого уровня безопасности и комфорта дорожного движения.

Основные компоненты любой ADAS системы – это датчики, осуществляющие наблюдение за обстановкой вокруг автомобиля, и блок анализа данных, который обрабатывает информацию с датчиков и генерирует соответствующие сигналы для автомобиля и водителя.

Существует большое количество различных датчиков, обладающих разными характеристиками и возможностями. Например, ультразвуковые датчики позволяют определить расстояние до близлежащих объектов, однако имеют крайне низкую дальность действия и не могут понять, под каким углом мы движемся к объекту, или определить скорость объекта. Ещё одним примером являются лидары – датчики, получающие информацию об окружающей среде с помощью активных оптических систем (в основном лазеров), использующих явления поглощения и рассеяния света. Лидары обладают высокой точностью, дальностью действия и не зависят от погодных условий (дождь, снег), однако являются сложными хрупкими устройствами с высокой стоимостью.

Несмотря на большое количество разнообразных датчиков, самыми доступными, универсальными и простыми остаются обычные камеры. Они позволяют получить изображения для распознавания на нём каких-либо объектов: дорожных знаков, пешеходов, дорожной разметки, а с помощью пары камер, так называемой стереокамеры, можно посчитать расстояния до окружающих объектов с достаточной точностью.

В качестве блока анализа данных можно использовать большое количество различных аппаратных платформ: обыкновенные персональные компьютеры, различные одноплатные компьютеры (Raspberry PI, Cubieboard) и микроконтроллеры (Texas Instruments), специальные платформы для разработок (NVIDIA Jetson).

В данной статье рассматривается разработка и построение программно-аппаратного комплекса для ADAS системы, основанного на использовании обыкновенного персонального компьютера и набора аналоговых камер.

Программно-аппаратный комплекс по извлечению и анализу видеопотока данных состоит из аналоговых видеокамер, платы видеозахвата и персонального компьютера (рис. 1).

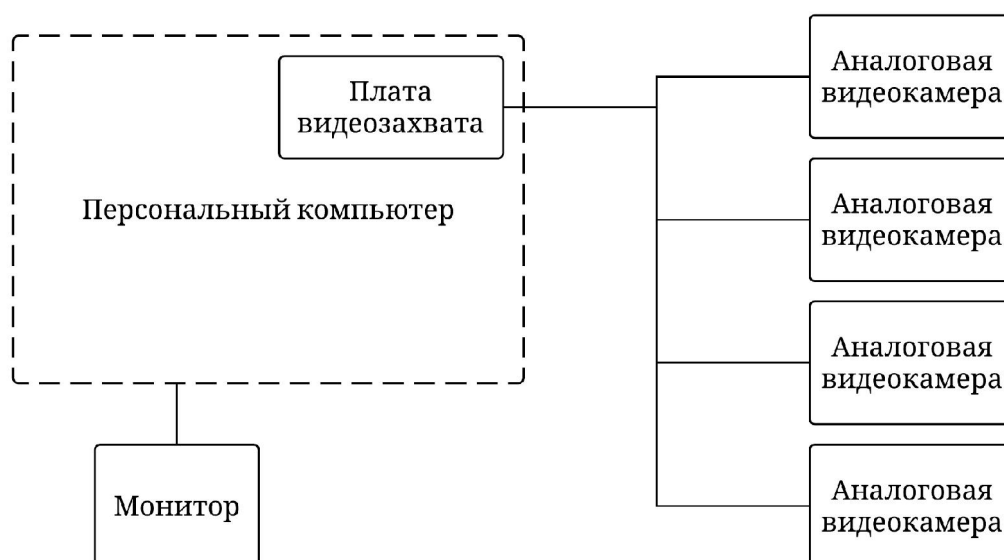


Рис. 1. Аппаратная структура комплекса

Аналоговые камеры, используемые в качестве сенсорных устройств при разработке программно-аппаратного комплекса, наиболее распространены и доступны и позволяют решать широкий спектр задач. При работе с ними требуется использование платы видеозахвата, представляющей собой электронное устройство (карта расширения PCI или PCI-E, либо USB-совместимая плата) для преобразования аналогового видеосигнала в цифровой видеопоток.

К сожалению, аналоговые камеры обладают довольно низким разрешением: самое высокое доступное разрешение такой камеры составляет 720 x 576 пикселей, что является недостаточным для распознавания далеко расположенных объектов. Проблема решается использованием аналоговых камер, поддерживающих новый формат AHD (Analog High Definition), позволяющий по аналоговым каналам передачи данных передавать видеопоток в HD и FullHD качестве.

В ходе работы были опробованы два вида аналоговых камер: AHD и не-AHD, и две различных платы видеозахвата для выбранных камер. Для работы с не-AHD камерами использовалась плата видеозахвата EWG4208HF-E на базе 10-битных АЦП Techwell TW2867C, позволяющая оцифровывать до 8 видеопотоков с частотой до 30 кадров в секунду с возможностью получения сжатого и несжатого видеопотоков в разрешениях 4CIF (704 x 576 пикселей), CIF (352 x 288 пикселей), QCIF (176 x 144 пикселей). Для работы с AHD камерами использовалась плата видеозахвата Линия AHD 4x25 Hybrid, которая позволяет оцифровывать до 4-х видеопотоков в формате HD (1280 x 720 пикселей) с частотой до 100 кадров в секунду [2].

При выборе плат видеозахвата и поиску для них драйверов возникли сложности, приведшие к разработке собственных решений. В частности, для первой платы видеозахвата поиск драйвера был нетривиальной задачей, но вместе с драйвером поставлялся и SDK (Software Development Kit) – набор средств разработки, позволяющий создавать приложения для управления платой [1]. Например, был доступен такой функционал, как извлечение сжатого и несжатого видеопотоков с камер, извлечение отдельных кадров с камер, настройка частоты кадров и разрешения видеопотоков для каждой из камер в отдельности. При анализе документации, поставляемой с драйвером и набором средств разработки, описывающей доступный функционал и методы его активации, были обнаружены явные ошибки (например, несоответствие описанных и фактических параметров некоторых функций), а также отсутствие подробного описания механизма работы платы видеозахвата. В результате проделанной работы экспериментальным путем были определены некоторые



нюансы работы платы видеозахвата, а также разработан алгоритм взаимодействия с платой видеозахвата, включающий в себя:

1) вызов процедуры инициализации платы видеозахвата и получение дескрипторов камер для последующей работы с ними;

2) выделение буфера под кадр с камеры и конфигурация параметров видеозахвата: частота кадров, разрешение, формат видеопотока;

3) получение очередного кадра для обработки и его обработка. Оповещение о новом кадре происходит путём вызова драйвером заранее переданной ему функции-обработчика. Новый кадр при этом уже расположен в буфере, выделенном в предыдущем шаге.

Далее представлен небольшой фрагмент псевдо-кода, иллюстрирующего работу с платой видеозахвата:

```

1. char buffer[704 * 576]
2. void imageStreamCallback(void* frameData, int channelID) {
3.     // код обработки кадра с камеры №channelID
4. }
5. int main() {
6.     InitDSPS();
7.     HANDLE channel1 = ChannelOpen(1);
8.     RegisterImageStreamCallback(imageStreamCallback);
9.     SetImageStream(channel1, 30, 704, 576, buffer);
10.    // ...
11.    DeInitDSPS();
12. }

```

При работе с несколькими камерами функция-обработчик вызывается из драйвера последовательно, а значит, при обработке текущего кадра вносится задержка в обработку последующих кадров этой и других камер (рис. 2).

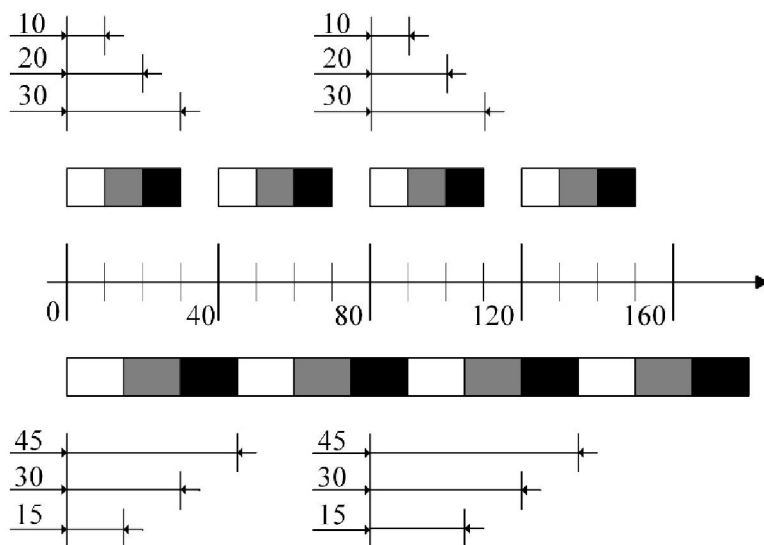


Рис. 2. Проблема задержек при работе с несколькими камерами

На рисунке прямоугольниками показано время работы функции-обработчика для кадра с каждой из трёх камер, кадры с разных камер выделены разным цветом. Очевидно, что есть некоторый предел по времени, которое может потратить функция-обработчик на один кадр. При усложнении функции-обработчика и увеличении затрачиваемого времени задержки будут расти с каждым новым кадром.

Опытным путём было выяснено, что при работе с несколькими камерами функция-обработчик вызывается для кадров с разных камер в случайном порядке. Например, для первого кадра функция-обработчик сначала будет вызвана для кадра с первой камеры, потом для кадров со второй и третьей камер. В следующий раз функция-обработчик будет вызвана сначала для кадра со второй камеры, а потом для кадров с первой и третьей камер. Данная ситуация изображена на рис. 3.

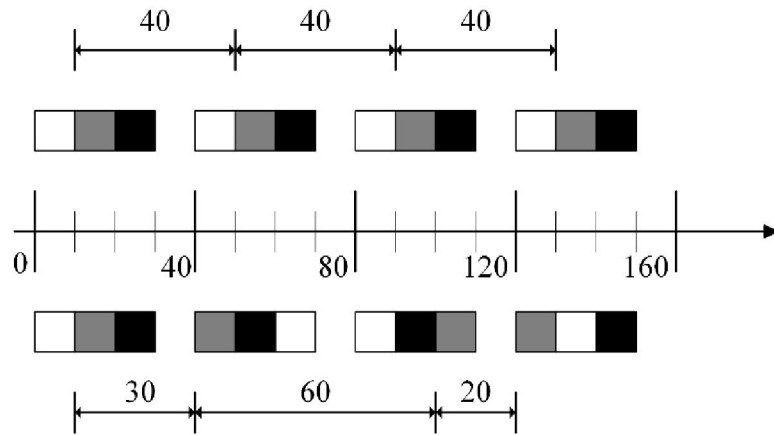


Рис. 3. Неопределённый порядок обработки кадров

Чтобы минимизировать задержки, влияние обработки кадров с одной камеры на обработку кадров с другой камеры, а также выровнять интервалы между соседними кадрами с одной и той же камеры, был реализован механизм многопоточной обработки видеопотоков (рис. 4).

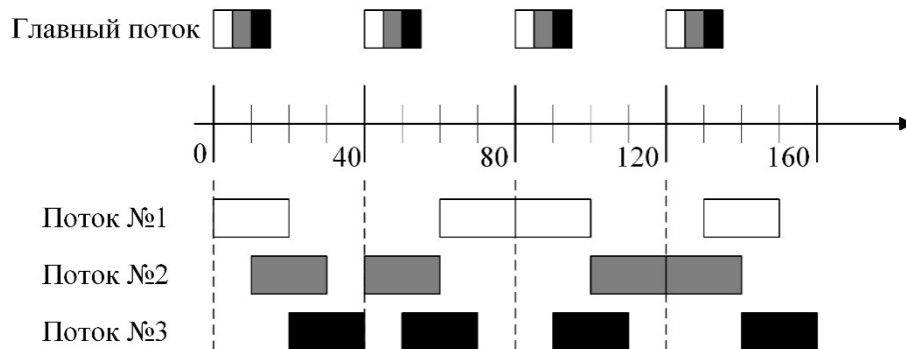
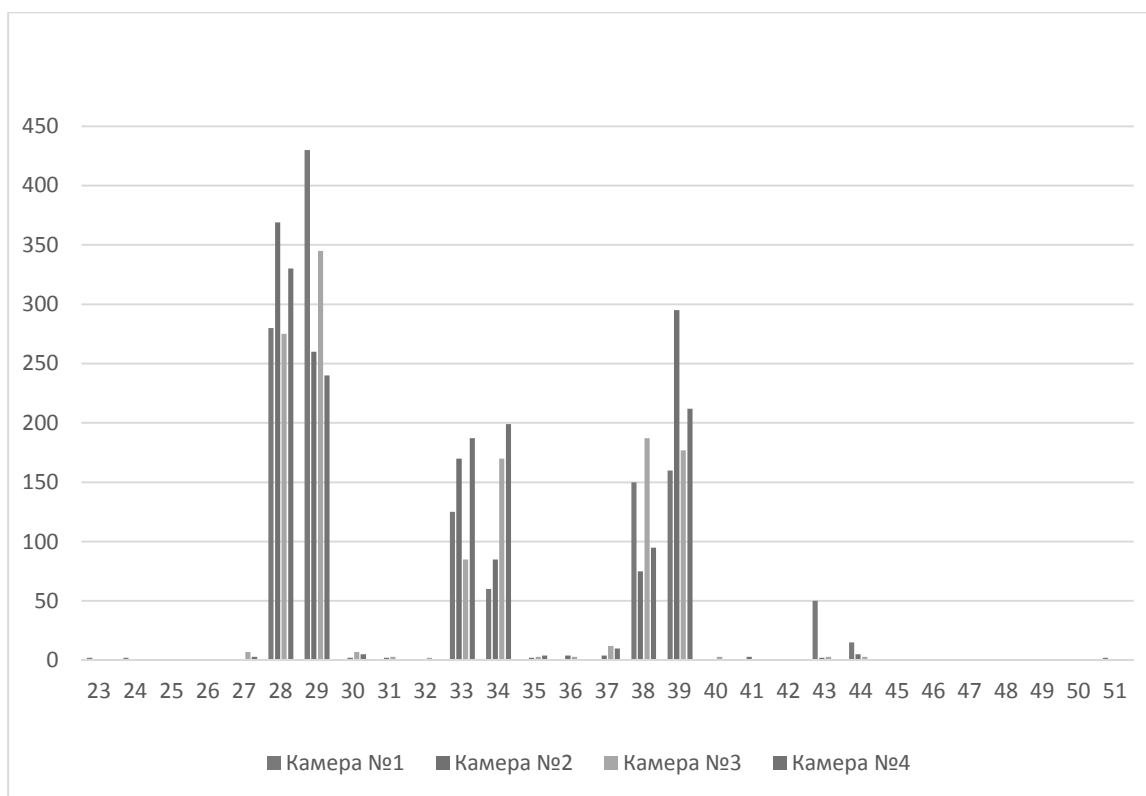


Рис. 4. Параллельная обработка видеопотоков

В данной ситуации функция-обработчик всего лишь оповещает соответствующий поток обработки о том, что очередной кадр получен с камеры и его нужно обработать. Отправка этих оповещений по-прежнему происходит последовательно для всех камер, но так как оповещение практически не занимает процессорного времени, проблема с задержками от последовательной обработки пропадает.

Ещё одна особенность платы видеозахвата – неравномерность интервалов между кадрами: в среднем временной интервал между соседними кадрами с одной камеры соответствует выбранной частоте кадров в секунду, однако отдельные кадры могут приходить гораздо раньше или наоборот гораздо позже, чем ожидалось (рис. 5).

На рис. 5 по горизонтальной оси отмечен временной интервал между кадрами в миллисекундах, а по вертикальной – количество раз, которое данный интервал встретился. Данные получены при обработке 4-х камер с частотой 30 кадров в секунду, статистика собрана для 1200 кадров с каждой камеры.



**Рис. 5. Гистограмма временных интервалов между кадрами**

Для работы с платой видеозахвата для АHD камер видеонаблюдения не было проблем с драйверами, так как они поставляются вместе с самим устройством, но существует проблема с SDK, которая заключается в полном его отсутствии в публичном доступе. Таким образом, обращаться напрямую к плате видеозахвата невозможно. Тем не менее, для решения этой проблемы был найден способ: ПО от производителя платы видеозахвата запускает локальный веб-сервер, через который можно получать видеопоток с камер, подключённых к плате видеозахвата.

В данном случае код приложения значительно упрощается, однако мы не имеем никакого контроля над процессом видеозахвата – получаемый видеопоток проходит слишком «длинный» путь от камеры до нашего приложения, из-за чего возникают большие задержки, на которые практически невозможно повлиять.

Эксперименты по замеру задержек показали следующие результаты: 200-300 мс для платы видеозахвата под АHD камеры видеонаблюдения и 100-200 мс для платы видеозахвата под не-АHD камеры.

Данные задержки несомненно являются значительными, если мы хотим решать задачи в масштабе реального времени или хотя бы в масштабе, близком к реальному времени. В частности, представим ситуацию: автомобиль движется со скоростью 50 км/ч, что приблизительно равно 15 м/с. Имея видеопоток с частотой 30 кадров в секунду (новый кадр приблизительно каждые 30 миллисекунд), получаем, что за один кадр автомобиль успеет проехать около полуметра. Соответственно, за 200 миллисекунд (около 7 кадров) автомобиль успеет проехать 3,5 метра – значительная задержка, которая будет заметна пользователю данной системы.

Таким образом, можно сделать вывод, что построение программно-аппаратного комплекса для реализации ADAS системы на основе аналоговых камер и плат видеозахвата возможно, однако стоит тщательно подойти к выбору платы видеозахвата: помимо технических характеристик важно обращать внимание на наличие драйверов, документации и каких-либо средств разработки. ПО, входящее в поставку с платами видеозахвата, необходимо только

для проверки работы платы, так как основная ниша, где они используются – это системы видеонаблюдения. Соответственно, в любом случае потребуется разработка своего собственного приложения для работы с платой видеозахвата: тут важно наличие средств разработки и документации, так как это позволит написать более производительное приложение, более точно сконфигурировать плату видеозахвата, лучше использовать её ресурсы и минимизировать задержки в извлечении видеопотока.

### Библиографический список

1. DH\_VEC Video Compression Card System SDK Manual (Windows) Ver: 2.1 Build0711 2012-07-11
2. [https://devline.ru/plata\\_videozahvata/](https://devline.ru/plata_videozahvata/) - описание и характеристики платы видеозахвата Линия АНД 4x25 Hybrid

*Дата поступления  
в редакцию 15.04.2018*

**A.D. Sachkov, D.A. Koblyakov, E.S. Sokolova**

### **DEVELOPMENT OF SOFTWARE AND HARDWARE COMPLEX OF EXTRACTION AND ANALYSIS OF VIDEO DATA FROM SENSORY DEVICES**

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

**Purpose:** Develop software and hardware stack to extract and analyze video data from sensory devices. Such stack is a base element of ADAS systems.

**Approach:** Analysis of embedded software to get maximal performance.

**Findings:** Developed software and hardware stack to extract and analyze video data from sensory devices which is capable to work in near real-time mode.

**Value:** Besides a lot of difficulties developing of software and hardware stack to extract and analyze video data from sensory devices based on analogue cameras and video-capture cards is possible.

*Key words:* advanced driver assistance systems, video capture cards, video stream extracting.

УДК 004.9

Д.Ю. Тюгин, А.А. Куркин, О.Е. Куркина

**ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС  
ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ ВНУТРЕННИХ ВОЛН  
В СТРАТИФИЦИРОВАННОМ ОКЕАНЕ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Изучение геофизических явлений, происходящих в Мировом океане, в том числе на шельфе, является актуальной задачей в рамках освоения природных ресурсов. Одним из основных инструментов при исследовании таких крупномасштабных процессов является математическое моделирование. Для проведения численного эксперимента необходим инструмент, ориентированный на проблемы, решаемые в данной области, а именно учитывающий особенности инициализации моделей, обработки и визуализации данных, доступный для применения без изучения исходного кода. В статье рассматриваются особенности разработки программного комплекса для моделирования внутренних волн на базе слабонелинейной теории. Предложены новые методы для построения программных комплексов, интегрирующих в себе данные, численные модели и средства подготовки данных, использующие контекст для автоматической инициализации численных моделей. Рассматривается набор программных инструментов: инструменты импорта данных, поддержки форматов международных гидрологических атласов, алгоритмов выборки и визуализации данных, блоков расчета полей характеристик внутренних волн для инициализации моделей, средств ввода и автоматической верификации начальных условий, вывода результатов расчета и построения графиков. Показано применение комплекса на примере расчета трансформации и распространения внутренних волн в акватории Балтийского моря.

*Ключевые слова:* программный комплекс, численное моделирование, пользовательский интерфейс, обработка данных, инициализация моделей, визуализация данных.

**Введение**

Детальное изучение физических процессов, возникающих на шельфе, прибрежной зоне и материковом склоне является важной задачей для осуществления дальнейшего освоения шельфа Мирового океана. Данные об этих процессах необходимы для безопасного проектирования и строительства гидротехнических сооружений, анализа и повышения продуктивности морских экосистем, поиска и добычи углеводородного сырья и других полезных ископаемых, уменьшения риска загрязнений морской среды.

В качестве одного из таких процессов следует рассматривать распространение и трансформацию внутренних гравитационных волн. Данный тип волн играет важную роль в динамике водных масс и экосистем. Они оказывают значительное влияние на перемешивание водных слоев, суспендирование и перемещение осадочных материалов, размывы дна и, в конечном итоге, формирование рельефа дна шельфовой зоны. Также они существенно определяют распределение питательных веществ и биологическую продуктивность. Течения, индуцированные внутренними волнами, воздействуют на подводные части морских гидротехнических сооружений, усиливая сосредоточенные нагрузки, изгибающие и крутящие моменты и натяжение якоряющих узлов. Кроме того, внутренние волны в значительной мере определяют процессы распространения естественных и техногенных примесей и влияют на качество воды и биопродуктивность морской среды.

Для эффективного исследования динамики внутренних волн необходим инструмент, оптимизированный для выполнения целого класса задач по моделированию внутренних волн и исследованию характеристик и физических полей, формируемых в процессе их распространения в горизонтально неоднородном стратифицированном вращающемся океане.

Существующие программные комплексы с открытым исходным кодом зарубежных разработчиков (MITgcm [1], POM [2], ROMS [3]) созданы с расчетом на более широкий спектр гидродинамических задач, требуют глубоких знаний в области программирования и численных методов. Для инициализации моделей в этих комплексах требуется внешняя подготовка данных. Российские разработки в области вычислительной гидро- и аэродинамики (пакет программ ЛОГОС и др.) не находятся в свободном доступе, ориентированы на промышленность и не поддерживают расчеты в стратифицированной жидкости (только в многофазной).

Таким образом, для решения задачи моделирования внутренних волн необходимо либо разработать свои исходные коды в одном из пакетов моделирования общего назначения, например Матлаб, либо изучить исходный код одного из свободных пакетов для моделирования, найти подходящие данные, обработать их для инициализации модели, провести расчет и проанализировать результаты. Как правило, при численном эксперименте требуется проводить множество расчетов, меняя как начальные условия модели, так и выборку данных для её инициализации. Такой подход отнимает много времени, к тому же изучение исходного кода пакета для моделирования, как и реализация модели с нуля и её верификация требуют значительных усилий и времени, и зачастую создание модели не является целью исследования. Существуют устоявшиеся модели на базе общепризнанных систем уравнений. Поэтому именно результаты моделирования в рамках этих систем уравнений в определенной акватории на базе общедоступных гидрологических атласов либо на базе натурных измерений и их анализ представляют большой интерес.

В этом случае инструмент, интегрирующий в себе общедоступные модели, данные, средства обработки данных для инициализации этих моделей, средства задания начальных условий, средства проведения расчетов и визуализации результатов без изучения исходного кода программного пакета, мог бы повысить эффективность исследований в данной области.

### Теоретический анализ

Для описания динамики внутренних волн разработан ряд общепризнанных моделей, применимых к результатам лабораторных экспериментов и к реальным природным условиям. Один класс образуют модели на базе прямого численного интегрирования полных нелинейных систем уравнений Навье-Стокса, двумерных по пространству. Такие модели, как правило, требуют больших вычислительных затрат. Учет в них дополнительных внешних факторов ведет к требованию учета третьей пространственной координаты и поэтому затруднителен. Другой класс моделей базируется на слабонелинейной теории длинных (по сравнению с глубиной жидкости) волн. В этом случае динамика волн описывается одномерным эволюционным уравнением Кортевега – де Вриза (КдВ). Коэффициенты уравнения определяются распределением плотности по глубине, горизонтального сдвигового течения и условиями на поверхности. К преимуществам данного класса моделей, в отличие от полнонелинейных, относится меньшая вычислительная сложность, возможность обобщения для горизонтально неоднородной жидкости. Для описания волн больших амплитуд уравнение КдВ может быть уточнено путем учета поправок следующих порядков малости. В таком случае подходящим является уравнение Гарднера [4] (уравнение Кортевега – де Вриза с комбинированной нелинейностью):

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + (c + \alpha \eta + \alpha_1 \eta^2) \frac{\partial \eta}{\partial x} + \beta \frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} = 0, \quad (1)$$

где  $\eta$  – смещение изопикнической поверхности в максимуме вертикальной моды; коэффициенты  $c$ ,  $\alpha$ ,  $\alpha_1$  и  $\beta$  определяются стратификацией плотности и глубиной океана ( $c$  – фазовая скорость длинных линейных внутренних волн,  $\alpha$  – коэффициент квадратичной нелинейности,  $\alpha_1$  – коэффициент кубической нелинейности,  $\beta$  – коэффициент дисперсии). Выражения для расчета коэффициентов подробно описаны в [5, 6].

Учет горизонтальной неоднородности жидкости и глубины бассейна приводит к изменчивости коэффициентов уравнения (1) вдоль направления распространения волны, в этом случае динамика волн может быть описана обобщенным уравнением Гарднера на случай плавно неоднородной среды [7]. Оно имеет вид:

$$\frac{\partial \xi}{\partial x} + \left( \frac{\alpha(x)Q}{c^2(x)} \xi + \frac{\alpha_1(x)Q^2}{c^2(x)} \xi^2 \right) \frac{\partial \xi}{\partial s} + \frac{\beta(x)}{c^4(x)} \frac{\partial^3 \xi}{\partial s^3} = 0, \quad (2)$$

где  $\xi(x, s) = \frac{\eta(x, s)}{Q(x, x_0)}$ ,  $s$  – координата с сопровождающей волну системе отсчета вдоль трассы,

$$s = \int \frac{dx}{c(x)} - t, \quad Q - \text{фактор усиления.}$$

Для учета вращения океана уравнение Гарднера может быть дополнено. В этом случае может использоваться уравнение Гарднера-Островского [8], записанное для неоднородной среды (3):

$$\frac{\partial \xi}{\partial x} + \left( \frac{\alpha(x)Q}{c^2(x)} \xi + \frac{\alpha_1(x)Q^2}{c^2(x)} \xi^2 \right) \frac{\partial \xi}{\partial s} + \frac{\beta(x)}{c^4(x)} \frac{\partial^3 \xi}{\partial s^3} = \frac{f^2}{2c(x)} \int \xi ds, \quad (3)$$

где  $f$  – параметр Кориолиса,  $f = (4\pi/T_e) \sin(\varphi)$ ,  $T_e$  – период вращения Земли,  $\varphi$  – географическая широта.

Уравнения (1) – (3) реализованы в виде расчетных модулей программного комплекса, на базе неявной псевдоспектральной схемы [9].

### Разработка программного комплекса

Для инициализации модели на основе уравнений КдВ-типа были использованы международные гидрологические атласы – WOA (World Ocean Atlas) [10], GDEM (Generalized Digital Environmental Model) [11]. Береговая линия задана на основе данных атласа батиметрии высокого разрешения ETOPO1 [12], с 1-минутной сеткой. Гидрологические атласы содержат пространственно-временные профили температуры и солености воды. Эти данные используются в комплексе для расчета профилей плотности, частоты Брента-Вяйсяля и полей характеристик внутренних волн (коэффициенты уравнения Гарднера). Архитектура программного комплекса представлена на рис. 1.



Рис. 1. Архитектура программного комплекса

Основой для хранения данных является библиотека NetCDF [13]. Данная библиотека широко распространена в научном сообществе, часть данных в открытых источниках уже описывается в формате NCF. Для загрузки данных в текстовом формате предусмотрен блок импорта из текстовых данных, конфигурируемый при помощи пользовательского интерфейса. Таким образом, он не зависит от конкретных данных, а может быть настроен пользователем. Данные приводятся к единому формату NCF, затем загружаются в память. Формат NCF позволяет описывать многомерные данные и сохранять их описание вместе с самими данными, в том числе различную служебную информацию о названии физических полей, единиц измерения и опорных точек сетки. Таким образом, загрузка открытых источников может быть выполнена путем сопоставления названий переменных и проверки единиц измерения. Для этого предусмотрены наборы описаний для атласов WOA и ETOPO1. Пользовательский интерфейс комплекса представлен на рис. 2.

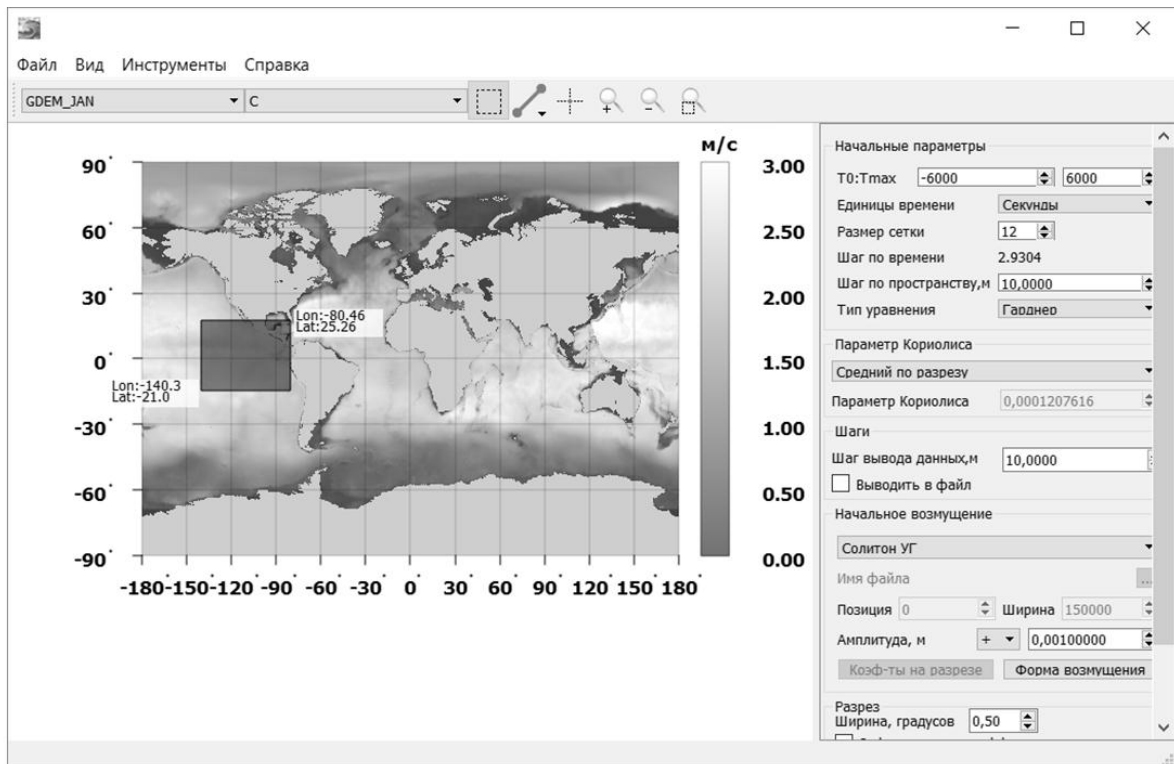


Рис. 2. Пользовательский интерфейс

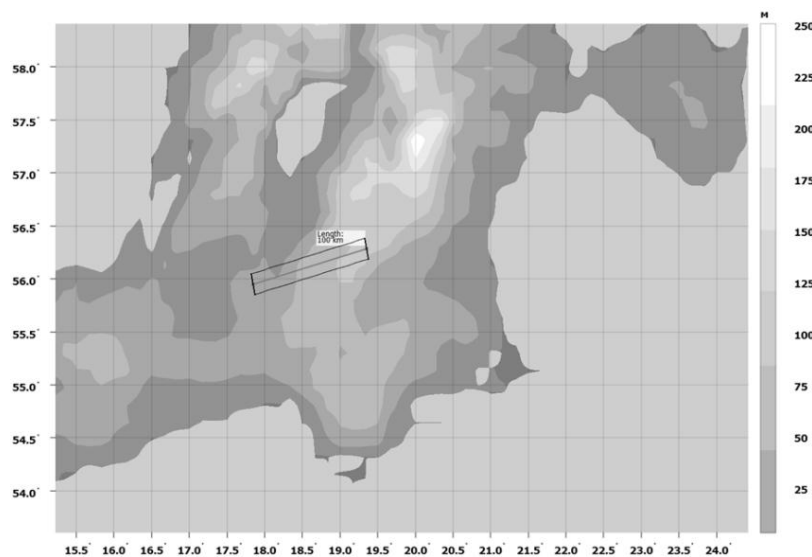


Рис. 3. Инструмент для задания выборки данных



Применение комплекса не требует изучения его исходного кода и компиляции. Задание начальных условий частично автоматизировано на основе контекста данных для инициализации модели. Так, выборка данных для инициализации модели привязана к географической карте, рис. 3.

Поэтому часть параметров, например, параметр Кориолиса в уравнении Гарднера-Островского может быть получен из координат разреза. Задание амплитуды начального возмущения для некоторых типов уравнений может быть выполнено более точно, с учетом ограничений, исходящих из аналитической оценки в рамках слабнолинейной теории [14]. Так, задание начального возмущения для расчетов в рамках уравнения Гарднера может быть уточнено в том случае, если начальным возмущением является солитон уравнения Гарднера. Если параметр кубической нелинейности отрицателен, то возможны солитоны одной полярности (определяется знаком параметра квадратичной нелинейности) и ограниченные амплитудой:

$$a_{\text{lim}} = -\alpha/\alpha_1. \quad (4)$$

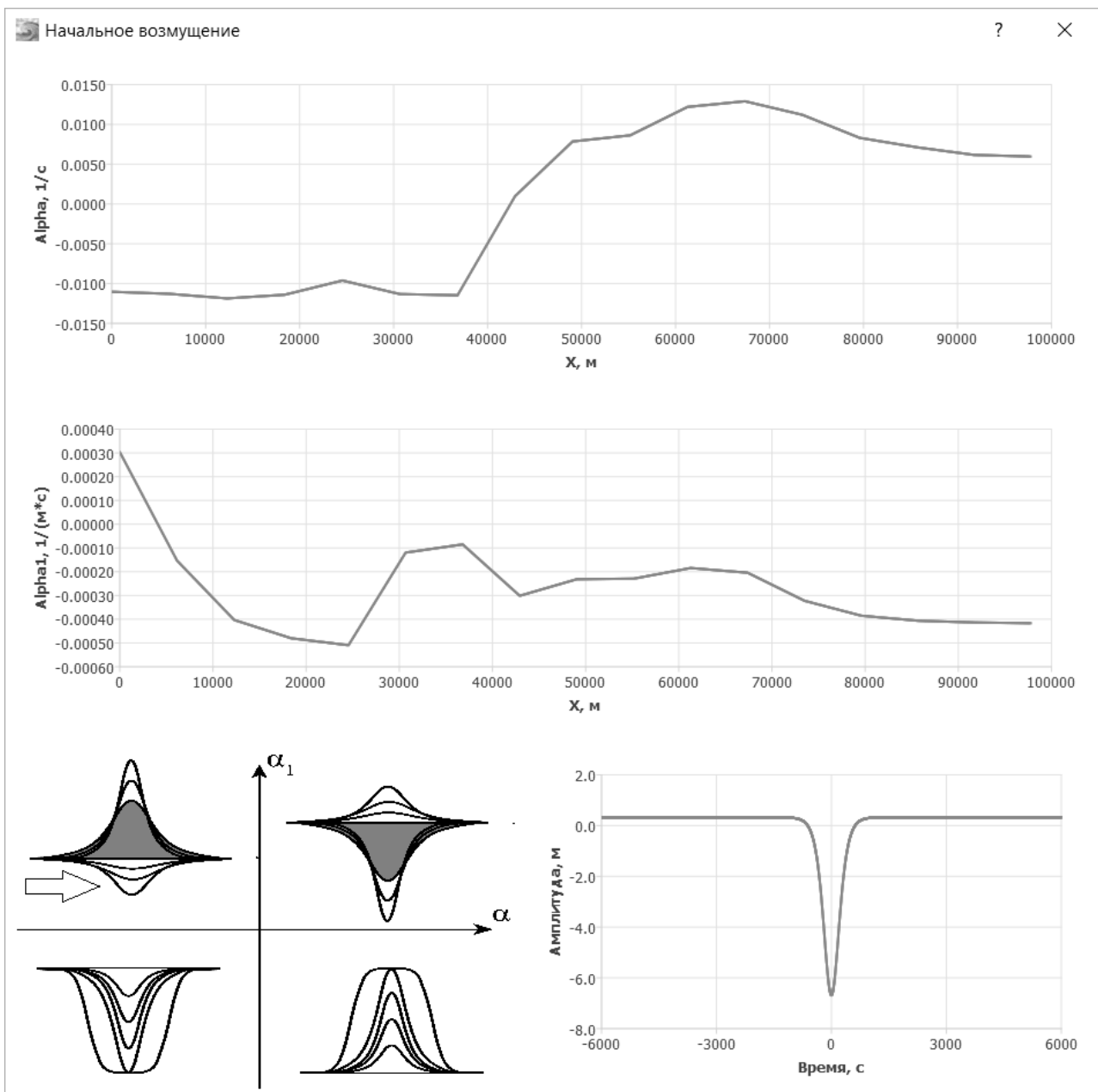


Рис. 4. Анализ входных параметров для задания начального возмущения

Если параметр кубической нелинейности положителен, то существуют две ветки солитонных решений и ветка противоположной знаку  $\alpha$  полярности ограничена по амплитуде снизу амплитудой алгебраического солитона (5)

$$a_{\text{alg}} = -2\alpha/\alpha_1. \quad (5)$$

Данная проверка выполняется в комплексе автоматически, пользователь получает подробный анализ (рис. 4).

### Эксперимент

Рассмотрим расчет динамики внутренних волн на базе уравнения Гарднера, в качестве начального возмущения задан солитон уравнения Гарднера, с амплитудой  $-7$  метров. Для инициализации модели используется разрез, показанный на рис. 3, 4. В начальной точке параметры  $\alpha_1=0.0003$ ,  $\alpha=-0.01$ , ограничение амплитуды отсутствует, так как ветка солитонных решений находится во втором квадранте и начальное возмущение отрицательно (рис. 4).

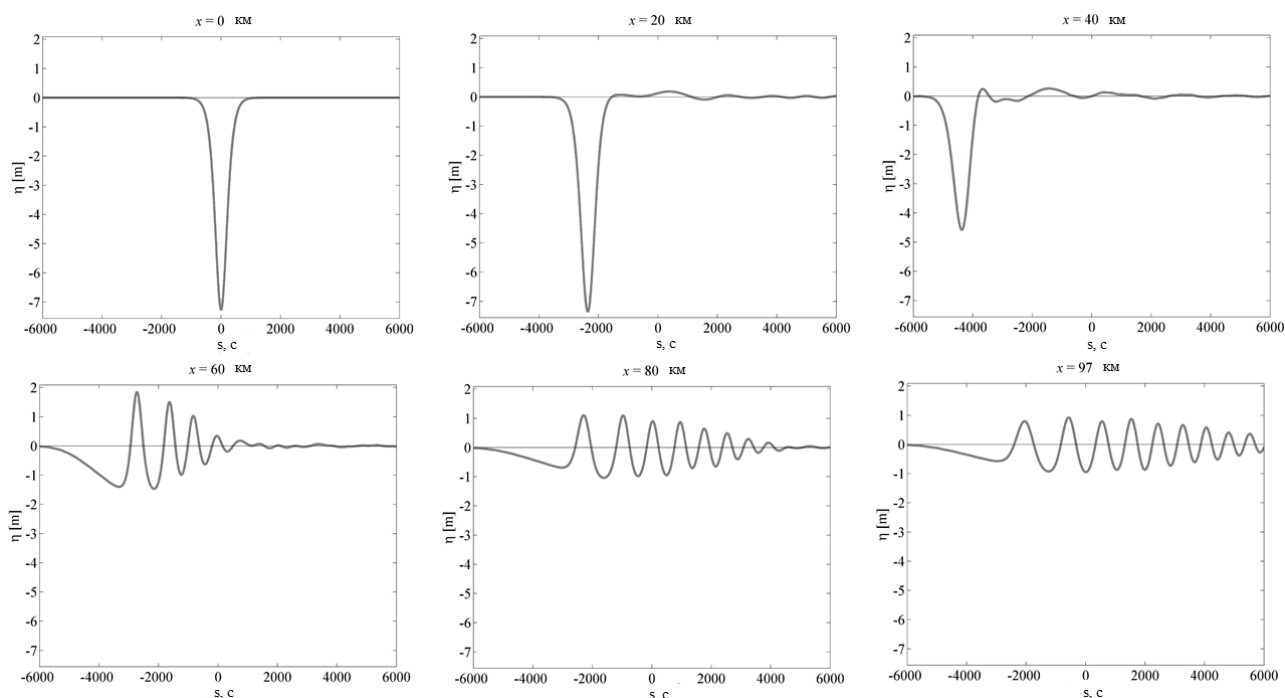


Рис. 5. Результаты моделирования динамики внутренних волн

На рис. 5 представлена трансформация солитона. Солитон отрицательной полярности адиабатически меняется до точки трассы  $x = 40$  км. Затем параметр  $\alpha$  меняет знак, и солитон трансформируется в цуг волн положительной полярности.

### Заключение

Разработан программный комплекс, ориентированный на решение задачи моделирования внутренних волн в стратифицированном океане на базе слабонелинейной теории. Он включает моделирование на основе уравнений Гарднера и Гарднера-Островского с учетом сил Кориолиса. Для поддержки проведения численного эксперимента в комплексе реализован набор инструментов, включая инструменты импорта данных, поддержки форматов международных гидрологических атласов, алгоритмов выборки и визуализации данных, блоков расчета полей характеристик внутренних волн для инициализации моделей, средств ввода и автоматической верификации начальных условий, вывода результатов расчета и построения

графиков в различных проекциях. Показано применение комплекса на примере расчета трансформации и распространения внутренних волн в акватории Балтийского моря.

Разработанный комплекс содержит все необходимые компоненты для проведения численных экспериментов в любой области мирового океана на базе слабонелинейной теории без написания дополнительного программного кода. В результате изучение внутренних волн, во-первых, может проводиться пользователями без знаний в области программирования, а во-вторых, наличие такого инструмента значительно экономит время на адаптацию данных и численных схем, что повышает эффективность исследований.

Переход от набора исходных кодов и разрозненных данных к программному продукту, интегрирующему в себе данные, алгоритмы обработки и численные модели, позволяет перейти к технологии для исследования внутренних волн.

*Представленные результаты получены за счет средств гранта Российского научного фонда (проект №17-71-10101).*

### Библиографический список

1. **Marshall, J.** Hydrostatic, quasi-hydrostatic, and nonhydrostatic ocean modeling / J. Marshall, C. Hill, L. Perelman, A. Adcroft // J. Geophysical Res. – 1997. – V. 102. – P. 5733–5752.
2. **Blumberg, A.** A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model // A. Blumberg, G. Mellor // Dynamics of Princeton. 1987. – P. 1–16.
3. **Melson, A.** Using the Regional Ocean Modeling System (ROMS) to improve the ocean circulation from a GCM 20th century simulation / A. Melson, V. Lien, W. Budgell // Ocean Dynamics. – 2009. – P. 969–981.
4. **Полухина, О.Е.** Обобщенное уравнение Кортевега – де Вриза в теории нелинейных внутренних волн в стратифицированных потоках: дисс. ... на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. – 2002. – С. 109–130.
5. Holloway P., Pelinovsky E., Talipova T. Internal tide transformation and oceanic internal solitary waves. Ch. 2: Environmental Stratified Flows / Ed. R. Grimshaw. Kluwer Acad. Publ. – 2002. – P. 29–60.
6. **Pelinovsky, E.** Internal solitary waves / E. Pelinovsky [et al.] // Ch. 4. Solitary Waves in Fluids. WIT Press. Southampton. Boston. – 2007. – P. 85–110.
7. **Holloway, P.** A Nonlinear Model of Internal Tide Transformation on the Australian North West Shelf / P. Holloway [et al.] // J. Phys. Oceanogr. 27/6. 1997. P. 871–896.
8. **Grimshaw, R.** Internal solitary waves: propagation, deformation and disintegration / R. Grimshaw [et al.] // Nonlin. Processes Geophys. – 2010. – V. 17. – P. 633–649.
9. **Кокорина, А.В.** Применение псевдоспектрального метода для моделирования диссипации в рамках уравнения Гарднера / А.В. Кокорина, Т.Г. Талипова // Известия Академии инженерных наук Российской Федерации. Прикладная математика и механика. – 2002. – Т. 3. – С. 62–68.
10. **Boyer, T.P.** World Ocean Database 2005 / T.P. Boyer [et al.]. – Washington: U.S. Government Printing Office. 2006. 190. P.
11. **Teague, W.J.** A Comparison between the Generalized Digital Environmental Model and Levitus Climatologies // W.J. Teague, M.J. Carron, P.J. Hogan // J. Geophys. Res. 1990. – V. 95. – P. 7167–7183.
12. **Amante, C.** ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis / C. Amante, B. Eakins // NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24. – 2009. 19. P.
13. NetCDF. URL: <http://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf>
14. **Kurkina, O.E.** Nonlinear Dynamics of Internal Gravity Waves in Shallow Seas // PhD Thesis. – 2012. P. 26–28.

*Дата поступления  
в редакцию 30.04.2018*

---

D. Y. Tyugin, A.A. Kurkin, O.E. Kurkina

**PROBLEM-ORIENTED SOFTWARE PACKAGE FOR MODELING DYNAMIC  
OF INTERNAL WAVES IN THE STRATIFIED OCEAN**

Nizhniy Novgorod state technical university n.a. Alekseev

**Purpose:** Proposed a new software package for researching dynamic internal waves in the World Ocean.

**Design/methodology/approach:** A theoretical framework based on weak non-linear theory. A set of models based on KdV equations was implemented. A set of tools for data processing, models initialization, results visualization and analysis were implemented. The software package provides ability to conduct internal waves modeling without source code knowledge and manual data preprocessing unlike other widely used software packages.

**Findings:** The proposed approaches for automated models initialization using built-in datasets and data context can be used in other applications related with geophysical processes modeling.

**Research limitations/implications:** The present study is a starting point for extending the software package with additional models and data sets which allow more detailed research of internal waves and theories comparison.

*Key words:* software package, numeric modeling, user interface, data processing, model initialization, data visualization.

УДК 004.94

А.Г. Шмелева<sup>1</sup>, А.И. Ладынин<sup>1</sup>, Ю.В. Таланова<sup>1</sup>, В.В. Наумов<sup>2</sup>**КОГНИТИВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ**Московский технологический университет (МИРЭА)<sup>1</sup>,  
АО «Концерн «МОРИНСИС-АГАТ»<sup>2</sup>

Системный подход к задачам разработки стратегий модернизации предприятий является актуальным направлением развития информационных систем поддержки принятия решений. В статье представлено применение экспертных оценок для построения когнитивных моделей выявления разнородных значимых внешних и внутренних факторов, способствующих формированию множества концептов и определения их взаимовлияния. С применением теории графов разработан программный модуль обработки матриц смежности экспертных мнений, позволяющий строить итоговую матрицу достижимости целей исследования, а также наглядно представлять решение в виде ориентированного графа – когнитивной карты. Когнитивные карты позволяют проводить оценку инновационного развития, строить прогностические модели взаимодействия различных факторов, исследовать стратегические и текущие задачи управления. Для начального определения характеристик когнитивных моделей используется исследование производственных систем посредством PEST и SWOT-анализов. Предлагаемая методика формирования когнитивных моделей позволяет выявить дополнительные факторы, оказывающие влияние на систему и включить их в единую модель. Представленная когнитивная модель оперирует лингвистическими переменными, что представляет особую актуальность в трудноформализуемых задачах, для которых не представляется возможным установить численные значения. В соответствии с представленным подходом разработан программный модуль системы поддержки принятия решений, направленный на исследование влияния разнородных воздействующих факторов. Приведен пример решения задачи анализа мнений трех экспертов. Результаты расчетов представляются в виде когнитивной карты – ориентированного графа и матрицы взаимовлияний концептов, наглядно отражающих обработку экспертных заключений.

*Ключевые слова:* когнитивное моделирование, экспертные оценки, лингвистические переменные, концепты, PEST-анализ, SWOT- анализ, программная реализация.

Современные тенденции развития наукоемких предприятий направлены на разработку информационных систем, позволяющих проводить комплексный анализ производственных задач. Конкурентоспособность предприятия зависит от возможности оперативно оценивать внутренние и внешние факторы, проводить модернизацию для улучшения характеристик выпускаемой продукции.

В основе построения информационных систем поддержки принятия решений, осуществляется выбор методов обработки больших объемов данных, их структуризация и агрегация для идентификации свойств и характеристик объекта исследования с целью получения определенных знаний. Математическое моделирование производственной системы применяется, если возможно однозначно установить зависимость между элементами, характеризующими объект-оригинал с количественной стороны [1].

Модель любого объекта включает:

- характеристики объекта, которые необходимо определить (неизвестные величины);
- характеристики внешних изменяющихся условий (входные величины);
- совокупность внутренних параметров объекта, с помощью которых описываются связи между величинами.

При решении трудноформализуемых производственных задач построение математической модели затруднительно, например, по причине невозможности установить функциональную зависимость между элементами, а, следовательно, возникает необходимость использования когнитивных подходов к анализу начальных данных [2, 3]. Когнитивное моделирование позволяет абстрагироваться от несущественных свойств объекта и получить но-

вые знания об оригинале, которые при непосредственном изучении были недоступны исследователю из-за невозможности изучить оригинал (разрабатываемая инновационная технология) или вследствие слишком больших затрат, необходимых для экспериментальных исследований [4].

При построении когнитивных моделей в качестве характеристик внешних изменяющихся условий (входных величин) будем рассматривать концепты – единицы речевого высказывания – логически смысловой компонент исследуемой системы [5]. Совокупность внутренних параметров объекта, с помощью которых описываются связи между концептами, в модели также задаются лингвистическими переменными и позволяют установить силу связи. Множество концептов и их взаимовлияние определяется экспертным оцениванием [6]. К задачам экспертов относятся изучение условий функционирования объекта, разграничение существенных и несущественных характеристик (концептов), а также четкое представление о целях исследования [7].

Для описания и последующего анализа когнитивной модели применяются элементы теории графов. Модель представления знаний эксперта можно задать в виде ориентированного графа:

$$G=(C, W),$$

где  $C$  – концепты – множество вершин графа;  $W$  – сила связи – множество ребер.

При решении нечетких задач с использованием методов и подходов теории графов получим ориентированный граф – когнитивную карту, наглядно характеризующую взаимодействия элементов системы, объединяющую экспертные мнения в единую модель [8].

Результирующий граф отвечает следующим требованиям:

- вершины графа соответствуют факторам влияния;
- ребра графа определяют силу взаимного влияния факторов.

Преимуществом данного подхода является возможность установить отсутствующие связи между концептами, т.е. влияние вида:

$$C_i \rightarrow C_j \rightarrow C_k \rightarrow C_l \Rightarrow C_i \rightarrow C_l,$$

где  $C_i, C_j, C_k, C_l$  – концепты исследуемой системы.

Существуют различные подходы к определению концептов и связей между ними [9]. Рассмотрим применение PEST и SWOT-анализа для формирования начальных данных когнитивной модели посредством оценки внутренних и внешних факторов влияния. В основе PEST-анализа лежат экспертные заключения, направленные на формализацию концептов. Термин PEST-анализ возник как аббревиатура основных сфер, характеризующих принадлежность концепта:

- policy – политические факторы;
- economy – экономические факторы;
- society – социокультурные факторы;
- technology – технические и технологические факторы.

PEST-анализ представляет собой коллективную экспертизу факторов, направленную на выявление и формирования набора концептов. Структуризация проблем с использованием PEST-анализа позволяет сформировать множество концептов – вершин графа в когнитивную модель согласно четырем основным направлениям. Пример факторов, участвующих в PEST-анализе приведен на рис. 1.

Преимуществом когнитивного моделирования с применением PEST – анализа является возможность формировать множество концептов из различных областей в единую модель.

Далее устанавливается степень взаимовлияния концептов посредством SWOT-анализа. Исследуются характеристики концептов в когнитивной модели:

- strengths – сильные стороны;
- weaknesses – недостатки;
- opportunities – возможности;
- threats – опасности.

SWOT-анализ относится к методам планирования стратегического развития предприятий, направлен на детализацию параметров, позволяет использовать его при составлении и структуризации когнитивных моделей.

Совокупность рассмотренных подходов позволяет создать методологию решения трудноформализуемых задач, разработать алгоритмы обработки экспертных мнений в рамках информационной системы поддержки принятия решений для формирования направленной стратегического развития предприятий.



Рис. 1. PEST-анализ

Рассмотрим методологию решения производственных задач посредством когнитивного моделирования, позволяющую оценить результаты экспертных заключений в условиях нечеткой формализации мнений, представленных в виде лингвистических переменных. Разработанный программный модуль позволяет проводить построение нечетких когнитивных карт, что является актуальным в задачах, для которых затруднительно определить численные значения весов связей между концептами.

Этапы когнитивного моделирования можно представить согласно следующей последовательности действий:

- 1) формирование экспертной группы;
- 2) определение концептов на основе PEST-анализа;
- 3) установление связей между факторами и определение силы влияния с использованием SWOT-анализа;
- 4) построение когнитивной модели;
- 5) заполнение экспертами матриц смежности взаимовлияний;
- 6) расчеты в графе возможных путей длины  $> 1$ ;

- 7) восстановление прямых влияний между концептами;
- 8) построение итоговой матрицы взаимовлияний (матрицы достижимости);
- 9) анализ результатов моделирования.

Рассмотрим пример решения упрощенной задачи с использованием разработанного модуля. Цель исследования – анализ возможности предприятия для создания инновационной технологии (далее концепт б).

#### Эксперт 1

	1	2	3	4	5	6
1	X	Сильно	Сильно	Нет данных	Нет данных	Нет данных
2	X	X	Существенно	Нет данных	Существенно	Нет данных
3	X	X	X	Сильно	Сильно	Сильно
4	X	X	X	X	Существенно	Существенно
5	X	X	X	X	X	Незначительно
6	X	X	X	X	X	X

#### Эксперт 2

	1	2	3	4	5	6
1	X	Нет данных	Нет данных	Существенно	Нет данных	Сильно
2	X	X	Сильно	Незначительно	Существенно	Существенно
3	X	X	X	Нет данных	Существенно	Нет данных
4	X	X	X	X	Нет данных	Сильно
5	X	X	X	X	X	Незначительно
6	X	X	X	X	X	X

#### Эксперт 3

	1	2	3	4	5	6
1	X	Нет данных	Нет данных	Существенно	Существенно	Нет данных
2	X	X	Незначительно	Нет данных	Нет данных	Существенно
3	X	X	X	Сильно	Сильно	Незначительно
4	X	X	X	X	Сильно	Сильно
5	X	X	X	X	X	Незначительно
6	X	X	X	X	X	X

Рис. 2. Начальные матрицы экспертных мнений

Экспертам необходимо провести анализ совокупности разнородных факторов. Предположим, что в результате предварительного этапа – PEST и SWOT анализов, группой экспертов в составе трех человек изучены внешние и внутренние факторы, сформировано множество концептов. Для силы связи определим следующее множество лингвистических переменных  $W = \{\text{незначительно, существенно, сильно}\}$ . Представим задачу когнитивного моделирования в виде поиска совокупного влияния концептов.



Пусть определены значимые концепты:

- 1) материально-техническое обеспечение;
- 2) количество потребителей;
- 3) современные материалы;
- 4) исследовательско-конструкторские разработки (научные разработки);
- 5) стоимость материалов;
- 6) инновационная технология.

Необходимо установить взаимовлияние концептов посредством экспертных суждений, на основе которых производится системный анализ ситуаций, принимаются решения по разработке мероприятий, направленных на модернизацию предприятия, отделов, производства, расстановки приоритетов.

Для примера рассмотрим матрицы смежности оценки взаимовлияния концептов, заполненные экспертами (рис. 2).

Обработка представленных матриц проводилась с использованием разработанного программного модуля системы поддержки принятия решений [10]. На рис. 3 представлено главное окно программы, позволяющее задать число экспертов, количество факторов-концептов и связей между ними.

Количество концептов:

Количество специалистов:

Название проекта:

Выбор проекта:

Сохранить

Загрузить

Удалить

Таблица связей между концептами

	1	2	3	4	5	6
1	X					
2	X	X				
3	X	X	X			
4	X	X	X	X		
5	X	X	X	X	X	
6	X	X	X	X	X	X

Выбор экспертной матрицы:

Названия концептов

Расчет

Показать граф

Выход

Рис. 3. Главное окно программного модуля

Для решения задачи заполняются матрицы экспертных суждений (матрицы смежности). В левой части окна пользователь может выбрать матрицу оценок для каждого из экспертов. Также программный модуль позволяет отобразить ориентированный граф – когнитивную карту в соответствии с введенными начальными матрицами экспертных мнений.

Рассмотрим результаты анализа когнитивных моделей. Для формирования заключения о характере влияния перечисленных концептов друг на друга и на концепт (цель исследования) на основании заключений трех экспертов пользователю необходимо нажать кнопку «Расчет». Разработанный модуль позволяет быстро производить обработку экспертных суждений, строить итоговую матрицу достижимости поставленной цели с выявлением набора значимых концептов. На рис. 4 представлена матрица достижимости – обобщенная матрица анализа совокупности экспертных мнений, построенная в результате обработки исходных матриц.

Итоговая матрица

	1	2	3	4	5	6
1	X	Незначительно	Незначительно	Незначительно	Незначительно	Незначительно
2	X	X	Существенно	Существенно	Существенно	Существенно
3	X	X	X	Существенно	Сильно	Существенно
4	X	X	X	X	Существенно	Сильно
5	X	X	X	X	X	Незначительно
6	X	X	X	X	X	X

Рис. 4. Итоговая матрица экспертных мнений

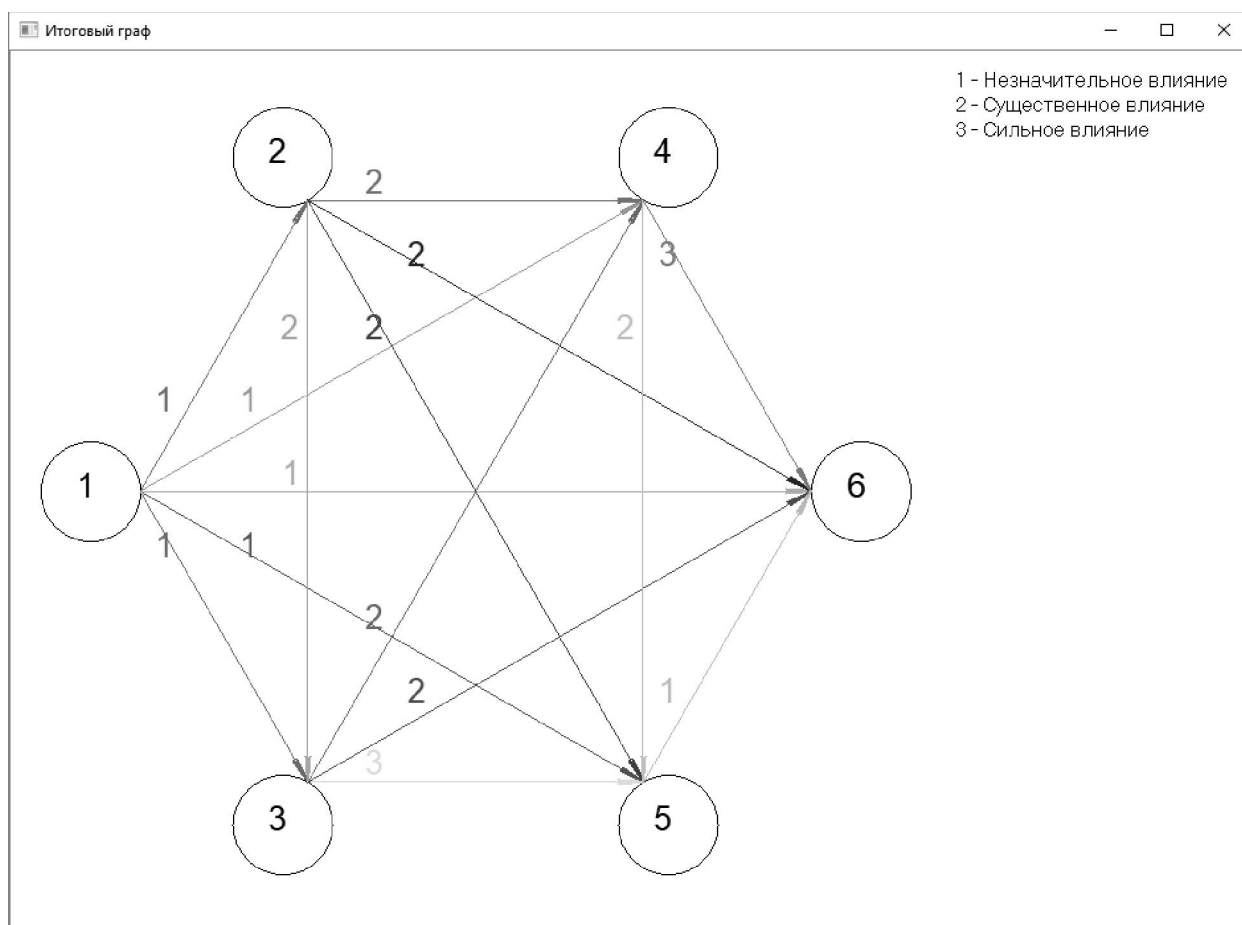


Рис. 5. Когнитивная карта

На рис. 5 представлен итоговый граф – когнитивная карта проекта, наглядно отображающая силу влияния факторов-концептов между собой (вершины 1-5) и на вершину 6, характеризующую цель экспертизы. Концепты являются вершинами графа, ребра представля-

ют связи, для удобства восприятия цифрами представлена интенсивность влияния между концептами. В правой части программного окна представлена легенда, отображающая соответствие номеров введенным лингвистическим переменным. Отметим, что полученный результирующий граф основан на оценке мнений трех экспертов и построен на основании матрицы, представленной на рис. 4.

Анализ матрицы достижимости (рис. 4) и соответствующего графа (рис. 5) позволяет сделать вывод, что на реализацию поставленной задачи создания инновационной технологии существенно влияет концепт 2 – число потребителей. При разработке проекта необходимо учитывать потребности потребителей, например, какие характеристики продукта наиболее востребованы. Также существенно влияет концепт 3 – современные материалы. Наиболее значимым концептом является концепт 4 – исследовательско - конструкторские разработки (научные разработки). По результатам рассматриваемой задачи разрабатываются мероприятия, по этапам реализации проекта составляется дорожная карта.

Представленный в работе модуль когнитивного моделирования направлен на обработку лингвистических переменных, формирование которых производится посредством PEST и SWOT-анализов, направленных на выявление концептов и определения силы их взаимовлияния. Разработанный программный модуль обладает интуитивным интерфейсом, позволяет задавать количество экспертов и концептов, эффективно проводить обработку матриц экспертных мнений. Модуль направлен на поддержку принятия решений и может быть использован в качестве источника информации при решении трудноформализуемых задач оценки степени влияния разнородных внешних и внутренних факторов на стратегическое развитие предприятия.

#### Библиографический список

1. **Тихобаев, В.М.** К построению модели многоуровневого управления / В.М. Тихобаев, Л.А.Толоконников // Известия Тульского государственного университета. Экономические и юридические науки. – 2011. – № 3–1. – С. 97–101.
2. **Горелова, Г.В.** Когнитивный подход к имитационному моделированию сложных систем // Известия Южного федерального университета. Сер.: Технические науки. – 2013. – №3. – С. 239–250.
3. **Лычагин, А.М.** Управление предприятием с позиции информационно-когнитивного моделирования // Вестник Новосибирского государственного университета. Сер.: Социально-экономические науки. – 2011. – Т. 11(2). – С. 81–91.
4. **Коробкин, В.В.** Учет рискованных ситуаций при моделировании процесса проектирования сложных управляющих систем на основе когнитивных моделей // В.В. Коробкин, А.Е. Колоденкова, А.П. Кухаренко // Известия Южного федерального университета. Сер.: Технические науки. – 2017. – №9. – С. 103–111.
5. **Гинис, Л.А.** Развитие инструментария когнитивного моделирования для исследования сложных систем // Инженерный вестник Дона. – 2013. – Т. 26. – С. 66–77.
6. **Шмелева, А.Г.** Программная реализация метода экспертных оценок форсайт-проектов / А.Г. Шмелева, А.И. Ладынин, А.В. Бахметьев // Современное состояние, проблемы и перспективы развития отраслевой науки: материалы Всероссийской научной конференции с международным участием. – М: Перо, 2016. – С. 534–537.
7. **Смирнова, Э.Е.** Методология оценки степени удовлетворенности потребителей в системе менеджмента качества / Э.Е. Смирнова, Т.А. Рябчик, А.И. Ладынин // Экономика и предпринимательство. – № 8 (ч. 4). – 2017. – С. 827–835.
8. **Шмелева, А.Г.** Оценка инновационных технологий на основе когнитивного моделирования / А.Г.Шмелева, Ю.В. Таланова Материалы международной научно-технической конференции «Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике» «МНТК ФТИ-2017». – М.: МТУ. – 2017. – С. 328–330.
9. **Луценко, Е.В.** Теория информации и когнитивные технологии в моделировании сложных многопараметрических динамических технических систем / Е.В. Луценко, Г.В. Серга // Поли-

тематический сетевой электронный научный журнал кубанского государственного аграрного университета. – 2016. – №121. – С. 68–115.

10. **Шмелева А.Г., Ладынин А.И.** “Система поддержки принятия решений «ШАГ» (СППР «ШАГ»)”. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ РОСПАТЕНТ № 2017619109 от 15.08.2017 г.

*Дата поступления  
в редакцию 18.04.2018*

**A.G. Shmeleva<sup>1</sup>, A.I. Ladynin<sup>1</sup>, Yu.V. Talanova<sup>1</sup>, V.V. Naumov<sup>2</sup>**

## **COGNITIVE MODELING IN THE DECISION SUPPORT SYSTEM**

Moscow Technological University (MIREA)<sup>1</sup>,  
Concern Morinformsystem-Agat<sup>2</sup>

**Purpose:** The article proposes the possible approach towards weakly structured problems investigation.

**Design/methodology/approach:** The paper introduces cognitive models with lingua-based impact descriptors. The PEST and SWOT-analysis usage in the factor formulation tasks are considered.

**Findings:** The developed program module and, the solution for the model problem are presented.

**Research limitations/implications:** The proposed method and the software are potentially highly efficient in weakly structured problems analysis.

**Originality/value:** Developed applied program is original and has a great potential as a primary or additional analytic software. The presented cognitive modeling methodology has great perspectives in both business and academic practice.

*Key words:* simulation model, cognitive modeling, weakly structured problem, software implementation.

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

---

УДК 621.039.586

А.В. Андреева, Г.Н. Власичев

### РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ АВАРИИ С БЛОКИРОВКОЙ ОТДЕЛЬНОЙ ТВС РЕАКТОРА БН В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева

**Цель исследования:** Доказательство эффективности средств обнаружения аварии с блокировкой отдельной ТВС и аварийной защиты реактора БН.

**Результаты:** Выполнен расчетный анализ аварии с блокировкой отдельной ТВС при различных уровнях мощности реактора. Получены высотные зависимости времен выпаривания натрия, расплавления оболочки и топливного сердечника. Анализ результатов показал, что проектный предел при данной аварии выполняется. Срабатывание аварийной защиты по сигналу системы контроля герметичности оболочек твэлов ограничит аварию пределами одной аварийной ТВС.

**Применение:** Возможность применения результатов исследования для выработки технических и организационных мер по предотвращению, управлению и ограничению последствий аварий для настоящих и будущих реакторов типа БН.

*Ключевые слова:* безопасность реакторов БН, проектная авария, тепловыделяющая сборка, выкипание натрия, плавление твэлов.

#### Введение

Существующая концепция безопасности ядерного реактора включает рассмотрение проектных и запроектных аварий [1]. В число проектных аварий реактора на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем (реактора БН) входят аварии с локальным нарушением расхода.

Уменьшение или прекращение расхода теплоносителя в отдельной тепловыделяющей сборке (ТВС) возможно в результате частичного или полного перекрытия сечения для прохода теплоносителя. Авария с закупоркой тепловыделяющей сборки может произойти при попадании посторонних предметов в хвостовик кассеты или в нижнюю решетку пучка тепловыделяющих элементов (твэлов). Чтобы такое перекрытие могло оказать существенное влияние на расход теплоносителя, оно должно быть достаточно большим. В результате снижения расхода произойдет выход из строя твэлов и попадание продуктов деления в контур. Значительное разрушение оболочек может быть обнаружено по аномальному росту активности теплоносителя.

