

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*

**№ 3 (118)**

**Нижний Новгород 2017**

УДК 050(06)  
ББК 9я54  
Т 78

Т 78 Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2017. №3(118).  
– 187 с.

*Выходит 4 раза в год*

**Журнал включен ВАК при Минобрнауки России**

в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук» по группам специальностей: 05.05.00 – транспортное, горное и строительное машиностроение; 05.13.00 – информатика, вычислительная техника и управление; 05.14.00 – энергетика

**Главный редактор С.М. Дмитриев**

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ**

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

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

**РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ**

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

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

**ЗАРУБЕЖНЫЕ ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОГО СОВЕТА**

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

**ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОГО СОВЕТА**

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

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

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

УДК 050(06)  
ББК 9я54

© Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2017

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

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

*Published since 2010*

**№ 3 (118)**

**Nizhny Novgorod 2017**



*The journal is issued 4 times a year*

**The journal is included in HAC Ministry of Education and Science**  
in the "List of peer-reviewed scientific publications where must be published basic scientific results of dissertations on competition of a scientific degree of Candidate of Science, on competition of a scientific degree of Doctor of Science" in specialties: 05.05.00 - transport, mining and construction engineering; 05.13.00 - computer science, computer engineering and management; 05.14.00 - energy

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

**EDITORIAL BOARD**

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

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

**EDITORIAL COUNCIL**

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

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

**Pelenovski Dmitri Efimovich**

**Foreign members of Editorial Council**  
PhD, Doctor of Mathematical Science, Professor  
McMaster University (Ontario, Canada)

**László Palkovics**

The Széchenyi István University (Győr, Hungary)

**Péter Várlaki**

The Széchenyi István University (Győr, Hungary)

**Vijay Kumar Chakka**

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

**Yalciner Akhmet Cevdet.**

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

**Members of Editorial Council**

**Guliaev Yuri Vasilevich**

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

**Grinberg Ruslan Semenovich**

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

**Mitiakov Sergei Nikolaevich**

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

**Kurkin Andrey Aleksandrovich**

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

**Kondratev**

Associate member of the Russian Academy of Sciences,

**Viacheslav Vasilevich**

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

**Ryndyk Alexander Georgievich**

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

**Raevski Sergei Borisovich**

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

**Koshelev Oleg Sergeevich**

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

**Khranilov Valery Pavlovich**

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

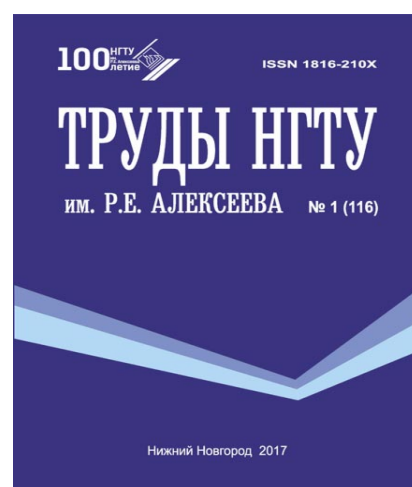
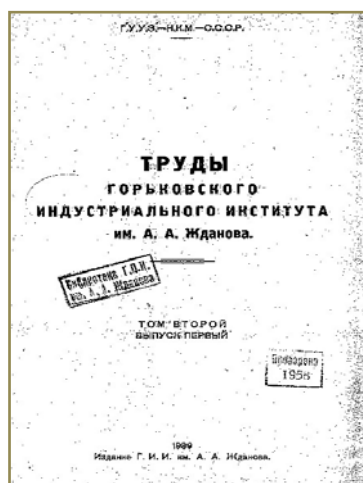
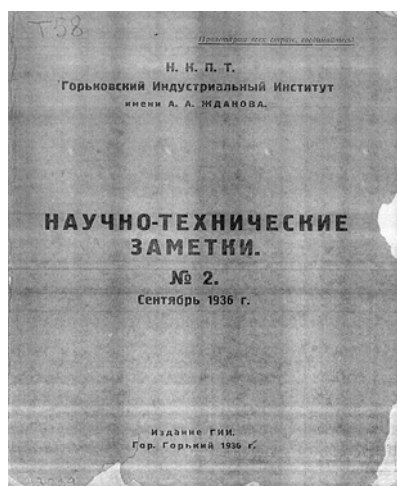
*The certificate on registration of periodic printed editions:  
III № ФС 77-56417*



**ВЫСШАЯ  
АТТЕСТАЦИОННАЯ  
КОМИССИЯ (ВАК)**  
при Министерстве образования и науки  
Российской Федерации



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



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

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

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



## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ.....</b>	<b>11</b>
<b>Гай В. Е., Пресняков И.А, Арабаджи М.И., Дербасов М.О., Поляков И.В., Викулова Е.Н.</b> Анализ аудиозаписей с позиций теории активного восприятия.....	11
<b>Галкин В.М., Елисеев М.Е., Сангалова М.Е.</b> К изоморфизму конечной плоскости Холла и плоскости Андре.....	20
<b>Ерофеева Л.Н., Лещева С.В., Мохнина Н.В., Юрова Н.В.</b> О простой группе $RI^2G_2(q)$ .....	24
<b>Логанов С.В.</b> Еще раз о принципах применения наследования.....	28
<b>Мошкова А.Н., Ерлыкина Е.И., Мурач Е.И., Царапкина Ю.И., Козлова Я.Ю.</b> Математическое моделирование зависимости между показателями гликолиза мозга в условиях гипоксического прекондиционирования.....	38
<b>Плеханова А.Ф., Узбекова А.С., Шибанов Н.А.</b> О применении портфельной теории к оценке промышленных кластеров.....	46
<b>Подкладкин А.С., Пособилов Н.Е.</b> Использование нейронных сетей глубокого обучения с целью формирования комментариев к видео.....	51
<b>Райкин Л.И., Субботина М.Н.</b> О подготовке контента для интерактивных электронных технических руководств.....	58
<b>ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ.....</b>	<b>65</b>
<b>Гордеев Б.А., Охулков С.Н., Осмехин А.Н., Плехов А.С.</b> Измерение торсионных моментов на валах электротехнических комплексов, соединенных магнитореологической муфтой, частотным методом.....	65
<b>Ермолаев А.И., Плехов А.С., Стрелков В.Ф., Титов Д.Ю.</b> Адаптивная система управления виброзащитными гидроопорами с магнитореологическим трансформатором.....	71
<b>Кисиленко К.И., Малахов В.А., Раевский А.С., Щербаков В.В.</b> Расчет и измерение параметров антенны Кассегрена.....	81
<b>Кузменков А.Н., Титов В.Г., Стрелков В.Ф.</b> Оптимизация контура регулирования тока электромагнитного подшипника.....	88
<b>Мякишева М.С., Нечаев А.С., Палачев М.А.</b> Автоматизированное проектирование и расчет характеристик широкополосного утроителя частоты 40-60 ГГц.....	94
<b>Османов Р.Р., Титов В.Г., Мирясов Г.М.</b> Малошумящий источник питания для сверхточной аппаратуры.....	102
<b>Раевский А.С., Раевский С.Б., Рыжакова Т.С.</b> Краевая присоединенная задача как частный случай задачи о возбуждении.....	109
<b>МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО .....</b>	<b>115</b>
<b>Белов О.А.</b> Современное состояние организации комплексной защиты металлических корпусов кораблей и судов от коррозии.....	115
<b>Гаврилюк Е.А., Манцеров С.А.</b> Разработка стратегии обслуживания и ремонта оборудования газотранспортного предприятия на основе индекса технического состояния.....	121



---

<b>Гусев А.А., Локтев А.В., Малахов А.В.</b> Особенности проектирования магистральных газопроводов на обводненных участках.....	127
<b>Зеленов С.Н., Семашко П.В.</b> Определение оптимальных геометрических размеров циркуляционного подшипника ГТД.....	135
<b>Крюков О.В.</b> Автоматизация нефтеперекачивающих станций транспорта нефтепродуктов.....	144
<b>Магницкая С.Ф., Кошелев О.С.</b> Эволюция и развитие методов классификации и группирования деталей при формировании технологических маршрутов обработки.....	151
<b>Макаров В.С.</b> Разработка научно обоснованных технических решений по созданию подвижных комплексов мониторинга береговых зон.....	157
<b>Пастухов Р.Д., Проворов В.В., Кварталов А.Р.</b> Анализ функциональных возможностей автоматизированной системы наведения с целью их изучения в учебном процессе технического вуза.....	168
<b>Плотников С.А., Зубакин А.С.</b> Исследование рабочего процесса двигателя 1Ч 6,8/5,4 при работе с добавками генераторного газа.....	175

## CONTENTS

<b>INFORMATICS AND MANAGEMENT IN TECHNICAL AND SOCIAL SYSTEMS....</b>	<b>11</b>
<b>Gai V. E., Presnyakov I. A., Arabaji M. I., Derbasov M. O., Polyakov I. V., Vikulova E. N.</b> The analysis of audio recordings from the standpoint of the theory of active perception.....	11
<b>Galkin V.M., Elyseev M.E., Sangalova M.E.</b> On the isomorphism of finite holl plane with andre plane.....	20
<b>Erofeeva L.N., Leshcheva S.V., Mokhnina N.V., Yurova N.V.</b> About simplegroup ${}^2G_2(q)$	24
<b>Loganov S.V.</b> Again on the principles of using inheritance .....	28
<b>Moshkova A.N., Erlykina E.I., Murach E.I., Tsarapkina Yu.I., Kozlova Ya.Yu.</b> Mathematical modelling of the dependence between brain glycolytic indexes under hypoxic preconditioning.....	38
<b>Plekhanova A.F., Uzbekova A.S. , Shibanov N.A.</b> Applying of mean-variance analysis to procedures for construction of industrial clusters.....	46
<b>Podkladkin A.S., Posobilov N.E.</b> Using deep learning neural networks for video captioning.	51
<b>Raikin L.I. , Subbotina M.N.</b> About the preparation of the content for interactive electronic technical guidelines.....	58
<b>ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES.....</b>	<b>65</b>
<b>Gordeev B.A., Okhulkov S.N., Osmekhin A.N., Plekhov A.S.</b> Measurement of the torsion moments on shaft of the electrotechnical complexes connected by the magnetorheological clutch, the frequency method.....	65
<b>Ermolaev A.I., Plekhov A.S., Strelkov V.F., Titov D.Y.</b> Adaptive control system of shock absorber with magnetoreological fluid.....	71
<b>Kisilenko K. I., Malakhov V. A., Raevskii A. S., Shcherbakov V. V.</b> Calculation and measurement of parameters of antenna Cassegrain.....	81
<b>Kuzmenkov A.N., Titov V.G., Strelkov V.F.</b> Optimization of current control circuit of electromagnetic bearing.....	88
<b>Myakisheva M.S., Nechaev A.S., Palachyov M.A.</b> Computer-aided design and characteristics calculation of a broadband 40-60 GHz frequency tripler.....	94
<b>Osmanov R.R., Titov V.G., Miryasov G.M.</b> Low-noise power supply for high-precisions instrumentation.....	102
<b>Raevskii A.S., Raevskii S. B., Ryzhakova T.S.</b> The regional affiliate task as a special case the problem of excitation.....	109
<b>MECHANICAL AND TRANSPORT: THEORY, TECHNOLOGY, PRODUCTION.....</b>	<b>115</b>
<b>Belov O.A.</b> Modern state of the integrated protection organization of metal casings of vessels and ships from corrosion.....	115
<b>Gavriliuk E.A., Mantserov S.A.</b> Development of gas-transport equipment maintenance strategy on basis of technical state index.....	121

---

<b>Gusev A.A., Loktev A.V., Malakhov A.V.</b> The design details of gas main pipelines for the watered grounds.....	127
<b>Zelenov S.N., Semashko P.V.</b> Determination of the optimum geometric dimensions of the circulating bearing GTD (gas-turbine engine).....	135
<b>Kryukov O.V.</b> Automation of oil pumping stations transport of oil products.....	144
<b>Magnizkaja S.F., Koshelev O.S.</b> The evolution and development of methods of classification and grouping of parts in the formation of the technological processing routes.....	151
<b>Makarov V.S.</b> Development of scientifically basic technical decisions on creating mobile complexes of monitoring of the coastal zones.....	157
<b>Pastukhov R.D., Provorov V.V., Kvartalov A.R.</b> The analysis of automated aiming system functions for the purpose of their research in the study process of technical university	168
<b>Plotnikov S.A., Zubakin A.S.</b> Investigation of the engine working rocess using generator gas additives.....	175

# ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

---

УДК 004.931

**В. Е. Гай, И. А. Пресняков, М. И. Арабаджи,  
М. О. Дербасов, И. В. Поляков, Е. Н. Викулова**

## **АНАЛИЗ АУДИОЗАПИСЕЙ С ПОЗИЦИЙ ТЕОРИИ АКТИВНОГО ВОСПРИЯТИЯ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева

Рассматриваются проблемы автоматизации процессов анализа звуковых записей. Информация, выделенная из аудиозаписи, может содержать полезные сведения, в данном случае приводятся примеры создания системы определения пола диктора по голосу, а также системы нахождения схожих по эмоциональному составу аудиозаписей. Целью работы является создание систем анализа записей звука, используя распознавание образов. На одном из этапов распознавания предлагается применить теорию активного восприятия, что позволит добиться высокой точности работы при уменьшении вычислительных затрат.

*Ключевые слова:* распознавание образов, машинное обучение, теория активного восприятия, аудиозаписи, звуковые сигналы, идентификация диктора, система рекомендаций.

### **Введение**

С ростом автоматизации производственных процессов возникает необходимость минимизировать участие человека при работе с ними. Главным образом это касается тех сфер деятельности, где работа однообразна либо опасна для человека. В таких процессах человека целесообразно заменить на автоматические системы, способные реагировать на различные отклонения параметров технологического процесса от номинальных. Пройдя развитие от распознающих автоматов до современных интеллектуальных систем распознавания, точность работы современных устройств позволяет использовать их в большом количестве сфер деятельности. При замене человека такой системой возможно повышение качества результатов (при работе с многократно повторяющимися рутинными операциями), а также скорости выполнения различных операций, что особенно критично при обстоятельствах, влияющих на психологическое состояние человека, принимающего решение.

При построении современных систем, решающих задачи распознавания образов, часто используются методы машинного обучения. Данные методы применяются на практике при решении задач в сферах медицинской диагностики, экономике, робототехнике, при распознавании речи, текста, рукописного ввода, а также в компьютерном зрении. Конкретное применение в области анализа музыкальных композиций и записей человеческой речи представлено далее.

При решении задач распознавания выделяют три этапа: предварительная обработка (формирование исходного описания); формирование системы признаков; классификация (принятие решения). На первом этапе к исходному сигналу применяются различные фильтры для избавления от шумов, также сигнал разделяется на сегменты определенной длительности. На этапе формирования системы признаков используются такие методы, как мел-



частотные кепстральные коэффициенты, вейвлет-коэффициенты, Коэффициенты оконного преобразования Фурье, LPC-коэффициенты, скрытая марковская модель, модель гауссовой смеси, методы глубокого обучения и др. Наконец, на этапе классификации используются байесовские классификаторы (методы опорных векторов, метод ближайших соседей), линейные разделители, нейронные сети и др.

## 1. Распознавание образов с позиций теории активного восприятия

### 2.1. Введение в теорию активного восприятия

Систему анализа аудиозаписи можно представить как систему распознавания образов. Известно, что данная система образов включает три этапа обработки данных: предварительная обработка, вычисление признаков и принятие решения [2]. Для реализации этапов предварительной обработки и вычисления признаков звукового сигнала предлагается использовать теорию активного восприятия [3].

Предварительная обработка заключается в выполнении  $Q$ -преобразования, т.е. в применении к сегментам исходного сигнала операции сложения:

$$g(t) = \sum_{k=(t-1) \cdot L+1}^{t \cdot L} f(k), t = \overline{1, N},$$

где  $L$  – число отсчётов, входящих в сегмент;  $N$  – число сегментов сигнала;  $g$  – результат применения  $Q$ -преобразования к сигналу  $f$ ;  $f(k)$  –  $k$ -й отсчёт сигнала  $f$ ;  $g(t)$  –  $t$ -й отсчёт сигнала  $g$ .

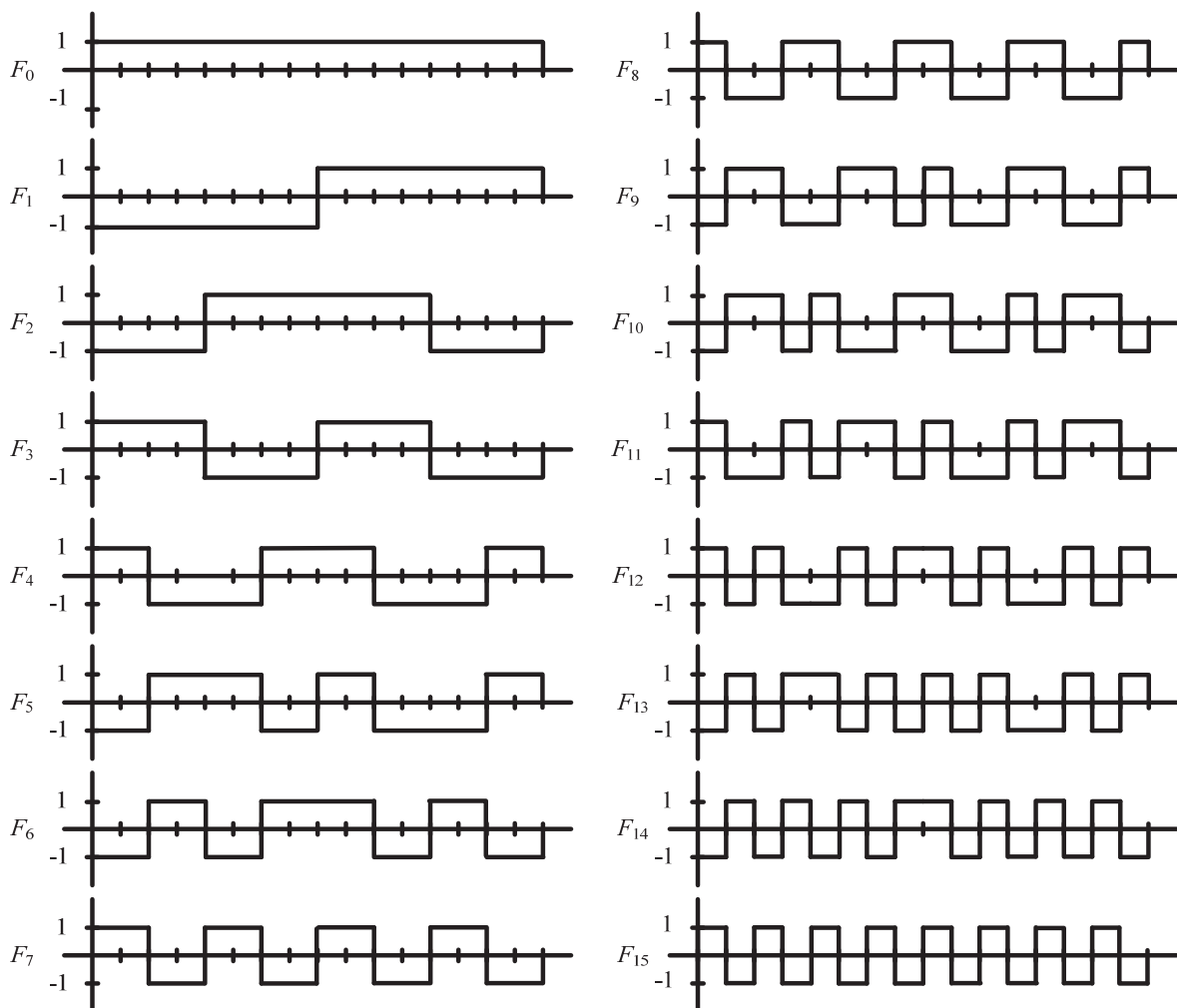


Рис. 1. Используемые фильтры

Формирование признакового описания исходного сигнала заключается в применении к сигналу  $g$  множества фильтров Уолша системы Хармута (рис. 1, показано 16 фильтров):

$$\mu(k, c(t)) = \sum_{i=0}^{M-1} F_k(i) \cdot g(((t-1) \cdot M + 1) : (t \cdot M)),$$

где  $\mu(k, c(t))$  – результат применения множества фильтров Уолша системы Хармута к сигналу  $g$ ;  $k = \overline{0, M-1}$ ;  $t = \overline{0, |c|-1}$ ;  $c = \{1, P, 2 \cdot P, 3 \cdot P, \dots, N - T \cdot P\}$  – множество значений смещений по сигналу  $g$ ,  $|c|$  – мощность множества  $c$ ,  $P$  – величина смещения по сигналу  $g$  ( $1 \leq P \leq M$ ),  $M$  – число используемых фильтров. Таким образом, признаковое описание сигнала представляет собой матрицу размером  $M \times |c|$ , причём каждая строка признакового описания представляет собой результат  $U$ -преобразования сегмента сигнала.

Последовательное применение к сигналу  $Q$ -преобразования и системы фильтров реализуют  $U$ -преобразование, являющееся базовым в теории активного восприятия.  $U$ -преобразование имеет минимально возможную вычислительную сложность, поскольку при его реализации используются простейшие операции – сложение и вычитание. Стандартные преобразования требуют реализации свертки, а на уровне весовых коэффициентов – операции арифметического умножения.

Теория активного восприятия не ограничивается только формированием спектрального представления сигнала. В состав теории входит раздел «Алгебра групп», посвящённый анализу зависимостей между спектральными коэффициентами разложения. Обнаруженные зависимости допускают своё использование на этапах принятия решения и понимания анализируемого сигнала. Пусть каждому фильтру  $F_i \in \{F_i\} \equiv F$  соответствует координатно-определенный бинарный оператор  $V_i \in \{V_i\} \equiv V$ ; тогда компоненте  $\mu_{i \neq 0}$  вектора  $\mu$  допустимо поставить в соответствие оператор  $V_i$  либо  $\bar{V}_i$  (в зависимости от знака компоненты). В результате вектору  $\mu$  ставится в соответствие подмножество операторов из  $\{V_i\}$ , имеющих аналогичную фильтрам конструкцию, но разное значение элементов матрицы ( $+1 \leftrightarrow 1$ ;  $-1 \leftrightarrow 0$ ). Задавая на множестве  $\{V_i\}$  операции теоретико-множественного умножения и сложения, имеем алгебру описания изображения в двумерных булевых функциях. С учётом инверсий всего существует 15 операторов, которые могут использоваться при формировании признакового описания, так как оператор  $V_0$  принимает только прямое значение.

На множестве операторов формируется алгебра групп (этап синтеза) анализируемого сигнала:

- семейство алгебраических структур (названных полными группами)  $\{P_{ni}\}$  вида  $P_{ni} = \{V_i, V_j, V_k\}$  мощности 35;
- семейство алгебраических структур (названных замкнутыми группами)  $\{P_{si}\}$  вида  $P_{si} = \{V_i, V_j, V_k, V_r\}$  мощности 105, где каждая группа образована из пары определенным образом связанных полных групп.

Среди полных групп выделяют полные группы на операции сложения и на операции умножения, среди замкнутых групп – замкнутые группы и замкнутые множества.

Две группы (полные или замкнутые) называются несовместными, если в их состав входят операторы с одинаковыми номерами, но с разными знаками.

С помощью замкнутых и полных групп выполняется спектрально-корреляционный анализ. Полные группы позволяют выявить корреляционные связи между операторами, замкнутые – выявить корреляционные связи между полными группами. Если множество операторов – алфавит, то множества групп – более сложные грамматические описания наблюдаемого сигнала: полная группа – слово, замкнутая группа – словосочетание.

Используя спектральное представление сигнала  $\mu$ , формируется множество операторов, описывающих данный сигнал, а затем множества полных и замкнутых групп:

$$V = GV[\mu], P_{na} = GP_{na}[\mu, V], P_{nm} = GP_{nm}[\mu, V],$$

$$P_s = GP_s[\mu, V, P_{na}, P_{nm}], P_c = GP_c[\mu, V, P_{na}, P_{nm}],$$

где  $GV$  – оператор вычисления по спектральному представлению сигнала признакового описания  $V$  на основе операторов;  $GP_{na}$  ( $GP_{nm}$ ) – на основе полных групп на операции сложения  $P_{na}$  (умножения,  $P_{nm}$ );  $GP_c$  ( $GP_s$ ) – на основе замкнутых групп  $P_s$  (замкнутых множеств,  $P_c$ ).

## 1.2. Реализация этапов системы распознавания

Используя признаковые описания, можно получить интегрированные признаковые описания в виде гистограмм частоты появления операторов, полных и замкнутых групп (двумерные, трёхмерные):

$$h_V = H[V, \Gamma], h_{na} = H[P_{na}, \Gamma], h_{nm} = H[P_{nm}, \Gamma], h_s = H[P_s, \Gamma], h_c = H[P_c, \Gamma],$$

где  $h_V$  – гистограмма операторов;  $h_{na}$  ( $h_{nm}$ ) – гистограмма полных групп на операции сложения (умножения);  $h_s$  ( $h_c$ ) – гистограмма замкнутых множеств (замкнутых групп);  $\Gamma$  – размерность гистограммы:  $1d$  – одномерная гистограмма;  $2d$  – двумерная гистограмма;  $3d$  – трёхмерная гистограмма. В двумерной гистограмме учитываются возможные появления пар групп в описании одного сегмента сигнала, в трёхмерной – троек.

В табл. 1 приведена оценка размерности предлагаемых интегрированных признаковых описаний (размерности приведены с учётом возможных инверсий операторов, включённых в полные и замкнутые группы).

Таблица 1

Размерность систем признаков

Система признаков / Размерность	$1d$	$2d$	$3d$
$h_V$	$1 \times 30$	$30 \times 30$	$30 \times 30 \times 30$
$h_{na}(h_{nm})$	$1 \times 140$	$140 \times 140$	$140 \times 140 \times 140$
$h_s(h_c)$	$1 \times 840$	$840 \times 840$	$840 \times 840 \times 840$

При увеличении размерности предложенных систем признаков количество признаков растёт как показательная функция. В связи с этим было принято решение ограничиться только двумерными гистограммами групп и трёхмерной гистограммой операторов. Двумерные гистограммы, представляющие собой матрицы, обладают следующими свойствами:

- нулевой главной диагональю;
- симметрией относительно главной диагонали.

Таким образом, число незначащих элементов в двумерной гистограмме составляет  $(H_{dim} \cdot H_{dim} - H_{dim}) / 2$ , где  $H_{dim}$  – число столбцов (строк) матрицы.

Таблица 2

Оценка размерности систем признаков до и после сжатия

Система признаков / Размерность	До сжатия			После сжатия		
	$1d$	$2d$	$3d$	$1d$	$2d$	$3d$
$h_V$	$1 \times 30$	$30 \times 30$	$30 \times 30 \times 30$	-	$1 \times 435$ (2,06)	-
$h_{na}(h_{nm})$	$1 \times 140$	$140 \times 140$	$140 \times 140 \times 140$	-	$1 \times 5050$ (3,88)	-
$h_s(h_c)$	$1 \times 840$	$840 \times 840$	$840 \times 840 \times 840$	-	$1 \times 106030$ (6,65)	-

Учитывая несовместность некоторых полных и замкнутых групп возможно сокращение размерности предложенных систем признаков. Сжатие с учётом несовместности возможно только для гистограмм размерностью больше или равных двум. Размерности систем признаков на основе гистограмм показаны в табл. 2. В скобках указан коэффициент сжатия, рассчитываемый как отношение числа признаков до сжатия к числу признаков после сжатия.

Схема формирования интегрированных признаков описаний показана на рис. 2.

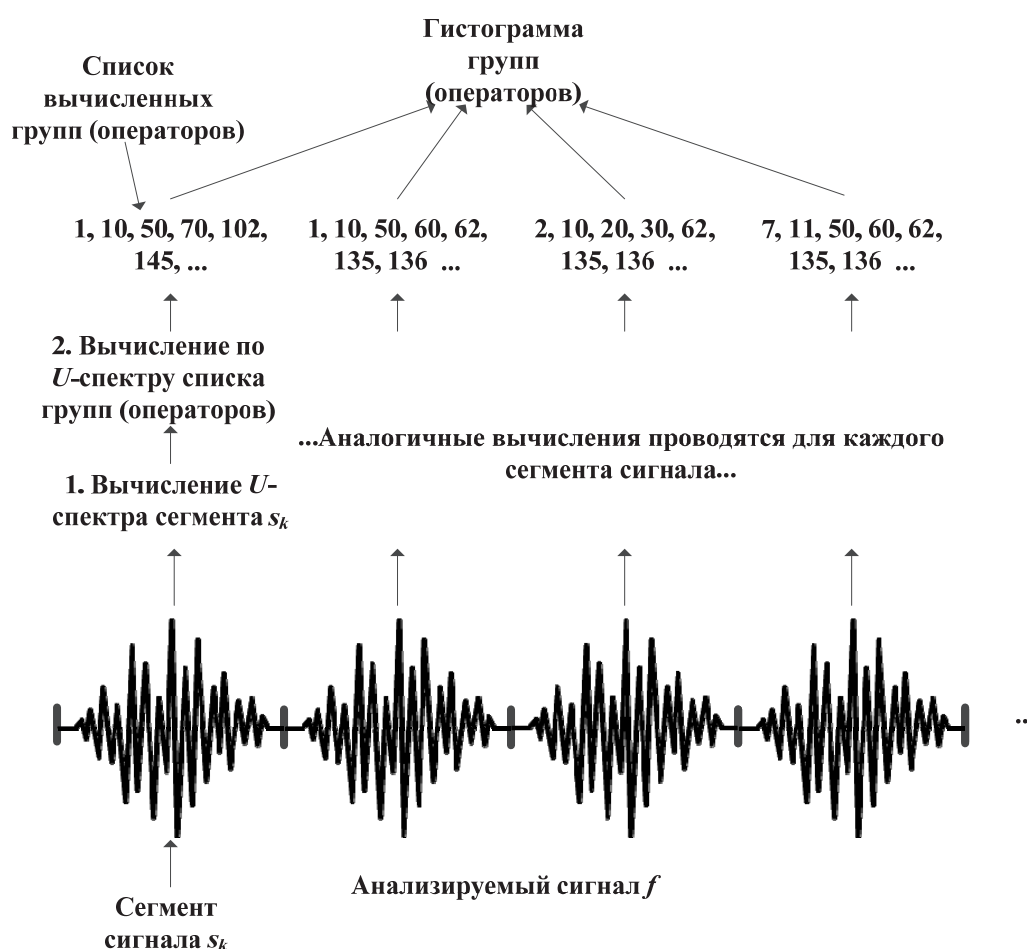


Рис. 2. Схема формирования системы признаков

## 2. Реализация рекомендательной системы подбора аудиозаписей

С развитием глобальных сетей большое распространение получили социальные сети. Такие сайты содержат множество мультимедийной информации (музыка, видео, изображения). Но так как поток информации слишком большой, пользователям обычно сложно найти что-то интересное именно для них. Чтобы помочь людям с этой проблемой и были созданы рекомендательные системы. Их задача заключается в прогнозировании того, какой контент будет интересен человеку, имея информацию о его профиле. Множество социальных сетей уже имеют рекомендательные системы, например, Яндекс музыка, AppleMusic, Вконтакте. Все они работают по схожему принципу. В них применяется метод коллаборативной фильтрации - в этом методе оценивается поведение пользователей в прошлом: их оценки той или иной музыки, покупки и частота прослушиваний тех или иных треков. Система сравнивает профили всех пользователей. Это делается для выявления людей со схожими музыкальными предпочтениями: что нравится одному, может понравиться и другому [4]. Однако системы такого рода не лишены недостатков, основным из которых является «холодный старт», т.е. когда рекомендательная система только начинает свою работы и пользователи еще не успели совершить достаточно действий, результат работы системы будет посредственным, так как ей не на чем основывать свои рекомендации.

Описанная далее система построена на принципе фильтрации содержимого – признаки для рекомендации выстраиваются не на основе действий пользователей, а на признаках, содержащихся в контенте. Это позволяет избежать проблемы «холодного старта», так как нет необходимости ожидать действий пользователей для генерации рекомендаций. В качест-



ве признака в такой системе выступает эмоциональный отклик. То есть в качестве признаков классификации в данной системе выступают эмоции, которые музыка вызывает у людей. Такая система позволяет иначе оценивать контент и давать рекомендации, которые классические системы не могут дать.

Так как центральной функцией системы является получение эмоционального состава аудиозаписей, в данном случае она рассматривается с точки зрения системного подхода. Задача состоит из этапов предварительной обработки сигналов, вычисления признаков и классификации. Для этапов предварительной обработки сигнала и формирования системы признаков было решено использовать теорию активного восприятия, а для этапа классификации – метод опорных векторов. Метод опорных векторов – алгоритм для классификации, основанный на обучении с учителем. Идея метода состоит в переводе исходных векторов в пространство более высокой размерности и поиск разделяющей гиперплоскости с максимальным зазором в этом пространстве [5].

Классификатор SVM необходимо обучить перед использованием, таким образом, было принято решение сделать его обучение в виде отдельной программы и сохранять созданный ей классификатор.

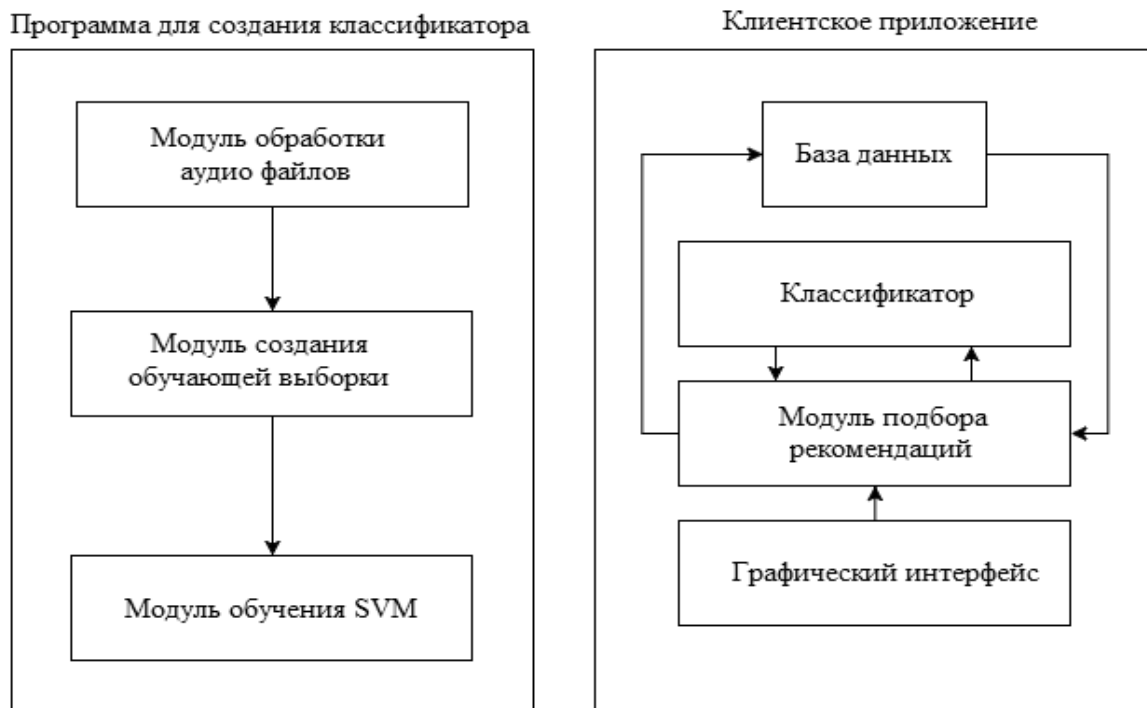


Рис. 3. Структура приложения

В качестве входных данных программа использует заранее подготовленный набор файлов, разбитых по пяти разным эмоциям, которые они вызывают. Далее программа открывает каждый файл, делит его на 10 частей, продолжительностью по 5 с и над каждой из частей производит операции  $U$ -преобразования, вычисления замкнутых групп на основе  $U$ -преобразования и добавления полученных признаков в общий массив. Далее необходимо обучить используемый классификатор с помощью полученной выборки.

Основная задача клиентского приложения – получить от пользователя аудиозаписи, вычислить их эмоциональный состав и найти в базе данных похожие записи. Таким образом, его алгоритм работы следующий:

1. Получение признаков из файла, полученного из графического интерфейса – файл подвергается такой же обработке, как и при создании классификатора (файл делится на 10 частей, выполняется  $U$ -преобразование, высчитываются закрытые группы);

2. Подключение классификатора – программа загружает заранее подготовленный в первом приложении классификатор для использования;

3. Признаки, полученные на первом этапе, передаются в классификатор. В итоге получаем эмоциональный состав этой аудиозаписи;

4. В базе данных происходит поиск наиболее похожих по эмоциональному составу записей с той, которую передал пользователь. Получаем список записей, рекомендованных пользователю, которые передаем в графический интерфейс;

5. Состав текущей записи добавляется в базу данных, чтобы она могла быть рекомендована в дальнейшем.

Для экспериментальной оценки эффективности системы был использован следующий метод: была создана тестовая подборка аудиозаписей, для которых были заранее определены классы. В данном случае подборка состояла из 25 музыкальных файлов – по пять файлов на каждый класс. Эти файлы были переданы в обученный классификатор. Далее в полученном эмоциональном составе для каждой записи выбиралась доминирующая эмоция, она сравнивалась с заранее заданным классом – если они равны, то система определила класс верно. Для тестовой выборки классы 19 из 25 файлы были определены верно.

### 3. Реализация идентификации пола диктора по голосу

Задача идентификации пола диктора по голосу – одна из подзадач актуальной в последнее время проблемы идентификации личности человека по физиологическим особенностям его голоса. Решение этой проблемы применимо в различных системах, связанных с распознаванием речи. В задачу идентификации личности входит оценка возраста диктора, его эмоционального состояния, среднего тона голоса и т. д. Применение задачи идентификации личности по голосу в системах, реализующих перевод речи в текст или распознавание голосовых команд, необходимо для устранения ошибок распознавания, причиной которых являются не учтенные заранее физиологические особенности голоса говорящего. Если в подобные системы добавить модуль, реализующий так называемую настройку на диктора, который перед началом основной работы выполнит анализ особенностей речи говорящего, это позволит значительно снизить вероятность ошибки системы, при этом практически не затронув её производительность.

В связи с изложенным, возникла идея создания программной системы, позволяющей определить пол диктора на основе физиологических характеристик речи, что станет первым шагом к решению проблемы неустойчивости систем распознавания, обусловленной отсутствием привязки речи к типу голоса диктора.

На данный момент существует несколько методов, с помощью которых решается аналогичная задача, к примеру, метод Парзена - распознавание пола диктора в пространстве параметров модели голосового источника, найденных путем решения обратной задачи; метод гауссовых смесей, основанный на моделировании плотности распределения вектора акустических признаков голоса взвешенной суммой нескольких гауссовских распределений; метод, основанный на решении обратной задачи относительно динамики площади голосовой щели и формы импульса объемной скорости потока через голосовую щель.

В данной работе для решения задачи идентификации пола диктора были использованы методы теории активного восприятия.

Алгоритм, основанный на применении теории активного восприятия, включает три этапа:

- 1) этап предварительной обработки сигнала (формирование исходного описания сигнала);
- 2) формирование системы признаков сигнала;
- 3) этап классификации сигнала на основе системы признаков.

Третий этап – классификация, выполненная на основе полученной системы признаков, осуществляется путем использования существующих классификаторов, вариации которых могут влиять на точность конечных результатов. В данной работе для получения срав-

нительных данных будут использоваться два классификатора: svm, основанный на методе опорных векторов, и knn, основанный на методе  $k$  ближайших соседей.

Метод опорных векторов был упомянут ранее, что касается knn, его идея заключается в вычислении некоторого заданного количества  $k$  ближайших соседей этого объекта (объектов, классы которых уже известны), тогда класс исходного объекта определяется тем, какой класс наиболее многочислен среди этих соседей.

В ходе тестирования программной системы, созданной на основе перечисленных методов и алгоритмов, были получены следующие результаты:

1. Для классификатора svm при значении параметров  $cost = 5000$  (цена нарушения ограничений) и  $gamma = 0,0005$  (параметр, определяющий насколько мало влияние одного тренировочного объекта на результат классифицирования) и при проведении тестирования на массиве из 32 тестовых записей результат оказался следующим: для класса Female было угадано 13 из 16 записей, для класса Male - 16 из 16. В общем получается, что количество успешно распознанных записей - 29 из 32, а это 90,6%.

2. Для классификатора knn при значении  $k = 7$  при проведении тестирования на массиве из 32 тестовых записей результат следующий: для класса Female было угадано 12 из 16 записей, для класса Male - 13 из 16. В общем получается, что количество угаданных записей - 26 из 32, а это 81,25% (результат хуже, чем у svm).

Для сравнения, распознавание пола диктора с помощью метода Парзена даёт результат до 97%, распознавание пола на основе решения обратной задачи относительно динамики площади голосовой щели и модели одномерного потока через голосовую щель даёт результат до 94,7% точности для распознавания мужского голоса, и до 97,6% - для распознавания женского; использование метода на основе моделирования акустических параметров голоса гауссовыми смесями даёт точность до 91%. Таким образом разработанный алгоритм при использовании для классификации метода опорных векторов даёт сравнительный с другими системами результат при использовании относительно небольшого количества обучающих записей.

### Заключение

В приведенных работах рассмотрены методы анализа информации, заключенной в звуковых записях. Решение задач выполнялось с позиции теории активного восприятия. Методы были реализованы программно и протестированы.

Полученные результаты вычислительных экспериментов подтверждают эффективность предложенных методов. Созданные системы могут быть использованы во многих сферах применения, также они имеют потенциал для дальнейшего развития.

### Библиографический список

1. Nwe, T. L. Speech emotion recognition using hidden Markov models / T. L. Nwe, S. W.Foo, L. C. De Silva // *Speech communication*. – 2003. – V. 41. – № 4. – P. 603–623.
2. Perez-Meana H. (ed.). *Advances in Audio and Speech Signal Processing: Technologies and Applications: Technologies and Applications* // Igi Global, 2007, Ch. 13. – P. 374.
3. Utrobin, V. A. Physical interpretation of the elements of image algebra // *J. Advances in Physical Sciences*. – 2004. – № 47. – P. 1017–1032.
4. Как это работает? Рекомендации в Яндекс. Музыке. URL: <https://yandex.ru/blog/company/92883>
5. Машина опорных векторов. URL: <http://www.machinelearning.ru/wiki/index.php?title=SVM>
6. Гай, В.Е. Информационный подход к описанию звукового сигнала // *Труды МФТИ*. – 2014. – Т. 6. – № 2. – С. 167–173.
7. Гай, В.Е. Оценка эмоционального состояния человека по голосу с позиций теории активного восприятия / В.Е. Гай [и др.] // *Системы управления и информационные технологии*. – 2015. – №1.1 (59). – С. 118–122.
8. Вапник, В.Н. Восстановление зависимостей по эмпирическим данным / В.Н. Вапник. – М.: Наука, 1979. – 448 с.

9. **Hastie, T.** The Elements of Statistical Learning, 2nd edition / T. Hastie, R. Tibshirani, J. Friedman // Springer. – 2009. – P. 533.
10. Прикладная статистика: классификация и снижение размерности / С.А. Айвазян [и др.]. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 198 с.

*Дата поступления  
в редакцию 01.06.2017*

**V. E. Gai, I. A. Presnyakov, M. I. Arabaji,  
M. O. Derbasov, I. V. Polyakov, E. N. Vikulova**

## **THE ANALYSIS OF AUDIO RECORDINGS FROM THE STANDPOINT OF THE THEORY OF ACTIVE PERCEPTION**

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

**Purpose:** New approaches to the analysis of sound signals from the standpoint of the theory of active perception are offered. They allow increasing the accuracy and reducing the computational complexity of methods of pattern recognition.

**Methodology:** Using the U-transformation and the algebra of groups from the theory of active perception, allows achieving the objectives. The work offers methods for solving the task of assessing the sex of speaker by voice and for solving the task of searching for similar music.

**Findings/Research implications:** The methods described in the work can find practical application in security systems and in various advisory systems.

**Value:** The problems of automation of the analysis of sound recordings are considered. The results of computational experiments indicate the effectiveness of the proposed approaches.

*Key words:* pattern recognition, machine learning, theory of active perception, audio recordings, sound signals, speaker identification, system of recommendations.



## УДК 513.015.2

В.М. Галкин<sup>1</sup>, М.Е. Елисеев<sup>1</sup>, М.Е. Сангалова<sup>2</sup>

## К изоморфизму конечной плоскости Холла и плоскости Андре

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>1</sup>,  
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского<sup>2</sup>

Известно, что конечная проективная плоскость Холла является в то же время и плоскостью Андре. Однако в литературе доказательство этого факта дается неконструктивно. В данной статье изоморфизм плоскостей строится явным образом, то есть указывается конкретное отображение точек и прямых одной плоскости в точки и прямые другой.