Процесс развития проектной аварии с блокировкой проходного сечения отдельной ТВС при работе реактора на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем (реактора БН) на мощности представляет интерес, в первую очередь, с точки зрения распространения повреждений на соседние ТВС. Анализ распространения аварии в радиальном направлении в активной зоне важен для разработки в проекте реакторной установки мер по предотвращению повреждения тепловыделяющих элементов в объеме за пределами аварийной ТВС.

Проектный предел повреждения твэлов для проектной аварии с блокировкой отдельной ТВС для реактора БН состоит в разрушении твэлов аварийной ТВС с непревышением

пределов безопасной эксплуатации по повреждению твэлов во всем остальном объеме активной зоны [1]. По результатам анализа должно быть очевидно, что не нарушается установленный проектный предел. Для предотвращения развития проектной аварии за пределы одной ТВС активной зоны и соответственно перехода аварии в разряд запроектных необходима своевременная остановка реактора средствами воздействия на реактивность (аварийной защитой). Для обоснования эффективности средств обнаружения аварий и аварийной защиты (доказательства своевременности срабатывания аварийной защиты) необходим детальный анализ аварии, в результате которого должны быть определены временные параметры ее развития. Предельные временные характеристики аварийных процессов могут быть получены в консервативном анализе с постулированием полного мгновенного прекращения расхода. Возможный сценарий развития аварии с прекращением расхода в отдельной ТВС определяется возможностями диагностики аварии на различных этапах ее протекания. При своевременном обнаружении и срабатывании аварийной защиты реактора развитие этой аварии ограничится установленным для нее проектным пределом повреждения твэлов. Для обнаружения аварии с блокировкой отдельной ТВС в реакторе БН предназначена штатная система контроля герметичности оболочек твэлов по запаздывающим нейтронам на входе в промежуточный теплообменник (система КГО). Выход источников запаздывающих нейтронов из твэлов в теплоноситель происходит при разгерметизации твэлов в процессе их перегрева либо расплавления оболочек на наиболее теплонапряженных участках.

К настоящему времени имеются данные по различным аспектам аварии с полной блокировкой отдельной ТВС быстрого реактора, сопровождающейся в случае ее возникновения плавлением в активной зоне. Результаты выполненных экспериментальных работ и сопровождающих расчетных исследований позволяют достаточно хорошо представлять сценарий развития такой аварии. В результате значительного снижения или прекращения расхода в ТВС происходят выкипание натрия, сопровождающееся осцилляциями его расхода, осушение и плавление оболочек твэлов [2] с образованием стальных блокировок каналов для теплоносителя в области нижней зоны воспроизводства [3]. После стальных оболочек плавятся таблетки топлива, образуя в случае продолжения работы реактора на мощности расплавленный и затем кипящий бассейн из топлива и стали. Высокие тепловые потоки от кипящего бассейна к чехлу [2] приводят к плавлению и разрушению чехлов аварийной и соседних ТВС и проникновению расплава в межчехловые зазоры [4] и, возможно, в окружающие ТВС. Чтобы избежать распространения аварии за пределы аварийной ТВС, реактор должен быть остановлен до достижения кипящего бассейна в этой сборке [2]. Проникновение расплава в окружающие ТВС с образованием полной блокировки происходит очень быстро – в случае образования кипящего бассейна в аварийной ТВС за 1-2 с [2, 5].

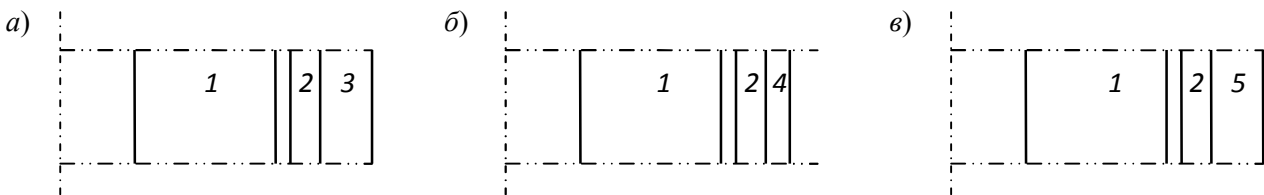
Возможность обнаружения аварии детектированием запаздывающих нейтронов подтверждается экспериментами программы SCARABEE [6]. При свежем топливе достаточно сильный сигнал может быть получен после повреждения чехла тепловыделяющей сборки и выхода источников запаздывающих нейтронов в межчехловой зазор с потоком натрия, а также при проникновении расплава в окружающие ТВС с номинальным натриевым потоком. При облученном топливе, как показал эксперимент ВТИ-Cabri [6], источники запаздывающих нейтронов выносятся к выходу из аварийной ТВС непосредственно после разрыва оболочек твэлов, что обеспечит своевременное детектирование аварии и ограничение ее проектными пределами. Такая авария может распространиться на всю активную зону в случае множественных отказов в системе аварийной защиты реактора.

Анализ проектной аварии с блокировкой отдельной ТВС при работе реактора БН на номинальной мощности показал, что проектный предел при данной аварии выполняется [7]. Срабатывание аварийной защиты по сигналу системы КГО ограничит аварию пределами одной аварийной ТВС – проектным пределом повреждения твэлов. Для доказательства безопасности быстрого реактора при данной аварии необходим анализ во всех возможных режимах работы, в частности на уровнях пониженной мощности, с облученным и свежим топливом.

### Методика исследования

Расчетная модель динамики разогрева и плавления твэла описывает нестационарный теплообмен в отдельном цилиндрическом твэле с учетом плавления оболочки и топлива при аварии с прекращением расхода. В процессе расчета динамики теплообмена в отдельном твэле и прилегающей эффективной кольцевой ячейке (канале) определяются на каждом шаге по времени осесимметричные распределения температуры в радиальном направлении (в цилиндрической системе координат) и координаты фазовых границ для отдельного высотного участка.

В данной модели расчетная схема твэла составляется из двух областей (рис. 1). Одна расчетная область включает топливный сердечник, вторая – оболочку. В случае рассмотрения выпаривания натрия вокруг твэлов добавляются еще одна либо две (в зависимости от разновидности модели) расчетные области, включающие эффективную кольцевую ячейку теплоносителя. Две дополнительные расчетные области используются для учета выталкивания части жидкого теплоносителя из рассчитываемого поперечного сечения пузырьком паров натрия из соседних по высоте канала, более нагретых участков.



**Рис. 1. Расчетные схемы радиального теплообмена в твэле в характерных состояниях в аварийном процессе после прекращения расхода:**

*a* – до закипания натрия; *б* – после закипания натрия; *в* – после высыхания пленки жидкого натрия; 1 – топливный сердечник; 2 – оболочка; 3 – жидкий натрий; 4 – пленка жидкого натрия; 5 – пары натрия

Нестационарное поле температуры в топливном сердечнике и оболочке твэла математически описывается уравнением теплопроводности

$$\begin{aligned} & c\rho(r, z, T) \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} + R_m \delta(T - T_m) \left] \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} = \right. \\ & = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ \lambda(r, z, T) r \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \lambda(r, z, T) \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial z} \right] + q_v(r, z, t), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $r$  – радиальная координата с центром на оси твэла;  $z$  – высотная координата;  $t$  – время;  $T$  – температура;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $c\rho$  – объемная теплоемкость;  $q_v$  – удельное тепловыделение (единицы объема);  $\delta(T - T_m) = 0$  при  $T \neq T_m$ . На границе раздела фаз температура равна температуре фазового перехода ( $T_m$ ), этим условием определяется текущее положение границы раздела.

Для описания плавления в топливе, характеризующемся распределенным по объему тепловыделением и значительным интервалом температур ликвидуса и солидуса, используется приближение двухфазной зоны. В нем поле температуры в топливном сердечнике твэла описывается обыкновенным уравнением теплопроводности (без члена с  $\delta$ -функцией), а скрытая теплота учитывается в величине объемной теплоемкости по следующей формуле:

$$c\rho_{SL} = R_m / \Delta T_m + [c\rho_S(T_m) + c\rho_L(T_m + \Delta T_m)] / 2, \quad (2)$$

где  $R_m$  – теплота плавления;  $\Delta T_m$  – перепад температуры в двухфазной зоне;  $L, S, SL$  – индексы жидкой и твердой фаз, двухфазной зоны соответственно.

Приведенные уравнения дополняются системой краевых условий на границах расчетных областей – топлива, оболочки, эффективной кольцевой ячейки натриевого теплоносителя, а также начальными условиями.

Передачей тепла вдоль оси твэла можно пренебречь, поскольку большая часть тепла от топлива отводится в радиальном направлении к теплоносителю. В связи с этим используемая версия расчетной модели основывается на одномерном варианте уравнения (1) – без учета второго слагаемого в правой части. В результате расчетов ряда высотных участков определяются времена выпаривания натрия и плавления элементов по всей длине активной части твэла.

Величина коэффициента термической проводимости в зазоре между топливом и оболочкой рассчитывается в данной модели с учетом газовой и лучистой составляющих. Учет лучистой составляющей в термической проводимости зазора обуславливается рассматриваемыми нестационарными температурными режимами. При подъеме температуры вплоть до точки плавления сильно возрастает доля лучистой составляющей теплообмена.

В данной версии модели расчеты напряженно-деформированных состояний твэла не производятся, расчет теплообмена продолжается до полного расплавления оболочки и топлива в рассчитываемом сечении. Такая модель может быть применена для условий аварий с прекращением расхода без повышения мощности реактора при невысоком выгорании топлива. В соответствии с экспериментальными данными механизмом разрушения оболочки твэла (и его разгерметизации) со свежим топливом и облученного твэла, не имеющего значимого перепада давлений на оболочке, является плавление оболочки. Доля расплавленного объема в поперечном сечении перед разрушением сердечника твэла из свежего топлива может составлять до 90 % [8].

Нагрев и выпаривание натрия приближенно рассчитываются при нулевом его расходе в эффективной кольцевой ячейке вокруг твэла. При этом за начальное принимается состояние в момент прекращения расхода в ТВС. Принято, что прекращение расхода наступает мгновенно после блокировки проходного сечения. После выпаривания пленки натрия на поверхности твэла принимается условие лучистого теплообмена. Плотность потока лучистой энергии с осушенной от теплоносителя поверхности отдельного твэла в ТВС, ослабляющегося за счет отражения от поверхностей окружающих твэлов, определяется с учетом расположения рассчитываемого твэла в пучке, плотности упаковки и числа рядов твэлов в сборке.

Система дифференциальных уравнений, описывающая теплообмен в элементах твэла и на границах с учетом плавления, а также в кольцевой ячейке теплоносителя, решена численно и реализована в компьютерной программе TRAMS-TWEL [9]. Данная программа позволяет получить высотные зависимости времен выпаривания натрия, плавления оболочки и топливного сердечника.

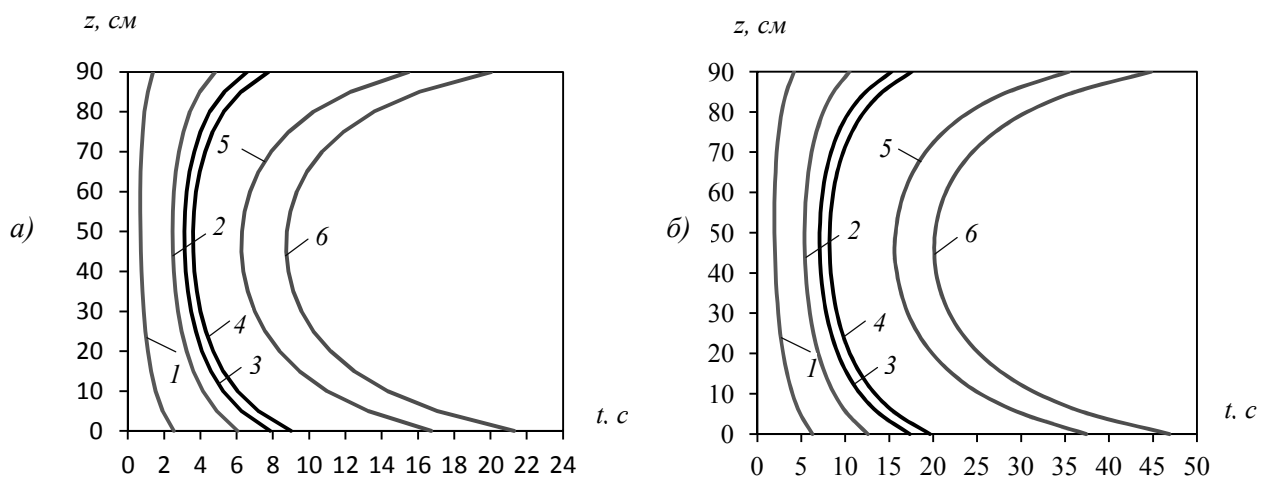
### Результаты исследования

Расчеты аварийного разогрева твэл и расплавления топливного сердечника и стальной оболочки по программе TRAMS-TWEL выполнены при номинальном и пониженных уровнях мощности реактора БН. В данном консервативном анализе примем, что разгерметизация твэлов происходит после расплавления оболочек твэлов на наиболее теплонапряженных участках.

В результате расчетов при номинальной мощности ТВС, равной 4,2 МВт, получено, что температура натрия достигает точки насыщения сначала в центре по высоте активной зоны примерно через 0,7 с после прекращения расхода в ТВС, далее зона кипения расширя-



ется вверх и вниз (рис. 2, а). Расплавление оболочки твэла наступает первоначально в центре через 3,6 с после прекращения расхода.



**Рис. 2. Времена начала (1) и окончания (2) выпаривания натрия, начала (3) и окончания (4) расплавления оболочки, начала (5) и окончания (6) расплавления топливного сердечника по высоте твэл:**

а – при мощности ТВС, равной 4,2 МВт; б – при мощности ТВС, равной 2 МВт

Расчет перемещения расплава оболочки вдоль твэла под действием силы тяжести, сил трения от восходящего потока паров натрия и противодействующих сил трения о твердый топливный сердечник показал, что верхняя граница стальной пленки не достигает верха активной зоны [7]. Следовательно, блокировок каналов для прохода теплоносителя затвердевающим расплавом оболочек в верхней части активной зоны не произойдет. При этом источники запаздывающих нейтронов будут выноситься к выходу из аварийной ТВС непосредственно после разрыва либо расплавления оболочек твэлов. В результате последующего опускного перемещения жидкой стальной пленки происходит полная закупорка проходного сечения в нижней зоне воспроизводства в результате затвердевания расплава.

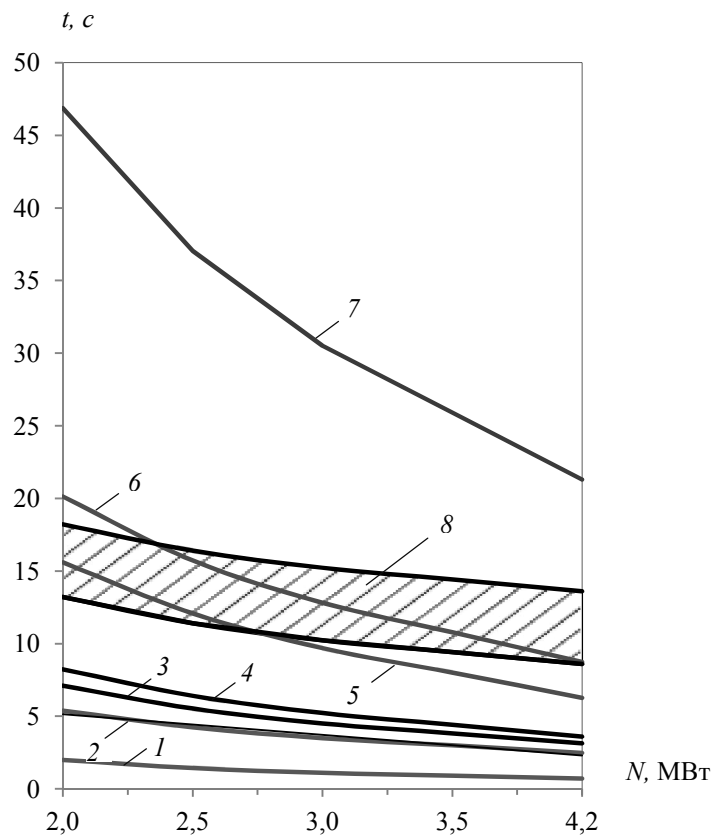
Плавление топливного сердечника в центральной плоскости активной зоны начинается в момент 6,3 с и заканчивается через 8,7 с после прекращения расхода. В момент 21 с топливо расплавляется по всей высоте твэл.

В результате расчетов при пониженной мощности ТВС, в частности при 2 МВт (рис. 2, б), времена выпаривания натрия, плавления оболочки и топливного сердечника увеличиваются. Так, расплавление оболочки твэла в центре при мощности ТВС, равной 2 МВт, наступает только через 8,2 с после прекращения расхода. Однако увеличиваются и времена расплавления топливного сердечника в центральной плоскости активной зоны – в момент 20 с и по всей высоте твэл – в момент 46 с.

После расплавления топлива на наиболее теплонапряженном участке твэл (в области центральной плоскости активной зоны) возможно попадание небольшого количества расплава топлива на стенку чехла аварийной ТВС. Это может привести к проплавлению стенок чехлов аварийной и соседней ТВС. При своевременной остановке реактора и соответствующем снижении тепловыделения в топливе до остаточного радиальное распространение аварии с повреждением стенок чехлов и, возможно, твэлов окружающих ТВС, прекращается.

При облученном топливе источники запаздывающих нейтронов выносятся к выходу из аварийной ТВС непосредственно после разрыва оболочек твэлов, после чего они в потоке теплоносителя беспрепятственно достигнут детектора системы контроля герметичности оболочек твэлов на входе в промежуточный теплообменник реактора. Для срабатывания ава-

рийной защиты за счет такого сигнала в реакторе БН требуется время около 5–10 с [10], необходимое преимущественно для переноса источников запаздывающих нейтронов до детектора системы КГО.



**Рис. 3. Времена начала (1) и окончания (2) выпаривания натрия, начала (3) и окончания (4) расплавления оболочки, начала (5) и окончания (6) расплавления топливного сердечника в центральном сечении активной зоны, полного расплавления топлива (7), время срабатывания аварийной защиты (8) в зависимости от мощности ТВС**

При номинальной мощности ТВС, равной 4,2 МВт, с учетом указанного времени переноса источников запаздывающих нейтронов до детектора время срабатывания АЗ после расплавления оболочек в центральной плоскости активной зоны составит около 8–13 с от момента исходного события аварии. Это произойдет во время расплавления топлива на наиболее теплонапряженном участке твэл либо немного позже (не более, чем на 5 с) (рис. 3). В случае остановки реактора и соответствующего снижения тепловыделения в топливе до остаточного до начала плавления стенки чехла аварийной ТВС при попадании на нее тонкого слоя топлива плавления стенки не произойдет. Топливо будет продолжать разогреваться, но значительно медленнее, под действием только остаточного тепловыделения; по мере его спада плавление прекратится и начнется постепенное остывание. Поскольку минимальное время проплавления стенки чехла аварийной ТВС тонким неподвижным слоем топлива при наихудших предпосылках составит примерно 5 с, плавление стенок в худшем случае ограничится одной стенкой чехла аварийной ТВС либо частью, без повреждения стенки соседнего чехла.

При меньших значениях мощности ТВС превышение верхнего предела времени срабатывания аварийной защиты, равного 10 с, над временем расплавления топлива на наиболее теплонапряженном участке твэл уменьшается (рис. 3), и при мощности ТВС, равной немного более 2 МВт, срабатывание аварийной защиты произойдет ранее расплавления топлива

на теплонапряженном участке либо, возможно, и до начала плавления (если время срабатывания аварийной защиты после выхода источников запаздывающих нейтронов из аварийной ТВС будет составлять только 5 с). Следовательно, протекание рассматриваемой аварии будет более безопасным при пониженных уровнях мощности реактора.

Следует отметить, что срабатывание аварийной защиты будет происходить всегда намного раньше расплавления топлива по всей высоте активной части тепловыделяющего элемента (рис. 3), в случае которого становится возможным попадание большой массы расплавленного топлива на стенку чехла ТВС и соответственно более быстрое проплавление стенки.

В результате облученное топливо будет локализовано пределами одной аварийной ТВС – проектным пределом повреждения твэлов при номинальном уровне мощности реактора, а также и при любом частичном уровне мощности.

### Заключение

Выполнено исследование аварии с блокировкой проходного сечения отдельной тепловыделяющей сборки быстрого реактора с натриевым теплоносителем при номинальном и пониженных уровнях мощности реактора. В результате расчетов получены высотные зависимости времени начала и окончания выпаривания натрия, расплавления оболочки и топливного сердечника. Анализ результатов показал, что проектный предел при данной аварии выполняется. Срабатывание аварийной защиты по сигналу системы контроля герметичности оболочек твэлов ограничит аварию пределами одной аварийной ТВС – проектным пределом повреждения твэлов.

### Библиографический список

1. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций. НП 082 07 // Ядерная и радиационная безопасность. – 2008. – № 1. – С. 52–77.
2. **Kayser, G.** Main SCARABEE Lessons and Most Likely Issue of the Sub-assembly Blockage Accident / G. Kayser, G. Berthoud, K. Schleisiek [et al.] // Sodium Cooled Fast Reactor Safety: Proc. of an International Topical Meeting. – Obninsk, Russia, October 3–7, 1994. – Obninsk, 1994. – V. 2. – P. 2/146–2/155.
3. **Moxon, D.** SCARABEE – an Interpretation of the Pump Trip and Inlet Blockage Series / D. Moxon, J. Papin, P. Obry, P. Soussan // Science and Technology of FAST REACTOR SAFETY: Proc. of an international conference held in Guernsey on 12-16 May 1986. – BNES, London, 1987. – V. 1. – P. 263–268.
4. **Papin, J.** The SCARABEE Total Blockages Test Series: Synthesis of the Interpretation / J. Papin, J. Mac dougall, R. Sesny [et al.] // Proc. of 1990 Int. Fast Reactor Safety Meet., Snowbird, 12-16 August 1990. – ANS, 1990. – V. 1. – P. 367–376.
5. **Schwarz, M.** The SCARABEE PV A Test for Melt Propagation of a Boiling Pool into a Neighbouring Pin Bundle / M. Schwarz, G. Kayser, C. Jamond // Sodium Cooled Fast Reactor Safety: Proc. of an International Topical Meeting. – Obninsk, Russia, October 3–7, 1994. – Obninsk, 1994. – V. 2. – P. 2/102–2/111.
6. **Charpenel, J.** Release of Delayed Neutron Emitters in SCARABEE Experiments / J. Charpenel, G. Kayser, R. Sesny, J.P. Trapp // Sodium Cooled Fast Reactor Safety: Proc. of an International Topical Meeting. – Obninsk, Russia, October 3-7, 1994. – Obninsk, 1994. – V. 2. – P. 2/112-2/121.
7. **Власичев, Г.Н.** Анализ проектной аварии с блокировкой отдельной ТВС реактора на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем / Г.Н. Власичев // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6; URL: <http://www.science-education.ru/120-16588> (дата обращения: 24.12.2014).
8. **Wright, S.A.** In-core Fuel Disruption Experiments Simulating LOF Accidents for Homogeneous and Heterogeneous Core LMFBRs: FD2/4 Series / S.A. Wright, P.K. Mast, G. Schumacher, E.A. Fischer. // Proc. of the LMFBR Safety Topical Meeting, Lyons, 19–23 July 1982. – V. 2. – P. 123–132.
9. Расчет аварийного разогрева и расплавления цилиндрического твэла ядерного реактора (TRAMS–TWEL): программа для ЭВМ № гос. регистрации 2014616006 от 09.06.2014 РФ / Власичев Г.Н.; Бюл. № 7(93) 2014.

10. Швецов, Ю.Е. Расчетный анализ эффективности контроля повреждений твэлов с помощью секторной системы «КГО» // В кн.: Теплогидравлические аспекты безопасности ЯЭУ с реакторами на быстрых нейтронах: Материалы Российской межотрасл. конф. «Теплофизика-2005». Т. 1. Тез. докл. – Обнинск, 16–18 ноября 2005 г. – Обнинск: ГНЦ РФ ФЭИ, 2005. – С. 44–45.

*Дата поступления  
в редакцию 05.04.2018*

**A.V. Andreeva, G.N. Vlasichev**

**ANALYSIS OF THE DESIGN-BASIS ACCIDENT WITH BLOCKAGE  
OF LIQUID METAL FAST REACTOR INDIVIDUAL FUEL ASSEMBLY  
IN VARIOUS OPERATION MODES**

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

**Purpose:** Substantiation of the detecting means effectiveness of accident with blockage of individual fuel assembly and emergency protection of fast reactor.

**Results:** Analysis of the design-basis accident with blockage of Liquid Metal Fast Reactor individual fuel assembly in various reactor power levels is executed. The altitude dependences of the evaporation times of sodium, of the melting times of pin cladding and fuel are received. Analysis showed that design limit under this accident is performed. The emergency protection actuation by fuel failure detection system signal will limited the accident within one damaged fuel assembly by design pins failure limit.

**Application:** The possibility of applying of the scientific study results to develop of technical and organizational measures to prevent, manage and limit of the accidents consequences for current and future fast reactors.

*Key words:* BN reactors safety, design-basis accident, fuel assembly, sodium boiling over, melting of fuel rods

УДК 621.039.586

Г.Н. Власичев, Е.В. Ситникова

**АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕРМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ НАСЫПНОГО СЛОЯ ИЗ ФРАГМЕНТОВ РАЗРУШЕННОЙ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ПРИ ТЯЖЕЛОЙ АВАРИИ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА**

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева

**Цель исследования:** Разработка модели поля температуры в насыпном тепловыделяющем слое из фрагментов разрушенной активной зоны при тяжелой запроектной аварии ядерного реактора.

**Результаты:** Разработана аналитическая математическая модель поля температуры в насыпном тепловыделяющем слое из фрагментов разрушенной активной зоны для адиабатических условий теплообмена с нижележащими конструкциями. Выполнена проверка качества модели. Численное моделирование с помощью разработанной модели теплообмена в насыпных тепловыделяющих слоях в условиях реакторных экспериментов показало, что расчетные результаты в целом соответствуют опытным данным.

**Применение:** Возможность применения созданной модели для анализа безопасности ядерных реакторов при запроектных авариях.

*Ключевые слова:* безопасность атомных станций, запроектные аварии, насыпной тепловыделяющий слой, математическое моделирование.

**Введение**

Для обеспечения безопасности атомных станций необходимо рассмотрение запроектных аварий. При этом возникает необходимость анализа теплоотвода от фрагментов разрушенной активной зоны внутри корпуса реактора на последней стадии аварии, когда тепловыделение в топливе уже соответствует остаточному.

Вопросу изучения условий теплообмена в насыпном тепловыделяющем слое, формирующемся из фрагментов разрушенной активной зоны, посвящены многочисленные экспериментальные и расчетные исследования. Имеются математические модели для расчета полей температуры в тепловыделяющем слое, основанные, как правило, на феноменологической экспериментальной информации, описанной, в частности, в [1]. Одним из важных результатов опытов в серии реакторных экспериментов, проведенных в лаборатории Sandia (США), явилось то, что осушенная зона при отсутствии входящего снизу потока жидкости появляется в нижней части зоны с двухфазным теплоносителем. Обзор программы экспериментов D-серии содержится в статье [2]. Наиболее строгий теоретический подход к описанию теплообмена в насыщенном теплоносителем слое из тепловыделяющих частиц состоит в решении уравнений сохранения для масс, импульсов и энергии. Ввиду сложности математического описания всех составляющих теплообмена в рассматриваемом слое наибольшее распространение для расчета полей температуры в зонах с однофазным теплоносителем получил метод эффективной теплопроводности. Более точными принято считать стационарные модели, поскольку в них могут использоваться проверенные на экспериментальных данных расчетные зависимости для прогнозирования начала осушения в зоне с двухфазным теплоносителем. Температура в зоне с кипящим теплоносителем в таких моделях просто принимается равной температуре насыщения. Для предсказания начала осушения части слоя от жидкого теплоносителя используются эмпирические зависимости либо расчетные модели, основанные на более сложном анализе теплообмена в кипящей зоне, например [3]. Имеется несколько расчетных зависимостей для величины критического теплового потока от двухфазной зоны, при которой наступает осушение. Наиболее полный обзор различных моделей осушения и их сравнительный анализ на предмет соответствия экспериментальным данным представлен в статье [4]. Методом стационарной эффективной теплопроводности рассчиты-

вали температуру в слое с жидким теплоносителем, толщину жидкой зоны при кипении теплоносителя в части слоя, а также толщину осушенной от теплоносителя зоны в работах [5, 6]. Было найдено, что наилучшее соответствие экспериментальным данным дает использование для расчета эффективного коэффициента теплопроводности среды из твердых частиц и жидкого теплоносителя формулы Kampf'a и Karsten'a [7], чем других формул, представленных в обзоре [8]. Модель теплопроводности, в которой асимптотическое поле температуры в зонах с разным фазовым состоянием теплоносителя и топлива, размеры всех зон рассчитываются с помощью явных математических выражений, полученных в результате решений стационарного уравнения теплопроводности при соответствующих граничных условиях, была наиболее развита в работе [9]. Стационарная расчетная модель, также основанная на решении уравнения теплопроводности для всех возникающих в слое зон и дополненная критерием оценки типа кипения (упакованного либо канального) при прогнозировании начала осушения, описывается в работах [10, 11]. Стационарная модель, основанная на численном решении уравнения теплопроводности, описана в работе [12].

Температурное поле и фазовое состояние компонентов внутри слоя фрагментов разрушенной активной зоны представляют интерес в плане оценок степени повышения температуры в нижерасположенных конструкциях (в том числе в поддоне, располагаемом над днищем корпуса реактора) за счет теплового потока от слоя. Весьма высокие значения температуры могут вызвать высокие термические напряжения в конструкции сверх предельных значений, которые снижаются с ростом температуры, что может вызвать разрушение поддона. В случае расплавления части топлива в слое появляется опасность проникновения расплава топлива непосредственно на поддон.

В данной работе приводится описание одномерной математической модели поля температуры в насыпном тепловыделяющем слое. Из дифференциального уравнения теплопроводности с системой граничных условий получены явные аналитические выражения для распределения температуры по высоте слоя и размеров характерных зон с однородным составом (размерами частиц, пористостью) при постоянной плотности тепловыделения в топливе и постоянных (усредненных по температуре каждой зоны) значениях коэффициентов теплопроводности компонентов слоя.

### Математическая модель

Рассматривается насыпной тепловыделяющий слой из равномерно распределенных частиц топлива разрушенной активной зоны, лежащий на горизонтальной плите (либо специальном поддоне) и находящийся в объеме жидкого теплоносителя. Теплоноситель находится и внутри слоя, заполняя промежутки между частицами, а также под плитой. Условия теплообмена с нижележащими конструкциями приняты адиабатическими, что соответствует наилучшим условиям аварии. Высота слоя намного меньше горизонтальных размеров, что позволяет в данном рассмотрении пренебречь теплоотводом в горизонтальном направлении, т.е. считать слой одномерным. Примем, что слой по своим нейтронно-физическим характеристикам образует подкритическую конфигурацию и поэтому плотность тепловыделения в нем соответствует уровню остаточного тепловыделения. Мощность остаточных тепловыделений в топливных частицах зависит от времени, прошедшего после потери критичности активной зоны.

Экспериментальные исследования показывают, что основной тепловой поток от пористого насыпного тепловыделяющего слоя направлен вверх к теплоносителю, покрывающему осколки [1]. В тонком слое тепло передается за счет теплопроводности и конвекции. Если толщина и/или плотность тепловыделения достаточно велики, температура теплоносителя, находящегося в непосредственном контакте с топливными частицами, достигнет точки кипения в части слоя. При этом пузырьки паров будут выноситься из зоны кипения. При недостаточно эффективном охлаждении топливных фрагментов может наступить осушение

части слоя. Осушение происходит по причине наступления кризиса теплоотдачи, когда скорость генерации паров теплоносителя становится выше, чем скорость притока жидкости в кипящий слой. Одним из важных результатов опытов, например, в D-серии реакторных экспериментов, проведенных в лаборатории Sandia (США), явилось то, что зона осушения от теплоносителя при отсутствии входящего снизу потока жидкости появляется в нижней части зоны с двухфазным (кипящим) теплоносителем. Может наступить расплавление части слоя в осушенной зоне, в которой температура топлива может, в свою очередь, достичь точки кипения. Из-за уплотнения топлива в зоне его плавления происходит оседание слоя за счет исчезновения исходной пористой структуры.

Расчетные схемы насыпного тепловыделяющего слоя при разных характерных состояниях, отличающихся между собой агрегатным состоянием компонентов по его высоте и определяющихся плотностью тепловыделения в топливных частях, толщиной слоя, температурой окружающего теплоносителя и рядом других факторов, показаны на рис. 1. При адиабатических условиях на нижней поверхности слоя зона с кипящим теплоносителем будет простирается до низа слоя.

Поле температуры в тепловыделяющей пористой среде с жидким теплоносителем описывается в принятой одномерной формулировке следующим стационарным уравнением теплопроводности:

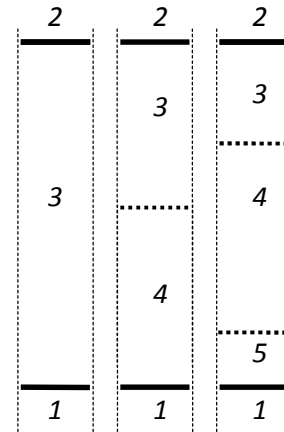
$$\frac{\partial}{\partial z} \left[ \lambda_{\text{эф}} \frac{\partial T(z)}{\partial z} \right] + q_v = 0, \quad (1)$$

где  $z$  – координата (начало координаты – внизу слоя);  $T$  – температура;  $\lambda_{\text{эф}}$  – эффективный коэффициент теплопроводности среды;  $q_v$  – плотность тепловыделения единицы объема среды. В данном уравнении  $q_v = (1-\varepsilon)\eta\rho_T q_T$ , где  $\varepsilon$  – пористость среды (объемная доля пространства между твердыми частицами);  $\eta$  – объемная доля топливных частиц;  $\rho_T$  – плотность топлива;  $q_T$  – плотность тепловыделения топлива (единицы массы).

Для вычисления эффективных коэффициентов теплопроводности среды из твердых частиц и жидкого теплоносителя существует ряд формул: для параллельной и последовательной проводимости, формула Maxwell'a, формула Lichtenecker'a [8]. Наилучшее соответствие экспериментальным данным дает использование формулы Kampf'a и Karsten'a [7]:

$$\lambda_{\text{эф}0} = \lambda_c \left\{ 1 - \varepsilon_d^{2/3} \left[ 1 - \frac{1}{1 + \varepsilon_d^{1/3} (\lambda_c / \lambda_d - 1)} \right] \right\}, \quad (2)$$

где  $\lambda_c$  – коэффициент теплопроводности сплошной среды;  $\lambda_d$  – коэффициент теплопроводности несплошной среды;  $\varepsilon_d$  – объемная доля несплошной среды. Для зон с жидким теплоносителем  $\lambda_c = \lambda_{\text{Na}}$ ,  $\lambda_d = \lambda_T$ ,  $\varepsilon_d = 1 - \varepsilon$ , где  $\lambda_{\text{Na}}$  – коэффициент теплопроводности теплоносителя;  $\lambda_T$  – коэффициент теплопроводности топлива. Поскольку  $\lambda_T$  и  $\lambda_{\text{Na}}$  зависят от температуры, их зна-



**Рис. 1. Характерные состояния насыпного тепловыделяющего слоя при отсутствии теплоотвода к нижележащей поверхности:**

1 – плита; 2 – жидкий теплоноситель над слоем; 3 – зона слоя с жидким теплоносителем; 4 – зона с кипящим теплоносителем; 5 – осушенная зона

чения принимаются при температуре, равной средней температуре в слое либо в зоне с жидким теплоносителем соответственно:

$$\bar{T} = (T^{\min} + T^{\max})/2 \quad \text{при } T^{\max} < T_s; \quad \bar{T} = (T^{\min} + T_s)/2 \quad \text{при } T^{\max} > T_s,$$

где  $T_s$  – температура насыщения теплоносителя.

Вклад естественной конвекции в теплообмен в насыпном слое учитывается в величине эффективного коэффициента теплопроводности. Соответствующая поправка, выражаемая числом Нуссельта (Nu), на которое умножается  $\lambda_{\text{эф0}}$ , связывается с внутренним числом Рэлея (Ra) эмпирической формулой [6], соответствующей данным экспериментов D2 и D3 с натриевым теплоносителем:

$$\text{Nu} = (\text{Ra}/0,76)^{0,34}, \quad (3)$$

$$\text{где } \text{Ra} = \frac{\lambda_{\text{Na}} g \rho_{\text{Na}} \beta_{\text{Na}} P q_v H_b^3}{2 \lambda_{\text{эф0}}^2 a_{\text{Na}} \mu_{\text{Na}}}; \quad P = \frac{d_T^2}{150} \frac{\varepsilon^3}{(1 - \varepsilon)^2};$$

$g$  – гравитационное ускорение;  $\rho_{\text{Na}}$  – плотность жидкого теплоносителя;  $\beta_{\text{Na}}$  – термический коэффициент объемного расширения теплоносителя;  $P$  – проницаемость пористой среды;  $H_b$  – толщина насыпного слоя;  $a_{\text{Na}}$  – коэффициент температуропроводности теплоносителя;  $\mu_{\text{Na}}$  – коэффициент динамической вязкости теплоносителя;  $d_T$  – диаметр частиц топлива. Термический коэффициент объемного расширения теплоносителя можно рассчитать по данным зависимости плотности от температуры ( $\beta = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t}$ ). Критическое число Рэлея, определяемое как число, с которого начинается конвекция ( $\text{Nu} > 1$ ), равно 0,76.

Эффективный коэффициент теплопроводности с учетом конвекции

$$\lambda_{\text{эф}} = \lambda_{\text{эф0}} \text{Nu}. \quad (4)$$

Уравнение (1) дополняется системой граничных условий (ГУ).

На нижней границе слоя принимается адиабатическое условие (ГУ второго рода):

$$-\lambda_{\text{эф}} \left. \frac{\partial T(z)}{\partial z} \right|_{z=0+} = 0; \quad (5)$$

На верхней границе слоя принимаются ГУ третьего рода:

$$-\lambda_{\text{эф}} \left. \frac{\partial T(z)}{\partial z} \right|_{z=H_b-} = \alpha_2 (T_{b2} - T_2), \quad (6)$$

где  $\alpha_2$  – коэффициент теплоотдачи к теплоносителю над слоем;  $T_{b2}$  – температура верха слоя;  $T_2$  – температура теплоносителя над слоем.

Теплоотдача от верха слоя к вышележащему объему теплоносителя (натрия) определяется соотношением [13]

$$\text{Nu}_2 = 0,0785 \text{Ra}_2^{0,32}, \quad (7)$$

$$\text{где } \text{Ra}_2 = \frac{c_{\text{Na}} g \rho_{\text{Na}}^2 \beta_{\text{Na}} D_b^3 \Delta T_2}{\lambda_{\text{Na}} \mu_{\text{Na}}}; \quad \Delta T_2 = T_{b2} - T_2; \quad \text{Nu}_2 = \alpha_2 D_b / \lambda_{\text{Na}}.$$

$c_{\text{Na}}$  – удельная теплоемкость теплоносителя;  $D_b$  – диаметр насыпного слоя;



Решение уравнения (1) при постоянном  $\lambda_{\text{эф}}$  с условиями (5) и (6) дает аналитическое выражение для расчета распределения температуры по высоте слоя:

$$T(z) = T_{b2} + \frac{\alpha_2 (T_{b2} - T_2)}{\lambda_{\text{эф}}} (H_b - z) - \frac{q_v}{2\lambda_{\text{эф}}} (H_b - z)^2. \quad (8)$$

Для стационарной задачи справедливо следующее соотношение баланса на верхней границе слоя:

$$q_v H_b = \alpha_2 (T_{b2} - T_2), \quad (9)$$

из которого получим формулу для температуры на верхней границе слоя:

$$T_{b2} = T_2 + \frac{q_v H_b}{\alpha_2}. \quad (10)$$

Поскольку  $\alpha_2$  и  $\lambda_{\text{эф}}$  зависят от температуры (определяются зависимостями (7) и (2) соответственно), распределение температуры по высоте слоя находится в результате нескольких итераций. На первой итерации принимается начальное значения  $\alpha_2$ , равное  $\lambda_{\text{Na}}/\delta_{\text{Na}}$ , где  $\delta_{\text{Na}}$  – толщина подслоя теплоносителя, задаваемая из физических соображений. При вычислении начального значения  $\lambda_{\text{эф}}$  значение  $T^{\text{min}}$  рассчитывается по формуле (10), а  $T^{\text{max}}$  принимается равным  $T^{\text{min}}$ . В каждой из последующих итераций рассчитываются уточненные значения  $T^{\text{min}}$  по формулам (10) и  $T^{\text{max}}$  по формуле (8) при  $z=0$ .

В результате, после уточнения  $\alpha_2$  и  $\lambda_{\text{эф}}$  находится распределение температуры по высоте слоя по формуле (8) с учетом (10).

Если значения температуры в слое превышают температуру кипения теплоносителя  $T_s$ , выполняется следующий этап расчетов: определяется координата верхней границы зоны с двухфазным (кипящим) теплоносителем и уточняется распределение температуры.

Для описания поля температуры в расположенной в верхней части слоя зоне с жидким теплоносителем используется уравнение (1). В зоне с кипящим теплоносителем расчет значений температуры не производится, она просто принимается равной температуре насыщения во всей данной зоне.

Система граничных условий (5) и (6) дополняется условиями на фазовой границе (стационарной) зоны с жидким теплоносителем с кипящей зоной, на которой принимается ГУ теплообмена второго рода. При этом на границе жидкой зоны с кипящей – плотность теплового потока  $q_{\text{скип}}$ , равная суммарному тепловыделению зоны кипения теплоносителя в объеме столбика под единичной поверхностью данной границы. Соответственно ГУ записывается в виде:

$$-\lambda_{\text{эф}} \left. \frac{\partial T(z)}{\partial z} \right|_{z=(H_b - h_{\text{Na}2})_+} = q_{\text{скип}}; \quad (11)$$

$$T(z = H_b - h_{\text{Na}2}) = T_s, \quad (12)$$

где  $h_{\text{Na}2}$  – толщина зоны с жидким теплоносителем;  $q_{\text{скип}} = q_v h_{\text{кип}}$ ;  $h_{\text{кип}}$  – толщина зоны с кипящим теплоносителем.

На основании выражения (8) с учетом (10), соотношения баланса (9) и условия (12) получены формула для размера зоны с жидким теплоносителем:

$$h_{Na2} = \frac{q_{s2}}{q_v} - \left[ \left( \frac{q_{s2}}{q_v} \right)^2 - \frac{2\lambda_{эф}}{q_v} \left( T_s - T_2 - \frac{q_{s2}}{\alpha_2} \right) \right]^{1/2}, \quad (13)$$

где  $q_{s2} = q_v H_b$  – плотность теплового потока к теплоносителю над слоем.

Если в верхней зоне  $Ra > 0,76$ , где  $Ra = \frac{\lambda_{Na} g \rho_{Na} \beta_{Na} P q_v h_{Na2}^3}{2\lambda_{эф0}^2 a_{Na} \mu_{Na}}$ , то  $\lambda_{эф} = \lambda_{эф0} Nu$ , где

значения  $Nu$  рассчитываются по формуле (3). При вычислении  $\lambda_{эф}$  в зоне с жидким теплоносителем значения  $\lambda_{т}$  и  $\lambda_{Na}$  принимаются при температуре, равной средней температуре в зоне  $-\bar{T} = (T^{\min} + T_s)/2$ .

Толщина зоны с кипящим теплоносителем

$$h_{кип} = H_b - h_{Na2}. \quad (14)$$

Размер зоны с жидким теплоносителем находится в результате итераций, поскольку  $\alpha_2$  и  $\lambda_{эф}$  зависят от температуры. На первой итерации принимаются начальные значения  $\alpha_2$  и  $\lambda_{эф}$ , рассчитанные на предыдущем этапе (до учета кипящей зоны).

После определения  $h_{Na2}$  находится распределение температуры по высоте зоны с жидким теплоносителем по формуле (8) с учетом (10).

Если плотность теплового потока от кипящей зоны превышает некоторую критическую величину, внутри кипящей зоны насыпного слоя появляется осушенная от жидкого теплоносителя зона.

В используемой модели критическая плотность теплового потока при диаметре топливных частиц  $d_t < 1$  мм определяется по формуле [3]

$$q_{кр} = q_0 (1 + L_c/H), \quad (15)$$

$$\text{где } q_0 = \frac{(\rho_{Na} - \rho_{vNa})g P R_{кип}^{Na}}{\frac{v_{vNa}}{1 - 1,1s} - \frac{v_{Na}}{s^3}}; \quad L_c = \frac{\sigma_{Na} (\varepsilon/P)^{1/2}}{\sqrt{5}(\rho_{Na} - \rho_{vNa})g};$$

$$s = \left[ 0,833 \frac{v_{Na}}{v_{vNa}} + \left( 2,7 \frac{v_{Na}}{v_{vNa}} \right)^{1/2} \right]^{1/2} - \left( 0,833 \frac{v_{Na}}{v_{vNa}} \right)^{1/2}; \quad P = \frac{d_t^2}{180} \frac{\varepsilon^3}{(1 - \varepsilon)^2}; \quad H = h_{кип};$$

$\rho_{vNa}$  – плотность паров теплоносителя;  $v_{Na}$  – коэффициент кинематической вязкости теплоносителя;  $v_{vNa}$  – коэффициент кинематической вязкости паров теплоносителя;  $R_{кип}^{Na}$  – скрытая теплота парообразования теплоносителя;  $\sigma_{Na}$  – поверхностное натяжение теплоносителя.

В осушенной зоне из-за значительного уменьшения теплопроводности сильно возрастает температура внутри ее объема и может превысить температуру плавления топлива, что создает возможность плавления материала по насыпным слоям.

### Результаты верификации модели

Процедура проверки качества программы, в которой реализована математическая модель, называется верификацией программы. На этапе верификации проверяется отсутствие ошибок в программе, сравнение результатов численных расчетов программы с результатами решения задач, поддающихся аналитическому решению, или сравнение с результатами дру-

гих программ. Также определяется степень применимости программы для моделирования физических явлений в моделируемом объекте путем сравнения результатов с данными экспериментов на физических стендах и экспериментов на реальных объектах.

Для проверки физической точности расчетной модели использованы опубликованные в [6, 14] результаты экспериментов серии D, выполненных в лаборатории Sandia в реакторных условиях. В рамках данной серии были выполнены, в частности, эксперименты D1 и D2 [14]. В этих экспериментах насыпной слой располагался на дне внутреннего сосуда (тигля) диаметром 102 мм, который теплоизолирован по сторонам и снизу. Бассейн натрия покрывал слой. Его объем охлаждался по бокам гелием, который циркулирует между внутренним и наружным сосудами. Система охлаждения способна поддерживать температуру объема натрия в пределах отклонений на несколько градусов от требуемого значения. Слой частиц из диоксида урана диаметром 0,1 - 1 мм в объеме жидкого натрия нагревался за счет энергии деления, тигель располагался в центральной полости реактора ACRR. Мощность нагрева слоя определялась из расчетов теплового баланса гелиевого потока и нейтронных расчетов.

Высота насыпного слоя в эксперименте D1 составляла 58 мм, в эксперименте D2 – 106 мм. Средний эффективный диаметр частиц в эксперименте D1 составлял 0,35 мм, в эксперименте D2 – 0,27 мм. Объемная доля натрия в слое в эксперименте D1 составляла 0,48, в эксперименте D2 – 0,43. Температура внутри слоя измерялась термопарами, располагающимися на дне слоя и в середине по его высоте (рис. 2). Высота расположения от дна слоя термопар M1 и M2 в эксперименте D1 составляла 33 мм, в эксперименте D2 – 65 мм. Для численного моделирования экспериментов D1 и D2 выбраны циклы нагрева при значениях недогрева натрия до точки насыщения, равных соответственно 500 и 463 градусов (характерных для условий с достаточным запасом теплоносителя внутри реакторного корпуса при тяжелой запроектной аварии с расплавлением активной зоны в быстром реакторе). При таких недогревах насыпной слой в соответствии с экспериментальными данными серии D при кипении должен быть в состоянии так называемого упакованного кипения. При этом для определения величины критической плотности теплового потока от кипящей зоны будет справедлива формула (15).

В эксперименте D1 точка кипения в слое не была достигнута. При вычислении эффективных коэффициентов теплопроводности в узлах расчетной сетки по формуле (2) в соответствии со значениями температуры в этих точках с поправкой на конвекцию, появляющуюся с ростом тепловыделения в слое, расчетные значения перепада температуры между точками расположения термопар на дне слоя и на высоте 33 мм хорошо совпадают с экспериментальными (рис. 3).

В эксперименте D2 при плотности тепловыделения около 0,5 Вт/г было отмечено закипание теплоносителя на основании показаний всех трех термопар на дне слоя. Температура же верхней части оставалась ниже температуры насыщения. При  $q_T = 0,76$  Вт/г было отмечено осушение низа слоя. Получено хорошее совпадение расчетных значений температуры с

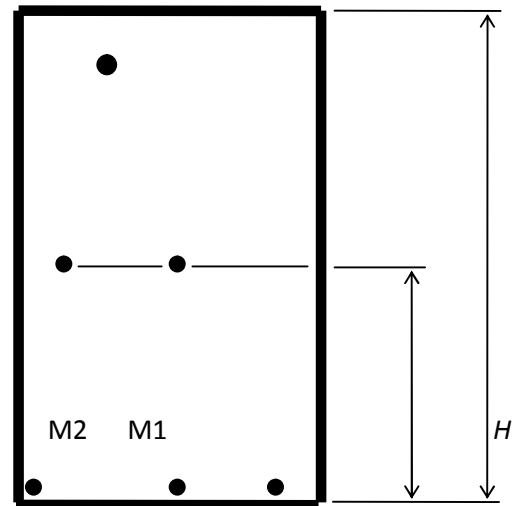
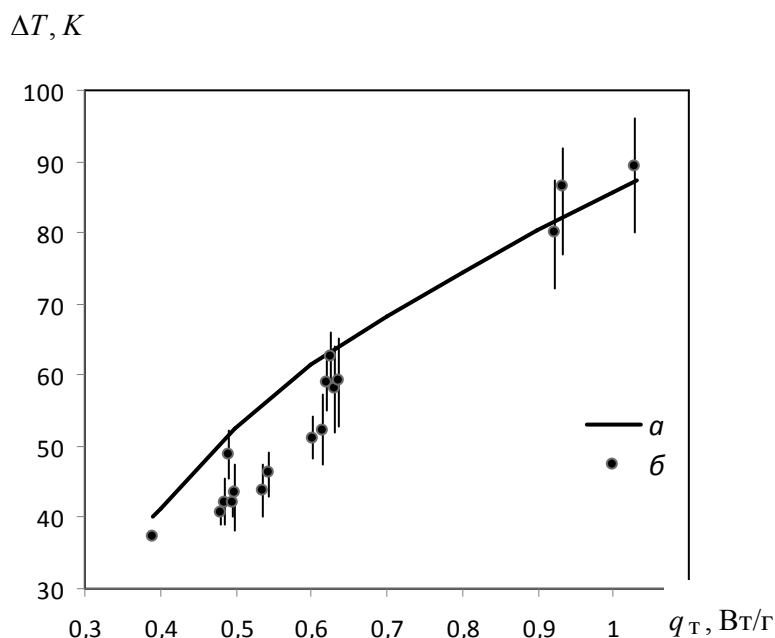
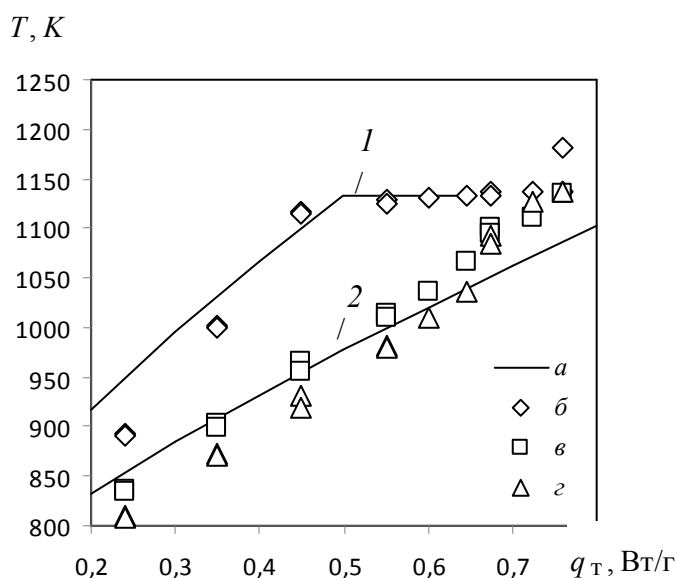


Рис. 2. Схема расположения термопар в насыпном слое внутри тигля в экспериментах D1 и D2, – термопара: V1, V2 и V3 – на дне насыпного слоя; M1 и M2 – примерно в середине по высоте слоя; H – высота насыпного слоя; x – высота расположения от дна слоя термопар M1 и M2

экспериментальными на высоте 65 мм от низа насыпного слоя (рис. 4). Расчетные максимальные значения температуры на дне слоя также хорошо совпадают с экспериментальными данными до плотности тепловыделения в топливных частицах  $q_T = 0,65$  Вт/г, при котором расчетная плотность теплового потока от зоны кипения теплоносителя достигает рассчитанного критического значения, т.е. до начала прогнозируемого осушения части слоя от теплоносителя.



**Рис. 3. Перепад температуры между точками расположения термопар на дне слоя и на высоте 33 мм в условиях эксперимента D1 в зависимости от плотности тепловыделения в топливных частицах:**  
*а* - расчетные значения; *б* - по показаниям термопар



**Рис. 4. Температура в слое в условиях эксперимента D2 в зависимости от плотности тепловыделения в топливных частицах:**  
*а* - расчетные значения; *1* - максимальная температура; *2* - температура на высоте 65 мм;  
*б, в, г* - показания термопар на дне слоя, на высоте 65 мм от дна (в центре) и на той же высоте (но на периферии) соответственно

Таким образом, численное моделирование с помощью разработанной модели теплообмена в насыпных тепловыделяющих слоях в условиях реакторных экспериментов показало, что расчетные результаты в целом соответствуют опытным данным. Достаточно хорошее совпадение расчетных значений температуры с экспериментальными достигается до начала прогнозируемого осушения.

### Заключение

Разработана аналитическая математическая модель поля температуры в насыпном тепловыделяющем слое из фрагментов разрушенной активной зоны при тяжелой запроектной аварии ядерного реактора для адиабатических условий теплообмена с нижележащими конструкциями. Выполнена проверка качества модели. Численное моделирование с помощью разработанной модели теплообмена в насыпных тепловыделяющих слоях в условиях реакторных экспериментов показало, что расчетные результаты в целом соответствуют опытным данным.

### Библиографический список

1. **Уолтер, А.** Реакторы-размножители на быстрых нейтронах: [пер. с англ.] / А. Уолтер, А. Рейнольдс. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 624 с.
2. **Mitchell, G.W.** Experimental Studies of Heat Removal from Fission-Heated UO<sub>2</sub> Debris in Sodium / G.W. Mitchell, J.B. Rivard, J.T. Hitchcock [et al.] // Science and Technology of FAST REACTOR SAFETY: Proc. of an international conference held in Guernsey on 12–16 May 1986. – BNES, London, 1987. – V. 2. – P. 253–257.
3. **Lipinski, R.J.** A Particle-Bed Dryout Model with Upward and Downward Boiling // Transactions of the ANS. – 1980. – V. 35. – P. 358–360.
4. **Lipinski, R.J.** A Review of Debris Coolability Models / R.J. Lipinski // Proc. of an International Meeting on Light Water Reactor Severe Accident Evaluation, Cambridge, Mass., Aug. 28 – Sept. 1, 1983. – V. 2. – P. 18.2/1–18.2/7.
5. **Schwarz, M.** Particle-Bed Heat Removal with Subcooled Sodium: D4 Analysis / M. Schwarz, J.E. Gronager, R.J. Lipinski // Transactions of the ANS. – 1980. – V. 35. – P. 357–358.
6. **Lipinski, R.J.** Particle Bed Heat Removal with Subcooled Sodium: D4 Results and Analysis / R.J. Lipinski, J.E. Gronager, M. Schwarz // Nuclear Technology. – 1982. – V. 58. – № 3. – P. 369–378.
7. **Kampf, H.** Effects of Different Types of Void Volumes on the Radial Temperature Distribution of Fuel Pins / H. Kampf, G. Karsten // Nuclear Applications and Technology. – 1970. – V. 9. – № 3. – P. 288–300.
8. **Godbee, H.W.** Thermal Conductivities of MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and ZrO<sub>2</sub> Powders to 850 °C. II. Theoretical / H.W. Godbee, W.T. Ziegler // Journal of Applied Physics. – 1966. – V. 37. – № 1. – P. 56–65.
9. **Nijsing, R.** A One-dimensional Computation Method for Predicting the Asymptotic Heat Transfer Behaviour of Sodium-Saturated Fuel Particle Beds with Top and Bottom Cooling / R. Nijsing, D. Schwalm // Nuclear Engineering and Design. – 1981. – V. 66. – P. 151–170.
10. **Букша, Ю.К.** Проблемы теплоотвода от фрагментов разрушенной активной зоны быстрого реактора / Ю.К. Букша, Е.Е. Мариненко, Ю.А. Лебедев // Доклад на семинаре по безопасности реакторов на быстрых нейтронах. СНГ – Европейское Сообщество. г. Обнинск – г. Актау, 24–29 февраля 1992. – 20 с.
11. **Buksha, Yu.K.** Analysis of Coolability of Fast Reactor Core Debris / Yu.K. Buksha, E.E. Marinenko // Sodium Cooled Fast Reactor Safety: Proc. of an International Topical Meeting. – Obninsk, Russia, October 3–7, 1994. – Obninsk, 1994. – V. 2. – P. 2/4–2/13.
12. **Власичев, Г.Н.** Методика расчета температурного состояния насыпного слоя из фрагментов разрушенной активной зоны / Г.Н. Власичев // Инженерно-физический журнал (Минск). – 1996. – Т. 69. – № 2. – С. 243–254.

13. **McDonald, J.S.** Investigation of Natural Convection Heat Transfer in Liquid Sodium / J.S. McDonald, T.J. Connolly // Nuclear Science and Engineering. – 1960. – V. 8. – №. 5. – P. 369–377.
14. **Rivard, J.B.** In-reactor Experiments on the Cooling of Fast Reactor Debris // Nuclear Technology. – 1979. – V. 46. – №. 2. – P. 344–349.

*Дата поступления  
в редакцию 05.04.2018*

**G.N. Vlasichev, E.V. Sitnikova**

**ANALYTICAL MODEL OF THE THERMAL STATE OF THE BULK LAYER FROM  
FRAGMENTS OF THE DESTROYED CORE IN THE EVENT OF A SEVERE NUCLEAR  
REACTOR ACCIDENT**

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

**Purpose:** Development of a model of the temperature field in a bulk heat-releasing layer from fragments of the destroyed core in the case of a severe beyond design-basis accident of a nuclear reactor.

**Results:** An analytical mathematical model of the temperature field in a bulk heat-releasing layer from fragments of the destroyed core for adiabatic heat exchange conditions with underlying structures is developed. The quality of the model is checked. Numerical simulation with the help of the developed model of heat exchange in bulk fuel layers under the conditions of reactor experiments has shown that the calculated results as a whole correspond to the experimental data.

**Application:** The possibility of using the created model for the analysis of the safety of nuclear reactors in beyond-design-basis accidents.

*Key words:* safety of nuclear power plants, beyond design basis accidents, bulk fueling layer, mathematical modeling.

УДК 621.311.1

Б.А. Гордеев<sup>1,2</sup>, С.Н. Охулков<sup>1,2</sup>, Д.Ю. Титов<sup>2</sup>, А.С. Плехов<sup>2</sup>**СТАБИЛИЗАЦИЯ РАБОТЫ МАГНИТОУПРАВЛЯЕМЫХ ДЕМПФЕРОВ  
УДАРНЫХ НАГРУЗОК КОНТУРНОЙ ТЕПЛОВОЙ ТРУБОЙ**Институт проблем машиностроения Российской академии наук<sup>1</sup>,  
Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева<sup>2</sup>

Рассмотрены некоторые подходы к проектированию магнитореологических трансформаторов (МРТ) демпферов ударных нагрузок. В частности, выяснено влияние температуры на стабильность работы демпфера при длительной его эксплуатации. Рассмотрены способы и предложены средства стабилизации температуры МР-демпера для обеспечения эффективного управления им.

*Ключевые слова:* магнитореологический трансформатор, гидроопора, МР-демпер, стабилизация температуры, контурная тепловая труба.

Интенсивное развитие в машиностроении электротехнических комплексов и других видов техники требует разработки, создания и внедрения активных средств их виброзащиты – управляемых демпферов с МРТ, оснащенных высокоэффективными и компактными системами термостабилизации. В процессе работы магнитоуправляемых демпферов ударных нагрузок и широкополосной вибрации ввиду интенсивного поглощения механической энергии происходит нагрев рабочей магнитореологической жидкости (МРЖ) и, как следствие, снижение эффективности работы МР-демпера. Для решения задачи стабилизации работы демпферов при изменении температуры рассматриваются способы передачи поглощенной энергии на другие объекты посредством контурных тепловых труб (КТТ), которые являются эффективными и надежными элементами систем обеспечения тепловых режимов термостатируемых объектов. В статье рассмотрено применение в МР-демперах ударных нагрузок контурных тепловых трубок, широко используемых в различных технических устройствах [11-15].

**Модель МР-демпера ударных нагрузок с цилиндрическим МРТ**

При создании новых гидравлических виброопор с МРТ, предназначенных для гашения ударных нагрузок и рассчитанных на работу в определенном частотном диапазоне, необходимо учитывать изменение физических свойств рабочей МРЖ при работе гидроопоры с МРТ ввиду проявления магнитореологического эффекта с одной стороны и термодинамических явлений с другой [1, 4, 5, 7].

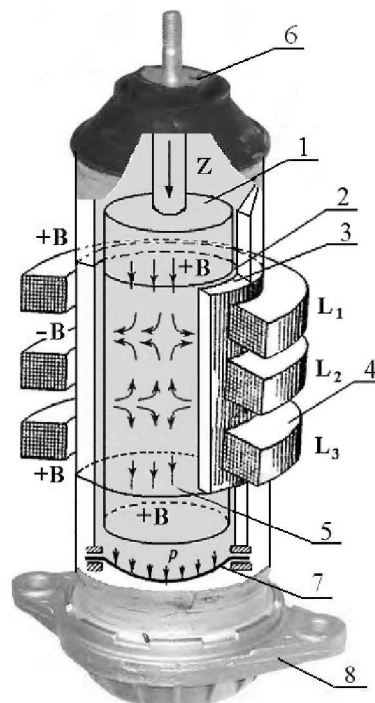
На рис. 1 представлена физическая модель (МР-демпера) с коаксиальным каналом с МРЖ и электромагнитной системой из трёх соленоидов [4].

В МР-демпере цилиндрический зазор 2, заполненный МРЖ, образован внутренней и внешней цилиндрическими рабочими поверхностями основной диамагнитной камеры 3 и ферромагнитного штока-поршня 1. На внешнюю поверхность основной диамагнитной камеры 3 устанавливаются соленоиды, которые создают продольные встречные магнитные поля. Цилиндрический зазор пронизывается переменным ортогональным магнитным полем.

Замедление и ускорение штока-поршня при работе МРТ определяются возникающей пондеomotorной силой Лоренца,  $F_L = q \cdot v \times B$ , где:  $v$  [м/с] – скорость штока-поршня в цилиндрическом зазоре;  $B$  [Тл] – магнитная индукция;  $q$  – заряд ионизированных ферромагнитных частиц МРЖ.

В области одноименных полюсов соленоидов встречные электромагнитные поля  $+B$  и  $-B$

противодействуют друг другу и могут прекращать дросселирование МРЖ в цилиндрическом зазоре. Результирующее магнитное поле встречных электромагнитных полей в области одноименных полюсов становится неоднородным и ортогональным, и его силовые линии в цилиндрическом зазоре с МРЖ направлены по нормали к направлению движения штока.



**Рис. 1. Физическая модель МР-демпфера с цилиндрическим МРТ и электромагнитной системой из трёх соленоидов:**

1 – ферромагнитный шток-поршень; 2 – коаксиальный цилиндрический зазор с МРЖ; 3 – цилиндрический корпус; 4 – соленоид; 5 – МРЖ; 6 – обечайка; 7 – эластичная мембрана; 8 – основание МР-демпфера [4]

Построение гидропор по физической модели МРТ с коаксиальным зазором и электромагнитной системой из трёх соленоидов позволяет осуществлять замедление и ускорение ферромагнитного штока-поршня в коаксиальном цилиндрическом канале за счёт магнито-реологического эффекта в МРЖ [4].

### Гидродинамика МРЖ в коаксиальном зазоре МР-демпфера

Рабочим органом в МР-демпфере является шток-поршень, который перемещается в цилиндрическом коаксиальном зазоре с МРЖ под действием разности давлений  $\Delta p = |P_1 - P_0|$ , создаваемой общей массой нагрузки  $m$ .

Поскольку длина хода штока-поршня  $\Delta l$  и внутреннее сечение цилиндрического корпуса МР-демпфера  $S_{\Pi}$  известны, то объем МРЖ, вытесняемый за один ход поршня  $V = S_{\Pi} \cdot \Delta l$ . Если за время  $\tau$  шток-поршень делает  $n$  ходов, то полный измеренный объем составит  $V = S_{\Pi} \cdot \Delta l \cdot n$ . Однако этот показатель нуждается в дополнении [9, 10]. Некоторое количество рабочей жидкости  $V_3$  будет утекать из-за зазоров между штоком-поршнем и внутренней концентрической поверхностью рабочей камеры МР-демпфера. Таким образом, фактическое количество жидкости  $V_{\text{д}}$ , вытекшее из зазора, будет:

$$V_{\text{д}} = n \cdot S_{\Pi} \cdot \Delta l + V_3. \quad (1)$$

Течение жидкости в узких цилиндрических коаксиальных зазорах представляет прак-



тический интерес при решении задач по гашению вибрации посредством МР-демпферов. В них гашение механических колебаний возможно тогда, когда коаксиальный зазор составляет порядка 100-150 микрон.

Работа МРЖ при гашении вибрации в МР-демпфере основана на физических свойствах реальных (вязких) жидкостей оказывать сопротивление течению. Математически величина искомого сопротивления ньютоновской жидкости определяется зависимостью Ньютона [9,10], согласно которой касательное напряжение между двумя слоями ламинарного потока пропорционально градиенту скорости  $dv/dt$  вдоль нормали к оси потока.

Установлено, что течение рабочей жидкости в узких коаксиальных цилиндрических зазорах подчиняется общим законам гидравлики. Критическое число Рейнольдса, при превышении которого нарушается ламинарность потока, обычно соответствует  $Re = v \cdot s / \zeta$ , где  $s$  – величина щели;  $v$ ,  $\zeta$  – скорость течения и коэффициент кинематической вязкости рабочей жидкости соответственно.

Ширина коаксиального цилиндрического зазора  $s$  в МР-демпфере не должна превышать 100-150 микрон, и поток МРЖ для распространенных условий работы (давлений и вязкостей жидкостей) носит обычно ламинарный характер. Исключением могут выступать гидропоры, работающие в условиях высоких температур и давлений ( $> 200$  кг/см<sup>2</sup>).

Течение МРЖ в МР-демпфере происходит под действием перепада давления  $\Delta p = |P_1 - P_0|$  между двумя параллельными кольцевыми поверхностями. При этом предполагается, что одна из них неподвижна, а вторая перемещается относительно первой со скоростью  $v$  (рис. 1). Кинематическая вязкость МРЖ в коаксиальном цилиндрическом зазоре принимается постоянной. В действительности же вязкость рабочей жидкости зависит от меняющихся во времени температуры и давления, что особенно явно выражено по мере движения жидкости [9, 10].

Поскольку изменения кинематической вязкости рабочей жидкости в зазоре носят нелинейный характер, то при практических расчетах используют среднее значение кинематической вязкости

$$\zeta_{cp} = \frac{\zeta_1 + \zeta_2}{2}, \quad (2)$$

где  $\zeta_1$  и  $\zeta_2$  – кинематическая вязкость входящей и выходящей из зазора жидкости при фактических температурах и давлениях.

Рассеиваемая при этом мощность эквивалентна работе, затрачиваемой на продавливание рабочей жидкости через зазор, образованный кольцевыми поверхностями:

$$N_p = \Delta p \cdot Q = |P_1 - P_0| \cdot Q = \frac{s^3 \Delta p^2}{12 \cdot \eta \cdot \Delta l} \cdot w, \quad (3)$$

где  $w = \pi \cdot d$  – длина средней линии коаксиального зазора;  $d$  – диаметр средней линии зазора;  $\Delta l$  – длина цилиндрического зазора в направлении движения потока жидкости (рис. 2).

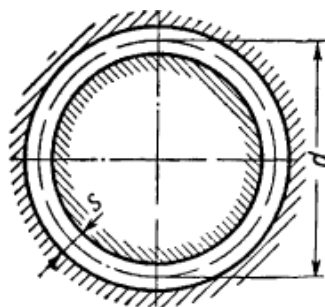


Рис. 2. Коаксиальный цилиндрический зазор в разрезе

Кольцевая поверхность штока-поршня в МР-демпфере перемещается со скоростью  $v$  относительно неподвижной кольцевой поверхности корпуса. В соответствии с этим в рассмотренных в работе [9] уравнениях, описывающих движение рабочей жидкости, учтен перенос МРЖ, движущейся кольцевой поверхностью поршня-штока (с учетом фрикционного движения жидкости).

$$Q = \frac{|P_1 - P_0| \cdot s^3 \cdot w}{12 \cdot \eta \cdot \Delta l} = \frac{\Delta p \cdot s^3 \cdot w}{12 \cdot \eta \cdot \Delta l} = \frac{\Delta p \cdot s^3 \cdot w \cdot g}{12 \cdot \eta \cdot \gamma \cdot \Delta l}, \quad (4)$$

где  $\frac{dp}{dy} = \frac{|P_1 - P_0|}{\Delta l}$  – градиент давления по длине зазора в направлении потока;  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости;  $\gamma$  и  $g$  – объемный вес рабочей жидкости и ускорение свободного падения.

Тогда течение через коаксиальный зазор (рис. 2) рассчитывается при ламинарном течении по выражению (4) с заменой  $w = \pi \cdot d$ :

$$Q = \frac{\pi \cdot d \cdot \Delta p \cdot s^3}{12 \cdot \eta \cdot \Delta l}. \quad (5)$$

Среднюю скорость течения МРЖ в МР-демпфере можно представить как:

$$v_{cp} = \frac{Q}{\pi \cdot ds}, \quad (6)$$

где  $\pi \cdot ds$  – площадь сечения зазора; для расчетов применительно к единице длины  $w = \pi \cdot d = 1$  величина  $\pi \cdot ds$  равна величине зазора  $s$ .

Подставив (5) в формулу (6), получим:

$$v_{cp} = \frac{\Delta p \cdot s^2}{12 \cdot \eta \cdot \Delta l}. \quad (7)$$

Из формулы (7) может быть выражен перепад давления:

$$\Delta p = \frac{12 \cdot \eta \cdot \Delta l \cdot v_{cp}}{s^2}. \quad (8)$$

Для выражения закона течения рабочей жидкости в МР-демпфере в безразмерной форме вводится понятие гидравлического радиуса для коаксиального зазора, под которым понимается отношение удвоенной площади поперечного сечения потока к смоченному периметру штока-поршня [9,10]. Для коаксиальных цилиндрических зазоров гидравлический радиус в этом случае равен ширине зазора (его номинальной величине)  $s$ . В соответствии с этим число Рейнольдса будет определяться по формуле:

$$Re = v \cdot s / \zeta = v \cdot s \cdot \rho / \eta. \quad (9)$$

Применяемые рабочие МРЖ в МР-демпферах представляют собой суспензии микрочастиц магнитных материалов в органических маслах. Под действием магнитного поля частицы, распределенные в объеме дисперсной среды, образуют структуры, ориентированные вдоль силовых линий поля, что вызывает увеличение вязкости жидкости более чем в  $10^5$  раз [1-6].

Главным показателем всех традиционных рабочих жидкостей газогидравлических виброопор и демпферов, качественно влияющих на характеристики их сопротивления, является коэффициент кинематической вязкости рабочей жидкости [8]:

$$\nu = \frac{\mu'}{\rho} = \frac{dP_{\tau}}{dS \frac{du}{dz} \cdot \rho}, \quad (10)$$

где  $\mu'$  - динамический коэффициент вязкости;  $dP_\tau$  - элементарная величина силы вязкого трения, Н;  $dS$  - площадь соприкосновения слоев в частице МРЖ, мм<sup>2</sup>;  $du/dz$  - модуль градиента скорости;  $du$  - разница скоростей на сдвиговых плоскостях рабочей МРЖ;  $dz$  - расстояние между рабочими плоскостями цилиндрического зазора МР-демпфера.

Для любой реологической среды сдвиговая вязкость определяется отношением касательного напряжения к градиенту скорости, поперечному направлению движения, который для МРЖ зависит от напряженности приложенного магнитного поля. Если считать МРЖ линейно вязкопластичной средой, то ее поведение описывается моделью Шведова-Бингама, учитывающей влияние вязкости и пластичности на касательные напряжения и может быть описана следующим образом [8]:

$$\eta = \frac{\tau_y}{\dot{\gamma}} + \eta_p, \quad (11)$$

где  $\tau_y$  - предельное напряжение сдвига (предел текучести) МРЖ, Па;  $\dot{\gamma}$  - сдвиговая скорость, м/с;  $\eta_p$  - показатель консистенции МРЖ, являющийся аналогом коэффициента пластической вязкости, т.е. вязкости при отсутствии магнитного поля.

Диапазон перемещений штока-поршня МР-демпфера определяется перепадом давлений  $\Delta p$  [Па], создаваемом в рабочем цилиндрическом зазоре с МРЖ. Перепад давлений состоит из двух составляющих [1, 5]:  $\Delta p_\eta$  – вязкая составляющая, определяющей течением рабочей МРЖ с вязкостью  $\eta$ ;  $\Delta p_\tau$  – составляющая, заданная пределом текучести структурированной магнитным полем магнитовязкой среды.

Принцип действия МР-демпфера основан на магнитореологическом эффекте, описанном ранее. Регулируя внешним магнитным полем вязко-упруго-пластичные свойства МРЖ, используемой в качестве рабочей среды, можно сверхточно управлять определяемым сдвиговыми напряжениями  $\tau$  перепадом давлений в гидравлической системе МРТ МР-демпфера или упругими деформациями структурированной суспензии, за счет чего осуществляется прецизионное демпфирование колебаний [1-6].

Поскольку в реальных условиях работы МР-демпфера вязкость рабочей МРЖ зависит от температуры и давления, которые являются величинами переменными [9, 10], то возникает задача отвода тепла от цилиндрического коаксиального зазора с рабочей МРЖ в МР-демпфере [4, 5, 7, 8]. Одним из способов решения данной задачи является применение КТТ, которые являются эффективными теплоотводами [12, 15].

### Отвод тепла в МР-демпферах с МРЖ

Проведённые авторами экспериментальные исследования на предмет воздействия температуры МРЖ на динамические характеристики МР-демпферов показали, что с ростом температуры МРЖ невозможно предварительно настроить МР-демпфер на заданные резонансные частоты при изменяющейся нагрузке [4, 5]. Этого невозможно достичь из-за неизбежного падения с ростом температуры МРЖ гидравлических и общих коэффициентов трения МР-демпфера при его работе. Динамическая вязкость МРЖ падает с ростом температуры [9,10], а для должной работы МР-демпфера её динамическую вязкость необходимо поддерживать на уровне определённого значения.

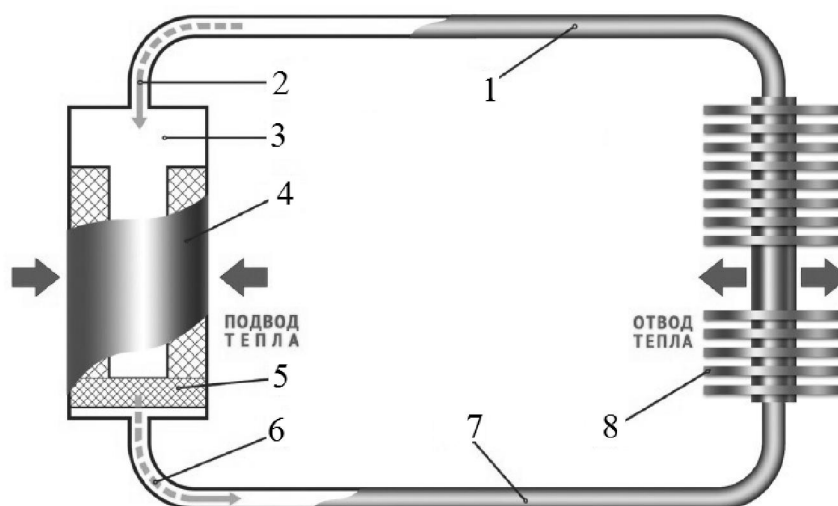
Для предварительной настройки МР-демпфера на заданные резонансные частоты необходимо принимать меры по принудительному охлаждению МРЖ [4,5]. Одним из технических решений является применение контурных тепловых трубок (КТТ), которые осуществляют быструю передачу тепла от одних устройств к другим и являются непревзойденными теплоотводами [12, 15, 16].

Отличаясь малыми массогабаритными показателями, КТТ способны передавать тепла

в сотни раз больше, чем сплошные стержни из меди и серебра [11-16]. КТТ работают по замкнутому испарительно-конденсационному циклу, используя капиллярное давление для прокачки теплоносителя. Устройства обладают сверхвысокой эффективной теплопроводностью, не содержат механически подвижных элементов, не потребляют дополнительной энергии (на прокачку теплоносителя) и имеют практически неограниченный рабочий ресурс.

КТТ успешно применяют в системах терморегулирования космических аппаратов, для охлаждения теплонапряженных компонентов электронных устройств и компьютерной техники и утилизации лишнего тепла [12, 15, 16].

Одна из схем такого устройства [15, 16] представлена на рис. 3.



**Рис. 3. Принципиальная схема контурной тепловой трубы:**

1 – конденсато-провод; 2 – жидкость; 3 – компенсационная полость;  
4 – испаритель; 5 – фитиль; 6 – пар; 7 – паропровод; 8 – конденсатор

Испаритель соединен с конденсатором посредством отдельных гладкостенных трубопроводов для пара и жидкости, имеющих относительно малый диаметр, благодаря чему они могут легко принимать различную конфигурацию и обеспечивать минимальное гидравлическое сопротивление. Основные технические характеристики КТТ представлены в табл. 1.

**Таблица 1**

**Основные технические характеристики КТТ [15]**

Наименование характеристики	Величина
Максимальная мощность, Вт	20-2000
Максимальная плотность тепловой нагрузки, Вт/см <sup>2</sup>	130
Термическое сопротивление, °С/Вт	0,02-0,2
Рабочая температура, °С	10-180
Эффективное расстояние теплопереноса, м	0,1-21
Эффективное расстояние теплопереноса при работе против сил тяжести, м	4,5
Длина зоны нагрева испарителя, мм	10-300
Диаметр испарителя, мм	5-32
Диаметр трубопроводов для пара и жидкости, мм	1,8-8
Материал корпуса	Нержав. сталь, медь
Теплоноситель	Вода, аммиак, фреоны

К числу миниатюрных относятся КТТ, диаметр испарителей которых не превышает 8 мм, а диаметр паропровода и конденсатопровода составляет не более 3 мм. Традиционная концепция испарителя, который является основной частью КТТ, уже не работает при таких малых диаметрах. Способность КТТ эффективно работать при любой ориентации является одним из основных преимуществ этих устройств, но в значительной степени нивелируется при таких небольших размерах. На рис. 4 представлена схема охлаждения микропроцессора мобильного компьютера, построенного на основе КТТ [15].

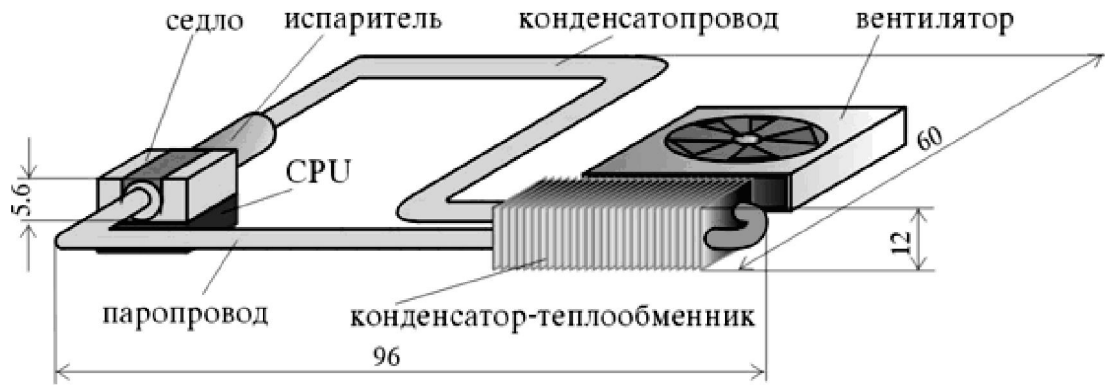


Рис. 4. Схема охлаждения процессора мобильного компьютера на основе КТТ

Применение КТТ труб является альтернативной концепцией и для отвода тепла от разогретой МРЖ в кольцевых зазорах МР-демпферов (рис. 5).

Действие КТТ в МР-демпферах также основано на принципе кипения теплоносителя (воды) в испарителе (источнике тепла) при более низкой температуре воздуха с пониженным давлением [11–14, 16]. Создавая вакуум в КТТ МР-демпферов, можно достичь температуры кипения меньшей, чем 100 °С. Испарители КТТ, которые могут применяться в МР-демпферах, должны иметь температуру кипения около 30 °С, поскольку при нагревании испарителя выше 30 °С вода будет испаряться, а пар будет быстро подниматься по паровому каналу передачи тепла к приёмнику тепла – конденсатору (рис. 5).

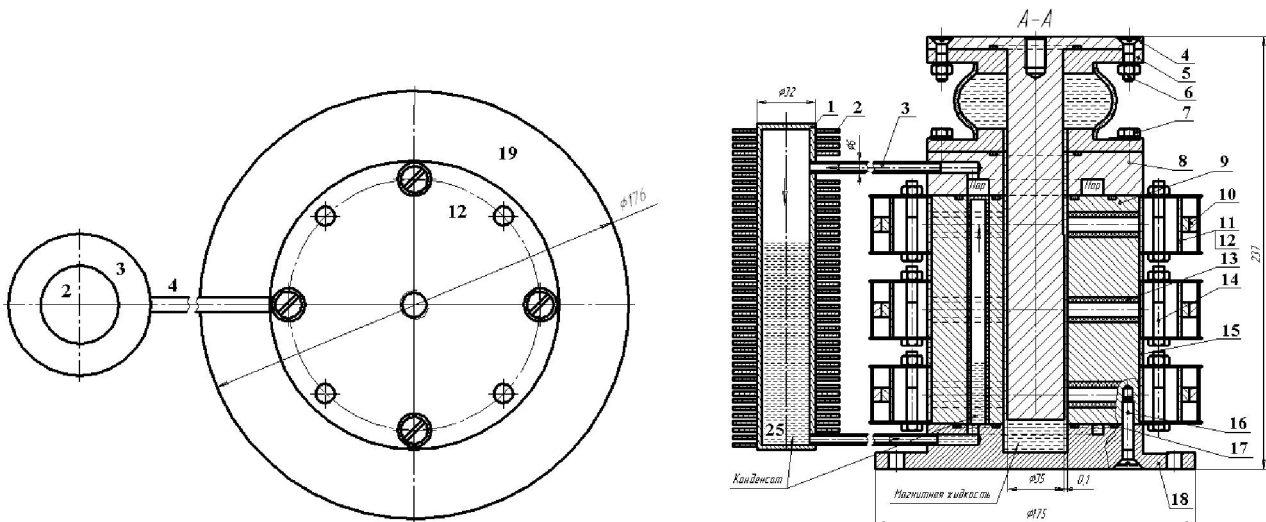


Рис. 5. Схема охлаждения МРТ МР-демпфера на основе КТТ:

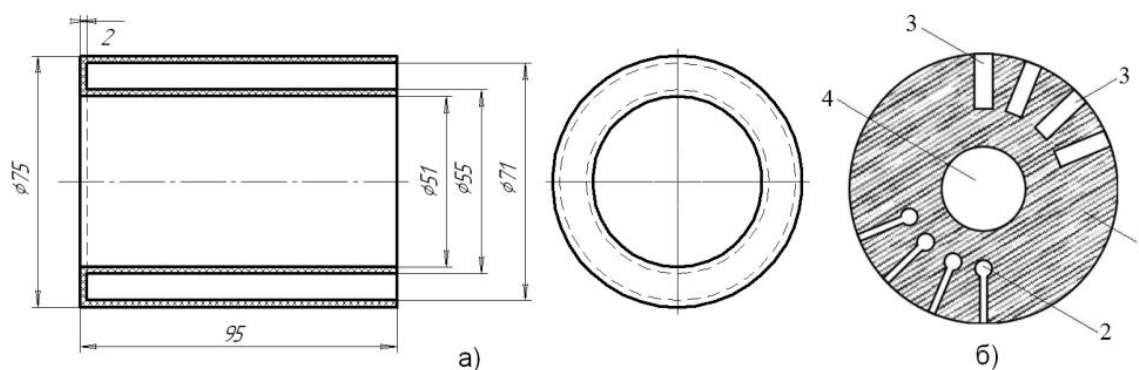
1 – испаритель; 2 – конденсатор; 3 – ребристый радиатор конденсатора; 4 – паровой канал; 5 – жидкостный канал; 6 – мелкопористый фитиль; 7 – штуцер; 8 – компенсаторную полость; 9, 10 – фланцы упругого жаростойкого сильфона; 11 – стягивающий болт; 12 – опорная плата со штоком-поршнем; 13, 14, 15 – уплотнительные кольца; 16 – винтовое соединение; 17 – стягивающий винт; 18 – соленоиды-индукторы; 19 – упорные кольца; 20 – ребристые радиаторы соленоидов; 21 – основание

Схема охлаждения МР-демпфера (рис. 5) содержит КТТ, которая состоит из герметичного корпуса, содержащего испаритель 1, помещённый внутри диамагнитного корпуса МР-демпфера и расположенный достаточно близко к источнику тепла, конденсатор 2, подключённый к приёмнику тепла – радиатору 3. Испаритель и конденсатор между собой соединены паропроводом 4 и конденсаторопроводом 5. Мелкопористый фитиль 6 плотно посажен в корпус последнего. Откачка воздуха и заполнение трубы теплоносителем осуществляется через штуцер 7 [12, 15, 16].

Работа МР-демпфера (рис. 5) основана на действии противоположных магнитных полей соленоидов 18 на ферромагнитный шток-поршень 12 и малый коаксиальный канал с МРЖ размещенных в электромагнитном поле трёх внешних соленоидов 18. Магнитное поле  $+B$  соленоидов  $L_1$  и  $L_3$  относительно поля  $-B$  соленоида  $L_2$  противоположное. Соленоид  $L_2$  создаёт противоположное поле  $-B$  с целью управления перемещением штока-поршня в МР-демпфере.

### Технология изготовления фитилей КТТ капиллярно-пористой структуры для МР-демпферов с МРЖ

Испаритель КТТ с порошковым фитилем рассчитывается на мощность испарения до 50 Вт. Корпус испарителя приведен на рис. 6, а.



**Рис. 6. Цилиндрический фитиль КТТ капиллярно-пористой структуры:**

а – эскизный чертёж фитиля; б – возможное поперечное сечение фитиля: 1 – поперечное сечение; 2 – паропроводные микроканалы; 3 – паросборные каналы; 4 – средняя пористая часть

Эскиз его возможного поперечного сечения (рис. 6, б) показан без соблюдения пропорций с целью повышения наглядности рисунка. Фитиль 1 имеет паропроводные микроканалы 2, расположенные радиально, и паросборные каналы 3, расположенные вдоль испарителя. Продольные каналы 3 могут быть выполнены в виде пазов между рёбер на поверхности фитиля [11, 12, 13]. Фитиль КТТ изготавливается из карбонильных порошков никеля путём прессования в цилиндрических прессформах при давлениях 800-900 кг/см<sup>2</sup> и последующего спекания в течении 4-5 часов при повышении температуры до 800-900 °С [12, 13].

В зависимости от длины ТТ, теплоносителя и передаваемой мощности разность температур может составлять 0,1-30 °С. Длина ТТ при работе в горизонтальном положении может составлять несколько метров [12, 15].

Приведённая технология изготовления цилиндрического фитиля КТТ капиллярно-пористой структуры не является единственной. В МГТУ им. Н.Э. Баумана проводятся комплексные исследования КТТ [16] с использованием различных узлов: фитилей, конденсаторов, компенсационных полостей и т.п.

Использование микроканальных поверхностей с различной геометрией делает возможным применение в качестве капиллярных структур для МР-демпферов как металлических (спеченные никелевые, медные порошки, порошки из коррозионно-стойкой стали), так

и неметаллических пористых материалов (стекловолокно, синтетические волокна, фильтровальная бумага) [16].

Таблица 2

### Основные характеристики пористых материалов фитилей КТТ

Пористый материал	Размер пор, мкм	Толщина, мм
Фильтровальная бумага (FP) ГОСТ 12026-76	10	0,4
Коррозионно-стойкая сталь (SS), спеченный порошок	10-15	2,5
Стекловолокно (GF)	2,6	0,4; 1,2; 2,4

Экспериментально установлено, что в качестве фитиля КТТ могут использоваться не только металлические материалы, но и фильтровальная бумага. Ресурсных испытаний не проводилось, но во всех вариантах, в том числе и с фильтровальной бумагой, установки работали длительное время, при этом они многократно выключались и включались. Наиболее полно результаты исследований представлены в работе [16].

Приведённую технологию изготовления фитилей капиллярно-пористой структуры КТТ можно применить и в МР-демпферах ударных нагрузок.

*Работа выполнена за счет средств Российского научного фонда (проект №15-19-10026).*

### Библиографический список

1. **Гордеев, Б.А.** Системы виброзащиты с использованием инерционности и диссипации реологических сред / Б.А. Гордеев [и др.]. – М.: Физматлит, 2004. – 175 с.
2. **Айбиндер, Р.М.** Демпфирование вибрации на резонансных частотах электротехнических комплексов и систем / Р.М. Айбиндер [и др.] // Вестник машиностроения. – 2017. – № 1. – С. 7–14.
3. **Гордеев, Б.А.** Физическая модель магнитореологического трансформатора / Б.А. Гордеев, С.Н. Охулков, А.С. Плехов, Д.Ю. Титов // ПромИнжиниринг-2017. С. 201-205.
4. **Гордеев, Б.А.** К вопросу создания цилиндрического магнитореологического трансформатора в ортогональных магнитных полях / Б.А. Гордеев [и др.] // Проблемы машиностроения и надёжности машин. – 2014. – №2. – С. 15–21.
5. **Гордеев, Б.А.** Влияние температуры рабочей жидкости на динамические характеристики гидропор / Б.А. Гордеев [и др.] // Вестник машиностроения. – 2012. – №12. С. 22–26.
6. **Гордеев, Б.А.** Физическая модель магнитореологических трансформаторов энергетических установок / Б.А. Гордеев, С.Н. Охулков, Е.А. Ершова // Актуальные проблемы электроэнергетики: сб.ст. НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2016. – С. 51–56.
7. **Актинов, А.А.** О стойкости магнитных жидкостей к воздействию повышенных температур / Актинов А.А. [и др.] // Физико-химические и прикладные проблемы МЖ: сборник научных трудов. – Ставрополь, СГУ 1997.
8. **Шульман, З.П.** Магнитореологический эффект / З.П. Шульман, В.И. Кордонский. – Минск: Наука и техника, 1982. – 184 с.
9. **Башта, Т. М.** Машиностроительная гидравлика: справочное пособие / Т. М. Башта. – 2-е изд., переработанное. – М. Машиностроение, 1971. – 672 с.
10. **Яворский, Б. М.** Справочник по физике / Б. М. Яворский, А.А. Детлаф. – М.: Наука, 1964. – 847 с.
11. **Дан П.Д.** Тепловые трубы: [пер. с англ.] / П. Д. Дан, Д. А. Рей. – М.: Энергия, 1979. – 272 с.
12. **Алексеев, В.А.** Тепловые трубы для охлаждения и термостатирования радиоэлектронной аппаратуры / В. А. Алексеев, В. А.Арефьев. – М.: Энергия, 1979. – 128 с.
13. **Ивановский, М. П.** Технологические основы тепловых труб. / М.П. Ивановский, [и др.]. – М.: Атомиздат, 1980. – 160 с.
14. **Елисеев, В. Б.** Что такое тепловая труба? / В. Б. Елисеев, Д. И. Сергеев. – М.: Энергия, 1971. – 136 с.

15. **Майданик, Ю. Ф.** Контурные тепловые трубы – высокоэффективные теплопередающие устройства // Биржа технологий и контактов. – 2003. – № 5.
16. **Афанасьев, В.Н.** Экспериментальное исследование процессов в “Контурных” тепловых трубах / В.Н. Афанасьев, А.В. Недайвозов, А.А. Якомаскин // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2014. – №2. – С. 44–61.

*Дата поступления  
в редакцию 16.04.2018*

**B.A. Gordeev<sup>1,2</sup>, S.N. Okhulkov<sup>1,2</sup>, D. Yu. Titov<sup>2</sup>, A.S. Plekhov<sup>2</sup>**

### **STABILIZATION OF CONTROLLABLE SHOCK LOAD DAMPERS OPERATION WITH A LOOP HEAT PIPE**

Mechanical Engineering Research Institute of Russian Academy of Sciences<sup>1</sup>,  
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev<sup>2</sup>

**Purpose:** Hydromounts during continuous operation produce a considerable amount of heat. Since the heating of the controllable fluid leads to a displacement of the hydromounts working frequency it becomes necessary to remove heat from it.

**Design/methodology/approach:** In the paper some approaches to the design magnetorheological transformers (MRT) of dampers operating under shock loads are considered. In particular, the influence of temperature on the stability of the damper operation during long-term operation is determined. The methods are considered and the temperature stabilizing means for the MR-damper are proposed to ensure efficient control of it.

**Findings:** In this paper the effect of temperature on the viscosity of non-Newtonian fluids was studied and technical solutions that allowed high-effectively remove heat from the heater were proposed.

**Research limitations/implications:** The present studies can be applied in the development and design of magnetorheological shock absorbers, couplings and brakes.

**Originality/value:** The design of the magnetorheological hydromount with the use of loop heat pipes as a cooling system was proposed.



УДК 621.314:621.318

Е.В. Калинин

**МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В АНИЗОТРОПНОМ ШИХТОВАННОМ СЕРДЕЧНИКЕ.  
РЕКОМЕНДАЦИИ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ СТЕПЕНИ МАГНИТНОЙ АНИЗОТРОПИИ  
ХОЛОДНОКАТАНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СТАЛЕЙ**

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева

Для холоднокатаных электротехнических сталей вводится обобщенный параметр  $K$  – степень анизотропии магнитных свойств, равный отношению максимальных магнитных проницаемостей вдоль и поперек прокатки. Указываются три причины снижения  $K$  трансформаторной стали с ростом частоты перемагничивания  $f$ . Отмечается определяющее влияние процесса динамического дробления равновесной полосовой доменной структуры и поверхностного эффекта на  $K(f)$ . Предлагается различать  $K$ -пластины для задач магнитостатики и  $K$ -материала для задач магнитодинамики. На примере стали 3413 описывается способ определения  $K$  по экспериментальным магнитным характеристикам.

*Ключевые слова:* холоднокатаная электротехническая сталь, анизотропия магнитных свойств, дробление полосовой доменной структуры,  $K$  - обобщенный параметр анизотропии.

Применение современной холоднокатаной кремнистой стали способствовало существенному росту характеристик силовых электроэнергетических устройств. Для оптимизации их магнитных систем требуется применение аппарата электромагнитного поля при наличии достоверных и полноценных магнитных характеристик используемых листовых электротехнических сталей. При этом необходимо принимать во внимание наличие магнитной текстуры, обуславливающей резко выраженную анизотропию магнитных свойств. Изучению этих вопросов посвящена настоящая работа.

Исследования проводятся на примере трансформаторной стали марки 3413 толщиной  $d=0,35$  мм с крупной полосовой доменной структурой (ДС). Это текстурованная сталь с ребровой структурой характеризуется значительной степенью магнитной анизотропии, высоким уровнем магнитных свойств в направлении прокатки и высокой чувствительностью ДС к динамике перемагничивания. Для сравнительного анализа взята динамная сталь марки 2412 толщиной  $d=0,5$  мм, также с ребровой структурой и с таким же, как у стали 3413, химическим составом. Однако за счет другой технологии изготовления у стали 2412 слабо выраженная магнитная анизотропия и мелкая, не чувствительная к динамике, ДС.

Ранее представлены отдельные результаты анализа характеристик магнитной анизотропии стали марки 3413 на частоте  $f=50$  Гц [1]. Установлено [1, 2], что наибольшее проявление магнитной анизотропии имеет место в ненасыщенных режимах намагничивания. Показано [2], что степень анизотропии магнитных свойств  $K$ , равна отношению максимальных магнитных проницаемостей по осям анизотропии листовой стали с угловыми положениями:  $\alpha=0$ , совпадающим с направлением прокатки, и в перпендикулярном направлении -  $\alpha=90^\circ$ :

$$K = \mu_{\max.0} / \mu_{\max.90} . \quad (1)$$

Отмечена зависимость  $K$  от частоты перемагничивания  $f$ , причем своих наибольших значений  $K$  текстурованные стали достигают в статике (для стали марки М6 -  $K=30$ ) [2]. Расчетами магнитного поля анизотропного сердечника кольцевой формы [3] подтверждается определяющее влияние степени анизотропии  $K$  на характер распределения индукции.

Поэтому для исследований рекомендованы режимы: статика -  $f=0$ , промышленная частота -  $f=50$  Гц и повышенная для этих сталей -  $f=400$  Гц. С целью получения достоверной информации с обеими сталями проведены все необходимые измерения магнитных свойств

в диапазоне частот  $f=(0-400)$  Гц. Измерения выполнены на комплекте магнито-измерительной аппаратуры производства Японии в Центральной Заводской Лаборатории Верх-Исетского металлургического завода в соответствии с требованиями ГОСТ [4].

При поиске входящих в (1) значений максимальных проницаемостей  $\mu_{\max}$ , возникают затруднения, связанные с неоднозначным, гистерезисным характером перемагничивания сталей (рис. 1, а). То есть за каждый цикл перемагничивания совершается по восходящей и нисходящей ветвям петли гистерезиса. Однако, в [2] определение  $\mu_{\max}$  производилось по основной кривой намагничивания (на рис. 1, а изображена пунктиром), что является неточным и методически неправильным из-за наличия начального пологого участка на основной кривой, зависящего от величины коэрцитивной силы стали  $H_c$ .

Для решения проблемы воспользуемся методом разложения магнитных характеристик ферромагнетика на структурные составляющие, предложенный Л.А. Бессоновым в [5] (рис. 1). Разложение имеет вид:

$$H(B) = H_{\text{ог}}(B) + H_{\text{г}}(B), \tag{2}$$

где  $H$  и  $B$  – соответственно, напряженность и индукция магнитного поля, а  $H_{\text{ог}}$  и  $H_{\text{г}}$  – безгистерезисная и гистерезисная составляющие напряженности  $H$ . Тогда:

$$H_{\text{ог}}(B) = H(B) - H_{\text{г}}(B). \tag{3}$$

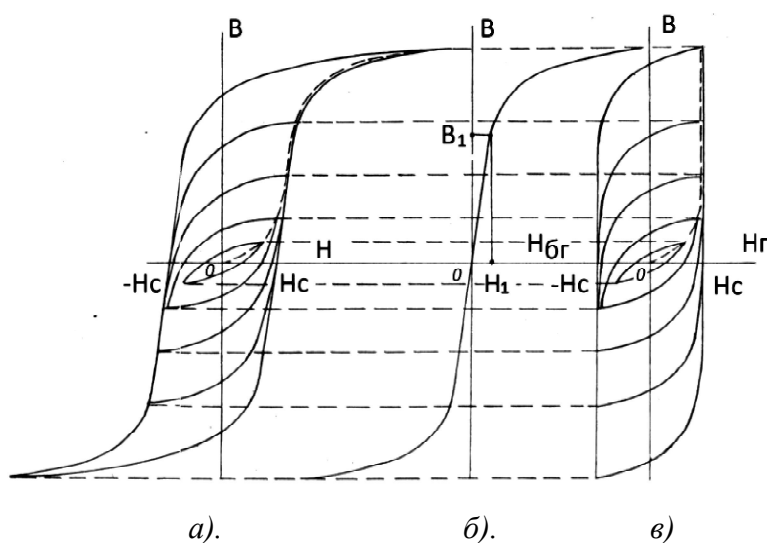


Рис. 1. Магнитные характеристики  $H(B)$  – (а) и их разложение на структурные составляющие: безгистерезисную  $-H_{\text{ог}}(B)$  – (б) и гистерезисную  $-H_{\text{г}}(B)$  – (в)

Максимальное значение магнитной проницаемости, соответствующее некоторому значению индукции  $B = B_1$  определяется, как:

$$\mu_{\max} = B_1 / H_{\text{ог}}(B_1). \tag{4}$$

Для симметричной петли гистерезиса с амплитудой индукции  $B_m$  при фиксированных частоте  $f$  и угле намагничивания  $\alpha$  значение  $H(B_m)$  находится по соответствующей основной кривой намагничивания  $H_{\text{ам}}(B_m)$ , являющейся геометрическим местом вершин симметричных гистерезисных циклов. В соответствии с введенным Г. Рейнботом понятием «коэрцитивной силы по магнитной индукции» гистерезисного цикла  $- \alpha H_c$ , отличающейся от коэрцитивной силы предельной петли [6], гистерезисная составляющая в верхней точке

петли равна:  $H_{\Gamma}(B_M) = \nu H_c(B_M)$ . Из (3) получаем следующее соотношение амплитудных значений структурных составляющих:

$$H_{\Gamma}(B_M) = H_{\alpha M}(B_M) - \nu H_c(B_M). \tag{5}$$

Равенство (5) справедливо при намагничивании стали вдоль осей  $\alpha=0$  и  $90^\circ$  для каждой из частот:  $f=0, 50$  и  $400$  Гц. Компоненты, входящие в (5) в общем случае зависят от  $f$ .

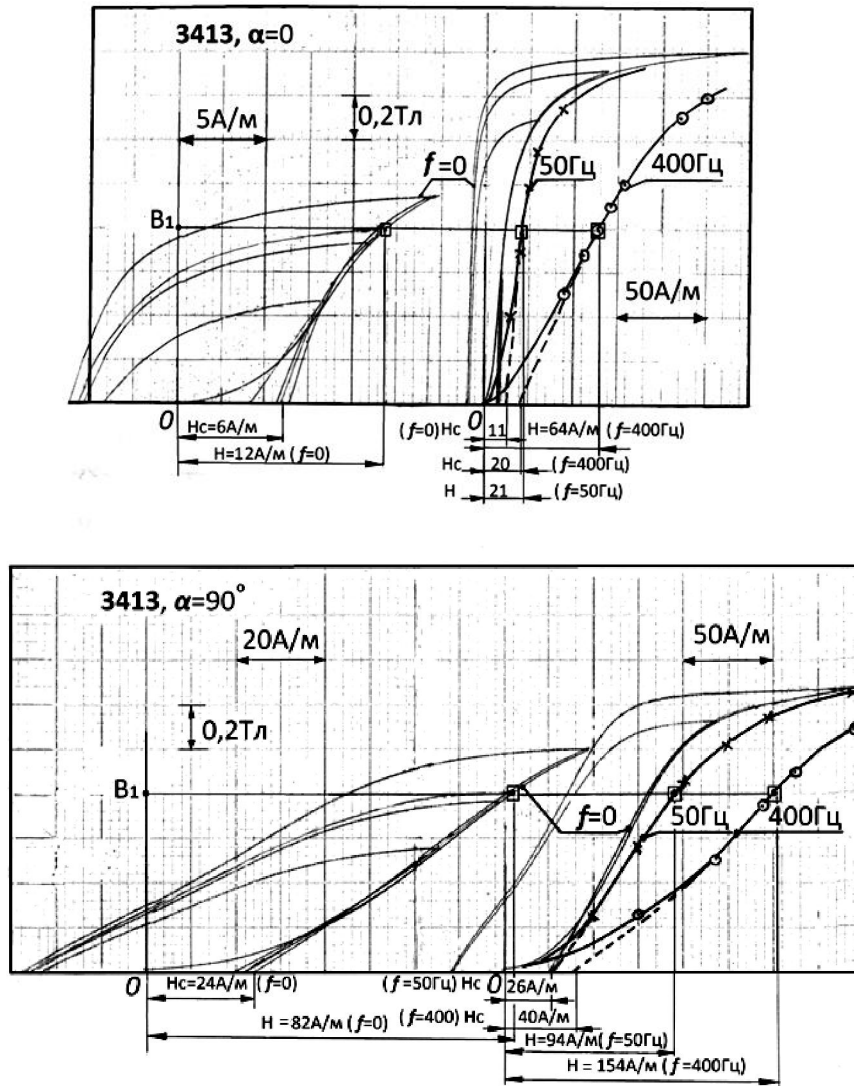


Рис. 2. Магнитные характеристики стали 3413 при  $\alpha=0$  и  $90^\circ$  для определения степени магнитной анизотропии  $K$  при  $f=0, 50$  и  $400$  Гц

При амплитуде индукции  $B_M=B_1$ , соответствующей  $\mu$  тах на границе линейных участков кривых намагничивания  $H_{\Gamma}(B_M)$  [2], принимаем для упрощения следующие обозначения:

$$H_{\alpha M}(B_1) = H; \quad \nu H_c(B_1) = H_c(B_1) = H_c; \quad H_{\Gamma}(B_1) = H_{\Gamma}. \tag{6}$$

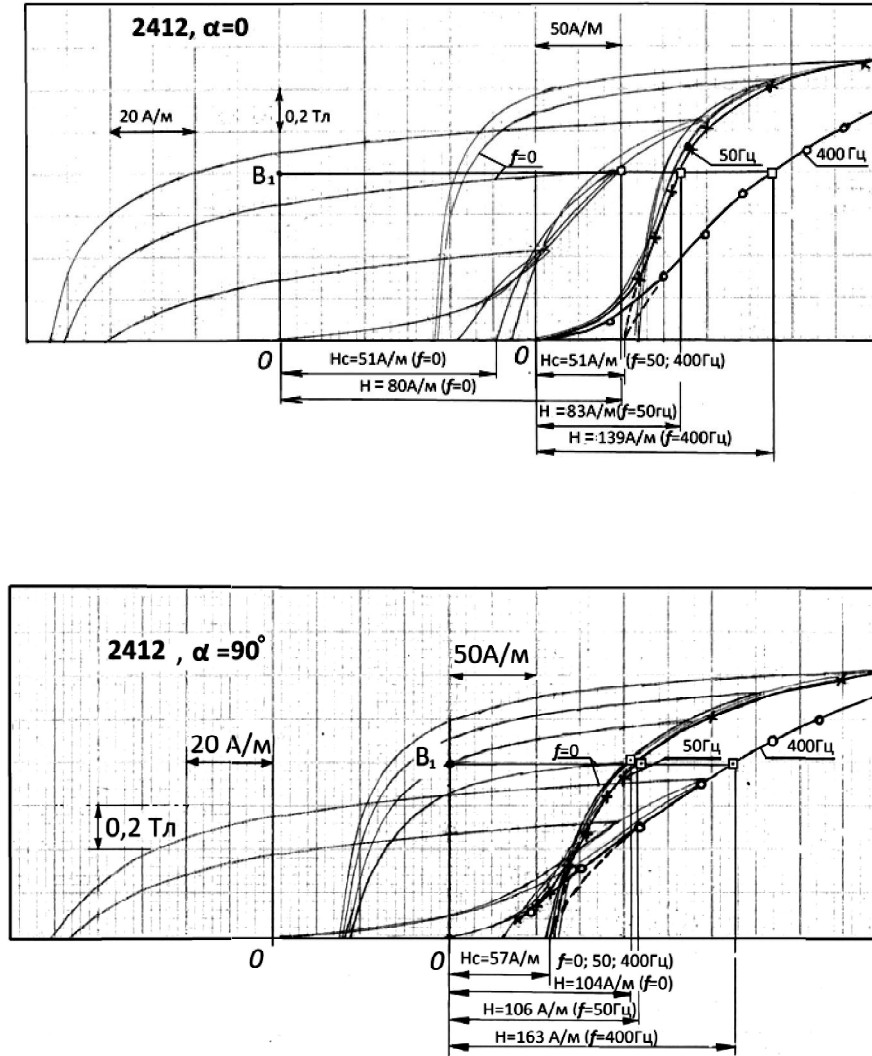
Равенство (5) приходит к виду:

$$H_{\Gamma} = H - H_c, \tag{7}$$

а формула (1) для определения  $K$  с учетом (4), (6) - к форме:

$$K = H_{\text{бр.}90} / H_{\text{бр.}0} . \tag{8}$$

На рис. 2, 3 представлены статические гистерезисные характеристики сталей 3413 и 2412 в угловых положениях  $\alpha=0$  и  $90^\circ$ , использованные для расчета  $K$  при  $B_1=0,8\text{Тл}$  и  $f=0$ .



**Рис. 3. Магнитные характеристики стали 2412 при  $\alpha=0$  и  $90^\circ$  для определения степени магнитной анизотропии  $K$  при  $f=0, 50$  и  $400$  Гц**

С учетом принятых обозначений (6) для стали 3413 (рис. 2) при  $\alpha=0$  -  $H_{c,0}=6\text{А/м}$ ,  $H_0=12\text{А/м}$ ,  $H_{\text{бр.}0}=12-6=6[\text{А/м}]$ ; при  $\alpha=90^\circ$  -  $H_{c,90}=24\text{А/м}$ ,  $H_0=82\text{А/м}$ ,  $H_{\text{бр.}90}=82-24=58[\text{А/м}]$ . По формуле (8) -  $K=58/6=9,7$ . Аналогично, для стали 2412 (рис. 3):  $H_{c,0}=51\text{А/м}$ ,  $H_0=80\text{А/м}$ ,  $H_{\text{бр.}0}=29\text{А/м}$ ;  $H_{c,90}=57\text{А/м}$ ,  $H_0=104\text{А/м}$ ,  $H_{\text{бр.}90}=47\text{А/м}$ ; -  $K=47/29=1,6$ .

Полученные значения для наглядности сведены в табл. 1.

В динамических режимах непосредственное определение значений  $H_c$  невозможно из-за влияния вихревых токов. Поэтому для поиска  $H_c$  используем наличие установленной в [6] прямой пропорциональной зависимости величин коэрцитивной силы по индукции  $H_c(B_M)$  и удельных гистерезисных потерь за один цикл перемагничивания  $P_V/f(B_M)$ .

У стали 2412 с мелкой ДС гистерезисные потери за цикл  $P_V/f$  не зависят от частоты  $f$ , а потери на вихревые токи близки к классическим - макровихревым, рассчитанным по удельной электропроводности стали [7, 11]. Для таких сталей благодаря линейному характеру зависимости полных удельных потерь за цикл  $P_{уд}f$  при  $B_M=\text{const}$  от частоты  $f$  применимо

разделение потерь методом двух и более частот [7]. Значения  $H_c$  стали 2412 для  $\alpha=0$  и  $90^\circ$ ; полученные при  $f=0$ , остаются неизменными на  $f=50$  и  $400$  Гц.

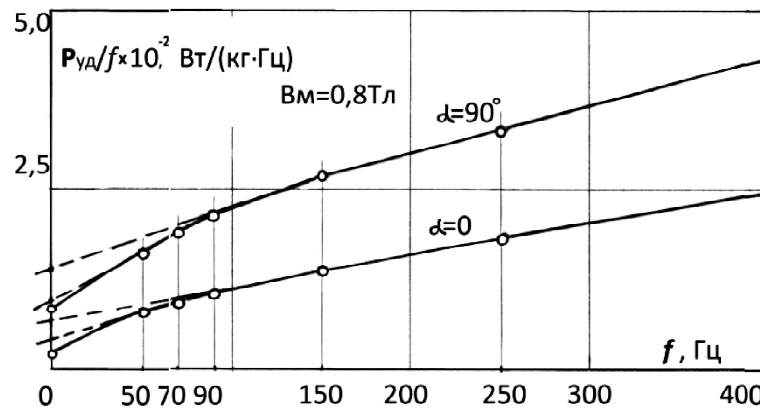


Рис. 4. Определение удельных гистерезисных потерь за цикл  $P_r/f$  стали 3413 при  $f=50$  и  $400$  Гц графическим путем

Зависимости полных удельных потерь за цикл  $P_{уд}/f$  от частоты  $f$  при  $B_m=\text{const}$  текстурованной стали имеют нелинейный характер. На рис. 4 представлены такие зависимости стали 3413 для  $\alpha=0$  и  $90^\circ$  и  $B_m=0,8\text{Тл}$ . Крупная полосовая ДС трансформаторной стали 3413 является причиной существенных дополнительных потерь в динамике. Установлено [8], что последние имеют такой же характер зависимости от  $f$ , как и классические потери от макровихревых токов. То есть при условии неизменности ДС и  $B_m=\text{const}$  зависимости  $P_{уд}/f$  от  $f$  стали 3413 на рис. 4 оставались бы линейными, как и у стали 2412. Однако, с ростом частоты полосовая ДС измельчается [7, 8], из-за чего линейность зависимости нарушается.

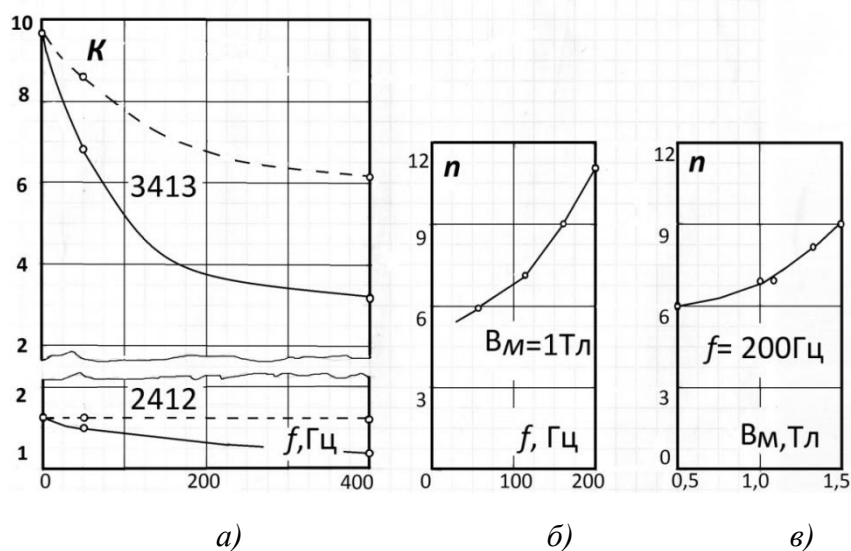
Проведенные рассуждения открывают возможность для нахождения значений удельных гистерезисных потерь за цикл  $P_r/f$  построением касательной к зависимости  $P_{уд}/f$  в точке исследуемой частоты. При этом точка пересечения касательной с осью ординат ( $f=0$ ) будет соответствовать величине фактических удельных потерь за цикл  $P_r/f$  для заданной частоты  $f$  (рис. 4).

С учетом установленной пропорциональности между  $H_c$  и  $P_r/f$  при  $B_m=\text{const}$  [6] проведенными построениями на рис. 4 получены точки для определения значений  $K_y$  - коэффициентов увеличения коэрцитивной силы  $H_c$  при  $B_m=0,8\text{Тл}$  для  $f=50$  и  $400$  Гц по отношению к  $H_c$  при  $f=0$ . При этом значения коэффициентов  $K_y$  оказались соответственно равными: при  $\alpha=0$  -  $K_y=1,8$  и  $3,3$ ; при  $\alpha=90^\circ$  -  $K_y=1,08$  и  $1,7$ .

Рассчитанные таким образом значения  $H_c$  для обеих частот занесены в табл. 1. По полученным значениям  $H_c$  с использованием (7), (8) при  $B_r=0,8\text{Тл}$  произведено вычисление величин, необходимых для расчета значений  $K$  обеих сталей в исследуемых динамических режимах. Для этого на рис. 2, 3 также приведены основные кривые намагничивания сталей 3413 и 2412 при  $\alpha=0$  и  $90^\circ$  для  $f=50$  и  $400$  Гц. Пунктиром нанесены предполагаемые восходящие ветви гистерезиса для определения  $H_c$ . При этом значения  $H_c$  коррелируют с рассчитанными по зависимостям на рис. 4. При  $f=50\text{Гц}$  (рис. 2, 3) для стали 3413:  $H_{бр.0}=10\text{А/м}$ ,  $H_{бр.90}=68\text{А/м}$ ; -  $K=68/10=6,8$ ; для стали 2412:  $H_{бр.0}=32\text{А/м}$ ,  $H_{бр.90}=49\text{А/м}$ ; -  $K=49/32=1,5$ .

При  $f=400\text{Гц}$  (рис. 2, 3) для стали 3413:  $H_{бр.0}=44\text{А/м}$ ,  $H_{бр.90}=114\text{А/м}$ ; -  $K=114/44=2,6$ ; для стали 2412:  $H_{бр.0}=88\text{А/м}$ ,  $H_{бр.90}=106\text{А/м}$ ; -  $K=106/88=1,2$ . Результаты сведены в табл. 1.

На основе полученных значений  $K$  на рис. 5, а построены зависимости  $K(f)$  (сплошными линиями), показывающие, что с ростом частоты  $f$  анизотропия магнитных свойств уменьшается. При этом две стали с одинаковым химическим составом, но отличающимися кристаллической и ДС, имеют принципиальное различие в характере зависимостей  $K(f)$ .



**Рис. 5. Зависимости  $K(f)$  сталей 3413 и 2412-(а) и зависимости числа полосовых доменов  $n(f)$  –(б) и  $n(B_m)$  –(в) для монокристаллических образцов кремнистой стали**

Рассмотрим три причины изменения степени магнитной анизотропии исследуемых холоднокатаных сталей.

1. Текстурированная сталь обладает крупной полосовой ДС, весьма чувствительной к любому внешнему воздействию, в том числе - к динамике перемагничивания  $dB/dt$ . Для такой стали характерны малые углы рассеяния кристаллитов от направления прокатки  $\alpha$  [7, 8], и по магнитным свойствам они приближаются к монокристаллам. В [7] обсуждаются экспериментальные данные об уменьшении средней ширины доменов текстурированной стали в 2 раза при повышении частоты  $f$  с 30 до 120 Гц. Исследованиями, проведенными в [8] на монокристаллических образцах холоднокатаной кремнистой стали  $50 \times 5 \times 0,3$  мм установлено, что при изменении  $f$  в диапазоне от 60 Гц до 200 Гц и  $B_m = 1$  Тл число полосовых доменов  $n$  при ширине пластины 5 мм увеличилось с 6 до 11 (рис. 5, б). Подобные процессы динамического дробления ДС от  $n=6$  до  $n=9$  при  $f=200$  Гц отмечены и в случае увеличения  $B_m$  от 1,0 Тл до 1,5 Тл (рис. 5, в). Оказывается также, что  $B_m$  и  $f$ , при которых изменяются условия равновесия ДС и начинается ее дробление, связаны дифференциальной зависимостью -  $dB/dt$ . Чем выше  $B_m$ , тем при меньших частотах начинается дробление. И, наоборот, с повышением частоты снижаются значения  $B_m$ , при которых начинается дробление доменов [8].

У текстурированной стали 3413 с ростом  $f$  происходит дробление полосовых доменов, снижается уровень магнитных свойств, преимущественно - в направлении прокатки [8]. Как следствие - снижается магнитная анизотропия. Мелкая ДС стали 2412 не чувствительна к динамике и поэтому не быть причиной изменения  $K(f)$ .

2. Как отмечено ранее, с применением холоднокатаной текстурированной стали появились дополнительные потери в стали [7]. Исследованиями [8] доказывается, что последние обусловлены локальными микровихревыми токами при движении, изгибе, а также зарождении и аннигиляции доменных границ в процессе динамического перемагничивания полосовой ДС. Динамическая петля перемагничивания материала под действием дополнительных потерь уширяется, и кривая намагничивания в зоне наибольших магнитных проницаемостей становится более полой. Так как полосовые домены ориентированы вдоль направления проката, эффект от снижения максимальной магнитной проницаемости материала в значительной степени проявляется при  $\alpha = 0$  и в малой - при  $\alpha = 90^\circ$ . Это - вторая причина снижения магнитной анизотропии стали 3413 с ростом частоты  $f$ .

3. И, наконец, влияние поверхностного эффекта в стальной пластине на зависимости  $H_{м.сп}(B_{мс})$ , которыми фактически являются измеренные магнитные характеристики  $H_{ом}(B_m)$

на переменном токе [9]. По существу, указанные зависимости являются динамическими характеристиками намагничивания пластин в шихтованном сердечнике, приведенными к удельным единицам материала, а не характеристиками материала, из которого изготовлены пластины сердечника. При этом:  $H_{м.зр}$  – амплитуда напряженности на границе (поверхности стальной пластины), определяемая через отношение ампер-витков намагничивающей обмотки  $ImW_n$  к длине средней силовой линии  $L_{ср}$ , а  $B_{мс}$  – амплитуда средней по сечению магнитной индукции, равная отношению амплитуды магнитного потока  $\Phi_m$  к поперечному сечению магнитопровода  $S$  [7]. Такие характеристики правильно использовать для решения задач магнитостатики. При расчете поверхностного эффекта в шихтованном магнитопроводе необходимы характеристики намагничивания материала на исследуемой частоте. Последние возможно определить только на основе численного решения обратной задачи электродинамики [10] по имеющимся характеристикам намагничивания пластины.

Нормализованный подход к расчету электромагнитного поля в стальной пластине [10] позволил обобщить влияние динамики перемагничивания [11], определяемой коэффициентом динамики  $\xi$  по максимальной магнитной проницаемости ( $\mu = \mu_{max}$ ):

$$\xi = d \sqrt{(\pi f \mu \gamma)}, \quad (9)$$

где  $d$  – толщина пластины, [м];  $f$  – частота, [Гц];  $\gamma$  – удельная электропроводность стали, [См/м] и нелинейности магнитной характеристики, определяемой коэффициентом нелинейности  $K_n$ :

$$K_n = \mu_{max} / \mu_{баз}, \quad (10)$$

где  $\mu_{баз} = B_{мс} / H_{м.зр}$ . На основе обобщенных параметров  $K_n$  и  $\xi$  численным путем рассчитано семейство зависимостей  $H_m / H_{м.зр}(\xi_{mat})$  и зависимость между  $\xi$  – пластины и  $\xi$  – материала:  $\xi_{nl}(\xi_{mat})$  (рис. 6).

Для ненасыщенных режимов при условии  $\mu = \mu_{max} = const$  выведены аналитические выражения:

$$H_m / H_{м.зр} = 1 / \xi \sqrt{2(\cosh \xi - \cos \xi) / (\cosh \xi + \cos \xi)}, \quad (11)$$

$$\xi_{nl} = \sqrt{\xi \sqrt{2(\cosh \xi - \cos \xi) / (\cosh \xi + \cos \xi)}}, \quad (12)$$

где  $\xi = \xi_{mat}$ , которым полностью соответствуют аналогичные зависимости на рис. 6 при  $K_n=1$ , полученные расчетным путем.

В [9] предложена методика восстановления характеристик намагничивания материала по измеренным характеристикам пластины при синусоидальном магнитном потоке, различных уровнях насыщения стали  $K_n$  и динамики перемагничивания  $\xi$  по зависимостям (12), (11), представленным на рис. 6. В нашем случае использование зависимостей следующее:

1) по безгистерезисной кривой намагничивания пластины на заданной частоте для индукции  $B_1$  определяется  $\mu_{max}$  и по формуле (9) находится значение  $\xi_{nl}$ ;

2) по графику  $\xi_{nl}(\xi_{mat})$  на рис. 6 или с использованием аналитической зависимости (12) устанавливается значение  $\xi_{mat}$ ;

3) для  $\xi_{mat}$  по графику кривой  $H_m / H_{м.зр}$  на рис. 6 или аналитическому выражению (11) определяется численное значение  $H_m / H_{м.зр}$ , по которому вычисляется значение напряженности материала  $H_m$  при  $B_m = B_1$ .

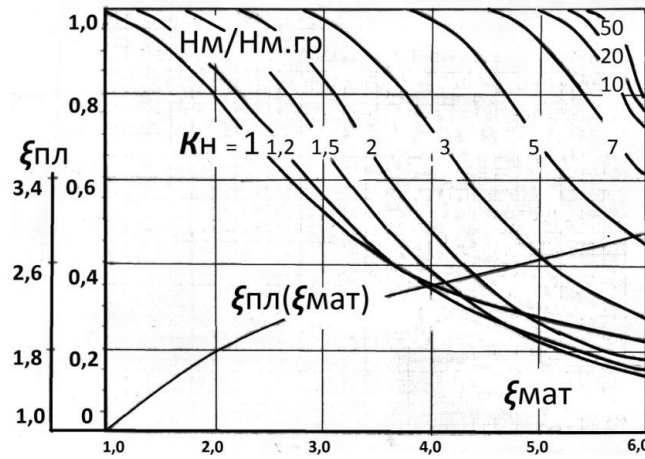


Рис. 6. Зависимости для восстановления динамических характеристик намагничивания материала по характеристикам пластины

В качестве примера все указанные действия для стали 3413 проведены при  $f=50$  Гц. Для  $\alpha=0$  максимальная магнитная проницаемость  $\mu_{\max} = B_1/H_{6г.0} = 0,8/10 = 0,080$  Гн/м. Удельная электропроводность стали с 3% Si  $\gamma = 2 \times 10^6$  См/м [7], толщина пластин  $d = 0,35 \times 10^{-3}$  м. По формуле (9) получаем:  $\xi_{пл.0} = 1,75$ . По значению  $\xi_{пл.0}$  и зависимости  $\xi_{пл}(\xi_{мат})$  на рис. 6 находим:  $\xi_{мат.0} = 1,97$ . Далее по значению  $\xi_{мат.0}$  по зависимости  $H_m/H_{м.зр}(\xi_{мат})$  на рис. 6 определяется отношение  $H_m/H_{м.зр} = 0,792$ . Фактическое значение напряженности материала  $H_{6г.0} = 10 \times 0,792 = 7,9$  А/м.

Для  $\alpha=90^\circ$   $\mu_{\max} = B_1/H_{6г.90} = 0,8/68 = 0,0118$  Гн/м, по формуле (9)  $\xi_{пл.90} = 0,67$ . При  $\xi < 1$  влиянием поверхностного эффекта можно пренебречь [11] и  $H_m = H_{м.зр} = H_{6г.90} = 68$  А/м. Значение коэффициента анизотропии  $K$  материала стали 3413 при  $f=50$  Гц:  $K = 68/7,9 = 8,6$ .

Таблица 1  
Степень анизотропии магнитных свойств  $K$  сталей 3413 и 2412 на различных частотах перемагничивания

Марка стали	СТАЛЬ 3413, $d=0,35$ мм						СТАЛЬ 2412, $d=0,5$ мм					
	0		50		400		0		50		400	
$f$ , Гц	0		50		400		0		50		400	
$\alpha$ , град.	0	90	0	90	0	90	0	90	0	90	0	90
<b>П Л А С Т И Н А</b>												
$H$ , А/м	12	82	21	94	64	154	80	104	83	106	139	163
$H_c$ , А/м	6,0	24	11	26	20	40	51	57	51	57	51	57
$H_{6г}$ , А/м	6,0	58	10	68	44	114	29	47	32	49	88	106
$\mu_{\max}$ , Гн/м	0,13	0,013	0,08	0,011	0,018	0,007	0,027	0,017	0,02	0,016	0,009	0,007
$\xi_{пл}$	0	0	1,75	0,67	2,37	1,47	0	0	1,40	1,13	2,39	2,17
$K$	9,7		6,8		2,6		1,6		1,5		1,2	
<b>М А Т Е Р И А Л</b>												
$\xi_{мат}$	0	0	1,97	0,67	3,86	1,55	0	0	1,47	1,16	3,96	3,09
$H_m/H_{м.гр}$	1	1	0,79	1	0,377	0,905	1	1	0,92	0,965	0,365	0,495
$H_{6г}$ , А/м	6,0	58	7,9	68	16,5	103	29	47	29	47	32	52,5
$K$	9,7		8,6		6,2		1,6		1,6		1,6	



Расчеты для определения  $K$  материала сталей 3413 и 2412 при различных частотах перемагничивания также сведены в табл. 1. Зависимости  $K(f)$  восстановленных характеристик материала для обеих марок сталей (если бы в пластине не было развития поверхностного эффекта) на рис. 5, *a* нанесены пунктиром.

Анализ зависимостей  $K(f)$  показывает, что у текстурованной стали 3413 с крупной полосовой ДС существенные изменения  $K$  пластины связаны с суммарным влиянием всех рассмотренных причин. Зависимость  $K$  материала от  $f$  выражена значительно слабее и связана с действием первых двух причин: микровихревых токов, вызванных движением и изгибом доменных стенок, и дроблением доменов [8]. У стали 2412 с мелкой ДС, не чувствительной к динамике, во всем диапазоне частот изменение  $K$  пластины мало и обусловлено только влиянием поверхностного эффекта. Подтверждается факт, что  $K$  материала стали 2412 в исследуемом диапазоне  $f$  не зависит от частоты перемагничивания (табл. 1). Одновременно доказывается правильность определения  $\mu$  тах по безгистерезисной магнитной характеристике  $H_{gr}(B)$ .

Проведенные следующие исследования изменения  $K(f)$  и их структуры позволяют сделать выводы:

1. Величина  $K$  текстурованных сталей в общем случае зависит от состояния равновесия ДС и развития поверхностного эффекта в пластине, зависящих от частоты перемагничивания.

2. Наибольших значений  $K$  достигает в статике при  $f = 0$ . На частоте  $f = 50$  Гц степень анизотропии  $K$  у трансформаторных сталей существенно уменьшается (рис. 5, *a*). У динамических сталей с исходно малыми уровнями магнитной анизотропии все изменения  $K$  несущественны (табл. 1).

3. Определение значений  $K$  - пластины или  $K$  - материала (табл. 1) следует производить с использованием предложенных рекомендаций для заданной  $f$  и в соответствии с требованиями решаемых задач – магнитостатики или динамики электромагнитного поля.

#### Библиографический список

1. Калинин, Е.В. Исследование характеристик магнитной анизотропии трансформаторной электротехнической стали / В.И. Любимый, Н.Я. Дианова // Электрические машины: сб. научн. тр. – Чебоксары. – 1982. – С. 52–57.
2. Калинин, Е.В. Анализ и математическое описание характеристик намагничивания анизотропных холоднокатаных электротехнических сталей / В.И. Любимый [и др.] // Электричество. – 1985. – № 10. – С. 34–37.
3. Калинин, Е.В. Магнитное поле в кольцевом анизотропном сердечнике // Электрооборудование промышленных установок: межвуз. сборн. научн. тр. – Н. Новгород. – 1998. – С. 127–132.
4. ГОСТ 12119.1-98. Сталь электротехническая. Методы определения магнитных и электрических свойств. Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации.- Взамен ГОСТ 12119-80. Введ.01.07.99. – М.: Изд-во стандартов, 1999. – 4 с.
5. Бессонов, Л.А. Электрические цепи со сталью / Л.А. Бессонов. – М.– Л.: Госэнергоиздат, 1948. – 344 с.
6. Рейнбот, Г. Технология и применение магнитных материалов. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 339 с.
7. Дружинин, В.В. Магнитные свойства электротехнических сталей. – М.: Энергия, 1974. – 240 с.
8. Зайкова, В.А. Доменная структура и магнитные свойства электротехнических сталей / И.Е. Старцева., Б.Н. Филиппов. – М.: Наука, 1992. – 272 с.
9. Калинин, Е.В. Определение кривой намагничивания листовых электротехнических сталей на переменном токе // Электрооборудование промышленных установок: межвуз. сборн. научн. тр. – Горький. – 1988. – С. 113–116.

10. **Калинин, Е.В.** Нормализованный подход к моделированию потерь на перемагничивание в листовой электротехнической стали // Электрооборудование промышленных установок: межвуз. сб. научн. тр. – Горький. – 1986. – С. 159–164.
11. **Ламмеранер, Й.** Вихревые токи / Й. Ламмеранер, М. Штафль. – М.: Энергия, 1967. – 208 с.

*Дата поступления  
в редакцию 16.04.2018*

**E. V. Kalinin**

**MAGNETIC FIELD IN AN ANISOTROPIC LAMINATED MAGNETIC CORE.  
PART 1. RECOMMENDATIONS FOR DETERMINING THE DEGREE OF MAGNETIC  
ANISOTROPY OF COLD-ROLLED ELECTRICAL STEELS**

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

**Purpose:** For cold-rolled electrical steels the generalized parameter  $K$  is introduced – the degree of anisotropy of magnetic properties equal to the ratio of maximum magnetic permeabilities along and across rolling.

**Methodology:** Are three reasons for the decrease  $K$  of transformer steel with increasing frequency  $f$  of magnetic reversal. Notes the decisive influence of the dynamic crushing of the equilibrium strip domain structure and surface effect on dependence of  $K(f)$ .

**Results:** It is proposed to distinguish between  $K$  – of plates for magnetostatic problems, and  $K$  – of material for magnetodynamic problems. For example, for steels 3413 and 2412 describes how to determine  $K$  on the experimental magnetic characteristics.

**Originality/value:** All results are new.

*Key words:* cold-rolled electrical steel, anisotropy of magnetic properties, crushing, the equilibrium strip domain structure, the generalized parameter  $K$  - of the magnetic anisotropy.

УДК 624.074.432(539.374)

С.В. Кожевников, С.А. Пименов

## ПРИМЕНЕНИЕ ПО АРКОН RELIABILITY SOLVER ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Филиал Федерального государственного унитарного предприятия «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова» г. Нижний Новгород  
(филиал ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» «НИИИС им. Ю.Е. Седакова»)

Рассматриваются методы оценки вероятности безотказной работы программно-технических средств автоматизированных систем управления технологическими процессами атомных электростанций, в том числе конструкций радиоэлектронной аппаратуры. Приведена методология оценки вероятности безотказной работы с использованием современного отечественного программного обеспечения АРКОН Reliability Solver. Сделан вывод о его применимости для решения как квазистатических задач, так и задач с динамическими случайными нагрузками. Ввиду общности принципа построения большого числа радио-электронной аппаратуры возможно применение разработанного программного обеспечения для широкого круга конструкций. Приведен алгоритм расчета и общая последовательность действий, необходимых для проведения анализа конструкций для определения вероятности безотказной работы. Предоставлены геометрические и расчетные модели тестовой конструкции. Построены графики откликов конструкции на эксплуатационные механические воздействия.

С применением программного обеспечения АРКОН Reliability Solver проведена отработка рабочего процесса расчета вероятности безотказной работы для конструкций программно-технических средств, разработанных для действующих и вводимых в эксплуатацию атомных электростанций.

*Ключевые слова:* надежность, метод конечных элементов, долговечность, вероятность безотказной работы, радиоэлектронная аппаратура.

### Введение

Определение прочности, вероятности безотказной работы, долговечности конструкций является важным элементом современного этапа развития техники и технологии.

Сложный характер взаимодействия различных составляющих конструкций, в том числе конструкций радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), с окружающей средой, между собой, случайная природа прочности материалов и условий эксплуатации, неточность сведений о характере напряженного состояния и условий разрушения (отказа) элементов конструкции требуют в расчетах на прочность и долговечность применения вероятностных методов анализа и использования в качестве критериев показателей надежности.

В отличие от расчетных задач на прочность, задачи оценки вероятности безотказной работы конструкций – принципиально другой класс. Данный класс задач появляется тогда, когда необходимо учесть стохастичность механических свойств материалов конструкции, случайность геометрических характеристик, нагрузки вероятностного характера.

На текущий момент достаточно хорошо разработаны методы и подходы к оценке вероятности безотказной работы на основе модели «нагрузка-прочность» [1, 3, 4, 8]. Одной из программных реализаций метода оценки вероятности безотказной работы на основе указанной модели является программное обеспечение (ПО) АРКОН Reliability Solver, которое интегрируется в САПР NX.