*Ключевые слова:* конечная проективная плоскость, плоскость Холла, плоскость Андре, изоморфизм проективных плоскостей, квазиполе.

1. Плоскости Холла относятся к классу так называемых плоскостей трансляций. Это простейший класс плоскостей, дающий примеры недезарговых плоскостей. Простейший в том смысле, что соответствующие плоскости обладают достаточно большими группами коллинеаций. Более точно, группа коллинеаций действует транзитивно на множестве точек вне некоторой прямой – несобственной или «бесконечно удаленной».

Плоскость трансляций конструируется исходя из алгебраической системы  $R(+, \cdot)$ , называемой квазиполем (Холл в [1] использует термин – система Веблена-Веддербарна). Аксиомы квазиполя являются ослабленным вариантом аксиоматики поля. Именно в  $R$  требуется выполнение следующих аксиом ([1], [2]):

- 1)  $R(+)$  – абелева группа с нейтральным элементом 0;
- 2)  $R \setminus \{0\}$  – лупа с единицей относительно операции  $(\cdot)$ ;
- 3) в  $R$  выполняется односторонняя (для определенности левая) дистрибутивность  $a \cdot (b+c) = ab+ac$ ;
- 4) уравнение  $ax+by=c$  имеет единственное решение  $x$  при  $a \neq b$ .

Само построение плоскости производится тем же путем, что и построение дезарговой плоскости над полем. Аффинная часть плоскости состоит из точек  $(x,y)$  с координатами из  $R$ . Из них komponуются прямые  $L_a = \{(a,y)\}$  и  $L_{m,b} = \{(x,y) | y = m \cdot x + b\}$ . Проективное пополнение аффинной плоскости вводит несобственную прямую  $L_\infty$ , состоящую из точек  $(\infty)$  и  $(m)$ . Аффинная прямая дополняется точкой  $(\infty)$ , а  $L_{m,b}$  – точкой  $(m)$ . Аксиома 4 обеспечивает выполнение аксиом инцидентности в плоскости.

Холл [1], [3] предлагает пример квазиполя исходя из поля  $k$  и неприводимого над  $k$  многочлена  $f(x) = x^2 - rx - s$ . Элементами  $R$  являются пары  $(x, y)$  с  $x, y \in k$  с обычным сложением. Умножение же дается формулами

$$(a, b) \cdot (x, y) = \begin{cases} (ax, ay), & \text{если } b = 0, \\ (ax - b^{-1}yf(a), bx - ay + sy) & \text{при } b \neq 0. \end{cases}$$

Нетрудно согласиться с тем, что этот пример появляется как *deus ex machina* и что желательно иметь прозрачное объяснение происхождения этой конструкции.

Заслуживает рассмотрения еще одно обстоятельство, связанное с плоскостями Холла. Имеется класс плоскостей трансляций более общий, чем класс плоскостей Холла. Это так называемые плоскости Андре. В конце книги [1] доказывается, что плоскость Холла является в то же время плоскостью Андре. Доказательство использует довольно сложную процедуру, называемую деривацией (derivation) и неконструктивно. Желательно иметь прямое доказа-

тельство изоморфизма соответствующих плоскостей. Далее обсуждаются оба поставленных вопроса.

2. Успех в построении Холлом его плоскостей можно объяснить следующей причиной. В группе  $GL_2(k)$  - группе обратимых преобразований двумерного векторного пространства  $V$  над полем  $k$  - имеются классы сопряженности, чьи элементы некоторым стандартным способом можно биективно отобразить на элементы из  $K/k$ , где  $K$  - квадратичное расширение поля  $k$ . Таковым классом является класс, характеристический многочлен которого неприводим над  $k$ . Отметим необходимые в дальнейшем свойства класса  $H$  с неприводимым характеристическим многочленом  $f(x)=x^2-rx-s$ .

#### Предложение 1

1. Если  $T \in GL_2(k)$  имеет  $f(x)$  характеристическим многочленом, то  $T \in H$ .
2. Для  $T \in H$  и ненулевого вектора  $v$  векторы  $v$  и  $T(v)$  линейно независимы.
3.  $T \in H$  однозначно определяется значением  $T(v)$  для  $v \neq 0$ .

#### Доказательство

1. Поскольку  $T$  не скаляр, то найдется  $v \in V$  такой, что  $v$  и  $T(v)$  линейно независимы. В базисе  $v, T(v)$  матрица  $T$  имеет вид  $\begin{pmatrix} 0 & s \\ 1 & r \end{pmatrix}$ , т.е.  $T \in H$ .

2. Линейная зависимость  $v$  и  $T(v)$  влечет существование у  $T$  собственного значения из  $k$ , что невозможно.

3. Следует из 1, если взять базис  $v, T(v)$  в  $V$ .

Квазиполе Холла теперь строится следующим образом. В качестве  $V$  берется квадратичное расширение  $K$  поля  $k$ . В  $GL_2(k)$  выбирается класс сопряженных элементов в  $H$ . Квазиполе Холла совпадает как множество с  $K$ , и с тем же сложением, что и в  $K$ . Умножение определяется формулами

$$xy = \begin{cases} xy, & \text{если } x \in k, \\ T_x(y), & \text{если } x \in K \setminus k. \end{cases}$$

где  $T_x \in H$  и индекс  $x$  определяются из равенства  $T_x(1)=x$ . Существование и единственность  $x$  обеспечивается свойством 3 из предложения 1. Выполнение аксиом 1 и 3 очевидно. Выполняется также левое деление, т.е.  $ax = b$  однозначно разрешимо при  $a \neq 0$ .

Уравнение  $xa = b$  при линейно зависимых  $a$  и  $b$  переходит в  $xa=b$  и  $x=b/a \in k$  единственно. При линейно независимых  $a$  и  $b$  существование и единственность  $x$  следует из п.3 предложения 1. Наконец, единицей по умножению в  $R$  является  $1 \in K$ . Обратимся к аксиоме 4.

Здесь надо рассмотреть три случая:  $a, b \in k, b$  (или  $a$ )  $\in k$  и  $a, b \notin k$ . Уравнение  $ax - bx = c$  переписывается как  $ax - bx = c$ ,  $(T_a - b)(x) = c$  или  $(T_a - T_b)(x) = c$ . Существование и единственность  $x$  очевидна в первом случае, следует из обратимости  $T_a - b$  (так как собственные значения  $T_a$  не лежат в  $k$ ) во втором. Обратимость  $T_a - T_b$  в третьем случае следует так же из п.3 предложения 1.

3. Не давая общего определения плоскости Андре (см. [2],[3]), остановимся лишь на частном случае, когда квазиполе строится, как и раньше, по полю  $K \setminus k$ . Пусть  $\theta = (x \rightarrow \bar{x})$  - нетождественный автоморфизм  $K$  над  $k$ . Умножение Андре определяется несколько иначе:

$$x * y = x\theta_x(y),$$

где  $\theta_x = \theta$ , если норма  $Nm(x) = x\bar{x} = 1$ , и тождественен в противном случае.

Для установления изоморфизма между плоскостями обоих типов используем следующее представление преобразования  $T_a$  из предыдущего пункта.

*Предложение 2.*  $T_a(x) = A_ax + B_a\bar{x}$ , где  $B_a = \frac{(a-\lambda)(a-\bar{\lambda})}{a-\bar{a}}$ ,  $A_a = a - B_a$ ,  $\lambda$  и  $\bar{\lambda}$  - корни  $f(x) = x^2 - rx - s$ .

*Доказательство.* Надо проверить, что правая часть представления переводит 1 в  $a$  и

удовлетворяет характеристическому уравнению  $T_a^2 - rT_a - s = 0$ . Первое условие дает  $A_a + B_a = a$ . Второе приводит к равенству

$$A_a(A_ax + B_a\bar{x}) + B_a\overline{(A_ax + B_a\bar{x})} = r(A_ax + B_a\bar{x}) + sx.$$

Оно заведомо выполняется, если совпадают коэффициенты при  $x$  и  $\bar{x}$  в обеих частях. Это дает

$$A_a^2 + B_a\bar{B}_a = rA_a + s, \quad (1)$$

$$A_a + \bar{A}_a = r. \quad (2)$$

Подставляя  $r$  из (2) в (1) и используя  $B_a = a - A_a$ , получаем

$$\bar{a}A_a + a\bar{A}_a = a\bar{a} - s. \quad (3)$$

Вместе с (2) это позволяет найти  $A_a = \frac{a\bar{a} - ra - s}{\bar{a} - a}$  и  $B_a = \frac{a^2 - ra - s}{a - \bar{a}}$ . Выражение для  $B_a$  в формулировке предложения получается из разложения  $f(x)$  на множители.

Перейдем теперь к основному результату этого пункта. Пусть  $P_H$  и  $P_A$  плоскости Холла и Андре, построенные по полю  $K/k$ .

### Предложение 3

Плоскости  $P_H$  и  $P_A$  изоморфны. Изоморфизм задается сопряжением аффинных точек  $(x, y) \in P_H \rightarrow (x', y') \in P_A$ , где  $x = x' - y'$ ,  $y = \lambda x' - \bar{\lambda}y'$ . Соответствие между точками несобственных прямых дается отображением

$$m \rightarrow m' = \begin{cases} \frac{m - \lambda}{m - \bar{\lambda}}, m \in k \\ -\frac{m - \lambda}{\bar{m} - \lambda}, m \in K \setminus k \end{cases}.$$

Точке  $(\infty) \in P_H$  соответствует  $(1) \in P_A$ , а точке  $(\infty') \in P_A$  соответствует точка  $(\bar{\lambda}) \in P_H$ .

### Доказательство

Проверке подлежит соответствие прямых  $y = mx + b \rightarrow y' = m' * x' + b'$ . Отдельно выделяются случаи, когда одна из прямых имеет несобственной точкой  $\infty$ . С них и начнем проверку. Точкам прямой  $x = a$  из  $P_H$  соответствуют точки  $(x', y')$ , для которых  $a = x' - y'$ , т.е. они лежат на прямой  $y' = 1 * x' + b'$  ( $b' = -a$ ) из  $P_A$ .

Точкам же прямой  $x' = a$  из  $P_A$  соответствуют точки  $(x, y) \in P_H$ , для которых

$$x = a - y', y = \lambda a - \bar{\lambda}y', \text{ т.е. } y = \bar{\lambda}x + b = T_{\bar{\lambda}}(x) + b, b = (\lambda - \bar{\lambda})a.$$

Далее для  $m \in k$  точки прямой  $y = m \cdot x + b$  переходят в точки  $(x', y')$ , причем  $m(x' - y') + b = \lambda x' - \bar{\lambda}y'$ , т.е. лежащие на прямой  $y' = \frac{m - \lambda}{m - \bar{\lambda}}x' + b'$ ,  $b' = \frac{b}{m - \bar{\lambda}}$ , что можно переписать в виде  $y' = m' * x' + b'$ .

Несколько длинее производится проверка в случае  $m \notin k, m \neq \bar{\lambda}$ . Здесь  $y = T_m(x) + b$  дает  $\lambda x' - \bar{\lambda}y' = A_mx + B_m\bar{x} + b = A_m(x' - y') + B_m(\bar{x}' - \bar{y}') + b$ , что можно переписать в виде  $(A_m - \bar{\lambda})y' - B_m\bar{x}' + B_m\bar{y}' - (A_m - \lambda)x' = b$ .

Это равенство заведомо выполняется для точек прямой  $y' = m' * x' + b'$ , если положить  $m' = \frac{B_m}{A_m - \bar{\lambda}}$ . Наконец найдем  $b'$  из соотношения

$$(A_m - \bar{\lambda})b' - B_m\bar{b}' = b. \quad (4)$$

Используя выражения для  $A_m = m - B_m$  и  $B_m$  из предложения 2, нетрудно проверить, что  $m' = -\frac{m - \lambda}{\bar{m} - \lambda}$ . Остается выразить  $b'$  через  $b$ . Для этого надо подействовать в (4) автомор-

физмом поля  $K/k$  и получить систему относительно  $b'$  и  $\bar{b}'$

$$\begin{cases} (A_m - \bar{\lambda})b' - B_m\bar{b}' = b, \\ \bar{B}_m b + (A_m - \bar{\lambda})\bar{b}' = \bar{b}. \end{cases} \quad (5)$$

Подсчет ее определителя с учетом равенства  $m' = \frac{B_m}{A_m - \bar{\lambda}}$  показывает, что он отличен от нуля, значит  $b'$  определяется однозначно.

#### Библиографический список

1. Холл, М. Теория групп / М. Холл. – М., 1962.
2. Huges, D. Projective planes / D. Huges, F. Piper // Springer. 1973.
3. Weibel, Ch. Survey of Non-Desargian planes // Notices of the AMS. – 2007. – V. 54. – P. 1299–1303.

Дата поступления  
в редакцию 01.06.2017

V.M. Galkin<sup>1</sup>, M.E. Elyseev<sup>1</sup>, M.E. Sangalova<sup>2</sup>

#### ON THE ISOMORPHISM OF FINITE HOLL PLANE WITH ANDRE PLANE

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev<sup>1</sup>,  
Nizhny Novgorod state university n.a. N.I. Lobachevsky<sup>2</sup>

**Purpose:** In this paper explicitly gives the isomorphism of finite projective Holl plane with Andre plane.

**Design/methodology/approach:** The theory of non-associative structures and theory of finite projective planes is using.

**Findings:** The result is important in the theory of finite projective planes

**Research limitations/implications:** Methods of this paper may be used on the proof of the isomorphism other finite projective planes.

**Originality/value:** The result is new.

*Key words:* finite projective plane, Hall plane, Andre plane, isomorphism of projective planes, quasi field.

УДК 512.54

Л.Н. Ерофеева, С.В. Лещева, Н.В. Мохнина, Н.В. Юрова

О ПРОСТОЙ ГРУППЕ  ${}^2G_2(q)$ 

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева

В статье для исключительной группы лиевского типа  ${}^2G_2(q)$  проверяется выдвинутая в [2] гипотеза о том, что неединичный класс сопряженности в конечной простой неабелевой группе содержит коммутирующие элементы.

*Ключевые слова:* класс сопряженности, конечная группа, коммутирующие элементы, централизатор.

Обоснование гипотезы о существовании коммутирующих элементов в произвольной конечной простой неабелевой группе и частичная ее проверка изложена в [1], [3], [5], [6], [8], [13]. Основной причиной для введения гипотезы являются результаты Л. Н. Ерофеевой в [7] о транзитивности группы трансляций одного класса группоидов.

В предлагаемой статье проведем проверку гипотезы для простой группы  $\text{P}\alpha {}^2G_2(q)$ , где  $q = 3^{2k+1}$ ,  $k \geq 1$ . Сведения о группе  ${}^2G_2(q)$  можно найти в [15], где приведен ряд утверждений о группе  ${}^2G_2(q)$  и таблица характеров. Из таблицы характеров можно восстановить классы сопряженности элементов и соответствующие централизаторы, используя атлас Конвея [14]. Эта информация приводится в табл. 1.

Таблица 1

Классы сопряженности группы  ${}^2G_2(q)$ 

Класс	Порядок элементов класса	Порядок централизатора	Число классов
1	2	3	4
1	1	$q^3(q-1)(q^3+1)$	1
$R^a$	делит $\frac{q-1}{2}$	$q-1$	$\frac{q-3}{4}$
$S^a$	делит $\frac{q+1}{2}$	$q+1$	$\frac{q-3}{8}$
$V^b$	делит $q - \sqrt{3q} + 1$	$q - \sqrt{3q} + 1$	$\frac{q - \sqrt{3q}}{6}$
$W^b$	делит $q + \sqrt{3q} + 1$	$q + \sqrt{3q} + 1$	$\frac{q + \sqrt{3q}}{6}$
$X$	3	$q^3$	1
$Y$	9	$3q$	1
$T$	3	$2q^2$	1
$T^l$	3	$2q^2$	1
$YT$	9	$3q$	1
$YT^l$	9	$3q$	1
$JT$	6	$2q$	1

Окончание табл. 1

$I$	2	3	4
$JT^{-1}$	6	$2q$	1
$JR^a$	делит $q-1$	$q-1$	$\frac{q-3}{4}$
$JS^a$	делит $q+1$	$q+1$	$\frac{q-3}{8}$
$J$	2	$q(q^2-1)$	1

Отметим, что централизатор инволюции  $J$  равен  $C(J) = \langle J \rangle \times L_2(q)$ . Группа проста для  $k \geq 1$  [4, с. 175]. Порядок элементов в классе сопряженности делит порядок централизатора. Например,  $R^a$  – это класс элементов, порядок которых делит  $q-1$ .

Следует заметить, что классы  $R^a, S^a, V^b, W^b, JR^a, JS^a$  – это классы полупростых элементов, т.е. элементов, чьи порядки взаимно просты с характеристикой поля  $q$ . Классы  $X, T, T^{-1}, YT, YT^{-1}$  – это классы унипотентных элементов, т.е. элементов, чьи порядки равны степени  $q$ . В действительности это порядки 3 и 9. Классы  $JT, JT^{-1}$  – классы смешанных элементов. Порядки смешанных элементов имеют в качестве делителя не только  $q$ . Кроме степеней с основанием 3, есть множитель 2.  $J$  – класс инволюций, содержащий элементы второго порядка.

Проверим гипотезу для полупростых элементов. Наличие в полупростых классах коммутирующих элементов следует из теоремы.

**Теорема.** В группе  ${}^2G_2(q)$  полупростой элемент сопряжен со своим обратным.

**Доказательство.** От группы  $G_2(q)$  перейдем в алгебраическую группу  $G$  над алгебраическим замыканием  $F_q$ , и покажем, что в ней полупростой элемент сопряжен со своим обратным. Из [10] известно, что полупростой элемент сопряжен с картановским элементом

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

В диаграмме Дынкина ([12], с.296) имеется пара ортогональных корней  $(\alpha, \gamma)$ . Отражение с помощью  $\omega = \omega_{\alpha}\omega_{\gamma}$ , где  $\alpha \perp \gamma$ ,  $\omega$  – представитель элемента из группы Вейля, переводит элемент вида  $h_{\alpha}(t_{\alpha})$  в  $h_{\omega(\alpha)}(t_{\alpha})$  такой, что  $\omega h_{\alpha}(t_{\alpha})\omega^{-1} = h_{\omega(\alpha)}(t)$ .

Это следует из соотношения  $\omega_{\alpha} h_{\beta}(t)\omega_{\alpha}^{-1} = h_{\omega_{\alpha}(\beta)}(t)$  в формулировке леммы 20 ([10], с. 31).

Отражение, являющееся композицией отражений относительно двух ортогональных корней

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

переводит каждый корень в противоположный:  $h_{\omega(\alpha)}(t_{\alpha}) = h_{-\alpha}(t_{\alpha})$ . Но из соотношения (8) определения 1 ([10], с. 32)  $h_{\alpha}(t)x_{\beta}(u)h_{\alpha}(t^{-1}) = x_{\beta}(t^{\langle \beta, \alpha \rangle}u)$ , следует  $h_{-\alpha}(t_{\alpha}) = h_{\alpha}(t_{\alpha}^{-1})$ .

Таким образом, сопряжение картановского элемента элементом  $\omega$  переводит каждый множитель в  $h$  в обратный:

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

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

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

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

Далее мультипликатор Шура группы  ${}^2G_2(q)$  равен 1 [4]. Теперь воспользуемся результатом из статьи Т.А. Спрингера и Р. Штейнберга из ([11], с. 200), по которому и в группе  ${}^2G_2(q)$  полупростой элемент сопряжен со своим обратным.

Наши рассуждения проходят при  $t \neq t^{-1}$ , когда  $h$  не является инволюцией. Но по Теореме 2.1 из [2] в любой конечной простой группе класс инволюций содержит коммутирующие элементы. Следовательно, это верно и для группы  ${}^2G_2(q)$ . Полупростые классы разобраны.

Перейдем к рассмотрению унипотентных элементов. Централлизаторы любого элемента и его обратного имеют один и тот же порядок. Из таблицы заключаем, что  $X$  и  $X^{-1}$  содержатся в одном классе.

Для остальных классов подобные рассуждения не проходят, так как имеются классы с одинаковым порядком централизатора. Это  $T$  и  $T^{-1}$  (3-элементы);  $Y$ ,  $YT$  и  $YT^{-1}$  (9-элементы). Элементы классов  $T$  и  $T^{-1}$  помещаем в централизатор инволюции  $C(J) = \langle J \rangle \times L_2(q)$ . Точнее, в множитель  $L_2(q)$ , то есть в проективную группу. Но в проективной группе гипотеза верна [2].

Доказательство того, что унипотенты классов  $Y$ ,  $YT$  и  $YT^{-1}$  содержат коммутирующие элементы основано на лемме из [2].

**Лемма.** Пусть  $x$  элемент порядка  $k$  в группе  $\Pi$  и его централизатор  $z(x)$  имеет порядок  $n$ . Если число классов сопряженности элементов порядка  $k$  с централизаторами порядка  $n$  меньше  $\varphi(k)$ , то  $x$  сопряжен с некоторой своей степенью. Здесь  $\varphi(k)$  – теоретико-числовая функция Эйлера.

Заметим, что  $\varphi(9) = 9(1 - \frac{1}{3}) = 6$ , а всего три класса порядка 9. Значит, в каждом классе есть коммутирующие элементы.

При доказательстве гипотезы для смешанных элементов (классы  $JT$ ,  $JT^{-1}$ ) помещаем их в централизатор инволюции, где они имеют вид  $J \times T$  и  $J \times T^{-1}$  соответственно. Поскольку элементы  $T$  сопряжены в проективной группе  $L_2(q)$ , а компоненты на первом множителе совпадают, то элементы будут сопряжены в централизаторе инволюции. Следовательно, элементы из смешанных классов сопряженности коммутируют. Для элемента из смешанного класса найдётся коммутирующий элемент в том же классе.

### Библиографический список

1. Галкин, В.М. Леводистрибутивные квазигруппы: дис. ... д-ра мат. наук. – Горький, 1986.
2. Галкин, В.М. Коммутирующие элементы в классе сопряженности / В.М. Галкин, Л.Н. Ерофеева, С.В. Лещева // Изв. вузов. Математика. – 2016. – № 8. – С. 12–20.
3. Галкин, В.М. О  $\varphi$ -структуре на группах  $E_7(q); E_8(q)$ ;  $q$  – нечетно / В.М. Галкин, Н.М. Мохнина // IV Международная алгебраическая конференция, посвященная 60-летию профессора Ю.И. Мерзлякова: тез. докл. – Новосибирск: Ин-т математики. – 2000. – С. 135–143.
4. Горенштейн, Д. Конечные простые группы. Введение в их классификацию / Д. Горенштейн. – М.: Мир, 1985. – 352 с.
5. Елисеев, М. Е. О  $\varphi$ -структуре на простых ортогональных группах в четной характеристике // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. Математика. – 2004. – № 1 (2). – С. 61–70.
6. Елисеев, М. Е. О некоторых автоморфизмах групп  $E_{7;8}(q)$ ;  $q$  – нечетно // Математический вестник педвузов и университетов Волго-Вятского региона. – 2004. – № 6. – С. 52–56.



7. **Ерофеева, Л.Н.** Об одном классе группшвидов / Л.Н. Ерофеева // Записки научных семинаров ПОМИ 305. – 2003. – 134 с.
8. **Лешева, С.В.** О  $\varphi$ -структуре на ортогональных группах  $O_{2n+1}(q)$ ,  $O_{2n}(q)^\pm$ ;  $q$ - нечетно / С.В. Лешева, Н.М. Мохнина // Международный алгебраический семинар, посвященный 70-летию кафедры Высшей алгебры МГУ: тез. докл. – М.: МГУ. 1999. – С. 38–46.
9. **Мохнина, Н.В.**  $\varphi$ -структура на симплектических и ортогональных конечных группах в нечетной характеристике: дисс. канд. мат. наук. – СПб., 2000. – 230 с.
10. **Стейнберг, Р.** Лекции о группах Шевалле / Р. Стейнберг. – М.: Мир, 1975. – 263 с.
11. Семинар по алгебраическим группам. – М.: Мир, 1973. – 315 с.
12. **Серр, Ж.-П.** Алгебры Ли и группы Ли / Ж.-П. Серр. – М.: Мир, 1969. – 375 с.
13. **Galkin, V.M.** On the  $\varphi$ -structure on the group  $Sp_{2n}(q)$ ;  $q$ -odd / V.M. Galkin, N.V. Mochkina // International Conference dedicated to the 90 th Anniversary of L.S. Pontryagin. August, 31 - September, 6. – М., 1998. – 28 p.
14. **Conway, I.H.** Atlas of finite Groups / I.H. Conway. – Oxford, 1965. – 252 p.
15. **Ward, H. N.** On Ree's series of simple group / H. N. Ward // Trans. Amer. Math.Soc. – 1966. 121. № 1. – P. 62–89.

*Дата поступления  
в редакцию 01.06.2017*

**L.N. Erofeeva, S.V. Leshcheva, N.V. Mokhnina, N.V. Yurova**

### **ABOUT SIMPLEGROUP ${}^2G_2(q)$**

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

**Purpose:** There is the conjecture that every conjugacy class of fin noabelian group contains the commuting elements. The conjecture for Ree group  ${}^2G_2(q)$  is verified.

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

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

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

**Originality/value:** The result is new.

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

УДК 004.045

С.В. Логанов

## ЕЩЕ РАЗ О ПРИНЦИПАХ ПРИМЕНЕНИЯ НАСЛЕДОВАНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Посвящена решению проблемы правомерности и адекватности применения наследования в объектно-ориентированном программировании. Приводится концепция о целях применения наследования и ее отличия от реализации интерфейсов.

*Ключевые слова:* объектно-ориентированное программирование, наследование, множественное наследование, реализация интерфейсов, отношения “Is-A” и “Has-A”.

Нет сомнения, что наследование – это один из основополагающих принципов объектно-ориентированного программирования. В большинстве авторитетных изданий принцип наследования трактуется как способ повторного использования [1, 2, 3], но при этом часто делается множество оговорок о сложности самой концепции наследования. Именно из-за трактовки наследования как способа повторного использования в [4] вводится отрицательное правило наследования, которое отфильтровывает вполне очевидные случаи неприменимости наследования.

Но как только удовлетворяется отрицательное правило наследования, тут же возникает проблема выбора между отношениями «является» и «имеет». В [4] при выборе между этими отношениями рекомендуется использовать правила «изменений» и «полиморфизма», которые не носят всеобъемлющего характера. Правило «изменений» (опять же отрицательное) не рекомендует использовать наследование, если объект может изменять тип во время выполнения. И лишь правило «полиморфизма» рекомендует использование наследования, если «для сущностей возникает потребность присоединения к объектам различных типов». То есть наследование необходимо, когда возникает потребность объединения сущностей и их подтипов в единые списки, массивы и иные структуры, и другого механизма для этого просто не существует. Но получение универсального списка или иной структуры не является самоцелью, а предполагает обход этих структур с выполнением некоторых действий. Таким образом, появляется класс-клиент, которому требуется выполнение таких действий в обобщённом виде, реализуемых сущностями в универсальном списке.

Следовательно, если подойти к наследованию не как к способу повторного использования, а как к объектно-ориентированному механизму реализации вариации поведения, то все противоречия в трактовке наследования исчезают. В [5] также признается, что применение наследования просто для повторного использования, является не самым хорошим способом использования наследования. К этому необходимо добавить, что такое применение существенно ограничивает возможности расширения и модернизации получаемых решений.

Решение, используемое на рис. 1, имеет практически неограниченные возможности по модернизации и расширению поведения, так как легко преобразуется в структуру, показанную на рис. 2, с неограниченными возможностями вариации поведения как по линии класса А, так и В. Решение же, показанное на рис. 3, ограничивается жесткими рамками наследования, в котором модернизация и расширение поведения возможно только добавлением новых потомков, не имеющих возможности удаления методов родителя (что абсолютно правильно).

Применение наследования для многократного использования (для конструирования нового типа) предполагает отсутствие клиента у базового класса или, по крайней мере, отсутствие возможности попадания наследника на место своего родителя, что не гарантирует

ни один объектно-ориентированный язык, и, следовательно, не может быть рекомендовано как хорошая практика программирования.

Однако в [1] считается вполне нормальным использование наследования для конструирования нового типа, при котором возможно нарушение правила «Is-A» (отрицательного правила наследования), но при этом делается оговорка, что «дочерний класс не является специализированной версией родительского класса, так как у нас и в мыслях не будет подставлять представителей дочернего класса туда, где используются представители родительского класса».



Рис. 1. Повторное использование на основе отношения «имеет»

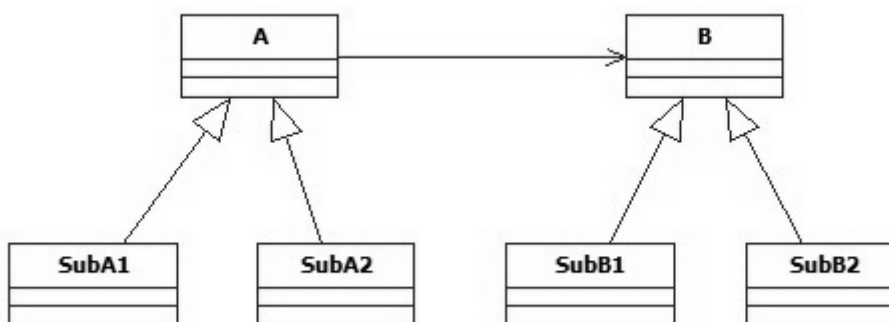


Рис. 2. Реализация вариативного поведения между классами А и В

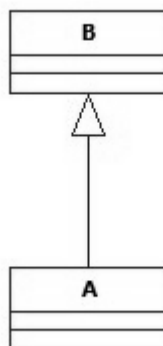


Рис. 3. Повторное использование на основе отношения «является»

Если у разработчика такого класса подобных мыслей и не возникает, то у программистов-клиентов этого класса они по определению будут, так как все они изучали принцип LSV (принцип подстановки Лисков). И сконструированный таким образом класс во многих случаях окажется неработоспособным.

Возможность повторного использования кода без внесения в него каких-либо изменений была основополагающим принципом развития программирования на протяжении многих лет, что привело к появлению объектно-ориентированного программирования. Однако классическим способом повторного использования является закрытое наследование, которое появилось в C++ и не предполагает возможность использования наследника вместо своего родителя. Возможность подстановки потомка вместо своего родителя, имеющаяся в открытом наследовании, дает принципиально иной способ построения кода, который предполагает вариативность поведения обобщенной сущности. Таким образом, и применение открытого наследования должно быть направлено на обеспечение вариативного поведения.

В желании использовать наследование в качестве повторного использования подкупает возможность воспользоваться функциями родителя, не написав ни единой дополнительной строки кода. В то время как использование отношения предполагает написание некоторых функций, делегирующих полномочия соответствующему объекту. Однако, с помощью написания нескольких простых строк для доступа к используемому объекту реализуется инкапсуляция взаимодействия совокупности объектов, позволяющая безболезненно модернизировать их составную функциональность и тем самым обеспечивая адаптированность кода к постоянно изменяющимся требованиям.

Кроме многократного использования, наследование применяют также для программирования отличий и замены типов [5].

Применение наследования для отличий позволяет запрограммировать только отличия между классом потомком и его родительским классом в рамках отношения «Is-A» (рис. 4). Программирование отличий – достаточно мощное средство. Небольшой объем кодирования и повышенная управляемость кода облегчают разработку программной системы. А поскольку в этом случае приходится писать меньше строчек кода, то уменьшается и количество добавляемых ошибок.

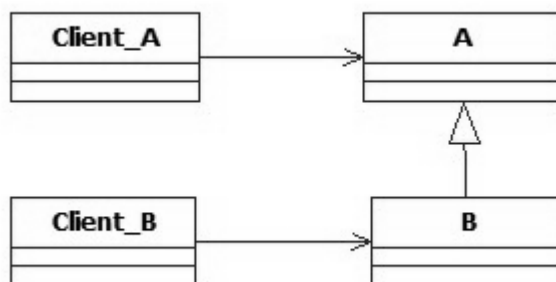


Рис. 4. Наследование класса В для программирования отличий класса А

При этом возможная замена родителя на его потомков не приводит к каким-либо последствиям, так как наследник лишь добавляет новые функции, а клиенты класса А продолжают использовать унаследованный код.

Возможность замены – одно из важных понятий в ООП. Поскольку классу-потомку можно посылать те же сообщения, что и классу родителя, то с классом потомком можно обращаться так, как с его родителем. Именно поэтому нельзя удалять поведение при создании класса-потомка, а можно лишь модернизировать его. Как правило возможность замены используется для сбора объектов базового класса и любых его подтипов в единую коллекцию и посылки им некоторого набора сообщений, которые, как правило, обрабатываются полиморфно (рис. 5).

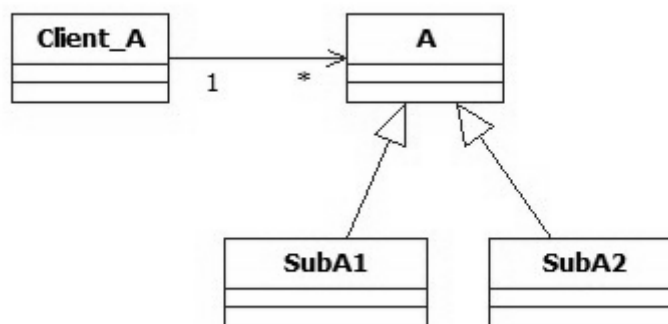


Рис. 5. Наследование для замены типов

Наследование – это обобщение, перевернутое с ног на голову. Умение человека делать обобщение – одна из величайших возможностей человеческого интеллекта, которая позволяет объединить и классифицировать сложное поведение с единых позиций. Отсюда множество примеров для применения наследования имеют биологическую природу. Однако обобщение и классификация выполняются с определенной целью. К. Линней разработал свою систему видов для классификации животных по степени их организации. А использование такой системы обобщения и классификации животных, например, для программы отображения на экране окажется совершенно неприемлемой.

Таким образом, особое значение для построения правильной системы обобщения играет ее цель, которая в ПО идентифицируется классом, использующим вершину иерархии и требующим от нее соответствующей вариативности поведения. Поэтому построение иерархии наследования классов без указания ее клиента приводит к непониманию того, зачем и по каким причинам строится такая иерархия.

Умение правильно использовать наследование заключается в умении адекватно идентифицировать обобщенную абстракцию и определить ее обобщенное поведение, которое может конкретизироваться с помощью ее наследников.

Кроме этого, проблемы классификации, рассмотренные в [4], при наличии класса-клиента вообще не имеют основания, так как нет необходимости притягивать к этому процессу какой-либо чужеродный критерий классификации. Поскольку класс является абстракцией, которая выделяет существенные свойства и отбрасывает несущественные, то наличие класса-клиента однозначно диктует соответствующий критерий классификации для ввода новых наследников в иерархию. Таким образом, класс вершина иерархии является моделью обобщенного представления совокупности объектов, обеспечивающего необходимое сложное поведение для класса-клиента. И согласно принципу единственности ответственности каждый класс этой иерархии должен быть неотъемлемой частью, направленной на поддержание данной модели.

Другими словами, наличие класса-клиента однозначно диктует единственный критерий классификации и нет необходимости сочетать противоречивые требования двух и более, казалось бы, возможных критериев, а следовательно, и не должно быть никаких причин для скрытия некоторых методов у классов наследников.

С другой стороны, добавление нового наследника должно реализовывать дополнительную вариацию поведения построенной обобщенной модели, что вполне согласуется с рекомендациями в [4] и однозначно исключает появление пустых классов наследников.

Замечательным примером создания обобщенной абстракции является проектирование визуального редактора документов в [7]. Очевидно, что документ – это организованное некоторым способом множество графических элементов: символов, линий, многоугольников и других геометрических фигур. Заслуга авторов заключается в том, что они представили эти элементы не в графическом виде, а в терминах физической структуры документа и таким образом построили модель предметной области.

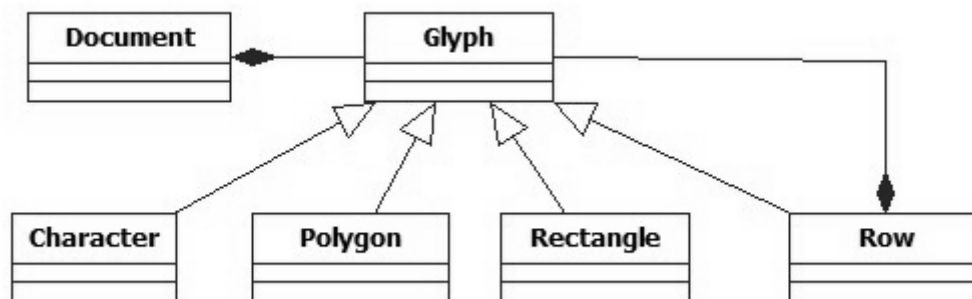


Рис. 6. Структура графического документа

Так появилось обобщенная абстракция в виде глифа, на основе которой строится вся структура документа (рис. 6) и которая обеспечивает неограниченную возможность расширения состава элементов визуального редактора.

Таким образом, документ состоит лишь из множества объектов одного типа, но может иметь сколь угодно сложную структуру, допускающую расширение как за счет введения новых примитивных типов, так и их объединения в более сложные структуры.

В отличие от наследования реализация интерфейса имеет принципиально иное назначение. Реализация интерфейса - это наделение объекта возможностью исполнить некоторую роль, не изменяя при этом своей первоначальной сущности. Например, получая водительское удостоверение, человек получает право стать участником дорожного движения (исполнить роль водителя) на своем автомобиле, но при этом он не становится его составной частью. С точки зрения разработки программного обеспечения исполнение классом некоторой роли позволяет участвовать его объектам в алгоритмах, реализованных в других классах.

Например, глифы графического редактора документа могут быть упорядочены по занимаемой площади (или по какому-либо другому признаку) с помощью реализации интерфейса `ISortable`, который требуется классу, непосредственно выполняющему сортировку. При этом глиф не изменяет своей первоначальной сущности – элемента графического документа. А реализация дополнительного интерфейса `ISortable` лишь позволяет экземплярам глифа стать участниками одного конкретного алгоритма сортировки или же множества алгоритмов, для которых достаточно возможностей, предоставляемых интерфейсом `ISortable`.

Дополнительные проблемы в проектировании объектно-ориентированных программ вызывает использование множественного наследования. Приведем определение множественного наследования из [3]: «Как видно из названия, множественное наследование позволяет тому или иному классу наследовать более чем от одного класса. ... При этом существует много реальных примеров множественного наследования. Родители — хороший пример такого наследования. У каждого ребенка есть два родителя — таков порядок. Поэтому ясно, что вы можете проектировать классы с применением множественного наследования.»

На основании того, что в реальной жизни имеются примеры множественного наследования, делается вывод о возможности применения такого наследования и в программной системе. При этом автор никак не задумывается о кардинально иной сути наследования от двух родителей в реальности и в программировании. Если бы программное наследование использовалось для реального ребенка, то он рождался бы с двумя головами, четырьмя руками и четырьмя ногами. Таким образом реальная суть термина наследования ускользнула от автора и надо признать приведенный пример с двумя родителями крайне неудачным.

Если множественное наследование рассматривать для повторного использования, т.е. когда у базовых классов отсутствуют клиенты (рис. 7), то оно обладает теми же недостатками, что и для одиночного наследования, но умноженными многократно (по количеству линий наследования).

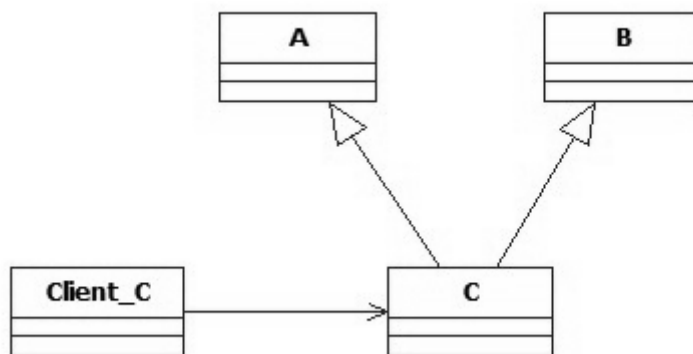
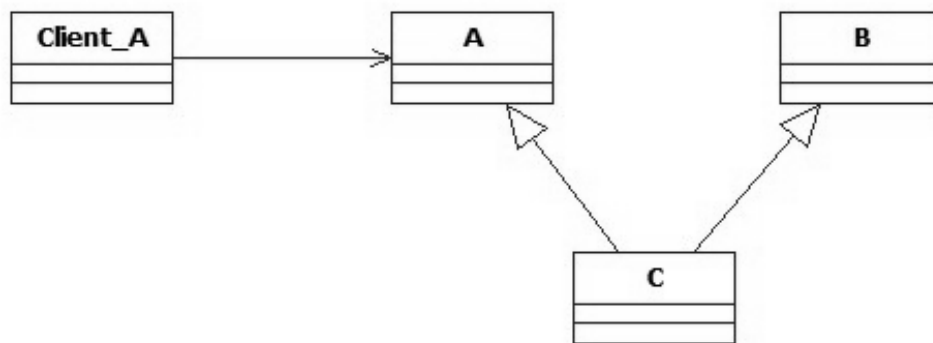


Рис. 7. Множественное наследование для многократного использования



Кроме того, наличие у классов А и В разнородных обязанностей (а иначе они были бы одним классом) приводит к тому, что класс С также обладает разнородными обязанностями и, следовательно, не соответствует принципу единственности ответственности со всеми вытекающими из этого негативными последствиями.

Если множественное наследование рассматривать как механизм реализации обязанности одной ветки наследования за счет другой (рис. 8), то такое использование наследования обедняет возможности поддержки и расширения функциональности всей исходной системы.

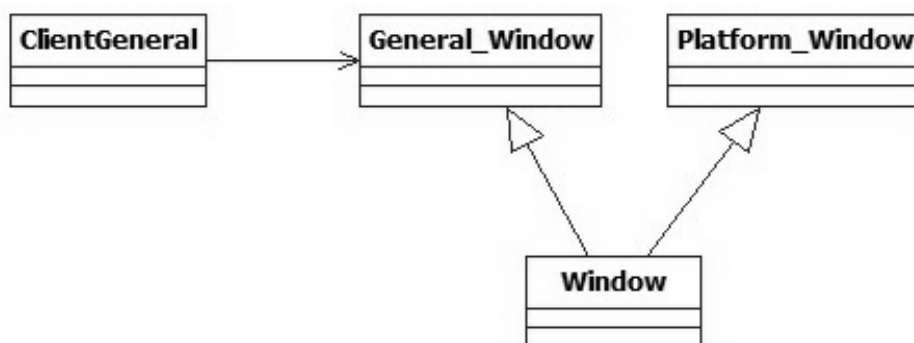


**Рис. 8. Множественное наследование для реализации обязанности одной ветки с помощью другой**

Об этом свидетельствует пример, приведенный в [4] для построения библиотеки Vision. Первый проект библиотеки Vision для платформенно-независимой графики столкнулся с общей проблемой учета зависимости от платформы. Первое решение использовало множественное наследование следующим образом: типичный класс, задающий, например, окна, имел двух родителей - одного, описывающего общие свойства, независимые от платформы, и другого, учитывающего специфику конкретной платформы (рис. 9).

Класс GENERAL\_WINDOW и ему подобные, например GENERAL\_BUTTON, являются отложенными: они выражают все, что может быть сказано о соответствующих графических объектах и применимых операциях без ссылки на особенности графической платформы. Такие классы, как PLATFORM\_WINDOW, обеспечивают связь с графической платформой, например Windows, OS/2 Presentation-Manager или Unix Motif. Они дают доступ к механизмам, специфическим для конкретной платформы.

Такие классы, как WINDOW, комбинируют свойства родителей, реализуя отложенные компоненты GENERAL\_WINDOW механизмами, обеспечиваемыми PLATFORM\_WINDOW.



**Рис. 9. Первоначальное решение для библиотеки Vision**

Класс PLATFORM\_WINDOW (как и другие подобные классы) должен присутствовать в нескольких вариантах - по одному на каждую платформу. Эти идентично именуемые классы могут храниться в различных каталогах, а специальный инструментарий при компиляции выбирает подходящий.

Это решение работает, но его недостаток в том, что понятие WINDOW становится тесно связанным с выбранной платформой. Иначе говоря, окно, став однажды окном Motif, всегда им и останется. Это не слишком печально, поскольку трудно вообразить, что однажды, достигнув почтенного возраста, окно Unix вдруг решит стать окном OS/2. Картина становится менее абсурдной при расширении определения платформы - при включении форматов Postscript или HTML. В этом случае графический объект может изменять представление, становясь то документом печати, то Web-документом.

Чтобы реализовать новое решение для расширенного толкования платформы, необходимо отказаться от наследования класса, представляющего конкретную платформу, и заменить его на клиентское отношение. Что и было сделано в следующей версии библиотеки Vision (рис. 10).

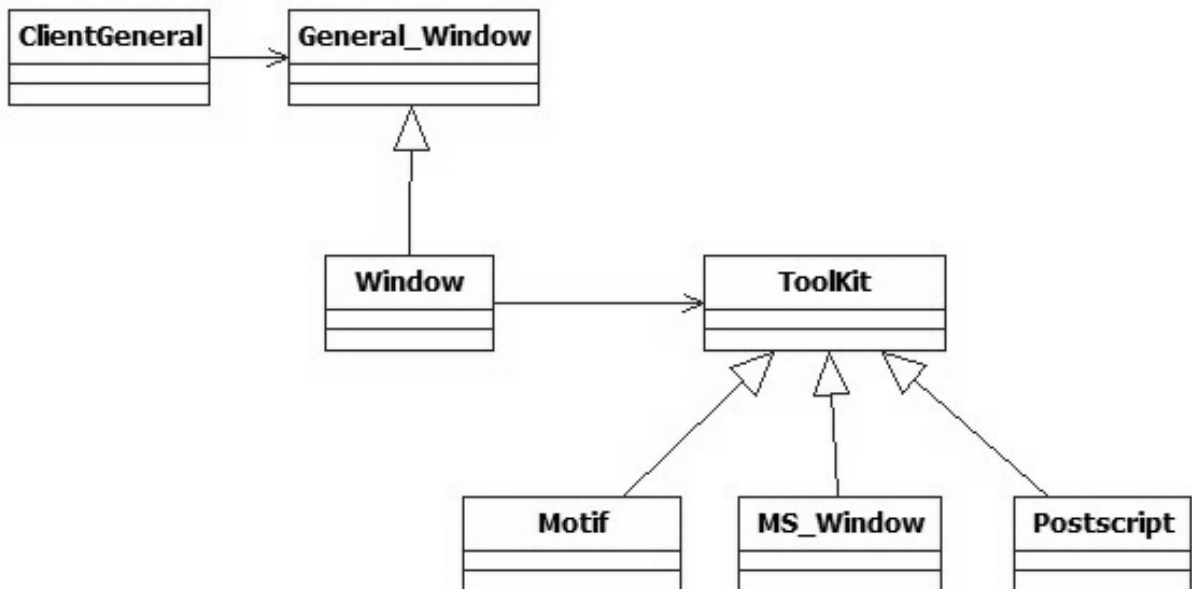


Рис. 10. Новое решение для зависимости от платформы

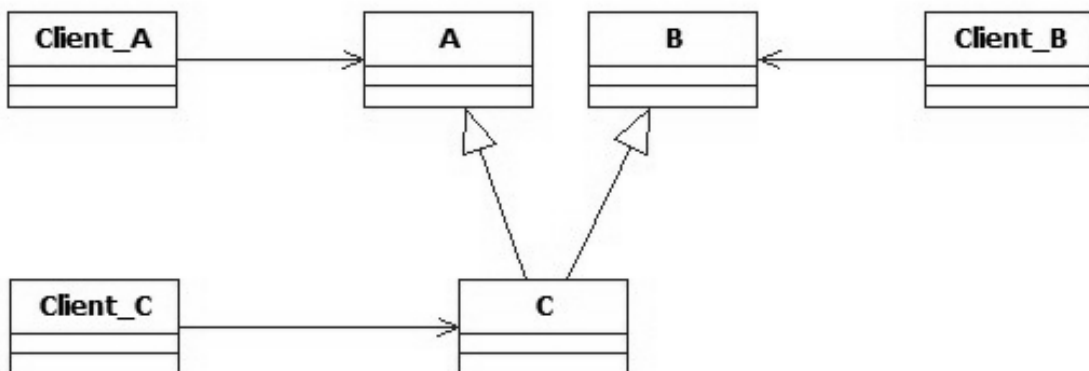


Рис. 11. Применение множественного наследования для отличий



Полученное решение не сложнее с точки зрения объема программирования, чем первоначально принятое решение. Однако, если взамен традиционного использования наследования для повторного использования было бы изначально принято клиентское отношение, то проведенная модернизация не потребовалась бы.

Применение множественного наследования для отличий (рис. 11) также не может считаться хорошей практикой, так как наследник нескольких классов содержит множество линий поведения, нарушая тем самым принцип единственности ответственности и шаблон GRASP высокого зацепления. Как следствие такого нарушения – полученный класс труден для понимания, дальнейшего сопровождения и поддержки.

Использование множественного наследования для полиморфного поведения (рис. 12) возможно, но также нарушает принцип единственности ответственности и шаблон высокого зацепления, так как родительские классы явно выполняют разнородные задачи. Поэтому такое применение множественного наследования не может считаться хорошей практикой. По крайней мере, необходимо разбить класс наследник на несколько классов, каждый из которых реализует собственную линию поведения, а необходимая информация доставляется с помощью клиентского отношения (рис. 13).

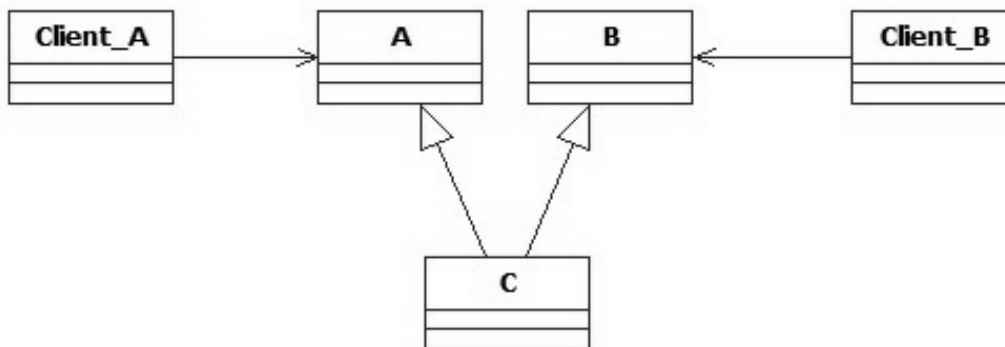


Рис. 12. Использование множественного наследования для полиморфного поведения

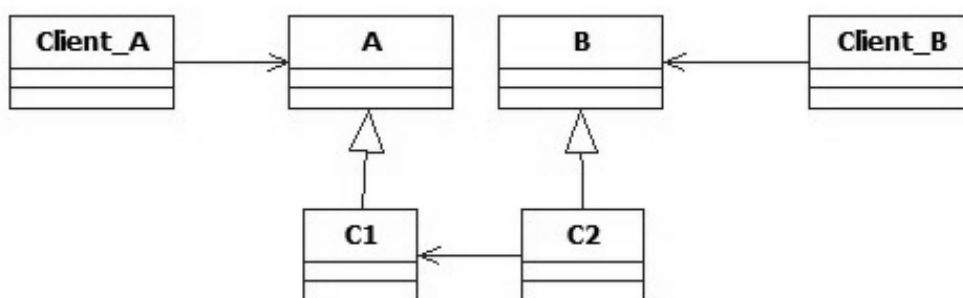


Рис. 13. Разделение наследника на несколько классов

При этом, отказавшись от множественного наследования, классы C1 и C2 будут соответствовать принципу единственности ответственности и шаблону высокого зацепления.

Приведенные рассуждения показывают, что применение множественного наследования не приводит к сколь-нибудь ощутимым преимуществам, а лишь затрудняют ясность понимания и расширения функциональности в процессе поддержки класса наследника. Поэтому в таких современных языках, как Java и C# разработчики отказались от концепции множественного наследования. Таким образом, разработчики современных объектно-

ориентированных языков неявно признали неэффективность, даже вредность, использования концепции множественного наследования, так как потомок множества классов обладает разнородными обязанностями.

Однако множество объектов реальной жизни могут использоваться в роли других объектов, не меняя при этом своей сущности. Например, человек может играть роль гражданина, врача, педагога, водителя, оставаясь человеком. Аналогичную концепцию в объектно-ориентированной программе можно реализовать с помощью использования интерфейсов.

Возможность объекта поучаствовать в нескольких алгоритмах, выполняемых другими объектами, или выступить в роли другого объекта достаточно легко осуществляется с помощью исполнения им требуемых интерфейсов. При этом данный объект не изменяет своей первоначальной сущности и не становится членом других иерархий. Такая возможность приводит к тому, что некоторые объекты могут реализовывать свои функции над любыми объектами, которые выполняют определенные условия, реализуя соответствующий интерфейс. Например, в современных системах нет смысла реализовывать алгоритм сортировки для работников фирмы, достаточно обеспечить объекты данного класса реализацией соответствующего интерфейса. Таким образом существенно расширяются возможности повторного использования.

Возможность любого класса появиться во множестве ролей существенно расширяет его внешний интерфейс, что не очень хорошо для клиентов этого класса и не имеющих к этим интерфейсам никакого отношения. Поэтому в С# существует возможность явной реализации интерфейса, которая позволяет избежать данного недостатка.

### Выводы

Наследование является механизмом реализации обобщенной абстракции, сочетающим совокупность программирования отличий, замены типов с полиморфным поведением, а также использования элементов классификации, обеспечивающих различные виды поведения этой обобщенной абстракции. Наследование не должно применяться просто для повторного использования, так как для этого имеется клиентское отношение, которое не препятствует превращению классов клиентов в обобщенные абстракции с возможностью безболезненного расширения их поведения.

В связи с этим, важное значение приобретает указание клиента обобщенной абстракции, так как именно класс-клиент определяет цели и задачи, реализуемые этой абстракцией, и диктует критерии классификации ее наследников.

Дополнительные действия с объектами, членами иерархии обобщенной абстракции, должны выполняться на основе реализации соответствующих интерфейсов без изменения их первоначальной сущности.

### Библиографический список

1. **Бадд, Т.** Объектно-ориентированное программирование в действии: [пер. с англ.] / Т. Бадд. – 3-е изд. – СПб.: Питер, 1997. – 304 с.
2. **Дейтел, П.** Как программировать на Visual C# 2012: [пер. с англ.] / П. Дейтел, Х. Дейтел. – 5-е изд. – СПб.: Питер, 2014. — 864 с.
3. **Вайсфельд, М.** Объектно-ориентированное мышление: [пер. с англ.] / М.Вайсфельд. – СПб.: Питер, 2014. – 304 с.
4. **Мейер, Б.** Объектно-ориентированное конструирование программных систем: [пер. с англ.] / Б. Мейер. – М.: Русская редакция, 2005. – 768 с.
5. **Синтес, А.** Освой самостоятельно объектно-ориентированное программирование за 21 день: [пер. с англ.] / А. Синтес. – М.: Вильямс, 2002. – 672 с.

6. Ларман, К. Применение UML2.0 и шаблонов проектирования. Введение в объектно-ориентированный анализ и проектирование: учеб. пособие: [пер. с англ.] / К. Ларман. – М.: Вильямс, 2008. – 736 с.
7. Приемы объектно-ориентированного проектирования. Паттерны проектирования / Э. Гамма [и др.]. – СПб.: Питер-ДМК, 2001. – 366 с.

*Дата поступления  
в редакцию 10.08.2017*

**S.V. Loganov**

## **AGAIN ON THE PRINCIPLES OF USING INHERITANCE**

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

**Purpose:** The solution to the problem of the propriety and adequacy of the use of inheritance in object-oriented programming. Is the concept of the purpose of use of inheritance and the difference of inheritance from implementation of interfaces.

**Design/ methodology/ approach:** The use of inheritance for reuse is accompanied by many side effects.

**Findings:** Inheritance should be used for the variable behavior of generalized abstractions. Special value gets the client a generalized abstraction that defines the boundaries of the required functionality of a generalized abstraction.

**Research limitations/implications:** Inheritance is not recommended to use for a reuse, if we are not talking about supporting legacy code.

**Originality/ value:** The use of inheritance for variable behavior of the generalized abstraction eliminates the possibility of errors. Applying the relation of using allows you to safely convert entities to the generalized abstraction.

*Key words:* object-oriented programming, inheritance, multiple inheritance, interfaces implementation, relations “Is-A” and “Has-A”.

УДК 004-942

А.Н. Мошкова<sup>1</sup>, Е.И. Ерлыкина<sup>2</sup>, Е.И. Мурач<sup>2</sup>, Ю.И. Царапкина<sup>1</sup>, Я.Ю. Козлова<sup>1</sup>

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ ПОКАЗАТЕЛЯМИ ГЛИКОЛИЗА МОЗГА В УСЛОВИЯХ ГИПОКСИЧЕСКОГО ПРЕКОНДИЦИОНИРОВАНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева<sup>1</sup>,  
Нижегородская государственная медицинская академия Министерства России<sup>2</sup>

**Цель работы:** Построить модель в виде функции двух факторных переменных  $y(x, z) = f(x, \varphi_0(z), \varphi_1(z))$ , объединяющую эмпирические характеристики нервной ткани экспериментальных животных (глюкозу  $x$ ) и лактата ( $y$ ) в разных условиях гипоксического прекондиционирования  $z$ . Разработать расчетный способ прогнозирования эффективных этапов прекондиционирования, способствующих формированию стойкой адаптации организма животных к тяжелой форме нарушения кислородного режима.

**Методология:** Ранее было установлено, что линейная функция  $y = a_0x + a_1$  хорошо аппроксимирует количественную зависимость показателей гликолиза мозга крыс глюкозы  $x$  и лактата  $y$  при гипоксическом воздействии 310 мм рт. ст. длительностью 60 мин в каждой экспериментальной ситуации (1,4,7,14) и 28 суток гипоксического прекондиционирования. Проведена попытка реконструировать функцию линейной аппроксимации в зависимость вида  $y(x, z) = \varphi_0(z)x + \varphi_1(z)$ , считая  $a_i = \varphi_i(z)$  ( $i = 0,1$ ), где  $z$  – вторая факторная переменная, обозначающая режимы гипоксического прекондиционирования.

**Результаты и область применения:** Построена модель в виде функции двух факторных переменных вида

$$y(x, z) = \left(0,3602 - 0,0766 \cdot \cos\left(\frac{21,9875}{z}\right)\right)x + \left(0,72 + 0,2458 \cdot \cos\left(\frac{22,0122}{z}\right)\right),$$

описывающая количественную зависимость содержания лактата ( $y$ ) от уровня глюкозы ( $x$ ) при переменной  $z$  – режимов гипоксического прекондиционирования. Проведен расчет значений лактата  $y$  при экспериментальных изменениях глюкозы  $x$  в интервале  $(x_{\min}, x_{\max})$  и режимах гипоксического прекондиционирования до 60 дней, выходящих за пределы экспериментального интервала. Машинный эксперимент показал, что стойкое адаптивное состояние к гипоксии животных наступает в интервале от 45 до 60 суток гипоксического прекондиционирования, так как расчетные значения лактата  $y$  попадают в интервал значений интактных животных. Высказано предположение, что оптимальный долгосрочный режим гипоксического прекондиционирования наблюдается на протяжении двух недель в конце второго месяца гипоксического воздействия. Полученные результаты можно рекомендовать при разработке немедикаментозных методов адаптации мозга к тяжелой форме нарушения кислородного режима.

**Вывод:** Полученная модель множественной регрессии, объединяющая показатели гликолиза мозга – лактат  $y$  и глюкозу  $x$  при допустимой длительности гипоксического воздействия  $z$  может быть использована для прогнозирования расчетным способом оптимальных режимов гипоксического прекондиционирования.

*Ключевые слова:* глюкоза, лактат, гипоксическое прекондиционирование, метод наименьших квадратов.

### Введение

При изучении работы некоторых систем или процессов нередко целью исследования является анализ зависимости между количественными показателями, характеризующими их действия в разных условиях внешней среды. В этом случае возникает необходимость восстановления значений "выходных" (результатирующих) показателей объектов исследования, характеризующих поведение или результат их функционирования по так называемым "выходящим" или "объясняющим" переменным. Для решения этой задачи в качестве исходных данных используют измеренные значения показателей системы или процесса, по которым производится предсказание их работы.

Существует два класса задач, изучающих эту зависимость.

**Первый класс.** Вид зависимости (функции), связывающей оба показателя, известен с точностью до параметра. Он определяется, например, физическими законами, связывающи-

ми этих показателей. В этом случае говорят о подборе экспериментальной модели, в условиях которой работает исследуемый объект.

**Второй класс.** О виде функции, связывающей эти показатели, нет никаких априорных сведений, но известна экспериментальная модель, в условиях которой изучается работа данного процесса или явления. Этот случай имеет место в таких науках, как медицина, биология, социология. Тогда говорят о подборе кривой, хорошо объединяющей в некотором смысле показатели  $x$  и  $y$ .

В таких случаях рассматривают некоторый класс функций и из него выбирают функцию, наилучшим образом аппроксимирующую зависимость между экспериментальными данными  $x$  и  $y$ . Для таких процедур характерны две степени произвольности. Это проявляется в выборе класса функций и в критерии наилучшей подгонки, который не связан со статистическими соображениями. При подборе кривой не делают предположений о распределении ошибок измерений переменных, и поэтому в случае использования полученной аппроксимирующей функции для прогнозирования зависимой переменной необходима дополнительная экспериментальная проверка, позволяющая оценить качество прогноза.

### Результаты

Ранее нами была решена задача подбора кривой  $y = f(x, a_0, a_1, \dots, a_k)$  на примере анализа зависимых отношений между экспериментальными характеристиками гликолиза мозга  $(x_i, y_i) (i = 1, 2, \dots, n)$ , где  $x_i$  - показатель глюкозы,  $y_i$  - содержание лактата в мозге интактных животных и животных в условиях разных режимов гипоксического прекондиционирования – 1, 4, 7, 14 и 28-дневного прекондиционирования (6).

В табл. 1 указаны результаты обработки экспериментальных показателей глюкозы ( $x_i$ ), лактата ( $y_i$ ) в разных условиях эксперимента.

Таблица 1

#### Экспериментальные показатели процесса гликолиза мозга лабораторных животных

Условия эксперимента	Глюкоза ( $x_i$ )	Cs, %	Лактат ( $y_i$ )	Cs, %
Интактные животные	4,116±0,020	0,2	1,969±0,030	0,8
1-дневное преконд.	5,824 ±0,088	0,7	2,974 ±0,033	0,5
4-дневное преконд.	4,041 ±0,062	0,8	2,174 ±0,022	0,5
7-дневное преконд.	4,471 ±0,070	0,8	2,191 ±0,038	0,8
14-дневное преконд.	4,281 ±0,053	0,6	2,622 ±0,019	0,4
28-дневное преконд.	4,563 ±0,036	0,8	2,038 ±0,023	0,6

Показатель точности определения средней  $C_S$ , не превышающий 1%, свидетельствует о достаточно точной коррекции экспериментальных данных.

Согласно полученным результатам, было установлено, что из множества элементарных функций вида  $y = a_0x + a_1$ ,  $y = a_0x^2 + a_1x + a_2$ ,  $y = a_0x^3 + a_1x^2 + a_2x + a_3$ ,

$y = a_0 \ln x + a_1$ ,  $y = a_0 x^{a_1}$ ,  $y = a_0 e^{a_1 x}$  наилучшим образом аппроксимировала зависимость между глюкозой  $x$  и лактатом  $y$  линейная  $y = a_0 x + a_1$ .

**Таблица 2**

**Значение коэффициентов аппроксимирующих функций, коэффициентов корреляции  $r_{xy}$  и детерминации  $R^2$  зависимости глюкозы  $x$  и лактата  $y$  в мозге экспериментальных животных**

Условия эксперимента	$a_0$	$a_1$	$R^2$	$r_{xy}$	$r_{xy}^2$
Интактные животные	1,4589	-4,036	0,9541	0,9768	0,9541
1-дневное преконд.	0,3398	0,9945	0,8016	0,8953	0,8016
4-дневное преконд.	0,3046	0,9426	0,7516	0,8670	0,7516
7-дневное преконд.	0,5336	-0,1945	0,9668	0,9832	0,9668
14-дневное преконд.	0,3608	1,0781	0,9765	0,9882	0,9765
28-дневное преконд.	0,3073	0,6358	0,9345	0,9667	0,9345

Согласно представленным данным, близкое к 1, 0 значение  $r_{xy}$ ,  $R^2$  и равенство  $r_{xy}^2 = R^2$  отражает очень тесную форму линейной корреляционной связи между выбранными показателями гликолиза мозга. В табл. 3 указаны расчеты исследуемых показателей по функции  $y = a_0 x + a_1$ .

**Таблица 3**

**Экспериментальные и расчетные содержания лактата в мозге экспериментальных животных в разных условиях гипоксического прекондиционирования**

Условия эксперимента	Глюкоза ( $x_i$ )	Лактат ( $y_i$ )	Линейная аппр.	
			$\bar{y}_{ан}$	$\delta_{отн}, \%$
Интактные животные	4,1158	1,9685	1,9688	0,0085
1-дневное преконд.	5,8236	2,9736	2,9735	0,0170
4-дневное преконд.	4,0413	2,1736	2,1735	0,0235
7-дневное преконд.	4,4712	2,1912	2,1912	0,0103
14-дневное преконд.	4,2808	2,6224	2,6227	0,0261
28-дневное преконд.	4,5635	2,0382	2,0380	0,0005

Относительная ошибка расчета  $\delta_{отн} < 1\%$ , что свидетельствует о соответствии функции  $y = a_0 x + a_1$  поставленной задаче «Подбор кривой». Анализ числовых значений пара-

метров  $a_0, a_1$  показал, что они меняются от условий гипоксического воздействия и могут рассматриваться как функции нового аргумента  $z$  - экспозиции гипоксического прекондиционирования.

Возникает задача создания математической модели, описывающей соотношение показателей гликолиза мозга в любых условиях эксперимента, следующей формулировки.

Дано:

$x_1, x_2, \dots, x_n$  - наблюдаемые показатели независимой переменной  $x$ ;

$y_1, y_2, \dots, y_n$  - наблюдаемые показатели независимой переменной  $y$ ;

1)  $x, y$  - случайные величины, детерминировано связанные между собой одинаковой экспериментальной ситуацией;

2)  $y = f(x, a_0, a_1, \dots, a_k)$  - функция независимой переменной  $x$  и  $k$  параметров  $a_0, a_1, \dots, a_k$ , наилучшим образом связывающая  $x$  и  $y$  в каждом рассматриваемом эксперименте;

3)  $a_0, a_1, \dots, a_k$  зависят от другой переменной  $z$ , характеризующей режимы гипоксического прекондиционирования, т.е.  $a_i = \varphi_i(z), i = 0, 1$ .

Требуется подобрать вид зависимости  $a_i = \varphi_i(z), i = 0, 1$  и входящие в нее параметры так, чтобы модель  $y(x, z) = f(x, \varphi_0(z), \varphi_1(z))$  наилучшим образом связывала  $x$  и  $y$  в любой экспериментальной ситуации, зависящей от  $z$ .

### Решение поставленной задачи

В роли  $\varphi_i(z)$  представлена трансцендентная функция вида

$$\varphi_i(z) = b_0^{(i)} + b_1^{(i)} \cos\left(\frac{b_2^{(i)}}{z}\right).$$

Тогда функция двух факторных переменных примет вид:

$$y(x, z) = a_0(z)x + a_1(z) = \left(b_0^{(0)} + b_1^{(0)} \cos\left(\frac{b_2^{(0)}}{z}\right)\right)x + \left(b_0^{(1)} + b_1^{(1)} \cos\left(\frac{b_2^{(1)}}{z}\right)\right). \quad (1)$$

Коэффициенты этой функции находились методом наименьших квадратов. Для этого решали систему уравнений вида (2), составленную из условия, что

$$J = \sum_{j=1}^n (b_0 + b_1 \cos\left(\frac{b_2}{z_j}\right) - a_j)^2$$

принимает наименьшее значение.

$$\begin{cases} \frac{\partial J}{\partial b_0} = 2 \sum_{j=1}^n (b_0 + b_1 \cos\left(\frac{b_2}{z_j}\right) - a_j) = 0, \\ \frac{\partial J}{\partial b_1} = 2 \sum_{j=1}^n [(b_0 + b_1 \cos\left(\frac{b_2}{z_j}\right) - a_j) \cos\left(\frac{b_2}{z_j}\right)] = 0, \\ \frac{\partial J}{\partial b_2} = 2 \sum_{j=1}^n [(b_0 + b_1 \cos\left(\frac{b_2}{z_j}\right) - a_j) \left(-\frac{b_1}{z_j}\right) \sin\left(\frac{b_2}{z_j}\right)] = 0. \end{cases} \quad (2)$$

В системе для упрощения вместо  $b_0^{(i)}, b_1^{(i)}, b_2^{(i)}$  использована запись  $b_0, b_1, b_2$ .



Преобразуем (2), используя формулу синуса двойного угла и свойство суммы слагаемых. Получим систему

$$\begin{cases} nb_0 + b_1 \sum_{j=1}^n \cos\left(\frac{b_2}{z_j}\right) - \sum_{j=1}^n a_j = 0, \\ b_0 \sum_{j=1}^n \cos\left(\frac{b_2}{z_j}\right) + b_1 \sum_{j=1}^n \cos^2\left(\frac{b_2}{z_j}\right) - \sum_{j=1}^n (a_j \cos\left(\frac{b_2}{z_j}\right)) = 0, \\ b_0 b_1 \sum_{j=1}^n \frac{\sin\left(\frac{b_2}{z_j}\right)}{z_j} + b_1^2 \sum_{j=1}^n \frac{\cos\left(\frac{b_2}{z_j}\right) \sin\left(\frac{b_2}{z_j}\right)}{z_j} - b_1 \sum_{j=1}^n \left(\frac{a_j}{z_j} \sin\left(\frac{b_2}{z_j}\right)\right) = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Из первого уравнения выразим  $b_0$ . Подставим  $b_0$  во второе уравнение системы (3) и выразим  $b_1$ . Получим равенство

$$b_1 = \frac{n \sum_{j=1}^n (a_j \cos\left(\frac{b_2}{z_j}\right)) - \sum_{j=1}^n a_j \sum_{j=1}^n \cos\left(\frac{b_2}{z_j}\right)}{n \sum_{j=1}^n \cos^2\left(\frac{b_2}{z_j}\right) - \left[\sum_{j=1}^n \cos\left(\frac{b_2}{z_j}\right)\right]^2}. \quad (4)$$

Подставим  $b_1$  в выражение  $b_0$  и упростим полученное равенство до

$$b_0 = \frac{\sum_{j=1}^n a_j \sum_{j=1}^n \cos^2\left(\frac{b_2}{z_j}\right) - \sum_{j=1}^n \cos\left(\frac{b_2}{z_j}\right) \sum_{j=1}^n (a_j \cos\left(\frac{b_2}{z_j}\right))}{n \sum_{j=1}^n \cos^2\left(\frac{b_2}{z_j}\right) - \left[\sum_{j=1}^n \cos\left(\frac{b_2}{z_j}\right)\right]^2}. \quad (5)$$

Подставим  $b_0$  и  $b_1$  в третье уравнение системы (3) и получим уравнение относительно коэффициента  $b_2$  вида

$$\begin{aligned} & 2 \sum_{j=1}^n \frac{\sin\left(\frac{b_2}{z_j}\right)}{z_j} \left[ \sum_{j=1}^n a_j \sum_{j=1}^n \cos^2\left(\frac{b_2}{z_j}\right) - \sum_{j=1}^n \cos\left(\frac{b_2}{z_j}\right) \sum_{j=1}^n (a_j \cos\left(\frac{b_2}{z_j}\right)) \right] + \\ & \sum_{j=1}^n \frac{\sin\left(\frac{2b_2}{z_j}\right)}{z_j} \left[ n \sum_{j=1}^n (a_j \cos\left(\frac{b_2}{z_j}\right)) - \sum_{j=1}^n a_j \sum_{j=1}^n \cos\left(\frac{b_2}{z_j}\right) \right] - \\ & 2 \sum_{j=1}^n \left(\frac{a_j}{z_j} \sin\left(\frac{b_2}{z_j}\right)\right) \left[ n \sum_{j=1}^n \cos^2\left(\frac{b_2}{z_j}\right) - \left[\sum_{j=1}^n \cos\left(\frac{b_2}{z_j}\right)\right]^2 \right] = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Уравнение  $F(b_2) = 0$  решалось методом последовательных приближений с точностью до 0,001. С этой же точностью находились и параметры  $b_0, b_1$ . Была написана программа на языке Си++ "Решение системы трех трансцендентных уравнений с тремя неизвестными", по которой рассчитывались коэффициенты  $b_0, b_1, b_2$  для каждой функции  $\varphi_0(z) = b_0^{(0)} + b_1^{(0)} \cos\left(\frac{b_2^{(0)}}{z}\right)$ ,  $\varphi_1(z) = b_0^{(1)} + b_1^{(1)} \cos\left(\frac{b_2^{(1)}}{z}\right)$ .

Таким образом, в результате решения поставленной задачи получена модель в виде функции двух факторных переменных вида

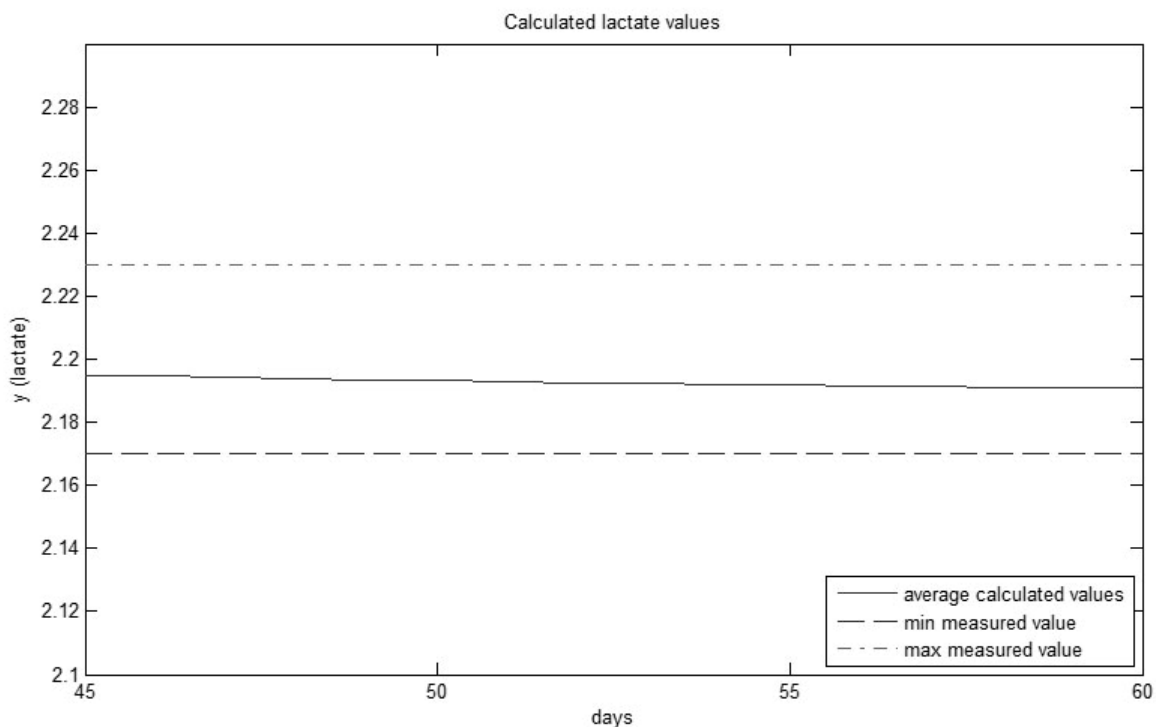
$$y(x, z) = \left(0,3602 - 0,0766 * \cos\left(\frac{21,9875}{z}\right)\right) * x + \left(0,72 + 0,2458 * \cos\left(\frac{22,0122}{z}\right)\right), \quad (7)$$

где  $x$  - содержание глюкозы в мозге экспериментальных животных, выраженное в микромолях на 1 г ткани;  $z$  - режимы гипоксического прекондиционирования, ч;  $y$  - содержание лактата в мозге экспериментальных животных, выраженное в микромолях на 1 г ткани, соотношенное к единицам длительности гипоксического воздействия.

### Проверка прогностической способности построенной модели

Прогностическая способность функции (7) проверялась методом табулирования, который предусматривает вычисление значений функции при изменении аргумента в заданном интервале с некоторым шагом. С этой целью была составлена программа "Табулирование функции двух факторов переменных" на языке Си++. Проведен расчет значений лактата при экспериментальном изменении содержания глюкозы в интервале  $(x_{\min}, x_{\max})$  и режимах гипоксического прекондиционирования до 60 дней, выходящих за пределы экспериментального интервала.

Машинный эксперимент показал, что близкое к интактным животным содержание лактата наблюдается на протяжении двух недель в конце второго месяца гипоксического воздействия. Можно предположить, что стойкое адаптивное состояние к гипоксии у животных наступает в интервале от 45 до 60 суток гипоксического прекондиционирования, так как расчетные значения лактата ( $\bar{y}$ ) попадают в интервал значений интактных животных. Результаты табулирования представлены на рис. 1.



**Рис. 1.** Расчетные значения лактата  $y$  по функции (7) при гипоксическом прекондиционировании 45-60 суток

Это предположение было подтверждено литературными данными – [2], [8], [15], [17].

Таким образом, полученная нами математическая модель вида (7), объединяющая показатели процесса гликолиза мозга – лактат  $y$  и глюкозу  $x$ , при  $z$  - допустимой длительности нарушения кислородного режима – соответствует поставленной задаче исследования и может быть использована для прогнозирования расчетным способом оптимальных режимов гипоксического прекондиционирования, формирующих адаптацию организма к недостатку кислорода.

Дальнейшая работа предполагает использование этой модели для прогнозирования оптимальных режимов гипоксического прекондиционирования на примере исследования других процессов метаболизма мозга.

### Библиографический список

1. **Колобов, А.В.** Математическая модель роста опухоли с учетом дихотомии миграции и пролиферации / А.В. Колобов [и др.] // Компьютерные исследования и моделирование. – 2009. – Т. 1. – № 4. – С. 415–422.
2. **Лукьянова, Л.Д.** Эффективность и механизмы действия различных типов гипоксических тренировок. Возможность их оптимизации / Л.Д. Лукьянова [и др.] // Патогенез. – 2008. – Т. 6. – №3. – С. 32–36.
3. **Молчанов, А.М.** Математическое моделирование в биологии / А.М.Молчанов, А.А.Ляпунов, Г.П. Багриновская // Материалы I школы по математическому моделированию сложных биологических систем. – М.: Книга по требованию, 2013. – 138 с.
4. **Мошкова, А.Н.** Подходы к прогнозированию адаптивного состояния энергетической системы мозга в условиях гипоксии / А.Н. Мошкова [и др.] // Бюллетень экспериментальной биологической медицины. 2010. –Т. 148. – №3. – С. 282–285.
5. **Мошкова, А.Н.** Исходные характеристики содержания адениновых нуклеотидов в условиях острого кислородного голодания методами математического анализа / А.Н. Мошкова [и др.] // Труды НГТУ. – 2015. – №1(108). – С. 274–282.
6. **Мошкова, А.Н.** Использование эмпирических зависимостей для прогнозирования оптимального режима гипоксического прекондиционирования на примере анализа показателей гликолиза мозга / А.Н. Мошкова [и др.] // Труды НГТУ. – 2016. – №2(113). – С. 37–45.
7. **Мошкова, А.Н.** Статистический анализ количественных отношений глюкозы и лактата в крови животных-опухоленосителей при терапии наноструктурированными препаратами / А.Н. Мошкова [и др.] // Труды НГТУ. – 2015. – №3(110). –С. 326–333.
8. **Мошкова, А.Н.** Подходы к прогнозированию пределов устойчивости организма к гипоксии, основанные на оценке системы адениновых нуклеотидов / А.Н. Мошкова [и др.] // Бюллетень экспериментальной биологии и медицины. – 1998. – №4. – Т. 125. – С. 391–394.
9. **Мошкова, А.Н.** Прогнозирование эффективного режима гипоксического прекондиционирования по уровню адениновых нуклеотидов / А.Н. Мошкова, Е.М. Хватова // Материалы регуляции физиологических систем организма в процессе адаптации к условиям среды. – СПб., 2010. – С.15–16.
10. **Мюррей, Дж.Д.** Математическая биология. Том II. Пространственные модели и их приложения в биомедицине / Дж.Д. Мюррей // М., Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2011. – 1104 с.
11. Теория вероятностей и математическая статистика. Математические модели: учеб. пособие / В.Д. Мятлев [и др.]. – М.: Академия. 2009. – 320 с.
12. Математические модели в биологии: учеб. пособие / Т.Ю. Плюснина [и др.] – 2-е изд. доп. – М., Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2014. – 136 с.
13. **Ризниченко, Г.Ю.** Лекции по математическим моделям в биологии / Г.Ю. Ризниченко // Изд. РХД. М.-Ижевск: Изд. РХД, 2011. – 560 с.
14. **Рыбникова, Е.А.** Перспективы использования гипоксического прекондиционирования для профилактики и лечения постстрессовых патологий / Е.А. Рыбникова, В.И. Миронова, М.О. Самойлов // Материалы XX съезда физиологического общества им. И.П. Павлова. – М., 2007. – С. 31.
15. **Самойлов, М.О.** Молекулярные механизмы кратко- и долговременных эффектов гипоксического прекондиционирования / М.О.Самойлов [и др.] // Проблемы гипоксии: молекулярные, физиологические и клинические аспекты; под ред. Л.Д. Лукьяновой, И.Б. Ушакова. – М., 2004. – С. 96–112.
16. **Сидняев, Н.И.** Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных: учеб. пособие / Н.И. Сидняев. – М.: Юрайт, 2011. – С. 7–148.
17. **Хватова, М.О.** Прогнозирование пределов устойчивости головного мозга к гипоксии по характеристике адениновых нуклеотидов / М.О. Хватова, А.Н. Мошкова // Патогенез. – 2008. – Т. 6. – №3. – С. 92.

18. **Moshkova, A.N.** Mathematical analysis of kinetic characteristics of oxidative phosphorylation in the animal brain under hypoxic condition ISSN 1819-7124 / A.N. Moshkova, E.M. Chvatova, J.A. Rusakova // *Neurochemical Journal*. – 2007. – V. 3. – №. 3. – P. 240–243.

*Дата поступления  
в редакцию 15.07.2017*

**A.N. Moshkova<sup>1</sup>, E.I. Erlykina<sup>2</sup>, E.I. Murach<sup>2</sup>, Yu.I. Tsarapkina<sup>1</sup>, Ya.Yu. Kozlova<sup>1</sup>**  
**MATHEMATICAL MODELLING OF THE DEPENDENCE BETWEEN BRAIN GLYCOLYTIC INDEXES UNDER HYPOXIC PRECONDITIONING**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. Alekseev<sup>1</sup>,  
 Nizhny Novgorod state medical academy<sup>2</sup>

**The aim:** of the study was to create a mathematical model in the form of two factor variables  $y(x, z) = f(x, \varphi_0(z), \varphi_1(z))$ , combining empiric characteristics of experimental animals nervous tissue (glucose (x)) and lactate (y) under various conditions of hypoxic preconditioning (z), as well as to develop an estimated method of prediction of effective preconditioning stages, which are counted to promote the formation of stable adaptation of the animal body to the serious form of oxygen regime violation.

**Methodology:** It has been established, that linear function  $y = a_0x + a_1$  can approximate well the quantitative dependence of glycolytic indexes in the rat brain in hypoxia (310 mmHg, duration 60 min each experiment) at 1, 4, 7, 14 and 28 days of hypoxic preconditioning. An attempt was made to reconstruct the function of linear approximation into dependence of type  $y(x, z) = \varphi_0(z)x + \varphi_1(z)$ , considering  $a_i = \varphi_i(z)$  ( $i = 0, 1$ ), where z is the second factor variable, meaning the regimes of hypoxic preconditioning.

**Results and area of application:** A model has been built in the shape of two factor variables with type:

$$y(x, z) = \left(0,3602 - 0,0766 \cdot \cos\left(\frac{21,9875}{z}\right)\right)x + \left(0,72 + 0,2458 \cdot \cos\left(\frac{22,0122}{z}\right)\right)$$

describing the quantitative dependence of lactate content (y) from glucose level (x) depending on hypoxic preconditioning regimes (z). The calculation of lactate values (y) has been conducted in experimental changes of glucose level (x) in the range  $(x_{\min}, x_{\max})$  and hypoxic preconditioning regimes, overstepping the limits of 60 days experimental interval. The computer experiment showed that stable adaptive state to animal hypoxia is reached in the interval of 45-60 days of hypoxic preconditioning; i.e. estimated values of lactate level (y) are in the interval of intact animal values. An assumption has been made, that optimal long-term hypoxic preconditioning regime is observed over a period of two weeks at the end of the second month of hypoxic preconditioning. Results obtained can be recommended in development of non- medicinal methods of brain adaptation to the severe form of oxygen regime violation.

**Conclusion:** A constructed model of multiple regression, uniting brain glycolytic indexes (lactate (y) and glucose (x)) at acceptable hypoxic influence duration (z) is suggested for the application to forecast the optimal hypoxic preconditioning regimes by calculation method.

*Key words:* glucose, lactate, hypoxic preconditioning, least square method.

УДК 334.012.23

А.Ф. Плеханова, А.С. Узбекова, Н.А. Шибанов

**О ПРИМЕНЕНИИ ПОРТФЕЛЬНОЙ ТЕОРИИ  
К ОЦЕНКЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ КЛАСТЕРОВ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

**Цель:** оценить возможность применения постулатов портфельной теории в ходе построения кластеров промышленных предприятий в Российской Федерации.

**Методология:** Кластеры и портфели, безусловно, не являются тождественными понятиями, однако, их значительное сходство позволяет применить математический аппарат портфельной теории при организации и оценке функционирования кластеров.

**Результаты:** На примере пилотных инновационных территориальных кластеров делается вывод о необходимости совершенствования механизма организации кластеров. Рассматривается алгоритм включения участников во вновь образуемый кластер предприятий атомной отрасли Нижегородской области. Алгоритм представляет набор итераций, в ходе каждой из которых оцениваются доходность и риск кластера и определяется результирующий показатель – объем синергии.

**Выводы:** Применение портфельной теории при организации и оценке функционирования кластеров позволит повысить эффективность применения кластеров предприятий Нижегородской области.

*Ключевые слова:* кластер, кластерное образование, риск, доходность, портфельная теория, атомный кластер.

Решение рабочей группы по развитию частно-государственного партнерства в инновационной сфере при Правительственной комиссии по высоким технологиям и инновациям от 22.02.2012 стало для России отправной точкой в развитии столь востребованного во многих странах мира экономического инструмента, как кластеры. Отобранные в том же году 25 пилотных инновационных территориальных кластеров (далее – ПИТК), поделенные на группы, с тех пор уже успели продемонстрировать первые результаты своей работы.

Анализ эффективности применения международной практики кластеризации экономики в российской действительности показывает, что на данный момент в нашей стране государство остается наиболее активным игроком кластерного рынка. И речь здесь не только о первоначальной инициативе.

Как вполне справедливо отмечает в своей работе Е.С. Куценко, во многих российских кластерах преобладают компании с государственным участием, их дочерние и зависимые организации, государственные образовательные и научные учреждения, региональные органы власти [17]. К сожалению, организация кластеров не сопровождается заметными институциональными реформами и даже подменяет их. При этом государство влияет на промышленный кластер не только на стадии его формирования, но и в дальнейшем. Региональные власти прямо воздействуют на ПИТК посредством участия в работе специализированных организаций (органов управления кластерами) либо путем создания надстроек над существующими административными органами [17].

Вопросы создания кластеров с государственным участием регулируется настолько детально, что, скажем, в «Методических материалах по созданию промышленного кластера», подготовленных Министерством промышленности и торговли России совместно с НИУ «Высшая школа экономики», обнаруживаются такие технические указания, как: «Схему организационной зависимости участников и инфраструктуры промышленного кластера рекомендуется выполнить в форме блок-схемы на бумажном носителе формата А3, а также на электронном носителе в формате pdf» [7].

Таким образом, речь не идет о каком-либо выявлении кластеров или наблюдении за их стихийной организацией. Напротив, все хоть сколько-нибудь заметные нынешние кластерные инициативы – результат усилий органов власти.

В целом такой подход укладывается в рамки международного опыта [19]. Гораздо более важным является вопрос о том, какие участники (субъекты) и по каким принципам попадают в кластер – будь то один из ПИТКов либо иной. Опыт организации ПИТКов (по крайней мере, внешняя его сторона) указывает на то, что каких-либо формализованных процедур отбора кластеров не применялось. По мнению авторов, такой подход является недостаточно эффективным.

В предыдущих публикациях авторы настоящей статьи высказали предположение о том, что кластер – это частный случай портфеля финансовых активов. Синергетический эффект кластера при этом выступает аналогом эффекта диверсификации рисков активов в портфеле [16].

Портфельная теория строится на том, что из-за независимости активов, разнонаправленности изменений их доходности возникает эффект хеджирования, элиминирующий индивидуальные риски активов. Взаимное влияние участников (субъектов) кластера искажает этот механизм. Действительно, в случае с кластером, например, мебельных производств, каждый из участников кластера будет косвенно заинтересован в повышении эффективности работы своих коллег. В случае с классическим портфелем трудно представить, чтобы один актив был «заинтересован» в успехе другого. Поэтому справедливым видится утверждение о том, что кластер – это частный случай портфеля с рядом допущений и ограничений.