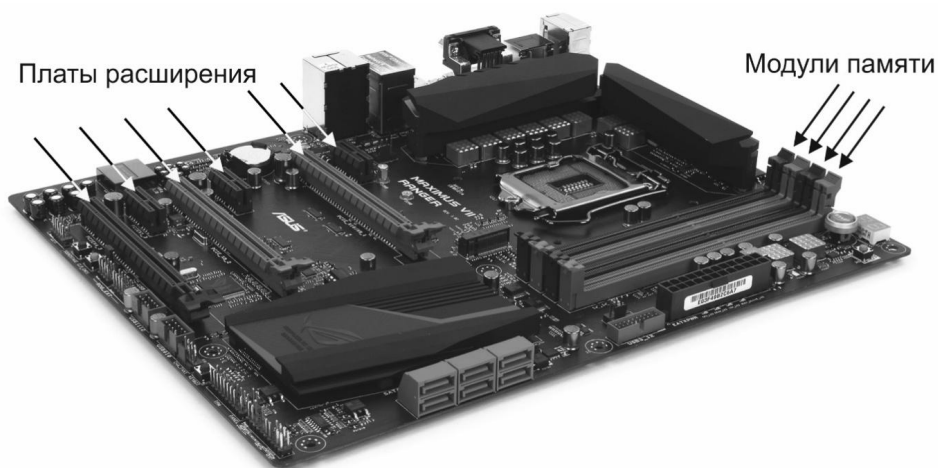
Основная область применения ПО АРКОН Reliability Solver – это решение квазистатических задач надежности, задач, в которых случайные факторы описываются при помощи

конечного числа случайных величин. Область применения не ограничивается случаями, когда нагрузки изменяются медленно (квазистатически). Допускается применение ПО и при случайных динамических нагрузках, представленных в виде детерминированных функций, зависящих от конечного числа случайных величин. Например: ударные воздействия, форма импульса которых неизменна, а амплитуда и длительность представлены как случайные величины; синусоидальная вибрация, где амплитуда и частота – случайные величины. Решатель ПО АРКОН Reliability Solver применим также, когда случайные процессы можно заменить одномерными случайными величинами, образованными из «сечений» случайного процесса. Возможно также решить классическую задачу статистической механики с точки зрения теории надежности, т.е. вычислить вероятность безотказной работы с учетом случайного нагружения (например, заданного в виде широкополосной случайной вибрации) и случайных факторов на уровне геометрии и свойств материалов конструкции.

ПО АРКОН Reliability Solver достаточно универсальное и может быть использовано для проведения расчетов для оценки вероятности безотказной работы достаточно широкого ряда конструкций. Отдельно следует остановиться на ряде специфических задач оценки вероятности безотказной работы применительно к конструкциям РЭА.

Специфика задачи здесь следующая – для достаточно большого числа РЭА, построенных по модульному принципу, допускается так называемый вариативный монтаж электронных компонентов. Например, для специализированных серверных шкафов (шкафов с сетевым оборудованием), в которых располагаются однотипные (или одинаковые) электронные модули, допускается некоторый разброс по вертикали для мест установки оборудования (рис. 2). Аналогичным образом допускается вариативный монтаж плат расширения или «модулей памяти» в РЭА (рис. 1). Все это влияет как на расположение центра тяжести (монтируемое оборудование может иметь значительный вес), собственные частоты, так и на уровень напряжений, деформаций и вероятность безотказной работы конструкции в целом.

Учитывая, что для РЭА, как правило, присутствуют требования по ударовибростойкости, ставится задача оценить вероятность безотказной работы при динамическом нагружении в случае вариативного монтажа электронных компонентов.



**Рис. 1. Расположение плат расширения и «модулей памяти»**

Такая задача решается в ПО АРКОН Reliability Solver путем ввода определяющего параметра в виде случайной координаты установки КЭМ сборочной единицы в общей КЭМ сборке. Случайная координата задаётся в виде вариационного ряда. Далее производится итерационный расчет с учетом всех возможных вариантов событий (вариантов установки электронных компонентов). Кроме этого, могут быть учтены и другие случайные факторы (стохастичность механических свойств материалов конструкции, случайность геометрических характеристик, нагрузки вероятностного характера).

### Пример расчета

В данном разделе рассматривается пример оценки вероятности безотказной работы секции УСУ-НВ из состава программно-технических средств (ПТС) автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) атомных электростанций (АЭС). Разработчиком является филиал ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» «НИИИС им. Ю.Е. Седатова». Оценка вероятности безотказной работы производится с применением ПО ARKON Reliability Solver на базе расчетного процессора NX Nastran [7].

### Постановка задачи и исходные данные

Секция УСУ-НВ представляет собой шкаф с установленными в нем электронными блоками. Масса секции УСУ-НВ составляет 350 кг.

Шкаф состоит из элементов несущей конструкции: прямоугольного каркаса, сваренного из особо жесткого профиля, передней вибростойкой двери с замком, задней вибростойкой двери с замком, верхней съемной крышки, комплекта сейсмостойкого усиления. Дно шкафа состоит из съемных панелей. Внизу каркаса шкафа расположены вводные кабельные панели с гермовводами для подводки внешних соединительных кабелей. Над вводными кабельными панелями установлены шины с кабельными зажимами для закрепления внешних кабелей.

Внутри шкафа установлены 19" адаптеры, на которые монтируется оборудование – электронные модули (рис. 2). Конструктивно это оборудование установлено друг над другом так, чтобы расположенные на их лицевой панели элементы индикации, управления и подключения были видны и доступны при открытой двери. При монтаже допускается некоторый разброс по вертикали для мест установки оборудования. Таким образом, имеет место вариативный монтаж электронных модулей оборудования. Секция УСУ-НВ приведена на рис. 2.

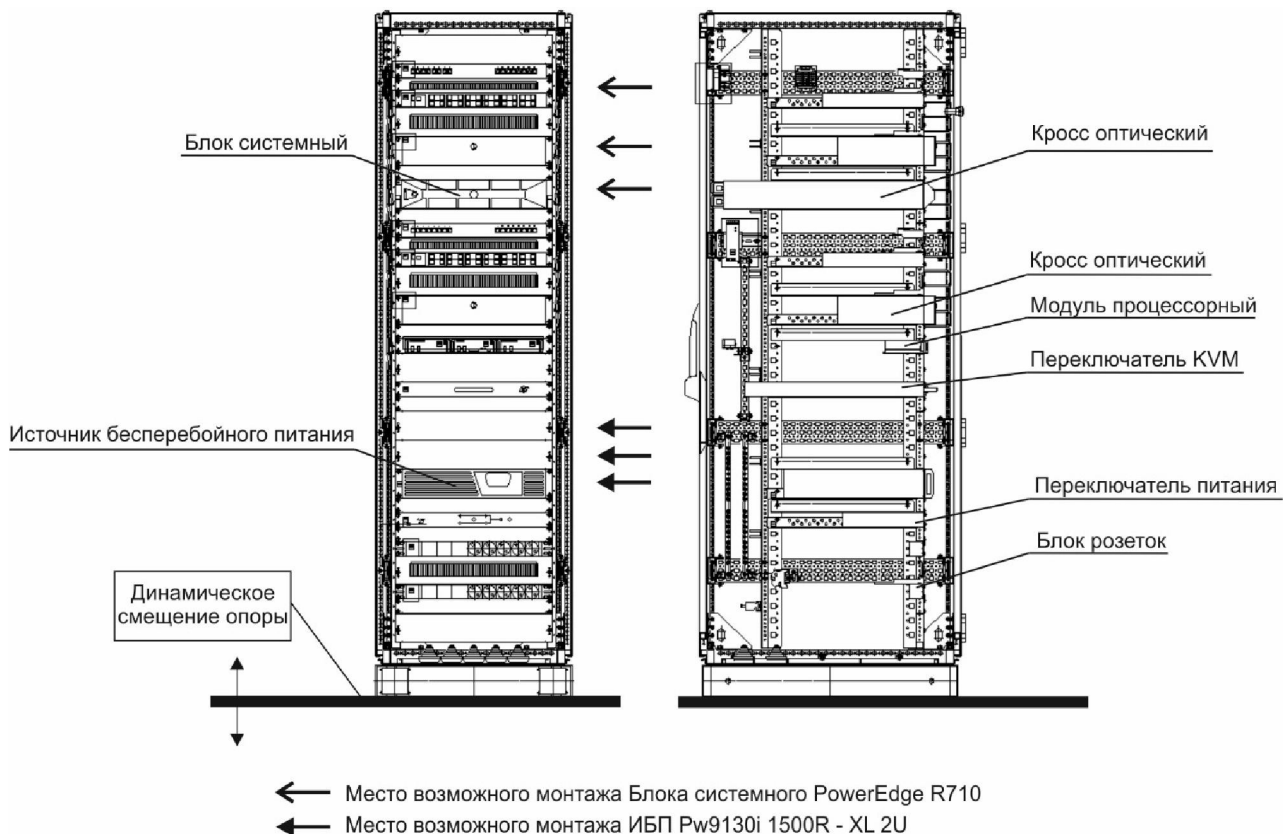


Рис. 2. Расположение оборудования в секции УСУ-НВ

Наиболее тяжелое монтируемое оборудование: блок системный PowerEdge R710 – масса 17,7 кг; источник бесперебойного питания ИБП PW9130i 1500R – XL 2U (ф. POWERWARE) - масса 19,5 кг. При монтаже допускается любое (вариативное) положение установки данного оборудования в рамках заданного диапазона высот (рис. 2). Учитывая, что 19" адаптеры имеют специальные отверстия для крепления по всей длине и расстояние между отверстиями достаточно мало по сравнению с размерами монтируемого оборудования, примем случайную величину в виде координаты установки КЭМ сборочной единицы как непрерывную. При этом расчетные исследования проводятся только для трех положений установки оборудования, остальные положения учитываются путем выравнивания статистического распределения нагрузки исходя из того, что координата установки принята непрерывной случайной величиной. Все возможные состояния приняты равновероятными.

Основная задача – оценить вероятности безотказной работы конструкции ПТС УСУ-НВ при динамическом нагружении в случае вариативного монтажа электронных модулей.

При оценке вероятности безотказной работы речь идет о нарушении работоспособного состояния ПТС как системы (нарушение функционирования приборов, работы электросети, возможные разъединения электрических разъемов, локальные отключения приборов в составе ПТС и т.п., которые расположены на несущей конструкции, в том числе и в местах возможных пластических деформаций). Для несущей конструкции, согласно ГОСТ 25804.3-83, в ТЗ на разработку ПТС вводится критерий работоспособности по достижению уровня предела текучести, а также вводится нижняя граница вероятности безотказной работы.

Материал несущей конструкции импортный, по своим характеристикам соответствует отечественной стали 20 с учетом химико-термической обработки (табл. 1).

Вариационный ряд параметра  $\sigma_T$  определяется по результатам статистических данных входного контроля.

Таблица 1

## Физические характеристики конструкционного материала

Е, Па	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\mu$	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
$2 \cdot 10^{11}$	290-340	490-590	0,28	7820

В табл. 1 основные обозначения: Е – модуль Юнга;  $\sigma_T$  – предел текучести;  $\sigma_B$  – предел прочности;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $\rho$  – плотность.

Условия динамического нагружения (воздействие в вертикальном направлении, динамическое смещение опоры, рис. 1) представлены в виде обобщенного спектра отклика от сейсмического воздействия уровня ПЗ на отметке 0.00 м и до отметки +20.00 м включительно (рис. 3).

Оценка вероятности безотказной работы конструкции ПТС методом статистического моделирования с вычислением НДС на основе МКЭ [2, 7] проводилась на ЭВМ с применением ПО АРКОН Reliability Solver – расчетный модуль для САПР NX версии 7 или более. Вычислительная технология и общий алгоритм действий представлены в [4, 5].

На первом этапе в САПР NX строится параметрическая трехмерная модель (рис. 2) с учетом определяющих параметров: предел текучести; вариативные координаты установки блока системного PowerEdge R710 и источника бесперебойного питания ИБП PW9130i 1500R – XL 2U. Итого 9 рассматриваемых вариантов событий (event 1-9).

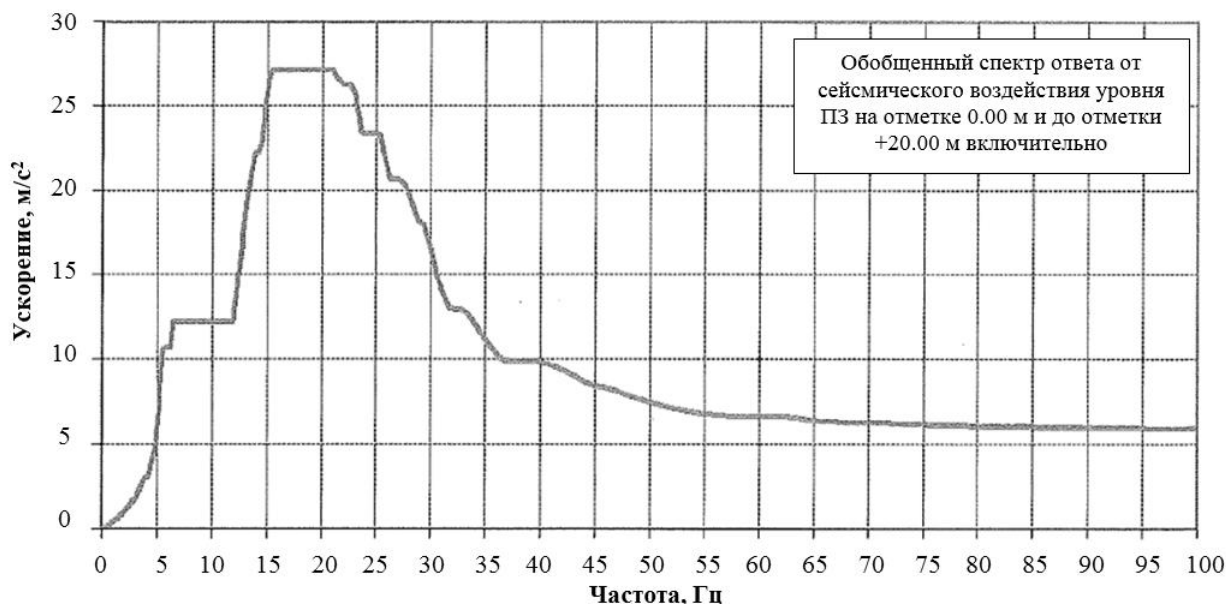
На втором этапе строится КЭМ и РМ конструкции (рис. 4).

На третьем этапе производится итерационный расчет на динамическое воздействие с

учетом рассматриваемых вариантов событий (event 1-9). Динамический расчет производится в два расчетных шага для варианта события:

- 1 - расчет собственных частот;
- 2 - расчет для контрольного узла динамического отклика модели конструкции на нагрузку в частотной области.

В качестве контрольного узла рассматривается один из узлов вместе с максимальными напряжениями (это место принято в качестве слабейшего звена конструкции).



**Рис. 3. Обобщенный спектр ответа от сейсмического воздействия уровня ПЗ на отметке 0.00 м и до отметки +20.00 м включительно**  
**Проведение оценки вероятности безотказной работы конструкции ПТС**

Результат расчета собственных частот для одного из вариантов событий представлен на рис. 5. Положение контрольного узла (узел № 48326) показано на рис. 6. Графики откликов в контрольном узле с учетом рассматриваемых вариантов событий (event 1-9) представлены на рис. 7. На основе графиков откликов в контрольном узле формируется вариационный ряд нагрузки для алгоритмов ПО АРКОН Reliability Solver. Вариационный ряд нагрузки с учетом рассматриваемых вариантов событий (event 1-9) представлен в табл. 2.

На четвертом этапе с учетом вариационных рядов нагрузки и несущей способности производится расчет оценки вероятности безотказной работы с применением ПО АРКОН Reliability Solver. Результаты расчета приведены на рис. 8, 9.

На рис. 8 приведены выравненные статистические распределения нагрузки и несущей способности. Для выравнивания в ПО АРКОН Reliability Solve используются специальные аппроксимирующие технологии. Выравнивание статистических данных производится автоматизировано с применением полиномиальных функций, полученные функции проверяются по критерию Пирсона [6] и критерию Колмогорова [6].

Следует заметить, что всегда имеет место наличие некоторых расхождений между теоретической кривой (как бы она хорошо подобрана не была) и статистическим распределением. Является ли это расхождение приемлемым с учетом ограниченного объема наблюдений (выборки) или расхождение значительное, связанное с тем, что подобранная кривая плохо выравнивает данное статистическое распределение? Для ответа на этот вопрос служат критерии согласия, и в данном случае, как ранее было заявлено, это критерий Пирсона [6] и критерий Колмогорова [6]. В данном расчете оба критерия показали, что расхождение незначительное.

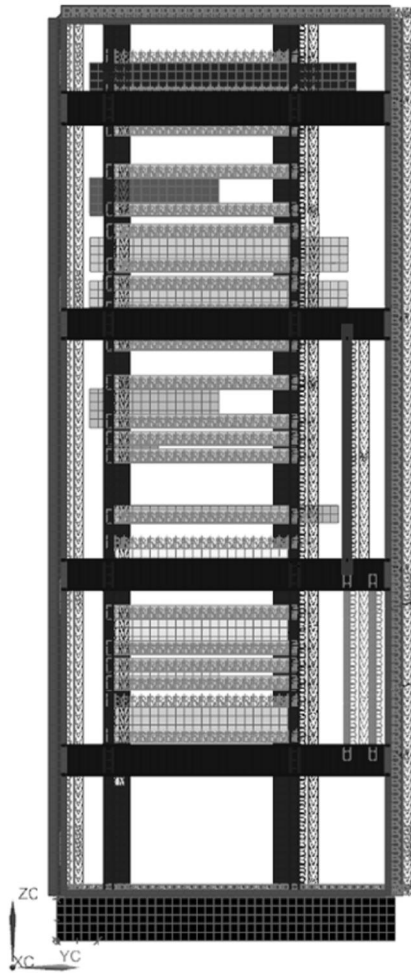


Рис. 4. Конечно-элементная модель конструкции

assembly1\_sim1 : Solution 1 Результат  
 Subcase - Dynamics, Режим 34, 3.448e+001 Гц  
 Перемещение - По узлам, Величина  
 Мин. : 0.000, Макс. : 0.694, Единицы = мм  
 Деформация : Перемещение - По узлам Величина

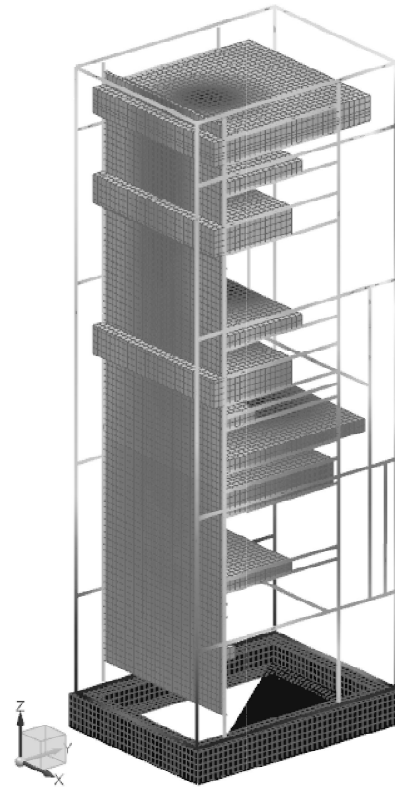


Рис. 5. Результат расчета собственных частот

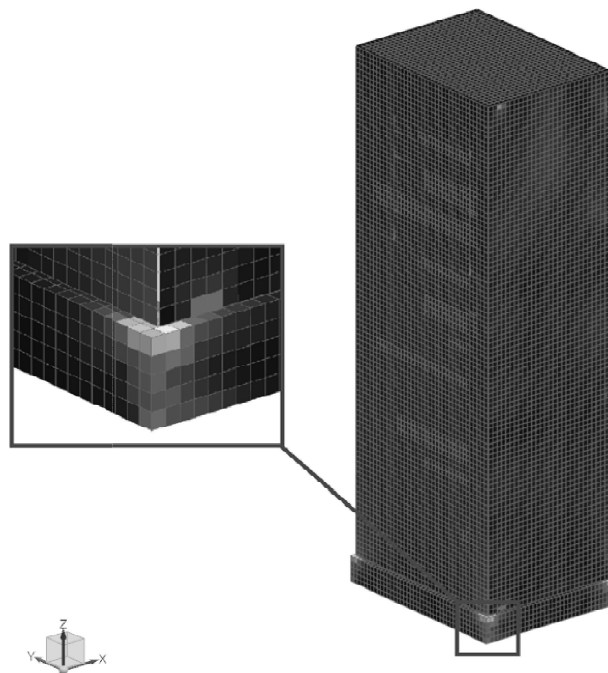
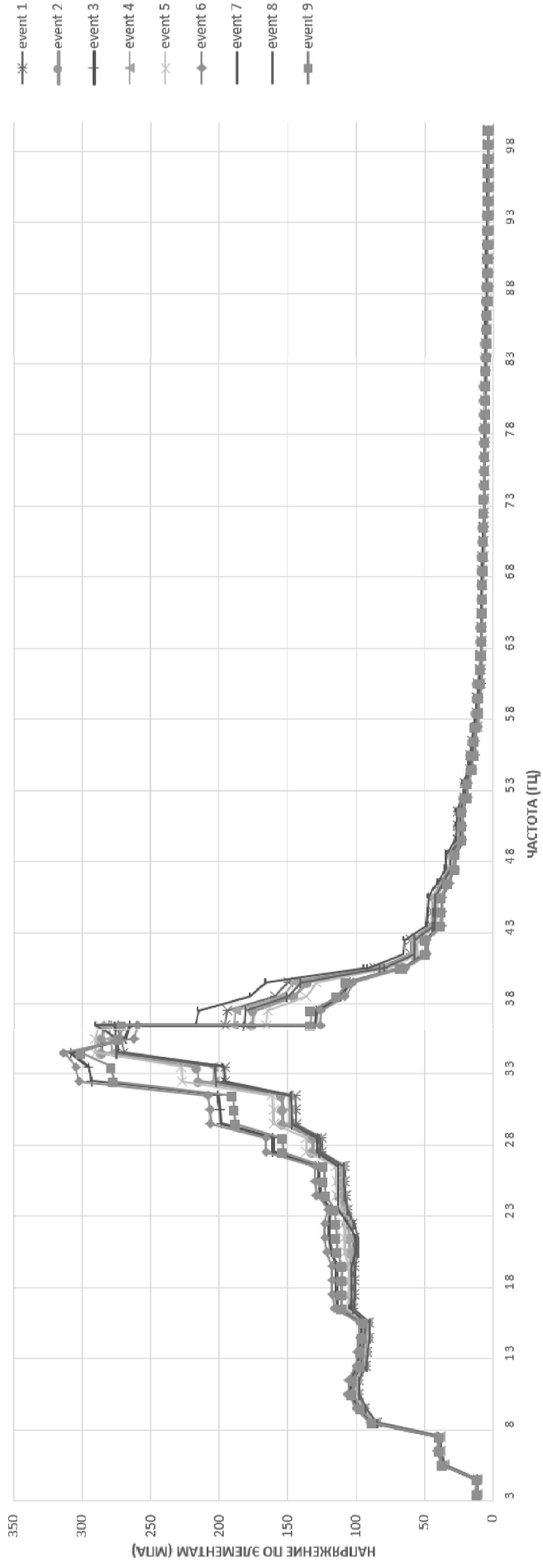


Рис. 6. Положение контрольного узла (узел № 48326)





**Рис. 7. Графики откликов в контрольном узле с учетом возможных вариантов событий (event 1-9)**

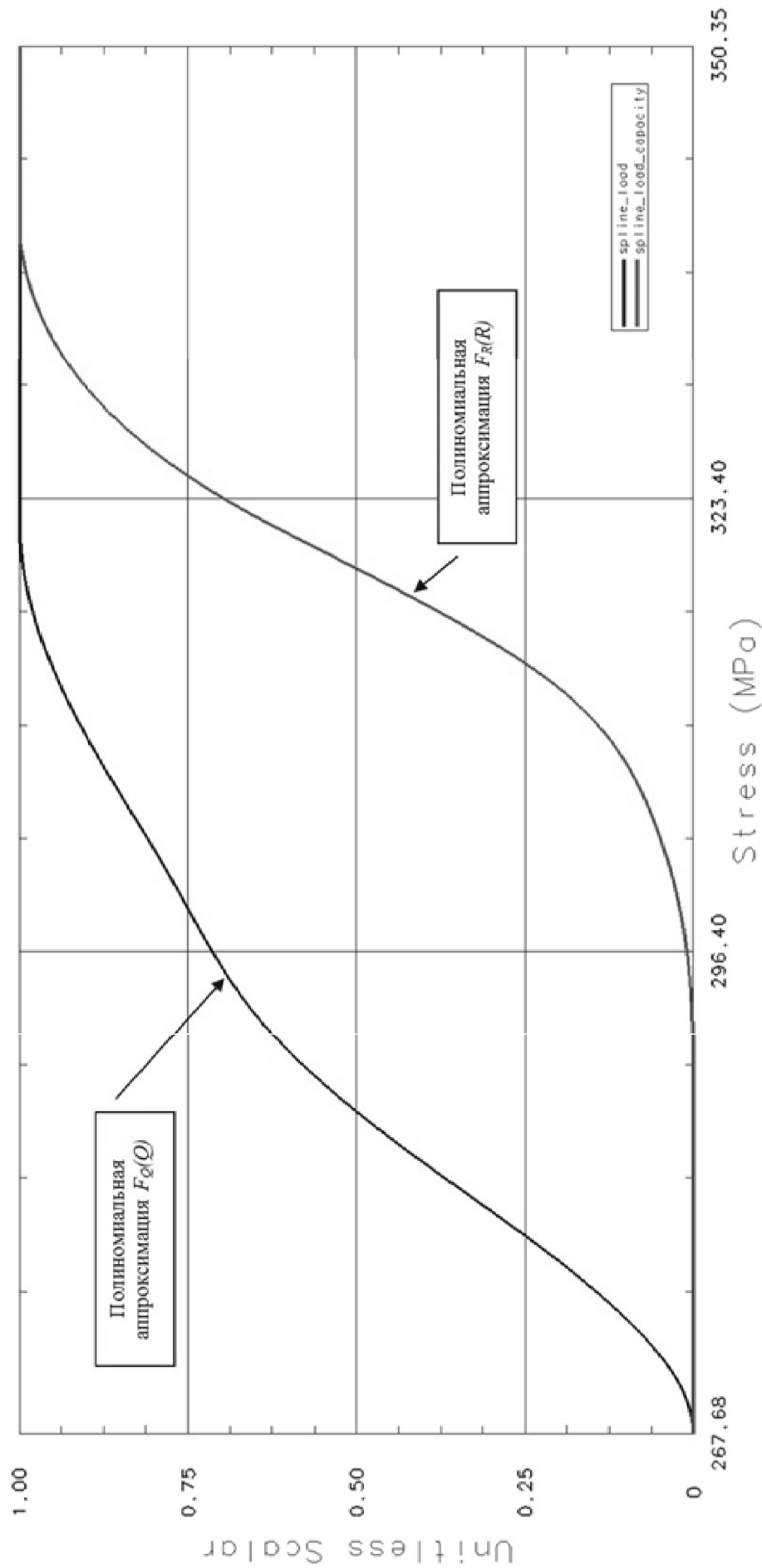


Рис. 8. Эмпирическая функция распределения нагрузки  $F_Q(Q)$  - полиномиальная аппроксимация, полученная с применением метода статистического моделирования на основе расчетов напряжений МКЭ, и эмпирическая функция распределения несущей способности  $F_R(R)$  - полиномиальная аппроксимация

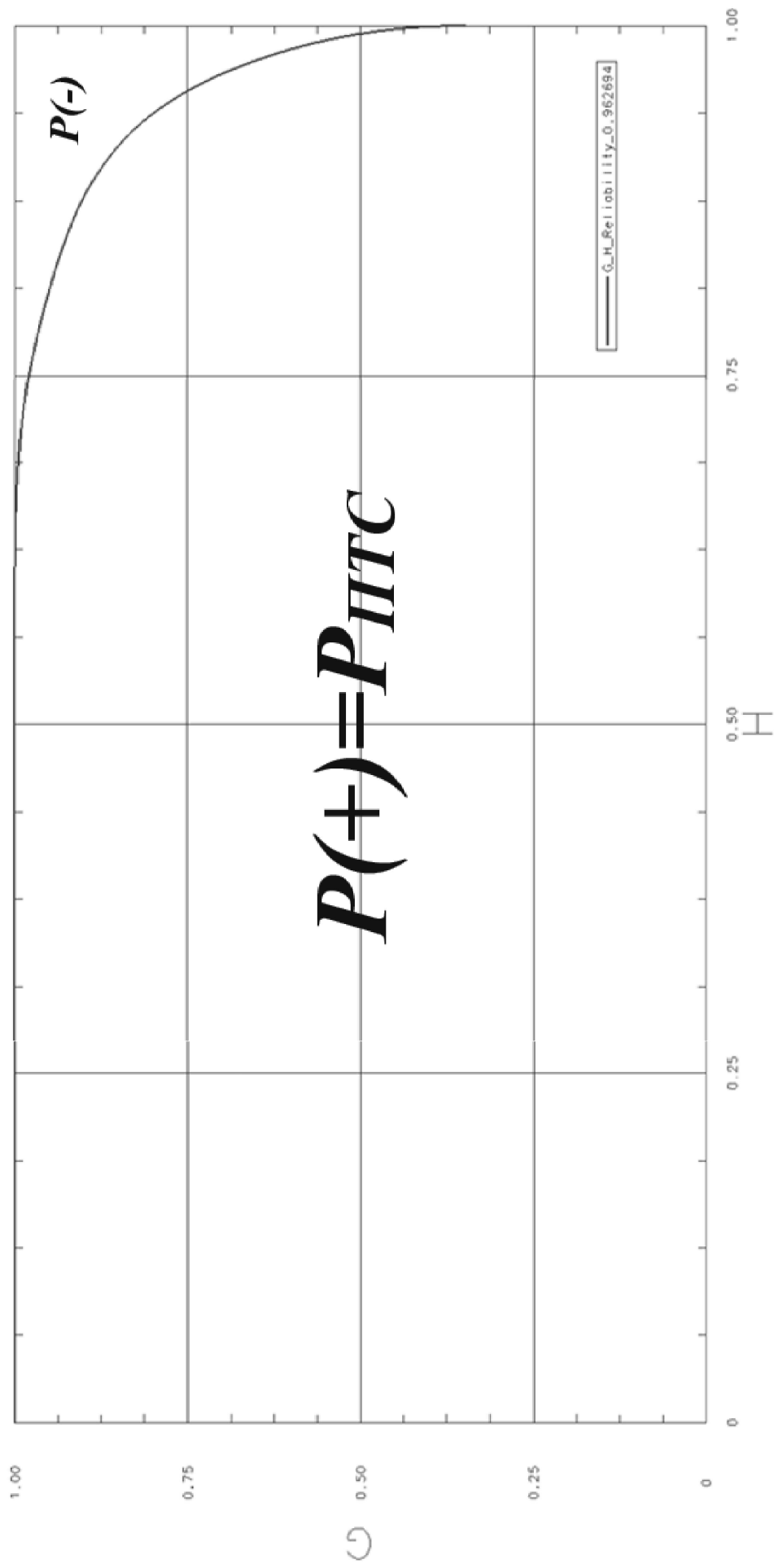


Рис. 9. Графики зависимости  $G$  от  $H$ , полученные для функций  $F_R(R)$  и  $F_Q(Q)$  при их полиномиальной аппроксимации по методу наименьших квадратов с алгоритмом автоматического выбора порядка полинома

Таблица 2

## Вариационный ряд нагрузки с учетом возможных вариантов событий (event 1-9)

Возможные варианты событий (event 1-9)	Частота, Гц	КУ № 48326, напряжения по Мизесу, МПа
1	36.21	277.1
2	35.62	286.0
3	34.48	309.2
4	36.21	281.5
5	34.48	290.4
6	34.48	313.4
7	36.21	290.7
8	36.21	276.3
9	34.48	301.0

## Анализ результатов

С учетом исходных данных, вероятность безотказной работы секции УСУ-НВ в случае вариативного монтажа электронных модулей, полученная с применением метода статистического моделирования на основе вычисления напряжений МКЭ, составляет:  $P_{ПТС} = 96.2694\%$  - при полиномиальной аппроксимации эмпирических функций распределения  $F_R(R)$  и  $F_Q(Q)$  с помощью метода наименьших квадратов с алгоритмом автоматического выбора порядка полинома (рис. 8, 9).

Учитывая, что в качестве несущей способности выбран предел текучести, полученная вероятность безотказной работы  $P_{ПТС} = 96.2694\%$  секции УСУ-НВ, при динамическом нагружении (в виде обобщенного спектра отклика от сейсмического воздействия уровня ПЗ) и вариативном монтаже электронных модулей является удовлетворительной (принимаемая в ТЗ нижняя граница вероятности безотказной работы несущей конструкции ПТС при сейсмическом воздействии  $[N]=95\%$ ).

## Заключение

ПО АРКОН Reliability Solver на базе расчетного процессора NX Nastran [7] достаточно хорошо себя зарекомендовало в филиале ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» «НИИИС им. Ю.Е. Седакова» и использовалось при проведении расчетной отработки следующих конструкций ПТС: секции ОМС и СУЗ ЭБ №3 Ростовской АЭС (отчет № 199-974/42-01.03.2013); секции СНЭ, ЭЧ и СУЗ ЭБ №1,2 Ленинградской АЭС-2 (отчет № 199-801-07-85-15.11.2013); секции СНЭ, ОМС ЭБ №4 Белоярской АЭС (отчет № 199-801-07-88-29.11.2013); опытный образец секции ПБ Нововоронежской АЭС-2 (отчет № 199-801-07-12-17.02.2014).

## Библиографический список

1. Волков, В.М. Надежность машин и тонкостенных конструкций: учеб. пособие / В.М. Волков; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2011. – 365 с.
2. Зенкевич, О.К. Метод конечных элементов в технике / О.К. Зенкевич. – М.: Мир, 1975. – 541 с.
3. Капур, К. Надежность и проектирование систем/ К. Капур, Л. Ламберсон. – М.: Изд-во «Мир», 1980. – 604 с.
4. Пименов, С.А. Применение численных методов для оценки надежности конструкций [Текст]/ С.А. Пименов // Новые промышленные технологии. – 2010. – №3. – С. 55–57.
5. Пименов, С.А. Применение рекурсивных алгоритмов при оценке надежности конструкций / С.А. Пименов, И.Ю. Палкин // Научно-технические технологии. – 2011. – №4. – С. 39–43.
6. Зажигаев, Л.С. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента / Л.С. Зажигаев, А.А. Кишьян, Ю.И. Романиков – М.: Атомиздат, 1978. – 231 с.

7. NX Nastran Numerical Methods User's Guide [Electronic version]/ -UGS, 2005. - From: [http://docs.plm.automation.siemens.com/data\\_services/resources/nxnastran/10/help/en\\_US/custom/numerical/numerical.pdf](http://docs.plm.automation.siemens.com/data_services/resources/nxnastran/10/help/en_US/custom/numerical/numerical.pdf)
8. Probabilistic Design Methodology for Composite Aircraft Structures, National Technical Information Service (NTIS), Springfield, Virginia 22161, June 1999/ [Electronic version]/ - From: <http://www.tc.faa.gov/its/worldpac/techrpt/ar99-2.pdf>

*Дата поступления  
в редакцию 12.04.2018*

**S.V. Kozhevnikov, S.A. Pimenov**

**APPLICATION SOFTWARE ARCON RELIABILITY SOLVER FOR ASSESSMENT  
OF RELIABILITY OF SOFT-AND-HARDWARE AUTOMATED PROCESS CONTROL  
SYSTEM OF NUCLEAR POWER PLANTS**

Branch of Federal State Unitary Enterprise «Russian Federal Nuclear  
Center-All-Russian Research Institute of Experimental Physics»  
«Research Institute of Measuring Systems named after Yu.Ye. Sedakov»,  
(Branch of FSUE «RFNC-VNIIEF» «NIIS named after Yu. Ye. Sedakov»)

**Purpose:** Calculation of quasi-static reliability problems where random factors are described by finite numbers of random variables based on ARCON Reliability Solver software integrated in Siemens NX. Assessment of failure-free operation probability under dynamic loading in case of variable assemblage of radio-electronics electronic components.

**Design/methodology/approach:** The problem is solved by input of a defining parameter as a random coordinate of mounting an assembly unit in a general finite-element model of assembly unit. A random coordinate is assigned as variational series. Afterwards, iterative calculation is done taking into account all possible variants of electronic components installation. While solving the problem, an accent can be also made on the following random factors: mechanical features stochasticity of structural materials, randomness of geometrical characteristics, probabilistic loads.

**Conclusions:** Based on the calculation results the achieved probability of failure-free operation under dynamic loading and variable assemblage of electronic modules is considered satisfactory.

*Key words:* dependability, finite elements method, durability, reliability, radio-electronic equipment.

УДК 621.039.58

Ю.А. Мухряков<sup>2</sup>, А.В. Дунцев<sup>1</sup>, В.В. Андреев<sup>1</sup>, Ю.В. Кучеров<sup>2</sup>, В.Н. Хохлов<sup>1</sup>**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НА ЧАСТОТУ ПОВРЕЖДЕНИЯ АКТИВНОЙ ЗОНЫ  
ОТ ВНЕДРЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ НАСОСНЫХ УСТАНОВОК  
И ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРОВ НА АЭС**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева<sup>1</sup>,  
Акционерное общество Инжиниринговая компания «АСЭ», Нижний Новгород<sup>2</sup>

Посвящена исследованию влияния мероприятий, нацеленных на уменьшение последствий запроектных аварий на частоту повреждения топлива в активной зоне реактора на атомных электрических станциях. В качестве мероприятий рассматривались: обеспечение аварийного электроснабжения (при помощи передвижных дизельных генераторов) и меры против потери систем конечного поглотителя тепла (при помощи мобильных насосных установок). Инструментом исследования был выбран вероятностный анализ безопасности, выполненный с помощью программного обеспечения Risk Spectrum PSA. При разработке логико-вероятностной модели энергоблока в качестве основы использовались логические элементы – деревья отказов систем безопасности (систем отвечающих за приведение энергоблока в безопасное состояние).

Также был определен перечень инициирующих событий и проведено моделирование аварийных последовательностей. Выполнена качественная и количественная оценка уровня безопасности энергоблока с учетом систем и мероприятий, направленных на снижение последствий запроектных аварий. Проведен анализ результатов, сделаны выводы о том, что внедрение предлагаемых мероприятий даст возможность уменьшить вероятность повреждения активной зоны, выявлены элементы, отказ которых вносит наибольший вклад в определенную вероятность, а также найдены «слабые», с точки зрения безопасности, места.

*Ключевые слова:* вероятностный анализ безопасности, атомная электростанция, мобильная насосная установка, конечный поглотитель тепла, активная зона.

11 марта 2011 года на японской атомной электростанции «Фукусима-Дайичи» произошла авария, возникшая в результате разрушительного землетрясения. Эта авария заставила человечество повторно убедиться, насколько сильными и опасными могут быть последствия аварии на АЭС и в тоже время подорвала доверие к атомной энергетике. Разрушительные последствия цунами и землетрясений были усугублены радиационным загрязнением, вызванным ядерной аварией, исходы которой устранять придется еще долгие годы и с огромными затратами средств. Также нанесен большой ущерб окружающей среде. В связи с недопущением подобных инцидентов, государства, использующие атомные электростанции, инвестируют финансовые и другие ресурсы в повышение безопасности и надежности как действующих, так и сооружаемых атомных электростанций. На АЭС, эксплуатируемых в России, проводились так называемые стресс-тесты, по результатам которых были предложены специальные мероприятия, целью которых является недопущение подобных аварий.

В данной работе как запроектные рассматривались следующие аварии, причинами которых являлись внешние факторы:

- полная потеря электроснабжения энергоблока, включая внешние и внутренние генерирующие мощности;
- утрата поглотителя тепла, отводящего остаточные тепловыделения от топлива в активной зоне (АЗ), бассейне выдержки (БВ) и мест хранения отработанного ядерного топлива (ОЯТ) (система технической воды ответственных потребителей).

Для повышения безопасности энергоблока АЭС при возникновении инициирующих событий (ИС), рассмотренных ранее, реализовывались следующие мероприятия:

- запитка потребителей, принимающих участие в управлении запроектными авариями от передвижной дизель-генераторной установки (ПДГУ);
- использование передвижной насосной установки (ПНУ) для подачи воды в парогенератор (ПГ);

- использование ПНУ для подачи воды в бассейн выдержки (БВ);
- отвод тепла, посредством подачи воды от ПНУ, от потребителей реакторного отделения (РО), принимающих участие в обеспечении безопасности энергоблока.

Возникает вопрос: как оценить уровень безопасности, как определить соответствует ли уровень безопасности того или иного проекта действующим нормам, а также выявить вклад в повышение безопасности того или иного технического решения. Кроме того, неплохо было бы иметь возможность определить слабые, с точки зрения безопасности, места в проекте и предусмотреть организационные и технические мероприятия по их «усилению», а также выяснить, насколько сбалансированы проектные решения. Основным инструментом, с помощью которого можно получить ответы на поставленные вопросы, является вероятностный анализ безопасности (ВАБ).

ВАБ преследует следующие цели [1, 2]:

- определение уровня безопасности. Определение частоты повреждения активной зоны, по величине которой определяется уровень безопасности;
- оценка сбалансированности проектных решений.

Моделирование аварийных последовательностей (АП) или моделирование путей протекания аварий выполняется для определения полных множеств конечных состояний без повреждения или с повреждением ядерного топлива для каждой группы инициирующих событий (ИС), входящих в перечни групп ИС.

В качестве методологической основы для моделирования АП используется метод деревьев событий. Дерево событий – это логическая диаграмма, определяющая возможные пути протекания аварийных сценариев, а также показывающая возможные конечные состояния энергоблока без повреждения и с повреждением ядерного топлива. Графически дерево событий изображается в виде таблицы состояний и собственно логической диаграммы АП в форме разомкнутого бинарного графа или дерева. Пример дерева событий приведен на рис. 1.

Иницирующее событие	Функциональное событие1	Функциональное событие 2	Функциональное событие 3	Функциональное событие4	No.	Freq.	Conseq.	Code
IE	FUNC_EV_1	FUNC_EV_2	FUNC_EV_3	FUNC_EV_4	1		OK	
					2		CD1	FUNC_EV_3
					3		OK	FUNC_EV_2
					4		CD1	FUNC_EV_2-FUNC_EV_4
					5		OK	FUNC_EV_1
					6		CD1	FUNC_EV_1-FUNC_EV_3

Рис. 1. Пример дерева событий

Интенсивность реализации  $i$ -й ветви для заданного иницирующего события определяется следующим образом:

$$P_{Ci} = I_i \cdot Q_i$$

где  $I_i$  – интенсивность  $i$ -го иницирующего события;  $Q_i$  – вероятность реализации определенных состояний систем, образующих  $i$ -ю ветвь дерева событий.

Для проведения количественных расчетов сформированы базы данных со значениями частот инициирующих событий, показателями надежности оборудования и элементов по параметрам моделей отказов общего вида. База данных по значениям частот ИС формировалась с использованием следующих источников:

- данные по частотам ИС, полученные из опыта эксплуатации АЭС с ВВЭР-1000;
- показатели надежности арматуры из нормативно-технической документации [3];
- результаты расчетов частот течей из первого контура на основе вероятностно-прочностных моделей;

- результатов оценок частот с применением моделей надежности систем.

Основные задачи анализа надежности систем состоят в разработке моделей надежности систем с применением метода деревьев отказов [4]. Дерево отказов – это логический граф, который позволяет определить возникновение основного или вершинного события, которое заключается в отказе системы осуществить предназначенную функцию по причине комбинаций первичных (базисных) событий, которые моделируют отказы отдельных элементов системы.

Дерево отказов – это графическое построение, с помощью которого моделируются отказы исполнительных (защитных и локализирующих), управляющих и обеспечивающих систем. В качестве базисных событий деревьев отказов рассматриваются отказы оборудования этих систем, а также ошибки персонала. Связь событий в дереве отказов осуществляется с помощью логических операторов «и», «или» и др. Пример дерева отказов приведен на рис. 2.

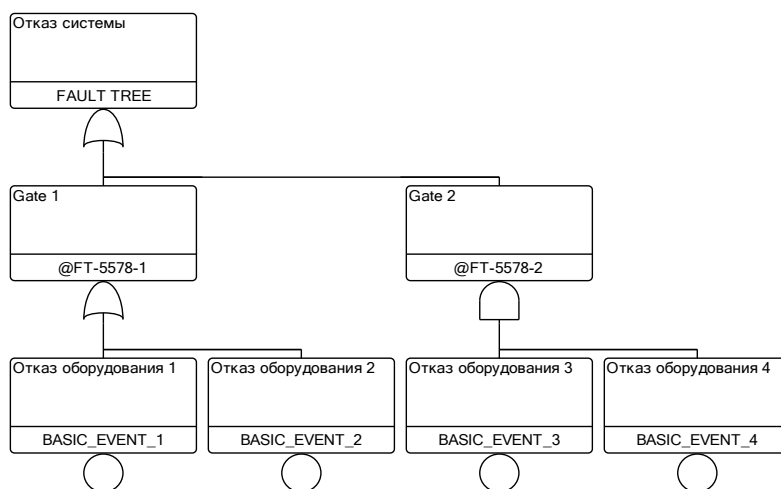


Рис. 2. Пример дерева отказов

Разработка интегральной вероятностной модели включает следующие этапы:

- объединение вероятностно-логических моделей АП и систем (деревьев событий и деревьев отказов) с учетом взаимосвязей;
- разработка функциональных деревьев отказов и других частей логики для адекватного отражения всех необходимых взаимосвязей и зависимостей;
- включение всех вероятностных показателей, определенных в рамках задач анализа данных, определения частот ИС, анализа ошибок персонала;
- предварительные расчеты для выявления зависимых ошибок персонала и учет зависимостей ошибок персонала в модели для окончательного расчета.

В представленной работе для проведения исследования был выбран энергоблок АЭС с РУ-320 (Ростовская АЭС- 2).

Для проведения исследования, выполняемого в рамках данной работы, была разработана логико-вероятностная модель с помощью программного кода Risk Spectrum PSA, не учитывающая введение мероприятий, направленных на снижение последствий запроектной аварии. После этого разрабатывались новые деревья отказов, моделирующие отказы систем, которые предусмотрены внедрением рассмотренных мероприятий, вносились изменения в деревья событий. Новые деревья отказов и измененные деревья событий интегрировались в базовую логико-вероятностную электронную модель энергоблока. Графический интерфейс программного кода Risk Spectrum PSA запрограммирован в MS C#, все алгоритмы, используемые для численного анализа, запрограммированы в MS C++. Основные математические методы включают теорию множеств, Булеву алгебру и теорию вероятности.

Полученные в результате настоящего исследования данные позволяют оценить влия-



ние мероприятий по снижению последствий ЗПА на уменьшение вероятности повреждения топлива в АЗ и БВ.

### **ИС с полной потерей электроснабжения энергоблока, включая внешние и внутренние генерирующие мощности**

Целью внедрения предлагаемых мероприятий является возможность питания потребителей, участвующих в приведении энергоблока в безопасное состояние, от ПДГУ.[5]

От передвижного дизель-генератора предусмотрено электроснабжение насосов химически обессоленной воды, насосов системы аварийного охлаждения активной зоны низкого давления (САОЗ НД), насосов системы аварийного ввода бора в первый контур, которое выполняется следующим образом: от распределительного шкафа ПДГУ питание подается на распределительные коробки, монтируемые со стороны улицы на стене реакторного отделения (РО), из коробки отдельными кабельными трассами питание подается к потребителям.

В состав ПДГУ входят силовые кабели и разъемы для присоединения к сети АЭС соответствующего напряжения для электроснабжения оборудования (систем важных для безопасности) СВБ при ЗПА с учетом подключения потребителей на разных каналах систем безопасности (СБ). Кабельные трассы от распределительных коробок до потребителей проложены, согласно *базовому* проекту, и готовы, в случае возникновения аварийной ситуации, к отключению. Для аппарата бесперебойного питания информационно-вычислительной системы (АБП ИВС), АБП СБ, электродвигателей насосов дренажной системы машзала и насоса химически обессоленной воды предусмотрено электроснабжение от передвижного дизель-генератора, которое осуществляется следующим образом: от распределительного шкафа передвижного дизель-генератора напряжение подается на распределительные коробки, монтируемые на наружной стене РО. Кабели от шкафов ПДГУ до распределительных коробок по наружной стене РО поставляются комплектно с передвижными дизель-генераторами. При выполнении анализа надежности было разработано дерево отказов (ДО), включающее отказ передвижного дизель-генератора и возможные ошибки персонала по включению ПДГУ в работу.

### **Реконструкция системы подачи воды в ПГ от ПНУ**

Рассматриваемая реконструкция представляет собой внедрение дополнительных технологических и конструктивных элементов, обеспечивающих возможность подачи химически обессоленной воды из баков аварийного запаса химически обессоленной воды и баков дистиллята в любой из парогенераторов с помощью автономного источника – передвижного насосного устройства.

Для реализации данного мероприятия предусмотрена разработка схемного решения по прокладке трубопроводов и гибких шлангов, соединяющих оборудование в следующей последовательности: баки – ПНУ – штатный трубопровод подачи аварийной питательной воды в ПГ. При выполнении анализа надежности построены деревья отказов, моделирующие отказы передвижного насосного устройства, запорной арматуры, открытие/закрытие которой требуется для успешной реализации требуемых функций.

### **Реконструкция системы подачи воды в БВ от ПНУ**

Рассматриваемая реконструкция представляет собой внедрение дополнительных технологических и конструктивных элементов, обеспечивающих возможность подачи раствора борной кислоты из баков очищенного борного концентрата и борного раствора из бака-приямка в бассейн выдержки при помощи мотопомпы.

Для реализации данного мероприятия предусмотрена разработка схемного решения по организации подачи раствора борной кислоты от баков запаса раствора борной кислоты в БВ, а также в напорный трубопровод спринклерной системы, способной осуществлять подпитку бассейна выдержки по штатной схеме. На всех вновь монтируемых трубопроводах

предусмотрена установка запирающей арматуры с ручным приводом, что позволяет производить сборку схемы в условиях обесточивания.

При выполнении анализа надежности построены дерево отказов, моделирующее отказы передвижного насосного устройства, запорной арматуры, открытие/закрытие которой требуется для успешной реализации требуемых функций.

### Реконструкция системы подачи охлаждающей воды мотопомпой к потребителям РО

Рассматриваемая реконструкция представляет собой внедрение дополнительных мероприятий, обеспечивающих возможность подачи воды из каналов водоема-охладителя в напорные трубопроводы каналов системы технической воды ответственных потребителей посредством мотопомпы. Для этого реализованы следующие мероприятия: в колодцах рядом с РО осуществлено соединение трубопровода с трубопроводами каждого канала системы охлаждения ответственных потребителей. Конец трубопровода оборудован специальным устройством, обеспечивающим быстрое подключение к трубопроводу от напорного трубопровода мотопомпы. При выполнении анализа надежности построены деревья отказов, моделирующие отказы передвижного насосного устройства и запорной арматуры, открытие/закрытие которой требуется для успешной реализации требуемых функций.

### Количественный анализ разработанной логико-вероятностной расчетной модели, анализ результатов

В результате анализа доминирующих аварийных последствий с учетом мероприятий, направленных на снижение последствий запроектных аварий в базовом вероятностном анализе безопасности, установлено, что значительный вклад в частоту повреждений активной зоны (ЧПАЗ) в обоих ВАБ вносят аварийные последовательности с отказом САОЗ НД в ИС «Малая течь из первого во второй контур DN ≤13», АП с отказом системы аварийного расхолаживания в режиме расхолаживания совместно с отказом режима «сброс-подпитка» в ИС «Большая течь паропровода в неизолируемой от ПГ части вне ГО» (рис. 3).

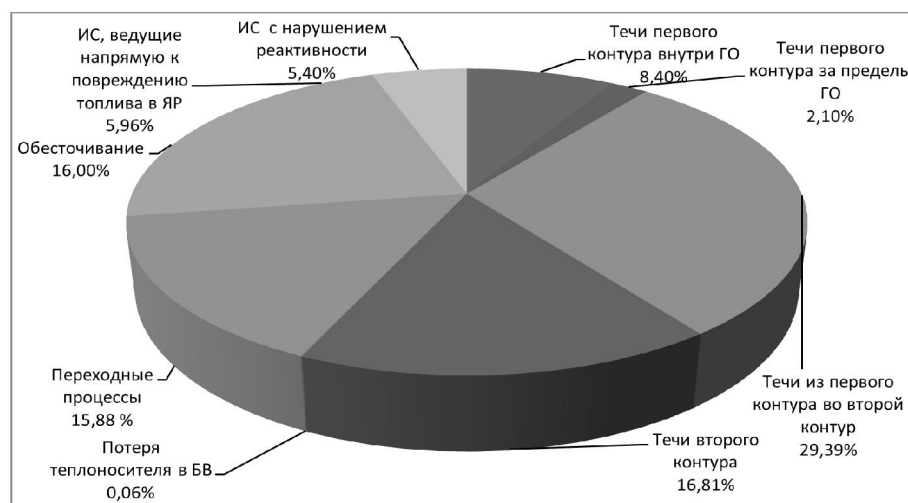


Рис. 3. Распределение вкладов групп исходных событий в ЧПАЗ в ЯР и топлива в БВ при работе энергоблока на мощности и в стояночных режимах

В результате проведенных расчетов было определено, что значение общей частоты разрушения активной зоны в ядерном реакторе и топлива в бассейне выдержки для рассматриваемых инициирующих событий при работе на энергетических уровнях мощности и в стояночных режимах составляет  $1,61 \cdot 10^{-5}$  на реактор в год. В том числе, значение частоты повреждения топлива (ЧПТ) в ядерном реакторе составило  $1,57 \cdot 10^{-5}$  на реактор в год, значе-

ние ЧПТ в БВ –  $3,85 \cdot 10^{-7}$ . То есть показано, что благодаря внедрению мероприятий, направленных на уменьшение последствий запроектных аварий, ЧПАЗ и топлива в БВ для энергоблока №2 Ростовской АЭС для рассматриваемых ИС уменьшилась на 39,5%, что подтверждает правильность предложенных мероприятий и повышает живучесть энергоблоков. Кроме того, предложенная концепция позволяет использовать другие мобильные циркуляторы, например, пожарные или поливочные машины.

### Библиографический список

1. НП-095-15. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Основные требования к вероятностному анализу безопасности блока атомной станции» // Утвержден приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 12.08.2015 г. №311. [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/420296469/>.
2. РБ-024-11. Положение об основных рекомендациях к разработке вероятностного анализа безопасности уровня 1 для внутренних иницирующих событий для всех режимов работы энергоблока атомной станции // [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200113881/>
3. ГОСТ 31901-2013. Арматура трубопроводная для атомных станций. Общие технические условия // [Электронный ресурс]. – URL: [http://standartgost.ru/g/ГОСТ\\_31901-2013/](http://standartgost.ru/g/ГОСТ_31901-2013/)
4. РБ-100-15. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии «рекомендации по порядку выполнения анализа надежности систем и элементов атомных станций, важных для безопасности, и их функций». // [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200117032/>
5. Исследование влияния мероприятий по снижению последствий запроектных аварий на частоту повреждения АЗ на примере энергоблока №3 Калининской АЭС // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: сб. тр. 10-й Международной научно-технической конференции. – Подольск, АО ОКБ «Гидропресс», 2017. [Электронный ресурс]. – URL: <http://gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2017/autorun/article35-ru.html> .

*Дата поступления  
в редакцию 05.04.2018*

**Y.A Mukhryakov<sup>2</sup>, A.V.Duncev<sup>1</sup>, V.V. Andreev<sup>1</sup>, Y.V. Kucherov<sup>2</sup>, V.N.Khokhlov<sup>1</sup>**

### **THE ANALYSIS OF INFLUENCE ON THE FREQUENCY OF DAMAGE OF THE ACTIVE ZONE FROM IMPLEMENTATION OF MOBILE PUMPING INSTALLATIONS AND DIESEL GENERATORS ON THE NPP**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev<sup>1</sup>,  
Joint-stock company ASE Engineering Company<sup>2</sup>

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

**Purpose:** This article is devoted to research the actions directed to decrease beyond design basis accidents effects influence the frequency of damage of the NPP core.

**Methodology:** The probabilistic analysis of safety made in the Risk Spectrum PSA program code was chosen for the research. Logical fault trees were used in development of the logic-probability model of the unit. Also the list of the initiating events was defined and modeling of sequences of accident was made. Quantification of a logic-probability model was carried out taking into account systems and actions directed to decrease beyond design basis accidents effects.

**Results:** The analysis of the received results was made; the conclusion about appearance of the opportunity to reduce probability of core damage by implementation of suggested actions was made; elements failure of which would contribute the most into received probability were defined; also "weak" places from the safety point of view were revealed.

*Key words:* probabilistic safety assessment, nuclear power plant, mobile pumping installation, ultimate heat, active zone.

УДК 621.313, 62-837

А.С. Семёнов<sup>1</sup>, Я.С. Харитонов<sup>2</sup>, А.Н. Егоров<sup>2</sup>**РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПРИВОДА С СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПИТАТЕЛЯ**

Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Политехнический институт (филиал), г. Мирный, Республика Саха (Якутия)<sup>1</sup>,  
АК «АЛРОСА» (ПАО), СТ «Алмазавтоматика», г. Мирный, Республика Саха (Якутия)<sup>2</sup>

Посвящена исследованию вибрационного перемещения слоя сыпучего материала в вибрационных питателях и разработке математической модели их электромагнитного привода путем математического моделирования. Представлена актуальность проделанного исследования, заключающаяся в малоизученности данного вопроса и распространенности поточно-транспортных систем для перемещения сыпучего материала на обогащательных фабриках по переработке и обогащению алмазосодержащего сырья. Проведены теоретические исследования перемещения слоя сыпучего материала при различных частотах и амплитудах вибрации. Разработана математическая модель, описывающая перемещение сыпучего материала по лотку питателя при вибрационном воздействии, произведено сопоставление с экспериментальными и расчетными данными. Разработана математическая модель электромагнитного привода с системой управления, стабилизирующей производительность питателя, которая позволяет получить оптимальную частоту собственной вибрации питателя при известной резонансной частоте.

*Ключевые слова:* поточно-транспортная система, вибрационный питатель, электромеханическая система, электромагнитный привод, система управления, математическое моделирование, MatLab, резонансная частота, тяговое усилие, электромагнитный момент.

**Введение**

Повышение эффективности использования энергетических ресурсов является одним из факторов, способствующим стабильности и устойчивому развитию экономики во всех отраслях промышленности. Одной из наиболее энергоемких сфер промышленности является горнодобывающее производство. Увеличение электропотребления горной промышленностью определяется не только ростом производства, но и качественными изменениями технологии, усложнением условий добычи и переработки руды, внедрением природоохранных мероприятий и пр. [1].

Обзор последних теоретических и экспериментальных исследований по вибрационному перемещению слоя сыпучего материала в вибрационных питателях позволил сделать вывод, что технологический процесс перемещения мелкозернистого материала в поточно-транспортных системах под воздействием вибраций в радиометрических, рентгенометрических и рентгенолюминесцентных сепараторах требует дальнейшего изучения – новых исследований для совершенствования конструкций вибрационных питателей и их электроприводов [2].

Вибрационные питатели занимают не последнее место в технологических процессах горных предприятий, поскольку, в отличие от других видов питателей, позволяют создать относительно устойчивый, равномерный поток материала, а также имеют возможность запуска с завалом подающего бункера. При комбинировании технологии вибрационных перемещений материала и применения различных колосниковых решеток и сит можно достичь сепарации сыпучего материала по размерам кусков или фракций. Современная номенклатура вибрационных питателей включает в себя широкий диапазон производительностей от десятых долей до нескольких сотен кубических метров материала в час, а крупность загружаемого материала может достигать 750 мм.

Обогащение алмазосодержащего сырья – сложный технологический процесс, зависящий от количественного содержания полезного компонента в руде, требующий большего числа подготовительных и основных операций для получения конечной продукции, при обеспечении в процессе обогащения крупности и качества алмаза без нарушений. Рентгенолюминесцентная сепарация, используемая на обогатительных фабриках АК «АЛРОСА» (ПАО), обеспечивает извлечение алмазов по всем переделам не менее 85-95% по массе и более 99,5% по стоимости [3].

Качественное исполнение и настройка режимов работы поточно-транспортной системы, обеспечивающей подачу материала в рентгенолюминесцентных сепараторах, может обеспечить повышение извлечения алмазов и снизить энергоёмкость производства путем уменьшения расхода электроэнергии [4].

**Постановка задачи.** В задачу исследования поточно-транспортной системы, состоящей из вибрационных питателей, входили следующие этапы:

- теоретические исследования перемещения слоя сыпучего материала при различных частотах и амплитудах вибрации, обоснование режимов работы, параметры вибрационного питателя и его привода;
- разработка математической модели, описывающей перемещение сыпучего материала по лотку питателя при вибрационном воздействии, и её апробация при сопоставлении с экспериментальными данными;
- разработка математической модели электромагнитного привода с системой управления, стабилизирующей производительность питателя.

**Теоретические решения.** Одной из важнейших проблем, возникающих при работе различных вибрационных установок, является проблема прохождения через резонансные частоты [5]. Традиционный способ решения этой проблемы состоит в подаче на вход системы достаточно больших по величине постоянных управляющих сигналов, формируемых независимо от текущих значений вектора состояния (система управления разомкнутого типа) [6]. Типичным преобразователем, обеспечивающим необходимые условия в системе управления питателя, является преобразователь в виде электромагнитного привода (ЭМП) [7]. В этих системах при отсутствии внешней силы дифференциальные уравнения будут иметь следующий вид:

$$\begin{cases} m \cdot h'' + r \cdot h' + c \cdot h - \frac{1}{2} \cdot \frac{dL}{dh} \cdot i^2 = 0 \\ \frac{dL}{dh} \cdot h' \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt} + R \cdot i = U \end{cases} \quad (1)$$

ЭМП представляет собой электромагнит с подвижным якорем. При подаче напряжения  $U$  на обмотку электромагнита, имеющую индуктивность  $L$  и активное сопротивление  $R$  создается электромагнитное тяговое усилие  $F_T = \frac{1}{2} \cdot \frac{dL}{dh} \cdot i^2$ , которое притягивает якорь, изменяя его положение относительно сердечника, при этом происходит переключение контактов [8]. Из анализа дифференциальных уравнений (1) имеем:  $m \cdot h''$  – сила инерции,  $r \cdot h'$  – сила вязкого сопротивления, которой в ЭМП можно пренебречь,  $c \cdot h$  – сила сопротивления возвратной пружины, имеющей жесткость  $C$ ,  $\frac{1}{2} \cdot \frac{dL}{dh} \cdot i^2$  – тяговое усилие,  $\frac{dL}{dh} \cdot h' \cdot i$  – электродвижущая сила (ЭДС), вызванная изменением индуктивности при перемещении якоря,  $L \cdot \frac{di}{dt}$  – ЭДС, вызванная изменением тока,  $R \cdot i$  – падение напряжения на активном сопротивлении обмотки ЭМП. Тяговое усилие ЭМП определяется изменением индуктивности  $L$  при перемещении якоря. При конструкции ЭМП клапанного типа и малом перемещении якоря можно считать, что:

$$L = \mu \cdot \frac{S_c}{\delta_H - h} \cdot \omega^2. \quad (2)$$

Тогда  $\frac{dL}{dh} = \frac{\mu \cdot S_C \cdot \omega^2}{(\delta_H - h)^2}$ , откуда

$$F_T = \frac{1}{2} \cdot \frac{\mu \cdot S_C \cdot \omega^2}{(\delta_H - h)^2} \cdot i^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\mu \cdot S_C \cdot \omega^2}{\delta^2} \cdot i^2, \quad (3)$$

где  $\delta = \delta_H - h$ .

При включении ЭМП на постоянное напряжение, как это обычно бывает, процесс описывается нелинейными дифференциальными уравнениями:

$$\begin{cases} m \cdot \delta'' + r \cdot \delta' + c \cdot \delta - \frac{k}{\delta^2} \cdot i^2 = 0 \\ \frac{k \cdot \delta'}{\delta^2} + L \cdot \frac{di}{dt} + R \cdot i = U \end{cases}, \quad (4)$$

где  $k = \frac{\mu \cdot S_C \cdot \omega^2}{2}$ .

Однако использование управления с обратной связью позволяет пройти через резонансные частоты на этапе запуска вибровозбудителя при снижении уровня входных сигналов, что делает возможным использование исполнительного двигателя меньшей мощности. Если добавить к данной системе модель выпрямителя с автономным инвертором и управлением по амплитуде вибраций, то получим модель электромеханической системы с системой управления стабилизирующей производительность питателя.

**Методика исследования.** Управление моделью стенда осуществляется с помощью компьютерной реализации модели. Компьютерная модель реализована благодаря пакету программ MatLab. Пакет программ MatLab можно отнести к числу универсальных пакетов программ (ПП), не ориентированных на конкретные прикладные области моделирования технических систем [9].

Важнейшей составляющей MatLab является приложение структурного моделирования динамических систем (ДС) Simulink. Simulink – это библиотека блоков для многодоменного моделирования и модельного проектирования. Он поддерживает системный дизайн, моделирование, автоматическую генерацию кода и непрерывный контроль, включая проверку встроенных систем. Simulink предоставляет графический редактор, настраиваемые библиотеки блоков и решатели для моделирования и симулирования ДС. Он интегрирован с MatLab, позволяя включать его алгоритмы в модели и экспортировать результаты моделирования для дальнейшего анализа [10].

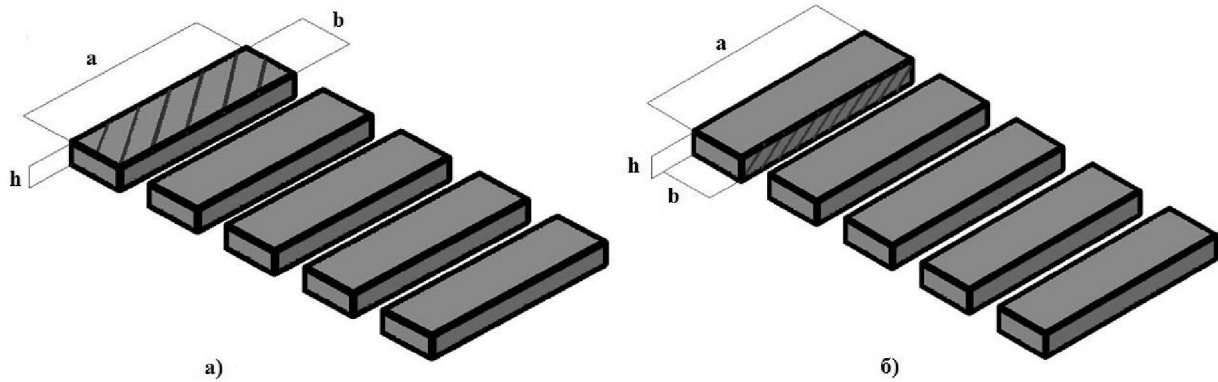
Рассчитаем резонансные частоты для продольных и вертикальных колебаний, которые соответственно будут равны [11]:

$$f_{\text{ПР}} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14} \cdot \sqrt{\frac{64760}{0,2416}} = 82,4 \text{ Гц},$$

$$f_{\text{ВЕР}} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14} \cdot \sqrt{\frac{16586}{0,2416}} = 41,7 \text{ Гц},$$

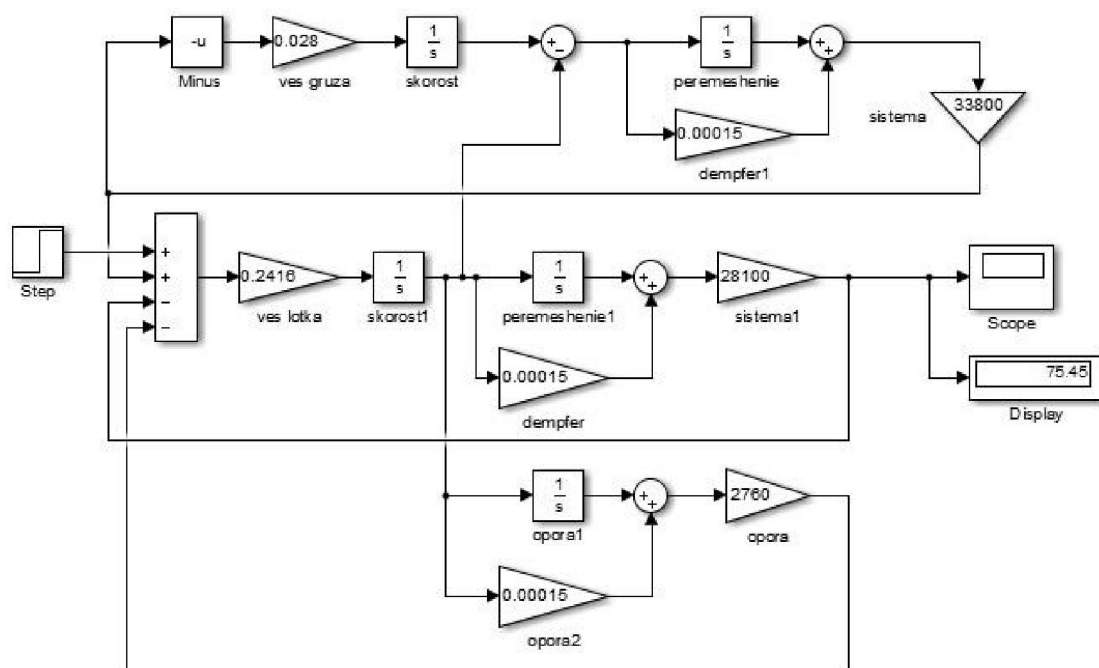
где  $k = \frac{E \cdot F}{h}$  – жесткость одной рессоры лотка питателя;  $m$  – масса одной рессоры лотка, кг;  $E = 2,86 \cdot 10^4$  – модуль упругости кимберлита, МПа;  $F = a \cdot b$  – площадь рабочей поверхности материала, м<sup>2</sup>;  $h$  – высота слоя материала, м;  $a, b$  – соответственно ширина и длина одной рессоры лотка питателя, м.