Экономические категории «кластер» и «портфель» могут быть признаны если и не тождественными, то сопоставимыми. Безусловно, соотнесение понятий «кластер» и «портфель» можно рассматривать с двух сторон. Поведенческая сторона действий лица, принимающего решение (ЛПР), в отношении кластера и портфеля идентична. ЛПР «складывает активы» в корзину, ориентируясь на совокупный результат их работы. Экономическая же сторона разделяет понятия, так как у субъектов (участников) в кластере есть ключевая особенность – они взаимодействуют друг с другом. Взаимодействуя же, могут порождать друг для друга как положительные, так и отрицательные последствия (образовательное учреждение, нацеленное только на нужды кластера, может потерять свою нишу на рынке образовательных услуг по прочим невостребованным в кластере направлениям подготовки кадров). В частности, синергия, возникающая в кластере, – это аналог диверсификации, возникающей в портфеле.

Например, в отношении кластера предприятий химической промышленности может быть справедливо такое суждение. Последствия техногенной аварии для предприятия, производящего кислоту, снижаются или вовсе нивелируются тем, что оно сможет покрыть свои убытки от аварии за счёт иных участников кластера (участники могут создать некий резервный фонд), что делает риск возникновения аварии менее значимым.

Отдельного внимания требуют ограничения и допущения портфельной теории и то, как они сочетаются с понятием кластера. Информация о применении классических ограничений теории портфельного инвестирования к организации кластера сведена в табл. 1.

Принимая кластер сопоставимым портфелю, необходимо установить ряд дополнительных ограничений и допущений:

- кластер – это узкоотраслевой и (или) локализованный географически портфель; авторы склонны принимать терминологию понятия «кластер» в части географической и отраслевой, производственной близости субъектов;
- кластер – это портфель, активы которого взаимодействуют друг с другом [14];
- гипотеза может быть применена только в случае принудительной организации кластера «сверху вниз»; действительно, ЛПР, организуя кластер, действует подобно инвестору, в случае же самоопределения кластера ни о каком алгоритме сознательного формирования кластера как портфеля речь идти не может;



- рассматриваться могут только субъекты кластера, прямо связанные с его деятельностью, субъекты же поддерживающей инфраструктуры (вузы, дорожное хозяйство, объекты энергетики и иные) могут быть учтены лишь условно (действительно, субъект, прямо не генерирующий доходность, не может быть включенным в портфель);
- кластер – это портфель с открытой информацией в том смысле, что каждый из участников кластера знаком с его структурой и составом, даже может влиять на эти характеристики кластера;
- кластер – это портфель с определенной степенью самостоятельности субъектов, которые могут принимать решения о входе/выходе из состава кластера.

Таким образом, целесообразным видится использование понятий портфельной теории и некоторых её принципов. Авторы вводят понятия «доходность кластера» и «риск кластера», а также принимают, что эти категории могут быть численно измерены.

Любые положительные проявления деятельности кластера (например, приток новых технологий в отрасль) в конечном итоге должны обращаться, конвертироваться в некое количество денежных средств, так как промышленный кластер организуется и работает в целях получения дополнительной прибыли. При этом эффекты внедрения кластерного подхода (будь то рост инновационной активности, расширение компетенций, появление новых знаний или повышение мотивированности персонала и прочее) крайне трудно формализуются и численно определяются. Для расширения возможностей применения кластерного подхода авторами в рамках исследования были введены следующие термины:

- доходность кластера (CE, от англ. cluster earnings) – относительная величина, характеризующая те или иные результаты деятельности кластера;
- риск кластера (CR, от англ. cluster risk) – относительная величина, характеризующая, изменчивость результатов деятельности кластера.

Математический аппарат портфельной теории предполагает использование для расчета доходности кластера математическое ожидание, а для оценки риска кластера – среднее квадратическое отклонение.

В более ранних работах был опубликован предложенный авторами алгоритм создания кластера, который представляет собой набор итераций [16]. Каждая итерация предполагает присоединение одного участника или (если необходимо) исключение одного из субъектов кластера. Любой новый участник кластера включается в кластер, если он:

- обеспечивает какой-либо дополнительный функционал кластера (например, учебное заведение, напрямую на риск и доходность не влияет, но обеспечивает необходимыми кадрами субъекты кластера);
- положительно влияет на соотношение «риск – доходность» (по крайней мере, не ухудшает его).

Используя предлагаемый алгоритм, был проведен анализ предполагаемых изменений доходности и риска кластера атомной отрасли Нижегородской области при последовательном добавлении к нему новых участников для оценки целесообразности их включения в этот кластер. Общий алгоритм исследования при этом выглядел таким образом.

На шаге 1 были выбраны исходные данные. Преимуществом алгоритма является тот факт, что они могут иметь различную размерность и любой размах колебаний. Такие данные могут быть составлены из показателей различной природы, абсолютно независимых друг от друга показателей. Фактически ЛПР самостоятельно может решить, какие и в каком объеме данные требуется исследовать. Авторами, в частности, были задействованы такие показатели, как рентабельность собственного капитала и величина прибыли до налогообложения EBIT.

На шаге 2 был произведен переход к безразмерным показателям. Некорректный переход к безразмерным показателям способен существенно исказить экономический смысл исходных показателей, заставить исследователя сделать ложные выводы. Однако в рассматриваемом алгоритме отказ от перехода к безразмерным показателям был невозможен.



На шаге 3, согласно постулатов портфельной теории, была вычислена доходность портфеля (CE) как средневзвешенное значение доходностей активов, входящих в портфель. При этом значения показателя CE определялись для субъекта, первым включенным в кластер (в качестве такового было выбрано АО «НИАЭП»), а также для субъектов, вопрос включения которых в кластер рассматривается ЛПР.

Далее рассчитывалась величина изменения  $\Delta CE$  от включения в него нового субъекта. Например, на начальном этапе создания кластера, когда в него входило лишь предприятие-организатор, формула имела вид

$$\Delta CE = \text{Среднее значение } [CE_1; CE_2] - CE_1,$$

где  $CE_1$  – доходность организатора кластера; среднее значение  $[CE_1; CE_2]$  – доходность кластера, в который включены организатор и второй участник.

На шаге 4 аналогичным образом была рассчитана величина риска

$$\Delta CR = \text{Среднее значение } [CR_1; CR_2] - CR_1,$$

где  $CR_1$  – доходность организатора кластера; среднее значение  $[CR_1; CR_2]$  – риск кластера, в который включены организатор и второй участник.

На шаге 5 было получено итоговое значение объёма синергии QS (от англ. quantity of synergy) [14]. Для этого применялась формула

$$QS = \Delta CE - \Delta CR.$$

На шаге 6 результаты были интерпретированы. Пожалуй, это наиболее творческая часть алгоритма, так как ЛПР может использовать самые разные подходы к интерпретации результатов. В частности, авторами было предложено использовать следующий принцип: субъект включается в кластер только при получении значения  $QS > 0$ . Так, в частности, было выявлено, что включение в кластер АО «ОКБМ Африкантов» является целесообразным.

По итогам исследования авторы пришли к заключению, что математический аппарат портфельной теории может быть применен при организации и оценке функционирования кластеров.

#### Библиографический список

1. **Гершман, М. А.** Программы инновационного развития компаний с государственным участием: первые итоги // Форсайт. – 2013. – Т. 7. – № 1. – С. 28–43.
2. **Волкова, Н.Н.** Промышленные кластеры / Н.Н. Волкова, Т.В. Сахно. – Полтава: АСМИ, 2005. – 282 с.
3. Кластерные политики и кластерные инициативы: теория, методология, практика: монография / Е.В. Тищенко [и др.]. – Пенза: Изд-во ПГУАС, 2012. – 264 с.
4. Кластерная политика: концентрация потенциала для достижения глобальной конкурентоспособности / под ред. И.М. Бортника [и др.]. – СПб.: Corvus, 2015. – 356 с.
5. **Кох, И. А.** Возможности и ограничения современной портфельной теории // КГФЭИ. – 2007. – № 1 (6). – С. 26–29.
6. Методические материалы по разработке и реализации программ развития инновационных территориальных кластеров и региональной кластерной политике / В.Л. Абашкин [и др.]; науч. ред. Л.М. Гохберг [и др.]. – М.: НИУ ВШЭ, 2016. – 208 с.
7. Методические материалы по созданию промышленного кластера. – М.: НИУ ВШЭ, 2016. – 80 с.
8. Методические рекомендации по реализации кластерной политики в субъектах РФ. – М.: Минэкономразвития РФ, 26.12.2008 г. № 20615-ак/д19.
9. Пилотные инновационные территориальные кластеры в Российской Федерации: направления реализации программ развития / под ред. Л.М. Гохберга, А.Е. Шадрина. – М.: НИУ ВШЭ, 2015. – 92 с.
10. **Пятинкин, С.Ф.** Развитие кластеров: сущность, актуальные подходы, зарубежный опыт / С.Ф. Пятинкин, Т.П. Быкова. – Минск: Тесей, 2008. – 72 с.
11. **Рэдхэд, К.** Управление финансовыми рисками / К. Рэдхэд, С. Хьюз. – М.: ИНФРА-М, 1996. – 288 с.
12. **Сташевская, Г.Н.** Формирование механизма развития инновационного кластера на базе профильного технопарка: дисс. ... канд. эконом. наук. – СПб. – 2009. – 176 с.

13. **Узбекова, А. С.** Некоторые аспекты оценки рисков участников кластерного образования / А. С. Узбекова, Н. А. Шибанов // Экономическая безопасность России: проблемы и перспективы: материалы III Междунар. научно-практич. конф. – Н. Новгород: НГТУ, 2015. – С. 419–423.
14. **Узбекова, А. С.** Оценка синергетического эффекта кластера / А. С. Узбекова, А. Ф. Плеханова, Н. А. Шибанов // Экономика в промышленности. – 2014. – № 3. – С. 74–77.
15. **Узбекова, А. С.** Проблематика идентификации и построения кластерных образований Нижегородской области / А. С. Узбекова, К. И. Колесов, Н. А. Шибанов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2013. – № 1 (98). – С. 266–271.
16. **Узбекова, А. С.** Риски кластерных образований и их субъектов / А. С. Узбекова, Н. А. Шибанов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Социальные науки. – 2015. – № 3 (39). – С. 70–76.
17. **Kutsenko, E.** Pilot Innovative Territorial Clusters in Russia: A Sustainable Development Model // Foresight-Russia. – 2015. – V. 9. – № 1. – P. 32–55.
18. **Porter, M. E.** // Competitive Advantage of Nations // Free Press. 1998.
19. **Sölvell, Ö.** The Cluster Initiative Greenbook 2.0 // ‘Designing the Future – Innovation through Strategic Partnerships’: 16th TCI Global Conference, 3–6 September 2013. – Kolding, Denmark, 2013. URL: <http://www.slideshare.net/TCINetwork/tci2013-5-septplenarygran-lindqvistrjan-slvell>, свободный.

*Дата поступления  
в редакцию 08.08.2017*

**A.F. Plekhanova, A.S. Uzbekova, N.A. Shibanov**

## **APPLYING OF MEAN-VARIANCE ANALYSIS TO PROCEDURES FOR CONSTRUCTION OF INDUSTRIAL CLUSTERS**

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

**Purpose:** to assess the possibility of applying the postulates of the mean-variance analysis can be applied in the course of building clusters of industrial clusters in the Russian Federation.

**Methodology:** Clusters and portfolios, of course, are not identical concepts. However, their considerable similarity makes it possible to borrow the mathematical instruments of the mean-variance analysis for the needs of building clusters.

**Results:** On the example of pilot innovative territorial clusters makes a conclusion about the need to improve the mechanism of cluster organization. An algorithm is considered for including participants in a newly formed cluster of enterprises of the atomic industry of the Nizhny Novgorod region. The algorithm represents a set of iterations, each of which evaluates the profitability and risk of the cluster and determines the resulting indicator – quantity of synergy.

**Conclusion:** The application of the mean-variance analysis for the organization and evaluation of the functioning of clusters will make it possible to increase the efficiency of the application of clusters of enterprises in the Nizhny Novgorod region.

*Key words:* cluster, cluster formation, risk, profitability, mean-variance analysis, atomic cluster.

УДК 004.89

А. С. Подкладкин, Н. Е. Пособилов

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ С ЦЕЛЬЮ ФОРМИРОВАНИЯ КОММЕНТАРИЕВ К ВИДЕО

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева

Предложен подход к решению задачи генерации комментариев к видео с использованием нейронных сетей глубокого обучения. Была разработана модель сети с комбинацией сверточной и рекуррентной структур. Проведено сравнение предлагаемого метода и существующих с помощью метрик генерации выражений.

*Ключевые слова:* нейронная сеть, глубокое обучение, обработка естественных языков, комментирование видео.

На сегодняшний день цифровой контент по своей природе является мультимедиа: текст, аудио, изображения, видео и т.д. В частности, видео становится новым способом общения между интернет-пользователями. В связи с распространением недорогих устройств мобильной записи, количество видео-контента растет, поэтому возникает потребность в разработке технологий автоматизированного анализа видео. Для большинства людей задача просмотра видео и описание происходящего в нем (словами) является легкой задачей. Для машин же извлечение смысла из видео и генерация комментариев – очень сложная задача. Фундаментальный вопрос, который лежит в основе успеха, – понимание содержимого видео.

Формирование комментариев к видео – новая задача, которая получает все большее внимание исследователей в таких областях, как компьютерное зрение и обработка естественных языков. Это логическое продолжение задачи описания статических изображений. Описание видео на естественном языке еще более сложная задача, так как модель описания видео должна быть достаточно мощной, чтобы не только распознавать действия и объекты, но и иметь возможность моделировать их пространственно-временные отношения, выраженные на естественном языке.

Перспективным направлением для решения этой задачи является использование нейронных сетей глубокого обучения, так как их применение позволило достигнуть высоких результатов в описании статических изображений.

Рассмотрим основные типы архитектур нейронных сетей

**Сверточная нейронная сеть (СНС)** – специальная архитектура искусственных нейронных сетей, предложенная Я. Лекуном и нацеленная на эффективное распознавание изображений, входит в состав технологий глубинного обучения. Использует некоторые особенности зрительной коры, в которой были открыты так называемые простые клетки, реагирующие на прямые линии под разными углами, и сложные клетки, реакция которых связана с активацией определённого набора простых клеток. Таким образом, идея свёрточных нейронных сетей заключается в чередовании свёрточных слоев и субдискретизирующих слоев. Структура сети – однонаправленная (без обратных связей), принципиально многослойная. Для обучения используются стандартные методы, чаще всего, метод обратного распространения ошибки. Функция активации нейронов (передаточная функция) – любая, по выбору исследователя.

Особенность свёрточной нейросети заключается в том, что в ней нейроны первых уровней упорядочены в особую структуру, а именно: на первых слоях нейроны разбиты на изображения определенного размера (их еще иногда называют картами), разные карты внутри одного слоя соответствуют нейронам разного типа, реагирующим на разные особенности

изображений. И вычисления активации следующего слоя в сверточных нейросетях бывают двух основных типов. В первом типе вычислений активация нейронов следующего уровня вычисляется как линейная комбинация активаций нейронов предыдущего уровня, причем веса этих линейных активаций зависят только от взаимных положений нейронов, типов нейронов, но не зависят от положения данного нейрона внутри карты.

Во втором типе вычислений активация нейронов на следующем уровне просто повторяет активацию нейронов на предыдущем уровне, но изображение становится меньшего размера за счет того, что активация рядом расположенных нейронов заменяется на их максимум или их среднее – так называемая процедура пулинга.

**AlexNet** – архитектура сверточной сети (рис. 1), созданная в 2012 г., которая выиграла конкурс по классификации изображений в этом же году базы ImageNet [1]. Основные особенности: 7 скрытых слоев, ReLu в качестве функций активации, 60000000 параметров.

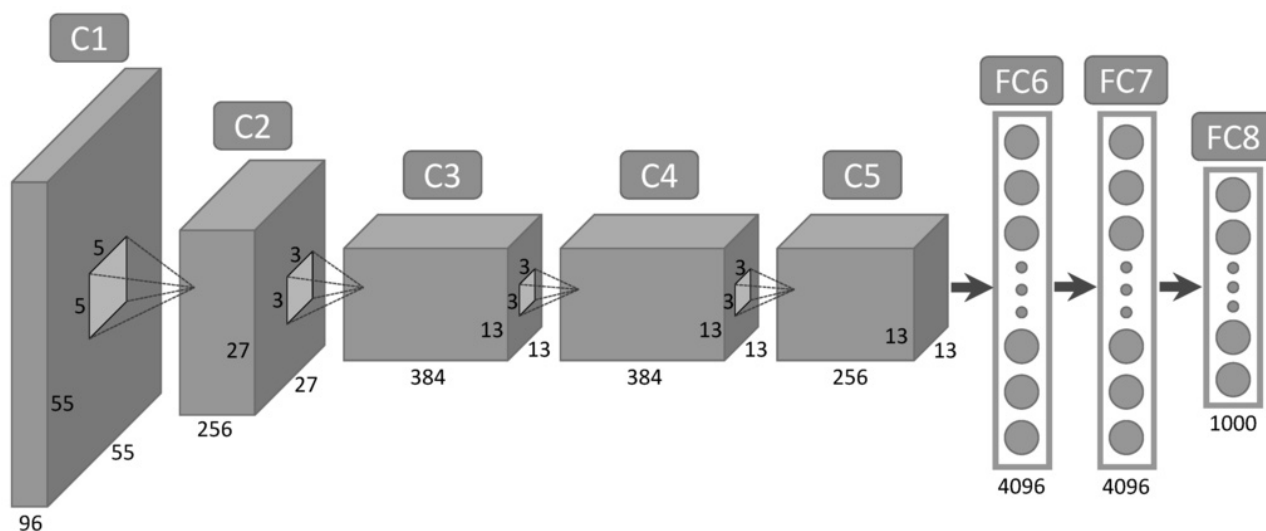


Рис. 1. Архитектура нейронной сети AlexNet (caffe)

**Рекуррентные нейронные сети (РНС)** - вид нейронных сетей, в которых имеется обратная связь. При этом под обратной связью подразумевается связь от логически более удалённого элемента к менее удалённому. Наличие обратных связей позволяет запоминать и воспроизводить целые последовательности реакций на один стимул. Стандартные РНС учатся отображать последовательность входов ( $x_1, \dots, x_t$ ) в последовательность скрытых состояний ( $h_1, \dots, h_t$ ) и от скрытых состояний к последовательности выходов ( $z_1, \dots, z_t$ ) на основе следующих повторений:

$$h_t = f(W_{xh}x_t + W_{hh}h_{t-1}),$$

$$z_t = g(w_{zh}h_t),$$

где  $f$  и  $g$  - элементарные нелинейные функции, такие как сигмоида или гиперболический тангенс;  $x_t$  - векторное представление фиксированной длины;  $h_t \in R^N$  - скрытое состояние с  $N$  значениями;  $W_{ij}$  - веса, соединяющие слои нейронов;  $z_t$  - выходной вектор.

Рекуррентные нейронные сети могут научиться отображать последовательности, для которых известно соответствие между входами и выходами, однако неясно, могут ли они применяться к задачам, когда входы ( $x_i$ ) и выходы ( $z_i$ ) имеют разную длину. Другая известная проблема с РНС заключается в том, что их трудно обучать на большом объеме данных. Для решения этих проблем была предложена архитектура LSTM сетей.

**Сети долго-краткосрочной памяти (Long Short Term Memory)** - обычно просто называют LSTM - особый вид РНС, способных к обучению долгосрочным зависимостям. Они были предложены Хохрейтером и Шмидхубером в 1997 г. [2]. Сети работают невероятно хорошо на большом разнообразии проблем и в данный момент широко применяются. LSTM

специально спроектированы таким образом, чтобы избежать проблемы долгосрочных зависимостей. Запоминать информацию на длительный период времени - это практически их поведение по умолчанию.

Все рекуррентные нейронные сети имеют форму цепи повторяющихся модулей (repeating module) нейронной сети. LSTM тоже имеют такую цепную структуру, но повторяющийся модуль другого строения. Вместо одного нейронного слоя их четыре, причем они взаимодействуют особым образом.

В данной работе использовалась реализация LSTM сети с повторяющимся блоком, представленным на рис. 2.

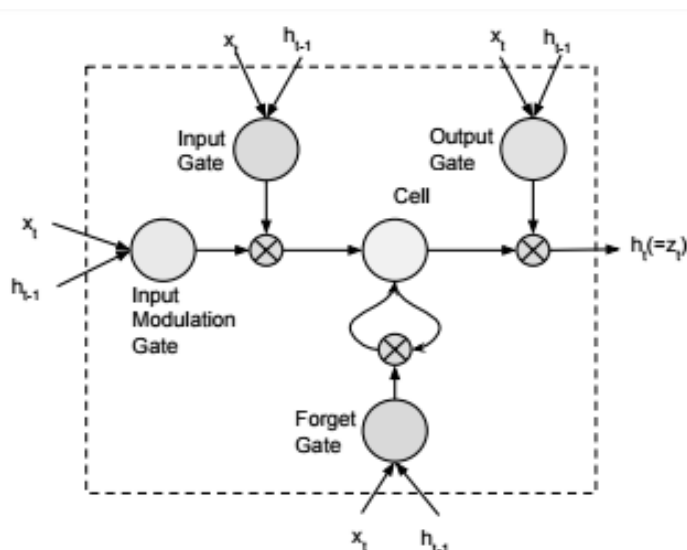


Рис. 2. Архитектура LSTM блока

В основе модели LSTM лежит ячейка памяти  $c$ , которая на каждом шаге кодирует значения входов, вычисленные до этого шага. Ячейка модулируется воротами, имеющими сигмоидальную функцию активации с диапазоном  $[0, 1]$  и применяющимися мультипликативно. Ворота определяют, сохраняет ли LSTM значение из затвора (если значение 1) или отбрасывает его (если значение 0). Три вида ворот: входные ворота ( $i$ ), – контролируют, рассматривает ли LSTM текущий вход ( $x_t$ ); забывающие ворота ( $f$ ), позволяющие LSTM забыть свою предыдущую память ( $c_{t-1}$ ); выходные ворота ( $o$ ) – решают, какую часть памяти необходимо передать в скрытое состояние ( $h_t$ ). Работа LSTM блока описывается так:

$$\begin{aligned} i_t &= \sigma(W_{xi}x_t + W_{hi}h_{t-1}), \\ f_t &= \sigma(W_{xf}x_t + W_{hf}h_{t-1}), \\ o_t &= \sigma(W_{xo}x_t + W_{ho}h_{t-1}), \\ c_t &= f_t \odot c_{t-1} + i_t \odot \varphi(W_{xc}x_t + W_{hc}h_{t-1}), \\ h_t &= o_t \odot \varphi(c_t), \end{aligned}$$

где  $\sigma$  – сигмоидальная функция активации;  $\varphi$  - гиперболическая функция активации;  $\odot$  – произведение с учетом значения ворот;  $W_{ij}$  – весовые матрицы (являются обученными параметрами).

На рис. 2 показана предлагаемая модель для генерации комментария к видео. Система основана на комбинации сверточной и рекуррентной нейронной сети. Сначала с помощью СНС генерируется одномерное векторное представление видео. Затем используются РНС, в частности LSTM, чтобы "декодировать" вектора в предложение (т.е. последовательность слов).

Наиболее вероятное описание для видео определяется обучением модели, чтобы максимизировать логарифмическую функцию правдоподобия выражения  $S$ , учитывая соответствующее видео  $V$  и параметры модели  $\theta$ :



$$\theta^* = \operatorname{argmax}_{\sum_{(v,s)}} \log(S|V; \theta) \quad (1)$$

Так как модель генерирует одно слово в предложении на каждом временном шаге, то естественно использовать совместную вероятность последовательных слов. Таким образом, логарифмическая функция правдоподобия предложения определяется суммой логарифмических функций всех слов и может быть выражена следующим образом:

$$\log P(S|V) = \sum_{t=0}^N \log P(S_{w_t}|V, S_{w_1}, \dots, S_{w_{t-1}}),$$

где  $S_{w_t}$  представляет  $i$ -е слово;  $N$  – общее число слов. Параметр  $\theta$  отброшен для удобства.

Необходимо максимизировать функцию правдоподобия выражения  $S$ . Эта функция рассчитывается и оптимизируется на всем тренировочном наборе данных. Выбирают слово с максимальной вероятностью на каждом временном шаге и устанавливают его на вход РНН сети для следующего временного шага.

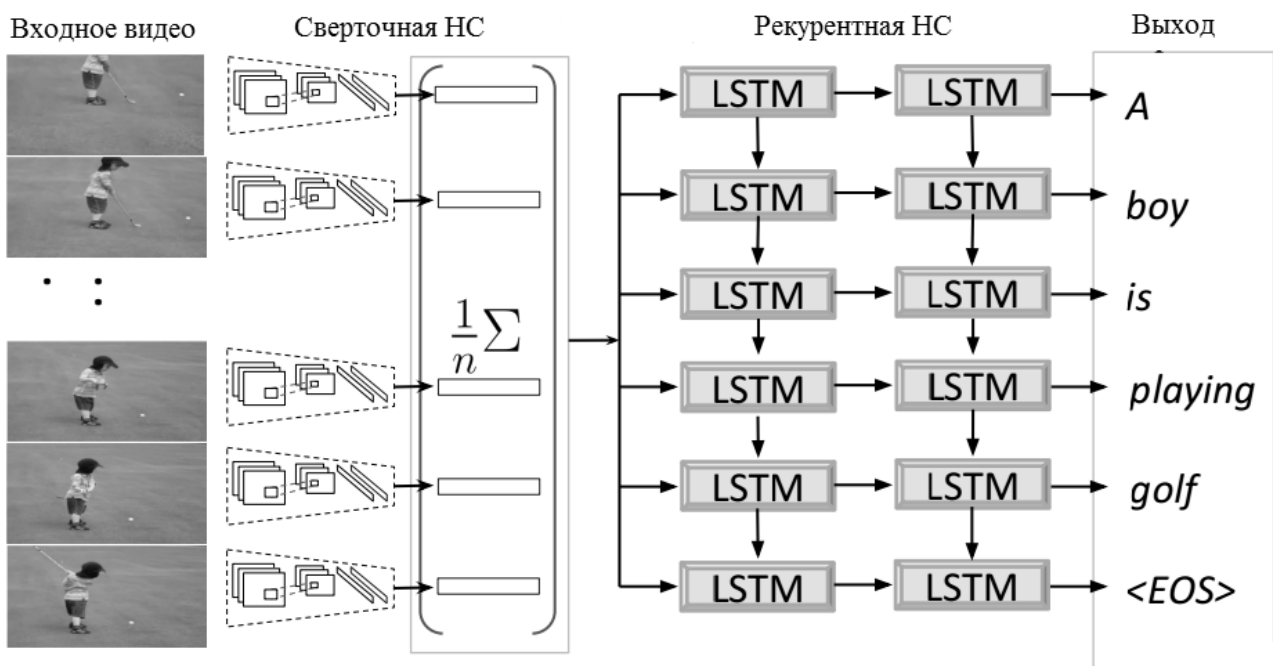


Рис. 3. Структура модели для генерации комментариев к видео

В работе используется LSTM сеть для генерации последовательности, так как сети такой архитектуры показывают высокую эффективность в задачах распознавания речи и машинного перевода. В данном случае используется два слоя LSTM, как показано на рис. 3. LSTM сеть “декодирует” вектор визуальных признаков, характеризующий видео.

Первым шагом в процессе генерации комментария к видео является создание вектора фиксированной длины, который эффективно обобщает происходящее на видео. Для этого используется СНС, в частности архитектуру AlexNet. Эта сеть предварительно обучена на 1.2 млн изображений набора данных ImageNet и, следовательно, имеет надежную инициализацию для распознавания объектов и позволяет сократить время обучения. Берем выборочные кадры из видео (1 из каждых 10 кадров) и извлекаем выход из 7 полносвязного слоя (fc7 на рис.1), выполняем усреднение по кадрам и получаем вектор размерностью 4096 для каждого видео. Этот вектор подается на вход первому слою LSTM сети, а состояние первого слоя является входом второго слоя. Слово из предложения является выходом второго слоя. В данной работе слова представляются как частота вхождения каждого слова в словарь (1-из- $N$ , где  $N$  – мощность словаря). Для обучения использовались две видеокарты NVIDIA GTX 980

4GB, каждая из которых имеет 2048 CUDA ядер. Первая видеокарта использовалась для обучения первого слоя LSTM, а вторая – второго слоя. Для предобработки изображений и выражений использовался ЦП.

Двухслойная LSTM модель обучается предсказывать следующее слово  $S_{w_t}$  в комментарии на основе вектора визуальных признаков и предыдущего  $t-1$  слова,  $P(S_{w_t}|V, S_{w_1}, \dots, S_{w_{t-1}})$ . Функция 1 рассчитывается и оптимизируется на всем тренировочном наборе данных с использованием стохастического градиентного спуска. На каждом временном шаге вход  $x_t$  подается в LSTM наряду с состоянием  $h_{t-1}$  предыдущего шага, и LSTM выдает следующий вектор состояния  $h_t$  и слово. Для первого слоя LSTM  $x_t$  – конкатенация визуального вектора признаков и предыдущие закодированное слово. Для второго слоя LSTM  $x_t - z_t$  первого слоя. Выбираем слово с максимальной вероятностью на каждом временном шаге и устанавливаем его на вход LSTM сети для следующего временного шага, пока не получим маркер конца строки.

В процессе выполнения эксперимента использовался набор видеоданных Microsoft Research Video Descriptor Corpus (MSVD) [3]. Этот набор данных представляет собой набор из 1970 отрывков YouTube видео. Длительность каждого ролика составляет от 10 до 25 с, как правило, изображающих одну активность или короткую последовательность. Для каждого видео доступно порядка 40 описаний на английском языке. Для нашей задачи выбираем 1200 видео, которые будут использованы в качестве обучающих данных, 100 видео для проверки и 670 для тестирования.

Так как количество видео в наборе данных мало по сравнению с набором данных, используемых LSTM моделями в других задачах, то используем набор данных Flickr30k для инициализации весов LSTM сети, чтобы увеличить ее скорость и точность обучения на видеоданных. Flickr30k содержит 30000 изображений, каждому из которых соответствуют 5 или более комментариев. Выбираем 1000 изображений для проверки, а остальные для обучения. Эксперименты проводим по обучению моделей на каждом наборе данных как отдельно, так и в комбинации.

Используемые модели генерации комментариев:

1. FGM – Factor Graph Model [4]. Этот подход, используя алгоритм SIFT для распознавания объектов и фактор-граф, определяет наиболее вероятный субъект, глагол, объект и сцену. Затем используется простой шаблон для генерации предложения.

2. Предлагаемые две основные LSTM модели:

а) LSTM-YT – двухслойная LSTM сеть, обученная на наборе данных MSVD;

б) LSTM-YTflickr – модель, сначала обученная на наборе данных Flickr30k, а затем тонко настроенная на MSVD наборе.

Для сравнения результатов экспериментов использовали алгоритмы автоматического оценивания качества машинного перевода BLEU [5] и METEOR [6].

## Результаты

Использование глубоких моделей генерации комментариев к видео дает прирост эффективности (табл. 1). Особенно это заметно на метрике BLEU, разница на метрике METEOR не столь высока в связи с тем, что модель FGM хорошо оптимизирована на поиск субъекта, глагола и объекта в видео.

Предварительное обучение предлагаемой модели на изображениях повышает производительность в обоих метриках. Модель LSTM-YTflickr, которая была претренирована на наборе данных Flickr30k, показывает прирост порядка 1% на обоих метриках по сравнению с LSTM-YT. Это указывало на то, что предлагаемая модель может использовать вспомогательный источник данных для улучшения предсказания. Разница между результатами двух наших моделей не столь велика из-за переобучения.



Таблица 1

## Результаты экспериментов

Модель	BLEU (%)	METEOR (%)
FGM	13.68	23.90
LSTM-YT	31.18	26.85
LSTM-YTflickr	32.03	27.89

На рис. 4 можно увидеть примеры генерации комментариев различных моделей. Точность предлагаемых моделей выше, чем метода FGM, однако точность крайне низка, например, на 3 картинке неправильно определяются объекты на видео.



FGM: A person is cutting a potato in the kitchen.  
 LSTM-YT: A man is slicing a tomato.  
 LSTM-YTf: A man is slicing a carrot.  
 Human: A man is sclicing carrots.

FGM: A person is riding a horse on the stage  
 LSTM-YT: A group of playing are playing in the ball.  
 LSTM-YTf: A basketball player is playing  
 Human: A basketball player does a fancy layup in an allstar game

FGM: A person is playing a person in the sky  
 LSTM-YT: A dog is playing in the snow  
 LSTM-YTf: A dog is walking on a ball  
 Human: Two polar bears are wrestling in the snow

Рис. 4. Примеры работы моделей

## Выводы

В данной работе предложена модель для описания видео, которое использует глубокие нейронные сети. В экспериментальной оценке показано, что предлагаемый подход создает лучшие комментарии, чем “классические” методы. Также показано, что использование размеченных изображений повышает производительность по сравнению с применением только видеоданных. Однако предложенный подход не учитывает временную информацию в видео, что является перспективным направлением исследований будущей работы.

## Библиографический список

1. **Krizhevsky, A.** ImageNet classification with deep convolutional neural networks / A. Krizhevsky, I. Sutskever, G.Hinton [Электронный ресурс]. – Canada, 2012. URL: <https://papers.nips.cc/paper/4824-imagenet-classification-with-deep-convolutional-neural-networks.pdf>
2. **Hochreiter, S.** Long short-term memory / S. Hochreiter, J. Schmidhuber - [Электронный ресурс]. – Germany, 1997. URL: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1246450>
3. **Chen, D. L.** Collecting highly parallel data for paraphrase evaluation / D. L. Chen, W.B. Dolan - [Электронный ресурс]. – USA, 2011. – URL: <http://www.cs.utexas.edu/~ai-lab/downloadPublication.php?filename=http://www.cs.utexas.edu/users/ml/papers/chen.ac111.pdf&pubid=127065>
4. Integrating language and vision to generate natural language descriptions of videos in the wild / Thomason J. [et al.] - [Электронный ресурс]/ – USA, 2015. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.650.7265&rep=rep1&type=pdf>,

5. **Papineni, P.** BLEU: a method for automatic evaluation of machine translation / P. Papineni [et al.] - [Электронный ресурс]. – USA, 2002. URL: <http://www.aclweb.org/anthology/P02-1040.pdf>
6. **Elliott, D.** Comparing automatic evaluation measures for image description / D. Elliott, F. Keller - [Электронный ресурс]. – UK, 2014. URL : <http://acl2014.org/acl2014/P14-2/pdf/P14-2074.pdf>

*Дата поступления  
в редакцию 10.08.2017*

**A.S. Podkladkin, N.E. Posobilov**

## **USING DEEP LEARNING NEURAL NETWORKS FOR VIDEO CAPTIONING**

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

**Purpose:** The goal is to generate language sentences for videos.

**Design/methodology/approach:** This paper presents a model to generate captions for videos. For this we exploit recurrent neural networks, specifically LSTMs, which have demonstrated state-of-the-art performance in image caption generation. Our LSTM model is trained on video-sentence pairs and learns to associate a sequence of video frames to a sequence of words in order to generate a description of the event in the video clip. The model consists of two components: deep convolutional neural network for learning powerful video representation, a deep RNN for generating sentences.

**Findings:** The model achieves state-of-the-art performance on the MSVD dataset. Despite its conceptual simplicity, our model significantly benefits from additional data, suggesting that it has a high model capacity, and is able to learn complex semantic structure of videos.

**Research limitations/implications:** However, the proposed approach does not take into account the temporal information in the video, which is a promising direction for research of future work. Moreover, the video description generation might be significantly boosted if we could have sufficient labeled video-sentence pairs to train a deeper RNN.

**Originality/value:** The model outperforms the FGM model with a significantly large margin on both BLEU and METEOR language generation metrics.

*Key words:* neural network, deep learning, natural language processing, video captioning.

УДК 338.47

Л.И. Райкин, М.Н. Субботина

## О ПОДГОТОВКЕ КОНТЕНТА ДЛЯ ИНТЕРАКТИВНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РУКОВОДСТВ

Нижегородский государственный технический университет им.П.Е. Алексеева

Интерактивные электронные технические руководства (ИЭТР) все более широко входят в практику эксплуатации высокотехнологичных и наукоемких изделий. Являясь базой знаний об изделии и представляя собой интеллектуальное средство поддержки эксплуатации изделия на постпроизводственных стадиях его жизненного цикла (ЖЦ), ИЭТР обладает большим функционалом. Возможности мультимедийного и 3D-модельного представления информации значительно улучшают восприятие документации ИЭТР. Однако при вставке в ИЭТР инструкций и документов, а также обновлении и корректировке информации возникают проблемы, среди которых несовместимость форматов мультимедийной технической документации. Статья посвящена оценке проблемы подготовки контента для ИЭТР.

*Ключевые слова:* интерактивные электронные технические руководства, эксплуатация высокотехнологичных и наукоемких изделий, контент, 3D-модели, мультимедиа.

Эксплуатационная документация (ЭД) в виде ИЭТР в качестве средства информационной поддержки на этапах эксплуатации используется рядом российских предприятий. В их число входят: ОАО «Адмиралтейские верфи», ОАО «Конструкторское бюро специального машиностроения», ОАО «Невское проектно-конструкторское бюро», ОАО «Автодизель», ОАО «Мытищенский машиностроительный завод», ПАО «Мотовилихинские заводы» и др. [1]. Предприятия начали активно использовать концепцию создания ЭД сразу в виде интерактивных электронных документов (ИЭД) на основе 3D-моделей. При этом наблюдается снижение сложности создания ЭД с использованием ранее разработанных 3D-моделей и повышение эффективности эксплуатации изделий при использовании интерактивной ЭД. Однако у данного подхода существуют проблемы, связанные с трудоемкостью создания контента для ИЭД и сложностью внесения изменений. Для предприятий оборонно-промышленного комплекса существуют ограничения, связанные с особенностями продукции. В качестве решения проблем предлагается использование ассоциативности ИЭД с 3D-моделями и автоматизации создания мультимедийного контента.

Использование ИЭТР в качестве обучающих программ сопряжено с проблемой взаимосвязанных аспектов: нормативно-техническими, информационными, дидактическими и организационными [2].

Анализ технологических платформ для разработки ИЭТР [3,4] показал, что в зарубежной и отечественной практике интегрированной логистической поддержки (ИЛП) сформирована серия стандартов в области создания ИЭТР и электронных каталогов. Имеется значительное количество разработчиков программного обеспечения для создания ИЭТР, электронных каталогов и электронных публикаций. Выбор той или иной технологической платформы зависит как от ведомственных предпочтений предприятий-заказчиков, так и опыта их работы с соответствующими профессиональными программными продуктами.

В ряд получивших распространение комплексов программного обеспечения для создания ИЭТР входят следующие:

- Autodesk Inventor Publisher от Autodesk;
- Composer от Dassault Systèmes;
- Cortona3D RapidAuthor от ParallelGraphics;
- Arbortext от PTC;
- Technical Guide Builder от НИЦ «Прикладная логистика»;

- Seamatica от Си Проект.

На основе анализа функциональности и распространенности в среде современных разработчиков технической документации программ автоматизации их деятельности произведено детальное сравнение наиболее популярных и развитых (кроме указанных) программных пакетов [5]:

- Technical Communication Suite от Adobe (США);
- StyleVision от Altova (США/Австрия);
- Flare от MadCap (США);
- AuthorIT от Author-it Software Corporation (Новая Зеландия);
- help&Manual от EC Software (Австрия).

В ряд программ, предназначенных для работы с техническими иллюстрациями, может быть включено приложение Corel DESIGNER X5 - основа пакета Corel DESIGNER Technical Suite X5 [6]. На рис. 1 представлен пример технической иллюстрации, выполненной в этом приложении.

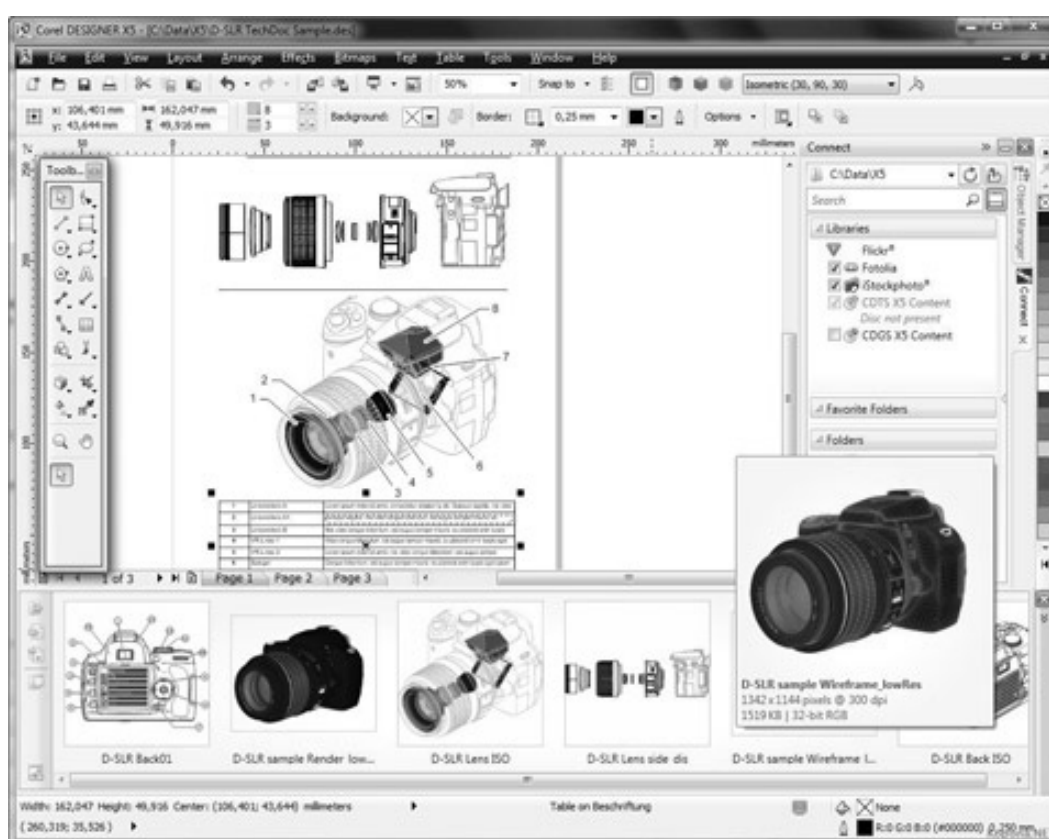


Рис. 1. Пример иллюстрации, выполненной в Corel DESIGNER X5

В числе многочисленных поддерживаемых приложением Corel DESIGNER X5 форматов: AutoCAD DWG и DXF, Microsoft Visio (VSD), SVG, DOCX, JPEG, PNG, TIFF, EPS, DOC, XLS. При этом обеспечивается улучшенная поддержка ряда продуктов Adobe (AI, PSD, PDF и др.). Доступны четыре вида пользовательского интерфейса: по умолчанию X5 Default Workspace и Microsoft Visio Pro, Micrografx Designer и CorelDRAW.

Программа обладает поддержкой ведущих отраслевых стандартов, в том числе S1000D и WebCGM 2.0/2.1. ASD S1000D является стандартом для создания ИЭТР, а WebCGM – открытый международный стандарт для хранения и обмена веб-графики. Улучшена совместимость и с другими системами стандартов: CMS, PDM и PLM. Поддержка стандарта Unicode позволяет работать с документами на других языках (в том числе на русском).

Некоторые проблемные вопросы и способы их решения в проектах разработки экс-

плуатационной и ремонтной документации приведены в презентации [7]. Рассмотрены проблемы: программно-технические, разработки содержательной информации документации, кооперации, взаимодействия с заказчиком, связанные с доставкой документации конечным пользователям.

Определенные проблемы возникают и с использованием интерактивных 3D-моделей, которые можно двигать, вращать и масштабировать в стандартном Web-браузере или на странице ИЭТР [8]. В частности, при разработанной 3D-модели в SolidWorks, необходимо использовать специализированные модули eDrawings и 3D Instant Website либо применять трансляторы, предназначенные для сохранения объемных моделей в виде потоковой графики. Это MTS, HOOPS, ZGL и т.д., каждый из которых поддерживается соответствующим ActiveX-компонентом, обеспечивающим вращение, перемещение, масштабирование и целый ряд других, более сложных операций над графическим объектом. Кроме того, в любом текстовом редакторе необходимо еще написать несколько строчек HTML-кода, создающего новую HTML-страницу.

Согласно концепции стандартизации в области управления жизненным циклом продукции [9], среди аспектов рассматриваемых информационных технологий выделяется стандартизация общих правил представления геометрической, мультимедийной и текстовой информации об изделии (форматы, информационные модели, протоколы обмена, регламенты информационного взаимодействия и т.п.).

Информация в ИЭТР может быть представлена в виде текста, графических изображений, 3D-моделей, анимации, аудио- и видеороликов [10].

Информационными источниками ИЭТР являются:

- конструкторская и техническая документация заводов-изготовителей; изменения и модификации конструкции как заводов-изготовителей, так и конструкторских бюро;
- технологические карты ремонта; маршрутные карты технологических процессов; инструмент, оснастка и стендовое оборудование, применяемые в эксплуатационных и ремонтных предприятиях;
- нормативные и руководящие документы: правила технической эксплуатации и инструкции, государственные стандарты (ГОСТы), технические условия (ТУ), отраслевые стандарты (ОСТы), нормы допусков и износов; инструкции, руководства по ремонту и обслуживанию оборудования;
- справочная и учебная литература: методические материалы первичной подготовки и повышения квалификации персонала; учебная литература и тематические пособия; справочная литература, пособия, памятки и т.п.

Состоит ИЭТР из контента (информационной базы данных), который содержит всю информацию о представленном изделии, и программного обеспечения (электронной системы отображения информации) для визуализации данных и обеспечения интерактивного взаимодействия с пользователем.

Контент ИЭТР, разрабатываемый на основе конструкторской, технической и нормативной документации, включает в себя 3D интерактивный иерархический каталог деталей и узлов оборудования, снабженный подробной текстовой и графической информацией о стандартах исполнения, материалах, нормах допусков, технологическом процессе обслуживания, оснастке и инструменте.

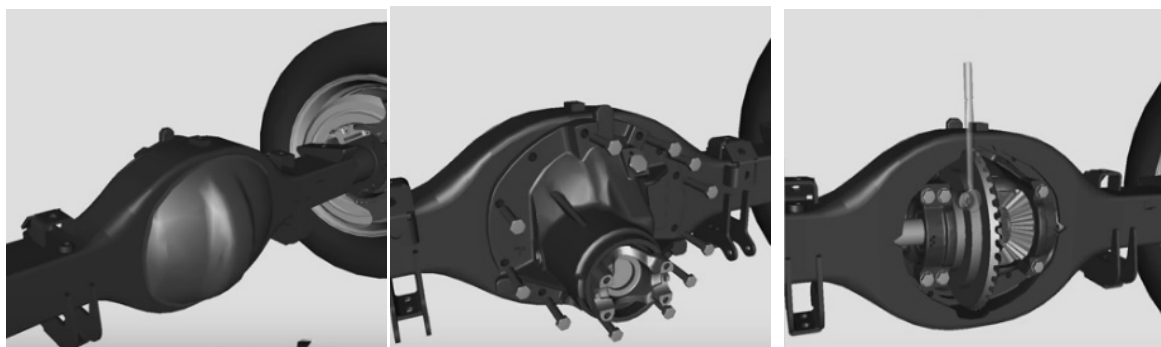
Рекомендации и указания по внесению контента в информационные базы ИЭТР вендоры инструментальных средств приводят в соответствующих руководствах и методиках.

Компания ParallelGraphics [11] предлагает технологию разработки ИЭТР в виде виртуальных руководств (рис. 2).

Методические рекомендации по созданию виртуальных руководств в среде Cortona3D RapidManual приведены в работе [12]. Согласно этим методическим указаниям, создание интерактивных электронных технических руководств в среде Cortona3D RapidManual осуществляется в следующей последовательности:



1. Экспорт 3D-модели из системы автоматизированного проектирования в VRML-формат (VRML -Virtual Reality Modeling Language - язык моделирования виртуальной реальности имеет расширение .wrl и является универсальным форматом хранения и обмена интегрированной 3D графики и мультимедиа);
2. Создание VM-проекта, импорт и оптимизация 3D-модели;
3. Разработка анимации;
4. Создание HTML страницы.



**Рис. 2. Фрагменты анимационного ролика, выполненного в среде Cortona3D RapidManual компании ParallelGraphics**

Набор модулей программного продукта (ПП) обеспечивает создание различных видов 3D-приложений для эксплуатации, обслуживания и ремонта сложных изделий и технологического оборудования (табл. 1).

**Таблица 1**

**Функционал модулей ПП ParallelGraphics для разработки виртуальных руководств**

Модули ПП ParallelGraphics	Функционал
Virtual Manual Administrator (VMA)	Создает VM конфигурации, обеспечивает эффективный обмен данными между различными продуктами семейства Cortona 3DRapidManual управляет проектами (создание, импортирование, удаление)
Virtual Manual Editor (VME)	Позволяет создавать наглядные трехмерные инструкции по ремонту, техническому обслуживанию, замене запасных частей и т.п. Трехмерные руководства могут распространяться через Internet, а также интегрироваться в PLM или CRM-системы
Virtual Manual Generator (VMG)	Обеспечивает предварительную обработку VRML-данных, полученных из CAD/CAM/CAE-систем для дальнейшего использования в Virtual Manual Editor (VME) и Virtual Training Editor (VTE)
Internet Model Optimizer (IMO)	Позволяет оптимизировать геометрию 3D-моделей, созданных в различных CAD/CAM/CAE-системах.
Virtual Manual Publisher (VMP)	Позволяет интегрировать 3D симуляции в HTML-документы и определить, какие элементы интерфейса будут доступны в 3D симуляции, и при необходимости отредактировать текст процедуры

Руководство пользователя программного комплекса для разработки, сопровождения и публикации эксплуатационной документации Technical Guide Builder [13] содержит описание всех возможностей, которые предоставляет модуль TG Builder.

Редактор описательного модуля данных: текстовая информация в документе (согласно международному стандарту на подготовку эксплуатационной документации ASDS1000D) оформлена по определенным шаблонам – стилям, т.е. совокупности параметров шрифта, абзацных отступов и другой информации, четко определяющей вид текста на экране или бумажном носителе. Приводятся методики: оформления текста, создания таблиц, вставки иллюстраций и мультимедиа объектов, работа с гипермедийными ссылками, настройка печати.

Однако TG Builder не работает с файлами изображений растровых форматов, содержащими информацию о прозрачности. Такие изображения не отображаются редактором иллюстраций и не видны в модуле данных. Если изображение, полученное из внешнего источника, содержит информацию о прозрачности, рекомендуется сохранить его в формате JPG в каком-либо «простом» редакторе изображений, например Paint, или сохранить файл в «продвинутом» редакторе изображений, например Photoshop, без использования альфа-каналов. Вставка в ИЭТР 3D-модели, разработанной в САПР, реализуется через формат VRML, а для просмотра Vrmml-документов необходимо подключить вспомогательную программу Cortona VRML Client, разработанную фирмой ParallelGraphics.

Описательные данные используются для представления сведений об устройстве изделия, принципах его работы, назначении и эксплуатации. Описание должно содержать информацию по идентификации и расположению систем и обзорную информацию по техническому обслуживанию компонентов. Типовыми модулями данных являются:

- описание изделия и его компонентов;
- описание процессов эксплуатации изделия.

Система TG Builder разделена на 12 модулей, каждый из которых имеет свой функционал. Так, *Базовый* модуль включает в себя: ядро, диспетчер проектов, описательный модуль данных, базовый перечень видов анализа базы данных, только плоские иллюстрации, экспорт/импорт в форматах PDB и XML, работа с публикациями, просмотр с помощью TGBrowser. Модуль *мультимедиа* реализует поддержку в модулях данных видео, flash, 3D. На рис. 3 приведен вид экрана при диалоге внесения изменения в ИЭТР, выполненный в TG Builder.

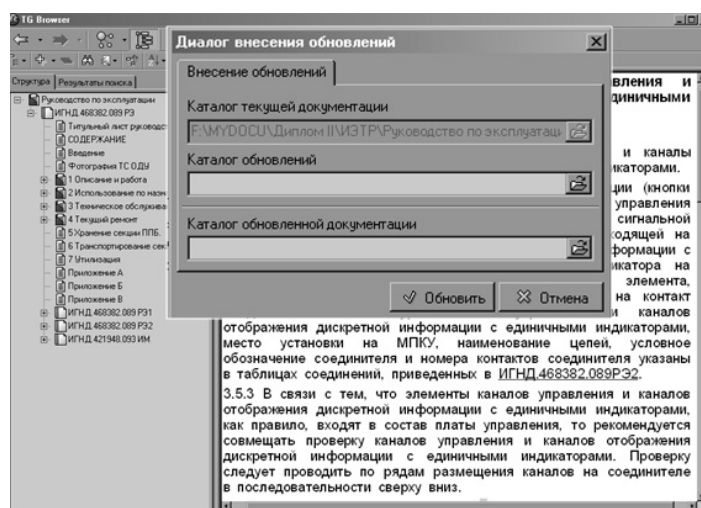


Рис. 3. Обновление документации в стандартных функциях ИЭТР, выполненное в TG Builder

На рис. 4 показан фрагмент анимационного ролика ИЭТР по ремонту блочного пульта управления, выполненного в TG Builder.





Рис. 3. Фрагмент анимационного ролика ИЭТР

### Вывод

Для использования существующих программных комплексов разработки, сопровождения и публикации эксплуатационной документации подготовка контента (в частности графических изображений, 3D-моделей, анимации, аудио- и видеороликов) представляется достаточно нетривиальной задачей.

### Библиографический список

1. **Катаев, Я. А.** О технологии разработки интерактивной электронной эксплуатационной документации. [Электронный ресурс]. URL: [http://kataevyakov.my1.ru/load/o\\_tekhnologii\\_razrabotki\\_interaktivnoj\\_ehlektronnoj\\_ehkspluatacionnoj\\_dokumentacii/1-1-0-4](http://kataevyakov.my1.ru/load/o_tekhnologii_razrabotki_interaktivnoj_ehlektronnoj_ehkspluatacionnoj_dokumentacii/1-1-0-4)
2. **Стручков, А.М.** Противоречия развития компьютерных учебно-тренировочных средств, предназначенных для обеспечения теоретического обучения // Программные продукты и системы. 2013. № 2. С. 55–60. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.swsys.ru/index.php?page=article&id=3461>
3. **Райкин, Л. И.** Анализ технологических платформ для разработки ИЭТР / Л. И.Райкин [и др.] // Информационные системы и технологии ИСТ-2017: материалы XXIII Междунар. научно-технич. конф. – Нижний Новгород, 2017. – С. 1430–1443.
4. **Девяткин, В. А.** О выборе инструментальных средств для разработки электронной интерактивной документации / В. А.Девяткин [и др.] // Инновации, качество и сервис в технике и технологиях: сборник науч. тр. 5-й Междунар. научно-практич. конф. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2015. – С. 118–121. [Электронный ресурс]. URL: <http://regionika.ru/konf/%C8%CA%D1-05%20%CC%E0%EA%E5%F2.pdf>
5. **Гуринович, В.** Интерактивные электронные технические руководства, основанные на принципе единого источника, в качестве инструмента поддержки УЖЦ элементов АЭС / В. Гуринович [и др.] // Инновационное проектирование. – 2012. – №6. – С. 54–61 [Электронный ресурс]. URL: [http://www.niaep.ru/resources/e9ed9a004d2ea3409987bd03f8ef67d2/jornal\\_3D\\_num6\\_2012.pdf](http://www.niaep.ru/resources/e9ed9a004d2ea3409987bd03f8ef67d2/jornal_3D_num6_2012.pdf)
6. **Иванов, М.** Профессиональный инструмент для технического дизайна // Softkey.info, 2011. [Электронный ресурс]. URL: Режим доступа: <http://www.softkey.info/reviews/review10372.php>
7. **Воронцов, А.В.** Способы решения основных проблемных вопросов в проектах разработки эксплуатационной и ремонтной документации: презентация семинара «ЭЭД-2016» [Электронный ресурс]. URL: <http://cals.ru/sites/default/files/downloads/conf/2016/vorontsov.pdf>

8. **Аведьян, А.** Программные решения SolidWorks для создания интерактивных электронных технических руководств / А. Аведьян, И.Щекин // САПР и графика. – 2003. – №7 [Электронный ресурс]. URL: <http://sapr.ru/article/7633>
9. **Судов, Е.В.** О концепции стандартизации в области управления жизненным циклом продукции военного назначения / Е.В. Судов, А.Н. Петров, А.В. Карташев // Технологии PLM и ИЛП. – 2014. – № 8.– С. 23 [Электронный ресурс]. URL: [http://cals.ru/sites/default/files/downloads/emagazine/emag\\_8\\_plm\\_concept\\_lcc.pdf](http://cals.ru/sites/default/files/downloads/emagazine/emag_8_plm_concept_lcc.pdf)
10. Сайт Центра транспортных исследований [Электронный ресурс]. URL: <http://m-cti.ru/ietr>
11. Сайт инструментария для создания трехмерных интерактивных электронных технических руководств (IETM) / рабочих процедур / инструкций по монтажу (установке), будь то для операций, обслуживания, технического обслуживания или ремонта [Электронный ресурс]. URL: <http://www.cortona3d.com/rapidmanual>
12. **Комисаренко, А.Л.** ИПИ-технологии в приборостроении / А.Л. Комисаренко, А.А. Саломатина // Приложение II. Методические рекомендации по выполнению СРС; под ред. Е.И. Яблочникова. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 72 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ifmo.ru/file/stat/10/ipi3.pdf>
13. TG Builder 4.0. Руководство пользователя [Электронный ресурс]. URL: <http://cals.ru/sites/default/files/downloads/docs/tgb-4.0-builder.pdf>

*Дата поступления  
в редакцию 14.05.2017*

**L.I. Raikin, M.N. Subbotina**

## **ABOUT THE PREPARATION OF THE CONTENT FOR INTERACTIVE ELECTRONIC TECHNICAL GUIDELINES**

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

**Purpose:** Interactive electronic technical guidelines (IETM) are increasingly becoming part of the practice of operating high-tech and science-intensive products. Being a knowledge base about the product and representing an intelligent means of supporting the operation of the product at the post-production stages of its life cycle, the IETM has great functionality. The capabilities of multi-media and 3D-model presentation of information greatly improve the perception of IETM documentation. However, when IETM inserts instructions and documents, as well as updates and corrects information, problems arise, among which incompatibility of formats of multi-format technical documentation. The article is devoted to the evaluation of the problem of content preparation for the IETM.

**Design/ methodology/ approach:** An overview of the main characteristics of the IETM and its basic capabilities.

**Research limitation/ implications:** To use existing software systems for the development, maintenance and publication of operational documentation, the preparation of content (in particular, graphic images, 3D models, animations, audio and video clips) seems to be a rather nontrivial task. To use existing software systems for the development, maintenance and publication of operational documentation, the preparation of content (in particular, graphic images, 3D models, animations, audio and video clips) seems to be a rather nontrivial task. To use existing software systems for the development, maintenance and publication of operational documentation, the preparation of content (in particular, graphic images, 3D models, animations, audio and video clips) seems to be a rather nontrivial task.

**Originality/value:** An original approach to the evaluation of content preparation for IETM.

*Key words:* Interactive electronic technical manuals, operation of high-tech and science-intensive products, content, 3D-models, multimedia.

# ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

УДК. 534.631

Б.А. Гордеев<sup>1,2</sup>, С.Н. Охулков<sup>1,2</sup>, А.Н. Осмехин<sup>3</sup>, А.С. Плехов<sup>2</sup>

## ИЗМЕРЕНИЕ ТОРСИОННЫХ МОМЕНТОВ НА ВАЛАХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ, СОЕДИНЕННЫХ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКОЙ МУФТОЙ, ЧАСТОТНЫМ МЕТОДОМ<sup>1</sup>

Институт проблем машиностроения РАН<sup>1</sup>,  
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>2</sup>,  
АО «Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова»<sup>3</sup>

**Объект исследования:** электротехнические комплексы.

**Цель:** исследование торсионных моментов в системах, соединяющих электротехнические комплексы.

**Результаты:** разработан способ измерения торсионных моментов частотным способом

**Область применения:** системы контроля работы исполнительных механизмов, соединяющих электротехнические комплексы с энергозадающими генераторами и потребителями.

*Ключевые слова:* магнитоологический трансформатор; магнитоологическая жидкость; дроссельный канал; внутреннее управляющее магнитное поле.

### Введение

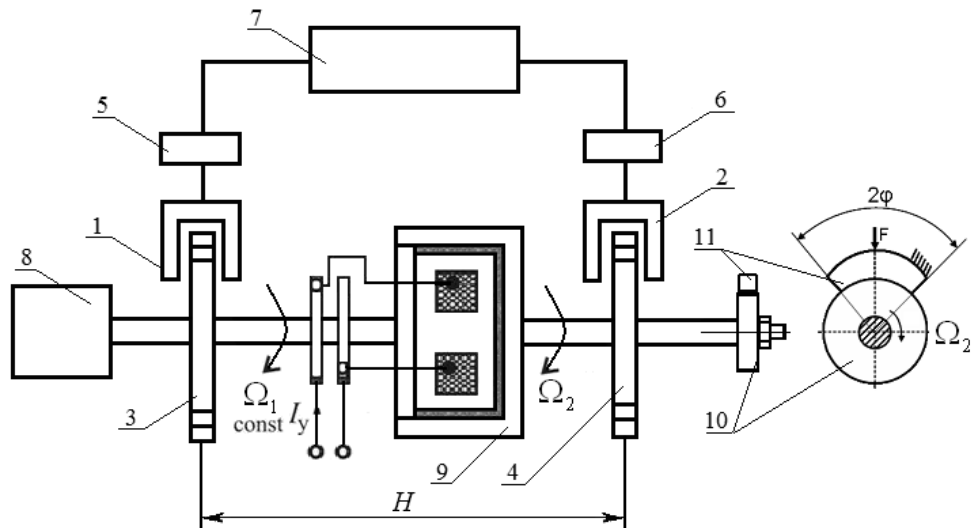
В статье рассмотрены новые подходы к исследованию торсионных моментов, возникающих на валах электротехнических комплексов при соединении их магнитоологическими муфтами. Показано, что поскольку вязкость магнитоологической жидкости (МРЖ), заполняющей муфту, является функцией магнитного поля, то целесообразно дроссельные каналы в магнитоологических трансформаторах (МРТ) заменить одним дроссельным каналом между коаксиальными цилиндрами. Магнитоологический эффект и различные его применения в демпфирующих устройствах исследовались и публиковались в работах [1-4].

### Частотный метод измерения торсионных моментов

Свойства магнитоологических жидкостей изменять вязкость при действии магнитных полей нашли широкое применение в различных областях науки и техники [5-13]. В работах [14-16] раскрыт способ измерения торсионных моментов неравномерно нагруженных валов частотным методом. Именно этот способ измерения торсионных моментов можно применить и к вращающимся соединительным муфтам с МРЖ, соединяющим валы исполнительных механизмов с электромеханическими комплексами [18].

При сцеплении валов муфтой возникает закрутка коаксиальных цилиндров, соединенных магнитоологическими муфтами (рис. 1) [8 – 10, 18].

При сцеплении валов соединительной муфтой в них возникает торсионный момент. При измерении торсионного момента используется симметричный линейный закон периодической частотной модуляции генератора качающейся частоты (ГКЧ) (рис. 2). Применяются два генератора: ГКЧ<sub>о</sub>- опорного сигнала ( $f_0$ ), ГКЧ<sub>с</sub> смещённого сигнала ( $f_c$ ) (рис. 2, а) [14 – 16].

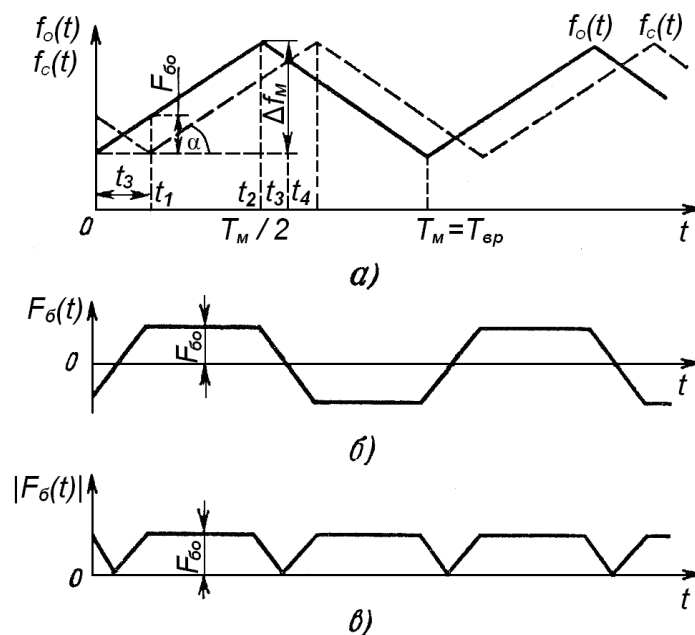


**Рис. 1. Функциональная схема испытаний цилиндрической магнитореологической муфты вязкого трения с парой трения «диск-колодка»:**

1, 2 – оптопары; 3, 4 – измерительные диски; 5, 6 – преобразователи импульсов; 7 – частотный измеритель «углового рассогласования ведущего и ведомого валов»; 8 – электродвигатель; 9 – магнитореологическая муфта; 10, 11 – диск и колодка пары трения; H – базовое расстояние (длина) муфты

При сцеплении валов муфтой возникающее угловое рассогласование валов приводит к смещению во времени сигналов частоты вращения валов муфты и, следовательно, частотно-модулированных сигналов ГКЧ. Частота опорного сигнала (от ГКЧ<sub>0</sub>) опережает частоту смещенного сигнала (от ГКЧ<sub>c</sub>). В результате происходит частотный сдвиг между опорным и смещенным сигналами ГКЧ.

Частота смещенного во времени сигнала под действием углового рассогласования соединительной муфты изменяется таким же образом, как и частота  $f_0$  опорного сигнала, но со сдвигом на время запаздывания  $t_3 = \Delta\phi/\Omega_{вр}$  относительно частоты  $f_0$  (рис. 1, а).



**Рис. 2. Изменение во времени частот опорного ( $f_0$ ) и смещенного ( $f_c$ ) частотно-модулированных сигналов (а) и разностной частоты биений  $F_{\delta}$  (б, в) в измерителе углового рассогласования ведущего и ведомого валов [12 -15]**

Скорость изменения частоты двух ГКЧ одна и та же. В результате смещения колебаний двух ГКЧ возникает биения.

Изменение частоты генераторов  $ГКЧ_0$  и  $ГКЧ_c$  по рис. 2, а составляет

$$F_6 = t_3 \operatorname{tg} \alpha = t_3 \frac{df_o}{dt} = \frac{df_o/dt}{\Omega_{вр}} \Delta \varphi, \quad (1)$$

то есть пропорциональна углу рассогласования муфты  $\Delta \varphi$  [14–17].

Измерение углового рассогласования валов, определяемого торсионными моментами, производится по частотному сдвигу ГКЧ, и основано на сравнении их частот в смесителе. На выходе смесителя выделяется разностная частота биений  $F_{60}$ .

### Реализация измерителя углового рассогласования ведущего и ведомого валов, соединенных муфтой по частоте биений

Структурная схема устройства измерения углового рассогласования ведущего и ведомого валов на разностной нулевой частоте биений приведена на рис. 3. Измеритель углового рассогласования ведущего и ведомого валов, соединенных муфтой реализуется на измерении частоты биений следующим образом (рис. 2) [14 -16]. С помощью установленных на ведущем и ведомом валах соединительной муфты кодовых дисков с фотоэлектрическими датчиками 1 и 2 снимаются сигналы частот вращения валов, соединённых муфтой (рис. 1).

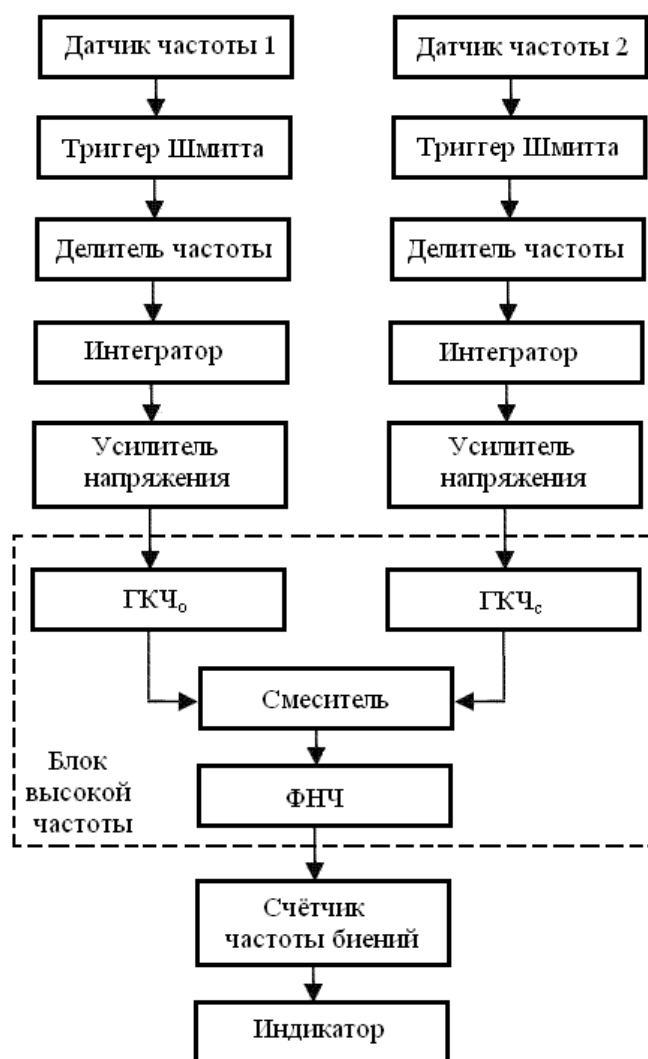


Рис. 3. Структурная схема устройства измерения углового рассогласования ведущего и ведомого валов на разностной нулевой частоте биений [12]

Измерение вязкости МРЖ происходит за счет определения углового рассогласования ведущего и ведомого валов муфты 9.

Сигналы частот вращения валов формируют модулирующие напряжения ГКЧ по закону симметричной треугольной пилы (рис. 1, а). Частоты вращения валов соединительной муфты 9 синхронно и синфазно снимают фотоэлектрическими датчиками 1 и 2 (рис. 1) Сигналы с фотоэлектрических датчиков 1 и 2 сдвинуты по фазе друг относительно друга за время изменения углового рассогласования ведущего и ведомого валов соединенных муфтой 9 определённым торсионным моментом.

При этом следует уточнить, что использование терминов *синхронность* и *синфазность* относительно сигналов с датчиков 1 и 2 правомерно только при постоянном торсионном моменте на валах, соединённых муфтой 9, так как в противном случае синхронность и синфазность нарушаются.

Далее сохранившие фазовый сдвиг сформированные частотно-модулированные сигналы ГКЧ (опорный с датчика 1 с частотой  $f_o(t)$  и сдвинутый вследствие углового рассогласования ведущего и ведомого валов муфты 9, сигнал с датчика 2 с частотой  $f_c(t)$ ) подают на измеритель углового рассогласования ведущего и ведомого валов 7 (рис. 1). В измерителе на выходе смесителя установлен фильтр низкой частоты (ФНЧ) с полосой пропускания  $\Delta F_0 = F_{60\max}$  (рис. 2).

Выход ФНЧ соединен с входом счетчика частоты биений, преобразующий частоту биений в значения углового рассогласования ведущего и ведомого валов соединительной муфты 9. Счётчик состоит из формирователя прямоугольных импульсов, длительность которых соответствует половине периода частоты биений, и высокостабильного генератора тактовых импульсов (ГТИ) с тактовой частотой порядка 100 МГц. Использовать более высокую частоту нецелесообразно из-за погрешности фотоэлектрических датчиков 1 и 2.

Поскольку условие линейной зависимости угла рассогласования муфты 9 от изменения момента на муфте сохраняется, то число импульсов ГТИ, занесённых в счётчик, пропорционально углу  $\Delta\varphi$  закручивания муфты. Результат вычисления углового рассогласования ведущего и ведомого валов соединительной муфты 9 в виде значений угла  $\Delta\varphi$  индицируется индикатором.

Мгновенная частота биений равна абсолютному значению разности мгновенных значений частот опорного и смещенного сигналов

$$|F_6(t)| = |f_o(t) - f_c(t)|,$$

хотя формально можно учитывать знак частоты  $F_6(t)$  [14 -16].

Изложенное иллюстрируется на рис. 2, б, в. Частота биений, которая в течение большей части периода модуляции  $T_m = T_{вр}$  остается постоянной, является основной.

Ее значение, как видно из рис. 1, а и формулы (1), равно  $F_{60} = \beta t_s$ , где  $\beta = \frac{df_o}{dt} = 2\Delta f_m F_m$  - скорость изменения частоты ГКЧ;  $\Delta f_m$  - девиация частоты;  $F_m = F_{вр}$  - частота модуляции.

Из приведённого рассмотрения следует, что при изменении вязкости МРЖ под действием магнитного поля изменяется частота ГКЧ, частота которого модулируется частотой  $\Omega_2$  ведомого вала. Это указывает на деформацию соединительной муфты 9 или на проскальзывание ведомого вала [10].

Крутящий момент на вращающемся ведомом валу соединительной муфты 9 определяется выражением

$$M_{кр} = \frac{\Delta\varphi}{H} GJ_p, \quad (2)$$

где  $\Delta\varphi$  – угол относительного поворота коаксиальных цилиндров муфты (9);  $H$  – базовое



расстояние (длина) муфты;  $G, J_p$  – модуль сдвига материала и полярный момент сечений ведущего и ведомого валов соединительной муфты.

Далее можно определить крутящий момент на вращающемся ведомом муфтой валу [14-16]. С учетом выражения (2) крутящий момент на вращающемся ведомом валу соединительной муфты будет равен

$$M_{кр} = \frac{\Omega_{60}}{2\Delta f_m} \frac{GJ_p}{H} = \frac{2\pi F_{60}}{2\Delta f_m} \frac{GJ_p}{H}. \quad (3)$$

Приравнявая выражение (2) к выражению (3), получаем равенство

$$M_{кр} = \frac{\Delta\varphi}{H} GJ_p = \frac{2\pi F_{60}}{2\Delta f_m} \frac{GJ_p}{H} = \frac{F_{60}}{2\Delta f_m} 2\pi \frac{GJ_p}{H}, \quad (4)$$

где относительная величина  $\frac{F_{60}}{2\Delta f_m} 2\pi = \Delta\varphi$  в правой части есть угол относительного поворота коаксиальных цилиндров муфты, выраженный в радианах.

Используя равенство (4), можно определить динамическую вязкость  $\eta$  исследуемой МРЖ в соединительной муфте:

$$\eta = \left( \frac{F_{60}}{2\Delta f_m} 2\pi \frac{GJ_p}{H} \right) \cdot \left( \frac{l}{2\pi F_{вр} Sr} \right) = \frac{F_{60}}{2\Delta f_m} \frac{GJ_p}{H} \frac{l}{F_{вр} Sr}, \quad (5)$$

где  $\Omega_{вр} = 2\pi F_{вр}$  – угловая скорость вращения;  $S$  – рабочая площадь внутреннего воспринимающего цилиндра ведомого вала муфты;  $l$  – зазор между внешним и внутренним воспринимающим цилиндром;  $\eta$  – вязкость МРЖ.

### Заключение

Рассмотренный метод измерения торсионных моментов, возникающих на валах, соединенных магнитореологическими муфтами, электротехнических комплексов позволяет производить исследования рабочей жидкости с изменяющейся вязкостью на несколько порядков. Изменение вязкости МРЖ, заполняющей соединительную муфту, позволяет оценить степень надёжного сцепления ведущего и ведомого валов исполнительных механизмов с электротехническими комплексами.

*Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект №15-19-10026).*

### Библиографический список

1. Шульман, З.П. Магнитореологический эффект / З.П. Шульман, В.И. Кордонский. – Минск: Наука и техника, 1982. – 184 с.
2. Борин, Д.Ю. Инженерное образование. Наука в образовании / Д.Ю. Борин, В.П. Михайлов, А.М. Базиненков. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – №10. – 9 с.
3. Системы виброзащиты с использованием инерционности и диссипации реологических сред / Б.А. Гордеев [и др.]. – М.: Физматлит, 2004. – 175 с.
4. Башта, Т.М. Машиностроительная гидравлика / Т.М. Башта. – М.: Машиностроение, 1971. – 672 с.
5. Гордеев, Б.А. Применение магнитореологических жидкостей в машиностроении / Б.А. Гордеев [и др.] // Приволжский научный журнал. – 2014. – № 4. – С. 29–42.
6. Гордеев, Б.А. Течение и релаксация магнитореологической жидкости в дроссельных каналах гидроопор / Б.А. Гордеев [и др.] // Вестник машиностроения. – 2015. – №7. – С. 32–38.
7. Морозов, Н.А. Нанодисперсные магнитные жидкости в технике и технологиях / Н.А. Морозов, Ю.Б. Казаков. – Иваново: Иван. гос. энерг. ун-т, 2011. – 264 с.
8. Соловьев, С.Н. Особенности проектирования исполнительных органов механотронных



- систем с магнито-реологическими средами / С.Н. Соловьев, А.Н. Гурский // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2007. – № 8. – С. 145–149.
9. **Соловьев, С.Н.** Улучшение рабочих характеристик электромагнитных муфт / С.Н. Соловьев, А.Н. Гурский // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2009. – № 7 (64). – С. 75–77.
  10. **Сизов, А.П.** Разработка и исследование магнито-жидкостных муфт / А.П. Сизов, Ю.И. Малков // *Магнитные жидкости: научные и прикладные исследования: сб. науч. тр.* - Минск, 1983. – С. 103–113.
  11. **Гордеев, Б. А.** К вопросу создания цилиндрического магнито-реологического трансформатора в ортогональных магнитных полях / Б.А. Гордеев [и др.] // *Проблемы машиностроения и надёжности машин*. – 2014. – № 2. – С. 15–21.
  12. **Крутоголов, В.Д.** Ротационные вискозиметры / В.Д. Крутоголов, М.В. Кулаков. – М.: Машиностроение, 1984. – 112 с.
  13. **Корганова, О.Г.** Ротационный вискозиметр / О.Г. Корганова, В.А. Кузнецов // *Вестник самарского государственного технического университета. Технические науки. Информационные технологии*. – 2012. – №1 (33). – С 55–60.
  14. Частотный метод измерения крутящего момента вращающихся валов / Б.А. Гордеев [и др.] // *Вестник машиностроения*. 2015. – № 2. – С. 3–7.
  15. Частотный метод измерения деформации кручения на вращающихся валах машин и механизмов / Б.А. Гордеев [и др.] // *Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. Надёжность и ресурс в машиностроении*. – 2006. – Вып. 16. – С. 62–70.
  16. Пат. Способ определения крутящего момента / С. Н. Охулков. № 2196309 от 10.01.2003. Заявка № 2000110472 от 24.04.2004.
  17. **Викторов, В. А.** Радиоволновые измерения параметров технологических процессов / В. А. Викторов, Б. В. Лункин, А. С. Совлуков. – М.: Энергоиздат, 1989. – 208 с.
  18. **Ганзбург, Л. Б.** Проектирование электромагнитных и магнитных механизмов: справочник / Л. Б. Ганзбург, Л. А. И. Федотов. – Л.: Машиностроение (Ленингр. отд-ние), 1980. – 364 с.

*Дата поступления  
в редакцию 25.07.2017*

**Gordeev B.A.<sup>1,2</sup>, Okhulkov S.N.<sup>1,2</sup>, Osmekhin A.N.<sup>3</sup>, Plekhov A.S.<sup>2</sup>**

**MEASUREMENT OF THE TORSION MOMENTS ON SHAFT  
OF THE ELECTROTECHNICAL COMPLEXES CONNECTED  
BY THE MAGNETORHEOLOGICAL CLUTCH, THE FREQUENCY METHOD**

Institute of problems of mechanical engineering of the Russian Academy of Sciences<sup>1</sup>,  
The Nizhny Novgorod state technical university of R. E. Alekseev<sup>2</sup>,  
JSC Experimental Design Bureau of Mechanical Engineering of I. I. Afrikantov<sup>3</sup>

**Object of probe:** – electrotechnical complexes

**Purpose:** probe of the torsion moments in the systems connecting electrotechnical complexes.

**Results:** the mode of measurement of the torsion moments by a frequency mode the Scope is developed: control systems of operation of the executive gears connecting electrotechnical complexes to the power setting generators and consumers.

*Key words:* magnetorheological transformer; magnetorheological liquid; throttle port; temporary magnet winding; the induced impulses; the internal steering magnetic field.

УДК 681.514

А.И. Ермолаев, А.С. Плехов, В.Ф. Стрелков, Д.Ю. Титов

**АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ВИБРОЗАЩИТНЫМИ  
ГИДРООПОРАМИ С МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИМ ТРАНСФОРМАТОРОМ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Дано определение виброизолятора, рассмотрены типы виброизоляторов, их области применения, показаны преимущества управляемых виброизоляторов и адаптивного управления виброизолятором с магнитореологическим трансформатором.

*Ключевые слова:* виброзащита, адаптивная система управления виброизолятором, натурное испытание гидроопоры.

**Введение**

Виброизолятор – это средство ослабления вибрации, применяемое в тех случаях, когда между источником вибрации и защищаемым объектом (конструкцией) допустимо соединение в дискретном количестве мест.

Область применения виброизоляторов весьма обширна и включает в себя транспортные амортизаторы, промышленные виброизоляторы, которые позволяют улучшить качество обработки деталей на металлорежущих станках и снизить потери электроэнергии в электромеханических приводных и генерирующих установках, а также системы виброзащиты оптических приборов и строительных конструкций. Для высокоточного оборудования и оборудования специального назначения целесообразно использовать системы, обладающие несущей способностью с возможностью управления колебаниями системы за счет изменения жесткости исполнительного элемента и степени демпфирования колебаний. Изменять и жесткость, и коэффициент демпфирования возможно посредством применения управляемых магнито-реологических демпферов.

Вопросы теоретического исследования таких устройств затрагиваются в работах Гордеева Б.А., Гусарова В.И., Ерофеева В.И., Ковтунова А.В., Морозова П.Н., Мугина О.О., Мулюкина О.П., Синева А.В., а также в работах зарубежных ученых Nicholas K.Petek, Choi Seung-Bok, Cristiano Spelta, Fabio Previdi, Sergio M. Savaresi, Giuseppe Fraternali, Nicola Gaudio и др.

Анализ публикаций по проблеме проектирования и исследования активных систем виброзащиты промышленного назначения показывает, что широко используемыми являются системы с гидравлическим исполнительным элементом [1, 2].

К настоящему времени реже используются электротехнические системы активной виброзащиты на основе электромеханических преобразователей. Это объясняется тем, что в них электротехнические исполнительные устройства применяются лишь в качестве органа регулирования в несущих исполнительных элементах жесткости.

В статье рассматривается виброизолятор в виде гидравлического амортизатора - гидроопоры. Управляемые виброизоляторы позволяют, в отличие от конструктивно настроенных гидроамортизаторов, обеспечить широкий диапазон частот гашения, постоянство характеристик при изменении условий окружающей среды и нагрузки, которая может изменяться как по величине, так и продолжительности.

Особенно актуально использование управляемых гидроопор для виброзащиты электромеханических комплексов с изменяемой массой или моментом инерции приводимого механизма либо с регулируемой частотой вращения выходного вала. Это относится и к генерирующим электромеханическим комплексам с переменной нагрузкой или переменной частотой вращения. Например, к таким комплексам относятся ветроэнергетические установки или дизель-электрические станции [3, 4].

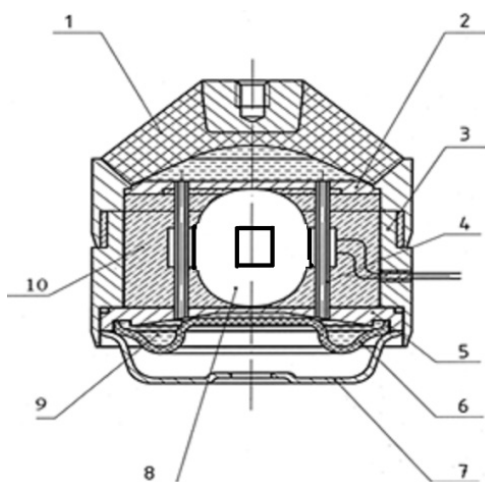
Авторы статьи предлагают адаптивную систему управления виброизолятором, позво-

ляющую автоматически настраивать его параметры на частоту, преобладающую в общем спектре вибровозмущения.

### Математическая модель управляемого виброизолятора и конструктивная реализация

При описании динамического поведения сложные конструкции, подверженные вибровозмущениям, можно рассматривать как систему масс, соединенных с помощью пружин и демпфирующих элементов. Поскольку силы демпфирования для реальной конструкции нельзя оценить с такой же точностью, как упругие силы и силы инерции, то строгое математическое моделирование явлений демпфирования невозможно. Для объяснения диссипативных сил, присутствующих в любой конструкции, следует сделать предположение о виде демпфирования. Это вид должен способствовать использованию простых математических операций, применяемых к линейным уравнениям движения [5].

Гидравлические виброопоры (гидроопоры) объединяют в себе упругий резиновый элемент и гидравлический гаситель колебаний, как показано на рис. 1.



**Рис. 1. Разрез виброзащитной управляемой гидроопоры:**

1 – резиновая обечайка – упругий элемент; 2 и 5 – несущие перегородки; 3 – корпус; 4 – демпферный канал; 6 – мембрана; 7 – поддон для крепления; 8 – катушка возбуждающего электромагнита магнито-реологического трансформатора; 9 – магнито-реологическая жидкость; 10 – крепящие элементы конструкции

В конструкции нет трущихся частей с фрикционным сухим контактом. Изменение объемов полостей с жидкостью происходит за счет деформации эластичной обечайки гидроопоры. В качестве компонентов трения выступают конструкционное трение в резине и гидравлическое вязкое сопротивление жидкости.

Диссипация (рассеивание) энергии колебаний в гидравлических опорах происходит в жидкости, заполняющей внутренние полости конструкции. Перемещение жидкости из одной полости (камеры) в другую сопровождается трением слоев, при котором выделяется тепловая энергия и совершается работа. Тепловая энергия далее рассеивается в окружающую среду через металлические корпусные детали гидроопоры.

Совершенствование гидроопор для гашения вибрации и шума связано с использованием магнито-реологических трансформаторов [6, 7]. Эти устройства не являются демпферами или виброизоляторами, а позволяют посредством магнитного поля изменять вязкость магнито-реологической жидкости в демпферных каналах виброизоляторов. Адаптивные системы управления магнито-реологическими трансформаторами гидроопор дают возможность изменять передаточные функции виброизоляторов, благодаря чему частотный диапазон эффективного применения расширяется в 2-5 раз.

Система управления магнито-реологическим трансформатором гидроопоры (далее – гидроопорой) должна реализовать следующие функции:

- выделить основную превалирующую частоту ослабляемых вибровозмущений;
- оценить степень ослабления гидроопорой уровней вибровозмущений;
- сформировать сигнал управления вязкостью жидкости в демпферном канале магнито-реологического трансформатора.

Для выполнения этих функций система управления должна содержать: датчики вибро-возмущений, полосовые частотные фильтры, систему обработки сигналов с выходов указанных фильтров, силовой полупроводниковый преобразователь частоты с блоками управления силовыми ключами.

### Адаптивная система управления виброзащитной гидроопорой

Рассмотрим особенности использования разработанных моделей. Как следует из изложенного, возможно управлять динамическими свойствами системы, используя различные подходы:

- изменять настройку системы за счет задания определенного тока управления демпфера;
- использовать канал управления током демпфера, реализуя замкнутую систему регулирования с помощью стабилизирующей обратной связи, например, по ускорению.

Первый случай соответствует управлению по разомкнутому циклу. Во втором случае в активной системе виброзащиты управление током в обмотке демпфера осуществляется в функции координат (перемещение, скорость, ускорение) виброзащищаемого объекта, то есть значение коэффициента гидравлического сопротивления, в отличие от предыдущей модели, изменяется в процессе управления.

Для решения задачи снижения вибрации электромеханического комплекса на резонансной частоте предлагается использовать систему автоматического управления МРТ гидроопоры, принцип действия которой поясняется на рис. 2.