Следует отметить, что параметры  $a, b, h$  и  $m$  можно найти в технической документации исследуемого питателя. Также важно учитывать, что величина  $F$  будет меняться в зависимости от рассматриваемого уровня колебаний, как показано на рис. 1.



**Рис. 1. Поведение кимберлита с лотком:**  
*a* – при продольных колебаниях; *b* – вертикальных колебаниях, где площадь рабочей поверхности  $F$  – заштрихованная область

**Результаты моделирования.** Для оценки правильности расчета коэффициентов жесткости опор и величины масс собираем суммарные одномассовые математические модели, имитирующие продольные и вертикальные колебания лотка, которые представлены на рис. 2 и рис. 3 соответственно [12]. Математические модели состоят из следующих основных блоков библиотеки MatLab/Simulink: Step – шаговый сигнал; Sum – сумматоры сигналов и обратных связей; Gain – усилители; Integrator – интегрирующие звенья; блоки Display и Scope – дисплей и осциллограф для численного и графического отображения выходных данных.



**Рис. 2. Математическая модель имитации продольных колебаний лотка питателя**

В результате моделирования имеем практически полное совпадение резонансных частот с погрешностью, не превышающей 10%, что допускается при математическом моделировании динамических систем [13]:

$$\Delta f_{\text{ПР}} = \frac{f_{\text{ПР.расч}} - f_{\text{ПР.мод}}}{f_{\text{ПР.расч}}} \cdot 100\% = \frac{82,4 - 75,45}{82,4} \cdot 100\% = 8,4\%,$$

$$\Delta f_{\text{ВЕР}} = \frac{f_{\text{ВЕР.расч}} - f_{\text{ВЕР.мод}}}{f_{\text{ВЕР.расч}}} \cdot 100\% = \frac{41,7 - 38,26}{41,7} \cdot 100\% = 8,2\%.$$

Также на графиках (рис. 4) мы видим, что в начале вибрации частота превышает резонансные значения в несколько раз. По мере продолжительности вибрации происходит затухание частоты. Примерно к 200 с времени моделирования осуществляется выход её на резонансное значение.

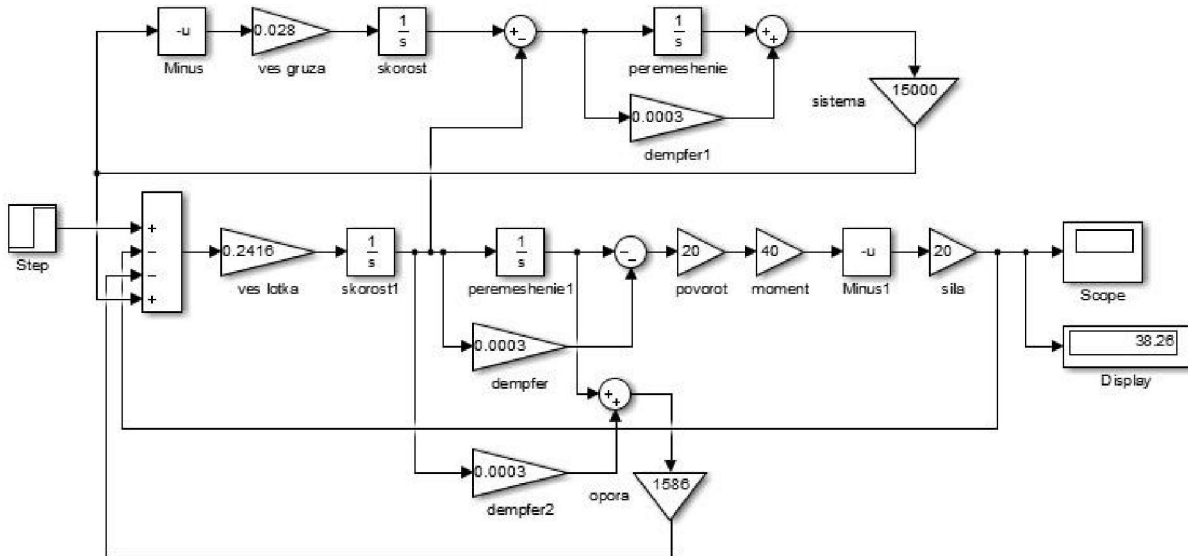


Рис. 3. Математическая модель имитации вертикальных колебаний лотка питателя

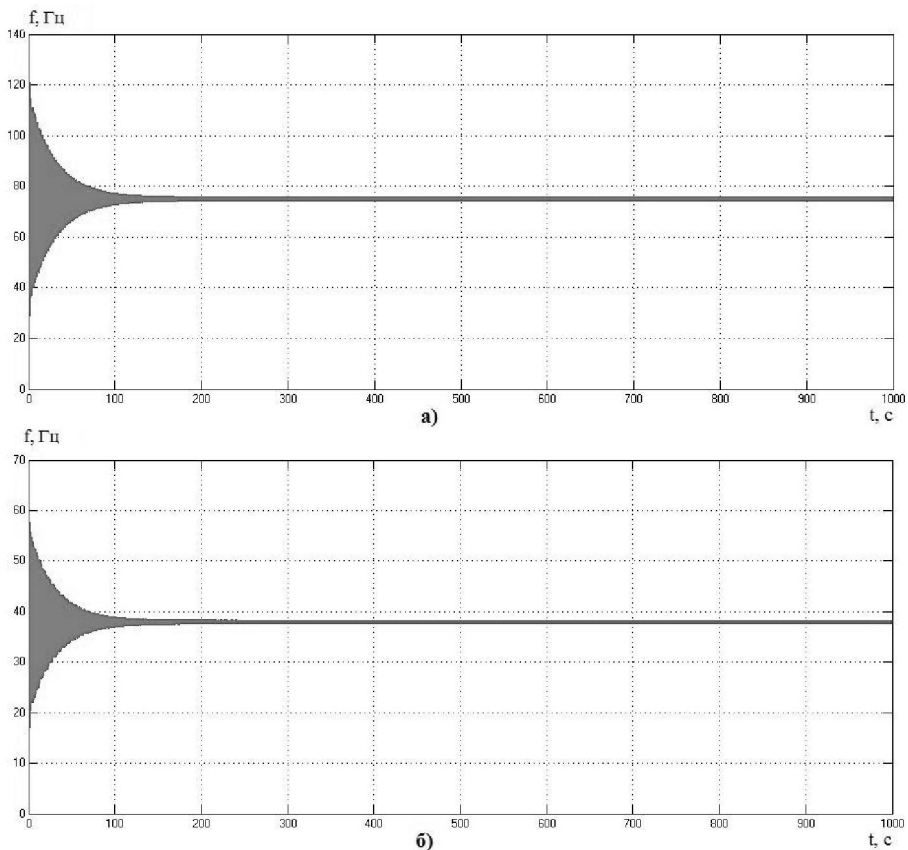


Рис. 4. Графики затухания резонансной частоты вибрации:  
 а – для продольных колебаний; б – вертикальных колебаний

После подтверждения правильности расчета резонансных частот колебаний для оценки перемещения кимберлита по лотку питателя разрабатываем математическую модель электромагнитного привода [14]. Данная модель (рис. 5) по сравнению с моделями, представлен-



ными на рис. 2 и рис. 3, дополнена следующими элементами из библиотеки MatLab/Simulink: SinWave – задатчик синусоидального сигнала; Product – блок произведения сигналов; Divide – блок деления сигналов; MathFunction – математическая операция (в нашем случае возведение в квадрат); XYGraph – графопостроитель, обеспечивающий построения графика зависимости одного сигнала от другого (функции  $f=x(y)$ ) [15, 16].

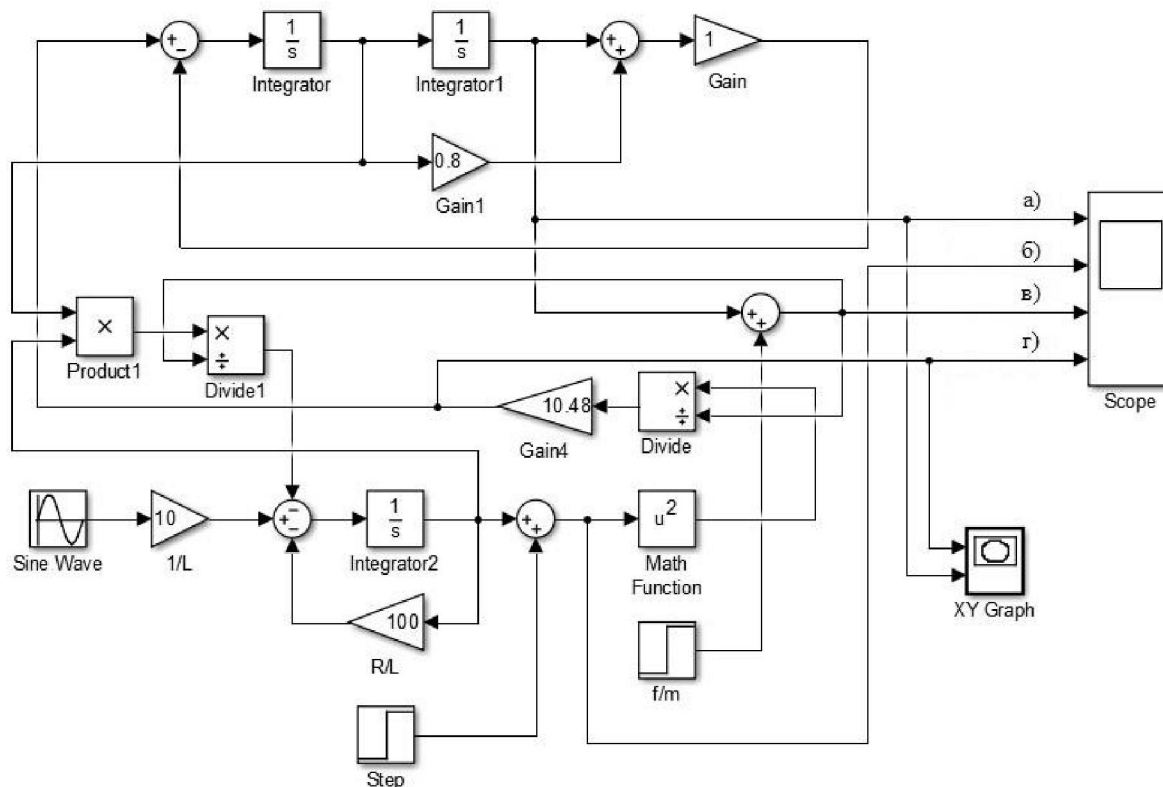


Рис. 5. Математическая модель электромагнитного привода с системой управления стабилизации производительности питателя

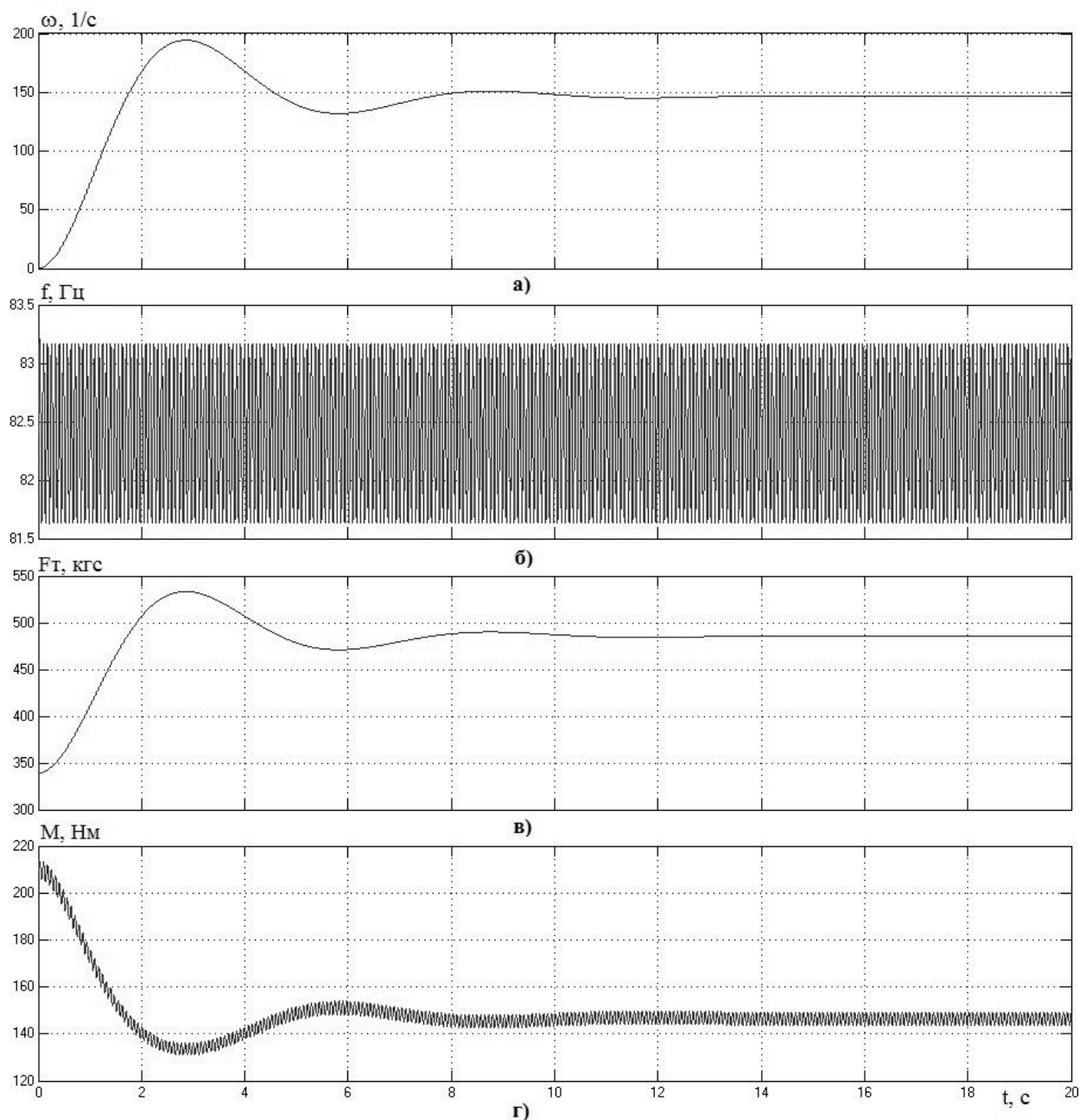
В результате моделирования на осциллографе мы можем наблюдать значения параметров собственной частоты ( $a$ ), резонансной частотой ( $b$ ), величину тягового электромагнитного усилия ( $в$ ) и момент ( $г$ ), прикладываемый к электромагнитам (рис. 6). Проанализируем эти графики.

На рис. 6,  $a$  виден процесс включения ЭМП и выход на установившееся значение собственной частоты. Через 14 секунд после запуска частота выходит на своё номинальное значение  $146 \text{ с}^{-1}$ , успешно преодолев барьер резонансных частот. Коэффициент перерегулирования составляет 0,2, а разрегулирования – 0,11, что является допустимым для динамических систем. На рис. 6,  $b$  наблюдаем резонансную частоту колебаний ЭМП питателя, которая колеблется в допустимых пределах от 81,65 до 83,2 Гц, что дает погрешность менее 1 %. На рис. 6,  $г$  показан электромагнитный момент ЭМП, который при пуске достигает величины  $214 \text{ Н*м}$ , а при выходе частоты на номинальное значение снижается до  $147 \text{ Н*м}$ . Отношение пускового момента к номинальному не превышает кратности 2, что является очень хорошим результатом, так как диапазон допустимых значений для ЭМП лежит в интервале от 2 до 3.

Зная максимальные значения таких параметров как частота, тяговое усилие и электромагнитный момент, мы можем определить максимальную мощность ЭМП, которая потребуется для обеспечения стабильной производительности питателя при перемещении кимберлита, по следующей формуле:

$$P_{\max} = \frac{\omega_{\max} \cdot F_{\max} \cdot M_{\max}}{E \cdot \eta} = \frac{189,5 \cdot 531,7 \cdot 214,2}{2,86 \cdot 10^4 \cdot 0,8} = 943,3 \text{ Вт} \approx 1 \text{ кВт},$$

где  $\omega_{\max}$  – максимальная частота вибрации (по графику), 1/с;  $F_{\max}$  – максимальное тяговое усилие (по графику), кгс;  $M_{\max}$  – максимальный электромагнитный момент (по графику), Н\*м;  $E = 2,86 \cdot 10^4$  – модуль упругости кимберлита, МПа;  $\eta = 0,8$  – принимаемый средний КПД вибровозбудителя.



**Рис. 6. Результаты моделирования электромагнитного привода:**

*a* – собственная частота; *б* – резонансная частота; *в* – тяговое электромагнитное усилие;  
*г* – электромагнитный момент

При такой мощности ЭМП выглядит предпочтительнее в качестве привода питателя, нежели альтернативные системы, например, асинхронный двигатель с дебалансом, либо более сложная система «тиристорный преобразователь – двигатель постоянного тока – регулируемый дебаланс», которые в зависимости от производительности могут достигать мощности десятков киловатт [17]. Этот выбор будет зависеть от технологического процесса и особенностей системы электроснабжения предприятия [18-22].

### Заключение

В результате проделанной работы были произведены теоретические исследования перемещения слоя сыпучего материала при различных частотах и амплитудах вибрации, определена резонансная частота продольных и вертикальных колебаний лотка питателя. Для решения математических задач был использован пакет программ MatLab. Разработаны математические модели, описывающие перемещение сыпучего материала по лотку питателя при вибрационном воздействии, сопоставлены расчетные и смоделированные параметры частот, установлена допустимая погрешность. Разработана математическая модель электромагнитного привода с системой управления стабилизации производительности питателя, позволяющая определить его мощность и подобрать тип системы электропривода с точки зрения оптимальности для технологического процесса и энергоэффективности электрооборудования.

### Библиографический список

1. **Решетняк, С.Н.** Особенности применения преобразовательной техники на горнодобывающих предприятиях России / С.Н. Решетняк, В.Н. Фащиленко, О.В. Федоров // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – № 6. – С. 331–334.
2. **Юрченко, А.В.** Математическое моделирование работы вибрационного питателя РМДС // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № 10. – С. 225–233.
3. **Шлюфман, Е.М.** Разработка методического и аппаратного обеспечения для исследования и повышения эффективности рентгенолюминесцентной сепарации алмазосодержащего сырья: автореферат дисс. ... канд. техн. наук: 25.00.13 / Ин-т проблем комплексного освоения недр. – М., 2004. – 17 с.
4. **Кузнецов, Н.М.** Рациональное электропотребление на горных предприятиях // Труды Кольского научного центра РАН. – 2011. – № 4. – С. 128–135.
5. **Браславский, И.Я.** Математическая модель частотно-регулируемого электропривода с ДС-ДС-преобразователем и емкостными накопителями энергии / И.Я. Браславский // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2016. – № 2 (544). – С. 39–46.
6. **Мещеряков, В.Н.** Математический анализ и моделирование преобразователя частоты матричного типа с непосредственным управлением по методу пространственно-векторной модуляции / В.Н. Мещеряков, Д.В. Байков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2015. – Т. 15. № 1. – С. 21–33.
7. **Маклаков, А.С.** Математическое описание трехуровневого преобразователя частоты с фиксированной нейтралью на базе активного выпрямителя и автономного инвертора напряжения // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2016. – Т. 16. № 4. – С. 49–59.
8. **Бериллов, А.В.** Исследование асинхронного генератора с фазным ротором с последовательным соединением статорных и роторных обмоток через преобразователь частоты / А.В. Бериллов, В.Г. Еременко, Х.Н. Нгуен // Вестник МЭИ. – 2016. – № 4. – С. 56–61.
9. **Семёнов, А.С.** Математическое моделирование технических систем в среде MATLAB / А.С. Семёнов, И.А. Якушев, А.Н. Егоров // Современные наукоемкие технологии. – 2017. – № 8. – С. 56–64.
10. **Дьяконов, В.П.** MATLAB R2006/2007/2008 + SIMULINK 5/6/7. Основы применения: учеб. пособие / В.П. Дьяконов. – М.: СОЛОН-Пресс, 2008. – 800 с.
11. **Гендлина, Л.И.** О численном моделировании динамики вибрационного питателя для выпуска горной массы / Л.И. Гендлина, Е.Г. Куликова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № 11. – С. 224–230.
12. **Синёнков, Д.В.** Математическое моделирование производительности шнекового питателя высевающего агрегата / Д.В. Синёнков, С.Б. Дёмин // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2016. – № 8 (115). – С. 36–43.
13. **Рыбальченко, Д.Е.** Математическая модель последовательных питателей для централизованных смазочных систем / Д.Е. Рыбальченко [и др.] // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2008. – № 1 (14). – С. 152–161.
14. **Матвеев, А.И.** Исследование распределения тяжелых фракций в колеблющейся сыпучей среде / А.И. Матвеев [и др.] // Наука и образование. – 2016. – № 2 (82). – С. 21–26.

15. **Жарков, В.В.** Математическая модель движения частицы в спиральном питателе-дозаторе роторной фасовочной машины / В.В. Жарков, В.В. Прейс // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2014. – № 7. – С. 76–84.
16. **Зобнин, Б.Б.** Математическая модель дискретного весового дозирования / Б.Б. Зобнин, С.Ю.Петрушенко, С.В. Ендияров // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2012. – № 4. – С. 63–67.
17. Алиев И.И. Справочник по электротехнике и электрооборудованию: учеб. пособие для вузов / И.И. Алиев. – 2-е изд., доп. – М.: Высш. шк., 2000. – 255 с.
18. **Голубцов, Н.В.** Проблема эффективности использования энергоресурсов / Н.В. Голубцов, Л.Г.Ефремов, О.В. Федоров // Вестник Чувашского университета. – 2014. – № 2. – С. 18–22.
19. **Федоров, О.В.** Некоторые особенности структуры систем внутреннего электроснабжения // Надежность и безопасность энергетики. – 2015. – №3(30). – С 30–33.
20. **Кузнецов, Н.М.** Особенности электропотребления и пути его оптимизации при подземной разработке кимберлитов / Н.М. Кузнецов, А.Н. Егоров, Н.В. Егоров // Горный журнал. – 2010. – № 7. – С. 87–89.
21. **Козярук, А.Е.** Искажение формы питающего напряжения в сетях электроснабжения при наличии полупроводниковых преобразователей | А.Е. Козярук [и др.] // Горное оборудование и электромеханика. – 2011. – №6. – С. 30–35.
22. **Федоров, О.В.** Влияние электротехнических комплексов с несинусоидальной характеристикой на систему электроснабжения / О.В. Федоров, А.Г. Немцов // Вестник Чувашского университета. – 2012. – №3. – С.166–174.

*Дата поступления  
в редакцию 20.04.2018*

**A.S. Semenov<sup>1</sup>, Ya.S. Kharitonov<sup>2</sup>, A.N. Egorov<sup>2</sup>**

## **DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODEL OF ELECTROMAGNETIC DRIVE WITH A CONTROL SYSTEM TO STABILIZE THE PERFORMANCE OF THE FEEDER**

Polytechnic institute (branch) of North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov  
in Mirny, Mirny, Republic of Sakha (Yakutia)<sup>1</sup>  
ST «Almazavtomatika» PJSC «ALROSA», Mirny, Republic of Sakha (Yakutia)<sup>2</sup>

**Purpose:** The purpose of the research in this work is to study the vibrational displacement of a layer of bulk material in vibrating feeders and to develop a mathematical model of an electromagnetic drive by mathematical modeling.

**Design/methodology/approach:** The methods of analysis include theoretical studies of technical documentation of flow-transport systems in general and vibrating feeders in particular, mathematical modeling of technical systems using the MatLab software package using the Simulink application.

**Findings:** As a result of the research, theoretical studies of the movement of a layer of bulk material at various frequencies and amplitudes of vibration were carried out. A mathematical model describing the movement of loose material through the feeder tray under vibration is developed, a comparison is made with the experimental and calculated data.

**Originality/value:** A mathematical model of an electromagnetic drive with a control system stabilizing the feeder performance is developed, which allows to obtain the optimum frequency of the feeder vibration at a known resonant frequency.

**Research limitations/implications:** The results obtained can be applied at enrichment plants for the enrichment of diamond-bearing rocks to calculate the power of the feeder drive and the selection of the type of electric drive system in terms of optimality for the technological process and the energy efficiency of electrical equipment.

**Conclusions:** Vibrating feeders are not the only place in the technological processes of mining enterprises, therefore, the high-quality execution and tuning of the operating modes of the flow-transport system that provides material to the X-ray luminescent separators can provide increased diamond recovery and lower energy intensity of production by reducing power consumption.

*Key words:* thread-transport system, vibrating feeder, electromechanical system, electromagnetic drive, control system, mathematical modeling, resonance frequency, tractive force, electromagnetic torque.

УДК 62-52-83:656.56

А.В. Серебряков

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АВТОНОМНЫХ ГЕНЕРАТОРНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева

Предложен подход к прогнозированию технического состояния автономного генераторного комплекса, основанный на применении аппарата искусственных нейро-нечетких сетей, которые позволяют предсказывать значение прогнозируемой величины с учетом внешних факторов, таких как условия эксплуатации и износ оборудования.

*Ключевые слова:* автономный генераторный комплекс, прогнозирование, нечеткая логика, техническое состояние.

### Введение

Большая территория РФ с различными климатическими поясами и низкой плотностью населения обуславливает необходимость обеспечения энергией удаленных от центральных электросетей районов. В отечественной и мировой электроэнергетике за многие годы накоплен достаточно большой опыт по созданию и использованию автономных генераторных комплексов на основе комбинированных источников энергии, имеющих высокие перспективы применения в настоящее время [1]. Применение автономных генераторных комплексов в отдаленных районах для питания потребителей первой и первой особой категории неминуемо приводит к высоким требованиям по надежности и бесперебойности работы [2, 3]. В связи с этим, задачи создания и/или усовершенствования системы диагностики и прогнозирования технического состояния создаваемого автономного генераторного комплекса являются, безусловно, актуальными [4].

Решение задач диагностики неразрывно связано с прогнозированием надежности на ближайший период эксплуатации, до следующего технического осмотра, капитального ремонта и т.д. В связи с возрастающей ролью автоматических и автоматизированных систем возрастает также значение прогнозирования их состояния. Без прогноза затруднительно управлять состоянием системы, нельзя своевременно предупреждать аварийные ситуации. Использование теории и методов прогнозирования для анализа надежности изделий создает возможность существенно повысить эффективность оценки надежности их на различных этапах разработки, изготовления и эксплуатации.

С появлением технических систем, выполняющих ответственные функции, возрастает роль предвидения технического состояния в некоторый будущий отрезок времени для своевременного принятия мер по предотвращению отказов. В процессе развития техники возникла задача управления техническим состоянием больших систем путем своевременного переключения на резерв, своевременного перехода на новые рабочие режимы и т. п. Таким образом, новые этапы развития техники вызвали к жизни новую техническую проблему - проблему прогнозирования технического состояния [5, 6].

В зависимости от прогнозируемых параметров и целевой направленности прогнозирования выбираются имеющиеся методы и математический аппарат.

Множество и размер классов определяются специфическими техническими особенностями прогнозируемых объектов. Методы, основанные на отнесении исследуемых объектов к одному из классов, будем называть методами статистической классификации. В них используется аппарат теории распознавания образов, а также теории искусственных нейронных сетей [7-9].

## Прогнозирование с помощью гибридной нейронной сети

Алгоритмы распознавания в технической диагностике частично основываются на диагностических моделях, устанавливающих связь между состояниями технической системы и их отображениями в пространстве диагностических сигналов. Важной частью проблемы распознавания являются правила принятия решений (решающие правила). Решение диагностической задачи, отнесение изделия к исправным или неисправным всегда связано с риском ложной тревоги или пропуска цели.

Нейро-нечеткая сеть представляет собой многослойную нейронную сеть специальной структуры без обратных связей, в которой используются обычные (нечеткие) сигналы, веса и функции активации, а выполнение операции суммирования основано на использовании фиксированной Т-нормы, Т-конормы или некоторой другой непрерывной операции. При этом значения входов, выходов и весов гибридной нейронной сети представляют собой вещественные числа из отрезка от 0 до 1.

Назначение нейро-нечетких сетей - извлечение знаний для реализации нечетких правил на базе нейронных сетей. Такой подход позволяет компенсировать один из главных недостатков нейронных сетей, который состоит в том, что ответ нейронных сетей является не прозрачным. Сама нейронная сеть - это черный ящик, т.е. объяснить ответ невозможно. Этот подход позволяет реализовать функцию объяснения для нейронных сетей.

Перспективным направлением в области решения задач прогнозирования является применение аппарата искусственных нейро-нечетких сетей.

Нечеткие нейронные, или гибридные, сети призваны объединить в себе достоинства нейронных сетей и систем нечеткого вывода. С одной стороны, они позволяют разрабатывать и представлять модели систем в форме правил нечетких продукций, которые обладают наглядностью и простотой содержательной интерпретации. С другой стороны для построения правил нечетких продукций используются методы нейронных сетей, что является более удобным и менее трудоемким процессом для системных аналитиков.

Основная идея, положенная в основу модели гибридных сетей, заключается в том, чтобы использовать существующую выборку данных для определения параметров функций принадлежности, которые лучше всего соответствуют некоторой системе нечеткого вывода. При этом для прохождения параметров функции принадлежности используются известные процедуры обучения нейронных сетей.

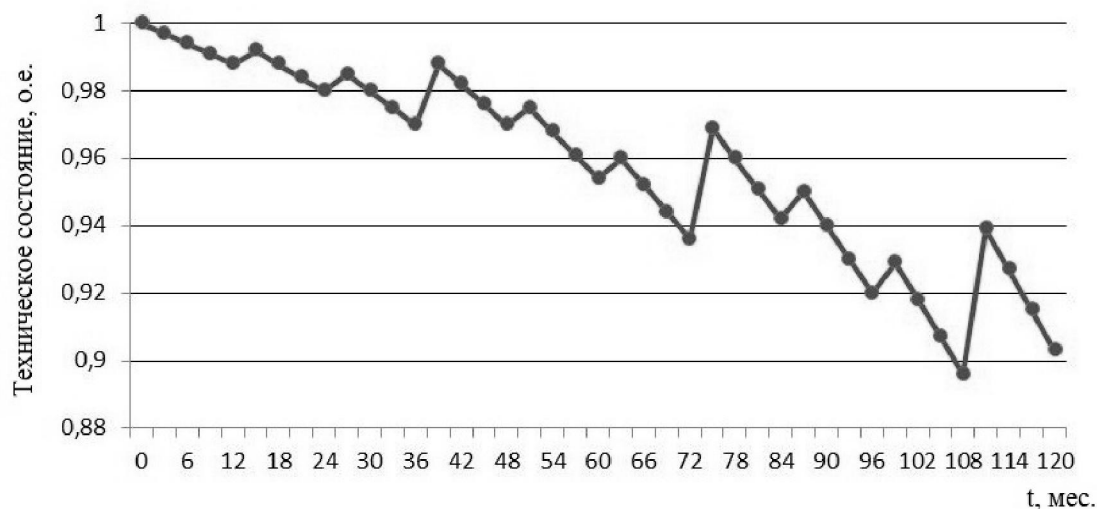
Гибридная сеть обучается с помощью алгоритма обратного распространения ошибки. Этот алгоритм представляет собой итеративный градиентный алгоритм минимизации среднеквадратичного отклонения значений выхода от желаемых значений (минимизации ошибок) в многослойных нейронных сетях.

Разработаем нечеткую модель гибридной сети для прогнозирования технического состояния автономной электростанции на основе ДВС и ветроэнергетической установки. Суть данной задачи состоит в том, что зная динамику изменения состояния системы за фиксированный интервал времени, спрогнозировать значения состояния системы на определенный момент в будущем.

Традиционно для решения данной задачи применяются различные модели технического анализа, основанные на использовании различных индикаторов. В то же время наличие неявных тенденций в динамике изменения технического состояния позволяет применить модель адаптивных нейро-нечетких сетей.

В качестве исходных данных воспользуемся информацией о динамике изменения технического состояния автономной электростанции на основе ДВС и ветроэнергетической установки за некоторый временной интервал. На рис. 1 представлена динамика состояния системы за десять лет эксплуатации, шаг проверки технического состояния автономной элек-

тростанции на основе ДВС и ветроэнергетической установки три месяца. График построен по результатам наблюдений за техническим состоянием автономной электростанции. Методика оценки фактического технического состояния подробно описана [10-12]. Следует отметить, что при оценке технического состояния системы использовано более 30 факторов, влияющих на состояние системы, а также учтено проведение профилактического ТО один раз в год и планового ТО один раз в три года.



**Рис. 1. Динамика технического состояния автономной электростанции на основе ДВС и ветроэнергетической установки за 120 месяцев**

Для дальнейшего использования данных произведем оцифровку с графика и представим динамику в табл. 1.

**Таблица 1**  
**Динамика технического состояния автономной электростанции на основе ДВС и ветроэнергетической установки за 120 месяцев**

№	T, мес.	sys	№	T, мес.	sys
1	2	3	4	5	6
1	0	1	21	60	0,954
2	3	0,997	22	63	0,96
3	6	0,994	23	66	0,952
4	9	0,991	24	69	0,944
5	12	0,988	25	72	0,936
6	15	0,992	26	75	0,969
7	18	0,988	27	78	0,96
8	21	0,984	28	81	0,951
9	24	0,98	29	84	0,942
10	27	0,985	30	87	0,95
11	30	0,98	31	90	0,94
12	33	0,975	32	93	0,93
13	36	0,97	33	96	0,92
14	39	0,988	34	99	0,929

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6
15	42	0,982	35	102	0,918
16	45	0,976	36	105	0,907
17	48	0,97	37	108	0,896
18	51	0,975	38	111	0,939
19	54	0,968	39	114	0,927
20	57	0,961	40	117	0,915

Предположим, что нечеткая модель гибридной сети будет содержать 4 входных переменных. При этом первая входная переменная будет соответствовать на текущий момент, вторая – на предыдущее время ( $t-1$ ), третья переменная на время ( $t-2$ ), а последняя - ( $t-3$ ).

Перед генерацией структуры системы нечеткого вывода типа Сугено после вызова диалогового окна свойств зададим для каждой из входных переменных по 3 лингвистических термина, а в качестве типа их функций принадлежности выберем треугольные функции.

Для обучения гибридной сети воспользуемся гибридным методом обучения с уровнем ошибки 0, а количество циклов обучения зададим равным 10. После окончания данной гибридной сети выполним анализ графика ошибки обучения и представим его на рис. 2.

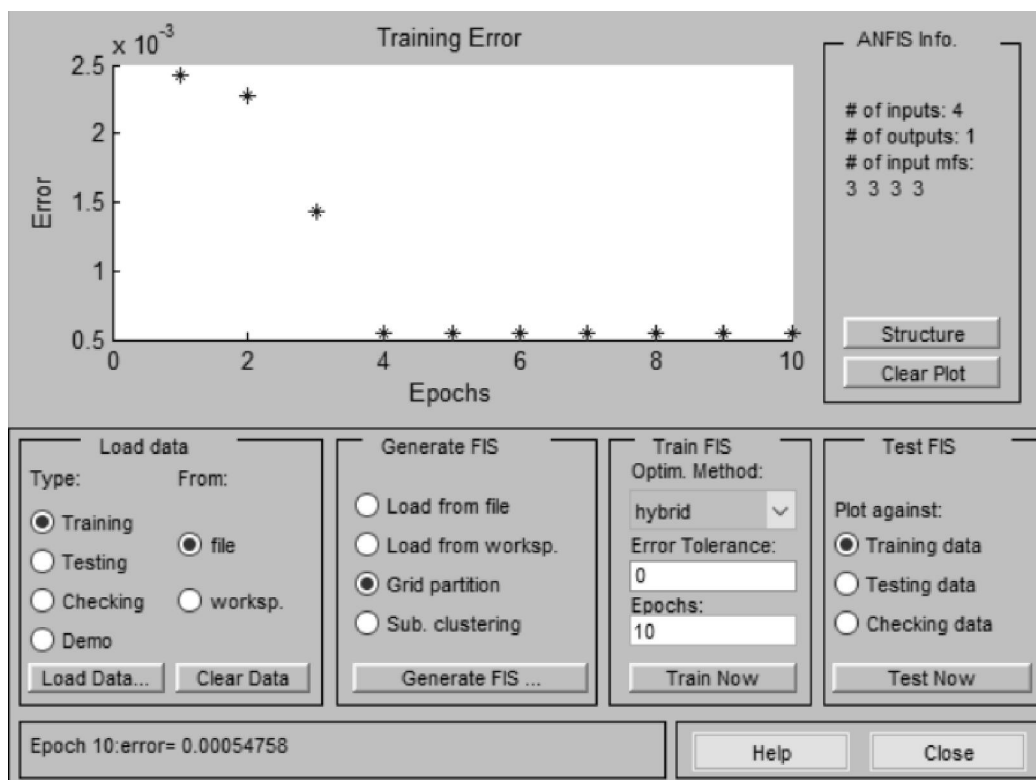


Рис. 2. График зависимости ошибки обучения от количества циклов обучения

Обучение гибридной нейронной сети завершилось после 4-го цикла. Графическая наглядность структуры нечеткой модели предельно затруднена, поскольку количество правил в разработанной адаптивной системе равно 81.

Проверка адекватности построенной нечеткой модели гибридной сети проводится при помощи ретроспективного прогноза значения технического состояния на будущее время, например, на 120-й месяц, считая для этого случая текущим 108-й месяц.



Разработанная нечеткая модель прогнозирует значение выходной переменной для будущего времени, а именно, 120-го наблюдения, равное 0.862

Сравнивая полученное значение с соответствующим значением из табл. 1, которое равно 0.903, оцениваем точность прогнозирования по формуле (3).

$$OO = \frac{|Z(t) - Z^{\wedge}(t)|}{Z(t)} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где  $Z(t)$  – фактическое значение в момент времени  $t$ ;  $Z^{\wedge}(t)$  – прогнозное значение.

Вычислим относительную ошибку прогнозирования:

$$OO = \frac{|0.903 - 0.862|}{0.903} \cdot 100\% = 4,5\%. \quad (2)$$

### Выводы

Предложен подход к прогнозированию технического состояния автономных генераторных комплексов, основанный на применении аппарата искусственных нейро-нечетких сетей, которые позволяют предсказывать значение прогнозируемой величины с учетом внешних факторов, таких как условия эксплуатации и износ оборудования. Построена нейро-нечеткая модель гибридной сети для прогнозирования технического состояния автономного генераторного комплекса. Проведена проверка адекватности построенной нечеткой модели гибридной сети при помощи ретроспективного прогноза, показавшая относительную ошибку прогнозирования, не превышающую 5%.

### Библиографический список

1. **Макриденко, Л.А.** Мониторинг и прогнозирование технического состояния электромеханических систем энергетики / Л.А. Макриденко, С.Н. Волков, А.П. Сарычев. – М., 2017 – 146 с.
2. **Thorsen, V.** Condition Monitoring Methods, Failure Identification and Analysis for High Voltage Motors in Petrochemical Industry // Proc 8a IEE Int Conf, EMD'97, University of Cambridge. – № 444. – P. 109–113.
3. **Серебряков, А.В.** Оптимизация диагностирования электромеханической части ветроэнергетических установок // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2013. – № 3. – С. 39–46.
4. **Серебряков, А.В.** Дифференцирование нагрузки в системах электроснабжения автономных потребителей / А.В. Серебряков [и др.] // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. – 2015. – № 2 (109). – С. 203–209.
5. **Серебряков, А.В.** Энергоэффективные ветроэнергетические установки с оперативной диагностикой для автономных систем электроснабжения: дисс. ... канд. техн. наук по спец. 05.09.03 / ИГЭУ. – Н.Новгород, 2013. – 171 с.
6. **Васенин, А.Б.** Как повысить энергоэффективность ветроэнергетической установки / А.Б. Васенин, В.Г. Титов // Главный энергетик. – 2015. – № 1. – С. 58–6.
7. **Стеклов, А.С.** Система диагностики технического состояния судового синхронного генератора // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. – 2016. – № 1. – С. 60–64.
8. **Стеклов, А.С.** Определение степени работоспособности судовых синхронных генераторов с применением искусственных нейро-нечетких сетей / А.С. Стеклов, В.Г. Титов, А.В. Серебряков // Вестник Чувашского университета. – 2016. – № 1. – С. 97–104.
9. **Лукьянов, С.И.** Разработка и внедрение интеллектуальных систем диагностирования технического состояния электрического оборудования / С.И. Лукьянов, [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова, 2014. – №1(45). – С. 129–134.
10. **Стеклов, А.С.** Определение степени работоспособности судовых синхронных генераторов с применением искусственных нейро-нечетких сетей / А.С. Стеклов, В.Г. Титов, А.В. Серебряков // Вестник Чувашского университета. – 2016. – № 1. – С. 97–104.

11. **Стеклов, А.С.** Нейро-нечёткое моделирование степени работоспособности трансформаторов судовых электроэнергетических установок // Электротехнические системы и комплексы. – 2016. – №3. – С. 39–43.
12. **Стеклов, А.С.** Новый алгоритм технического диагностирования гребных электродвигателей / А.С. Стеклов, В.Г. Титов, А.В. Серебряков // Вестник южно-уральского государственного университета. Сер.: энергетика. – 2017. – № 2. – С. 82–88.

*Дата поступления  
в редакцию 16.04.2018*

**A.V. Serebryakov**

### **FORECASTING THE TECHNICAL CONDITION OF AUTONOMIC GENERATOR COMPLEXES**

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

**Purpose:** An approach to forecasting the technical state of an autonomous generator complex.

**Design/methodology/approach:** The approach is based on the use of the device of artificial neural-fuzzy networks, which allow predicting the value of the predicted value taking into account external factors, such as operating conditions and equipment wear.

**Findings:** A neuro-fuzzy model of a hybrid network was constructed to predict the technical state of an autonomous generator complex. The adequacy of the constructed fuzzy hybrid network model was checked with the help of the retrospective forecast, which showed a relative error of forecasting not exceeding 5%.

**Research limitations/implications:** The proposed method of prediction can be applied to various electrical systems.

**Originality/value:** The purpose of further research is to improve the accuracy of predicting the technical state of autonomous generator complexes.

*Key words:* Autonomous generator complex, forecasting, fuzzy logic, technical condition.

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

---

УДК 629.113

С.А. Гагунов

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЛЕГКИХ КОММЕРЧЕСКИХ АВТОМОБИЛЕЙ С УЧЕТОМ ТРЕБОВАНИЙ УТИЛИЗАЦИИ В КОНЦЕ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

Нижегородский государственный технический университет им П.Е. Алексеева

Вопросы утилизации транспортных средств в конце жизненного цикла являются наиболее важными с точки зрения экологии. Зарубежный опыт в области утилизации транспортных средств позволяет также вести речь и об экономической эффективности данной отрасли, однако для достижения высоких результатов необходимо учитывать требования к утилизации на ранних этапах проектирования изделия. В данной статье проведен анализ отечественной отрасли утилизации. Выявлены основные барьеры в области утилизации коммерческих транспортных средств. Предложена методология проектирования легких коммерческих автомобилей (ЛКА), удовлетворяющая показателям утилизации. Предложен алгоритм проектирования, учитывающий требования инженерного анализа и экономической целесообразности, который обеспечивает ориентированность изделия на возможность утилизации. Приведен расчет показателей утилизации на основе полного набора информации о компонентах транспортного средства. Рассмотрен демонтаж компонентов транспортного средства как ключевой процесс в структуре утилизации. Проведена сравнительная оценка эффективности демонтажа пластиковых изделий коммерческих транспортных средств Группы ГАЗ.

*Ключевые слова:* утилизация, рециклинг, легкие коммерческие транспортные средства (ЛКА), жизненный цикл.

### Введение

Растущий парк автомобилей и, как следствие, возрастающая нагрузка на окружающую среду ставят задачу минимизации отрицательного воздействия автотранспорта на экологию. Одним из ключевых направлений повышения экологичности выступает задача утилизации отслуживших срок транспортных средств. При этом степень повторного использования материалов и компонентов, применяемых при изготовлении автомобилей, имеет существенное значение для повышения энергоэффективности и ресурсосбережения экономики.

В утилизации автомобилей заинтересованы практически все основные участники автотранспортного комплекса. Автопроизводители получают существенную выгоду за счет использования более дешевого вторичного сырья, автотранспортные компании и автовладельцев со стороны государственные обеспечивают денежными субсидиями. Министерство промышленности и торговли посредством утилизации способствует стимулированию обновления парка транспортных средств. Обновление парка подвижных средств также выгодно и для министерства транспорта. За счет утилизации отслуживших срок автомобилей повышаются экологичность и безопасность транспортной системы [1].

Зарубежные государства имеют колоссальный опыт в области утилизации транспортных средств в результате чего данная сфера деятельности приносит довольно внушительный доход, который позволяет отрасли развиваться без существенного вмешательства правительства. Так, в странах Евросоюза, согласно Европейской ассоциации автопроизводителей, прибыль от переработки одного автомобиля в ЕС составляет около 340 евро [2].

### Отечественный опыт в области утилизации транспортных средств

В отличие от зарубежных стран, отечественная отрасль утилизации находится сегодня на начальной стадии развития. Наряду с проблемами в правовой сфере, отсутствия единой системой утилизационных центров, существуют сложности в утилизации транспортных средств, конструкция которых не позволяет качественно и быстро осуществить процесс демонтажа и последующую переработку изделия.

Так, вопрос утилизации легких коммерческих транспортных средств Группы ГАЗ имеет большую значимость, ввиду того, что продукция предприятия занимает на отечественном рынке порядка 70% от общего числа продаваемых транспортных средств данной категории. Адаптированность конструкции к утилизации позволяет не только соответствовать экологическим требованиям на отечественном рынке, а также способствует повышению экспортного потенциала продукции. Для наиболее качественного решения задачи утилизации автотранспорта необходимо уже на стадии проектирования новой продукции закладывать возможности максимального повторного использования и переработки компонентов и материалов после завершения этапа эксплуатации автомобиля.

Решением задач, связанных с оценкой экологичности и разработкой методологий проектирования транспортных средств с учетом их последующей утилизации, занимались различные ученые и научные организации.

В трудах [3, 4] рассмотрены технологические схемы утилизации узлов и агрегатов транспортного средства, проведен анализ зарубежного опыта в области утилизации, дана оценка отечественной нормативно-правовой базе.

В работе [5] представлена методика экологической оценки легковых автомобилей в полном жизненном цикле, учитывающая стадии их производства, эксплуатации и утилизации.

В работе [6] представлена методология проектирования усовершенствованных конструкций автотранспортных средств с учетом их последующей утилизации, которая подразумевает использование комплекса рекомендаций, включающих применение технологий модульного принципа проектирования узлов и систем автомобиля, использования в конструкции АТС соединений, способствующих упрощенной разборке деталей и узлов, а также сортировке материалов, выбора конструкционных материалов в узлах и системах с точки зрения их совместимости при рециклировании.

По результатам анализа можно сделать вывод о целесообразности применения вышеуказанных трудов для успешного решения задачи утилизации транспортных средств.

Однако при утилизации легких коммерческих транспортных средств в конце жизненного цикла, существует ряд особенностей, связанных с отсутствием внутренних нормативных документов, определяющих методологию проектирования ЛКА с учетом требований пригодности к утилизации, неподготовленностью базы данных состава продукта для расчета показателей утилизируемости, сложностью организации работы с поставщиками деталей, узлов и агрегатов в части предоставления паспортов материалов и компонентов и т.д.

От выбора методики проектирования легких коммерческих транспортных средств с учетом утилизации напрямую зависит вывод продукции на зарубежные рынки, в особенности на рынок Евросоюза, а также на рынки Российской Федерации и стран Таможенного союза, в которых возрастает тенденция к ужесточению экологических норм.

Детальное исследование требований Правил ООН и Директив ЕС (Правила ООН 133, директивы 2000/53/ЕС и 2005/64/ЕС, стандарт ИСО 22628:2002 и т.д.) показало, что, для приведения конструкции новых и уже выпускаемых автомобилей в соответствие требованиям утилизации необходимо создание методологии проектирования и разработки легких коммерческих транспортных средств, удовлетворяющих показателям утилизации.

### **Разработка методологии проектирования и разработки легких коммерческих транспортных средств, удовлетворяющих показателям утилизации**

На первых этапах разработки данной методологии был определен ряд подходов, которые необходимо применить автопроизводителю:

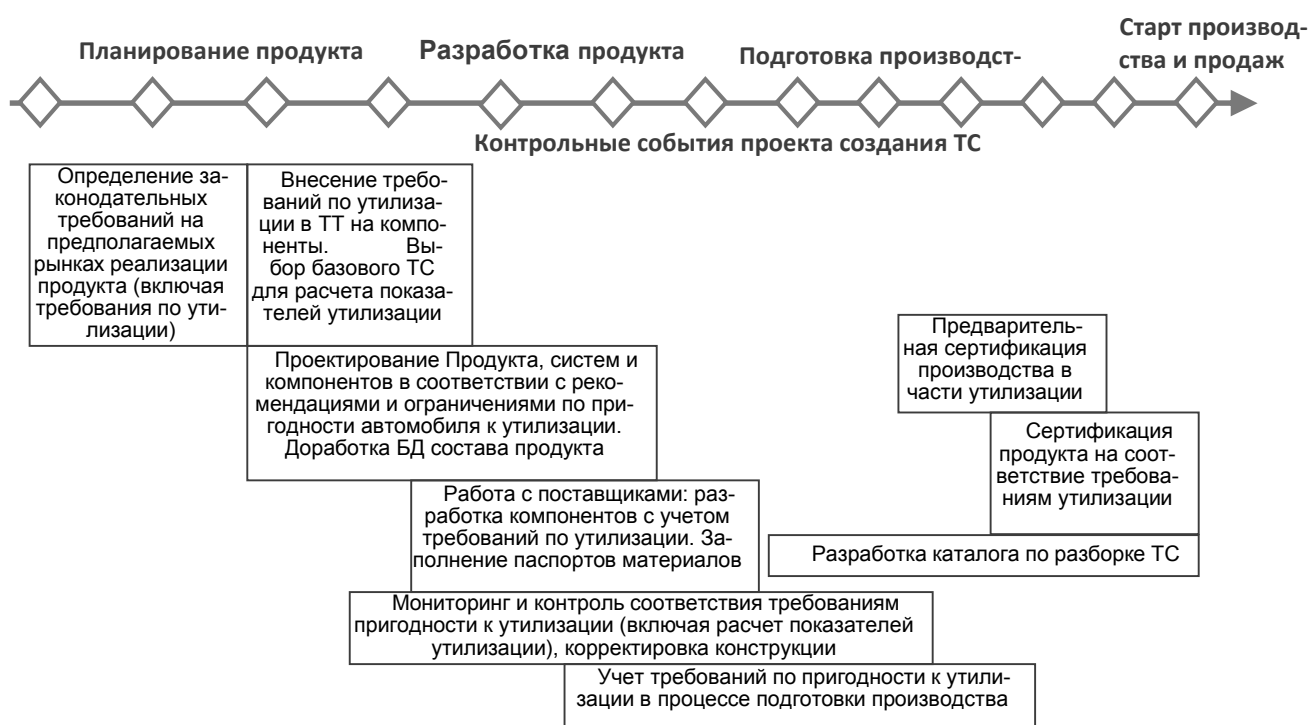
- разработка и внедрение комплекта стандартов управления целями по утилизации;
- создание специализированной среды коллективной работы для представителей различных областей проектирования продукта и его производства;
- разработка конструкции, ориентированной на возможность переработки с целью повторного использования;
- раннее вовлечение поставщиков в работы по обеспечению пригодности к утилизации;
- отказ от использования опасных материалов, либо непревышение предельных значений (свинец, кадмий, ртуть, шестивалентный хром);
- использование материалов, пригодных к переработке и повторному использованию;
- маркировка компонентов из полимеров и эластомеров;
- разработка и обеспечение доступности Каталогов разборки ТС предприятиям по утилизации;
- гарантирование возможности повторного использования более 85% от массы автомобиля, заложенное уже на стадии проектирования.

Алгоритм проектирования легких коммерческих транспортных средств с учетом требований к утилизации в конце жизненного цикла, объединяющий данные подходы заключается в следующем.

На начальном этапе проектирования производится анализ функционального назначения изделия и параллельно, согласно нормативным документам, определяются требования к конструкции изделия относительно возможности его повторного использования, вторичной переработки и восстановления. На основании данного анализа формируется структура конструкции изделия и выбор его материала. При соответствии характеристик изделия требованиям инженерного анализа осуществляется оценка пригодности материала изделия к его переработке. В случае отрицательной оценки пригодности рассматриваются возможность изменения типа материала изделия и простота демонтажа изделия. После удовлетворения требованиям инженерного анализа, пригодности к утилизации и простоте демонтажа производится расчет затрат и выгоды от переработки изделия с учетом бюджета производства. В случае соответствия результатов расчетов заданным требованиям производится анализ затрат и прибыли при производстве и переработке изделия и запуск производства. При несоответствии результатов расчета требованиям производится изменения конструкции изделия, начиная с первого этапа данного алгоритма.

В процессе проектирования нового автомобиля особенности в части утилизации встраиваются в общий поток работ, представленный на рис. 1.

На этапе планирования продукта определяются законодательные требования на рынках предполагаемой реализации автомобилей. Формируется база данных по составу продукта с возможностью расчета показателей утилизации. На этапе разработки продукта требования по утилизации включаются в состав технических требований к поставщику компонентов. При проектировании учитываются ограничения и рекомендации по пригодности автомобилей к утилизации, осуществляется выбор контрольного транспортного средства (ТС) для расчета показателей. На этапе подготовки производства от поставщиков получают подтверждения о выполнении требований по утилизации в виде оформленных паспортов материалов компонентов. При подготовке производства, также, учитываются требования пригодности к утилизации в отношении процесса производства. На всех этапах проводится мониторинг расчета показателей утилизации и необходимая корректировка конструкции и технологии (в случае выявления несоответствий).



**Рис. 1. Поток работ по выполнению требований пригодности к утилизации при создании продукта**

С точки зрения продукта можно выделить следующие особенности при обеспечении его пригодности к утилизации.

Концепция продукта:

- максимальный охват затребованных рынком функциональных характеристик путем создания линейки продуктов с минимально необходимым количеством вариантов;
- точное выполнение ожиданий потребителя без заниженных или избыточных характеристик продукта;
- оптимизация конструкции ТС в части идентичности основных характеристик компонентов (равный ресурс, идентичный уровень качества);
- минимизация материалоемкости и энергопотребления продукта на всем жизненном цикле;
- проектирование с обеспечением легкой разборки. Обеспечение устойчивости соединений к воздействию времени (коррозия, старение, изменение свойств), т.е. можно ли будет разобрать автомобиль через 10...15 лет так же легко, как в момент сборки;
- минимизация номенклатуры компонентов из различных материалов, т.е. необходимо стремиться использовать одни и те же компоненты и материалы.

Использование в конструкции экологически «дружественных» материалов:

- минимизация использования опасных материалов (свинец, ртуть, кадмий, шестивалентный хром);
- предпочтение выбору материалов, имеющих наименьшие энергозатраты при производстве продукта;
- применение материалов наиболее пригодных к повторному использованию;
- повторное использование материалов, полученных в результате утилизации; Снижение массово – габаритных характеристик компонентов продукта;
- снижение массы и объема компонентов способствует снижению логистических затрат при производстве и энергопотребления при эксплуатации автомобиля;
- Оптимизация технологии производства:

- использование технологических процессов с минимальной энергоемкостью и наименьшими выбросами вредных веществ;
  - минимизация количества технологических операций;
  - использование материалов, не требующих дополнительной обработки поверхности деталей;
  - минимизация образование отходов;
  - повторное использование отходов в том же технологическом процессе;
  - использование вторичных материалов в производстве автомобилей.
- Использование продукта по окончании срока службы:
- на этапе проектирования предусматривать возможность повторного использования компонентов, после соответствующего ремонта;
  - конструкция должна обеспечивать легкую разборку и разделение материалов;
  - следует использовать модульную конструкцию, что позволяет упростить разборку;
  - материалы должны иметь маркировку (особенно полимеры и эластомеры) для ускорения их сортировки;
  - чем больше материалов пригодно к переработке для повторного использования - тем меньше отходов будут подлежать захоронению;
  - узлы и детали, содержащие опасные материалы, должны легко сниматься, чтобы в дальнейшем не засорять окружающую среду (особенно при сжигании отходов).

Поскольку показатели пригодности к утилизации и восстановлению определяются расчетом по массам материалов компонентов транспортного средства, обозначенным в технической документации автопроизводителя с последующим контролем фактических отклонений в производстве, вопрос управления массами занимает одно из ключевых мест в процессе управления целями по утилизации. Порядок действий по управлению целевой массой автомобиля представлен в табл. 1.

Таблица 1

#### Порядок действий по управлению целевой массой автомобиля

№	Действие	Этап создания продукта
1	Проанализировать тенденции изменения массовых характеристик автомобилей и их компонентов в будущие периоды. Провести анализ предшествующих моделей собственного производства. Провести анализ значений масс продуктов конкурентов и их компонентов в рамках работы по бенчмаркингу.	Планирование
2	Установить целевые массы для базовых модификаций автомобиля в семействе продукта	Планирование
3	Представить инженерный состав базовых модификаций до крупных систем - первый уровень декомпозиции (кузов, шасси, электрика и электроника, ...). Провести разбивку целевой массы продукта на системы.	Конец этапа планирования
4	Провести декомпозицию систем на подсистемы (колеса, КПП, ...) – второй уровень декомпозиции. Провести разбивку целевой массы на подсистемы.	Начало этапа разработки
5	Провести декомпозицию подсистем на компоненты – третий уровень декомпозиции. Провести разбивку целевой массы на компоненты.	Разработка
6	Разработка конструкции компонентов в рамках неперевышения целевой массы. Корректировка распределения масс в обоснованных случаях.	Разработка
7	Подтверждение достижения целевых значений в производстве. Проведение изменений конструкции в обоснованных случаях.	Подготовка производства

Расчет показателей утилизации осуществляется на основе полного набора информации о составе и массах каждого компонента ТС, вплоть до деталей крепежа, уплотнителей,

наполнителей, припоев и т.д. Взаимосвязь стадий переработки транспортных средств с расчетом показателей пригодности к утилизации представлена на рис. 2.



**Рис. 2. Взаимосвязь стадий переработки ТС с расчетом показателей пригодности к утилизации**

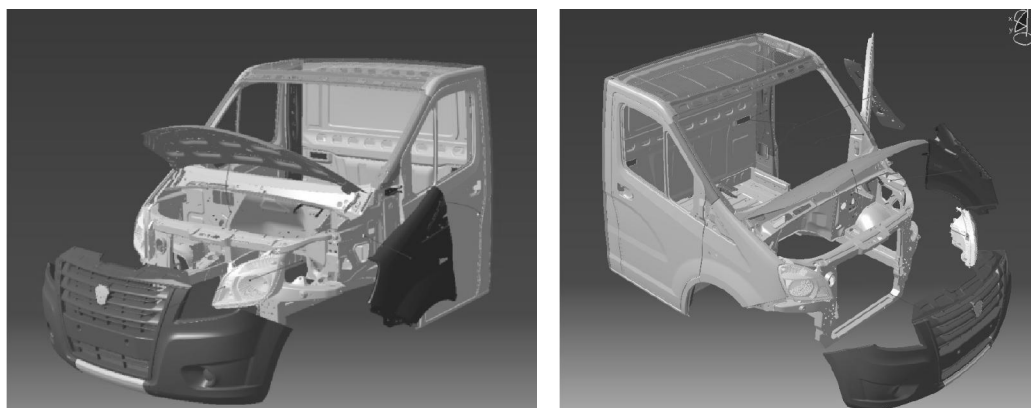
Другим ключевым моментом в пригодности автомобилей к утилизации выступает обеспечение эффективного процесса разборки автомобиля в конце жизненного цикла [7,8]. Данный критерий напрямую связан с экономической эффективностью утилизации автомобилей. Время на разборку автомобиля определяется особенностями его конструкции, элементами крепления узлов и деталей, наличием инструкций по проведению разборки и т.д. К настоящему времени многие зарубежные автопроизводители уделяют особое внимание на временные затраты, связанные с разборкой автомобиля, так как при увеличении времени разборки возрастает полная стоимость утилизации автомобиля.

Учитывая изложенное, для минимизации временных и финансовых затрат на утилизацию легких коммерческих транспортных средств в их конструкции уже на этапе проектирования закладываются специализированные решения и ограничения, упрощающие разборку. Средствами САД-системы и специализированной системы моделирования технологических процессов производится имитация демонтажа компонента с расчетом траектории и времени операций. Пример моделирования демонтажа пластиковых деталей облицовки «ГАЗель Next» представлен на рис. 3.

Для оценки эффективности демонтажа пластиковых изделий ТС «ГАЗель Next», при проектировании которого были учтены требования по демонтажу в целях утилизации, и ТС «ГАЗель Бизнес» (ГАЗ 3302), в конструкции которого не было заложено требований по демонтажу компонентов, были проведены сравнительные испытания. Суть испытаний заключалась в оценке количества пластиковых компонентов и времени, затрачиваемого на их демонтаж. Несмотря на то, что количество пластиковых деталей на автомобиле «ГАЗель Next», по сравнению с «ГАЗель Бизнес», больше на 15%, время, затрачиваемое на демонтаж данного типа изделий, меньше на 25%. По результатам данного эксперимента можно сделать вывод о том, что данный



подход позволяет минимизировать временные и материальные затраты на обеспечение демонтируемости компонентов, а также, повысить число демонтируемых неметаллических деталей, что увеличивает показатель пригодности автомобиля к утилизации.



**Рис. 3. Моделирования демонтажа пластиковых деталей облицовки «ГАЗель Next»**

Результатом вышеуказанных работ являются выпущенные каталоги демонтажа легких коммерческих автомобилей Группы ГАЗ, удовлетворяющие требованиям нормативных документов ЕС в отношении пригодности транспортных средств к утилизации.

### **Выводы**

Таким образом, для обеспечения лидирующих позиций ЛКА ГАЗ на внутреннем рынке и роста продаж на внешних рынках было достигнуто существенное повышение экологической безопасности продуктов, в том числе путем обеспечения пригодности к утилизации в конце жизненного цикла. Результаты данной работы позволили реализовать проект по разработке новых и приведению уже выпускаемых легких коммерческих автомобилей ГАЗ в соответствие Европейским требованиям по пригодности к утилизации в конце жизненного цикла.

Следует отметить, что при непосредственном применении вышеописанной методики проектирования легких коммерческих транспортных средств с учетом утилизации в конце жизненного цикла были получены сертификаты соответствия Директивам 2009/1/ЕС и 2005/64/ЕС на производство и продукцию соответственно, что является одним из условий выхода на экспортные рынки.

### **Библиографический список**

1. **Акулова, А. А.** Организация процесса утилизации автомобилей в уральском регионе: дисс. ... канд. техн. наук: 05.02.22 / Екатеринбург, 2017.
2. Официальный сайт «Российской газеты» [Электронный ресурс]: [официальный сайт]. – Электрон. дан. Режим доступа: <https://rg.ru/2013/09/10/transport.html>, свободный
3. **Бобович, Б.Б.** Утилизация автомобилей и автокомпонентов: учеб. пособие / Б. Б. Бобович. – М.: МГИУ, 2010. – 176 с.
4. **Трофименко, Ю.В.** Утилизация автомобилей: монография / Ю.В. Трофименко, Ю.М. Воронцов, К.Ю. Трофименко. – М.: АКПРЕСС, 2011. – 336 с.
5. **Петров, Р. Л.** Экологическая безопасность автомобилей ВАЗ в полном жизненном цикле: дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.03 / М., 2006.
6. **Сычев, А.В.** Методология проектирования автомобилей с учетом их последующей утилизации / А.В. Сычев, А.С. Теренченко // Журнал автомобильных инженеров. – 2012. – №1. – С. 34–35.
7. **Крясков, В.Г.** Разработка методологии создания карт демонтажа для целей утилизации / В.Г. Крясков, С.А. Гагунов, А.М. Грошев // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – №6. – С. 109–117.

8. **Крясков, В.Г.** Анализ способов организации процессов демонтажа вышедших из эксплуатации транспортных средств для нужд утилизации / В.Г. Крясков, Т.В. Анфимова, С.А. Гагунов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2014. – №1(102). – С. 142–149.

*Дата поступления  
в редакцию 20.03.2018*

**S.A. Gagunov**

## **LIGHT COMMERCIAL VEHICLES DESIGNING WITH CONSIDERING END-OF-LIFE VEHICLES RECYCLING REQUIREMENTS**

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

**Purpose:** Development of light commercial vehicles designing methodology satisfying the utilization rates.

**Design/methodology/approach:** This approach is based on functional and engineering analysis of the projected product and on the requirements of normative documents in the field of recycling

**Findings:** The analysis of the domestic recycling industry was carried out. The main barriers in the field of commercial vehicles utilization have been identified. A methodology of designing light commercial vehicles (LCV) with satisfies the utilization rates is proposed. The calculation of recycling indicators based on a complete set of information on vehicle components is given. The dismantling of vehicle components as a key process in the utilization structure is considered. A comparative evaluation of the efficiency of dismantling of plastic products of GAZ Group commercial vehicles was carried out.

**Research limitations/implications:** This work is the basis for creating the GAZ Group products according with the end-of-life vehicles recycling requirements

**Originality/value:** The introduction of this methodology will provide the leading positions of GAZ Group's products on the domestic market and the growth of sales in foreign markets, and will increase the environmental safety of manufactured vehicles.

*Key words:* end-of-life vehicles (ELV), dismantling, recycling, material separation, light commercial vehicles (LCV).

УДК 629.33-52

А.М. Иванов, С.Р. Кристальный, Н.В. Попов, М.А. Топорков, М.И. Исакова

**НОВЫЕ МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО ЭКСТРЕННОГО ТОРМОЖЕНИЯ И ОПЫТ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ**Московский автомобильно-дорожный  
государственный технический университет, г. Москва

Предлагаются методы испытаний систем автоматического экстренного торможения легковых автомобилей. Проверка функционирования САЭТ осуществляется при движении автомобиля по направлению к различным неподвижным «целям». Оцениваются возможности САЭТ по распознаванию различных «целей», момент поступления сигнала предупреждения о столкновении и эффективность автоматического торможения. Испытательные заезды проводятся на различных опорных поверхностях. Для исключения повреждений автомобиля при столкновении с «целью» используется «мягкая» цель из картона или выполняется манёвр «объезд препятствия». Описан метод синхронизации сигнала предупреждения о столкновении с параметрической записью заезда. Проведены испытания САЭТ автомобиля Infiniti QX 60 Hi-tech. Проанализированы отказы САЭТ в различных условиях. Установлено, что средства технического зрения САЭТ Infiniti QX 60 Hi-tech распознают «мягкую» цель как препятствие.

*Ключевые слова:* DAS/ADAS, САЭТ, TTC, автоматическое торможение, цель, время до столкновения, полигонные испытания.

**Введение**

Всё большее количество производителей автомобилей предлагают в качестве опции на своих моделях системы помощи водителю (DAS/ADAS): системы удержания в полосе движения, системы автоматического экстренного торможения (САЭТ), системы адаптивного круиз-контроля, системы автоматической парковки и другие. Эти системы, несмотря на дополнительную стоимость, пользуются популярностью у покупателей. Так, по данным «Авторевю» [1], 15%-ный прирост новых клиентов марки «Субару» в Европе обеспечили не полный привод или оппозитный двигатель этих автомобилей, а фирменная система безопасности EyeSight. В свою очередь, покупатели возлагают определенные надежды на системы DAS/ADAS для обеспечения безопасности движения, которые должны быть проверены при испытаниях. В статье [2] перечисляются возможные проблемы при эксплуатации автомобилей с подобными системами и указывается необходимость их тестирования.

В рамках научной работы кафедры «Автомобили» МАДИ, выполняемой по государственному заданию Минобрнауки России, было решено проверить эффективность действия САЭТ автомобиля в различных дорожных ситуациях. Испытания проводились с целью получения информации о работе типичной современной САЭТ.

Задачами экспериментального исследования являлись:

1. Определение условий (скорость объекта, дистанция до цели, тип и смещение цели) срабатывания или отказа САЭТ.
2. Определение статистики отказов САЭТ.
3. Оценка своевременности поступления сигнала предупреждения о столкновении;
4. Оценка величины замедления автомобиля, реализуемого САЭТ.
5. Анализ адаптивности САЭТ к изменению состояния дорожного покрытия.
6. Определение устойчивости САЭТ к ложным срабатываниям.

Под отказом САЭТ рассматривалась ситуация несрабатывания сигнала предупреждения о столкновении.

Для проведения экспериментальных исследований были разработаны программа испытаний и методика выполнения испытательных заездов, а также собран измерительный комплекс для регистрации параметров объекта испытаний (ОИ).

### Программа и методика испытаний

Для проверки основных функций САЭТ, определяющих общую эффективность действия системы, различные дорожные ситуации моделировались в соответствии с табл. 1.