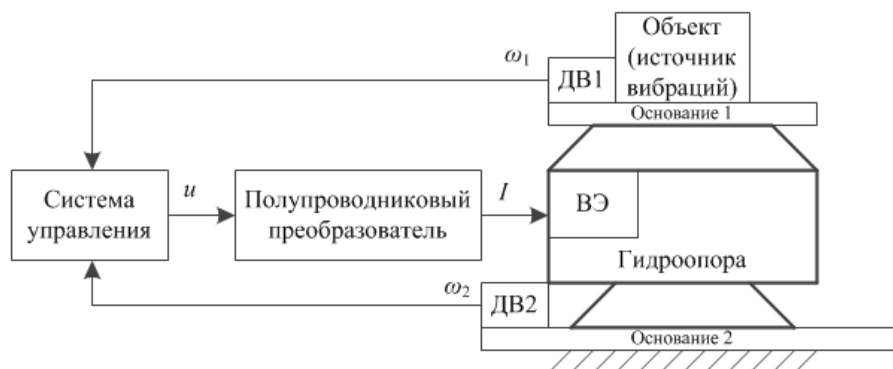


Рис. 2. Функциональная схема системы автоматического управления виброзащитной гидроопорой

На вход системы управления поступает информация о текущих колебаниях  $\omega_1$  с датчика вибраций (ДВ), установленного на гидроопоре - основании 1, на котором размещен источник вибрации. Датчик вибраций  $I$  может транслировать один из сигналов, которые пропорциональны перемещению, скорости или ускорению. Этот информационный сигнал обычно представляет собой сумму гармонических колебаний на частотах от 5 до 100 Гц.

Управляемую гидроопору можно представить как полосно-заграждающий фильтр. Частота настройки гидроопоры является частотой, которую подавляет полосно-заграждающий фильтр. Так как реальная гидроопора имеет резиновую обечайку, которая гасит высокочастотные гармоники, то гидроопору можно представить как последовательное соединение двух звеньев: полосно-заграждающего фильтра и передаточной функции резиновой обечайки.

Расчет передаточной функции гидроопоры  $W_d$  производился согласно выражению:

$$W_d = W_f \cdot W_a = \frac{r_0 s^2 + r_0 \omega_t^2}{s^2 + b \omega_t s + \omega_t^2} \cdot \frac{0,003s + 1}{0,005s + 1},$$

где  $W_f$  – передаточная функция полосно-заграждающего фильтра;  $W_a$  – передаточная функция обечайки;  $r_0$  – коэффициент усиления;  $b$  – ширина заграждения;  $\omega_i$  – частота настройки гидропоры.  
 ЛАЧХ и ЛФЧХ гидропоры показаны на рис. 3.

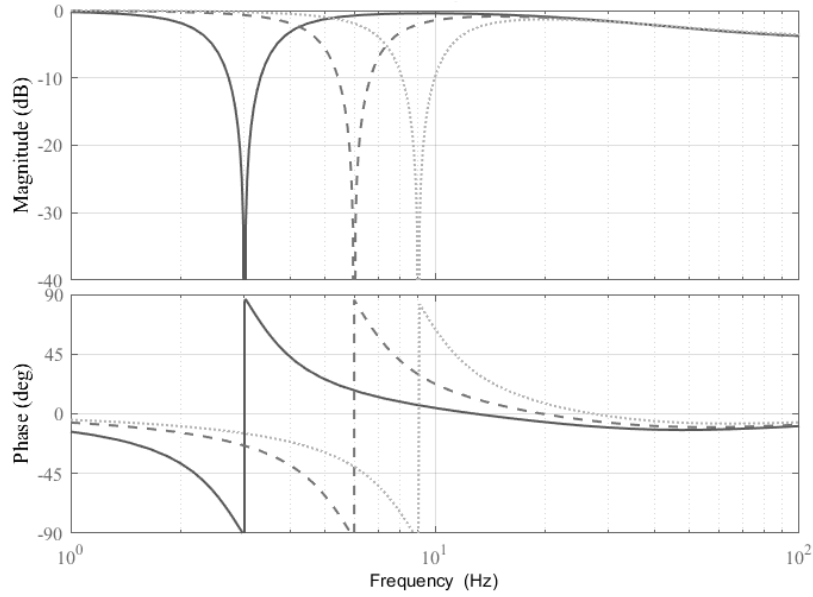


Рис. 3. ЛАЧХ и ЛФЧХ гидропоры, настроенной на 3, 6 и 9 Гц

Система обработки сигналов от вибродатчиков представлена на рис. 4. Она использует более простые алгоритмы, чем Фурье-анализ [10, 11].

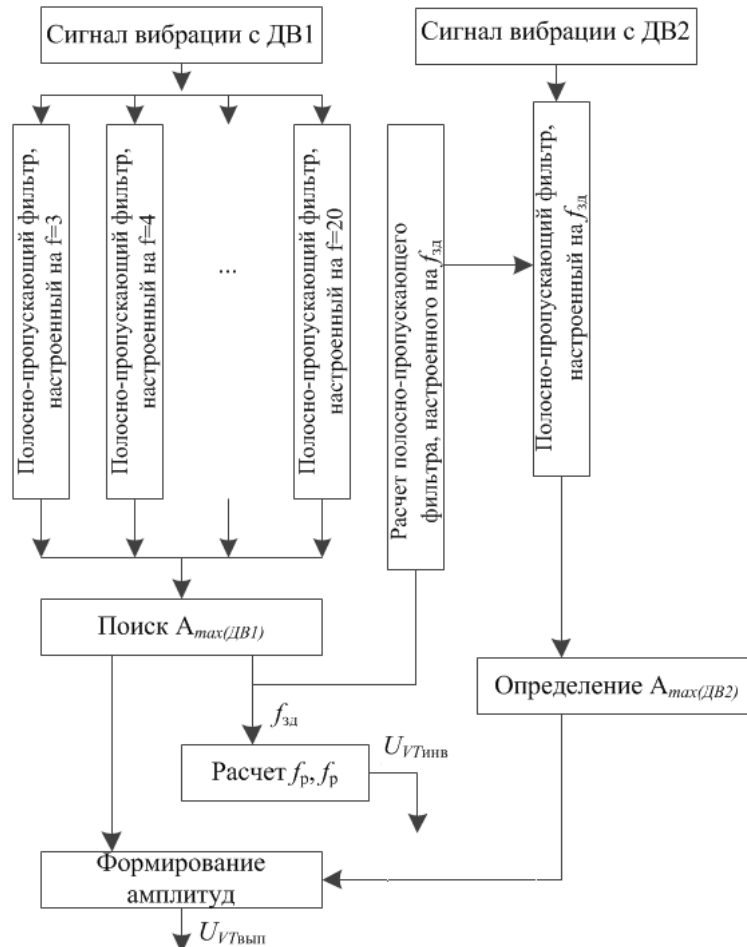


Рис. 4. Функциональная схема системы управления

Сигнал вибраций поступает на цифровые полосно-пропускающие фильтры в системе управления, настроенные с кратностью  $f$  от 3 до 20 относительно опорной частоты. Эти фильтры рассчитываются по соотношению

$$W_{pf} = \frac{r_0 \omega_t s}{s^2 + b \omega_t s + \omega_t^2},$$

где  $W_{pf}$  – передаточная функция полосно-пропускающего фильтра;  $r_0$  – коэффициент усиления;  $b$  – ширина пропускания;  $\omega_t = 0,2 \cdot \pi \cdot f$  – частота настройки.

На рис. 5 показаны ЛАЧХ полосно-пропускающих фильтров, настроенных на разные частоты (3, 6 и 9 Гц).

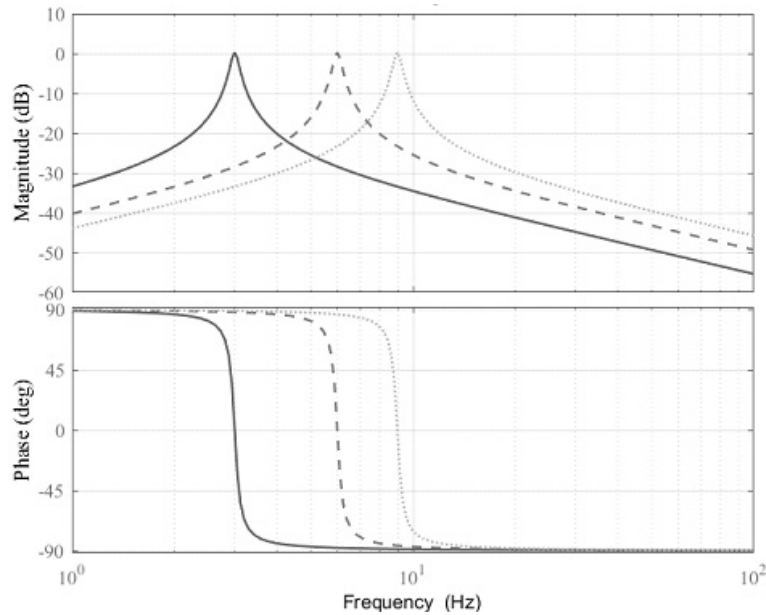


Рис. 5. ЛАЧХ полосно-пропускающих фильтров

Далее происходит сравнение выходных сигналов полосно-пропускающих фильтров для определения наибольшей амплитуды в заданном диапазоне частот. Система управления производит настройку гидропоры на частоту с наибольшей амплитудой и формирует сигнал  $u$ , управляющий ключами полупроводникового преобразователя. Под действием магнитного поля каналы, по которым протекает магнитная жидкость, «открываются» и «закрываются», т.е. преобразователь питает возбуждающий электромагнит (ВЭ) током намагничивания  $I$ , который влияет на вязкость магнитной жидкости.

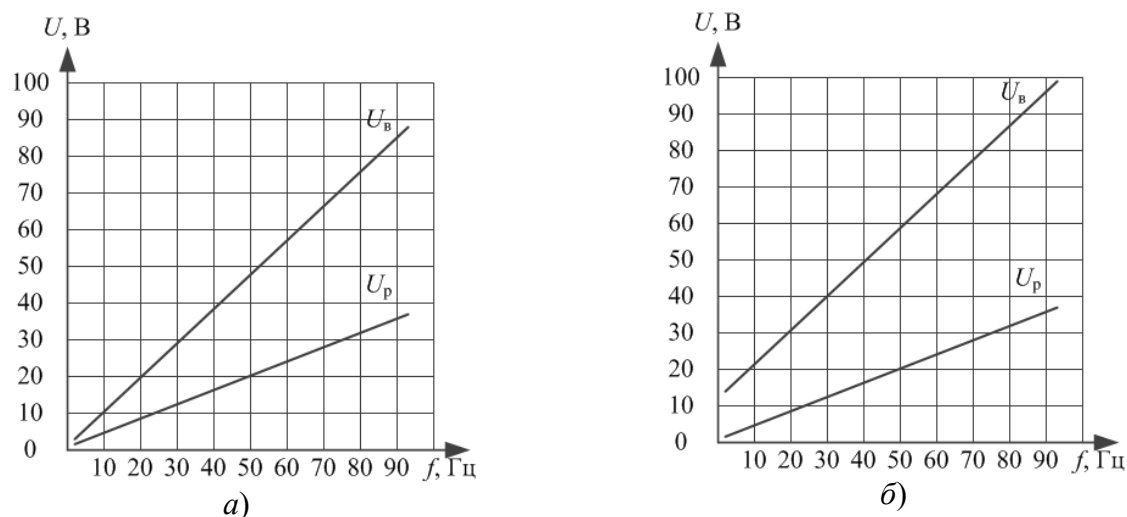
Блок «Поиск  $A_{\max}$ » выполняет поиск наибольшей амплитуды  $A_{\max}$  и соответствующего этой амплитуде значения частоты  $f_{зд}$ . Значение  $A_{\max(ДВ1)}$  и  $A_{\max(ДВ2)}$  поступает на блок формирования амплитуды, где происходит расчет необходимого напряжения в звене постоянного тока преобразователя и формируется сигнал управления ключами выпрямителя  $U_{VT\text{выпр}}$ . Значение  $f_{зд}$  поступает на блок расчета  $f_b, f_p$ , где происходит вычисление частот и длительностей сигналов возбуждения и размагничивания и формируется сигнал управления ключами инвертора  $U_{VT\text{инв}}$ .

Кроме датчика вибрации, установленного на гидропоре, используется второй датчик вибрации, установленный на основании 2. Сигнал вибрации с этого датчика необходим для оценки качества виброгашения. Сигнал с датчика вибрации  $\omega_2$  поступает на полосно-пропускающий фильтр. Частота пропускания этого фильтра равна частоте настройки гидропоры, и в системе управления анализируется амплитуда выходного сигнала. Это значение амплитуды может быть добавлено к максимальной амплитуде сигнала с частотой  $\omega_2$ , выделенной из спектра частот сигнала от первого датчика для более эффективного виброгашения. При этом частота настройки гидропоры не изменяется (рис. 6, а), а увеличивается напряжение возбуждения электромагнита (рис. 6, б).



В процессе управления МРТ гидропоры на обмотку возбуждающего электромагнита подается двухполярное напряжение возбуждения  $U_B$ , величина и частота  $f_B$  которого определяется системой управления.

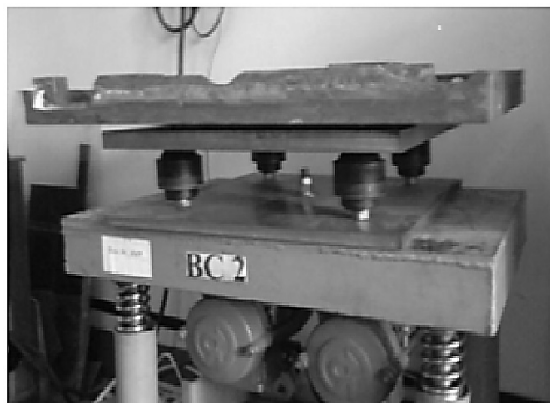
Особенностью изменения управляющего напряжения возбуждения  $U_B$  при постоянных магнитных потоках в МРТ, заполненных магнитореологической жидкостью, является его изменение по линейному закону от значений частоты перестройки  $f_B$  (рис. 6).



**Рис. 6. Изменения напряжений возбуждения/размагничивания сердечников ВЭ и магнитной жидкости в зависимости от значений частоты перестройки  $f_B$ :**  
*a* – без использования ДВ2; *б* – при использовании ДВ2

### 3. Натурные испытания гидропоры с адаптивной системой управления магнитореологическим трансформатором

Центробежный вибростенд, предназначенный для испытаний на виброгашение, содержит механическую оснастку, позволяющую крепить различные типы гидропор с МРТ для измерения динамических АЧХ и ФЧХ в трех взаимно перпендикулярных направлениях по осям  $z$ ,  $y$ ,  $x$ . На центробежном вибростенде создается периодическая вибрация, имитирующая транспортную тряску. Фотография четырёх гидропор под нагрузкой в 108 кг на вибростоле вибростенда приведена на рис. 7.



**Рис. 7. Фотография четырёх гидропор под нагрузкой с массой в 108 кг на вибростенде**

Источником колебаний вибростола являются два электромеханических вибратора, которые возбуждают дебалансами широкополосную низкочастотную вибрацию. Особенность низкочастотной вибрации состоит в том, что она слабо затухает в пространстве и, следовательно, в точку установки вибродатчика доходит вибрация от всех узлов вибростенда. В результате в



контрольной точке вибростола или в контрольной точке нагрузки виброизоляторов проявляется широкополосная низкочастотная случайная вибрация, которая характеризуется, как правило, большим количеством гармонических составляющих в области низких частот [12].

Сигналы вибрации, поступающие на ПЛИС, приведены на рис. 8, 10 и 12. Сигналы с основания – источника вибровозмущений –  $vibro_1$  содержат основные гармоники на частотах соответственно 3, 6 и 9 Гц (рис. 8, *a*, рис. 10, *a* и рис. 12, *a*). На рис. 8, *б*, рис. 10, *б* и рис. 12, *б* представлены осциллограммы вибросигналов на защищаемом объекте –  $vibro_2$ .

Спектры измеренных сигналов виброускорений показаны на рис. 9, 11 и 13. Они иллюстрируют возможность использования адаптивной системы управления магнитоэрологическим трансформатором гидроопоры, предложенной авторами.

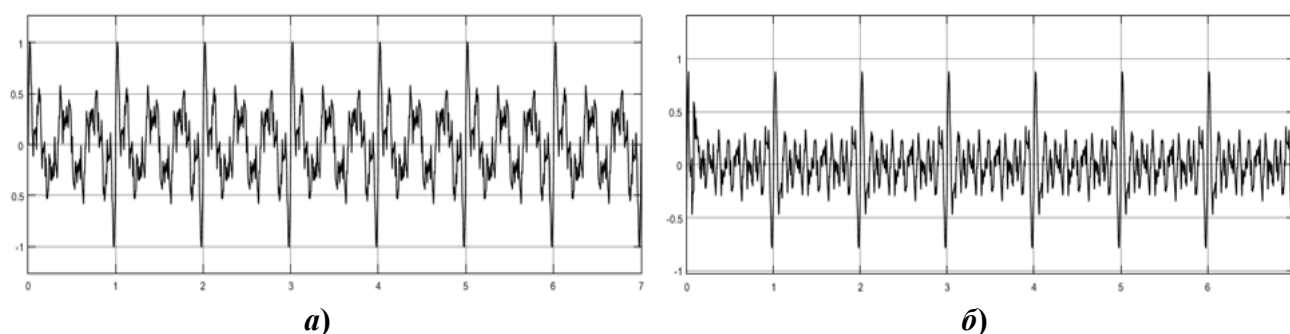


Рис. 8. Сигналы вибрации: *a* –  $vibro_1$ ; *б* –  $vibro_2$  с датчиков при основной частоте  $f_1 = 3$  Гц

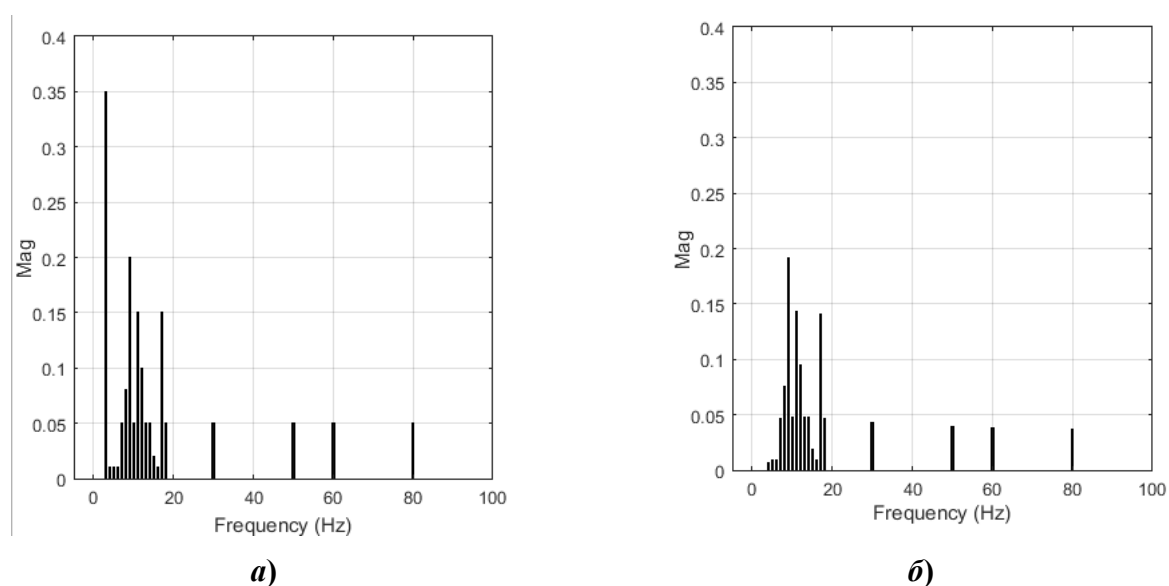


Рис. 9. Спектр сигналов вибрации: *a* –  $vibro_1$ ; *б* –  $vibro_2$

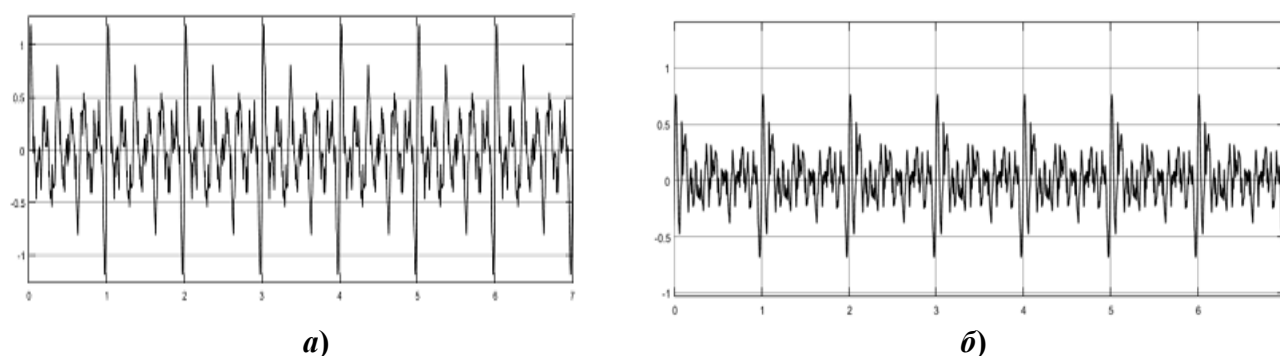


Рис. 10. Сигналы вибрации:  
*a* –  $vibro_1$ ; *б* –  $vibro_2$  с датчиков при основной частоте  $f_1 = 6$  Гц

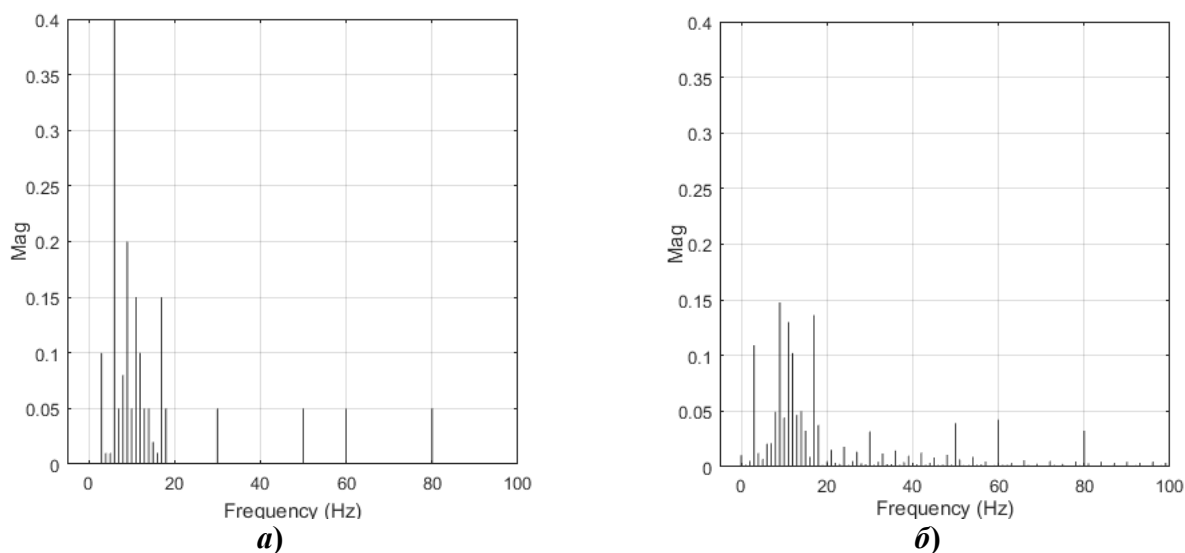


Рис. 11. Спектр сигналов вибрации:  $a - vibro_1$ ;  $b - vibro_2$

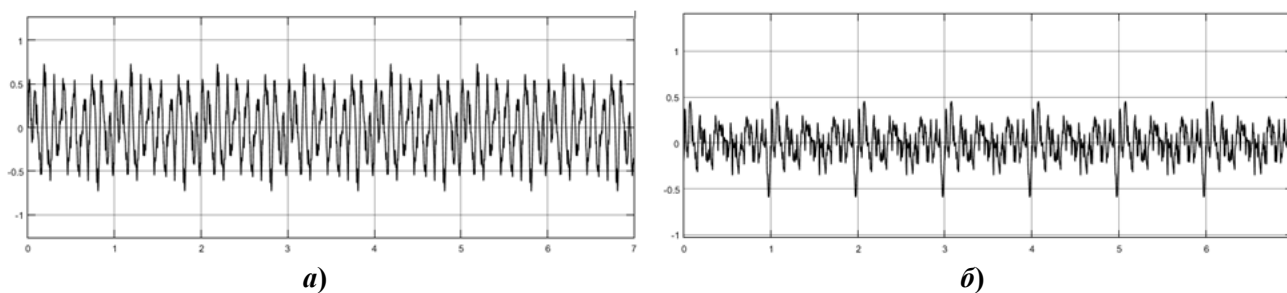


Рис. 12. Сигналы вибрации:  $a - vibro_1$ ;  $b - vibro_2$  с датчиков при основной частоте  $f_1 = 9$  Гц

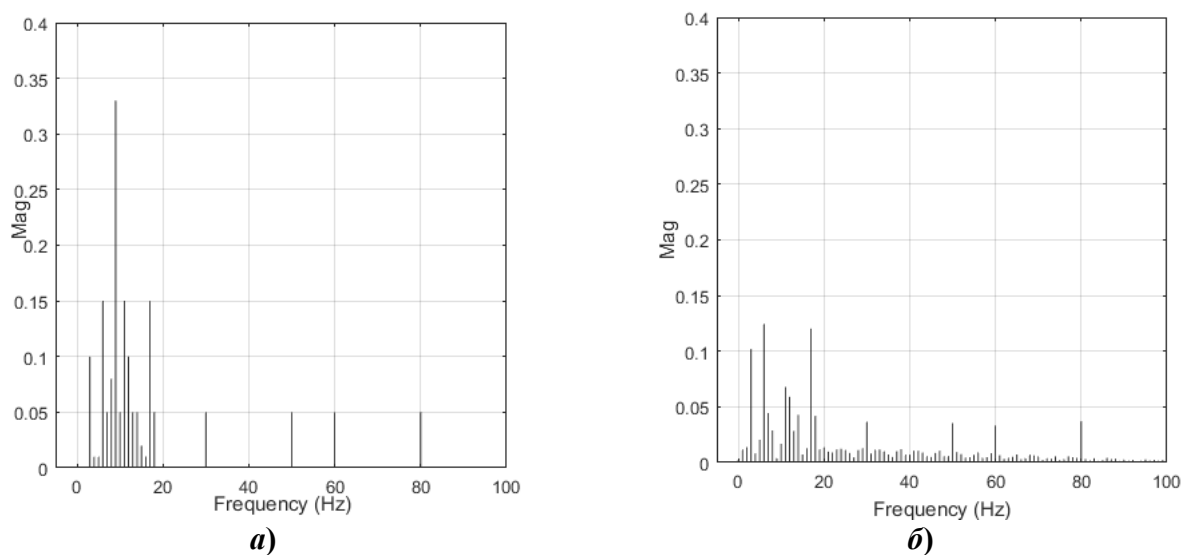


Рис. 13. Спектр сигналов вибрации:  $a - vibro_1$ ;  $b - vibro_2$

### Заключение

Авторы считают, что дальнейшее решение проблемы виброзащиты машин и агрегатов связано с внедрением гидроопор с магнитореологическими трансформаторами и систем автоматического управления гидроопорами. Приведено описание элементов системы виброзащиты, разработана математическая модель гидравлической виброопоры с параметрическим

управлением, предложена структура и алгоритм работы адаптивной системы управления магнитореологического трансформатора виброзащитной гидропоры. Эта система управления позволяет автоматически производить перенастройку гидропоры на диапазон частот, соответствующий преобладающей частоте в спектре вибровозмущений.

Показаны порядок разработки конструкции и этапы использования метода модельно-ориентированного проектирования цифровой системы управления. Разработанная адаптивная система управления гидропорой с магнитореологическим трансформатором при экспериментальном исследовании показала работоспособность в актуальном диапазоне частот вибровозмущений.

*Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект №15-19-10026).*

### Библиографический список

1. **Абакумов, А. М.** Электромеханические системы виброзащиты прецизионных объектов с использованием нейронных сетей / А.М. Абакумов, Г.Н. Мятлов, А.А. Винокуров // *Электротехника*. – 2008. – № 8. – С. 57–61.
2. **Израилович, М.Я.** Активное виброгашение вынужденных колебаний с использованием параметрического и силового воздействий / М.Я. Израилович, А.А. Гришаев. – М.: ЛИБРОКОМ, 2012. – 80 с.
3. **Feng, N.S.** Simulation of vibration signals from a rolling element bearing defect / N.S. Feng, E.J. Hahn, R.B. Randall. – Sydney: University of new south wales, 2004.
4. **Zhou, Q.** Semi-active control of three-dimensional vibrations of an inclined sag cable with magnetorheological dampers / Q. Zhou, S.R.K. Nielsen, W.L. Qu // *Journal of Sound and Vibration*. – 2006. – V. 296. – Is. 1-2. – P. 1–22.
5. **Guo, S.** Dynamic modeling of magnetorheological damper behaviors / S. Guo, S. Yang, C. Pan // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. – 2006. – V. 17. – Is. 3. – P. 3-14.
6. **Sahin, I.** Comparison of some existing parametric models for magnetorheological fluid dampers / I. Sahin, T. Engin, S. Cesmeci // *Smart Materials and Structures*. – 2010. – V. 19. – Is. 3. – P. 1–11.
7. **Snyder, R.A.** Characterization and analysis of magnetorheological damper behavior under sinusoidal loading / R.A. Snyder, G.M. Kamath, N.M. Wereley // *AIAA Journal*. – 2010. – V. 39. – Is. 7. – P. 1240–1253.
8. **Giuclea, M.** Model parameter identification for vehicle vibration control with magnetorheological dampers using computational intelligence methods / M. Giuclea, T. Sireteanu, D. Stancioiu, C.W. Stammers // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. – 2004. – V. 218. – Is. 7. – P. 569–581.
9. **Гордеев, Б.А.** Физические основы и конструкция индукционного магнитореологического трансформатора гидропор / Б.А. Гордеев [и др.] // *Прикладная механика и технология машиностроения*. – 2011. – №2. – С. 52–68.
10. **Tinghsu, S.** Suppression control method for torque vibration of AC motor utilizing repetitive controller with Fourier transform / S. Tinghsu [et al.] // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 2002. – V. 38. – Is. 5. – P. 1316–1325.
11. **Liao, W.H.** Harmonic analysis of a magnetorheological damper for vibration control / W.H. Liao, C.Y. Lai // *Smart Materials and Structures*. – 2002. – V. 11. – Is. 2. – P. 88–96.
12. **Охулков, С.Н.** Методы и устройства ослабления вибрации электромеханических комплексов: монография / С.Н. Охулков [и др.]; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород.: 2016. – 254 с.
13. **Гордеев, Б.А.** Оптимальное управление магнитореологическими трансформаторами гидропор в системах виброзащиты / Б.А. Гордеев [и др.] // *Прикладная механика и технология машиностроения*. – 2011. – №2. – С. 31–42.

*Дата поступления  
в редакцию 05.07.2017*

**A.I. Ermolaev, A.S. Plekhov, V.F. Strelkov, D.Y. Titov**

**ADAPTIVE CONTROL SYSTEM OF SHOCK ABSORBER WITH  
MAGNETOREOLOGICAL FLUID**

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

The field of application of vibration isolators is very extensive and includes transport shock absorbers, industrial vibration isolators that improve the quality of machining of parts on metal cutting machines and reduce power losses in electromechanical drive and generating units, as well as vibration protection systems for optical instruments and building structures. The article proposes an adaptive vibration control system. Adaptive control system allows automatically change the parameters of the shock absorber, tuning it to the frequency prevailing in spectrum of vibration disturbance. The design of a controlled shock absorber and the functional control scheme are considered is considered. The control system is based on the use of band-pass filters. The experimental study was performed on a shake table. The stand contains a mechanical rig that allows mounting different types of shock absorbers for measuring dynamic amplitude-frequency characteristics along the z, y, x axes. Oscillograms of vibration and their spectra at various disturbance frequencies are presented.

*Key words:* vibration protection, adaptive control system, shock absorber test.

УДК 621.396.677.833.2

К.И. Кисиленко, В.А. Малахов, А.С. Раевский, В.В. Щербаков

**РАСЧЕТ И ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ АНТЕННЫ КАССЕГРЕНА**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлены результаты расчета и измерения параметров антенны Кассегрена. Расчет электрических параметров антенны проводился с помощью пакета программ численного моделирования как единый проект, а для уменьшения времени расчета использовался трехэтапный метод. Результаты расчета согласуются с результатами измерений параметров антенны Кассегрена в СВЧ диапазоне на частоте 29 ГГц. По результатам проведенных исследований предложена методика расчета параметров антенны Кассегрена, позволяющая сократить время расчета и уменьшить затраты вычислительных ресурсов компьютера.

*Ключевые слова:* антенна Кассегрена, CST Microwave Studio, безэховая камера, диаграмма направленности, коэффициент усиления.

**Введение**

Антенна Кассегрена находит широкое применение в системах беспроводной связи. Основные геометрические параметры антенны приведены на рис. 1. Она состоит из рупорного облучателя, вспомогательного зеркала - субрефлектора в виде гиперboloида вращения и основного зеркала в виде параболоида вращения. Преимуществом антенны является небольшой продольный размер, технология их изготовления хорошо отработана [1, 2]. Она позволяет реализовать необходимые электрические параметры, поскольку можно управлять размерами и формой большего количества элементов (два зеркала, облучатель, расстояние между ними). Облучатель обычно размещают у вершины основного зеркала. Это укорачивает длину питающего фидера, что приводит к уменьшению массы антенны, потерь в фидере и снижению шумовой температуры.

**Расчет антенны Кассегрена**

Расчет, при заданных требованиях, начинают с определения параметров основного зеркала, затем субрефлектора совместно с облучателем. В качестве облучателей антенны Кассегрена обычно используются рупорные антенны и их модификации, так как они наиболее просты конструктивно, хорошо согласуются с питающим трактом, позволяют осуществить работу на двух линейных поляризациях, имеют фазовый центр, обладают широким рабочим диапазоном частот. Наибольшее применение получили пирамидальные и конические рупоры, причем коэффициент усиления рупорного облучателя выбирают так, чтобы обеспечить одинаковое затенение на основном зеркале субрефлектором и раскрытом облучателе. В этом случае антенна будет оптимизирована по коэффициенту использования поверхности (КИП).

Для расчета геометрических параметров антенны на начальном этапе проектирования используем метод геометрической оптики [3].

При заданном коэффициенте усиления антенны  $G$  диаметр большого зеркала находится по формуле  $D_m = (\lambda/\pi)Gv$ , где КИП антенны  $v = 0,5...0,7$ . Из соотношения  $f_m = (0,35...0,5)D_m$  выбираем фокусное расстояние большого зеркала. Используя формулу  $D_s \approx (2\alpha f_m)^{1/2}$ , рассчитаем диаметр вспомогательного зеркала  $D_s$ , где  $\alpha = 1,1...1,3$  – коэффициент, учитывающий амплитудное распределение поля в раскрытом облучателе. Площадь раскрытого облучателя у оптимизированной антенны Кассегрена будет равна  $(\pi D_s^2)/4$ . По формуле  $e = (4 f_m + D_m)/(4 f_m - D_m)$  найдем эксцентриситет гиперболы  $e$ . Половина угла раскрытого большого зеркала  $\psi_v$  и половина угла раскрытого вспомогательного зеркала  $\psi_r$  рассчитываются по формулам (1).

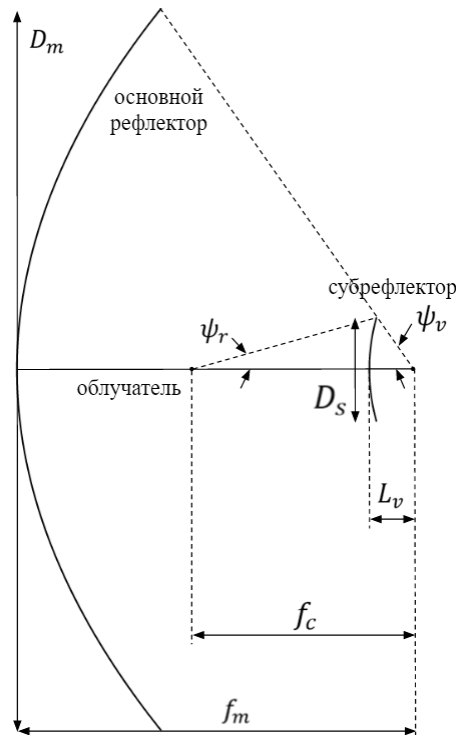


Рис. 1. Основные геометрические параметры антенны Кассегрена

$$\begin{aligned}
 \tan(\psi_v / 2) &= D_m / (4f_m), \\
 \tan(\psi_v / 2) / \tan(\psi_r / 2) &= 2f_c / D_s, \\
 1 - \frac{\sin((\psi_v - \psi_r) / 2)}{\sin((\psi_v + \psi_r) / 2)} &= 2L_v / f_c, \\
 (f_c - L_v) &= L_v (e + 1) / (e - 1).
 \end{aligned} \tag{1}$$

Дальнейший расчет электрических параметров и характеристик антенны Кассегрена проводим с использованием программы CST Microwave Studio [4], которая предназначена для численного моделирования высокочастотных устройств (антенн, фильтров, ответвителей мощности, планарных и многослойных структур).

Время расчета электрических параметров антенны Кассегрена на компьютере (параметры: 2 процессора Intel Xeon E5-2690 v2 3.0 GHz, оперативная память 256 Gb DDR3 1666 MHz, интегрированная видеокарта Intel HD Graphics, операционная система Windows 7 Pro) занимает порядка 4-5 ч. Для оптимизации, а также экономии времени и вычислительных ресурсов, расчеты проводились в несколько этапов.

На первом этапе моделировался рупорный облучатель, являющийся источником первичного электромагнитного излучения. При анализе полученных результатов вычисляется фазовый центр рупора, а ДН в дальней зоне сохраняется как источник поля.

Далее создается новый проект для расчета вспомогательного зеркала. На втором этапе, используя результаты вычислений облучателя, определяли токи на поверхности субрефлектора, через которые находится излучение, отраженное от субрефлектора. В проект импортируется ДН рупора в дальней зоне и помещается в фокус гиперболического зеркала, учитывая фазовый центр рупора. При анализе полученных результатов вычисляется фазовый центр системы, а ДН в дальней зоне сохраняется как источник поля.

В третьем проекте рассчитывается основное зеркало. В проект импортируется ДН в дальней зоне предыдущего проекта и помещается в фокус параболического зеркала, учитывая фазовый центр предыдущего проекта. На третьем этапе вычислялись токи на поверхности основного рефлектора, через которые определялось поле антенны Кассегрена в дальней зоне.



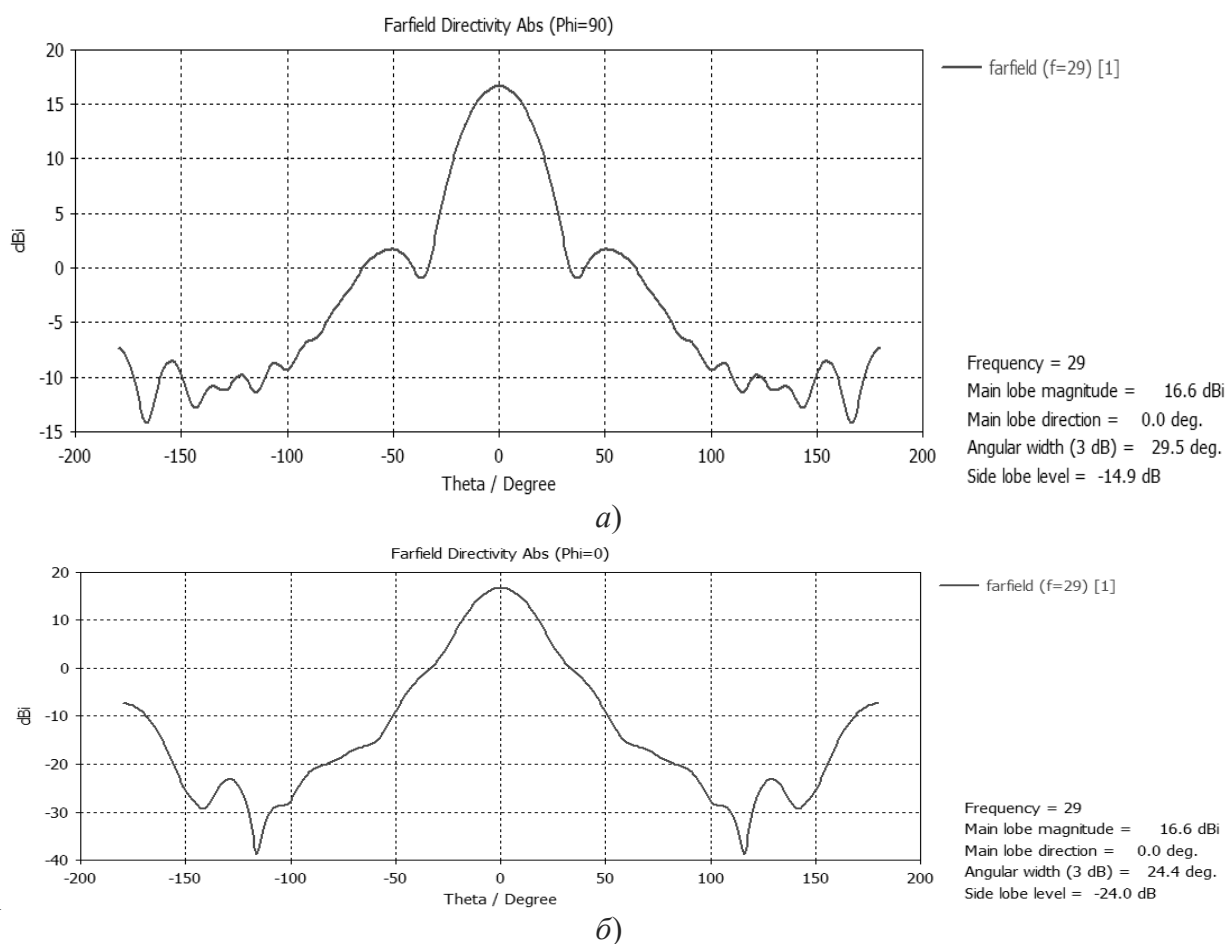
Суммарный расчет всех трех проектов занимает порядка 30 мин, что существенно быстрее расчета всей антенны Кассегрена как единого проекта.

Такой трехэтапной методикой была рассчитана антенна Кассегрена на частоту 290 ГГц [2]. Данная поэтапность позволяет существенно сократить время расчета, но не учитывает взаимного влияния зеркал. Для сравнения результатов расчета выполненных трехэтапным и одноэтапным методом был произведен расчет антенны Кассегрена без разбивки на этапы - как один проект.

В качестве исследуемой была выбрана антенна Кассегрена, используемая в частотном диапазоне 28-30 ГГц, имеющая диаметр основного и вспомогательного зеркал 190 и 39,6 мм соответственно. В качестве облучателя для антенной системы использовался пирамидальный рупор, питаемый прямоугольным волноводом сечением 7,2x3,4 мм.

Расчет рупора проводился в частотной области с использованием программы CST Microwave Studio на средней частоте 29 ГГц. Геометрические размеры этого облучателя подбирались из условия оптимальности. Питающий фидер длиной 10 мм. Длина пирамидального рупора 40 мм при раскрыве размерами 30,5 на 18,2 мм.