Испытательные заезды проводились на сухом и влажном асфальтобетонном покрытии, а также на увлажненном базальте (для некоторых типов испытаний), имитирующем покрытие с низким коэффициентом сцепления.

Типы испытаний 1-7 позволяют определить возможности средств «технического зрения» САЭТ по обнаружению различных типов неподвижных препятствий, а также способность САЭТ к автоматическому снижению скорости движения. При выполнении испытаний 1-7 автомобиль движется прямолинейно по направлению к «цели».

В испытаниях 1, 3-7 после получения сигнала предупреждения о столкновении водитель не принимает мер к снижению скорости. Вне зависимости от факта срабатывания САЭТ в испытаниях 1, 3-7, водитель-испытатель выполняет манёвр объезда «цели» во избежание столкновения с ней (рис. 1). Данный маневр выполняется на минимально безопасном расстоянии от «цели». Маневр объезда препятствия позволяет с большей вероятностью избежать контакта с «целью», может быть осуществлён позже по сравнению с манёвром «торможение перед препятствием» и позволяет проанализировать работу САЭТ практически до самого препятствия.

Таблица 1

Программа испытаний САЭТ

Тип испытания	Манёвр	Цель	Скорость объекта испытаний, $V$ , км/ч	Смещение «цели» $E_{lat}$ , %	Дорожное покрытие
1	Объезд препятствия	«Мягкая» стена	40 60 80	0	Сухой асфальтобетон
2а	Прямое торможение (тормозит водитель)	«Мягкая» стена	40 60 80	0	Сухой асфальтобетон Увлажнённый асфальтобетон Увлажнённый базальт
2б	Прямое торможение (тормозит САЭТ)	«Мягкая» стена	40 60 80	0	Сухой асфальтобетон Увлажнённый асфальтобетон
3	Объезд препятствия	«Мягкая» стена	40 60 80	50	Сухой асфальтобетон
4	Объезд препятствия	Автомобиль	40 60 80	0	Сухой асфальтобетон
5	Объезд препятствия	Макет мотоцикла	40 60 80	0	Сухой асфальтобетон
6	Объезд препятствия	Велосипед	40 60 80	0	Сухой асфальтобетон
7	Объезд препятствия	Манекен	40 60 80	0	Сухой асфальтобетон
8	Прямой проезд	Автомобиль	40 60 80	100	Сухой асфальтобетон



**Рис. 1. Маневр объезд препятствия (мягкая стена)**

При выполнении испытания 2а после получения сигнала предупреждения о столкновении, водитель-испытатель производит экстренное торможение. Объект во время замедления остается в полосе движения вплоть до остановки перед «целью» или до удара о «цель».

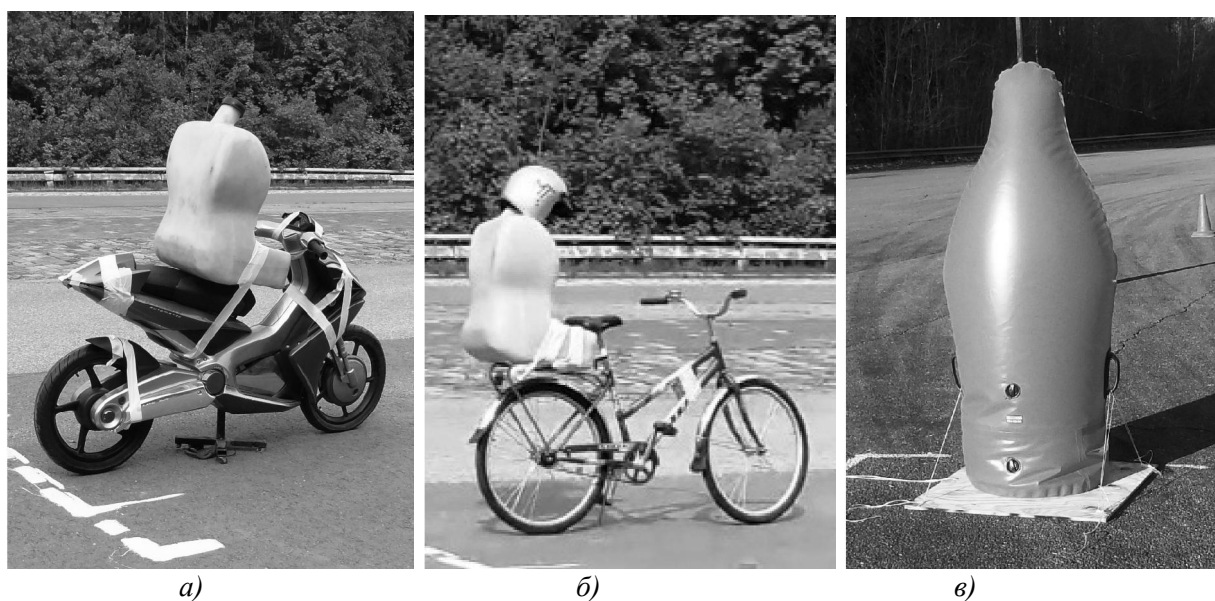
Испытание 2б идентично 2а и отличается тем, что после подачи сигнала предупреждения о столкновении, водитель-испытатель не производит торможения, а ожидает замедления объекта от действия САЭТ. Испытание 2а позволяет оценить своевременность поступления сигнала предупреждения о столкновении.

Испытание 2б позволяет определить величину замедления, развиваемого САЭТ объекта испытаний без участия водителя.

Испытание 8 позволяют оценить устойчивость САЭТ к ложным срабатываниям на неподвижное примыкающее ТС.

При выполнении испытания 8 автомобиль движется прямолинейно по направлению к «цели», которая установлена в соседней полосе.

При составлении программы испытаний были проанализированы нормативные документы [3–6], а также использован опыт других подобных исследований [7–9].



**Рис. 2. «Цели»:**

*а* – макет мотоцикла; *б* – велосипед; *в* – надувной манекен

Испытательные заезды были проведены на участке специальных дорог Центра испытаний НАМИ (г. Дмитров).

#### Описание «целей»

В качестве «целей» при испытаниях САЭТ были задействованы:

- «мягкая» стена (рис. 1);
- автомобиль;
- макет мотоцикла (рис. 2, а);
- велосипед (рис. 2, б);
- надувной манекен (рис. 2, в).

Для заездов, где имеется вероятность столкновения ОИ с «целью», применялась «мягкая» стена, выполненная из картона. На поверхности «мягкой» стены, обращенной, к приближающемуся ОИ, закрепляется металлизированное покрытие, необходимое для улучшения чувствительности радаром данной «цели». Основные размеры «цели» приведены на рис. 3.

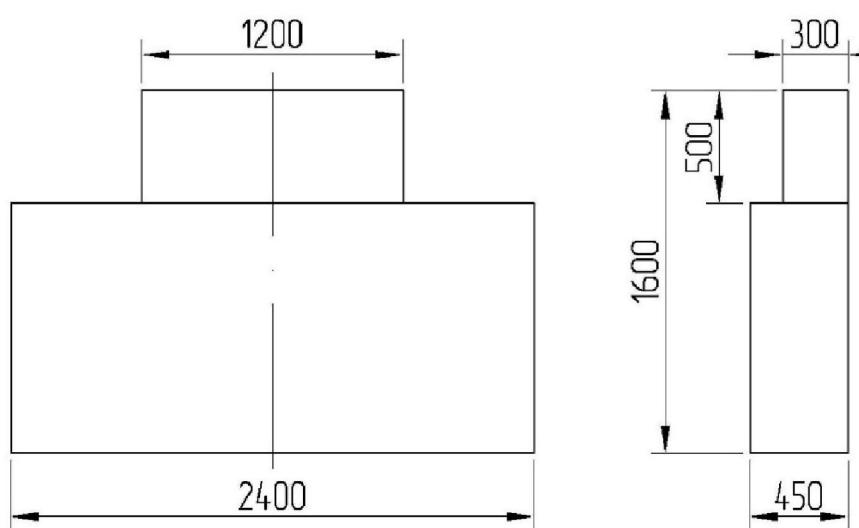


Рис. 3. Основные размеры «цели» «мягкая» стена

Преимущественное применение «мягкой цели» объясняется повышением безопасности испытательных заездов, при обязательном условии адекватного обнаружения такой цели со стороны САЭТ объекта испытаний.

Перед проведением заездов производилась разметка испытательного участка и фиксация географических координат «цели».

Под боковым смещением цели  $E_{lat}$  понимается поперечное расстояние между продольными осями объекта испытаний и «цели», измеряемое в процентах от ширины ОИ (рис. 4). При  $E_{lat}=100\%$  цель располагается в соседней полосе с максимальным смещением от боковой поверхности ОИ не более 0,3 м по наружным зеркалам заднего вида.

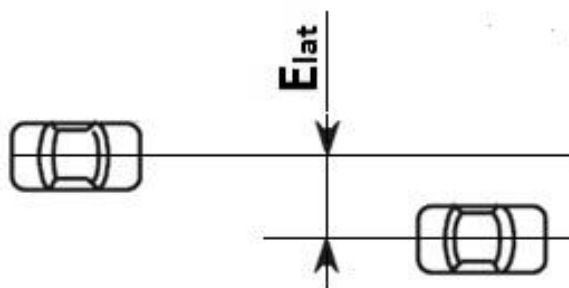


Рис. 4. Боковое смещение  $E_{lat}$  между ОИ и «целью»

### Метод фиксации момента срабатывания сигнала предупреждения о столкновении

Для определения параметров движения автомобиля в момент подачи визуального и/или акустического сигнала предупреждения о столкновении был разработан метод, позволяющий синхронизировать время подачи этого сигнала с параметрической записью испытательного заезда.

*Преимущество* предлагаемого метода заключается в возможности фиксировать любые аудиовизуальные сигналы независимо от их природы: появление звукового сигнала, загорание контрольной лампы на панели приборов, появление сообщения на экране бортового компьютера и т.п.

*Недостатки* метода – отсутствие возможности зафиксировать тактильные сигналы (увеличение усилия на педали акселератора, натяжение ремня безопасности, быстрый провал тормозной педали и т.п.), сложность и большое время обработки данных. Факт подачи сигнала предупреждения о столкновении фиксируется видеокамерой. В поле зрения видеокамеры находится лампа (светодиод) внутренней световой индикации, которая загорается определенное время после начала параметрической записи. В блоке регистрации и обработки данных также фиксируется момент подачи и длительность цифрового сигнала, который управляет включением лампы световой индикации. По записи, сделанной видеокамерой, можно синхронизировать время поступления сигнала предупреждения о столкновении с параметрической записью. Внешняя лампа индикации позволяет при наличии наружной видеосъемки также синхронизировать с параметрической записью все процессы, происходящие с автомобилем во время испытательного заезда, например момент включения стоп-сигналов.

### Объект испытаний (ОИ)

Для проведения испытаний компанией «INFINITI Россия» был предоставлен автомобиль Infiniti QX 60 Hi-tech, оснащённый системой FEB (Forward Emergency Braking) – системой экстренного торможения при опасности фронтального столкновения с функцией обнаружения пешеходов [10].

Система FEB использует радар (рис. 5, поз. а), установленный позади нижней решетки переднего бампера, для измерения расстояния до автомобиля, движущегося в той же полосе движения. Для обнаружения пешеходов предусмотрена камера (рис. 5, поз. б) [10], установленная сверху за ветровым стеклом. Система FEB функционирует при скоростях больше 5 км/ч (в диапазоне скоростей от 10 до 60 км/ч при обнаружении пешеходов).

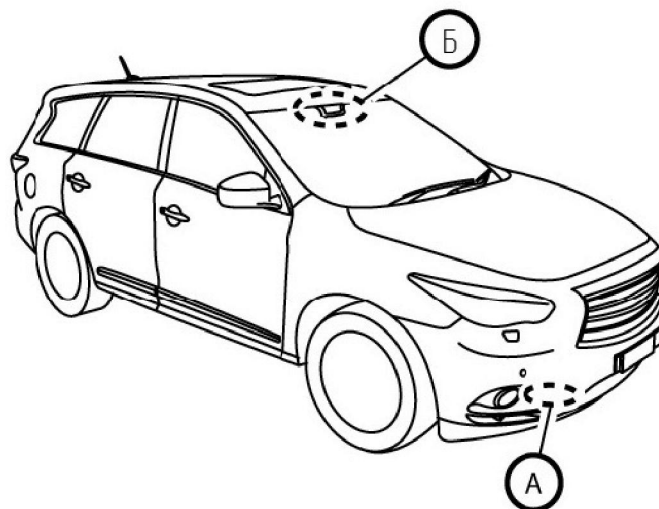


Рис. 5. Средства «технического зрения» систем помощи водителю объекта:

а – радар; б – камера

### Измерительная и регистрирующая аппаратура

Для решения сформулированных выше задач экспериментального исследования на автомобиль была установлена следующая измерительная и регистрирующая аппаратура:

- динамометрическое измерительное рулевое колесо MEASUREMENT STEERING WHEEL (MSW) фирмы KISTLER, Германия;
- датчик усилия нажатия на тормозную педаль CPFTA фирмы KISTLER, Германия;
- выносной датчик угловой скорости колеса WPT фирмы KISTLER, Германия для определения окружной скорости левого переднего колеса;
- датчик ускорений и угловых скоростей Tri-Axial Navigational Sensor (TANS) фирмы KISTLER, Германия;
- GPS антенны фирмы IMC (Германия) и JAVAD (США);
- универсальная измерительная система сбора и обработки данных CS 1016 FAMOS Online фирмы IMC, Германия.

Питание оборудования осуществлялось от бортовой сети автомобиля через блок распределения питания Small 12V Power Distributor Box фирмы KISTLER, Германия.

Регистрация момента подачи визуального сигнала предупреждения о столкновении на приборной панели производилась с помощью видеокамеры, укрепленной на кожухе рулевой колонки.

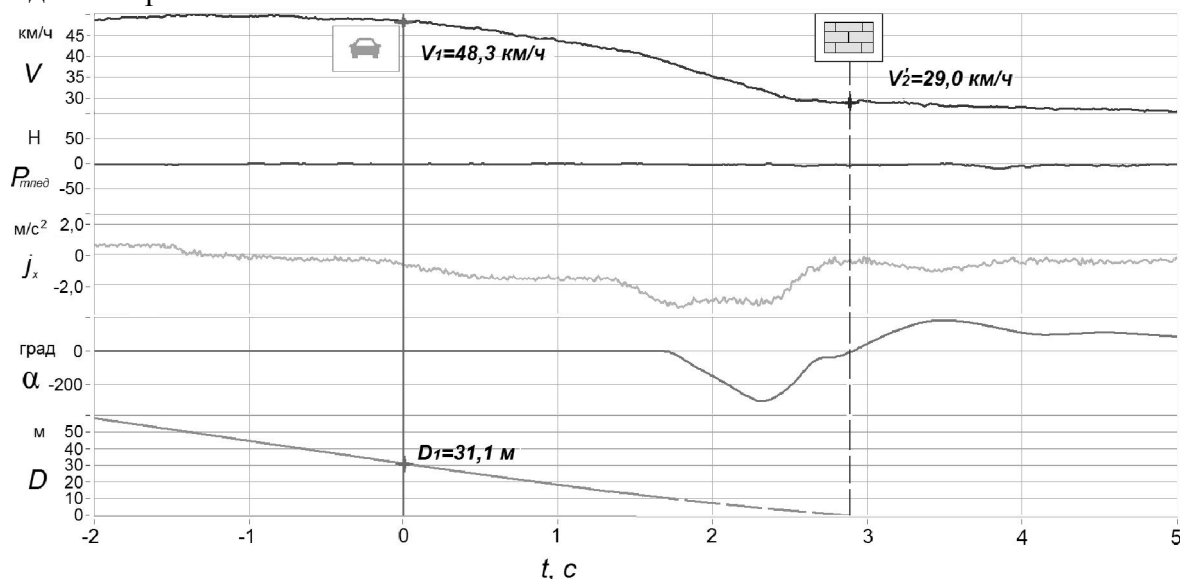
### Обработка результатов испытаний

По каждому испытательному заезду были построены зависимости от времени (рис. 6):

- скорости движения  $V$ ;
- продольного замедления ( $j_x$ );
- угла поворота рулевого колеса ( $\alpha$ );
- расстояния от ОИ до «цели» ( $D$ );
- усилия нажатия на педаль тормоза ( $P_{торм}$ ).

За начало отсчёта времени на графиках принят момент срабатывания предупреждения о возможном столкновении. Дистанция между ОИ и «целью» определяется по координатам системы глобального позиционирования.

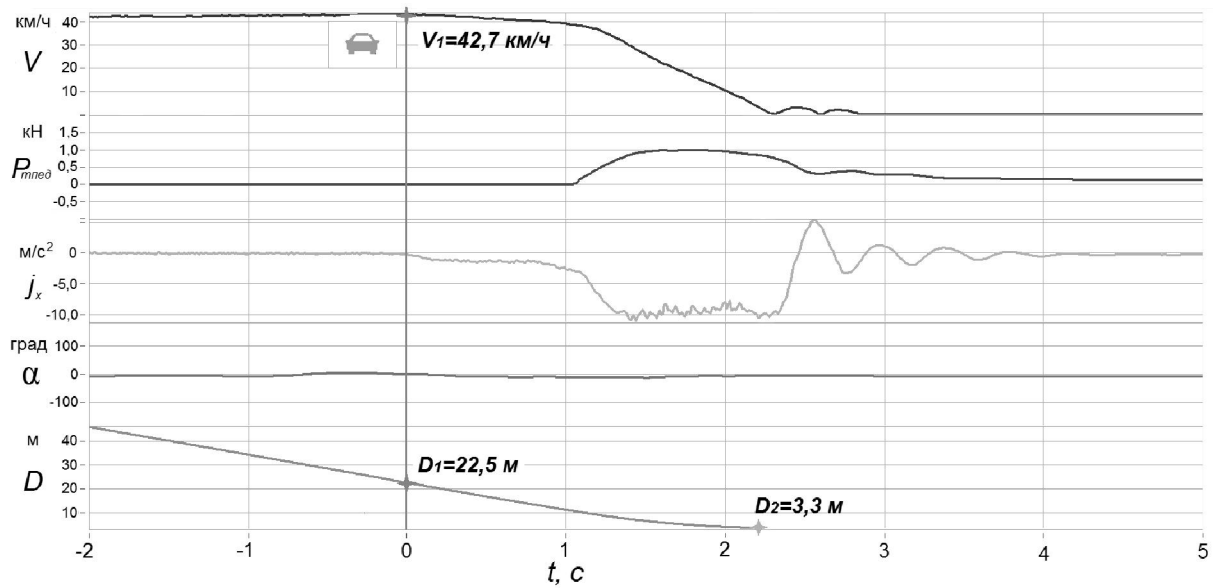
Примеры построенных зависимостей для некоторых различных типов испытаний приведены на рис. 6.



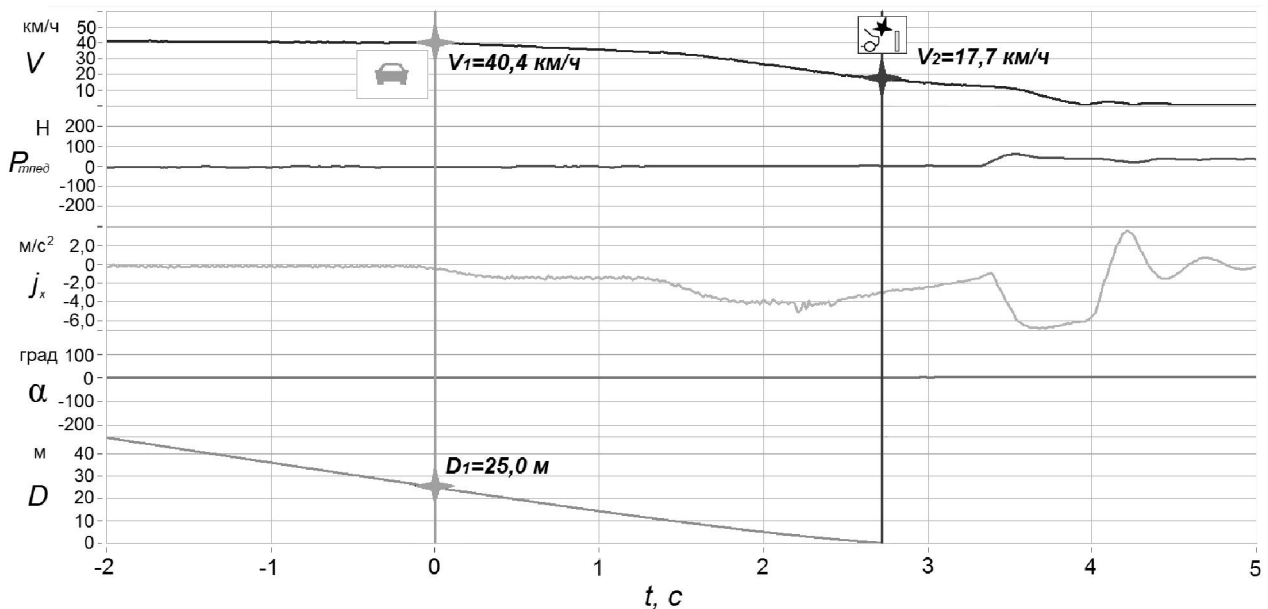
a)

Рис. 6. Пример зависимостей для испытаний 1, 3, 4, 5, 6, 7, 8 (a)





б)



в)

Рис. 6. (Окончание). Пример зависимостей для испытания 2а (б);  
пример зависимостей для испытания 2б (в)

Условные обозначения на рис. 6:

$V_1$  – продольная скорость ОИ в момент срабатывания предупреждения о возможном столкновении;  $D_1$  – дистанция между ОИ и «целью» в момент срабатывания предупреждения о возможном столкновении;  $D_2$  – дистанция между ОИ и «целью» в случае остановки перед «целью»;  $V_2$  – продольная скорость ОИ в момент столкновения с «целью»;  $V'_2$  – гипотетическая продольная скорость ОИ в момент столкновения с «целью» (при проезде мимо «цели») – скорость ОИ в момент столкновения с «целью», если бы не проводился объезд препятствия;



– момент срабатывания сигнала предупреждения о столкновении;



– момент условного касания (при выполнении объезда препятствия) ОИ «цели»;



– момент касания (только для мягкой стены) ОИ «цели».

### Анализ результатов испытаний

После поступления сигнала предупреждения о столкновении САЭТ начинает сразу же автоматическое торможение и обеспечивает уровень установившегося замедления на сухом асфальтобетоне перед «целями» мягкая стена или автомобиль порядка 2-3 м/с<sup>2</sup> (со скорости 40 км/ч) и порядка 3-4 м/с<sup>2</sup> (со скорости 60 км/ч). Такой эффективности автоматического торможения оказывается недостаточно для остановки перед «целями».

На сухом асфальтобетоне при выполнении испытания 2а ОИ успевал остановиться перед целью, но на увлажнённых асфальтобетоне и базальте происходило столкновение. Таким образом, данная система САЭТ не адаптируется к изменению коэффициента сцепления опорной поверхности.

Ложных срабатываний по испытанию 8 не зафиксировано.

Статистика отказов САЭТ в зависимости от разных условий представлена в табл. 2 и табл. 3.

Таблица 2

Отказы САЭТ по типам «целей» и испытаний

Тип испытания	«Цель»	Количество заездов		Количество отказов САЭТ, ед. (%)	
			Итого: 59		Итого: 4 (7 %)
1	«Мягкая» стена	34	Итого: 59	2	Итого: 4 (7 %)
2а, 2б		22		2	
3		3		0	
4	Автомобиль	13		2 (15 %)	
5	Макет мотоцикла	10		3 (30 %)	
6	Велосипед	9		3 (33 %)	
7	Манекен	18		5 (28 %)	

Таблица 3

Отказы САЭТ в зависимости от скорости движения ОИ

«Цель»	Количество отказов в зависимости от скорости, км/ч		
	40	60	80
«Мягкая» стена	1	1	2
Автомобиль	0	0	2
Макет мотоцикла	1	0	2
Велосипед	0	0	3
Манекен	1	1	3
Всего отказов:	3	2	12
Выполнено заездов:	40	33	36

Анализ табл. 2 показывает, что данная система САЭТ лучше всего распознает «цели» мягкая стена и автомобиль.

Также было выявлено увеличение числа отказов САЭТ с ростом скорости ОИ (табл. 3).

Заблаговременность появления предупреждения оценивается параметром *TTC* (Time to collision) – время до столкновения. Время до столкновения – время, через которое произойдет столкновение ОИ с «целью» при условии неизменной текущей относительной скорости ОИ и цели.

Время до столкновения с неподвижной целью рассчитывается по следующей формуле:  $TTC = D_1 / V_1$ .

В табл. 4 представлено сравнение средних значений *TTC* для различных «целей» при скоростях срабатывания предупреждения о столкновении 40 и 60 км/ч.

В табл. 5 представлено сравнение средних значений *TTC* для различных опорных поверхностей.

Таблица 4

## Значение ТТС для различных «целей»

Тип «цели»	ТТС, с	
	$V_{сраб}=40$ км/ч	$V_{сраб}=60$ км/ч
«Мягкая» стена	2,18	2,42
Автомобиль	2,06	2,55
Велосипед	0,98	1,51

Таблица 5

Значение ТТС для различных опорных поверхностей  
(испытания 2а, 2б, «цель» – мягкая стена,  $V=60$  км/ч)

Опорная поверхность	ТТС, с
Сухой асфальтобетон	2,25
Увлажнённый базальт	2,29

Адекватность срабатывания САЭТ на мягкую цель подтверждается малым процентом отказов (табл. 2) и идентичностью параметра ТТС для мягкой «цели» и реального автомобиля (табл. 4).

Сигнал предупреждения о столкновении с велосипедом поступает гораздо позже, чем с мягкой стеной или автомобилем. Поэтому автоматическое торможение не успевает начаться до выполнения маневра объезда препятствия.

Анализ табл. 5 подтверждает ранее сделанный вывод об отсутствии адаптивности алгоритма работы САЭТ к изменению состояния опорной поверхности.

### Заключение

Для проведения испытаний систем автоматического экстренного торможения предложен новый метод. Особенности предлагаемого метода испытаний:

- испытания проводятся на опорных покрытиях с различным сцеплением;
- исследуется взаимодействие с большим количеством «целей»;
- введён манёвр «объезд препятствия»;
- анализируется большее количество параметров движения автомобиля;
- используются новые методы обработки испытательных данных.

По результатам проведённого экспериментального исследования САЭТ автомобиля Infiniti QX 60 Ni-tech можно сделать следующие выводы:

1. Средства технического зрения САЭТ объекта распознают тип «цели» – «мягкая стена» как препятствие. Данная «цель» может применяться и в дальнейших испытаниях.

2. Средства технического зрения САЭТ объекта плохо распознают тип «цели» – неподвижный велосипед. Данный аспект накладывает ограничения на диапазон функциональной безопасности САЭТ.

3. Замедление, развиваемое объектом, во время функционирования САЭТ (без участия водителя) недостаточно для полной остановки объекта перед неподвижным препятствием, что также сужает эффективный диапазон системы.

4. Алгоритм подачи сигнала предупреждения о столкновении не зависит от сцепных свойств покрытия, что приводит к значительному снижению функциональной безопасности САЭТ на скользких покрытиях.

5. Большое количество отказов САЭТ на скорости 80 км/ч косвенно свидетельствует о недостаточной дистанции обнаружения препятствия, что также сужает диапазон применения ОСЭТ.

6. Срабатываний САЭТ на «ложную цель» зафиксировано не было.

## Библиографический список

1. Растегаев, О. Outback в снегу // Авторевю. – 2018. – № 6 (630). – С. 36–37.
2. Приходько, В.М. Методики тестирования автоматизированных систем управления автомобилем / В.М. Приходько [и др.] // Вестник Московского автомобильно-дорожного технического университета. – 2017. – № 4(51). – С. 10–15.
3. Правила ЕЭК ООН № 131 (01) . Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения автотранспортных средств в отношении систем автоматического экстренного торможения (САЭТ). – URL: <https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2017/R131r1am1r.pdf> (дата обращения 04.04.2018).
4. ГОСТ Р ИСО 22839-2017 Интеллектуальные транспортные системы. Системы снижения тяжести последствий от столкновения с движущимся впереди транспортным средством. Работа, эксплуатационные характеристики и требования к проверке (ISO 22839:2013, IDT). – М.: Стандартиформ, 2017. – 29 с.
5. ГОСТ Р ИСО 15623-2017 Интеллектуальные транспортные системы. Системы предупреждения столкновений с движущимся впереди транспортным средством. Требования к эксплуатационным характеристикам и методы испытания (ISO 15623:2013, IDT). – М.: Стандартиформ, 2017. – 28 с.
6. Safety Assist. – URL: <https://www.euroncap.com/ru/для-инженеров/protocols/safety-assist/> (дата обращения 04.04.2018).
7. Сачков, М. Топ-стоп / М. Сачков // За рулём. – 2018. – № 2. – С. 42-53.
8. OCAS-DRI-CIB-16-08 New car assessment program. Crash imminent braking system confirmation test. 2016 Nissan Rogue. Final Report. U. S. Department of transportation. – 2016. – P. 108.
9. CAS-DRI-CIB-17-06 New car assessment program. Crash imminent braking system confirmation test. 2017 Mitsubishi Outlander. Final Report. U. S. Department of transportation. – 2017. – P. 120.
10. Руководство по эксплуатации автомобиля Infiniti QX 60. – URL: <https://www.infiniti.ru/content/dam/Infiniti/Russia/manuals/qx60.pdf> (дата обращения 10.11.2017).

*Дата поступления  
в редакцию 29.04.2018*

**A.M. Ivanov, S.R. Kristalniy, N.V. Popov, M.A. Toporkov, M.I. Isakova**

**NEW METHODS OF TESTING AUTOMATIC EMERGENCY BRAKING SYSTEMS  
AND THEIR APPLICATION**

Moscow Automobile and Road Construction state technical university (MADI)

**Purpose:** The article proposes the methods of testing automatic emergency braking systems (AEBS) in passengers cars.  
**Working methods:** Checking the functioning of the AEBS is carried out when the car moves in the direction of various fixed "targets." Estimates the possibility of the AEBS for recognizing various "targets", the moment of arrival of the collision warning signal and the efficiency of automatic braking. Test races are conducted on different support surfaces. The "soft target" made from carboard or performing by-pass maneuver, are used to exclude damaging the car from a collision. This article describes the method of synchronizing a collision warning signal with a parametric entry record.  
**Result:** AEB system was tested on Infiniti QX 60 Hi-tech. All failures of AEBS in road conditions are analyzed.  
**Conclusions:** The AEB system can recognize the "soft target" as an obstacle. This "target" can be used in further testing of such systems.

*Key words:* AEBS / AEB system, emergency braking, target, time before collision, test race.

УДК621.355:629.331

**А.В. Кочеров, Д.Р. Курмакаев, А.Ю. Сизов, А.А. Туманов, Л.О. Федосова**  
**ВЫБОР ТИПА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ АККУМУЛЯТОРА**  
**ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ LCV-СЕКМЕНТА**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Посвящена вопросам проектирования аккумуляторной системы отечественного электромобиля сегмента LCV. В частности, рассматривается базовый вопрос выбора типа химии аккумуляторной ячейки таким образом, чтобы обеспечивалось выполнение требований к эксплуатационным характеристикам электромобиля. Проведен анализ существующих химических источников тока, в том числе наиболее широко применяемых в электротранспорте. Сделан вывод о предпочтительном типе химии для LCV-электромобиля.

*Ключевые слова:* аккумуляторная система, электрохимическая система, электромобиль, система термостатирования, LightCommercialVehicle, литий-ионный аккумулятор, аккумуляторная ячейка.

Грузоперевозки по территории нашей страны играют важную роль для обеспечения связи между различными субъектами, обусловленную значительной протяженностью по площади и рассредоточением населенных пунктов. Число компаний, осуществляющих процесс грузоперевозок, растет изо дня в день, что свидетельствует о повышенном спросе на этот вид услуг [3].

При этом увеличивается не только межрегиональный грузопоток, но и внутри городов из-за роста интенсивности хозяйственной и промышленной деятельности компаний на их территории. Как правило, для обеспечения грузоперевозок в городских условиях используются не крупные грузовики, а автомобили сегмента LCV – LightCommercialVehicle (легкий коммерческий автомобиль), поскольку они более маневренные, экономичные и, соответственно, более выгодные в плане себестоимости перевозок.

Современные тенденции в автомобильной отрасли к производству электромобилей, привлекательность их эксплуатации в городских условиях, а также динамичное развитие рынка автомобилей LCV-сегмента побуждают автопроизводителей к разработке LCV-электроплатформ. Разработками в данной отрасли занимаются такие мировые автогиганты, как Mercedes, Renault и Volkswagen.

Как известно, наиболее важными компонентами любого электромобиля являются электропривод и аккумуляторная система [4]. Расчет и конструирование электропривода – одна из наиболее важных проектных задач в машиностроении в целом, поэтому к решению данной задачи существует большое количество подходов и методов, ориентированных на обеспечение различных выходных характеристик [7].

Иначе обстоит дело с проектированием другого, не менее важного, компонента электромобиля – аккумуляторной системы. Поскольку отрасль электрического автомобилестроения является относительно молодой, то на настоящий момент не существует устоявшихся концепций и методик, которые позволили бы в достаточной мере определенно решать задачи проектирования аккумуляторных систем. По этой причине каждый автопроизводитель, занимающийся выпуском или проектированием собственных электроплатформ, решает задачи проектирования аккумуляторных систем по-своему, разрабатывая собственную методику и получая уникальный продукт.

В 2017 году ОАО «Группа «ГАЗ» занялась разработкой собственного электромобиля на базе автомобиля «Газель-NEXT». В состав проектных работ, в том числе, входит разработка бортовой аккумуляторной системы, в которой принимает участие коллектив студенческого конструкторского бюро «Мехатроника и робототехника» НГТУ им. Р.Е.Алексеева. Данная статья посвящена вопросам проектирования химического состава аккумуляторной системы для электромобиля на базе «Газель-NEXT».

Аккумулятор представляет собой химический источник тока (ХИТ), т.е. такой источник ЭДС, в котором электрическая энергия появляется за счет преобразования энергии химической реакции элементов, входящих в состав ХИТ [2]. Поскольку концепция электромобиля подразумевает повторную зарядку (или подзарядку) источников энергии, то элементы питания должны представлять собой вторичные ХИТ, т.е. перезаряжаемые от внешнего источника тока [6].

Любой аккумулятор можно охарактеризовать рядом параметров:

1. Тип химии аккумулятора.
2. Номинальная емкость аккумулятора. Измеряется в Ампер-часах и определяет количество энергии, запасаемой аккумулятором.
3. Внутреннее сопротивление аккумулятора. Измеряется в миллиОмах. Этот параметр отражает способность аккумулятора отдавать ток в нагрузку. Чем меньше внутреннее сопротивление, тем больший ток может обеспечить аккумулятор.
4. Саморазряд аккумулятора. Выражается в процентах от номинальной емкости. Этот параметр характеризует самопроизвольный разряд аккумулятора, отключенного от нагрузки.
5. Плотность энергии. Измеряется в Ватт-часах на килограмм ( $Вт \cdot ч/кг$ ). Чем выше этот показатель, тем легче будет аккумулятор заданной емкости.
6. Ресурс (время жизни). Выражается в количестве циклов заряд/разряд и показывает, сколько циклов заряд/разряд сможет обеспечить аккумулятор до того момента, пока его емкость не снизится до определенного значения (как правило, 80%).

Приведенные параметры являются зачастую взаимосвязанными. В частности, номинальная емкость определяется исходя из объемно-габаритных параметров и удельных характеристик аккумулятора. Удельные, а также зарядно-разрядные и ресурсные характеристики, в свою очередь, определяются типом химии и технологией аккумулятора.

В современной технике используются пять основных типов аккумуляторов, отличающихся по своему химическому составу [2]:

1. Никель-кадмиевые (NiCd). Хорошо отработанная и изученная технология, но обладает низкой плотностью энергии. Используется там, где важны долговечность, способность обеспечить высокий ток нагрузки и малая стоимость. Основные области применения: портативные радиостанции, медицинское оборудование, профессиональные видеокамеры и электроинструмент. NiCd аккумуляторы содержат токсичные материалы и являются экологически грязными.
2. Никель-металлогидридные (NiMH). По сравнению с NiCd имеют более высокую плотность энергии, но меньшее время жизни. NiMH не содержат токсичных материалов. Применяются в мобильных телефонах и портативных компьютерах.
3. Литий-ионные (Li-ion). Наиболее бурно развивающаяся технология. Используются там, где нужна высокая плотность энергии и малый вес. Li-ion дороже всех других аккумуляторов. При эксплуатации необходимо строго соблюдать режимы заряда и разряда, указанные производителем из соображений безопасности. Применяются в компьютерах и сотовых телефонах.
4. Литий-полимерные (Li-polymer). Задуманы как удешевленная версия Li-ion аккумуляторов. Этот тип химии по плотности энергии аналогичен Li-ion. Это позволяет делать Li-polymer аккумуляторы очень компактными. В основном, используются в мобильных телефонах.
5. Герметичные свинцово-кислотные (SLA). Применяются там, где требуется большая мощность, а вес не имеет значения. Типовые области применения - стационарное медицинское оборудование, электромобили, системы аварийного энергоснабжения, UPS.

Литий-ионные аккумуляторы являются наиболее подходящими в качестве ХИТ для электромобиля [5]. Электромобили с литий-ионными аккумуляторами могут иметь пробег без подзарядки 200 км и более. В настоящее время несколько фирм Японии, Франции, США и других стран проводят испытания электромобилей с литий-ионными аккумуляторами. Ос-

новным недостатком литий-ионных аккумуляторов, ограничивающим их применение в электромобилях, является очень высокая стоимость. Однако стоимость аккумуляторов непрерывно снижается благодаря использованию более дешевых материалов, усовершенствованию технологии и увеличению объема производства.

Разные подвиды литий-ионной электрохимической системы именуется по типу своего активного вещества и обозначаются либо его химической формулой, либо словесно[5]. Далее представлены типы химии литий-ионных аккумуляторов, применяемых в электротранспорте[1].

### **Литий-марганцевые ячейки**

Структура литий-марганцевой ячейки (LMO) содержит трехмерную марганцевую шпинель в качестве катода, за счет чего улучшается поток ионов на электроде и уменьшается внутреннее сопротивление ячейки. Также такая шпинель обладает высокой термостабильностью, но срок жизни и количество циклов ячеек ограничены.

За счет низкого внутреннего сопротивления ячейки обеспечиваются быстрый заряд и высокое значение силы тока разряда: цилиндрические ячейки форм-фактора 18650 способны разряжаться силой тока в 20-30А с умеренным теплообразованием. Кроме того, литий-марганцевые ячейки способны выдерживать импульсные броски тока до 50А в течение 1-2 с. Продолжительная нагрузка в 50А приведет к нагреву аккумулятора, температура которого не должна превышать 80°C во избежание деградации. Высокая выходная мощность и хорошие показатели термостабильности под нагрузкой позволяют использовать литий-марганцевые ячейки в аккумуляторах мощных инструментов, медицинского оборудования, а также данные ячейки используются в аккумуляторах гибридного и электротранспорта.

Емкость литий-марганцевого аккумулятора примерно на треть ниже, чем у литий-кобальтового. Однако конструкция шпинели позволяет оптимизировать ячейку под различные задачи, изменяя емкость. В частности, емкость ячейки форм-фактора 18650 составляет всего 1100 мАч, в то время как оптимизированной ячейки того же форм-фактора – 1500 мАч.

Большинство литий-марганцевых ячеек комбинируются с литий-никель-марганец-кобальтовыми (NMC) для повышения удельной энергоемкости и продления срока службы. Подобная комбинация используется в большинстве электромобилей, таких как NissanLeaf, ChevyVolt и BMW i3. Доля литий-марганцевых ячеек в таких аккумуляторах составляет около 30% и обеспечивает высокие возможности ускорения двигателя, а NMC-часть отвечает за размер автономного пробега.

### **Литий-никель-марганец-кобальт-оксидные ячейки**

Одним из наиболее успешных вариантов исполнения литий-ионной электрохимической системы является сочетание никеля, марганца и кобальта (NMC) в катоде. По аналогии с LMO, эти системы могут быть оптимизированы под емкость или мощность. Например, NMC-ячейка форм-фактора 18650 для умеренной нагрузки имеет емкость 2800 мАч и может обеспечивать силу тока в 4-5 А, а версия в том же форм-факторе, но оптимизированная под мощностные показатели, имеет емкость только 2000 мАч при максимальной силе тока разряда в 20 А. Показатель емкости может быть увеличен до 4000 мАч при добавлении кремния в состав анода, однако при этом значительно ухудшатся нагрузочные характеристики и долговечность ячейки. Это объясняется свойствами кремния изменять свои размеры при зарядке и разрядке, что приводит к механической неустойчивости конструкции аккумулятора.

Основной элемент управления характеристиками в технологии NMC – это сочетание никеля и марганца. Похожим примером является поваренная соль, компоненты которой – натрий и хлор – по отдельности являются токсичными, но в соединении образуют полезное пищевое вещество. Никель характеризуется высокой удельной энергоемкостью, но низкой стабильностью; марганец имеет преимущество в виде шпинельной структуры, которая обес-

печивает низкое внутреннее сопротивление, но приводит к недостатку – малой удельной энергоемкости. Сочетания данных металлов в различных пропорциях позволяют компенсировать недостатки друг друга и в полной мере использовать их сильные стороны.

NMC-аккумуляторы используются для мощных инструментов, электровелосипедов и других силовых агрегатов. Состав катода, как правило, сочетает никель, марганец и кобальт в равных частях. Такое соотношение известно как 1-1-1. Оно выгодно стоимостью, так как содержание дорогого кобальта по сравнению с другими версиями ячеек относительно невелико (третья часть объема катода). Еще одна успешная комбинация NMC содержит 5 частей никеля, 3 части кобальта и 2 части марганца.

Высокая производительность и низкая стоимость данных ячеек делают их наиболее популярными. Производство катода из никеля, марганца и кобальта технологически несложно, что позволяет удовлетворить широкий спектр требований электротранспорта и подобрать оптимальные сочетания металлов катода для обеспечения циклической работы и приемлемых нагрузочных характеристик. Кроме того, низкий уровень самонагрева делает эту батарею предпочтительным вариантом для электротранспорта.

### **Литий-никель-кобальт-алюминий-оксидные ячейки**

Ячейки типа NCA схожи с NMC-ячейками. Они выделяются высокой удельной энергоемкостью, удельной мощностью и длительным сроком службы. Электрохимическая система NCA стала очередным этапом развития литий-никелевой системы в направлении повышения стабильности.

Высокие показатели энергоемкости и плотности энергии данных ячеек вкупе с их долговечностью делают такую технологию перспективной для электротранспорта. Но основными недостатками NCA-ячеек на настоящий момент являются низкая безопасность и высокая стоимость, поэтому на данном этапе их использование в качестве источника энергии для электромобилей крайне затруднительно.

### **Литий-титанатные ячейки**

Анод литий-титанатной ячейки (Li4Ti5O12) состоит не из графита, как в классическом литий-ионном аккумуляторе, а из нанокристаллов титаната лития. Графит также присутствует в составе ячейки, но в роли катода. Номинальное напряжение ячейки составляет 2,4В, благодаря чему возможен быстрый заряд аккумулятора, а также обеспечивается высокий ток разряда – 10С. Количество циклов заряда-разряда больше, чем у обычной литий-ионной ячейки. Литий-титанатные ячейки безопасны, имеют отличные низкотемпературные характеристики: при -30°C емкость сохраняется на 80%. Но стоимость таких ячеек значительно выше, а показатель удельной энергоемкости в 65 Вт\*ч/кг позволяет конкурировать только с никель-кадмиевыми аккумуляторами. Типичные области применения данных аккумуляторов – электрические силовые агрегаты, системы аккумулирования электроэнергии и уличное освещение на солнечных батареях, однако в настоящее время ведутся активные разработки литий-титанатных аккумуляторов для электрических грузовиков и автобусов.

Основные требования к эксплуатационным характеристикам электромобилей LCV-сегмента заключаются в обеспечении достаточной грузоподъемности и запаса автономного хода на одном заряде автомобиля. При этом требования к грузоподъемности здесь значительно серьезнее, чем для легковых автомобилей, в силу выполняемых задач. Кроме того, поскольку коммерческий транспорт, как правило, эксплуатируется в практически непрерывном режиме, важным параметром является количество зарядно-разрядных циклов аккумулятора. В табл. 1 приведены основные требования, предъявляемые к проектируемому электромобилю.



Таблица 1

## Основные технические параметры проектируемого LCV -электромобиля

Технические характеристики	Параметры разрабатываемого электромобиля LCV - сегмента
Полная масса	3500-4500 кг
Грузоподъемность	1400-1600 кг
Мощность номинальная/ максимальная тягового электродвигателя	80-120 кВт
Момент номинальный/максимальный	300-450 Нм
Максимальная скорость,	100-130 км/ч
Емкость аккумуляторных батарей	50-70 кВтч
Пробег на одной зарядке	120-200 км
Время 100% зарядки, ч	Не более 7 часов при зарядке от розетки 220 В, 0,75-1 час при использовании специального зарядного устройства

Таким образом, исходя из предъявляемых требований и характеристик различных типов химии ХИТ, можно сделать вывод, что литий-ионные батареи являются наиболее подходящим на текущий момент типом ХИТ для электромобиля, поскольку их удельные эксплуатационные параметры и показатели безопасности значительно выше, чем у аналогов, основанных на иных электрохимических системах.

Наибольший интерес представляет совместное использование в определенных пропорциях в составе аккумулятора электромобиля NMC и LMO-ячеек, поскольку подобная комбинация позволяет обеспечивать наилучшие соотношения эксплуатационных характеристик LCV-электромобиля.

Перспективно применение систем NCA и LTO в силу их более высоких удельных (NCA) и эксплуатационных (LTO) характеристик. Однако масштабный ввод в эксплуатацию данных систем на текущем этапе невозможен в силу ряда проблем, связанных с несбалансированностью характеристик ячеек, а также высокой стоимостью и сложностью их производства.

Исследования в области проектирования аккумуляторов разделяются на два основных направления. Первое заключается в оптимизации существующих электрохимических систем по критериям максимизации срока службы, удельных характеристик и емкости ячейки, а также в совершенствовании технологий их производства с целью его удешевления. В первую очередь это относится к NMC, NMA, LMO, LTO-ячейкам.

Второе направление ориентировано на разработку новых электрохимических систем, позволяющих достигать качественно иного уровня эксплуатационных характеристик и параметров аккумуляторов. В частности, речь идет о разработках твердотельных литиевых аккумуляторов, литий-серных ячеек. Также проводятся исследования в области разработки эффективных систем обслуживания аккумуляторов (систем термостатирования, балансировки, оптимизации зарядных операций и пр.).

## Библиографический список

1. **Абрамова, О.** Типы и виды литий-ионных (литиевых) аккумуляторов (Li-ion) [Электронный ресурс] // URL: <https://best-energy.com.ua/support/battery/bu-205> (дата обращения 20.12.2017 г.).
2. **Бадаев, Ф.З.** Элементы электрохимии. Химические источники тока: учеб. пособие / Ф.З. Бадаев, В.А.Батюк, В.Н. Горячева. – М.: Изд-во МГТУ, 1993. – 71 с.
3. **Белозерцева, Н.П.** Структура и особенности современного рынка грузоперевозок / Н.П. Белозерцева, М.С. Ярайкина // Территория новых возможностей. Вестник ВГУЭС.- №1/2012. – Владивосток: Изд-во ВГУЭС, 2012. – С. 64–73.
4. **Гаджилы, Б.Э.** Исследование аккумуляторных батарей электромобилей // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура (электронный научный журнал). – 2014. – №2(2). – М.: МАДИ, 2014.

5. **Кедринский, И.А.** Li-ионные аккумуляторы / И.А. Кедринский, В.Т. Яковлев. – Красноярск: Платин», 2002. – 268 с.
6. **Таганова, А.А.** Герметичные химические источники тока: справочник / А.А. Таганова, Ю.И. Бубнов, С.Б. Орлов. – СПб.: Химиздат, 2005. – 264 с.
7. **Шабанов, А.В., Ломакин, В.В., Шабанов, А.А.** Характеристики электромобилей и тенденции развития электропривода / А.В. Шабанов, В.В. Ломакин, А.А. Шабанов // Журнал автомобильных инженеров. – 2014. – №3 (86). – С. 38–43.

*Дата поступления  
в редакцию 05.04.2018*

**A.V. Kocherov, D.R. Kurmakaev, A.Y. Sizov, A.A. Tumanov, L.O. Fedosova**

### **SELECTING OF THE ELECTROCHEMICAL SYSTEM TYPE FOR THE ELECTRIC LCV**

Nizhniy Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

**Introduction:** The development of electric platforms for the segment of light commercial vehicles (LCV) has become popular at present. The most important components of any electric vehicle are the electric drive and the battery system. At the moment there are no established concepts and techniques that would sufficiently adequately solve the battery systems design problems. For this reason, each automaker engaged in the production or design of its own electrical platforms, solves the problem of designing battery systems in its own way. Therefore, the development of the first domestic battery system for electric vehicles LCV-segment is an urgent scientific and technical task.

**Methods:** The work methods are applied: analysis, decomposition, investigation of electrochemical processes.

**Results:** Analytical review of existing chemical sources of current is carried out. The requirements for electric vehicles of the LCV segment are analyzed. Investigations of the characteristics of various types of lithium-ion batteries have been conducted. A conclusion is drawn on the preferred type of chemistry of the LCV electric vehicle battery.

**Conclusions:** Of greatest interest is the joint use in certain proportions in the battery of the electric vehicle NMC and LMO-cells, since such a combination allows to provide the best ratio of the performance characteristics of the LCV-electric vehicle. The use of NCA and LTO systems is promising because of their higher specific (NCA) and operational (LTO) characteristics.

*Key words:* battery system, electrochemical system, electric car, thermal management system, Light Commercial Vehicle, lithium-ion battery, battery cell.

УДК 629.331

**И.Р. Мавлеев, И.И. Салахов, В.В. Волошко****МОДУЛЬНАЯ ТРАНСМИССИЯ ТЯЖЕЛЫХ ГРУЗОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ****Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского)  
федерального университета**

Предложена конструкция модульной коробки передач для тяжелых грузовых автомобилей по патенту РФ № 2508486, которая состоит из дифференциального делителя, основного редуктора и дифференциального демультипликатора с интегрированной задней передачей. Предложенная конструкция имеет меньшие габаритные размеры, вес и инерционные массы вращающихся частей, обладает большей жесткостью, быстродействием процесса переключения передач. Транспортное средство, оснащенное данной трансмиссией, будет более рационально использовать мощность двигателя и экономно расходовать топливо, что повысит его конкурентоспособность на рынке.

*Ключевые слова:* трансмиссия, коробка передач, дифференциальный механизм, делитель, демультипликатор, планетарный редуктор.

Целью Госпрограммы РФ «Развитие промышленности и повышение её конкурентоспособности» (Постановление Правительства РФ №328 от 15.04.14), подпрограммы 1 «Развитие транспортного и специального машиностроения» является развитие конкурентоспособной промышленности в условиях антикризисной стабилизации рынка и формирование внутренних источников инновационного развития.

В рамках этой программы можно выделить следующие основные задачи, стоящие перед производителями автомобильной техники и её компонентов, на решение которых направлена разработка многоступенчатой коробки передач:

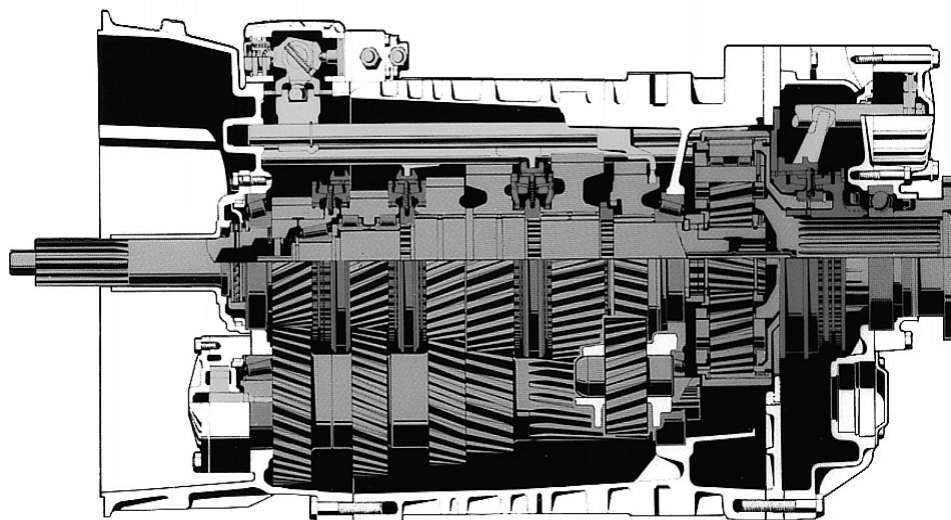
1. Обеспечение потребностей транспортного комплекса страны за счет внутреннего производства конкурентоспособной техники.
2. Развитие инфраструктуры проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок по созданию новых видов продукции, компонентов и технологий мирового уровня.

Производители тяжелых грузовых автомобилей также разрабатывают свои программы развития, ориентируясь на Госпрограмму РФ «Развитие промышленности и повышение её конкурентоспособности». Так, одной из основных задач является создание нового поколения коробок передач, обладающих принципиально другими техническими характеристиками и потребительскими свойствами.

**Аналоги предлагаемой трансмиссии**

На тяжелых грузовых автомобилях для увеличения диапазона передаточных чисел используются коробки передач с комбинированной кинематической схемой, состоящей из основного редуктора, образованного несколькими парами зубчатых колес, расположенных на параллельных валах с неподвижными осями вращения, и дополнительных редукторов (делители и демультипликаторы), причем делитель представляет собой двухступенчатую зубчатую передачу, а демультипликатор – планетарный зубчатый механизм [1, 2].

Известны устройства, наиболее близкие по совокупности признаков к заявленному изобретению, для ступенчатого изменения крутящего момента и передачи его на ведущие колеса автомобиля. Например, наиболее удачным европейским вариантом коробки передач для грузовых автомобилей, является коробка ZF Ecosplit (рис. 1).



**Рис. 1. Конструкция коробки передач ZF Ecosplit**

Они представляют собой механическую коробку передач, состоящую из основного четырехступенчатого редуктора, двухступенчатого делителя передач, встроенного в основной редуктор, и двухступенчатого демультимпликатора, образованного трехзвенным планетарным механизмом.

Размещение делителя, состоящего из двух пар зубчатых передач и синхронизатора, в корпусе основного редуктора увеличивает длину и вес вторичного и промежуточного валов, соответственно, увеличивает габариты основного редуктора. Кроме этого, основной редуктор имеет дополнительный ряд шестерен для обеспечения задней передачи, который также увеличивает длины валов и габариты корпуса основного редуктора. Ряд шестерен задней передачи, в силу конструктивных особенностей, не обеспечивает передачу полной мощности двигателя в случае необходимости использования её при эксплуатации автомобиля.

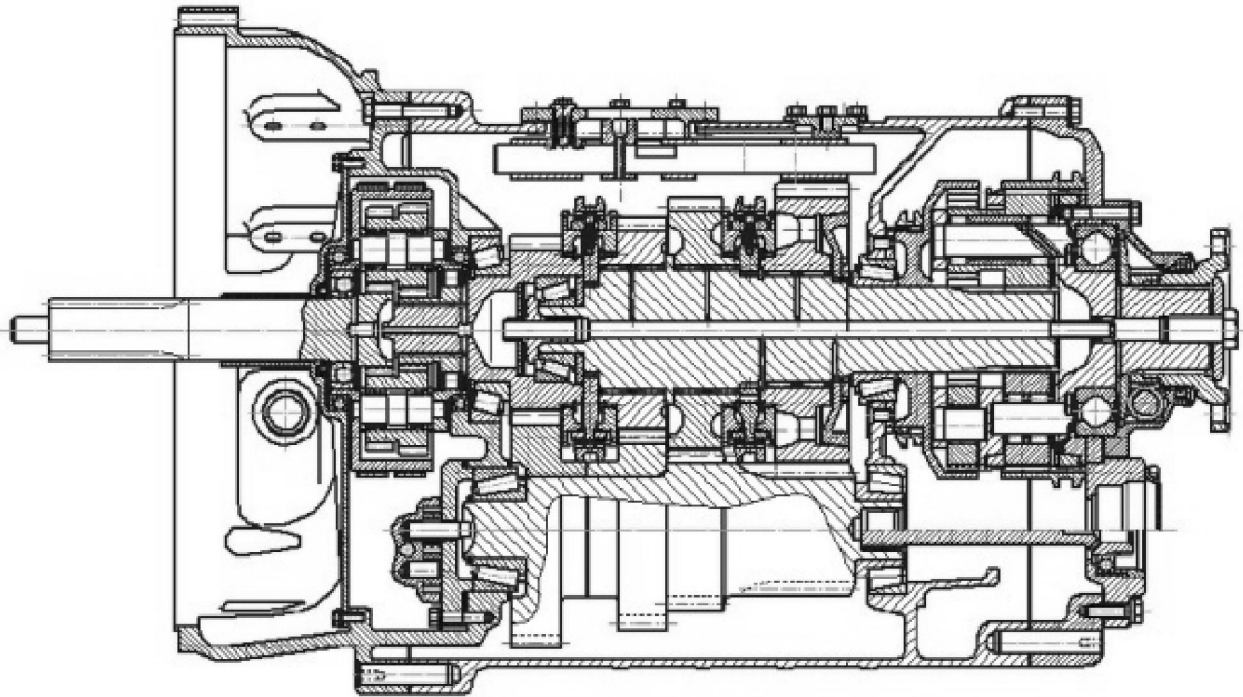
Синхронизатор, служащий для переключения делителя, при управлении движением автомобиля переключается в четыре раза чаще, чем каждый синхронизатор основной коробки, что приводит к более интенсивному его износу. При этом каждое переключение делителя осуществляется с выключением-включением сцепления, что приводит к повышенному износу трущихся деталей сцепления, разрыву потока мощности передаваемого на ведущие колеса автомобиля. При этом уменьшается коэффициент использования мощности двигателя, уменьшается коэффициента полезного действия коробки и снижается комфорт управления автомобилем.

Очевидно, что перед проектировщиками многоступенчатых коробок передач стоят следующие задачи:

- обеспечение общих требования к любым новым агрегатам транспортных средств, а именно повышение надежности и жесткости, а также обеспечение модульности конструкции с меньшими габаритными размерами и весом;
- выполнение специальных требований к коробкам передач: повышение быстродействия, обеспечение необходимого количества ступеней и требуемого диапазона передаточных чисел, обеспечение плавности переключения передач без разрыва потока мощности, обеспечение возможности испытания отдельно модулей коробки передач, передача полной мощности при движении задним ходом и т.п. [3, 4]

### **Конструкция модульной коробки передач**

В настоящее время в Набережночелнинском институте (филиале) К(П)ФУ разработана и запатентована конструкция модульной коробки передач (рис. 2).



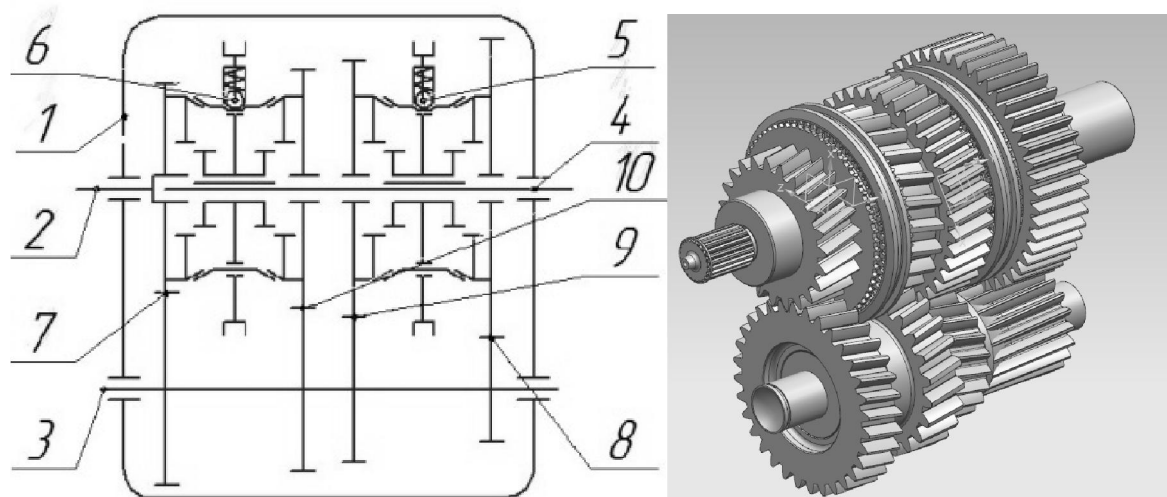
**Рис. 2. Конструкция модульной коробки передач**

Коробка передач состоит из следующих модулей: основной редуктор коробки передач, дифференциальный делитель и дифференциальный демультипликатор [5].

### **Основной редуктор коробки передач**

Кинематическая схема и конструкция основного редуктора представлены на рис. 3. Корпус основного редуктора *1* с картером сцепления образуют замкнутую полость, в которой находятся первичный вал *2*, промежуточный вал *3* и вторичный вал *4* основного редуктора коробки передач. Первичный вал является валом-шестерней, опирающейся на роликоподшипник, установленный в отверстие картера сцепления. Промежуточный вал опирается на два роликоподшипника, установленные в отверстиях корпуса и картера сцепления. Вторичный вал одним концом опирается на роликоподшипник, установленный в первичном валу, а вторым концом – на роликоподшипник, установленный в корпусе основного редуктора.

Основной редуктор коробки передач имеет четыре передачи, переключение которых происходит с помощью синхронизаторов *5* и *6*. Синхронизатор *5* включает первую и вторую передачи основного редуктора, при этом синхронизатор *6* находится в нейтральном положении. Первая передача основного редуктора включается перемещением муфты синхронизатора *5* в крайнее правое положение, когда происходит блокировка зубчатого колеса первой передачи с вторичным валом *4*. Вторая передача основного редуктора включается перемещением муфты синхронизатора *5* в крайнее левое положение, когда происходит блокировка зубчатого колеса второй передачи с вторичным валом *4*. Включение третьей и четвертой передачи осуществляется синхронизатором *6*, при этом синхронизатор *5* находится в нейтральном положении. Третья передача основного редуктора включается перемещением муфты синхронизатора *6* в крайнее правое положение, когда происходит блокировка зубчатого колеса третьей передачи с вторичным валом *4*. Четвертая передача основного редуктора – прямая, включается перемещением муфты синхронизатора *6* в крайнее левое положение, когда происходит блокировка первичного вала *2* с вторичным валом *4*.

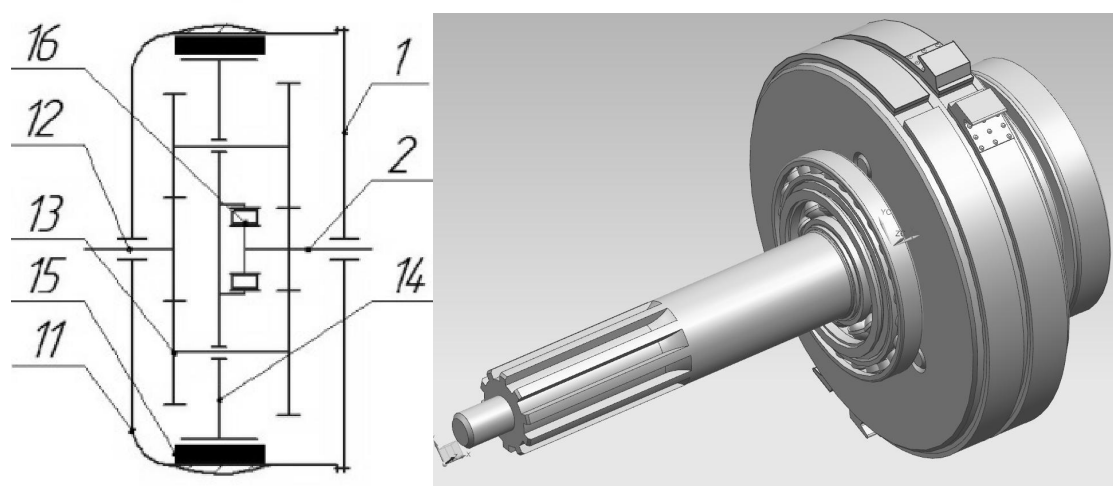


**Рис. 3. Кинематическая схема и конструкция основного редуктора:**

1 – корпус основного редуктора; 2 – первичный вал основного редуктора; 3 – промежуточный вал основного редуктора; 4 – вторичный вал основного редуктора; 5, 6 – синхронизаторы соответственно первый-второй и третьей-четвертой передач основного редуктора; 7 – пара постоянного зацепления основного редуктора; 8 – пара первой передачи основного редуктора; 9 – пара второй передачи основного редуктора; 10 – пара третьей передачи основного редуктора

### Дифференциальный делитель

Кинематическая схема и конструкция основного редуктора представлены на рис. 4. Дифференциальный делитель содержит входной вал-шестерню 12, находящийся в зацеплении с двухвенцовыми сателлитами 13, установленных на осях, запрессованных в водило дифференциального делителя 14. Водило дифференциального делителя опирается на шарикоподшипники установленные в картере сцепления и в крышке дифференциального делителя, и блокируется ленточными тормозами 15. Между водилом 14 и первичным валом основного редуктора 2 установлена роликовая муфта свободного хода 16.



**Рис. 4. Кинематическая схема и конструкция дифференциального делителя:**

1 – корпус основного редуктора; 2 – первичный вал основного редуктора; 11 – картер сцепления (картер дифференциального делителя); 12 – входной вал-шестерня дифференциального делителя; 13 – двухвенцовые сателлиты; 14 – водило дифференциального делителя; 15 – ленточные тормоза; 16 – роликовая муфта свободного хода

Дифференциальный делитель имеет две передачи. Ускоряющая передача делителя включается блокировкой водила делителя 12 на картер сцепления 11, которая осуществляется ленточными тормозами 15. Включение прямой передачи делителя происходит автоматически при растормаживании ленточных тормозов блокировкой водила делителя на роликовую муфту свободного хода 16, установленной на валу основного редуктора 2. Автоматическая блокировка водила делителя на муфту свободного хода возможна благодаря особенностям дифференциальных механизмов с положительным передаточным числом меньше единицы, при котором все звенья дифференциального механизма вращаются в одну сторону, причем водило имеет большую угловую скорость вращения, нежели угловые скорости входного и выходного валов.

Переключение диапазона дифференциального делителя осуществляется без выключения сцепления и, следовательно, без разрыва потока мощности. Тормозной момент на ленточных тормозах составляет часть передаваемого на выходной вал вращающего момента двигателя, например, при передаточном отношении дифференциального делителя  $i = 0,75$ , на ленточный тормоз действует 0,25 вращающего момента и на выходной вал 0,75 вращающего момента, развиваемого двигателем. Алгоритм включения ленточных тормозов, осуществляемый гидравлической системой, обеспечивает быстрое и плавное переключение диапазонов дифференциального делителя.

Небольшая разница передаточных отношений соседних передач коробки позволяет выбрать оптимальный режим движения в экономичном диапазоне числа оборотов двигателя. Кроме того, это облегчает управление коробкой передач и снижает уровень шума.

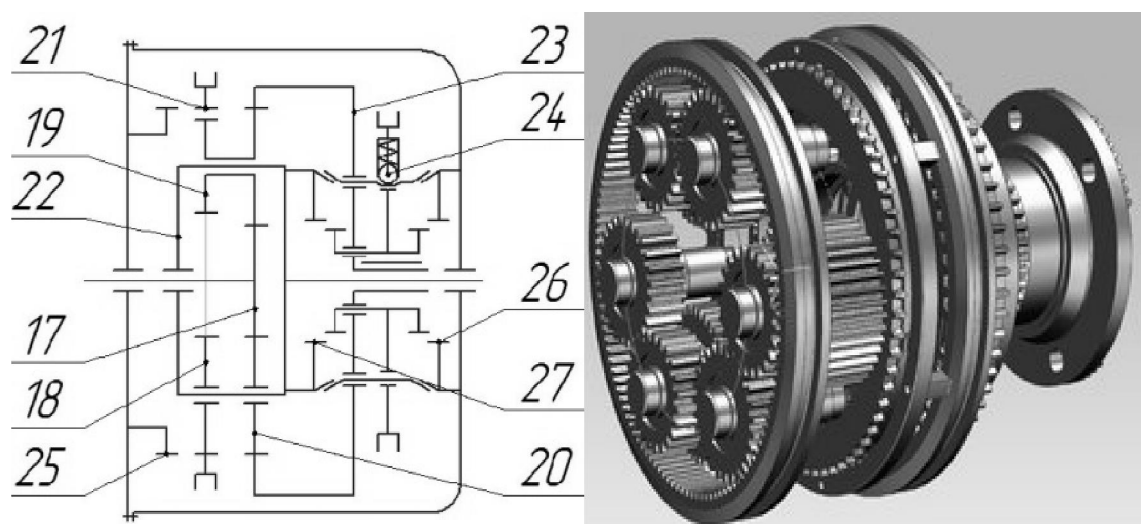
В отличие от прототипа, у которого переключение диапазона делителя осуществляется с помощью синхронизатора, в предлагаемой коробке передач для включения ускоряющей передачи осуществляется торможением водила дифференциального делителя ленточными тормозами, для включения прямой передачи ленточные тормоза освобождаются, и происходит автоматическая блокировка водила дифференциального делителя через муфту свободного хода на выходной вал дифференциального делителя.