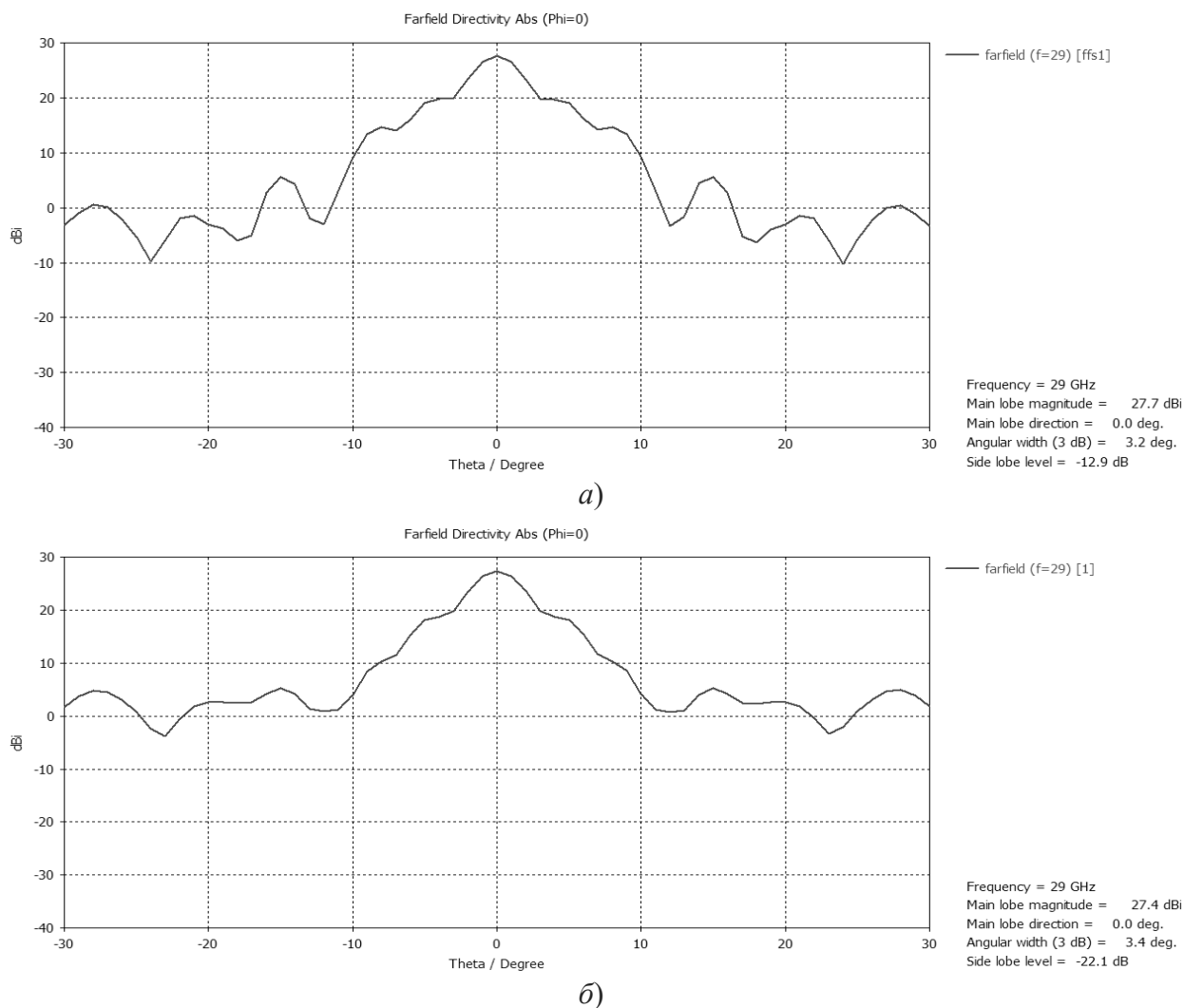
Результаты расчета диаграммы направленности в плоскостях  $E$  и  $H$  рупора приведены на рис. 2.



**Рис. 2. Диаграмма направленности пирамидального рупора:**  
 $a$  –  $E$ -плоскость;  $b$  –  $H$ -плоскость

Результаты расчета диаграммы направленности в  $H$ -плоскости исследуемой антенны Кассегрена, выполненные трехэтапным ( $a$ ) и одноэтапным ( $b$ ) методами расчета на частоте 29 ГГц, приведены на рис. 3. В  $E$ -плоскости диаграмма направленности принципиально не отличается от диаграммы направленности в  $H$ -плоскости, поэтому она здесь не приводится.

Как видно из графиков, результаты, полученные трехэтапным методом расчета коэффициента усиления антенны, дают больший на 0,3 дБ результат по сравнению с одноэтапным. Однако трехэтапный метод расчета не учитывает взаимного влияния зеркал антенны. Одноэтапный метод дает меньшее значение КУ, так как он учитывает многократные отражения от зеркал антенны, и благодаря дифракции все большая часть энергии будет рассеиваться, образуя боковые лепестки ДН антенны, уменьшая тем самым КУ антенны. Чтобы убедиться в правильности проводимых расчетов одноэтапным и трехэтапным методом, было принято решение сравнить результаты расчета с результатами экспериментальных исследований.



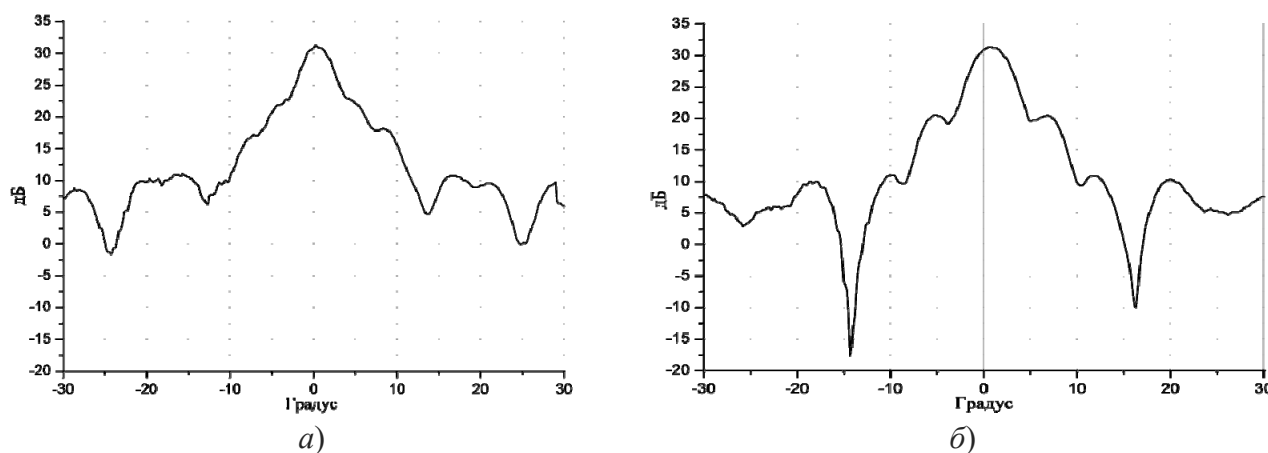
**Рис. 3. Диаграмма направленности антенны Кассегрена в  $H$  плоскости на частоте 29 ГГц:**  
*a* – трехэтапная методика расчета; *б* – одноэтапная

Экспериментальное исследование антенны проводилось по стандартизированной методике измерения в дальней зоне в безэховой камере [5] с коэффициентом безэховости не хуже минус 40 дБ. Шаг измерения ДН составлял 10 угловых минут. Настройка антенны на максимальное значение КУ проводилась регулировкой субрефлектора по трем координатам. Результаты экспериментального исследования исследуемой антенны приведены на рис. 4.

Результаты эксперимента отличаются от результатов расчета для коэффициента усиления трехэтапным методом не более 3 дБ, а от одноэтапного не более 3,3 дБ.

Сравнение результатов расчета и измерений параметров антенны дает возможность предложить процедуру расчета антенны Кассегрена, позволяющей экономить время расчета

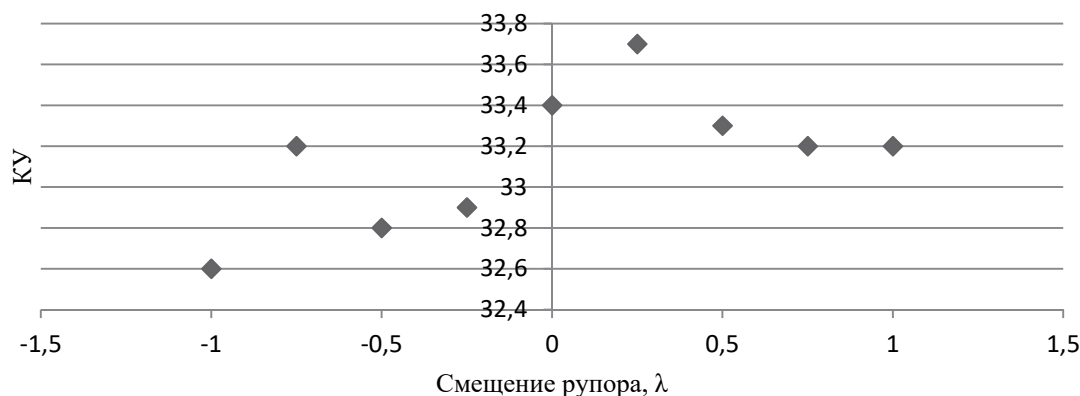
и вычислительные ресурсы компьютера. Сначала методом геометрической оптики, исходя из требуемого коэффициента усиления, выполняется расчет геометрических параметров антенны. Затем выполняется расчет облучателя антенны на основе условия одинакового затенения создаваемого раскрытом облучателя и субрефлектором. Далее с помощью трехэтапной методики выполняется расчет геометрических параметров антенны, при этом добиваются требуемого значения коэффициента усиления. Заключительным шагом является расчет с помощью одноэтапной методики с целью получения более точного значения КУ антенны.



**Рис. 4. Измеренная диаграмма направленности антенны Кассегрена на частоте 29 ГГц:**  
*а* – *E*-плоскость; *б* – *H*-плоскость

Следует отметить, что используемые при расчете программы позволяют моделировать дефекты или возможные смещения элементов антенны друг относительно друга, которые могут возникнуть в реальной ситуации при ее настройке. В результате можно определить диапазон смещений элементов антенны, при которых это не приводит к выходу параметров антенны за предельно допустимые границы.

На рис. 5 приведена зависимость влияния на КУ антенны Кассегрена изменения расстояния между рупором и субрефлектором. Показано, что при смещении на расстояние, равное длине волны, КУ изменяется на 0,5 – 0,8 дБ.

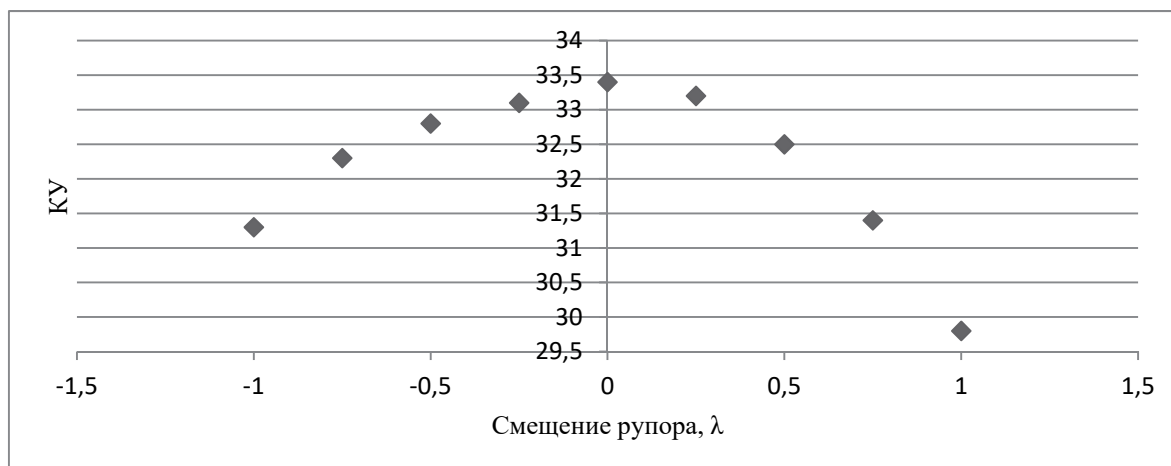


**Рис. 5. Влияние на коэффициент усиления перемещения рупора вдоль оси симметрии антенны Кассегрена**

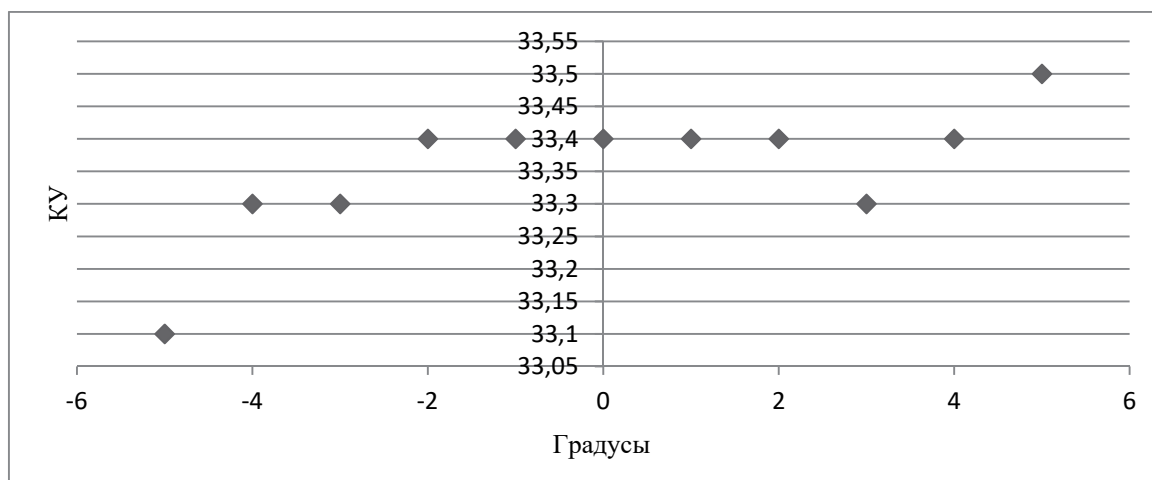
На рис. 6 приведена зависимость влияния на КУ антенны Кассегрена смещения рупора в фокальной плоскости. Левая часть графика - рупор смещается вдоль узкой стенки прямоуголь-

ного волновода, а правая - вдоль широкой стенки. Показано, что при смещении на расстояние, равное длине волны, КУ в первом случае уменьшается на 2,15дБ, а во втором – на 3,65дБ.

На рис. 7 приведена зависимость влияния на КУ антенны Кассегрена при повороте рупора относительно оптической оси антенны. Показано, что при повороте рупора в диапазоне  $\pm 2$  градуса КУ остается постоянным, а при повороте рупора в диапазоне  $\pm 5$  градуса КУ изменяется на величину 0,1 – 0,3дБ.



**Рис. 6. Влияние на коэффициент усиления антенны Кассегрена перемещения рупора в фокальной плоскости**



**Рис. 7. Влияние на коэффициент усиления при повороте рупора относительно геометрической оси симметрии антенны Кассегрена**

### Заключение

В данной работе приведены результаты расчета и измерения характеристик антенны Кассегрена на частоте 29 ГГц трехэтапным и одноэтапным методом с помощью программного пакета CST Microwave Studio. Создана модель, позволяющая быстро и эффективно проводить расчеты основных параметров и характеристик антенны Кассегрена, а также учитывать технические неточности при изготовлении и настройке антенны. При использовании трехэтапной методики расчета можно существенно сократить время расчета, однако в этом случае модель не учитывает взаимного влияния зеркал антенны. Одноэтапная методика расчета дает более правильные результаты. Сравнение результатов расчета и экспериментальных исследований параметров антенны дает возможность предложить процедуру расче-

та антенны Кассегрена, позволяющая экономить время расчета и вычислительные ресурсы компьютера.

Авторы статьи выражают благодарность сотрудникам НИИ измерительных систем им. Ю.Е. Седакова Варенцову Е.Л. и Дудкину М.И. за помощь при проведении измерений антенны.

*Исследование выполнено в рамках гранта РНФ №17 – 19 – 01628.*

#### Библиографический список

1. **Ху, Х.** Terahertz Cassegrain Reflector Antenna / X. Xu, X. Zhang, Z. Zhou // Antennas & Propagation (ISAP), 2013 Proceedings of the International Symp. – 2013. – P. 969–971.
2. **Кисиленко, К.И.** Моделирование и расчет антенны Кассегрена на 290 ГГц / К.И. Кисиленко, [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2016. – №4. – С. 46–52.
3. **Бахрах, Л.Д.** Зеркальные сканирующие антенны: Теория и методы расчета / Л.Д. Бахрах. – М.: Наука, 1981. – 304 с.
4. CST – Computer Simulation Technology [Электронный ресурс]. URL: <https://www.cst.com>
5. Методы измерений характеристик антенн СВЧ / под ред. Н.М. Цейтлина. – М.: Радио и связь, 1985. – 368 с.

*Дата поступления  
в редакцию 08.07.2017*

**K. I. Kisilenko, V. A. Malakhov, A. S. Raevskii, V. V. Shcherbakov**

#### CALCULATION AND MEASUREMENT OF PARAMETERS OF ANTENNA CASSEGRAIN

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

**Purpose:** Calculation and measurement Cassegrain antenna with high gain used for wireless communication systems.

**Design/methodology/approach:** Calculation of electrical parameters of the antenna were carried out using the software package of numerical simulation. To reduce calculation time, used a three-step method. However, a three-stage method of calculation does not take into account the mutual influence of the mirrors of the antenna. Why was the calculation of a Cassegrain antenna, without division into phases as one project. In order to verify the accuracy of the calculations, it was decided to compare the calculation results with the experimental results in 29 GHz.

**Originality/value:** Created program allows to quickly and efficiently carry out the calculations of the basic parameters and characteristics of a Cassegrain antenna, which also allows to simulate the technical inaccuracies in the manufacture and adjustment of the antenna. When using a three-step design procedures can significantly reduce the computation time, but in this case, the model does not take into account the mutual influence of the mirrors of the antenna. Single-stage calculation method gives more correct results.

*Key words:* Cassegrain antenna, CST Studio, anechoic chamber, radiation pattern, gain.

УДК.621.3

А.Н. Кузменков, В.Г. Титов, В.Ф. Стрелков

**ОПТИМИЗАЦИЯ КОНТУРА РЕГУЛИРОВАНИЯ ТОКА  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОДШИПНИКА**

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева

Рассмотрены вопросы построения импульсной системы управления радиальным электромагнитным подшипником для мощных вращающихся агрегатов и различные варианты построения внутреннего контура тока. В разомкнутом состоянии система является неустойчивой и обладает особенностями, которые необходимо учитывать при синтезе регуляторов.

Для расчета параметров регуляторов используется метод передаточных функций, метод  $z$ -преобразования и компьютерное моделирование в программном комплексе Matlab Simulink. В результате моделирования импульсной системы показано, что наиболее рациональным является построение контура тока ЭМП с релейным регулятором, работающим в скользящем режиме. Полученные результаты использованы при построении системы управления электромагнитным подшипником газового нагнетателя компрессорной станции «Помарская».

*Ключевые слова:* электромагнитный подшипник, контур тока, релейный регулятор, импульсная система управления, метод  $z$ -преобразования, Matlab Simulink.

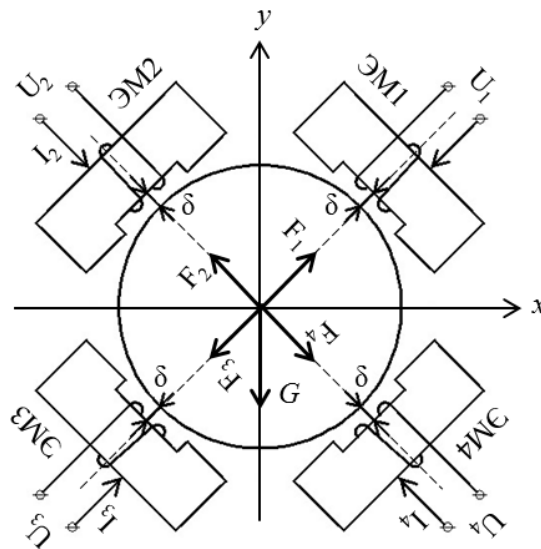
Электромагнитные подшипники являются перспективными видами опор, которые находят применение в высокоскоростных машинах и агрегатах с большой массой ротора. Применение электромагнитных подшипников для подвеса ротора компрессора газоперекачивающего агрегата позволяет исключить маслосистему, необходимую для работы традиционного гидростатического подшипника скольжения. Причем следует отметить, что доля компрессоров с электромагнитным подвесом ротора с каждым годом увеличивается. В работе на примере газового нагнетателя мощностью 16мВт перекачивающей станции «Помарская» газопровода «Уренгой–Помары–Ужгород», рассматриваются вопросы построения цифровой системы управления радиальным и осевым электромагнитными подшипниками (ЭМП). Рабочие зазоры между статором и ротором нагнетателя составляют десятые доли миллиметра при весе ротора нагнетателя около одной тонны[1].

Подвес ротора в электромагнитном подшипнике обеспечивается за счёт взаимодействия между управляемыми электромагнитами статора и ферромагнитными сердечниками ротора. Стабилизация заданного положения ротора достигается за счёт регулирования токов в обмотках электромагнитов по сигналам датчиков положения ротора. Электромагниты являются исполнительными органами стабилизации ротора в центральном положении. Обычно выделяют четыре активные зоны, которые располагаются по окружности подшипника под углом  $90^\circ$  относительно друг друга. Причем каждая из этих зон представляет собой самостоятельный электромагнит. При горизонтальном расположении ротора машины, когда вес ротора значительно превышает действующие возмущения, оси полюсов подшипника располагают под углом  $45^\circ$  относительно вертикальной оси  $u$ , что позволяет распределить весовую нагрузку между электромагнитами (рис. 1) [2].

Магнитные силы  $F_1 - F_4$ , создаваемые электромагнитами, обеспечивают компенсацию веса ротора  $G$  и равнодействующую других внешних сил  $F_B, H$ . Из рассмотренной схемы рис. 1 следует, что электромагнитный подшипник как радиальный, так и осевой представляет собой неустойчивый объект управления. Неустойчивость объекта вызвана, прежде всего, наличием положительной обратной связи по перемещению и большой постоянной времени электромагнита, которая зависит от величины зазора между статором и ротором ЭМП, а значит, меняется периодически. Поэтому без системы управления, обеспечивающей устойчи-

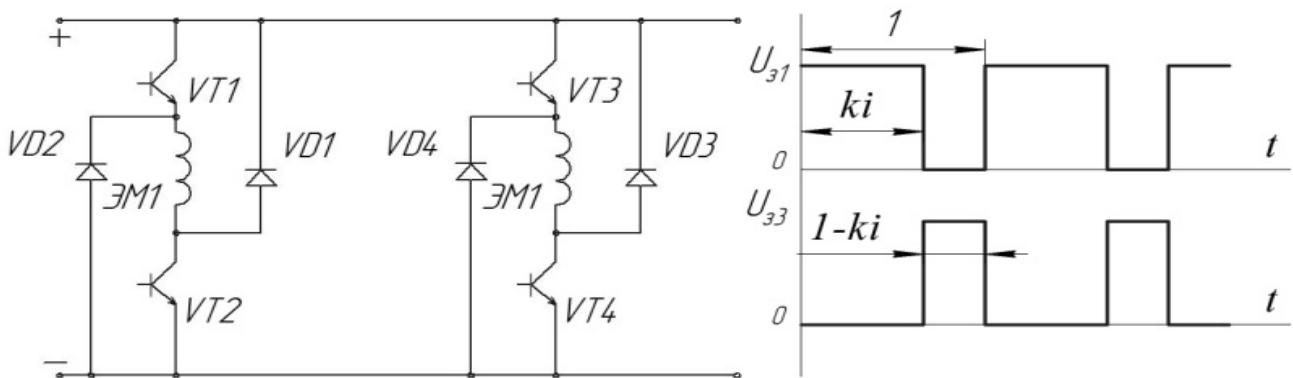


вость, электромагнитные опоры работать в принципе не могут. Структурный синтез системы и выбор параметров регуляторов обеспечивают как устойчивость, так и требуемые статические и динамические характеристики электромагнитного подшипника. Для повышения быстродействия электромагнитных подшипников, что очень актуально для высокоскоростных машин, применяют принципы построения и методы синтеза систем подчиненного регулирования. Настройка системы производится путем последовательной оптимизации контуров регулирования. Синтезируемая по такому принципу система управления характеризуется простотой технической реализации (как средствами аналоговой, так и средствами микропроцессорной техники) и простотой ограничения регулируемых координат (ток, скорость и т.д.) [4, 5]. Практическое преимущество многоконтурных систем управления заключается в том, что настройка контуров регулирования осуществляется независимо и последовательно.



**Рис. 1. Расчетная схема электромагнитного подшипника:**

ЭМ1–ЭМ4 – электромагниты;  $U_1–U_4$  – напряжения, подаваемые на катушки электромагнитов, В;  $I_1–I_4$  – токи, наводимые в обмотках электромагнитов, А;  $F_1–F_4$  – магнитные силы, создаваемые электромагнитами, Н;  $G$  – вес ротора нагнетателя, Н;  $\delta$  – регламентируемый зазор между ЭМП и цапфой вала нагнетателя, м



**Рис. 2. Схема питания и диаграмма задающих импульсов при дифференциальном управлении токами обмоток электромагнитного подшипника**

Также из схемы рис. 1 следует, что для системы управления ЭМП наиболее предпочтительной является дифференциальная схема питания за счет линейности тяговой характеристики и её максимальной жесткости при центральном положении ротора. Здесь посредством широтно-импульсной модуляции (ШИМ) оба электромагнита из пары ЭМ1–ЭМ3 и

ЭМ2–ЭМ4 управляются одним ШИМ-модулятором, первый магнит от прямого выхода, а противоположный – от инверсного. При таком управлении сумма токов в противоположных катушках, расположенных на одной оси, остается постоянной, т.е. увеличение одного тока приводит к пропорциональному снижению тока в противоположной катушке [3]. Иллюстрация этого способа управления, основанная на широтно-импульсной модуляции тока, показана на рис. 2. Кроме того, в этой схеме вдвое сокращается число силовых вентиляей по сравнению с независимым управлением токами всех четырех обмоток. Здесь в качестве коммутирующих элементов применены IGBT транзисторы (VT1-VT4), работающие в режиме широтно-импульсной модуляции с несущей частотой 1-2 кГц.

При рассмотренном расположении электромагнитов (рис. 1) и дифференциальном управлении токами электромагнитов можно рассматривать каждую ось подшипника как магнитный подвес двустороннего действия, преобразующий электрическую энергию сети питания в работу магнитных сил, обеспечивающих заданное положение ротора [1]. Контур регулирования тока представлен на рис. 3. В соответствии со структурной схемой внутренний контур образуется регулятором тока, силовым преобразователем, объектом регулирования и обратной связью по току через датчик тока.

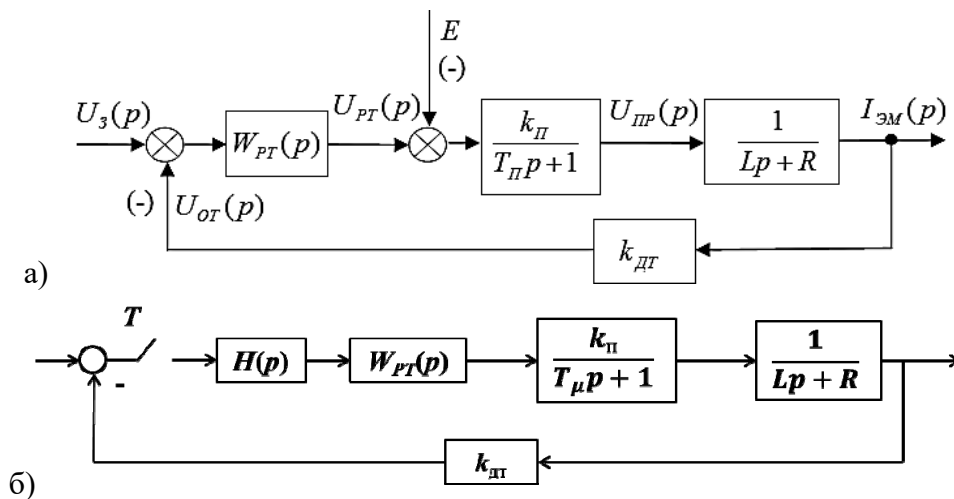


Рис. 3. Структурная схема внутреннего контура тока ЭМП:

а – структурная схема внутреннего контура тока;

б – импульсная модель внутреннего контура тока

При расчете регулятора тока контур тока настраивается на модульный оптимум, при этом пренебрегают влиянием ЭДС движения  $E$ ,  $V$ , и положительной обратной связью по перемещению [3]. Таким образом, в качестве регулятора тока в системе подчиненного регулирования электромагнитного подвеса ротора должен быть использован пропорционально-интегральный регулятор. Настройки регулятора будут определяться следующими параметрами:

$$W_{пр}(p) = \frac{Lp + r}{2k_{п}k_{дт}T_{\mu}p}, \quad (1)$$

где  $T_{\mu}$  – малая постоянная времени во внутреннем контуре тока, с;  $k_{п}$  – коэффициент передачи силового преобразователя;  $k_{дт}$  – коэффициент передачи датчика тока;  $L$  – индуктивность электромагнита, Гн;  $r$  – активное сопротивление электромагнита, Ом;

Современные системы управления электромагнитными подшипниками являются цифровыми, центральным вычислительным ядром которых служит мощный программируемый контроллер. Принимая во внимание, что регулирование тока в электромагнитном подшипнике обеспечивается широтно-импульсным регулятором, представляет особый интерес

рассмотреть объект управления как импульсный. Импульсная система управления (рис. 3, б) может быть представлена в виде последовательного соединения импульсного элемента и непрерывной части. Импульсный элемент можно представить как последовательное соединение идеального элемента  $T$  и формирующего элемента (фиксирующей цепи) с передаточной функцией  $H(p)$  [4].

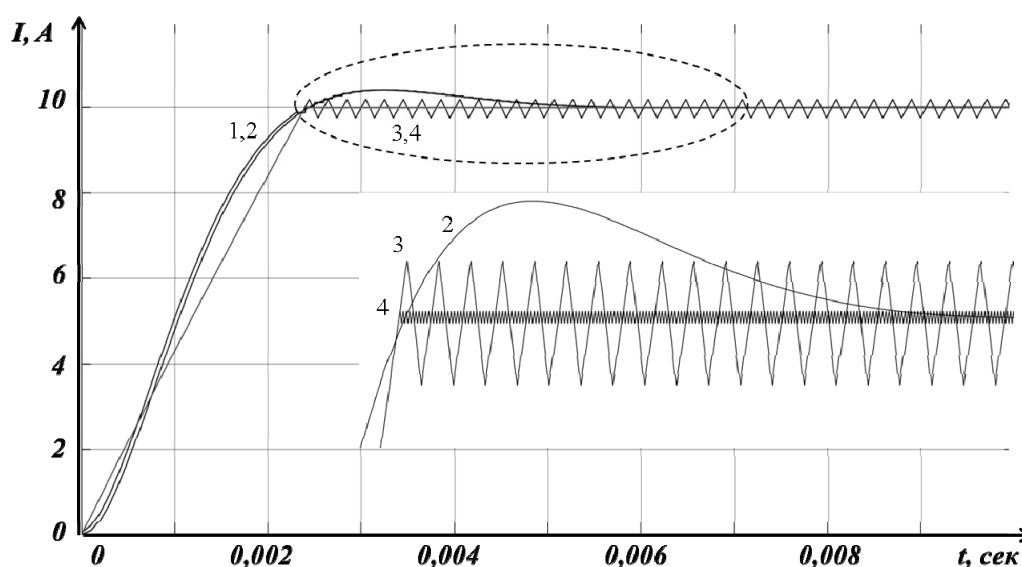
Для получения дискретных моделей, как правило, используют математический аппарат  $z$ -преобразований. Импульсная передаточная функция замкнутого контура тока

$$W_{ЗКТ}(z) = \frac{z \frac{k_{PT}k_{П}(T_{\mu}p + 1)}{p(T_{\mu}p + 1)(Lp + r)}}{1 + z \frac{k_{PT}k_{П}(T_{\mu}p + 1)}{p(T_{\mu}p + 1)(Lp + r)}}. \quad (2)$$

Формула (2) получена для самой простой непрерывной модели (рис. 3, б), когда предполагается, что регулятор системы управления может регулировать непосредственно токи электромагнитов. Дискретные передаточные функции позволяют исследовать устойчивость цифровой системы управления электромагнитным подшипником, корректно определить период дискретизации и на этапе проектирования определить достижимые жесткостные свойства магнитной опоры. Существует также способ параметрического синтеза регуляторов цифровой системы управления электромагнитным подшипником с использованием моделирования в программной среде Matlab Simulink. При этом в расчетной модели объект представляют непрерывным и подключают к нему цифровой регулятор и экстраполятор. Параметры дискретной передаточной функции регулятора определяют методом подбора.

На рис. 4 представлены расчетные значения изменения тока электромагнита газового нагнетателя мощностью 16 мВт, полученные при моделировании обозначенных вариантов построения контура тока. Представляет интерес рассмотреть несколько вариантов построения внутреннего контура тока [5]:

- контур тока с пропорционально-интегральным (ПИ) регулятором (рис. 4, 1, 2);
- контур тока с релейным регулятором (рис. 4, 3);
- контур тока с релейным регулятором, работающим в скользящем режиме (рис. 4, 4).



**Рис. 4. Кривые переходных процессов тока при различных типах регуляторов тока:**

1, 2 – контур тока с пропорционально-интегральным регулятором;

3 – контур тока с релейным регулятором;

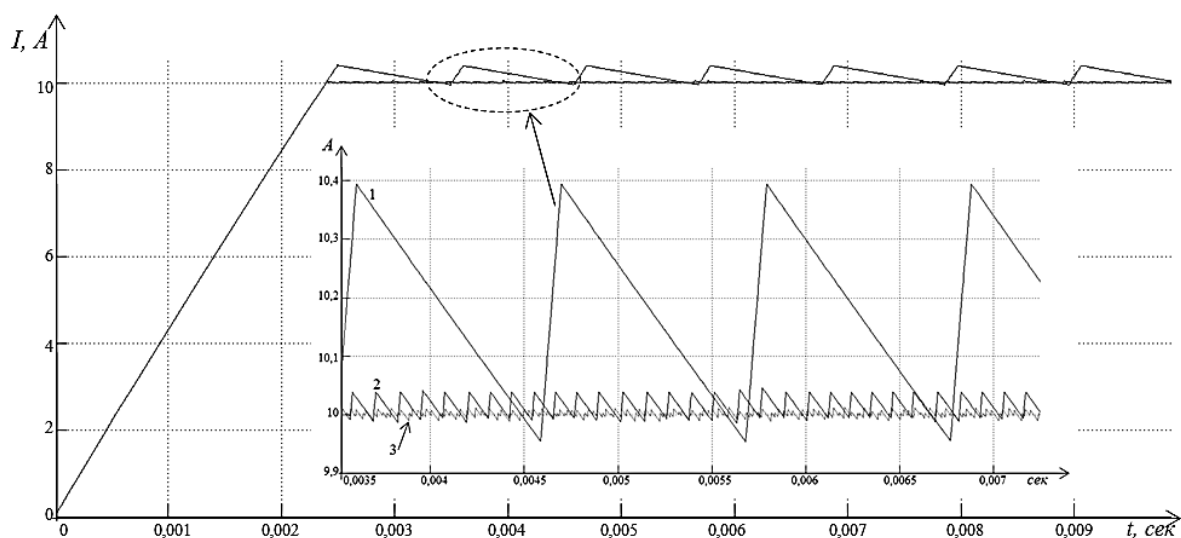
4 – контур тока с релейным регулятором, работающим в скользящем режиме

Для оценки адекватности полученных дискретных передаточных функций построены по ним переходные процессы и проведено их сравнение с аналогичными процессами, рассчитанными для непрерывного объекта (рис. 4). Результаты моделирования дают возможность сделать вывод, что полученные дискретные передаточные функции позволяют с достаточной степенью точности описывать процесс перемещения ротора при цифровой технической реализации системы управления осевым электромагнитным подшипником. Анализ кривых 1 и 2 (рис. 4) показывает, что переходные процессы практически совпадают, а максимальная погрешность на интервале времени, равном 100 тактам периода дискретизации, составляет около 1%.

С ПИ регулятором (рис. 4, 2) контур тока является астатическим как по заданию, так и возмущению. Перерегулирование при оптимизации на модульный оптимум составляет 4,3%. Релейный регулятор (рис. 4, 3) обеспечивает более высокое быстродействие, но процесс изменения тока имеет достаточно ярко выраженный колебательный характер. При этом характер переходного процесса определяется максимальным напряжением источника питания, шириной петли гистерезиса регулятора и постоянной времени  $T_{II}$ . Чтобы повысить качество регулирования, т.е. снизить амплитуду и поднять частоту автоколебаний, необходимо ввести корректирующую цепь. Используя данный способ, можно получить в системе как медленно затухающие апериодические процессы (скользящие), так и оптимальные переходные процессы.

Скользящий режим реализуется в релейных системах введением внутренней обратной связи с коэффициентом усиления  $k$ , охватывающей релейный элемент. Проведен анализ влияния коэффициента  $k$  в обратной связи релейного регулятора на характер переходных процессов в контуре тока (рис. 5). Действие внутренней связи приводит к тому, что как только управляющий сигнал проходит через пороговое значение, релейный элемент через внутреннюю обратную связь изменяет его так, что этот сигнал проходит через пороговое значение в обратном направлении. Релейные регуляторы, работающие в скользящем режиме, принято называть вибрационными регуляторами.

Анализ результатов моделирования показывает, что практически оптимальным является выбор коэффициента в обратной связи  $k=0,0000001$  (рис. 5, 3). При такой настройке регулятора процесс нарастания тока имеет практически апериодический характер (рис. 4, 4).



**Рис. 5. Кривые переходных процессов тока при различных коэффициентах гибкой обратной связи релейного регулятора:**  
 1 –  $k=0,00001$ ; 2 –  $k=0,000001$ ; 3 –  $k=0,0000001$

На практике всегда реализуется режим, близкий к скользящему, вводится ограничение конечной частоты переключения релейного элемента. Реальный релейный элемент не может

переключаться с бесконечной частотой вне зависимости от способа его реализации: аппаратной (реле), электронной (электронная схема) или программной (микропроцессорное устройство). Из полученных результатов видно, что наилучшими показателями по быстродействию изменения тока электромагнитного подвеса обладает релейный регулятор тока. При этом релейный регулятор тока выполняется с гибкой обратной связью по току, что делает процесс нарастания тока практически апериодическим.

#### Библиографический список

1. **Наумец, А.Е.** Оптимизация контура регулирования тока электромагнитного подшипника А.Е. Наумец [и др.] // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. – 2013. – №5(102). – С. 298–303.
2. **Журавлев, Ю.Н.** Активные магнитные подшипники: теория, расчет, применение / Ю.Н. Журавлев. – СПб.: Политехника, 2003. – 206 с.
3. **Сарычев, А. П.** Математическая модель ротора для анализа управления магнитными подшипниками / А. П. Сарычев, И. Г. Руковицын // Тр. НПП ВНИИЭМ. – 2008. – Т. 107. – С. 11–15.
4. **Кузменков, А.Н.** Разработка и моделирование трехконтурной системы управления электромагнитным подшипником / А.Н. Кузменков, В.Г. Титов, А.В. Шахов // Вестник АГТУ. Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2015. – №4. – С. 27–36.
5. **Титов, В.Г.** Разработка и моделирование трехконтурной системы управления электромагнитным подшипником / В.Г. Титов, А.Н. Кузменков, А.В. Шахов // Инженерный вестник Дона. – 2015. – №3. – С. 17–23.

*Дата поступления  
в редакцию 30.06.2017*

**A.N. Kuzmenkov, V.G. Titov, V.F. Strelkov**

#### OPTIMIZATION OF CURRENT CONTROL CIRCUIT OF ELECTROMAGNETIC BEARING

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

**Purpose:** Issues of creating a pulse system of radial electromagnetic bearing for powerful rotating machines and different variants of constructing the inner current circuit are considered.

**Research limitations:** In the open state the system is unstable and has the features, which must be considered while synthesizing the regulator.

**Methodology:** To calculate the parameters of regulators used the method of transfer functions, z-transformation method and the computer simulation method in Matlab Simulink software.

**Findings:** In the result of simulating a pulsed control system is shown that the best performance in speed and overshoot has a relay regulator operating in sliding mode. The acquired results are utilized while building up a system of controlling the electro-magnetic bearing of a gas pressurizer in “Pomarskaya” compressor station.

*Key words:* electromagnetic bearing, pulse control system, current loop, relay controller, z-transformation method, Matlab Simulink.

УДК 621.396

М.С. Мякишева, А.С. Нечаев, М.А. Палачев

**АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ШИРОКОПОЛОСНОГО УТРОИТЕЛЯ ЧАСТОТЫ 40-60 ГГц**

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева

Рассматривается методика автоматизированного проектирования и расчета характеристик широкополосного диодного утроителя частоты 40-60 ГГц на базе программных продуктов компании ANSYS (HFSS и Designer). Данная методика объединяет электродинамический анализ волноведущей части и расчет характеристик цепей с нелинейными элементами. Приводится сравнение рассчитанной выходной характеристики утроителя частоты с экспериментальными данными. Оценивается влияние параметров цепей автосмещения и диодов на характеристики устройства.

*Ключевые слова:* утроитель частоты, автоматизированное проектирование, диодный умножитель

**Введение**

В терагерцовом диапазоне частот для получения необходимой частоты широко применяются умножители частоты. Одним из промежуточных умножителей может быть утроитель частоты 40-60 ГГц. Для анализа характеристик таких умножителей применяются комплексы трехмерного моделирования. Использование программного комплекса точного моделирования трёхмерных структур – это новый, активно используемый в настоящее время подход, который становится основным инструментом автоматизированного проектирования, существенно ускоряя разработку новых устройств. Но до сих пор одной из основных проблем, возникающих при проектировании СВЧ-устройств, построенных на нелинейных элементах, является отсутствие эффективных методик автоматизированного расчета на базе программных средств автоматизированного проектирования, которые бы объединяли в себе электродинамические методы анализа волноведущих структур и расчет характеристик цепей с нелинейными полупроводниковыми элементами.

Несмотря на большое количество различных методов (как аналитических, так и машинных) анализа нелинейных СВЧ-устройств (смесителей, модуляторов, умножителей частоты и др.), задача их проектирования достаточно сложна, трудоёмка и обычно решается итерационно. Кроме этого, важную роль в таком проектировании играют длительные и дорогостоящие экспериментальные исследования.

В данной работе применена предложенная ранее [1-2] методика проектирования с использованием программных продуктов компании ANSYS (системы автоматизированного проектирования HFSS и Designer) для расчета характеристик ранее экспериментально разработанного и серийно выпускаемого широкополосного волноводного диодного утроителя частоты диапазона 40-60 ГГц. Предложенная методика проектирования состоит из двух этапов, объединяющих электродинамический анализ волноведущей части утроителя частоты и расчет характеристик цепей с нелинейными элементами (диодами).

*Первый этап* состоит в том, что в системе автоматизированного проектирования ANSYS HFSS создается модель утроителя частоты без нелинейных элементов. После этого производится расчет  $S$ -параметров модели путём решения электродинамической задачи с пространственным распределением полей (расчёт методом конечных элементов).

*Второй этап* – подключение рассчитанной ранее модели утроителя в качестве многополюсника в САПР ANSYS Designer, подключение диодов, цепей их автосмещения и расчет выходных характеристик (уровня мощности гармонических составляющих входного сигнала на выходе) утроителя частоты с помощью нелинейного анализа (расчёт методом гармонического баланса).



### Схемно-конструктивные особенности утроителя частоты

Схематически утроитель частоты – это широкополосный тракт с парой антипараллельно включенных диодов. Диоды включены через резистивно-емкостные цепи для балансировки утроителя и достижения минимальных потерь преобразования в требуемом диапазоне входных частот путём реализации оптимального автосмещения диодов при максимальном уровне мощности входного сигнала 100 мВт (20 дБм) [3-4].

Конструктивно утроитель частоты выполнен в виде последовательно соединенных входной микрополосковой линии (МПЛ), щелевого резонатора, выходной МПЛ и прямоугольного металлического волновода размерами  $3,775 \times 2,388$  мм (рис. 1). Волновод является запердельным для диапазона частот второй гармоники входного сигнала.

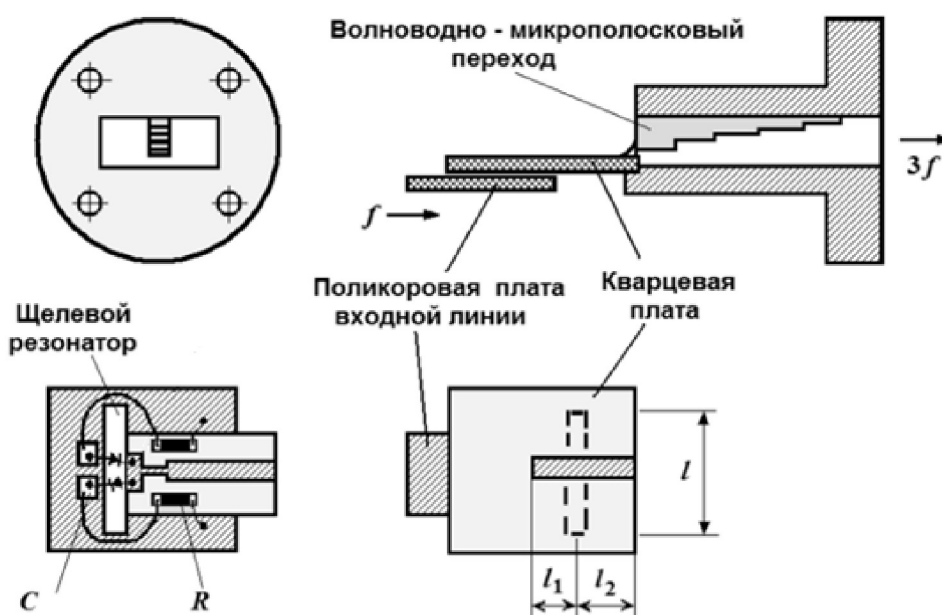


Рис. 1. Конструкция утроителя частоты 40-60 ГГц

Основой всей конструкции являются две платы, скрепленные экранами. На входной поликоровой плате расположена входная микрополосковая линия, а на другой, кварцевой – щелевой резонатор. Умножительные диоды, пересекая резонатор по центру, подключены разнополярно к входной МПЛ и противоположной стороне щелевого резонатора. Входная МПЛ на конце (в точке подключения диодов) имеет низкое волновое сопротивление, образуя шунтирующий конденсатор для замыкания тока третьей гармоники. С обратной стороны платы щелевой резонатор пересекает (перпендикулярно) выходная МПЛ, которая соединена с волноводным трактом с помощью П-образного волноводно-микрополоскового перехода Чебышевского типа.