### **Дифференциальный демультипликатор с интегрированной передачей заднего хода**

Кинематическая схема и конструкция дифференциального демультипликатора представлены на рис. 5. Дифференциальный демультипликатор содержит ведущий зубчатый венец 17, нарезанный на вторичном валу основного редуктора, сателлиты 18 и двухвенцовые сателлиты 19, паразитные сателлиты 20, коронное колесо 21, которое одновременно является муфтой заднего хода, водило демультипликатора 22, являющееся одновременно выходным валом коробки передач, и коронное колесо 23. На шлицах ступицы коронного колеса 23 установлен синхронизатор демультипликатора 24.

К корпусу основного редуктора закреплен зубчатый венец 25, предназначенный для блокировки коронного колеса 21, на картере демультипликатора закреплен зубчатый венец 26, предназначенный для блокировки коронного колеса 23, а на водиле закреплен зубчатый венец 27, предназначенный для блокировки демультипликатора.

Дифференциальный демультипликатор с интегрированной передачей заднего хода имеет две передачи переднего хода и нейтральное положение, одну передачу заднего хода. При движении груженого автомобиля в тяжелых дорожных условиях включается понижающая передача демультипликатора. Для этого зубчатая муфта синхронизатора 24 перемещается в крайнее правое положение и, после выравнивания угловых скоростей соединяемых деталей входит в зацепление с зубчатым венцом 26. При переключении дифференциального демультипликатора на повышающую передачу зубчатая муфта синхронизатора 24 перемещается в крайнее левое положение и входит в зацепление с зубчатым венцом 27. Включение передачи заднего хода происходит перемещением коронного колеса 21, одновременно являющегося муфтой заднего хода, в крайнее левое положение и введением его в зацепление с зубчатым венцом 25, при этом муфта синхронизатора 24 переводится в нейтральное положение.



**Рис. 5. Кинематическая схема и конструкция дифференциального демультипликатора:**

17 – ведущий зубчатый венец; 18 – сателлиты; 19 – двухвенцовые сателлиты; 20 – паразитные сателлиты; 21 – коронное колесо (муфта заднего хода); 22 – водило (выходной вал коробки передач); 23 – коронное колесо; 24 – синхронизатор демультипликатора, 25 – зубчатый венец блокировки муфты заднего хода; 26 – зубчатый венец блокировки коронного колеса; 27 – зубчатый венец блокировки дифференциального демультипликатора

### Выводы

Разработанная модульная трансмиссия для тяжелых грузовых автомобилей обеспечивает следующие технические результаты:

1. Исключение старой конструкции делителя, состоящего из двух пар зубчатых передач и синхронизатора, в корпусе основного редуктора, с заменой его на дифференциальный делитель, который обеспечивает уменьшение осевых размеров коробки передач, веса вторичного и промежуточного валов.

2. Модуль дифференциального делителя также обеспечивает плавное регулирование передаточного отношения, что позволяет осуществлять переключение диапазона делителя без выключения сцепления, плавно и без разрыва потока мощности. Это дает уменьшение износа трущихся деталей сцепления, повышение коэффициента использования мощности и повышение топливной экономичности двигателя, так как в моменты переключения диапазона делителя, которые происходят в четыре раза чаще, чем переключение передач основного редуктора, двигатель не переходит в режимы частичных нагрузок.

3. Управление дифференциальным делителем осуществляется гидроприводом, включаемым только с помощью кнопки, расположенной на рычаге переключения передач, что облегчает управление при движении автомобиля, повышает комфорт и снижает физическую нагрузку на водителя.

4. Исключен дополнительный ряд зубчатых шестерен заднего хода, за счет применения дифференциального демультипликатора с интегрированной задней передачей. Это позволяет получить несколько передач заднего хода, а также передавать полную мощность двигателя при его движении задним ходом на различных скоростях, что особенно важно для автомобилей специального назначения.

5. Дифференциальный демультипликатор с интегрированной задней передачей с дополнительно уменьшает осевые размеры и вес вторичного и промежуточного валов, что увеличивает жесткость валов основного редуктора и их моменты инерции. Это способствует более быстрому выравниванию угловых скоростей вращающихся масс, уменьшению нагрузок на синхронизаторы, следовательно, увеличивается долговечность синхронизаторов.

6. Повышение надежности коробки передач, так как технологический процесс её сборки может быть осуществлен после предварительных стендовых испытаний отдельных её



узлов, а именно, дифференциального делителя, основного редуктора и дифференциального демультипликатора, что в свою очередь создает предпосылки для автоматизации процесса общей сборки коробки передач.

Предлагаемая модульная трансмиссия соответствует требованиям Госпрограммы РФ «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности» (Постановление Правительства РФ №328 от 15.04.14), предъявляемым к современным узлам и агрегатам тяжелых грузовых автомобилей.

### Библиографический список

1. **Фасхиев, Х.А.** Новая трансмиссия для транспортных средств / Х.А. Фасхиев [и др.] // Инженерный журнал с приложением. – 2015. – №7. – С. 47–51.
2. **Волошко, В.В.** Конструирование и проектирование планетарной коробки передач / В.В. Волошко [и др.] // Новый университет – научный журнал. Сер. «Технические науки». – 2012. – №3. – С. 58–62.
3. **Кравец, В.Н.** Теория автомобиля: учебник / В.Н. Кравец, В.В. Селифонов. – М.: Грин-лайт+, 2011. – 884 с.
4. **Кравец, В.Н.** Определение параметров коробок передач современных легковых автомобилей / В.Н. Кравец, Р.А. Мусарский, С.А. Волков // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. – №1. – С. 175–181.
5. **Пат. № 2508486 РФ.** Автомобильная многоступенчатая коробка передач / Волошко В.В., Мавлеев И. Р., Салахов И. И. // Бюллетень изобретений. 2014. № 6.

*Дата поступления  
в реакцию 20.04.2018*

**I.R. Mavleev, I.I. Salakhov, V.V. Voloshko**

### MODULAR HEAVY DUTY TRUCK TRANSMISSION

Kazan Federal University

**Purpose:** The aim is to develop a modular transmission for heavy trucks that meets the requirements of the state Program of the Russian Federation «Development of industry and increase its competitiveness».

**Design/methodology/approach:** The approach is based on the study of foreign experience in the development of vehicle transmissions. Theoretical studies are based on the theory of complex-system approach to machine design.

**Findings:** A modular transmission design for heavy duty trucks has been developed and patented. The design of the modular transmission for heavy trucks is designed, which has technical characteristics that meet the requirements of modern automotive industry.

**Research limitations/implications:** The results of the research can be used in the design organizations of automobile enterprises in the design of new-generation transmissions of trucks.

**Originality/value:** Implementation of this project will fulfill the requirements of the state Program of the Russian Federation «Development of industry and increase its competitiveness», as well as allow to implement the national program of import substitution in transport engineering.

*Keywords:* transmission, differential mechanism, divider, demultiplikator, planetary reducer.

УДК 621.432.2

С.А. Плотников<sup>1</sup>, П.Я. Кантор<sup>1</sup>, И.С. Козлов<sup>1</sup>, М.Н. Втюрина<sup>2</sup>**ИССЛЕДОВАНИЕ МОТОРНЫХ СВОЙСТВ СМЕСЕЙ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА С РАПСОВЫМ МАСЛОМ**Вятский государственный университет, г. Киров<sup>1</sup>,  
Вятская государственная сельскохозяйственная академия, г. Киров<sup>2</sup>

Объектом исследования являются свойства смеси на основе дизельного топлива с добавкой биотоплива – рапсового масла и цетаноповышающей присадки DIFRON H372.

Задачей исследования явилось рассмотрение закономерностей изменения кинематической вязкости смесей дизельного топлива с рапсовым маслом и влияния на вязкость присадки, действующим веществом которой является 2-этилгексилнитрат.

Целью исследования явилось построение математической модели формирования вязкости смеси.

Методами настоящего исследования явились теоретический анализ и экспериментальная проверка.

Проведенные экспериментальные исследования и их теоретический анализ выявили возможность интерпретации и прогнозирования эффекта снижения кинематической вязкости смесевоего топлива за счет добавления узкофункциональных присадок.

*Ключевые слова:* дизельное топливо, биотопливо, рапсовое масло, цетаноповышающая присадка, вязкость.

В связи с постепенным исчерпанием мировых запасов нефти все более насущной задачей становится переход на альтернативные и, в частности, возобновляемые источники тепловой энергии. При этом в последнее время первоочередная роль отводится топливам биологического происхождения [1, 2]. Несмотря на то, что использование рапсового масла (РМ) в качестве заменителя дизельного топлива (ДТ) насчитывает многолетнюю историю, проблема оптимизации состава топливных смесей, содержащих РМ, остается актуальной. Это связано, главным образом, с отрицательным влиянием повышенной вязкости РМ на моторные свойства смесевоего топлива [3, 4].

Цель настоящей работы заключалась в исследовании закономерностей изменения кинематической вязкости смесей дизельного топлива с рапсовым маслом и влияния на вязкость цетаноповышающей присадки DIFRON H372, действующим веществом которой является 2-этилгексилнитрат.



**Рис. 1. Общий вид вискозиметра ВПЖ-1**

Исследованные смеси содержали 10...50% масс. рапсового масла, 0,5...2,0% масс. искомой присадки и летнее дизельное топливо по ГОСТ 305-2013 – до 100% масс. Измерения проводились при температуре +20°C на капиллярном вискозиметре типа ВПЖ-1 (рис. 1). Результаты измерений отражены в табл. 1 и на рис. 2 (под символом  $c$  здесь понимается массовая концентрация рапсового масла в растворе при отсутствии присадки,  $c_D$  – концентрация присадки). Из представленных на рис. 2 результатов видна характерная для растворов высокомолекулярных соединений нелинейная зависимость вязкости от концентрации раствора.

Таблица 1

Зависимость вязкости смеси  $\nu$ , сСт от концентрации добавок

Концентрация рапсового масла, $C$ , %	Вязкость смеси $\nu$ , сСт, при концентрации присадки $C_D$ , %			
	0	0,5	1,0	2,0
0	4,524	4,492	4,455	4,405
10	6,008	5,945	5,873	4,811
20	7,885	7,739	7,633	7,123
30	10,264	10,096	9,984	9,860
40	13,899	13,468	13,270	12,968
50	17,894	17,692	17,400	16,985

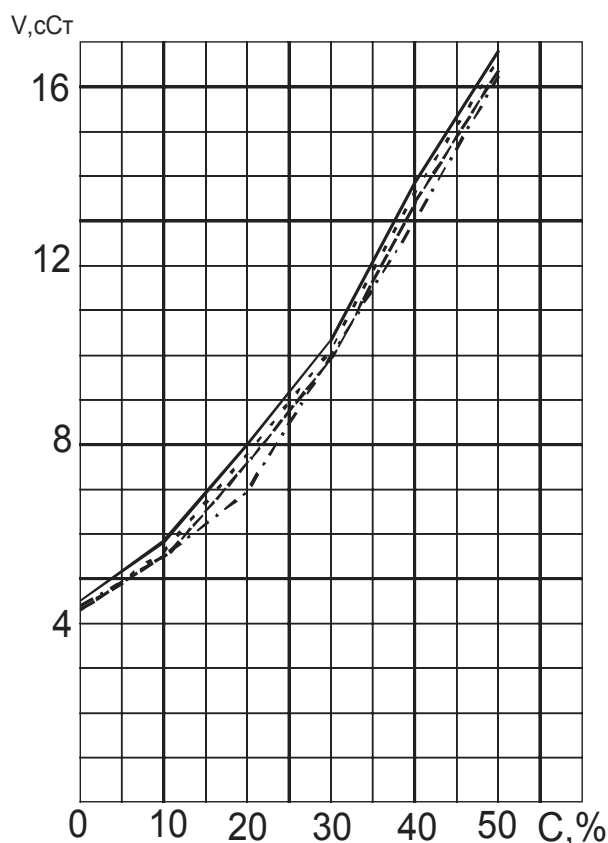


Рис. 2. Зависимость вязкости топливной смеси от концентрации добавок:

○ — ○ — 0% присадки; ✖ — ✖ — 0,5% присадки;  
 □ — □ — 1,0% присадки; ▲ — ▲ — 2,0% присадки

Отсутствие надежной теоретической модели взаимодействия молекул разнородных высокомолекулярных веществ, которая позволила бы вычислить вязкость раствора, приводит к необходимости конструирования тех или иных эмпирических формул. Для описания зави-

симости вязкости смеси от концентрации компонент иногда используется экспоненциальная аппроксимация [5].

Такая аппроксимация может давать удовлетворительное согласие с экспериментом в некотором интервале концентраций, но лишена каких-либо физических оснований, и в этом смысле должна расцениваться как некоторый чисто формальный прием. Расчет вязкости смеси через взвешенное среднее текучести компонент [6] в нашем случае приводил к результатам, в несколько раз отличающимся от экспериментальных данных.

Вид концентрационных зависимостей (рис. 2) позволяет допустить квадратичную зависимость между вязкостью и концентрацией  $c$  масла:

$$v = v_0 + ac + bc^2. \quad (1)$$

В случае смеси дизельного топлива с рапсовым маслом значения параметров регрессии, найденные по экспериментальным данным, оказались следующими:  $v_0 = 4,524$ ,  $a = 96,54 \cdot 10^{-3}$  и  $b = 3,407 \cdot 10^{-3}$  ( $v$  - в сантистоксах,  $c$  - в процентах). Расхождения между экспериментальными и вычисленными по квадратичной регрессии значениями вязкости не превышают 3%.

Ввиду того, что вязкость жидкости определяется в первую очередь усредненными характеристиками межмолекулярного взаимодействия, имеет смысл рассматривать вязкость смеси в зависимости от мольной доли примеси. С этой целью приведенные массовые концентрации  $c$  были пересчитаны в мольные доли примеси:

$$x = v_2 / (v_1 + v_2), \quad (2)$$

где  $v_1$  - число молей дизельного топлива;

$v_2$  - число молей масла в смеси.

Молярные массы дизельного топлива, рапсового масла и присадки DIFRON H372 принимались равными соответственно 226, 932 и 175 г/моль. Полученное уравнение линейной регрессии имеет вид

$$v = 4,17 + 69,24 x, \text{ сСт}. \quad (3)$$

Сопоставление линейной модели с полученными экспериментальными результатами проведено на рис. 3.

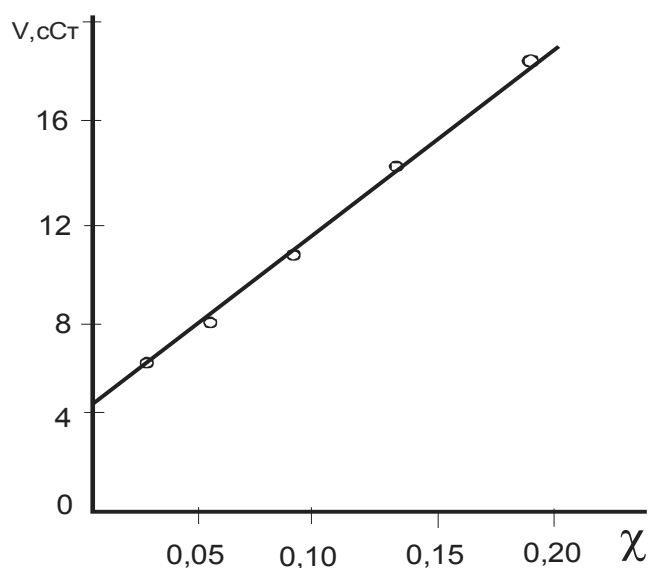


Рис. 3. Зависимость вязкости топливной смеси от мольной доли рапсового масла

Видно, что имеется удовлетворительное согласие между результатами измерений и расчетов по полуэмпирической формуле (3), что косвенно свидетельствует об адекватности

указанной линейной модели. Некоторые расхождения могут быть связаны с неточностью использованных для расчета молярных масс: авторами были взяты их типичные значения, так как детально исследовать фракционный состав дизельного топлива не представлялось возможным.

Экстраполяция измеренных значений вязкости смеси на случай  $x = 1$  (чистое РМ) по формуле (3) дает результат 73,4 сСт, что гораздо ближе к экспериментальному значению вязкости чистого РМ, равной  $\nu_{\text{РМ}} = 81,9$  сСт, чем результат экстраполяции по формуле (1), равный 48,2 сСт. Проведенный анализ позволяет констатировать, что при сравнительно небольших массовых концентрациях РМ (до 50%) вязкость раствора хорошо описывается эмпирической квадратичной зависимостью (1), тогда как в целом связь между молярной концентрацией примеси и вязкостью раствора адекватно описывается физически обоснованной линейной моделью (3).

Как видно из данных табл. 1 и рис. 2, влияние присадки сводится к некоторому снижению вязкости раствора. Анализ результатов позволяет обнаружить две закономерности:

- относительное уменьшение вязкости существенно превосходит процентную концентрацию присадки;
- относительное уменьшение вязкости возрастает с ростом содержания масла в растворе.

Согласно данным табл. 1 и рис. 4, добавление 2% присадки в смесь, содержащую равные массы ДТ и РМ, приводит к уменьшению вязкости на 5,1%, тогда как расчет с использованием линейной модели дает понижение вязкости только на 3,7%. Возможная причина указанного несоответствия будет рассмотрена далее.

Для выявления степени влияния различных физических факторов на вязкость смеси авторами была проведена экспериментальная оценка энергии активации  $E$  вязкого течения. С этой целью исследовалась зависимость вязкости от температуры. Согласно общепринятой активационной теории указанная зависимость должна иметь вид

$$\nu = C e^{\frac{E}{kT}}, \quad (4)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура.

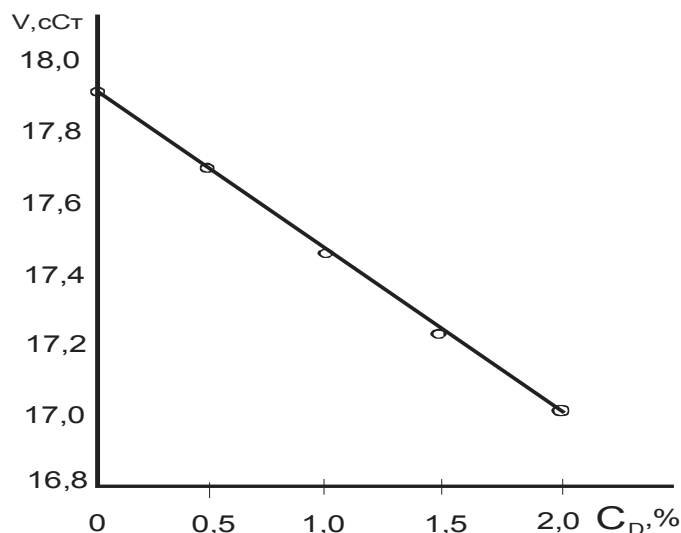


Рис. 4. Зависимость вязкости смеси от концентрации присадки  $C_D$

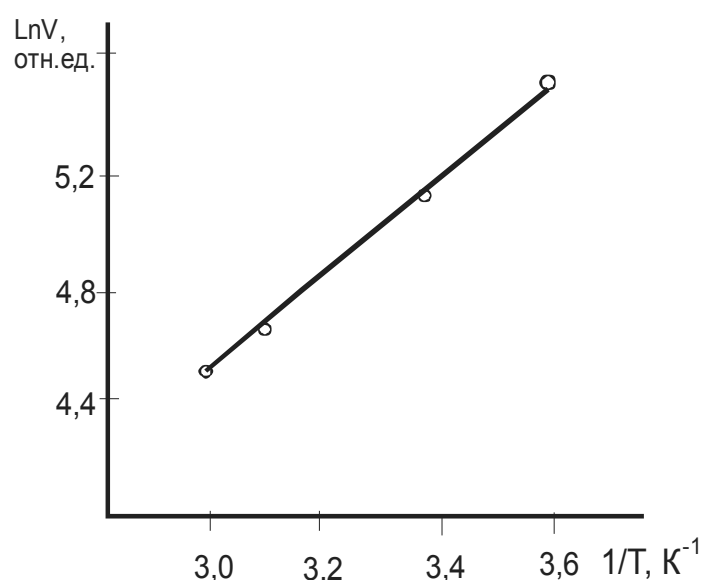
Величина  $C$  слабо зависит от  $T$  и в небольшом интервале температур может считаться постоянной. Один из экспериментальных результатов представлен на рис. 5. Полученные экспериментальные оценки энергии активации приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Энергия активации вязкого течения в смесях ДТ, РМ  
и цетаноповышающей присадки**

Состав смеси	Энергия активации $E$ , эВ
100% ДТ	$0,120 \pm 0,005$
80% ДТ + 20% РМ	$0,101 \pm 0,010$
60% ДТ + 40% РМ	$0,135 \pm 0,009$
50% ДТ + 50% РМ	$0,128 \pm 0,008$
49% ДТ + 49% РМ + 2% DIFRON H372	$0,132 \pm 0,009$

Из данных табл. 2 видна некоторая тенденция к повышению энергии активации с увеличением концентрации примесей в растворе, что может быть связано с наличием дополнительного диполь-дипольного притяжения полярных фрагментов молекул масла и присадки. Однако указанные различия не выходят за рамки экспериментальной погрешности и, по-видимому, не могут служить причиной существенных вариаций вязкости смесей, наблюдавшихся в представленных измерениях.



**Рис. 5. Зависимость вязкости смеси от температуры**  
(ДТ = 49%, РМ = 49%, DIFRON H372 – 2%)

Помимо энергии активации, на вязкость органических жидкостей существенное влияние оказывает молярная масса вещества. Обычно предполагается, что предэкспоненциальный множитель в формуле (4) зависит от молярной массы степенным образом:

$$C \propto M^n, \quad (5)$$

причем показатель степени  $n$ , согласно данным разных источников [7-9], может варьироваться от  $-1/6$  до  $+3,5$ . Для предельных тяжелых жидких углеводородов, исходя из данных [8], можно принять  $n \approx 2,9$ .

Рапсовое масло относится к слабополярным жидкостям: его диэлектрическая проницаемость составляет  $\epsilon_{PM} = 2,84$  [9], что заметно выше диэлектрической проницаемости чистого дизельного топлива ( $\epsilon_{DT} = 2,0$ ).

Следовательно, РМ должно обнаруживать некоторую склонность к образованию ассоциатов, приводящему к дополнительному повышению вязкости. Указанный эффект непропорционального снижения вязкости смеси может быть предположительно связан с тем, что молекулы 2-этилгексилнитрата, обладающие значительным дипольным моментом, разрушают старые ассоциаты и образуют новые, со значительно меньшей (примерно в 1,7 раза) эффективной молекулярной массой.

### Выводы

Полученные данные позволяют сформулировать следующие выводы.

1. Исследовано влияние концентрации примесей на моторные свойства топливных смесей, содержащих дизельное топливо, рапсовое масло и цетаноповышающую присадку.
2. Построены математические модели формирования вязкости смеси. Показано, что зависимость вязкости от массовой концентрации и мольной доли рапсового масла удовлетворительно описывается, соответственно, квадратичной и линейной регрессиями.
3. Обнаружен и интерпретирован эффект снижения вязкости смеси за счет добавления цетаноповышающей присадки, возрастающий при повышении концентрации масла.

### Библиографический список

1. **Marczuk, A.** Production and Use of Rapeseed Oil in Power Plant Machinery in the Northeast of European Part / A. Marczuk [et al.] // *Jökull Journal*. – 2017. – № 8. – V. 67 С. – P. 8–21.
2. **Карташевич, А.Н.** Исследование свойств альтернативных топлив на основе рапсового масла / А.Н. Карташевич, С.А. Плотников, П.Н. Черемисинов // *Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии*. – 2017. – № 3. – С. 144–146.
3. **Марков, В.А.** Рапсовое масло как альтернативное топливо для дизеля / В.А. Марков [и др.] // *Автомобильная промышленность*. – 2006. – № 2. – С. 1–3.
4. **Габитова, А. Р.** Исследование коэффициента динамической вязкости рапсового масла как основы биодизельного топлива в широкой области изменения параметров состояния / А. Р. Габитова, И. Р. Габитов, З.И. Зарипов // *Вестник технологического университета*, 2015. – Т. 18. – № 17. – С. 252–253.
5. **Кувыкин, В.И.** Вязкость смеси углеводородов / К В. И.увыкин, Е. В. Кувыкина // *Естественные и математические науки в современном мире*. – 2016. – № 1 (36). – С. 46–51.
6. *Технология переработки нефти. В 2-х ч. Ч. 1* / под ред. О.Ф. Глаголевой, В.М. Капустина. – М.: Химия, КолосС, 2007. – 400 с.
7. *Новый справочник технолога и химика* / под. ред. Москвина А. В. – СПб.: НПО «Профессионал», 2006. – 1464 с.
8. **Рагозин, Н. А.** Справочник по авиационным и автомобильным топливам / Н. А. Рагозин. – М.: Гос. н.-т. изд-во нефт. и горно-топливн. лит., 1940. – 180 с.
9. **Трапезникова, Е. Ф.** Метод расчета динамической вязкости жидких углеводородов и газоконденсатов / Е. Ф. Трапезникова, С. А. Ахметов // *Башкирский химический журнал*, 2011. – Т. 18. – № 2. – С. 165–167.
10. **Аникеева, М. А.** Исследование характеристик растительных масел для высоковольтного маслонаполненного электрооборудования: дисс. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 2016. – 130 с.

*Дата поступления  
в редакцию 15.04.2018*

**S.A. Plotnikov, P.Y. Kantor, I.S. Kozlov, M.N. Vtyurina**

### RESEARCH OF MOTOR PROPERTIES OF MIXES OF DIESEL FUEL WITH RAPE SEED OIL

**The purpose** of research was construction of mathematical model of formation of viscosity of a mix.

**Object** of research are properties of a mix on the basis of diesel fuel with the additive of biofuel – rape seed oils and increase tsetan korrektor additives DIFRON H372.

**The research** problem was consideration of laws of change of kinematic viscosity of mixes of diesel fuel with rape seed oil and influences on viscosity of the additive, operating which substance is 2 – etilgeksilnitrat.

**Methods** of the present research were the theoretical analysis and experimental check.

The lead experimental researches and their theoretical analysis have revealed an opportunity of interpretation and forecasting of effect of decrease in kinematic viscosity fuel mixes due to addition narrow function .

*Key words:* diesel fuel, biofuel, rape seed oil, tsetan korrektor additives, viscosity.

УДК 629.33.02.073.243.5

В.А. Савельев

## КРИТИЧЕСКАЯ ЧАСТОТА ВРАЩЕНИЯ КАРДАННОГО ВАЛА И ЭФФЕКТ ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ В ТРАНСМИССИИ С РЯДНЫМ ЧЕТЫРЕХЦИЛИНДРОВЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», г. Москва

**Цель работы:** Установление причин высокой виброактивности карданных валов в резонансных зонах.

**Методология:** Анализ результатов испытаний карданных валов автобусов с двигателями CUMMINS.

**Результаты работы:** В статье показана роль прецессии карданного вала в повышении его виброактивности. Показано, что в случае установки на транспортное средство рядных четырехцилиндровых двигателей из-за эффекта принудительной синхронизации (захвата частот), проявляющемся в том, что при приближении частоты действия неуравновешенных сил инерции второго порядка двигателя к критической частоте вращения карданных валов, эти валы входят в резонансный режим колебаний, подвергаются интенсивным изгибным колебаниям, приводящим к аварийной ситуации.

*Ключевые слова:* виброактивность, карданный вал, неуравновешенные силы инерции, критическая частота, изгибные колебания, прецессия, принудительная синхронизация, двигатель.

### Введение

Снижение степени неуравновешенности роторов разных машин является первоочередной задачей для решения проблемы их повышенной виброактивности, в связи с чем необходимо возможно более точное определение параметров их дисбаланса. Это касается как жестких, работающих при частотах вращения, меньших, чем критические, так и гибких, работающих при закритических частотах вращения, роторов [1, 2]. Однако при решении задачи идентификации параметров дисбаланса результаты расчетов часто расходятся с данными экспериментов, и «малые погрешности при измерении вибраций ротора приводят к большим погрешностям при определении параметров дисбаланса» [3].

*Неуравновешенность вращающегося карданного вала также является одной из основных причин появления вибраций, действующих на его опоры и передаваемых соединяемым им агрегатам, и конструкции автомобиля в целом.* При этом важно иметь в виду, что вращающийся карданный вал совершает сложное движение, которое можно представить как суперпозицию вращения вокруг собственной оси и прецессии.

Способы решения проблемы снижения неуравновешенности роторов разных машин известны. Теория и физическая сущность связанных с этим явлений, в том числе касающихся прецессионного движения, достаточно полно рассмотрены в литературе по динамике роторов [4–9]. Применительно к карданным валам трансмиссий автомобилей и других транспортных средств в существующей литературе проблеме прецессионного движения не уделено должного внимания.

В ней рассмотрение динамики вращательного движения в основном ограничивается расчетом критической частоты. Критическая частота вращения – важный параметр, характеризующий поведение карданного вала в эксплуатационных условиях, но суть проявления его виброактивности во многом определяется прецессионным движением, а не собственным вращением, что обычно остается за рамками обсуждения методики расчета параметров резонансного режима. Важно не только нахождение критической частоты вращения карданного вала, но и раскрытие существа вопроса: показать движение от явления к сущности проблемы.

В качестве критической частоты вращения принимается частота, соответствующая резкому возрастанию амплитуд колебаний, возбужденных неуравновешенностью карданного вала.



Это явление обычно объясняется как резонансное увеличение амплитуд колебаний на частоте действия возмущающих сил, обусловленных дисбалансом вращающегося вала, совпадающей с собственной частотой плоских изгибных колебаний невращающегося вала, что логически противоречиво, поскольку эффекты, проявляющиеся во вращательном движении, выводятся из условий, полученных для невращающейся системы.

Более логичным представляется подход к объяснению поведения вращающегося вала не с позиции анализа его изгибных колебаний относительно положения статического равновесия, а с точки зрения рассмотрения поведения во времени малых возмущений его установившегося движения – вращения с постоянной угловой скоростью. Это точнее отражает существо явления и особенно важно при анализе поведения рассматриваемого объекта при вращении с закритическими скоростями [5].

Для анализа эффектов, которые могут проявиться при вращении карданного вала, рассмотрим две ситуации: а) идеальный случай – вращение уравновешенного карданного вала; б) вращение неуравновешенного карданного вала.

### **Вращение уравновешенного карданного вала**

Вращающийся ротор не вызывает переменного возмущающего действия на опоры, если ось вращения совпадает с одной из главных его осей инерции [1, 2]. При этом в качестве расчетной модели таких конструкций традиционно принимается масса, закрепленная на жесткой двухопорной балке, т.е. игнорируется вызываемый весовой нагрузкой прогиб оси вращения ротора. Чтобы не учитывать это явление в некоторых исследованиях рассматривается вращение ротора при его вертикальном расположении. Модель ротора с вертикальным расположением оси вращения применяется с целью упрощения решения задач его динамики [8, 10].

Однако карданный вал в трансмиссии автомобиля устанавливается обычно не вертикально и имеет прогиб, вызванный действием весовой нагрузки. При этом вращение вала происходит относительно полученной линии изгиба. Поскольку центр массы вала и центры сечений элементарных его масс находятся на линии изгиба, то уравновешенный (сбалансированный) двухопорный карданный вал с трубой кольцевого сечения при собственном вращении не должен бы вызывать вибраций.

### **Вращение неуравновешенного карданного вала**

При вращении неуравновешенного карданного вала возникает центробежная сила  $R = m\omega_{кв}^2 r$ , где  $m$  - неуравновешенная масса;  $r$  - радиус расположения неуравновешенной массы;  $\omega_{кв}$  - частота вращения карданного вала. Действие центробежной силы и весовой нагрузки при вращении упругого карданного вала, т.е. конструкции, обладающей конечной жесткостью в плоскости изгиба, приведет к изменению картины его кинематического поведения. При этом к вращению карданного вала вокруг линии изгиба, обусловленной действием весовой нагрузки, с угловой скоростью  $\omega_{кв}$  добавится прецессионное движение – вращение плоскости изгиба карданного вала с угловой скоростью  $\Omega$ , называемой скоростью прецессии. Такой вывод согласуется с результатами анализа прецессионного движения ротора в виде безмассового вала с насаженным на него диском, причем «осью прецессии оказывается не ось подшипников, а кривая линия, определяющая положение вала под действием статической (в данном случае весовой) нагрузки» [9].

Таким образом, действие весовой нагрузки и дисбаланс карданного вала порождают появление прецессии его оси и, как следствие, вибраций, передаваемых через опоры вращающегося вала на соединенные с ним агрегаты.

Первые работы (1869 г.) по динамике роторов в связи с явлением “прецессия ротора” связаны с именем У. Рэнкина, названной им “centrifugal whirling” [8].

Шарнирно опертый вращающийся карданный вал представляет из себя своеобразную

гироскопическую систему, напоминающую двухстепенной гироскоп. Одна степень такого гироскопа реализуется в виде собственного вращения вокруг изогнутой оси с угловой скоростью  $\omega_{зир}$ , а вторая – в виде вращения плоскости изгиба с угловой скоростью  $\Omega$ . В механике под гироскопом понимают вращающееся твердое тело любой формы, причем скорость его вращения не является характерным признаком [11]. Задача о движении такого тела “в общем случае до сих пор не решена и в некотором смысле неразрешима” [6].

Для предсказания поведения гироскопических систем используется фундаментальный закон физики – закон сохранения момента импульса, в соответствии с которым

$$\frac{dL}{dt} = M, \quad (1)$$

где  $L = \omega_{зир}I$  – момент импульса (кинетический момент или момент количества движения),  $I$  – момент инерции вращающегося тела.

Если момент  $M$  внешних сил, приложенных к гироскопу, равен нулю, то момент количества движения  $L = \text{const}$ , и ось вращения гироскопа будет сохранять свое положение в пространстве. Если момент внешних сил отличен от нуля, то гироскоп будет двигаться так, что только одна его точка будет оставаться неподвижной. Движение гироскопа в этом случае можно рассматривать как вращение вокруг мгновенной оси, проходящей через неподвижную точку. Для вращающегося карданного вала такими точками можно считать его шарнирные опоры.

Взаимосвязь угловых скоростей прецессии  $\Omega$ , вращения вокруг собственной оси  $\omega_{зир}$ , внешнего момента  $M$  и момента инерции вращающегося тела  $I$  в соответствии с приближенной теорией гироскопических систем выражается следующим образом [12]:

$$\Omega = \frac{M}{\omega_{зир}I}. \quad (2)$$

Следует отметить, что прецессия вращающегося вала может быть как прямой, так и обратной в зависимости от направления угловых скоростей самого вала и его прецессионного движения, определяемые, например, пространственными характеристиками упругости опор вала, в том числе их анизотропией или изотропией [13, 14]. При этом, в общем случае, частота прецессии вращающегося вала  $\Omega$  в зависимости от частоты вращения самого вала  $\omega_{зир}$  определяется через некоторый коэффициент  $s$ , который может быть целым или дробным и иметь положительный или отрицательный знак, т. е.  $\Omega = s\omega_{зир}$  [7]. Однако силы инерции неуравновешенных масс наиболее распространенных конструкций роторов, в том числе и карданных валов автомобилей, порождают вынужденные колебания этих конструкций в виде синхронной прецессии с частотой, равной частоте их вращения [2, 7] и для них  $s = 1$  и  $\Omega = \omega_{зир}$ . Эти силы пропорциональны квадрату частоты вращения ротора. Источником возмущения может быть также собственный вес ротора, а также любая другая нагрузка неизменного направления.

В учебной литературе анализ движения статически неуравновешенных роторов часто ограничивается рассмотрением прямой синхронной прецессии. В [9] рассматриваются физическая сущность и условия возбуждения прямой и обратной прецессии ротора. Обратная прецессия безопорно вращающегося вала при определенных условиях его возбуждения была зафиксирована в экспериментах с помощью фотодиодных датчиков [15].

### **Синхронизация частоты действия неуравновешенных сил инерции второго порядка двигателя и критической частоты вращения карданного вала**

Область опасного самовозбуждения изгибных колебаний карданных валов достаточно точно может быть определена в рамках методики, описание которой приводится в учебной литературе [16, 17], в стандарте [18]. Однако решение этой задачи не является исчерпывающим. Например, такое решение нельзя назвать достаточным для случая применения в авто-

мобиллях широко распространенных рядных четырехцилиндровых двигателей. Это связано с тем, что, как известно [19], вращение коленчатого вала в процессе работы рядного четырехцилиндрового четырехтактного двигателя с угловой скоростью  $\omega$  сопровождается действием неуравновешенных сил инерции второго порядка, происходящих с частотой  $2\omega$ . Эти силы передаются на опоры агрегатов и элементы динамической системы “коленчатый вал двигателя – сцепление – коробка перемены передач – карданный вал”, упруго связанными с податливой рамой, т.е. с общим основанием. При совпадении частоты  $2\omega$  действия неуравновешенных сил инерции второго порядка двигателя с критической частотой вращения карданного вала  $\omega_{кр}$  последний входит в режим резонанса изгибных колебаний, характеризующихся резким возрастанием амплитуд изгибных колебаний.

Таким образом, при приближении частоты  $2\omega$  действия на опоры двигателя неуравновешенных сил инерции второго порядка к критической частоте  $\omega_{кр}$  изгибных колебаний карданного вала, соединенного через коробку перемены передач и сцепление с вращающимся с частотой  $\omega$  коленчатым валом, происходит принудительная синхронизация колебаний, захватывание частоты. При этом карданный вал подвергается интенсивным изгибным колебаниям с частотой  $2\omega$  синхронизирующей системы, поскольку он начинает функционировать в резонансной зоне, финалом чего может быть разрушение вала [20-22].

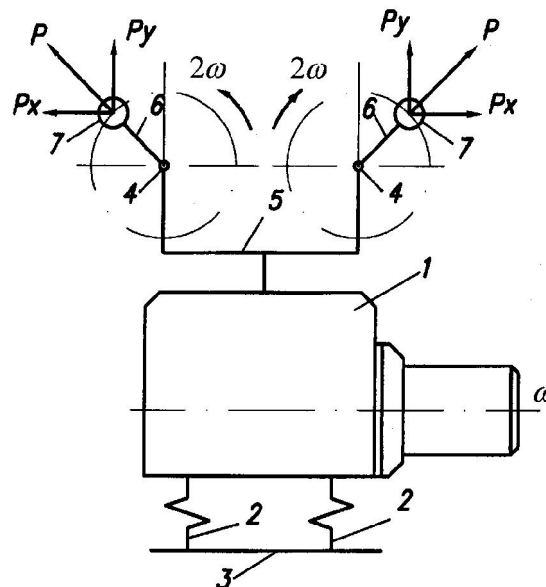
Следовательно, критическая частота  $\omega^{синхр}$ , соответствующая принудительной синхронизации колебаний, может быть определена следующим образом:

$$\omega = \omega^{синхр} = 0,5\omega_{кр} . \quad (3)$$

Здесь  $\omega_{кр}$  - критическая частота вращения карданного вала (по первой форме).

Рис. 1 демонстрирует схему действия неуравновешенных сил инерции второго порядка возвратно-поступательно движущихся масс двигателя на его опоры.

На этом рисунке обозначено: 1 – двигатель, 2 – упругий элемент подвески двигателя, 3 – основание крепления двигателя, 4 – ось вращения неуравновешенной массы, 5 – корпус вибратора, 6 – стержень, 7 – неуравновешенная масса вибратора.



**Рис. 1. Схема действия неуравновешенных сил инерции второго порядка возвратно-поступательно движущихся масс двигателя на его опоры**

Изображенный схематично на приведенном рисунке вибратор представлен в виде двух одинаковых симметрично расположенных относительно вертикальной оси неуравновешенных масс, вращающихся в противоположных направлениях (в противофазе) с частотой  $2\omega$ . При этом горизонтальная составляющая от действия центробежных сил в каждый мо-

мент времени равна нулю, а на опоры передается только составляющая центробежных сил вертикального направления [23].

### Заключение

1. Карданный вал – один из существенных источников вибраций, передаваемых от трансмиссии на конструкцию автомобиля в целом. Он в процессе своей работы совершает сложное движение, которое можно представить как суперпозицию вращения вокруг собственной оси и прецессии.

2. Современное состояние теории динамических процессов роторов позволяет сделать вывод о том, что достаточно точное отражение физической сущности повышения виброактивности вращающегося в трансмиссии автомобиля карданного вала возможно с позиции анализа его прецессионного движения.

3. В случае установки на транспортное средство рядных четырехцилиндровых двигателей из-за эффекта принудительной синхронизации (захвата частот), проявляющегося в том, что при приближении частоты действия неуравновешенных сил инерции второго порядка двигателя к критической частоте вращения карданных валов эти валы входят в резонансный режим колебаний, подвергаются интенсивным изгибным колебаниям, вследствие чего возможно возникновение аварийной ситуации. При этом определение запаса по критической частоте вращения карданных валов с целью обеспечения безопасности при работе в эксплуатационных условиях является необходимым, но не является достаточным. Дополнительным условием в данном случае является учет влияния на колебательную систему неуравновешенных сил инерции второго порядка двигателя.

### Библиографический список

1. **Гусаров, А.А.** Динамика и балансировка гибких роторов / А.А.Гусаров. – М.: Наука, 1990. – 152 с.
2. **Никифоров, А.Н.** Состояние проблемы уравнивания роторов. Вестник научно-технического развития. www.vntf.ru. – 2013. – №4 (68). – С. 20–28.
3. **Ляхов, А.Ф.** Вычислительная обусловленность задачи балансировки ротора. Проблемы прочности и пластичности. – 2017. – Т. 79. – №2. – С. 135–146.
4. **Скубачевский, Г.С.** Авиационные газотурбинные двигатели. Конструкция и расчет деталей / Г.С. Скубачевский. – 3-е изд., перераб. и дополн. – М.: Машиностроение, 1969. – 544 с.
5. Вибрация энергетических машин: справочное пособие/ под ред. Н.В. Григорьева. – Л.: Машиностроение”, (Ленингр. отд-ние), 1974. – 464 с.
6. **Арнольд, В.И.** Математические методы классической механики / В.И. Арнольд. – М.: Наука, 1979. – 432 с.
7. **Хронин, Д.В.** Колебания в двигателях летательных аппаратов / Д.В. Хронин. – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 1980. – 296 с.
8. **Пасынкова, И.А.** Динамика прецессионного движения неуравновешенного ротора / И.А. Пасынкова. – СПб.: Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2014. – 238 с.
9. **Подольский, М.Е.** Физическая природа и условия возбуждения прямой и обратной прецессии ротора / М.Е. Подольский, С.В. Черенкова // Теория Механизмов и Машин. – 2014. – № 1. – Т. 12. – С. 27–40.
10. **Митенков, Ф.М.** О стационарных движениях распределенной и дискретной моделей ротора на электромагнитном подвесе / Ф.М. Митенков, Е.Ф. Сабаев, Т.А. Сабаева // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2007. – № 1. – С. 130–136.
11. **Магнус, К.** Гироскоп. Теория и применения: [пер. с нем.] / К. Магнус; под ред. Г.Д. Блюмина. М.: Мир, 1974. – 526 с.
12. **Ландау, Л.Д.** Теоретическая физика. Т.1. Механика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 1988. – 214 с.
13. **Рыжик, Б.В.** Влияние дисбаланса на усталостную прочность ротора, опирающегося на анизотропные упругодемпферные опоры / Б.В. Рыжик. – М.: Наука. Машиноведение, 1986. – №3. – С. 34–38.

14. **Пасынкова, И.А.** Вынужденные колебания неуравновешенного ротора в неизотропных опорах. – Вестник СПбГУ. Сер. 1. – 2014. – Т. 1(59). – Вып. 2. – С. 292–302.
15. Денисов Г.Г., Неймарк Ю.И., Поздеев О.Д., Цветков Ю.В. Экспериментальное исследование колебаний безопорного вращающегося вала Г.Г./ Денисов [и др.] // Сб. Динамика машин, М., “Машиностроение”, 1969. – С. 127–138.
16. **Лукин, П.П.** Конструирование и расчет автомобиля / П.П. Лукин, Г.А. Гаспарянц, В.Ф. Родионов. – М.: Машиностроение, 1984. – 376 с.
17. Проектирование трансмиссий автомобилей: справочник / под общ. ред. А.И. Гришкевича. – М.: Машиностроение, 1984. – 272 с.
18. ГОСТ Р 52430 – 2005 «Автомобильные транспортные средства. Передачи карданные автомобилей с шарнирами неравных угловых скоростей. Общие технические условия». – М.: Стандартинформ, 2006. – 12 с.
19. **Тольский, В.Е.** Колебания силового агрегата автомобиля / В.Е. Тольский [и др.]. – М.: Машиностроение, 1976. – 266 с.
20. **Иванов, С.Н.** Особенности расчета карданной передачи с целью обеспечения ее безопасной работы в процессе эксплуатации / С.Н. Иванов, В.А. Савельев, Н.П. Кочешков // ААИ (Журн. ассоциации автомобильных инженеров). 2010. № 5.– С. 46– 48.
21. **Савельев, В.А.** Особенности влияния дисбаланса вращающихся масс трансмиссии автомобиля на ее виброактивность // Безопасность транспортных средств в эксплуатации: мат. 71-й Международной научно-технической конференции. – Н. Новгород, 12-13 октября 2010 г. – С. 20–22.
22. **Савельев, В. А.** Влияние неуравновешенных сил инерции второго порядка четырехцилиндрового рядного двигателя на изгибные колебания валов карданной передачи автомобиля // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2012. – №5 (2). – С. 197–200.
23. **Литвак, В.И.** Автоматизация усталостных испытаний натуральных конструкций / В.И. Литвак. – М.: Машиностроение, 1972. – 384 с.

*Дата поступления  
в редакцию 20.04.2018*

**V. Saveliev**

**CRITICAL SPEED OF THE DRIVESHAFT AND THE EFFECT OF FORCED  
SYNCHRONIZATION IN THE TRANSMISSION WITH A FOUR-CYLINDER INLINE ENGINE**

GNTS NAMI

The State Scientific Centre of the Russian Federation in the Automotive Equipment  
The Central Automobile and Automobile Engine Scientific Research Institute

**Purpose:** To determine the causes of high vibration activity of cardan shaft in resonance zones.

**Methodology:** Analysis of test results of cardan shafts of buses with CUMMINS engines.

**Results:** The article shows the role of the precession of the propeller shaft in increasing its vibration. It is shown that in installed on a vehicle four-cylinder row engines, because of the effect of forced synchronization (capture of frequencies), which is manifested in the fact that as the frequency of action of unbalanced forces of inertia of the second order of the four-cylinder engine approaches a critical frequency of rotation of cardan shafts, these shafts enter into a resonance oscillations mode and they undergo intensive flexural oscillations leading to an emergency situation.

*Key words:* vibration activity, cardan shaft, unbalanced forces of inertia, critical frequency, flexural oscillations, precession, forced synchronization, engine.

УДК 629.3.06

В.В. Савченко, С.Н. Поддубко

## ПОДХОД К РАЗРАБОТКЕ МЕТОДА ПЕРЕДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫМ СРЕДСТВОМ ВОДИТЕЛЮ БОРТОВЫМИ СИСТЕМАМИ В АВТОМАТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

Государственное научное учреждение «Объединенный институт машиностроения  
НАН Беларуси», г. Минск, Республика Беларусь

Рассмотрена структура и основные функциональные возможности бортовой информационно-аналитической системы верхнего уровня и ее подключение при совместном использовании с другими интеллектуальными бортовыми системами на борту транспортного средства. Предложен и обоснован подход к разработке нового метода оценки потенциальной возможности передачи (возврата) управления транспортным средством водителю бортовыми системами в автоматическом режиме, предположительно, имеющем высокую эффективность и достоверность.

*Ключевые слова:* ADAS, интеллектуальные бортовые системы, определение опасных состояний водителя, транспортное средство, функциональное состояние водителя, уровень автоматизации автомобилей.

### Введение

Широко известная классификация уровней автоматизации автомобилей разработана сообществом автомобильных инженеров (стандарт SAE J3016 [1]), содержит шесть уровней:

- 0-й уровень (без автоматизации): отсутствие автоматического контроля над машиной, но может присутствовать система уведомлений, весь процесс управления осуществляет водитель;
- 1-й уровень (включающий помощь водителю): водитель в основном осуществляет управление, как правило на борту транспортного средства (ТС) установлены ADAS оказывающие содействие водителю в управлении рулевой системой и тормозами с использованием информации о внешней среде, работающие в автоматическом режиме, но могут отключаться водителем;
- 2-й уровень (частично автоматизированный): водитель должен реагировать, если система не смогла в автоматическом режиме справиться самостоятельно. ADAS управляет ускорением, торможением и рулением одновременно, может быть отключена водителем;
- 3-й уровень (условно автоматизированный): водитель может не контролировать ТС на некоторых типах дорогах (например, автобаны), но должен быть готовым взять управление при изменении ситуационной обстановки или система останавливает ТС если водитель не реагирует на оповещение;
- 4-й уровень (высоко автоматизированный): аналогичный 3-му уровню, но уже не требует внимания водителя и выполняет свои функции, которые допустимы в конкретных внешних условиях движения;
- 5-й уровень (полностью автоматизированный): со стороны человека не требуется никаких действий кроме указания на начало движение и определение пункта назначения.

Из представленной классификации видно, что уже начиная с 1-го уровня, бортовые системы представляют из себя аппаратно-программные средства, в которых значительное место (в том числе по функционалу) занимают методы и алгоритмы анализа разнородной информации о процессах функционирования транспортных средств и синтеза управляющих воздействий на системы различного иерархического уровня для динамической стабилизации транспортного средства и его траекторного движения с использованием IT методов и технологий и специализированного программного обеспечения (с каждым уровнем степень автоматизации увеличивается), и лишь на 5-м уровне со стороны человека не требуется никаких

действий, кроме указания на начало движение и определение пункта назначения. На рис 1. показано видение компании Movimento [2] по современным «объёмам» программного обеспечения (одна из простых характеристик метрики – количество строк программного кода) в различных системах, в сравнении, и как изменится «сегодняшний» автомобиль в перспективе.

## Характеристики метрики программного обеспечения



## Тренд изменения соотношения технической и программной части в автомобильной технике



**Рис. 1. Количество строк кода в различных системах и объемы технических компонент, программного обеспечения и контента на автомобильном транспорте в перспективе**

Таким образом, уровень автоматизации ТС значительно возрастает, при этом этап оснащения ТС системами ADAS рассматривается как промежуточный при переходе к полностью автоматизированному движению. По мнению экспертов, к 2035 году на дорогах общего

пользования Российской Федерации будет около 10% беспилотных ТС. Будут реализованы и компромиссные варианты, при определенных условиях ТС движется в беспилотном режиме, а при изменении ситуации (прежде всего связанные со сложностью или невозможностью ее формализации) «передает» управление водителю.

### Классификация методов мониторинга усталости водителя

Известны основные требования к системам мониторинга функционального состояния операторов систем «человек-машина» [3, 4], в том числе водителей автомобилей: необходимо обнаруживать предвестники опасных состояний, интерпретировать в реальном масштабе времени функциональные состояния, которые несовместимы с выполняемой работой (смерть, потеря сознания, сон и т.п.). Определение предвестников опасных состояний позволяет принять превентивные меры, в автоматическом или автоматизированном режиме, а констатация наличия таких функциональных состояний почти неизбежно приводит к развитию аварийной обстановки.

Известны методы, определяющие наличие предвестников сна и глубокой релаксации водителей автомобилей (табл. 1, где  $p$  – вероятность опасного отказа; ЭДА – электродермальная активность) и лежащие в основе многих систем мониторинга усталости водителя [5].

Таблица 1

#### Методы, определяющие наличие предвестников сна и глубокой релаксации водителей автомобилей [5]

Технология	$p$
Изменение «почерка» вождения	0,3
Рациональные действия	0,3
Пульс	0,3
Поза (тонус мышц)	0,2
Направление взгляда	0,2
Наклоны головы (тонус мышц)	0,1
Речь	0,1
Окулограмма	0,05
Моргания	0,02
Микросаккады (потенциально)	0,001
ЭДА (47 млн. ч-час без аварий)	0,0001

### Создание информационно-аналитической системы верхнего уровня

На рис. 2 представлена структура бортовой информационно-аналитической системы (БИАС) верхнего уровня и ее подключение при совместном использовании с другими интеллектуальными бортовыми системами на борту ТС [6]. Основное назначение системы – превентивное автоматическое упреждение развития аварийной ситуации, в том числе вызванной ошибочными действиями водителя или автоматической интерпретации опасных состояний водителя (не совместимых с выполнением основных алгоритмов по управлению ТС), в реальном масштабе времени, путем удержания ТС в полосе движения (с использованием серийно выпускаемых ОАО «Экран» систем активной безопасности, разрабатываемых в стране системы электромеханического усилителя рулевого управления, системы мониторинга мертвых зон вокруг движущегося автомобиля, системы электронно-пневматического привода тормозов, в перспективе системы адаптивного круиз-контроля), потенциала классических пассивных ADAS (например, компании Mobileye 6-Series), с корректировкой, при необходимости, траекторного движения ТС с использованием информации с высокоточного навигационного модуля. БИАС выполняет, в том числе, функции системного интегратора (в зависимости от того какие бортовые системы установлены на конкретном ТС), уменьшает кинетическую энергию и/или останавливает в аварийном режиме ТС, если позволяет ситуацион-



ная обстановка, с учетом интегральной оценки, на основе анализа информации от всех подключенных бортовых систем, с единых методологических позиций. В случае, если авария произошла, БИАС в автоматическом режиме реализует функцию систем экстренного реагирования при авариях (ЭРА-РБ, ЭРА-ГЛОНАСС).

Бортовой модуль определения опасных состояний водителя подключен к системе через информационную шину CAN [5,6]. Применение модуля существенно расширяет функциональные возможности БИАС и придает системе свойства превентивной системы безопасности, позволяющей предотвратить наступление события аварии по причине глубокой релаксации, потери сознания или смерти водителя.

Модуль отличается тем, что в нем использован специализированный чипсет, робастные алгоритмы выделения полезного сигнала из шума, оригинальные алгоритмы автоматической интерпретации функционального состояния водителя, ближняя телеметрия для передачи информации на стационарную часть системы, что в совокупности позволяет получить высокую надежность интерпретации динамики уровня бодрствования водителя, сопоставимую с требованиями, предъявляемыми к системам активной безопасности.

Прототипом для разрабатываемого модуля является серийно выпускаемая СПРВ или VIGITON, в которой используется мониторинг и автоматический анализ параметров электродермальной активности (основной критерий для автоматической интерпретации текущей динамики уровня релаксации водителя, использованный метод имеет наименьшую, из известных, вероятность опасного отказа ( $p = 0,0001$ ), применены принципы построения систем безопасного мониторинга состояния водителя. В технических требованиях к бортовому модулю определение опасных состояний водителя (глубокая релаксация, потеря сознания, смерть) заложены вероятность опасной ошибки метода регистрации (ошибка 2-го рода) не более  $4 \cdot 10^{-4}$  и поток вероятности опасных отказов, приводящих к ДТП, не хуже  $10^{-9}$ .

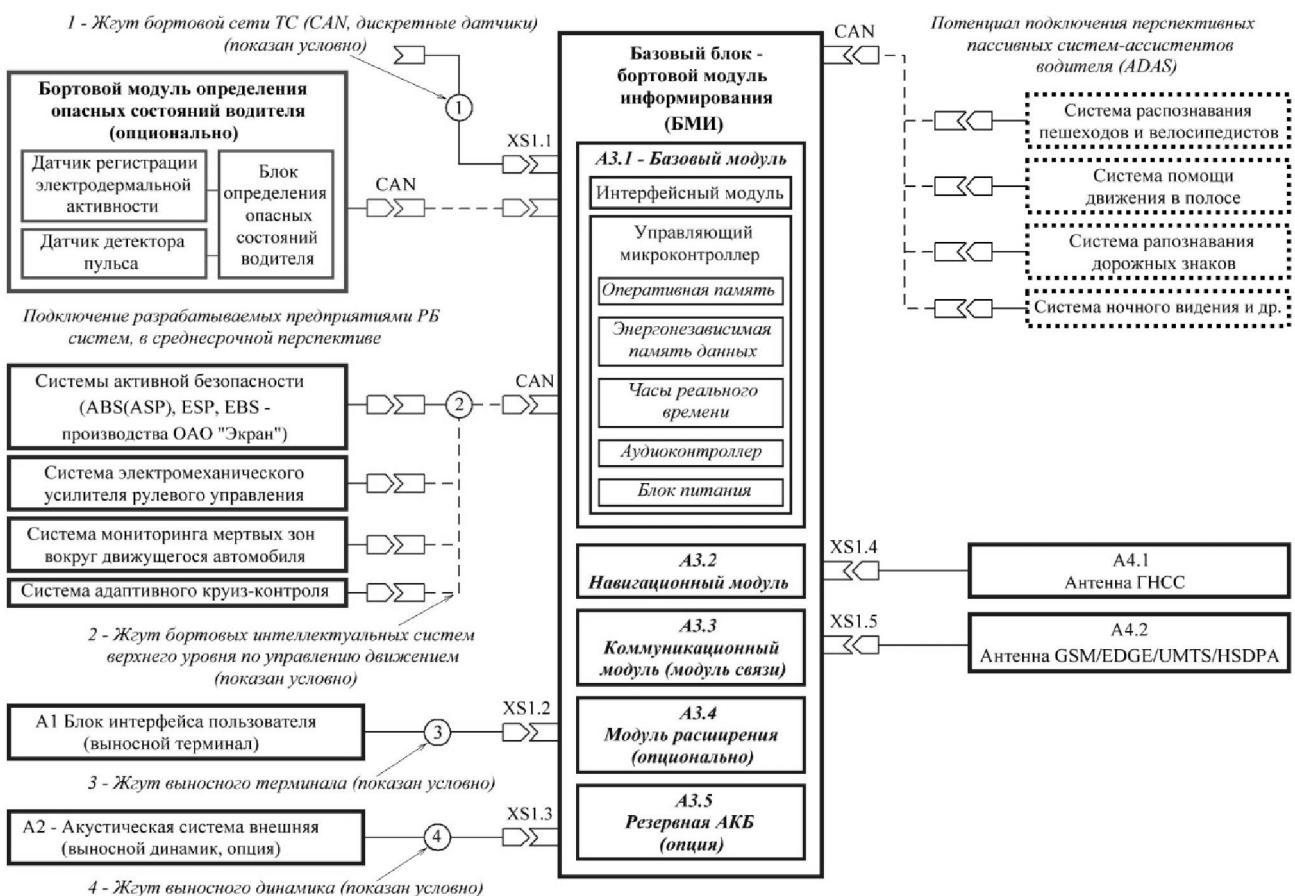


Рис. 2. Структура БИАС и ее подключение на борту ТС

*Навигационный модуль.* Для улучшения показателей точности и надежности навигационного модуля, предусмотрено использование в совместной обработке сигналов функционирующих глобальных спутниковых навигационных систем (ГНСС) ГЛОНАСС (в диапазонах частот L1, L2), GPS (в диапазонах частот L1, L2), GALILEO (в диапазонах частот – E1B, E1C, E5a, E5b) и BEIDOU (в диапазоне B1-C). Для дополнительного повышения точности определения координат предусматривается возможность применения технологии RTK (Real Time Kinematic - дословно «кинематика реального времени»), позволяющей за счет совместной обработки в реальном времени сигналов от ГНСС и сигналов корректирующих станций получать сантиметровую точность определения координат [7].

Возможность комплексирования обработки сигналов ГНСС с информацией от датчиков *микроэлектромеханических систем* и одометрического датчика пути автомобиля позволяет использовать технологию Dead reckoning, что обеспечит снижение ошибки исчисления навигационных параметров, а также позволит производить оценку координат при недоступности сигналов ГНСС в заданных временных диапазонах. Модуль поддерживает автоматический контроль целостности (достоверности) навигационных определений и исключения недостоверных измерений, реализацию робастных алгоритмов дифференциальной коррекции (режим RTK) и алгоритмов комплексирования данных ГНСС и инерциальных датчиков (акселерометров) собственной разработки, определение навигационных параметров в системах координат WGS-84 или ПЗ-90 (при доверительной вероятности 0,95).

*Базовый модуль* содержит необходимый аппаратный функционал и набор интерфейсов, обеспечивающий реализацию базовых функций и технологические режимы.

*Модуль расширения* поддерживает дополнительные функциональные возможности, связанные с взаимодействием с перспективными интеллектуальными системами, которые появятся на борту ТС.

Программное обеспечение БИАС имеет многоуровневую модульную иерархическую структуру. Отдельные модули работают асинхронно относительно друг друга, что позволяет реализовать многозадачный режим работы в реальном времени. Используемая файловая структура позволяет добиться максимальной изоляции кода уровней и модулей.

### **Методы исследований перехода ТС с автоматического режима управления движением к «ручному»**

Сегодня только начинают создаваться и находятся на стадиях поисковых и исследовательских проектов [8, 9 и др.]. В подавляющем большинстве исследовательских проектов используются методы мониторинга и оценки динамики зрительного анализатора водителя, с использованием соответствующего экспериментального оборудования, во взаимосвязях с восстановлением контроля водителя над траекторным движением ТС, ситуационной обстановки и выполнением алгоритмов деятельности (или их фрагментов) в различных вариациях и в реальном масштабе времени, при уровнях автоматизации ТС с первого по четвертый, в соответствии с классификацией SAE.

Установлено, что в зависимости от конкретной ситуационной обстановки на трассе, чем занимался водитель до возникновения обстоятельств по возобновлению контроля за вождением (пассивно наблюдал за ситуационной обстановкой, использовал в это время различные телематические сервисы или просматривал информацию на DVD носителях) ему потребуется несколько десятков секунд для возобновления контроля над ТС, но указывается, что «в будущих исследованиях следует подумать о том, как наилучшим образом информировать водителей о своем обязательстве возобновить контроль за вождением из автоматизированной системы».

Один из банальных вариантов может быть запрос у водителя о его готовности возобновить контроль за вождением, и субъективный ответ водителя значим, поскольку он четко понимает, что при положительном ответе он принимает и всю меру ответственности, в том числе за безопасность дорожного движения. Из табл. 1 видно, что достоверность интерпре-

тации функционального состояния водителя ADAS типа DMS (система контроля состояния водителя) классифицируется в зависимости от используемой технологии в конкретной DMS, и вероятность опасного отказа лежит в диапазоне  $p - 02 - 0,001$ , при использовании методов мониторинга зрительного анализатора водителя и  $p - 0,0001$ , при использовании методов мониторинга анализа динамики ЭДА, при автоматической интерпретации функционального состояния водителя (способность выполнять заданные алгоритмы деятельности) типа «глубокая релаксация».

Известна методология мониторинга функционального состояния (способности выполнять заданные алгоритмы деятельности в реальном масштабе времени, готовности к экстренному действию) операторов транспортных систем «человек-машина», широко апробированная на машинистах локомотивов и водителях автомобилей [10–13 и др.], основанная на автоматическом анализе параметров ЭДА оператора. Системы поддержания работоспособности водителей автомобилей прошли квалификационные испытания [14] и продолжают развиваться [3–6].

В БИАС используется бортовой модуль определения опасных состояний водителя (глубокой релаксации, потери сознания или смерти водителя), где автоматическая интерпретация релаксации водителя (не совместимой с требуемой готовностью к выполнению алгоритмов деятельности по управлению автомобилем) основана на автоматическом анализе параметров ЭДА, что позволяет обосновано прогнозировать эффективность и наиболее высокую достоверность предложенного подхода к разработке и исследованию нового метода(ов) оценки передачи (возврате) управления транспортным средством водителю бортовыми системами в автоматическом режиме.

### Заключение

Реализация в БИАС функций мониторинга функционального состояния водителя, высокоточного определения текущих навигационных координат транспортного средства и анализа разнородной текущей информации (динамические характеристики ТС, состояние основных узлов и агрегатов, состояние водителя, навигационная координата и ее тренд) в реальном масштабе времени, где используются оригинальные алгоритмы и программное обеспечение, модульности построения БИАС и возможность наращивания функционала путем интеграции с другими бортовыми системами имеет перспективу развития и направлено на повышение эффективности функционирования автотранспортных систем «человек-машина».

БИАС, являясь, по сути, бортовым интегрирующим комплексом, может быть использована и как экспериментальная система для обоснования и разработки новых методов определения времени возможной передачи управления водителю, когда водитель потенциально способен выполнять требуемые алгоритмы деятельности, при переходе с автоматического режима управления движением ТС к «ручному».

### Библиографический список

1. SAE J3016. Taxonomy and definitions for terms related to on-road motor vehicle automated driving systems. Warrendale: Society of Automotive Engineers; 2014.
2. **Валентин, К.** Будущее автомобильной промышленности: автомобиль, определяемый программным обеспечением // Интеллектуальные транспортные системы: мат. Междунар. автомобил. науч. форума (МАНФ-2017), М., 18–19 окт. 2017 г. [Электронное издание] / ААИ, ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ». – М., 2017. — R20171026.
3. **Савченко, В.В.** Развитие методологии мониторинга функциональных состояний операторов транспортных систем «человек-машина» // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2013. – №6. – С. 27–32.
4. **Бонч-Бруевич, В.В.** Дистанционный контроль бодрствования водителя в рейсе/ В.В. Бонч-Бруевич [и др.] // Автоматизация в промышленности. – 2015. – №2. – С. 33–35.
5. **Dementienko, V.V.** Driver vigilance remote monitoring system // Science Journal of Transportation. – October 2015. – Especial Issue. – №. 06. – P. 110–114.

6. **Савченко, В.В.** Интеграция пассивных систем помощи водителю с бортовыми системами автомобилей / В.В. Савченко, С.Н. Поддубко // Интеллектуальные транспортные системы: материалы междунар. автомобил. науч. форума (МАНФ-2017), М., 18–19 окт. 2017 г. [Электронное издание] / ААИ, ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ». – М., 2017. — R20171014.
7. NT1065/66\_USB3\_multi-channel\_GNSS\_RF\_front-end\_board. URL: <http://ntlab.com/section/sec:v:44976.htm>
8. **Merat, N.** Highly automated driving, secondary task performance and driver state / N. Merat. [and all] // Human Factors. – 2012. – № 54. P. 762–771.
9. **Merat, N.** Transition to manual: Driver behavior when resuming control from a highly automated vehicle / N. Merat, Jamson, H. Lai, F. O. Carsten, // Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behavior. – November 2014. – Volume 27, Part B. – P. 274–282.
10. **Савченко, В.В.** Методы и средства повышения эффективности функционирования операторов транспортных систем «человек-машина» // Весті НАН Беларусі. Сер. фіз-тэхн. навук. – 2005. – №2. – С. 9–37.
11. **Дементьенко, В.В.** Биоматематическая модель засыпания человека-оператора / В.В. Дементьенко // Физиология человека. – 2008. – № 34(5). – С. 63–72.
12. Физические принципы построения систем безопасного мониторинга состояния человека-оператора: автореф. дисс. ... на соиск. учен. степ. докт. техн. наук: 01.04.01: 26.11.2010 / Дементьенко Валерий Васильевич. – М., 2010. – 41 с.
13. **Дементьенко, В.В.** Оценка эффективности систем контроля уровня бодрствования человека-оператора с учетом вероятностной природы возникновения ошибок при засыпании / В.В. Дементьенко, В.Б. Дорохов // Журнал высшей нервной деятельности. – 2013. – Т. 63. – № 1. – С. 24–32.
14. **Савченко, В.В.** Система поддержания работоспособности водителя: результаты испытаний и экспериментальных исследований / В.В. Савченко, М.С. Свистун, В.В. Сикорский // Автомобильная промышленность. – 2008. – № 1. – С. 32–34.

*Дата поступления  
в редакцию 20.04.2018*

**V.V. Savchenko, S.N. Poddubko**

## **AN APPROACH TO DEVELOPMENT OF A METHOD FOR TRANSFER OF VEHICLE CONTROL FROM ON-BOARD SYSTEMS TO THE DRIVER IN AUTOMATIC MODE**

The Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus,  
Minsk, Republic of Belarus

**Purpose:** A new approach to assess the potential readiness of the driver to return control over the trajectory movement of the vehicle is proposed.

**Methodology:** A method to monitor the functional state and readiness for emergency action of the driver based on the analysis of the parameters of electrodermal activity, successfully tested by engine-drivers and motor vehicle drivers in practice, is used.

**Results:** The main functionalities of upper level on-board information-analytical system and information analysis from all the connected on-board systems are used having applied uniform methodological positions.

**Originality/value:** An approach to development of a method for assessment of capability of transfer (return) of vehicle control from on-board systems to the driver in automatic mode with the least probability of a dangerous failure is proposed and justified.

*Key words:* ADAS, intelligent on-board systems, detection of dangerous driver's conditions, vehicle, driver's functional state, vehicle's automation level.

УДК 629.113

Д.Р. Стахин, К.О. Гончаров

## ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ ТРИЦИКЛА КЛАССА SHELL ECO-MARATHON

Нижегородский государственный технический университет им П.Е. Алексеева

Рассматривается болид класса Shell Eco Marathon, главной задачей при эксплуатации которого является преодоление наибольшего расстояния при минимальных затратах энергии (жидкого топлива или альтернативного источника). С целью обеспечения технико-эксплуатационных показателей болида целесообразно решить задачу по снижению массы болида, коэффициента лобового сопротивления воздуха, выбора экономичной силовой установки. Представлены основные формулы для тягово-динамического расчета двигателя. По результатам расчетов сделан вывод об экономичности силовой установки. Также описаны принцип электродвигателя и основные его преимущества перед двигателями внутреннего сгорания.

*Ключевые слова:* Электродвигатель, трицикл, топливная экономичность, Shell Eco Marathon.

Соревнования автомобилей с минимальным расходом топлива Shell Eco-Marathon проводятся по всему миру. Впервые данный марафон был проведен нефтяной компанией Shell в 1939 году. Главная цель ежегодных соревнований - преодолеть наибольшее расстояние на одном литре топлива. В 1985 году автомобиль-победитель Эко-Марафона показал результат, позволявший проехать на одном литре топлива расстояние от Роттердама до Лондона. 30 лет спустя прототип на сжатом природном газе (КПГ) французской команды Microjoule La Joliverie проехал на одном литре топлива 2551,8 км, что равняется расстоянию от Роттердама до Москвы, и показал абсолютно лучший результат 2016 года.

Уменьшение загрязнений атмосферного воздуха токсичными веществами, выделяемыми промышленными предприятиями и автомобильным транспортом, является одной из задач современных автопроизводителей. На автомобильный транспорт приходится порядка 40% всех загрязнений воздуха. Автомобиль в среднем выбрасывает в год 135 кг окиси углерода, 25 кг окислов азота, 20 кг углеводородов, от 7 до 10 кг бензопирена, 4 кг двуокиси серы, 1,2 кг твердых частиц.

На данный момент в мире насчитывается порядка 500 млн автомобилей. Их выбросы в совокупности в год составляют порядка 67,5 мегатонн окиси углерода и 12,5 мегатонн окислов азота.

В связи с этим становится актуальной работа в области развития и популяризации автомобильного транспорта на альтернативных источниках энергии. В НГТУ им. П.Е. Алексеева в студенческом конструкторском бюро ведется разработка электрического трицикла класса Shell Eco-Marathon, к которому предъявлены требования по высокой экономичности и экологичности. Трицикл представляет собой трехколесное транспортное средство рамной конструкции, закрытое корпусом из композиционных материалов, с лежащим расположением пилота и управляемыми передними колесами. Привод осуществляется через заднее ведущее мотор-колесо.

*Таблица 1*

**Исходные данные расчета координата центра масс**

№	Элемент	Масса, кг	Координата X, м	Координата Y, м
1	Пилот	75	0,751	0,129
2	Рама	20	1,178	0
3	Аккумулятор	10	1,590	0,04
4	Рулевое управление	3	-0,93	0,05
5	Мотор колесо	7	2,11	0
6	Управляемые колеса	3	0	0,03

Исходя из найденных технических решений, была предложена компоновочная схема трицикла, для которой проведен расчет центра масс. Для этого по 3D-модели трицикла в программе Autodesk Inventor были определены координаты основных элементов и узлов болида (рама, аккумулятор, рулевое управление) и пилота по осям (табл. 1).

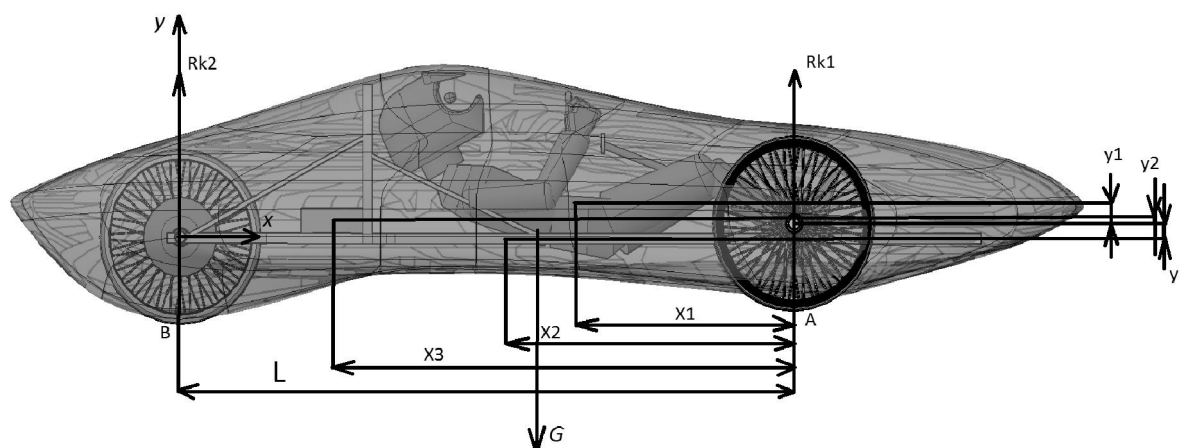


Рис. 1. Схема для определения координат центра масс трицикла

Определим координаты центра масс системы по соотношениям (табл. 2):

$$x_c = \frac{\sum m_i \cdot x_i}{\sum m_i} \quad y_c = \frac{\sum m_i \cdot y_i}{\sum m_i} ,$$

где  $i$  - порядковый номер элемента, указанного в табл. 1,  
 $m$  - масса элемента,  
 $x_c, y_c$  - координаты центра масс по оси  $x$  и  $y$  соответственно.

Таблица 2

Координаты центра масс

№	$m_i, \text{кг}$	$m_i \cdot x_i$	$m_i \cdot y_i$	$x_c, \text{м}$	$y_c, \text{м}$
1	75	56,325	9,675	0,913	0,005
2	20	23,56	0		
3	10	15,9	0,4		
4	3	-2,79	0,15		
5	7	14,805	0		
6	3	0	0,09		
Сумма	118	107,8	0,64		

Для наиболее оптимального размещения составных частей болида необходимо вычислить нормальную нагрузку на передние и задние колеса.

Нормальная нагрузка  $R_{k1}$  (Н), действующая на переднюю ось болида, из уравнения моментов действующих сил относительно оси задних колес:

$$\sum M(R_{k2}) = 0$$

$$G \cdot X_c - R_{k1} \cdot L = 0$$

$$R_{k1} = G \cdot X_c / L = m \cdot g \cdot X_c / L = 118 \cdot 9,81 \cdot 0,913 / 2,11 = 500,9 \text{ Н.}$$

Нормальная нагрузка  $R_{k2}$  (Н), действующая на заднее колесо болида, из уравнения моментов действующих сил относительно оси передних:

$$\sum M(R_{k1}) = 0$$

$$R_{k2} \cdot L - G \cdot (L - X_c) = 0$$

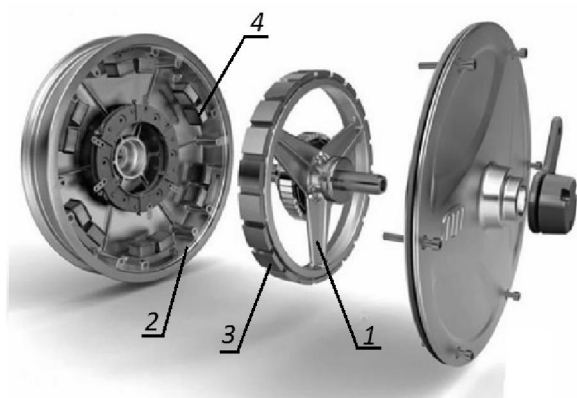
$$R_{k2} = G \cdot (L - X_c) / L = m \cdot g \cdot (L - X_c) / L = 118 \cdot 9,81 \cdot (2,11 - 0,913) / 2,11 = 656,7 \text{ Н}$$

Из расчетов видно, что нагрузка распределена в соотношении 43,3% - передняя ось,

56,7% - задняя ось. Большую нагрузку воспринимает ведущее заднее колесо, которое должно обеспечивать отсутствие проскальзывания между колесом и поверхностью во время старта болида. Таким образом, полученные координаты центра масс и нагрузка на оси позволяют оптимизировать компоновочную схему трицикла с целью более оптимального распределения массы отдельных элементов.

В ходе работы над проектированием трицикла были проведены расчеты с целью выбора оптимального силового агрегата.

Анализ коллекторных и бесколлекторных бытовых электродвигателей, применяемых на различном технологическом оборудовании, показал, что их габариты и масса слишком велики для установки на трицикл, участвующий в соревнованиях. В связи с этим, одним из решений стало применение мотор-колеса (рис. 2), наиболее приспособленного для работы в условиях движения. В комплекте с мотор-колесом прилагается микроконтроллер (рис. 3), который обеспечивает взаимосвязь компонентов и позволяет регулировать крутящий момент электромотора. Благодаря применению мотор-колеса может быть использована система рекуперации энергии при торможении, которая позволит несколько увеличить запас хода болида.



**Рис. 2. Принципиальная схема мотор-колеса:**

1 – статор; 2 – ротор;  
3 - магниты, 4 - обмотки



**Рис. 3. Комплект мотор-колеса:**

1 - спицевое мотор-колесо; 2 – контроллер;  
3 - тормозные ручки; 4 - ручки газа; 5 - усилители дроп-аутов; 6 - панель управления

С целью изучения тягово-динамических характеристик трицикла с мотор-колесом проводим тягово-динамический расчет. Для проведения тягово-динамических характеристик проводим расчет безредукторного электромотора мощностью 1 кВт. Исходные данные для тягового расчета показаны в табл. 3.

**Таблица 3**

**Исходные данные тягово-динамического расчета**

Параметры	Обозначения	Значения
Мощность, кВт	$P_e$	1
Момент, Н·м	$T_e$	30
Полная масса, кг	$m$	110
Габаритная высота, м	$H$	1,225
Габаритная ширина, м	$B$	0,5
КПД трансмиссии	$\eta_{тр}$	0,9
Радиус колеса, м	$r_d$	0,3

Строим внешнюю скоростную характеристику электродвигателя. Для этого разбиваем весь диапазон значений угловой ( $\omega_e$ ) скорости на 10 равных частей. Задавая номинальный момент двигателя ( $T_e$ ), определяем его максимальную мощность ( $P_e$ ). Далее определяем значение мощности для каждого значения угловой скорости (табл. 4). Строим график внешней скоростной характеристики (рис. 4).

Таблица 4

Исходные данные внешней скоростной характеристики

Угловая скорость ( $\omega_e$ ), рад/с	Момент ( $T_e$ ), Н•м	Мощность ( $P_e$ ), Вт
6	30	100
9	30	200
12	30	340
15	30	440
18	30	580
21	30	680
24	30	780
27	30	890
30	20	980
33	10	1000

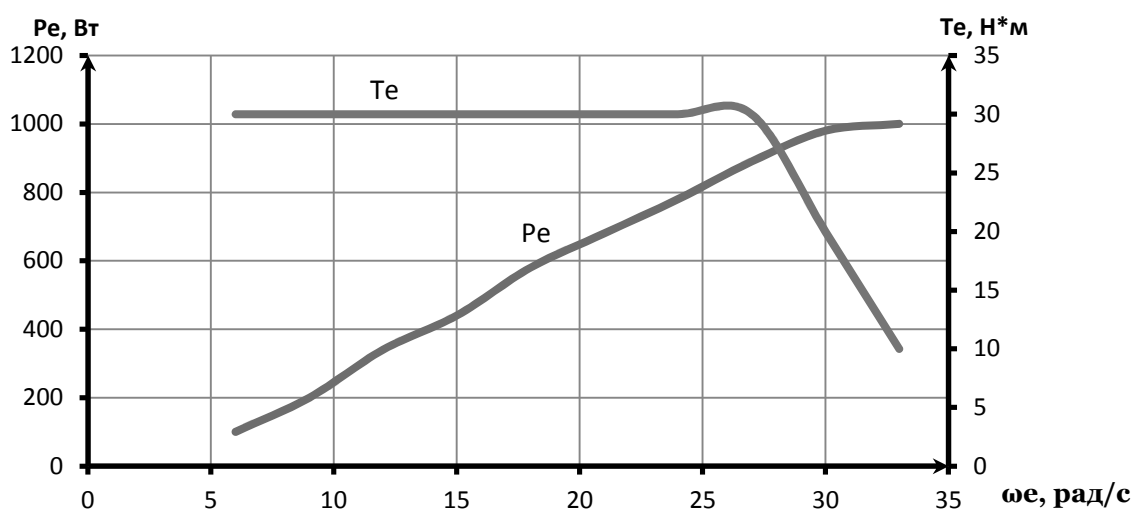


Рис. 4. График внешней скоростной характеристики болида

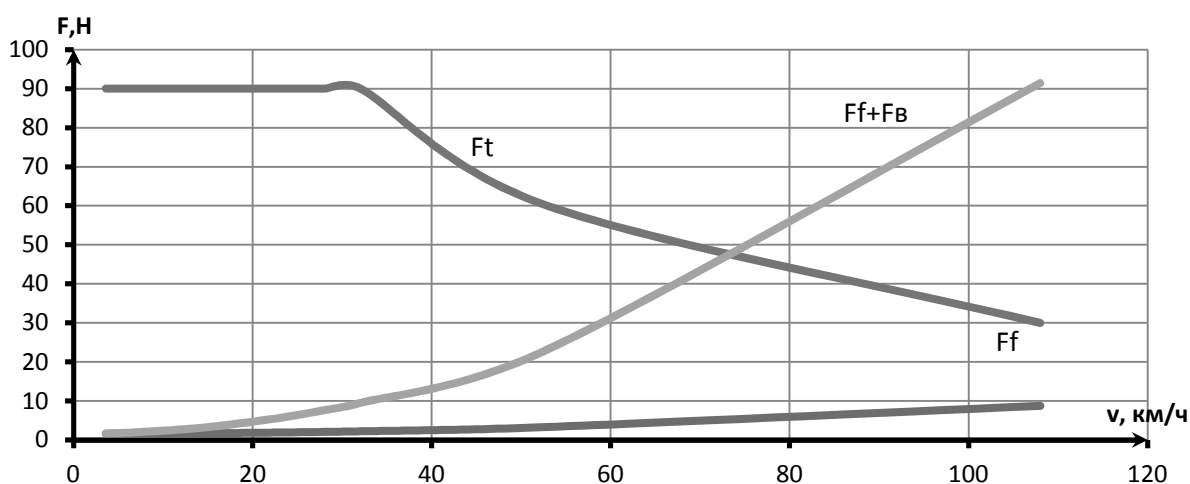


Рис. 5. График тягового баланса болида

Определяем максимальную скорость ( $v$ ) в зависимости от мощности и силы тяги ( $F_t$ ) [1]:

$$F_t = \frac{T_e \cdot i_{тр} \cdot \eta_{тр}}{r_d}$$



где  $i_{тр}$  - передаточное число трансмиссии;  
 $\eta_{тр}$  - КПД трансмиссии;  
 $r_d$  - радиус колеса, м;  
 $F_f$  - сила сопротивления качению, Н;  
 $F_B$  - сила сопротивления воздуху, Н;

$$v = 3,6 \cdot \eta_{тр} \cdot \frac{P_e}{F_t}$$

Строим график тягового баланса (силы тяги от скорости) (рис. 5). По графику можно сделать вывод, что тяговая сила на электродвигателе имеет максимальное значение с начала движения болида, что дает преимущество перед ДВС. При больших скоростях тяговая сила снижается, однако на соревнованиях Shell Eco Marathon болиды не достигают данных скоростей, что позволяет использовать болид в наиболее рациональном режиме тяговой силы.

Вычисляя фактор обтекаемости, силу сопротивления воздуху ( $F_B$ ) и качению ( $F_f$ ), для определения соответствующих мощностей.

$$F_B = W \cdot v^2,$$

где  $W$  - фактор обтекаемости ( $\text{Н} \cdot \text{с}^2 / \text{м}^2$ ).

$$W = c_x \cdot \rho \cdot A / 2,$$

где  $c_x$  - коэффициент аэродинамического сопротивления. На основании данных испытаний имитационной модели корпуса трицикла в прикладном пакете Star CCM принимаем  $c_x = 0,3$ ;

$\rho$  - плотность воздуха.  $\rho = 1,225 \text{ кг/м}^3$ ;

$A$  - площадь миделя. Определяется из 3D модели.  $A = 0,5 \text{ м}^2$ ;

$$F_f = f \cdot v^2,$$

где  $f$  - коэффициент сопротивления качению. Зависит от дорожного покрытия.

Принимаем  $f = 0,014$ .

Определяем Тяговую мощность, мощность сопротивления воздуху и мощность сопротивления качению, строим график баланса мощности (рис. 6)

$$P_t = F_t \cdot v, P_f = F_f \cdot v, P_e = F_e \cdot v.$$

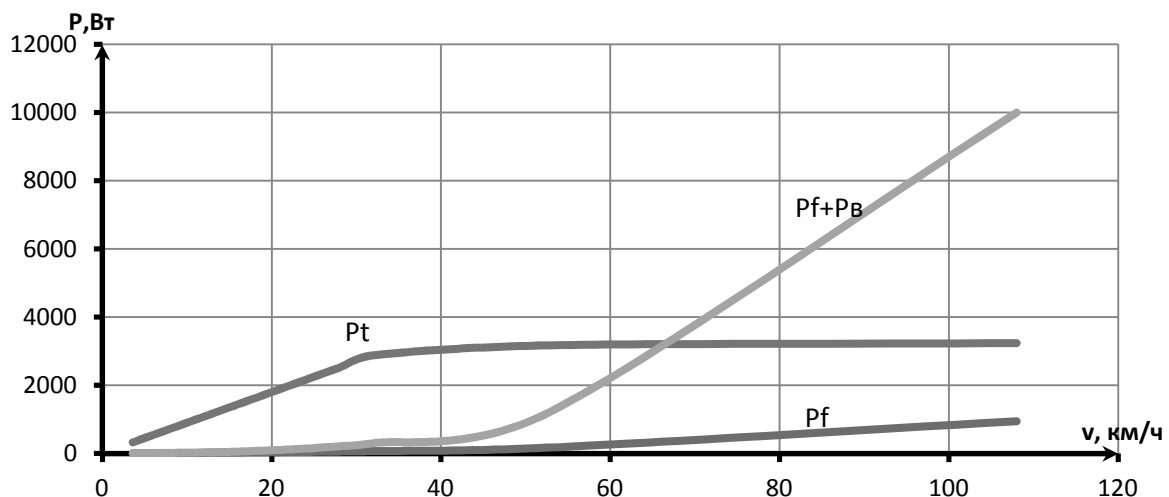


Рис. 6. График баланса мощности автомобиля

Далее, вычисляя динамический фактор болида, определяем его ускорение (рис. 7)

$$a = \frac{(D-f) \cdot g}{6},$$

где  $D$  - динамический фактор.

$$D = \frac{F_t - F_B}{m \cdot g}$$

$g$  - ускорение свободного падения  $9,81 \text{ м/с}^2$ ;

$B$  - коэффициент учета вращающихся масс.

Так как у электродвигателя отсутствует трансмиссия и вращающиеся массы в самом двигателе, то для мотор-колеса принимаем значение  $B = 1$ .

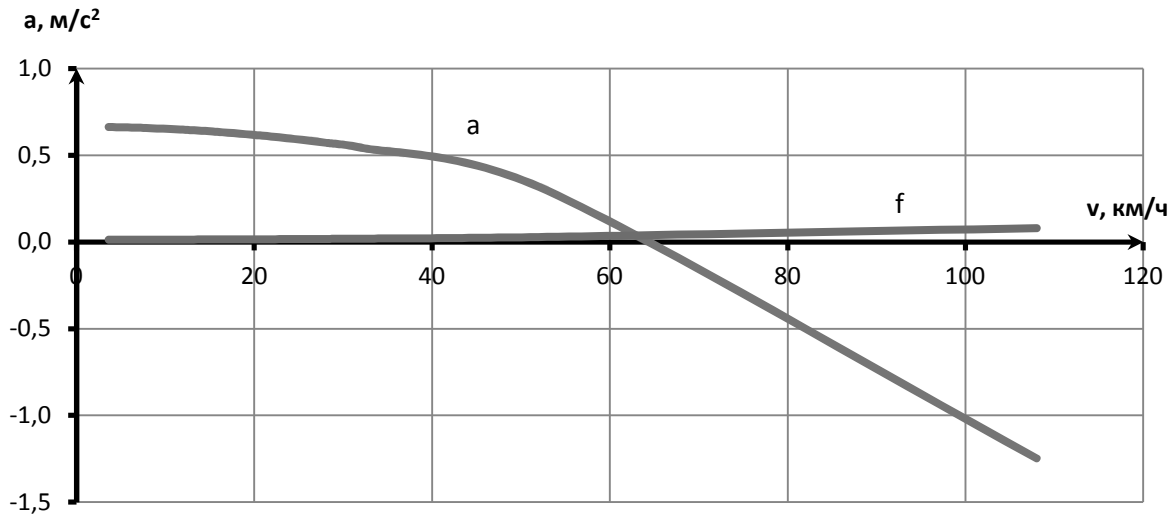


Рис. 7. График ускорения болида

Из рис. 7 видно, что с увеличением скорости ускорение трицикла уменьшается незначительно, демонстрируя преимущество перед двигателями внутреннего сгорания. Определяем удельный расход энергии мотор-колеса:

$$P_{out} = P_{in} \cdot \eta,$$

где  $P_{out}$  – выходная мощность мотор-колеса, Вт;

$P_{in}$  – потребляемая (входная) мощность мотор-колеса, Вт;

$\eta$  – КПД мотор-колеса.

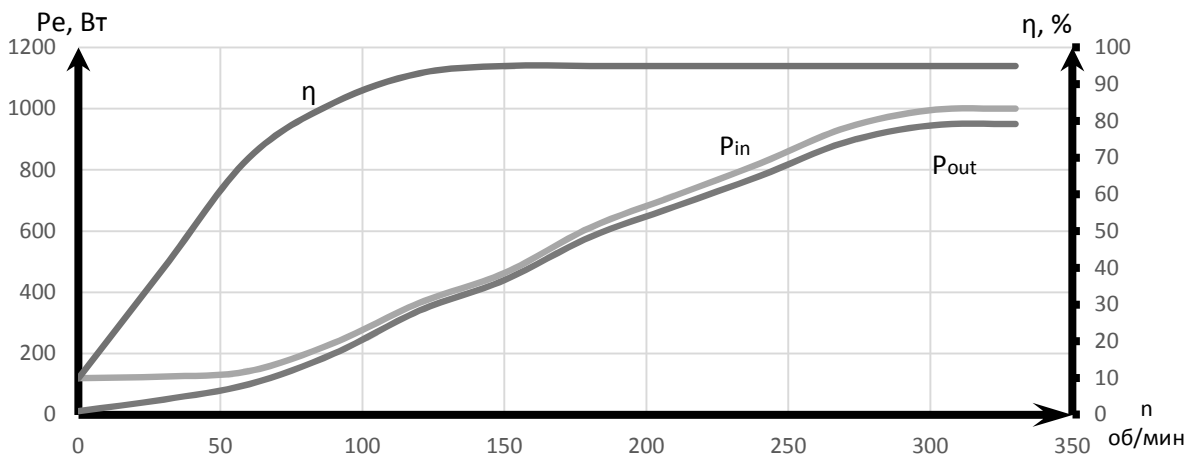


Рис. 8 График удельного расхода энергии

На рис. 8 представлен удельный расход топлива. На графике указаны выходная мощность ( $P_{out}$ ) и входная мощность ( $P_{in}$ ) мотор-колеса. Выходная пиковая мощность двигателя

определяется произведением входной мощности на КПД электродвигателя. Входная мощность определяет удельный расход энергии в данный момент времени в зависимости от оборотов ротора электродвигателя.

Исходя из проведенных расчетов, можно сделать вывод, что главным параметром, влияющим на экономичность болида, является мощность силовой установки. При недостаточной мощности транспортное средство теряет подвижность либо не способно набрать необходимую скорость. Принимая во внимание проведенные расчеты, можно принять, что болид, имеющий снаряженную массу 120 кг, должен быть оснащен двигателем мощностью 1 кВт для достижения наибольшего пробега на заданном количестве электроэнергии.

Из графиков можно определить максимальную скорость движения трицикла, которая составляет порядка 65-70 км/ч. Однако, в отличие от двигателя внутреннего сгорания, электродвигатели тем экономнее, чем меньше частота вращения вала электромотора, а значит, при наименьшей скорости. Принимая во внимание свойства электромотора, который при старте расходует максимальное количество энергии, необходимо обеспечить оптимальную скорость трицикла для наиболее экономного режима движения. При данных массогабаритных характеристиках принимается оптимальная скорость, равная 20-25 км/ч, которая соответствует требованиям регламента соревнований Shell Eco Marathone. Именно при данных скоростях сила сопротивления качению и сила сопротивления воздуха минимальны, в то время как сила тяги обеспечивает необходимое движение и экономичность.

Не менее важными задачами для достижения экономичности и повышения запаса хода трицикла является снижение его массы и силы сопротивления воздуха благодаря оптимизации массогабаритных характеристик и улучшению аэродинамики корпуса болида [2, 3]. Одним из решений этой задачи является применение композитных материалов при создании корпуса-монокока болида. Достаточно подробно вопрос использования композитных материалов в создании элементов спортивных автомобилей рассмотрен в трудах коллектива инженеров НГТУ им. Р.Е. Алексеева [4–6]. Адаптация технологии вакуумной инфузии композиционных материалов для получения элементов трицикла будут рассмотрены отдельно.

#### Библиографический список

1. **Кравец В.Н.** Теория автомобиля: учебник / В.Н. Кравец; Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – 2-е изд., переработ. – Нижний Новгород, 2013. – 413 с.
2. **Гухо В.Г.** Аэродинамика автомобиля: [пер. с нем.] / В.Г. Гухо. – М.: Машиностроение, 1987. – 424 с.
3. **Мацкерле Ю.** Современный экономичный автомобиль: [пер. с чешск.] / Ю. Мацкерле. – М.: Машиностроение, 1987. – 320 с.
4. **Стахин, Д.Р.** Ультра-легкий корпус и рама для болида shell eco-marathon / Д.Р. Стахин, К.О. Гончаров // Будущее технической науки: сб. мат. XVI Международной молодежной научно-технической конференции. – НГТУ. – Нижний Новгород, 2017. – С. 314–315.
5. **Деунажев, Р.В.** Особенности создания элементов спортивных автомобилей на основе композиционных материалов / Р.В. Деунажев, А.Л. Кулагин, К.О. Гончаров // Беспилотные транспортные средства: проблемы и перспективы: сб. материалов 94 международной научно-технической конференции Ассоциации автомобильных инженеров. – НГТУ. – Нижний Новгород, 2016. – С. 140–141.
6. **Кулагин, А.Л.** Композиционные материалы в системах пассивной безопасности и элементах конструкции спортивных автомобилей класса «Formula Student» / А.Л. Кулагин [и др.] // Беспилотные транспортные средства: проблемы и перспективы: сб. мат. 94 международной научно-технической конференции Ассоциации автомобильных инженеров; НГТУ. – Нижний Новгород, 2016. – С. 145–148.

*Дата поступления  
в редакцию 29.03.2018*

D. R. Stakhin, K. O. Goncharov

**THE PECULIARITIES OF SELECTION OF THE POWER UNIT TRICYCLE  
CLASS SHELL ECO-MARATHON**

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

**The aim of the study** is to select the components of the tricycle power unit to optimize the technical and operational indicators of the transport facility.

**The objective of the study** is to select the parameters in such a way as to ensure the maximum mileage on a single battery charge. The paper uses an analytical approach and calculation methods for determining the necessary characteristics of the power plant. Shown traction-dynamic calculation, the calculation of the center of mass of the tricycle.

**The study found** the coordinates of the center of mass of the object of study, the load distribution along the axes. The load ratio is 43.3% for front axle, 56.7% for rear axle. Power characteristics of the tricycle are investigated. The graphs of the external velocity characteristic, the graph of the traction balance, the power balance, the graph of the specific energy consumption.

**As a result** and taking into account the calculations, it can be assumed that a car with a mass of 120 kg, must be equipped with a 1 kW motor to achieve the highest mileage on a given amount of electricity. The most economical mode of travel is achieved at a speed of 20-25 km/h.

*Key words:* motor-wheel, tricycle, fuel economy, Shell Eco Marathon.

УДК 621.43

А.Н. Тихомиров, В.В. Щербаков

**ВОПРОСЫ ВЫБОРА МОЩНОСТИ ВСПОМОГАТЕЛЬНОЙ  
ЭНЕРГОУСТАНОВКИ ТРАНСПОРТНОЙ ЭЛЕКТРОПЛАТФОРМЫ**

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева

Рассмотрена экспериментальная и аналитическая оценка энергетических затрат на движение электрического транспортного средства различной энерговооруженности в условиях разных циклов движения. На основании этого сделан выбор мощности вспомогательной бортовой энергетической установки достаточной для полной или частичной компенсации данных затрат энергии.

*Ключевые слова:* электроплатформа, аккумуляторная батарея, мощность, вспомогательная энергоустановка.

Доля электромобилей сегодня примерно 0,5% от общего числа транспортных средств, и уже сейчас возникает противоречие между развитием электротранспорта и существующей энергетической инфраструктурой. В отличие от систем батарейных электромобилей, выработка электроэнергии – это зрелая технология, и законы передачи энергии останутся в значительной степени неизменными. Если использование электротранспорта следует рассматривать как меру снижения экологической нагрузки на крупные города, то именно в крупных центрах имеющиеся электросети работают на пределе, не позволяющем наращивать передаваемую электрическую мощность [1].

Выход из положения видится в генерации электроэнергии непосредственно на борту транспортного средства. Использование так называемых расширителей пробега (*range extender*) не противоречит общей концепции электроплатформы. Транспортное средство (ТС), которое может быть крупнотоннажным, способно въезжать в центры городов на электротяге, не загрязняя воздух и избегая платы за это.

Пробег на электроэнергии может быть невелик, примерно 50 км, но в большинстве случаев этого достаточно для выполнения транспортной работы. При удалении от центра вспомогательная энергоустановка включается для подзарядки батарей, и вопрос заключается только в ее эффективности и экологичности. Достигается компромисс между традиционными и инновационными технологиями.

Каков может быть источник вспомогательной энергии? В самом общем виде – это некая система преобразования химической энергии топлива (жидкого или газообразного) в электрическую энергию. Непосредственно генерация электроэнергии в большинстве случаев обеспечивается электродинамическим генератором тока. А вот промежуточным звеном преобразования химической энергии в механическую служит тепловой двигатель – традиционный поршневой двигатель внутреннего сгорания, газовая турбина или двигатель внешнего сгорания. Существует способ получения электрического тока из химической энергии топлива без промежуточных преобразований в тепловую и механическую энергию – топливные элементы. Их преимуществами, в сравнении с традиционными автономными источниками энергии, являются высокая эффективность использования топлива, меньшие показатели шума и вибрации, высокая маневренность во всем диапазоне нагрузок.

Для транспортного средства с непосредственной передачей энергии от двигателя на колеса мощность силовой установки выбирается из условий достижения заданной максимальной скорости и желаемой динамики разгона. Гибридные автомобили комплектуются ДВС пониженной мощности и при динамичных разгонах на короткое время рассчитывают на помощь электропривода и запасенную в аккумуляторах энергию. У электроплатформ, где вспомогательная энергосистема не может помочь движению, выходная мощность должна выбираться так, чтобы соответствовать средней мощности движения ТС за некий цикл.

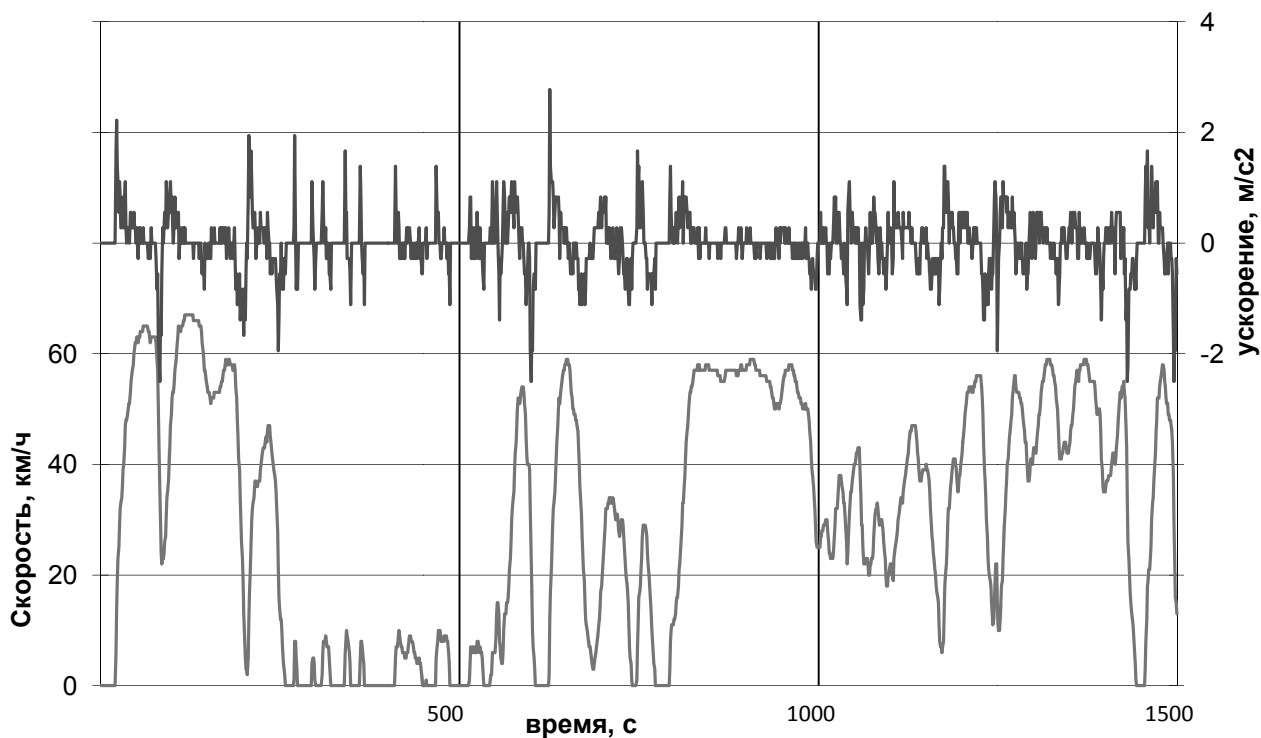


Рис. 1. Фрагмент записи движения ГАЗ А21R22 по городу

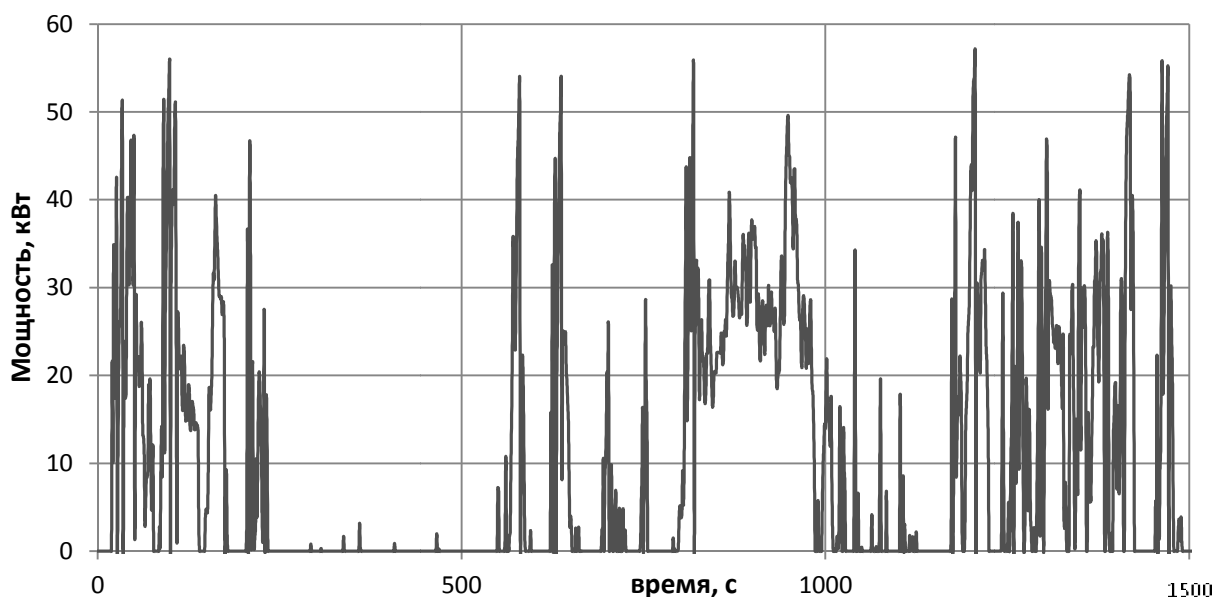


Рис. 2. Мощность, затраченная на движение ГАЗ А21R22 по городу (фрагмент)

Требовать от вспомогательной энергоустановки высоких мощностей нецелесообразно. Максимальная скорость и динамика ТС обеспечивается энергией, запасенной в батареях. К тому же в городской среде, где планируется основная эксплуатация электроплатформ, доля максимальных нагрузок чрезвычайно мала, а доля остановок и движения с малыми скоростями – велика.

В качестве примера на рис. 1 приведен фрагмент записи параметров движения автомобиля ГАЗ А21R22, двигавшегося с полной массой 3500 кг в условиях крупного города, а на рис. 2 – мощности, отбираемой от двигателя в этих условиях. Производилась запись пара-

метров макропрофиля дороги (Racelogic VBOX3i 100Hz), данных с блока управления двигателя о расходе топлива (CAN), в контрольных точках ручным триггером ставились временные метки. Маршрут начинался и заканчивался в одной точке для исключения влияния перепада высот, которые составляли около 100 м. Общая длина заезда составила 42,5 км, средняя скорость движения – 26,3 км/ч, максимальное ускорение достигало 3 м/с<sup>2</sup>. Запись длилась 6090 с, но для удобства сравнения с расчетным циклом, приведенным далее, на рисунках представлены только фрагменты записи длительностью 1500 с.

Видно, что только на коротком участке движения в диапазоне от 820 до 980 с, где ТС преодолевало затяжной подъем, мощность сохранялась на уровне примерно 25...30 кВт. На всем остальном маршруте мощность была востребована импульсно и расходовалась, главным образом, на ускорение транспортного средства. Максимальная достигнутая мощность двигателя составила 60 кВт. Также наблюдалось 15 пиков мощности амплитудой 55 кВт. За полный цикл на движение было затрачено 67560 кДж, что соответствует средней мощности двигателя 11,1 кВт.

Для дизельного двигателя, которым оснащено данное ТС с механической ступенчатой трансмиссией, одна и та же мощность может быть достигнута на разных режимах работы. Эффективность одних режимов выше, других – ниже, а выбор объясняется только предпочтениями и темпераментом водителя. Это хорошо иллюстрирует рис. 3, где представлены все режимные точки, пройденные ДВС на маршруте.

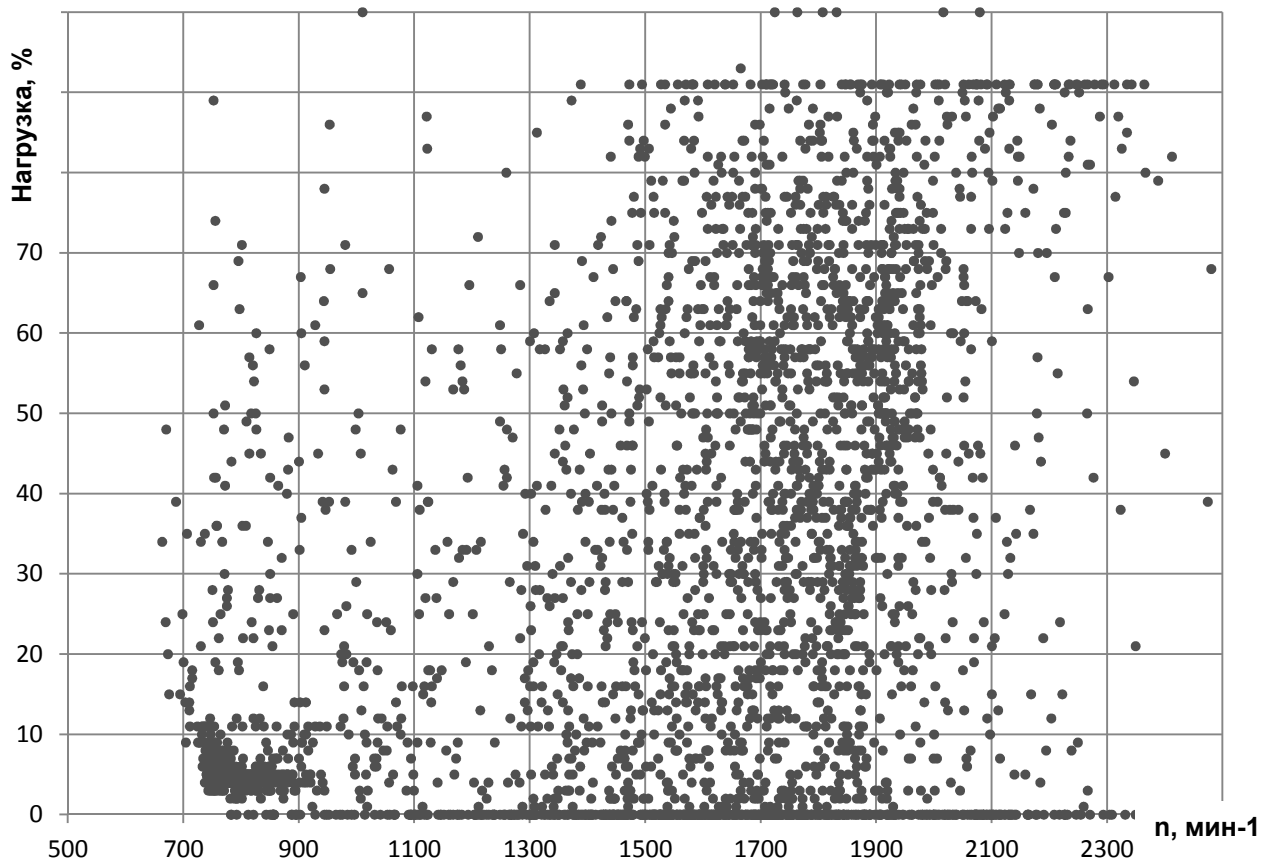


Рис. 3. Режимы работы двигателя ГАЗ А21R22 при движении по городу

Для исключения приверженности к определенным диапазонам, возможных различий в замерах от манеры управления транспортным средством, оценка энергетических затрат должна вестись по стандартным ездовым циклам. Каждый из них представляет собой известную зависимость скорости движения от времени. Наиболее распространенным является европейский ездовой цикл NEDC имитирующий движение как в городе (первая часть цикла)

так и за городом (вторая часть цикла). Однако созданный более полувека назад он стал совершенно не типичен для современных условий движения. В городской фазе цикла максимальная скорость составляет 50 км/ч, средняя скорость – около 18 км/ч, максимальное ускорение – около  $1 \text{ м/с}^2$ .

В качестве альтернативы Европейскому циклу экспертами стран ЕС, Японии и Индии разработана новая процедура испытаний WLTP (*Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedures*) [2]. Основное назначение – оценка эксплуатационной топливной экономичности транспортного средства, в полной мере характеризуемой эмиссией  $\text{CO}_2$ . Процедура предполагает три возможных класса испытаний с соответствующими циклами испытаний WLTC, в зависимости от энерговооруженности автомобиля. В качестве критерия выбрано отношение номинальной мощности двигателя к снаряженной массе ТС – PWR.

Наибольшее число современных ТС с ДВС попадают в третий класс удельной мощностью  $\text{PWR} > 34 \text{ кВт/т}$ . Так, энерговооруженность автомобиля ГАЗ А21R22 с дизельным двигателем мощностью 96 кВт, рассмотренного в первом случае, составляла 48 кВт/т. В отличие от него, электроплатформы, особенно с учетом вспомогательной энергоустановки, имеют относительно большую снаряженную массу непропорционально мощности электропривода. Проведенный анализ 12 легких коммерческих грузовиков с электроприводом показал, что третья часть из них попадает только во второй класс с  $\text{PWR} < 34 \text{ кВт/т}$ . Более того, максимальная скорость у них не превышает 90 км/ч. Для таких ТС предусмотрен усеченный цикл WLTC класса 2 (рис. 4), который не содержит высокоскоростного участка ExtraHigh2.

Сравнивая реальный цикл движения в городе и цикл WLTC класса 2, можно отметить их значительное сходство. Это подтверждает правильность выбора процедуры WLTC для объективной оценки ТС в эксплуатации. Цикл WLTC менее динамичен, максимальное ускорение не превышает  $1 \text{ м/с}^2$ , при максимальной скорости 84 км/ч. Но пониженная динамика задана здесь, исходя из двукратной разницы в энерговооруженности ТС. В первом случае мы располагали  $\text{PWR} = 48 \text{ кВт/т}$ , во втором – только  $\text{PWR} = 22 \text{ кВт/т}$ .

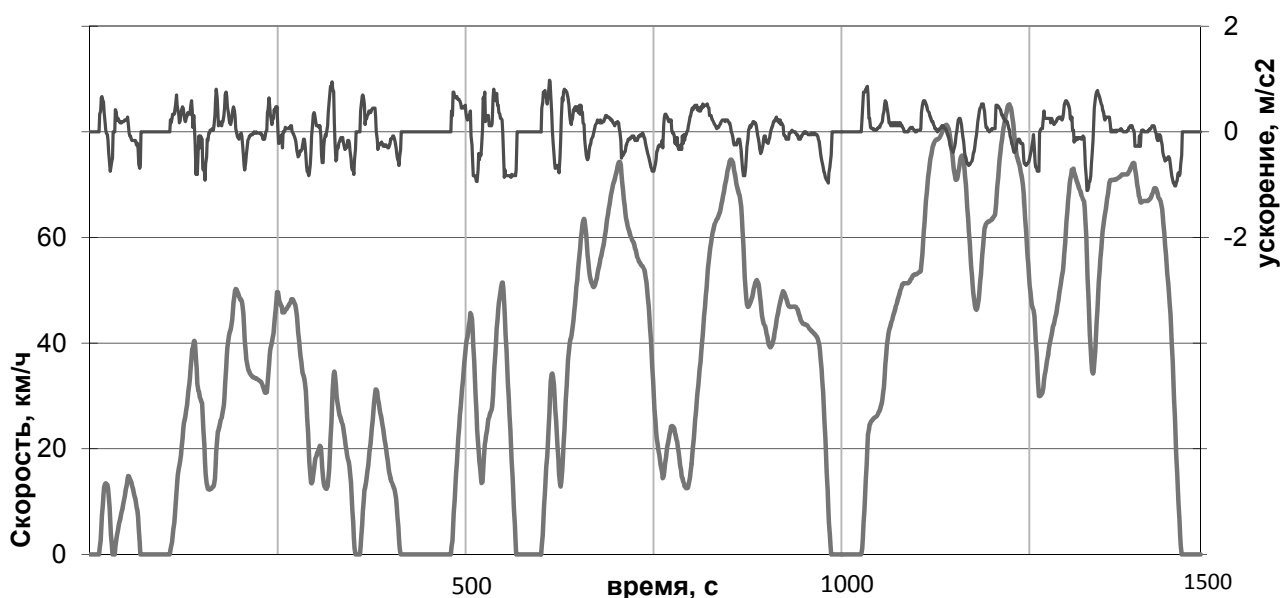


Рис. 4. Цикл испытаний WLTC класс 2 для ТС с максимальной скоростью менее 90 км/ч

Приведем расчетные характеристики цикла WLTC для полной массы автомобиля 3500 кг. Имитация динамометра выполнена по ГОСТ Р 41.83-2004. Общая длительность цикла 1477 с. За полный цикл на движение транспортного средства следует затратить 6864 кДж, что соответствует средней мощности двигателя 4,65 кВт.

Различие в средней мощности движения по циклам (4,65 кВт против 11,1 кВт), хорошо согласуется с различием в требуемой динамичности используемых циклов ( $1 \text{ м/с}^2$  против



3 м/с<sup>2</sup>) и позволяет сделать выбор мощности вспомогательной энергоустановки достаточной для обслуживания электроплатформы.

Так, для электроплатформы снаряженной массой около 2500 кг и мощностью электропривода 55 кВт (PWR=22 кВт/т) достаточной окажется мощность вспомогательной энергоустановки на уровне 5 кВт. Транспортное средство, вероятно, не сможет удержаться в современном городском транспортном потоке. Однако агрегат заряда такой мощности при непрерывном включении позволит полностью компенсировать затраты электроэнергии на движение. До исчерпания запаса топлива на борту электроплатформа сможет сохранять мобильность, не подключаясь к розетке. Однако ТС перестает быть электрическим в полном смысле. Но в тоже время емкость и масса тяговых батарей могут быть существенно снижены, освободив место для полезной нагрузки.

Электромобили сегодня ориентированы на запас хода на одной зарядке в 100...200 км. Подобный выбор основан на рациональном использовании рабочего времени ТС и его водителя, на статистическом анализе развозного парка легких коммерческих автомобилей. Энергоемкость лучших литий-ионных аккумуляторов сегодня около 250 Вт\*ч/кг, а энергопотребление электромобилей с полной массой около 3500 кг составляет примерно 300 Вт\*ч/км [3]. Следовательно, на борту должна находиться аккумуляторная станция массой около 200 кг.

Использование вспомогательной энергоустановки легко сохраняет заданный суточный пробег, позволяет исключить холостые пробеги до заправочной станции и обратно. Пробег на электротяге может быть сокращен до 50 км, что может оказаться достаточным для обслуживания «зеленых» зон в центрах мегаполисов. Соответственно снижается втрое масса аккумуляторов. Не следует забывать о совокупной стоимости установленных батарей и, соответственно, электроплатформы в целом. Цена на батареи для электромобилей за последние годы снизилась почти в пять раз, однако стоимость аккумуляторов продолжает оставаться одним из сдерживающих факторов распространения электротранспорта.

В случае несоответствия реальных условий движения расчетным (выезд на загородные трассы, агрессивное вождение, стремление двигаться вместе с потоком) принятая мощность вспомогательной энергоустановки уже не сможет полностью покрывать энергозатраты непосредственно за время движения. При средней мощности движения 11 кВт, как в первом примере, даже непрерывная работа вспомогательной энергоустановки покроет только половину затраченной электроэнергии. Полное исчерпание энергии батарей приведет к необходимости либо снизить затраты (максимальную скорость или динамику ТС) и сохранить при этом возможность движения, либо полностью остановиться для зарядки батарей. В любом случае следует помнить, что это все-таки электроплатформа и в подобной ситуации следует отправиться на ближайшую электрическую заправочную станцию.

Пока программы по субсидированию частных заправочных станций и развития государственной сети заправочных станций не реализованы, для электромобилей следует сохранить резервные пути развития. Они должны заключаться в поддержке чистых технологий электротранспорта технологиями зарядки батарей на борту транспортного средства с помощью проверенных технических средств. В качестве таких средств выступают вспомогательные системы генерации электроэнергии на базе тепловых двигателей или топливных элементов. Применение таких систем позволит снизить количество аккумуляторных батарей на борту электроплатформы или заменить их более дешевыми и доступными для российских условий, но меньшей емкости.

Относительно мощности вспомогательной энергоустановки, расчет движения по циклу WLTC показал, что средняя мощность, затрачиваемая на движение, не превышает 5 кВт для ТС второго класса энерговооруженности. Если данный уровень обеспечит полную независимость от зарядных станций, то для более нагруженных условий эксплуатации мощность вспомогательной энергоустановки на уровне 5 кВт будет, как это и задумано, покрывать энергозатраты на движение частично. Для уровня энерговооруженности ТС около 48 кВт/т

непрерывное включение вспомогательной энергоустановки может компенсировать половину затраченной на движение энергии либо всю энергию, но с перерывами в движении ТС на 50% времени.

### Библиографический список

1. CBCNews [Электронный ресурс]: [официальный сайт]. – Электрон.дан. Режим доступа: <http://www.cbc.ca/news/canada/toronto/ontario-hopes-revised-condo-act-ev-friendly-1.4155747>, свободный.
2. Europeancommission [Электронный ресурс]: [официальный сайт]. – Электрон.дан. Режим доступа: <https://circabc.europa.eu/sd/a/b40f73ed-314f-442f-b04a-48e8b4b6dae7/WLTP-2012-008%20Draft%20Annex%20Cycle%20as%20of%2018.05.2012.pdf>, свободный.
3. Battery University [Электронный ресурс]: [официальный сайт]. – Электрон.дан. Режим доступа: <http://www.batteryuniversity.com>, свободный.

*Дата поступления  
в редакцию 26.03.2018*

**A.N. Tikhomirov, V.V. Scherbakov**

## **THE ISSUE OF SELECTING POWER OF AUXILIARY POWER SYSTEM OF TRANSPORT ELECTRIC PLATFORM**

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

The article presents the results of an experimental and theoretical study of the energy consumption of a vehicle under different conditions. The purpose was to determine the power of the auxiliary range extender on board of the transport electric platform. Motion is considered both in the real road driving in a large city, and movement along an specific driving cycle. The high adequacy of the results obtained with the use of the new driving cycle WLTC. It is shown that for satisfactory compensation of electric power consumption of a vehicle moving in urban traffic with a curb weight 2500 kg, a 5 kW auxiliary power plant is sufficient.

*Key words:* electrical platform, battery, power, auxiliary power system.

## НАШИ АВТОРЫ

### ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

**Гусев Роман Сергеевич** – студент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
romavipgusev@mail.ru

**Евдокимова Татьяна Сергеевна** – бакалавр НГТУ им. Р. Е. Алексеева;  
evdokimovats97@gmail.com

**Ерофеев Владимир Иванович** – д-р физ.-мат. наук, профессор, директор института ИПМ РАН;  
hlybov\_52@mail.ru

**Иляхинский Александр Владимирович** – научный сотрудник института ИПМ РАН;  
hlybov\_52@mail.ru

**Китаев Александр Евгеньевич** – инженер-программист АО «ННПО имени М.В.Фрунзе»;  
kitaev\_a\_e@mail.ru

**Кобляков Дмитрий Александрович** – ст. преподаватель НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
d.koblyakov@gmail.com

**Корелин Олег Николаевич** – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е.Алексеева;  
o\_korelin@mail.ru

**Куркин Андрей Александрович** – д-р физ.-мат. наук, зав. кафедры НГТУ им. Р.Е.Алексеева;  
aakurkin@gmail.com

**Куркина Оксана Евгеньевна** – канд. физ.-мат.наук, PhD, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
oksana.kurkina@mail.ru

**Ладынин Андрей Иванович** – аспирант МИРЭА;  
andrey.ladynin@hotmail.com

**Мусарский Роман Абрамович** – д-р техн. наук, профессор, гл. науч. сотрудник научно-исследовательской лаборатории транспортных интеллектуальных систем НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
musarsky@list.ru

**Наумов Владимир Владимирович** – инженер-программист первой категории АО «Концерн «Моринсис-Агат»;  
v\_naumov@rambler.ru

**Сачков Алексей Дмитриевич** – магистрант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
sachkov2011@gmail.com

**Синодкин Алексей Александрович** – бакалавр НГТУ им. Р. Е. Алексеева;  
alexey.sinodkin@gmail.com

**Соколова Элеонора Станиславовна** – д-р техн. наук, профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
essokolowa@gmail.com

**Таланова Юлия Викторовна** – преподаватель МИРЭА;  
talanova@nextmail.ru

**Тимофеева Ольга Павловна** – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
optimofeeva@mail.ru

**Тюриков Максим Игоревич** – магистр НГТУ им. Р. Е. Алексеева;  
sys32b@gmail.com

**Тюгин Дмитрий Юрьевич** – канд. физ.-мат. наук, PhD, науч. сотрудник НИЛ МПиТК, НГТУ им. Р.Е.Алексеева;  
dtyugin@gmail.com

**Федосова Людмила Олеговна** – ассистент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
fedosovaludmila@list.ru

**Хлыбов Александр Анатольевич** – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
hlybov\_52@mail.ru

**Цапаев Алексей Петрович** – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
alexgrusp@mail.ru

**Шмелева Анна Геннадьевна** – канд. физ.-мат. наук, доцент МИРЭА;  
ann\_shmeleva@mail.ru

### ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

**Андреев Вячеслав Викторович** – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
vyach.andreev@mail.ru

**Андреева Алина Викторовна** – магистрант НГТУ им.Р.Е. Алексеева;  
aav2704@yandex.ru

**Власичев Герман Николаевич** – д-р техн. наук, ст. науч. сотрудник, доцент НГТУ им. П.Е. Алексеева; vlas@mts-nn.ru

**Гордеев Борис Александрович** – д-р техн. наук, гл. научн. сотрудник ИПМ РАН, профессор НГТУ им. П.Е. Алексеева; Gord347@mail.ru

**Дунцев Андрей Всеволодович** – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. П.Е. Алексеева; react@nntu.ru

**Егоров Айаал Николаевич** – начальник монтажно-наладочного центра ПАО СТ «Алмазавтоматика» АК «АЛРОСА» (г. Мирный); egorovan@alrosa.ru

**Калинин Евгений Владимирович** – ведущий инженер НГТУ им. П.Е. Алексеева; Chernmaza@eandex.ru

**Кожевников Сергей Васильевич** – инженер-конструктор 3 категории филиала ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» «НИИИС им. Ю.Е. Седакова»; Sergei.v.kozhevnikov@rambler.ru

**Кучеров Юрий Вячеславович** – инженер 1 категории АО Инжиниринговая компания «АСЭ»; Yu.Kucherov@niaer.ru

**Мухряков Юрий Андреевич** – инженер 3 категории, ОРО БПК-1 АО Инжиниринговая компания «АСЭ»; yura\_muhryakov@mail.ru

**Охулков Сергей Николаевич** – канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотрудник ИПМ РАН, доцент НГТУ им. П.Е. Алексеева; Oхulkovs@mail.ru

**Пименов Станислав Александрович** – канд. техн. наук, доцент, ст. науч. сотрудник филиала ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» «НИИИС им. Ю.Е. Седакова»; Spimenov\_m\_fem@mail.ru

**Плехов Александр Сергеевич** – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. П.Е. Алексеева; Aplehov@mail.ru

**Ситникова Екатерина Вадимовна** – магистрант НГТУ им.П.Е.Алексеева; miladymildem@gmail.ru

**Семёнов Александр Сергеевич** – канд. физ.-мат. наук, доцент, зав. кафедрой Политехнического института (филиала) Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова в г. Мирном; sash-alex@yandex.ru

**Серебряков Артем Владимирович** – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. П.Е. Алексеева; serebryakov@ardman.ru

**Титов Дмитрий Юрьевич** – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. П.Е. Алексеева; Dm\_titiv@list.ru.

**Харитонов Яков Станиславович** – начальник участка технического обслуживания силовой преобразовательной техники ПАО СТ

«Алмазавтоматика» АК «АЛРОСА»

(г. Мирный);

kharitonovyas@alrosa.ru

**Хохлов Валерий Николаевич** – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. П.Е. Алексеева; khvan1956@yandex.ru

#### **МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО**

**Волошко Владимир Владимирович** – ст. преподаватель Набережночелнинского института (филиал) Казанского (Приволжского) федерального университета; mirkamri@mai.ru

**Втюрина Марина Николаевна** – канд. хим. наук, доцент ВГСХА (г. Киров); Vtyurina-60@mail.ru

**Гагунов Сергей Алексеевич** – заведующий кафедрой НГТУ им. П.Е. Алексеева; GagunovSA@gaz.ru

**Гончаров Кирилл Олегович** – канд. техн. наук, доцент, зам. директора Института транспортных систем НГТУ им. П.Е. Алексеева; zemadm@mail.ru

**Иванов Андрей Михайлович** – д-р техн. наук, профессор МАДИ (г. Москва); ivanov-am@madi.ru

**Исакова Марина Игоревна** – магистрант МАДИ (г. Москва); marina\_sy@mail.ru

**Кантор Павел Яковлевич** – канд. физ.-мат. наук, доцент ВятГУ (г. Киров); shawl@list.ru

**Козлов Илья Сергеевич** – аспирант ВятГУ, (г. Киров); vz-43@mail.ru

**Кочеров Антон Валерьевич** – аспирант  
НГТУ им. Р.Е.Алексеева  
gennadiy.zuganov@mail.ru

**Кристалльный Сергей Робертович** – канд.  
техн. наук, доцент МАДИ (г. Москва);  
sportauto@rambler.ru

**Курмакаев Денис Руфилович** – студент  
НГТУ им. Р.Е.Алексеева;  
dkurmakaev@mail.ru

**Плотников Сергей Александрович** – д-р  
техн. наук, профессор ВятГУ (г. Киров);  
Plotnikovsa@bk.ru

**Попов Николай Викторович** – канд. техн.  
наук, доцент МАДИ (г. Москва);  
niko-porov@yandex.ru

**Савельев Валерий Алексеевич** – канд.  
техн. наук, ст. науч. Сотрудник ГНЦ РФ  
ФГУП “НАМИ” (г. Москва);  
cardan-nami@yandex.ru

**Савченко Владимир Владимирович** – канд.  
техн. наук, директор научно-инженерин-  
гового центра “Бортовых систем управле-  
ния мобильных машин” ГНУ ОИМ НАН  
Беларуси (г. Минск);  
uus@tyt.by

**Салахов Ильдар Ильгизарович** – канд.  
техн. наук, доцент Набережночелнинского  
института (филиал) Казанского (Привол-  
жского) федерального университета;  
mirkampr@mai.ru

**Сизов Александр Юрьевич** – ассистент  
НГТУ им. Р.Е.Алексеева;  
sizov\_ost\_vk@mail.ru

**Стахин Дмитрий Романович** – студент  
НГТУ им. Р.Е.Алексеева,  
dimka.sta777@gmail.com

**Тихомиров Александр Николаевич** –  
канд. техн. наук, доцент НГТУ  
им. Р.Е. Алексеева; alniti@mail.ru

**Топорков Максим Алексеевич** – аспи-  
рант МАДИ (г. Москва);  
makstoporkov@rambler.ru

**Туманов Алексей Анатольевич** – assi-  
стент НГТУ им. Р.Е.Алексеева;  
Alexey.tumanov.ngtu@mail.ru

**Мавлеев Ильдус Рифович** – канд. техн.  
наук, доцент Набережночелнинского ин-  
ститута (филиал) Казанского (Привол-  
жского) федерального университета;  
mirkampr@mai.ru.

**Поддубко Сергей Николаевич** – канд.  
техн. наук, доцент, генеральный директор  
ГНУ «Объединенный институт машино-  
строения НАН Беларуси» (г. Минск);  
p-s-n@tyt.by.

**Федосова Людмила Олеговна** – assi-  
стент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
fedosovaludmila@list.ru

**Щербаков Вячеслав Вячеславович** – ст.  
преподаватель НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
sla@dvsbox.ru

## РЕКОМЕНДАЦИИ ПО НАПИСАНИЮ АВТОРСКИХ РЕЗЮМЕ

(АННОТАЦИЙ, РЕФЕРАТОВ К СТАТЬЯМ)

Авторский реферат на английском языке должен быть понятен без ссылки на саму статью. Это краткое точное изложение содержания документа, включающее основные фактические сведения и выводы описываемой работы. Объем не менее 10 строк (100–250 слов – 850 знаков). Реферат включает: 1) предмет, тему, цель работы; 2) метод или методологию проведения работы; 3) результаты и область их применения; 4) выводы. Таблицы, формулы, рисунки (нумерация в реферате может не совпадать с текстом статьи) включаются, если раскрывают основное содержание документа и позволяют сократить объем реферата.

Реферат можно начать с изложения результатов работы и выводов. Сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте реферата. Следует применять терминологию, характерную для иностранных специальных текстов, избегать терминов, являющихся прямой калькой русскоязычных слов. Текст должен быть связным с использованием слов «следовательно», «более того», «например», «в результате» (consequently, moreover, for example, the benefits of this study, as a result). Необходимо использовать активный, а не пассивный залог, т.е. «The study tested», но не «It was tested in the study».

Авторское резюме из International Journal of Operations & Production Management. V.22.N 8

**B. Meijboom, M. Houtepens**

### STRUCTURING INTERNATIONAL SERVICE OPERATIONS: A THEORETICAL FRAMEWORK AND A CASE STUDY IN THE IT-SECTOR

#### The name of organization

**Purpose:** The specific challenges with which companies pursuing international manufacturing strategies are faced, if their output also contains a service dimension, are addressed.

**Design/methodology/approach:** A theoretical framework is proposed based on three virtually complementary perspectives by integrating international production, demand, and contemporary ICT-based theory. Subsequently, an exploratory case study in a pure service environment is described that illustrates the value of the framework.

**Findings:** It is possible, for example, to apply the theoretical framework to case studies in internationally-operating companies delivering a mix of goods and services.

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

**Originality/value:** Moreover, the framework has proven to be useful in improving the European structure of the case company. This is a notable and promising side-effect of the exploratory study, at least from a managerial point of view.

*Key words:* multinationals, service operations, location, decision making, case studies.

## ПРИНИМАЕМ В ПЕЧАТЬ НАУЧНЫЕ СТАТЬИ В ЖУРНАЛ «ТРУДЫ НГТУ им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»

*Адрес редакции: 603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24*

*Телефон: 8(920)00-37-877*

*E-mail: [rsl@nntu.ru](mailto:rsl@nntu.ru)*

### **ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ, НАПРАВЛЯЕМЫХ В РЕДАКЦИЮ**

- В редакцию направляют **два экземпляра** статьи и комплекта сопроводительной документации: бумажный и электронный.
- Желательно, чтобы объем статьи не превышал 10 страниц текста и 4–6 рисунков. Все страницы должны быть пронумерованы. Минимальное количество страниц – 6.
- **Статью необходимо сопроводить** актом и протоколом экспортного контроля, экспертным заключением о возможности открытого опубликования, выпиской из заседания кафедры, рекомендующей статью к опубликованию, сведениями об авторах и рецензией от внешней организации, подписанной доктором наук и заверенной печатью.
- Статья должна быть подписана всеми авторами.
- Первая страница статьи должна содержать следующую информацию: УДК (код по универсальному десятичному классификатору); инициалы и фамилии авторов (в таком порядке); название статьи; место работы всех авторов (полное название организации, город); аннотацию; ключевые слова (не более 10).
- Изложение материала должно быть ясным, логически выстроенным. Рекомендуется следующая структура статьи: вводная часть с обоснованием необходимости и изложением цели работы, теоретический анализ, методика, экспериментальная часть, результаты и выводы (не более 0,5 страницы), библиографический список.
- Статья должна завершаться **информацией на английском языке**: инициалы и фамилии авторов, тема, названия организаций, в которых работают авторы, реферат и ключевые слова.
- К статье следует **приложить файл с информацией об авторах** на русском языке: ФИО (полностью), место работы, должность, ученая степень и звание, служебный телефон и адрес электронной почты.
- Текст набирают через один интервал 12 кеглем. Сноски и примечания 10 кеглем. Поля: левое, правое и нижнее – 20 мм, верхнее – 25 мм. Переносы не допускаются. Используется формат **Word for Windows** и стандартные шрифты **Times New Roman** и **Symbol**.
- Формульные выражения выполняют строго в редакторе MS Equation 3 –12 кегль. Размерность физических величин должна соответствовать системе СИ.
- Сокращение слов, кроме общепринятых, не допускается.
- Таблицы (11 кегль жирный) должны иметь названия, их следует располагать по тексту статьи, ссылки на таблицы (табл. 1).
- Диаграммы выполняются в формате Excel.
- Графический материал (только в черно-белом изображении) должен быть четким и не требовать перерисовки. Изображение выполняется в формате **jpg** или **tif** с разрешением 300 **dpi**. Рисунки выполняются по ГОСТ, подрисовочная подпись 11 жирный кегль.

**РУКОПИСИ И СОПРОВОДИТЕЛЬНАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ  
ПРИНИМАЮТСЯ ПО СЛЕДУЮЩИМ АДРЕСАМ:**

**05.05.03 Колесные и гусеничные машины**

Владимир Сергеевич Макаров: [vladimir.makarov@nntu.ru](mailto:vladimir.makarov@nntu.ru)

**05.14.02 Электрические станции и электроэнергетические системы**

Евгений Викторович Бычков: [fae\\_nir@nntu.ru](mailto:fae_nir@nntu.ru)

**05.14.03 Ядерные энергетические установки, включая проектирование,  
эксплуатацию и выход из эксплуатации**

Максим Александрович Легчанов: [legchanov@nntu.ru](mailto:legchanov@nntu.ru)

**05.13.01 Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям).  
05.13.17 Теоретические основы информатики**

Валерий Павлович Хранилов: [hranilov@nntu.ru](mailto:hranilov@nntu.ru)



**ТРУДЫ НГТУ  
им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА**

**№ 2 (121)**

Редакторы: **О.В. Пугина, Н.Н. Максимова**  
Технический редактор **Т.П. Новикова**

*Редакция:*  
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24.  
[rs1@nntu.ru](mailto:rs1@nntu.ru)

Подписано в печать 14.06.2018. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Бумага офсетная.  
Печать трафаретная. Усл. печ. л. 26,0. 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.