Входной сигнал поступает через коаксиально-полосковый переход и входную МПЛ, содержащую согласующий фильтр нижних частот, на умножительные диоды, которые осуществляют симметричное ограничение амплитуды и генерируют нечетные гармоники входного сигнала. Расположенный над щелевым резонатором отрезок линии, образованный выводами диодов, возбуждает в нем волну напряжения. Длина резонатора  $l$  выбирается равной половине длины волны на третьей гармонике. Выходной сигнал снимается с резонатора с помощью разомкнутого шлейфа длиной  $l_1$ , равной приблизительно четверти длины волны третьей гармоники, и через отрезок МПЛ длиной  $l_2$  и волноводно-микрополосковый переход поступает на выход.

## Проектирование и расчет характеристик

Первый этап анализа – создание адекватной модели. В системе автоматизированного проектирования ANSYS HFSS была создана 3D модель, соответствующая ранее экспериментально разработанной конструкции диодного утроителя частоты (рис. 2).

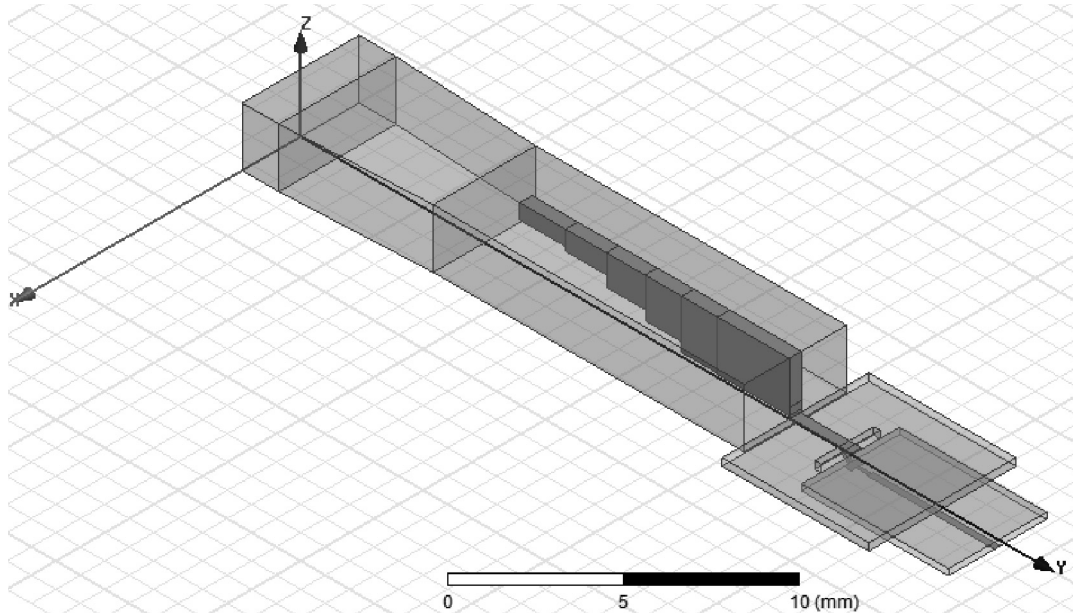


Рис. 2. Модель утроителя частоты в ANSYS HFSS

На входе всей системы установлен сосредоточенный порт 1, в месте расположения диодов, на противоположной стенке входной платы, установлен порт 2, на выходе волновода установлен сосредоточенный порт 3. После создания модели и согласования входного и выходного трактов проведен анализ распределения поля в диапазоне входных частот и анализируемых гармоник в модели утроителя с учетом особенностей конструкции. Были вычислены  $S$ -параметры модели утроителя и произведено исследование их зависимости от ширины и длины щели, длины выходной МПЛ и наличия абсорбера, поглощающего отраженное излучение для получения минимальных потерь преобразования.

Коэффициент передачи  $S_{32}$  с порта 2 до выхода волновода (порт 3) представлен на рис. 3. Затухание в диапазоне выходных частот 40-60 ГГц составляет в среднем 7 дБ.

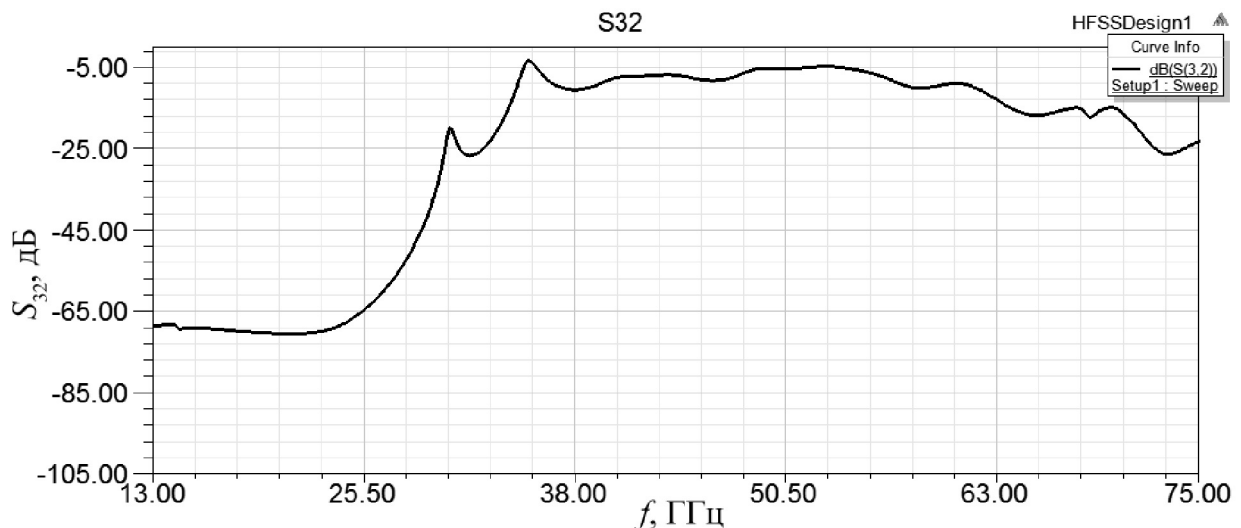


Рис. 3. Коэффициент передачи  $S_{32}$

Второй этап анализа – расчет гармонических составляющих входного сигнала на выходе утроителя частоты методом гармонического баланса

Ранее созданная и проанализированная модель утроителя частоты в ANSYS HFSS была передана в ANSYS Designer и подключена к построенной схеме умножителя частоты в виде многополосника с известной матрицей рассеяния. Схема утроителя частоты в ANSYS Designer (рис. 4) включает нелинейные элементы – полупроводниковые диоды, резистивно-емкостные цепи для реализации автосмещения диодов и порты входа (с источником гармонического сигнала) и выхода.

В свойствах входного порта 1 был задан источник гармонического сигнала и на вход подавался сигнал в диапазоне частот 13-20 ГГц мощностью 100 мВт (20 дБм). Порт 2 служит для подключения пары диодов с резистивно-емкостными цепями автосмещения. Расчет характеристик утроителя частоты заключается в анализе уровня мощности гармонических составляющих входного сигнала в порте 3 (выходной порт). Рабочие выходные характеристики – уровни мощности третьей гармоники входного сигнала.

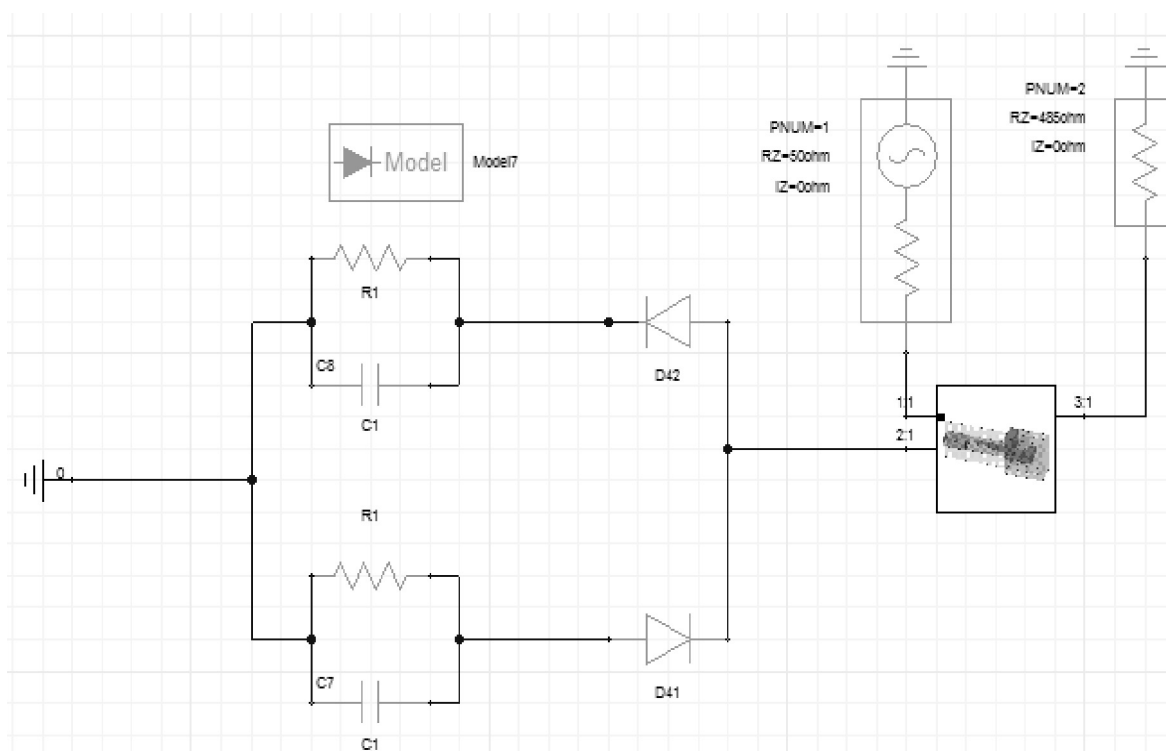


Рис. 4. Схема утроителя частоты в ANSYS Designer

Порты 1 и 3 согласованы с импедансами волноводов на анализируемых частотах. Параметры используемых диодов: емкость  $p$ - $n$  перехода  $C_0 = 0,1$  пФ и сопротивление прямого перехода  $R_s = 1$  Ом. В схеме ANSYS Designer использовалась модель диодов DIODE\_Level7 (Enhanced SPICE Diode). Номиналы элементов цепей автосмещения диодов:  $C1 = 10$  пФ,  $R1 = 155$  Ом.

Результат анализа – зависимость уровня мощности третьей гармоники от частоты сигнала на входе, полученная в результате моделирования, в сравнении с экспериментально измеренными ранее значениями мощности на выходе утроителя частоты диапазона 40-60 ГГц производства НИИПИ «Кварц» им. А.П. Горшкова (рис. 5). Уровень мощности третьей гармоники лежит в диапазоне 1-7 дБм. Потери преобразования находятся, в среднем, на уровне 16 дБ.

Кроме рабочей третьей гармоники входного сигнала, в утроителе частоты генерируются и другие нечётные гармоники. Уровень мощности паразитной пятой гармоники подавлен относительно уровня третьей, в среднем, на 20 дБ.

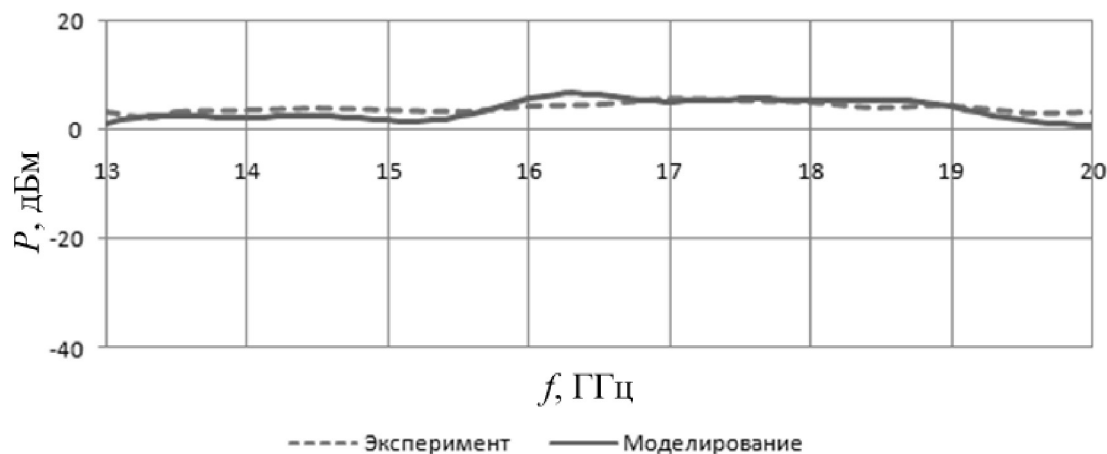


Рис. 5. Уровень мощности третьей гармоники на выходе утроителя

### Исследование влияния параметров утроителя частоты на его характеристики

Важный этап в проектировании утроителя частоты – выбор оптимальных номиналов элементов цепей автосмещения диодов (сопротивления  $R1$  и емкости  $C1$ ). Уровень мощности третьей гармоники на выходе утроителя частоты при  $R1=155$  Ом и различной емкости  $C1$  представлен на рис. 6. При изменении емкости  $C1$  (от 10 до 50 пФ) уровень мощности третьей гармоники практически не изменяется.

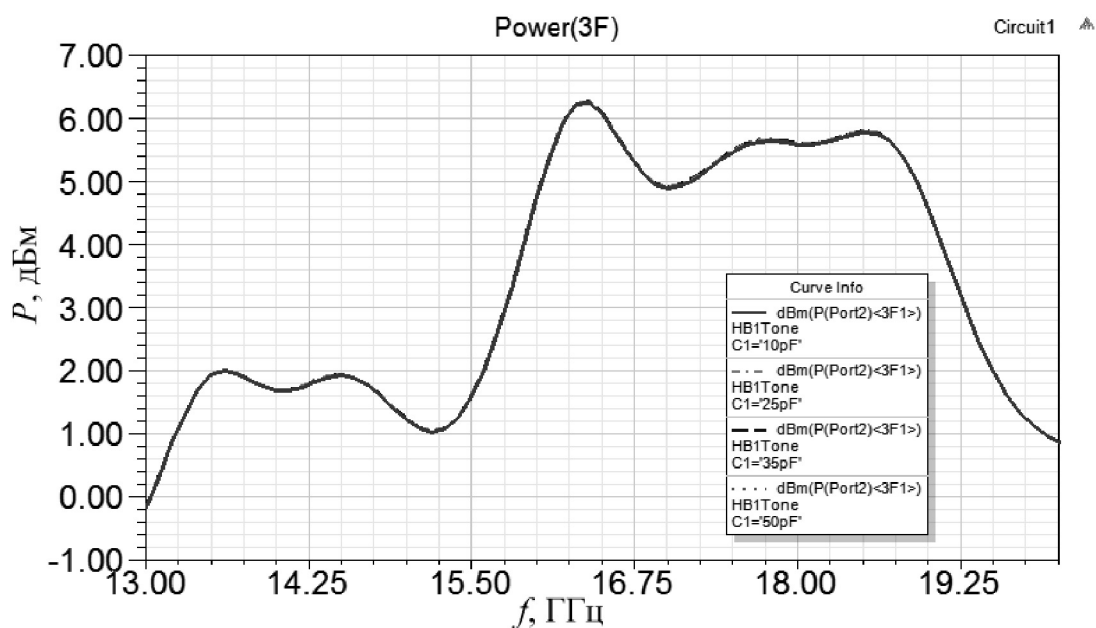


Рис. 6. Зависимость мощности третьей гармоники на выходе от емкости  $C1$

Зависимость уровня мощности третьей гармоники на выходе при  $C1=10$  пФ и различном сопротивлении  $R1$  показана на рис. 7. При увеличении  $R1$  с 50 Ом до 1 кОм уровень мощности третьей гармоники на выходе утроителя увеличивается до максимального значения 8 дБм, при дальнейшем увеличении практически не изменяясь. Таким образом, путем изменения сопротивления  $R1$  возможно увеличение уровня мощности третьей гармоники приблизительно на 1,7 дБ по сравнению с ранее рассчитанным.

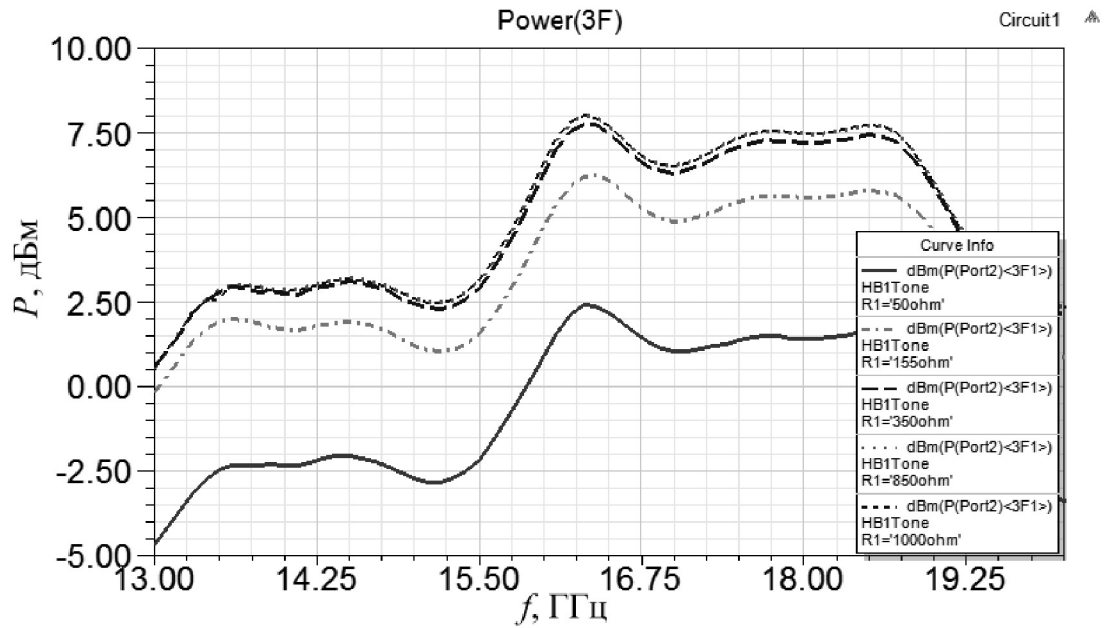


Рис. 7. Зависимость мощности третьей гармоники на выходе от сопротивления  $R_1$

При идентичных параметрах диодов в утроителе частоты четные гармоники входного сигнала не генерируются. Однако на практике всегда имеет место разброс параметров диодов. На рис. 8–9 представлены зависимости уровней мощности паразитных четных гармоник (второй и четвертой) при различной степени неидентичности параметров диодов  $C_0$  (барьерная емкость перехода) и  $R_s$  (сопротивление прямого перехода). Анализ произведен при изменении данных параметров на 10% по отношению к номинальным значениям (одновременно и по отдельности).

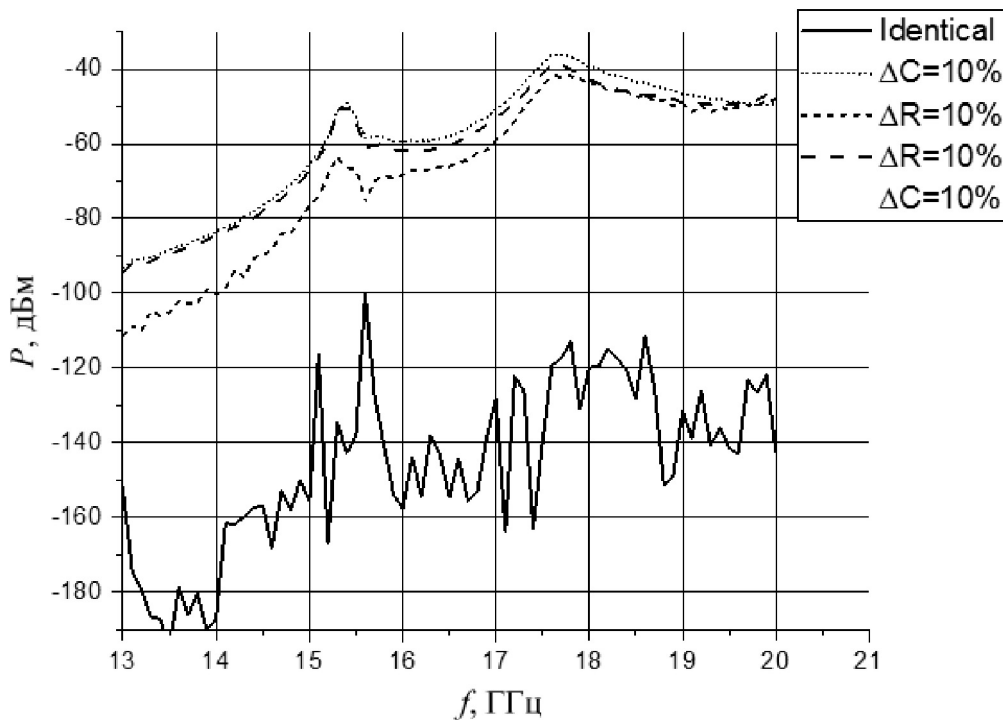


Рис. 8. Уровни мощности второй гармоники при различной степени неидентичности параметров диодов

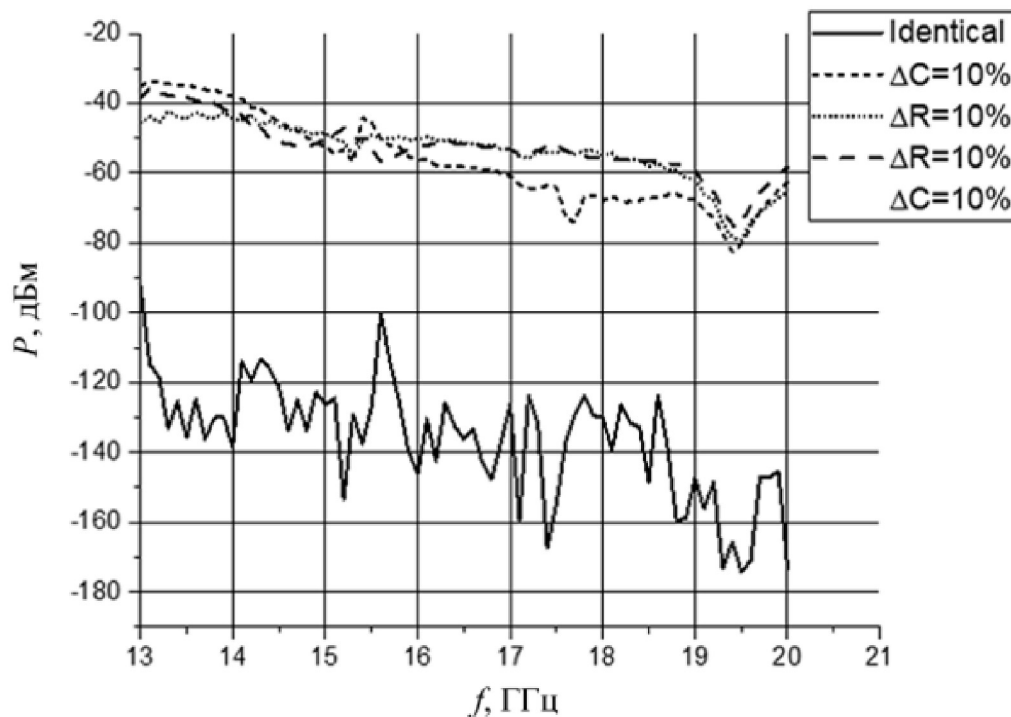


Рис. 9. Уровни мощности четвертой гармоники при различной степени неидентичности параметров диодов

### Выводы

Результаты анализа мощности третьей гармоники входного сигнала на выходе утроителя частоты согласуются со значениями мощности, полученными в результате экспериментального исследования утроителя частоты 40-60 ГГц производства НИИПИ «Кварц» им. А.П. Горшкова. Это означает, что предложенная методика проектирования и расчета характеристик может быть применена в дальнейших исследованиях нелинейных СВЧ-устройств. Данная методика дает возможность проводить оптимизацию различных схемно-конструктивных элементов утроителя, как волноведущих трактов, так и параметров нелинейных элементов (диодов), а также позволяет определить потенциальные возможности совершенствования технических характеристик без проведения дорогостоящих и трудоемких экспериментальных исследований.

В ходе проведенных расчетов были определены возможности совершенствования технических характеристик (увеличение эффективности преобразования и уменьшение уровня паразитных гармоник) утроителя частоты. Анализ характеристик показал, что увеличение мощности третьей гармоники на выходе утроителя возможно осуществить путём изменения параметров используемых цепей автосмещения диодов (увеличение номинала сопротивления  $R_1$ ).

Анализ уровня мощности чётных гармоник на выходе при различной степени неидентичности параметров диодов показывает, что при минимально достижимой на практике неидентичности параметров  $C_0$  и  $R_s$  в 10% вторая и четвертая гармоники подавлены относительно третьей в среднем на 35 дБ. В широкополосном утроителе частоты 40-60 ГГц вторая и четвертая гармоники не могут быть отфильтрованы, поскольку находятся в рабочей зоне частот или в непосредственной близости, поэтому требования к неидентичности параметров диодов весьма высоки.

*Исследование выполнено в рамках гранта РФФ №17-19-01628.*



## Библиографический список

1. **Березин, В.В.** Методика расчета и проектирования волноводного диодного утроителя частоты 75-110 ГГц / В.В. Березин, А.М. Щитов, С.В. Оболенский // Информационные системы и технологии (ИСТ-2015): материалы XXI Междунар. науч.-техн. конф.; НГТУ им. Р.Е. Алексева. – Нижний Новгород, 2015. – С. 62–63.
2. **Щитов, А.М.** Автоматизированный расчет широкополосных волноводных диодных утроителей частоты в диапазонах 75-110 ГГц и 110-170 ГГц / А.М. Щитов, В.В. Березин // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2015): материалы 25-й Междунар. Крымской конф.: в 2 т. – Севастополь, 2015 – Т. 1. – С. 75–76.
3. **Щитов, А.М.** Широкополосные умножители частоты миллиметрового диапазона (26,5-110 ГГц) / А.М. Щитов, А.Е. Серебряков // Вестник ВВО АТН РФ, серия Высокие технологии в радиоэлектронике. – 1997. – №1(3). – С. 91–96.
4. **Щитов, А.М.** Расчет и проектирование балансного утроителя частоты на ДБШ в миллиметровом диапазоне // Специальная радиоизмерительная техника, НТС, «Кварц». – Нижний Новгород, 1996. – С. 24–32.

*Дата поступления  
в редакцию 08.07.2017*

**M.S. Myakisheva, A.S. Nechaev, M.A. Palachyov**

**COMPUTER-AIDED DESIGN AND CHARACTERISTICS CALCULATION  
OF A BROADBAND 40-60 GHz FREQUENCY TRIPLER**

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

**Purpose:** The computer aided design and characteristics calculation strategy of a broadband diode 40-60 GHz frequency tripler based on software from ANSYS (HFSS and Designer). The technical characteristics improvement of a previously experimentally developed and serially produced frequency tripler without costly and labor-intensive experimental studies.

**Design/methodology/approach:** This strategy combines the electrodynamic analysis of a waveguide part and the calculation of circuits with nonlinear elements characteristics. The influence of a self-bias circuit and diode parameters on device characteristics is evaluated.

**Findings:** As a result, the calculated output characteristic of a frequency tripler are consistent with experimental data.

*Key words:* frequency tripler, computer-aided design, diode multiplier.

УДК 621.314

Р.Р. Османов, В.Г. Титов, Г.М. Мирясов

**МАЛОШУМЯЩИЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ ДЛЯ СВЕРХТОЧНОЙ АППАРАТУРЫ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Проведен анализ возможности применения импульсных источников питания в сверхточной высокочувствительной аппаратуре, описаны основные принципы работы наиболее оптимальных источников питания. По результатам компьютерного моделирования оценен уровень пульсаций выходного напряжения источников питания с Flyback, Forward и SEPIC архитектурами преобразователей.

*Ключевые слова:* аппаратура специального назначения, импульсный источник питания, малошумящий источник питания, Flyback преобразователь, Forward преобразователь, SEPIC преобразователь.

В настоящее время весьма актуальной является задача создания источников питания (ИП) для сверхточной высокочувствительной аппаратуры специального назначения.

На данный момент существует большое количество готовых решений ИП, но предъявление конкретных требований резко сужает область поиска подходящего. К основным требованиям относится уровень пульсаций выходного напряжения ИП в заданной полосе частот, не превышающий 1 мВ. Дело в том, что в большинстве случаев уровень регистрируемого прибором сигнала ненамного превышает уровень шумов, поэтому на точность обработки сигнала влияют собственные шумы, которые в большинстве случаев определяются шумами ИП.

Наиболее подходящим вариантом для использования в условиях вне лабораторной среды являются импульсные ИП. Данные типы ИП имеют приемлемые массогабаритные показатели, хорошие значения КПД, а также обладают достаточно простой и дешевой схмотехнической реализацией.

Из всего многообразия схмотехнических решений для импульсных ИП в качестве потенциального источника питания были выбраны обратноходовые (Flyback converter), прямоходовые (Forward converter) преобразователи, а также преобразователи с топологией SEPIC (single-ended primary inductance converter – преобразователь с несимметрично нагруженной первичной индуктивностью). Данный выбор основан на требованиях по мощности, по простоте исполнения ИП и его экономическим показателям.

**Архитектура преобразователя Flyback**

Принцип работы обратноходового преобразователя (рис. 1) заключается в том, что при открытом состоянии ключа (транзистора  $VT_1$ ) в трансформаторе линейно нарастает ток и одновременно запасается энергия [1]. При этом диод  $VD_1$  заперт. В момент размыкания ключа напряжение на трансформаторе увеличивается до уровня входного напряжения  $V_{in}$ . В момент, когда напряжение на трансформаторе достигает значения входного, диод  $VD_1$  открывается, и напряжение трансформатора нарастает до выходного и устанавливается на этом уровне. Данный уровень называется напряжением обратного хода. Трансформатор при напряжении обратного хода отдает накопленную энергию в нагрузку.

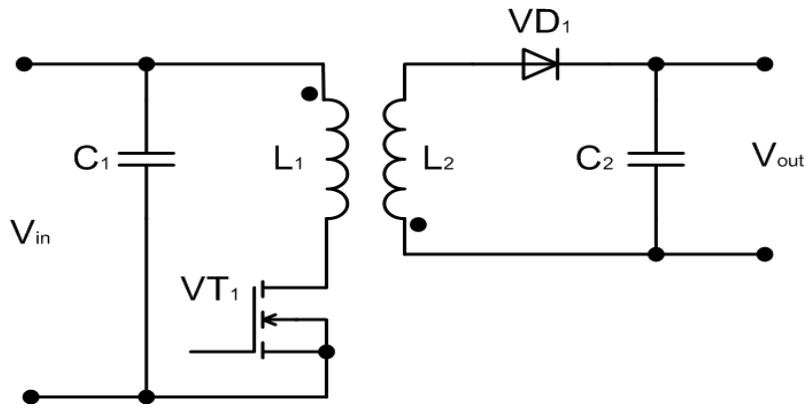


Рис. 1. Схема обратноходового (Flyback) преобразователя

### Архитектура преобразователя Forward

Схема прямоходового преобразователя приведена на рис. 2 [1]. Основным отличием такого преобразователя, от обратноходового, является то, что здесь энергия запасается не в трансформаторе, а в индуктивности вторичной цепи  $L_4$ . При замкнутом состоянии ключа ток протекает во вторичной цепи через вторичную обмотку трансформатора, индуктивность  $L_4$ , конденсатор  $C_2$  и сопротивление нагрузки. При этом диод  $VD_2$  открыт, а  $VD_3$  закрыт. Когда ключ размыкается, полярность напряжения обмоток трансформатора меняется на обратную. В результате этого диод  $VD_2$  закрывается, а  $VD_3$  переходит в открытое состояние. Ток во вторичной цепи замыкается через диод  $VD_3$ , индуктивность, конденсатор и сопротивление нагрузки. В данной схеме размагничивание трансформатора происходит при помощи дополнительной обмотки и диода  $VD_1$ .

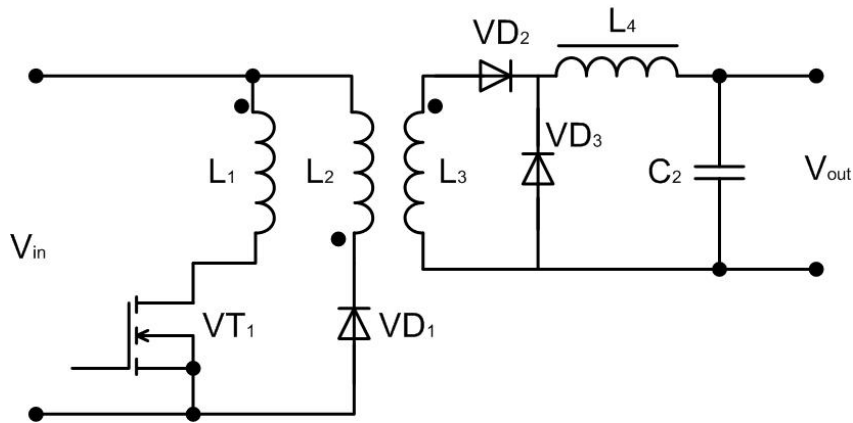


Рис. 2. Схема прямоходового (Forward) преобразователя

### Архитектура преобразователя SEPIC

При замкнутом положении ключа преобразователя (рис. 3), происходит заряд индуктивности  $L_1$  от входного источника напряжения [2, 3]. В то же время катушка  $L_2$  принимает энергию от конденсатора  $C_1$ . Выходной же конденсатор  $C_2$  обеспечивает протекание тока в нагрузке, но в это время энергия в нагрузку не поступает. При размыкании ключа индуктивности  $L_1$  заряжает конденсатор  $C_1$ , одновременно поддерживая ток в нагрузке. В свою очередь индуктивность  $L_2$  тоже подключена к нагрузке.

На современном этапе развития электронной аппаратуры ключевой частью проектирования любого электронного устройства является его математическое моделирование в специализированных программах схемотехнического анализа.

Все моделируемые схемы обеспечивали на выходе уровень напряжения равный 12 В и значение тока в районе 150 мА. В качестве нагрузки, имитирующей входное сопротивление прибора, используется резистор номиналом 100 Ом.

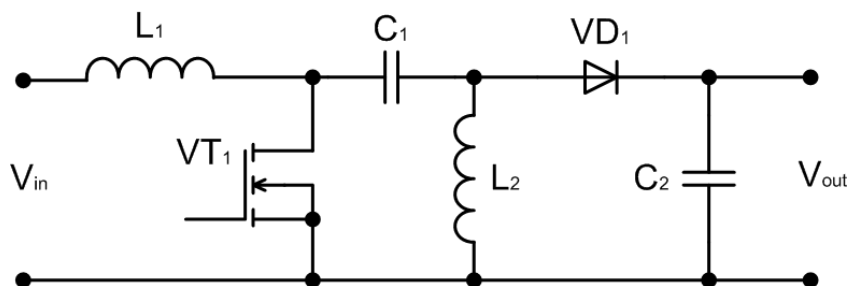


Рис. 3. Схема преобразователя SEPIC

### Моделирование обратного преобразователя

На рис. 4 представлена модель импульсного стабилизатора напряжения на основе Flyback преобразователя [4]. Двухобмоточный дроссель (катушки  $L_1$  и  $L_2$ , сердечник  $K_1$ ) осуществляет гальваническую развязку, передачу энергии из входной части схемы в выходную, а также преобразование уровня напряжений.

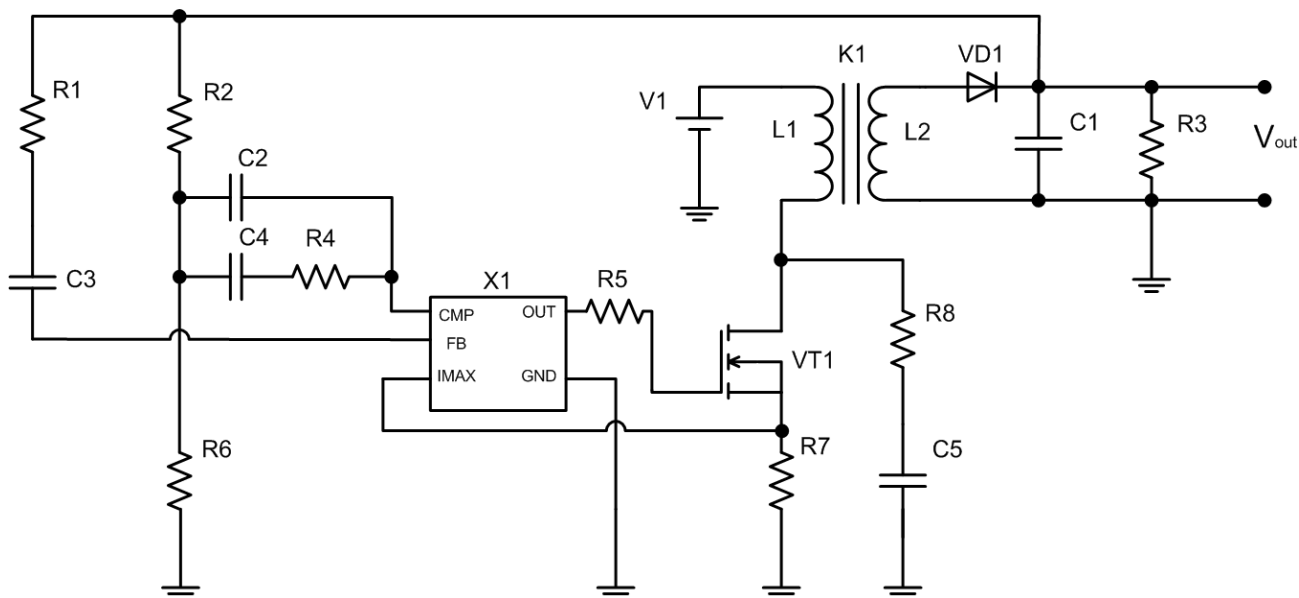


Рис. 4. Схема для моделирования работы импульсного источника питания (Flyback топология)

В качестве ШИМ-контроллера используется подсхема  $X_1$ , создание которой приведено в [4].  $VD_1$  – диод, открывающийся при запираии полевого транзистора  $VT_1$ .  $C_1$  – конденсатор, выполняющий роль выходного фильтра,  $R_3$  – резистор, имитирующий входное сопротивление прибора.

На рис. 5 представлены пульсации выходного напряжения в установившемся режиме. Уровень пульсаций составляет 25-35 мВ. Появление данных пульсаций объясняется особенностью работы ШИМ-контроллера преобразователя.

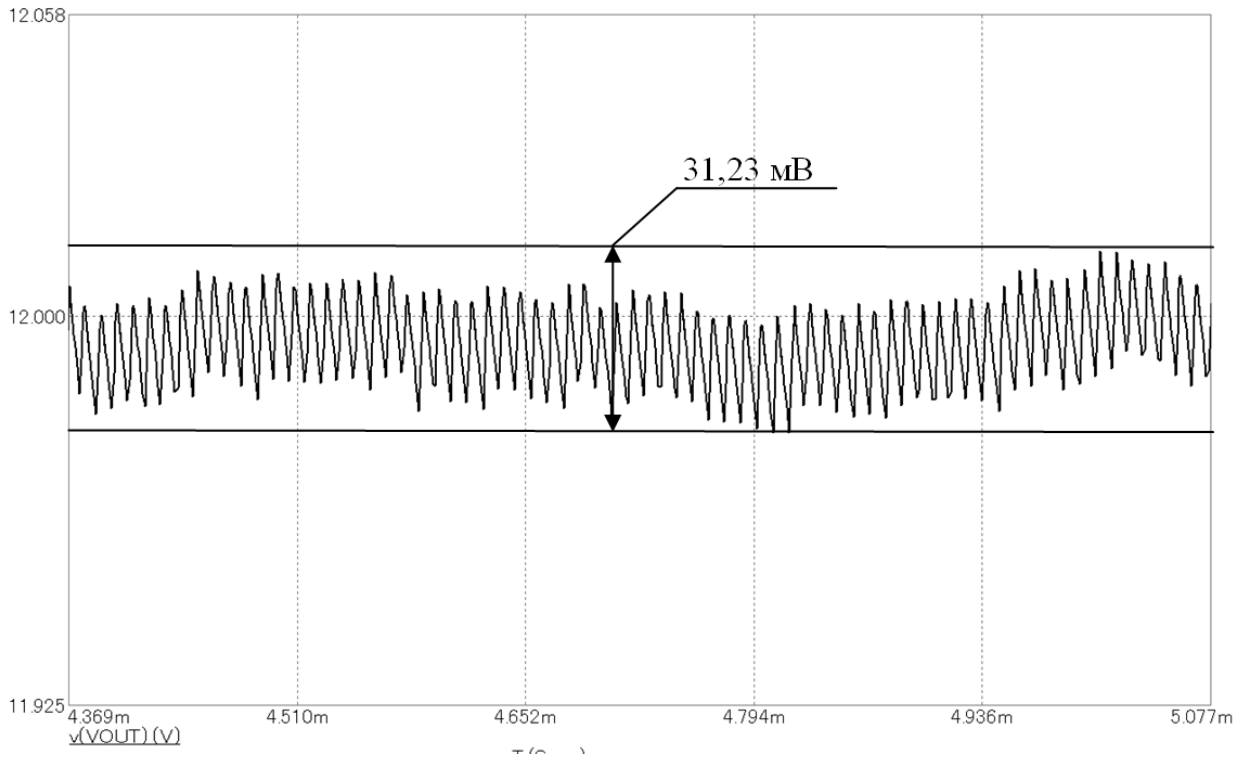


Рис. 5. Пульсация выходного напряжения (Flyback топология)

### Моделирование прямоходового преобразователя

Электрическая схема Forward преобразователя приведена на рис. 6. Данная схема очень близка к Flyback преобразователю, но имеются некоторые отличия. В схеме присутствует катушка индуктивности  $L_1$ , имитирующая дополнительную обмотку трансформатора. Также в первичной цепи установлен диод  $VD_1$ .

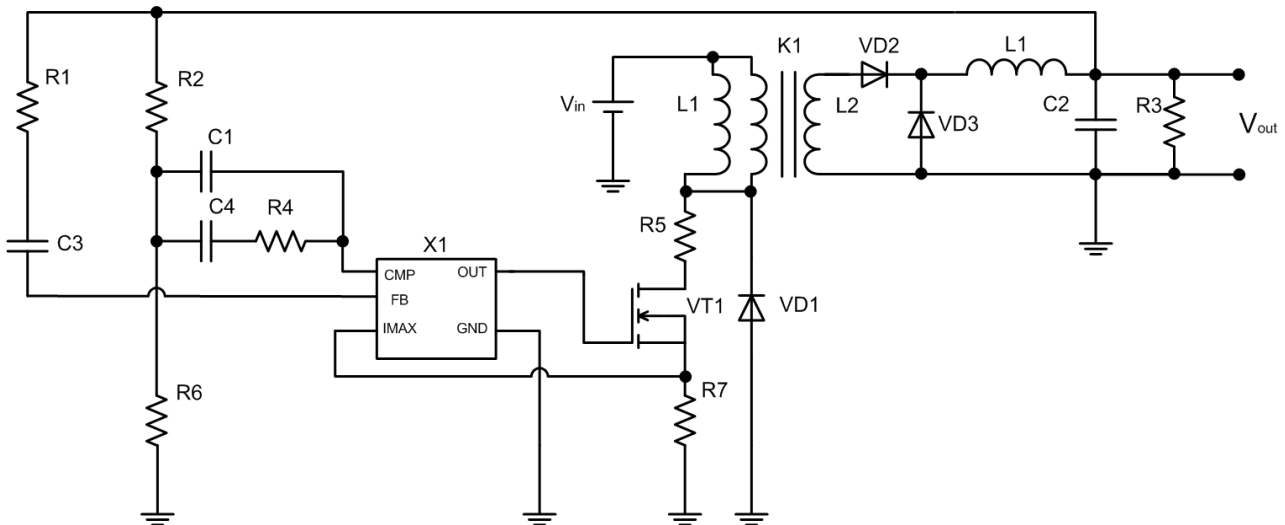


Рис. 6. Схема для моделирования работы импульсного источника питания (Forward топология)

Для прямоходового преобразователя коэффициент заполнения в ШИМ-контроллере  $X_1$  выбирается меньше 0,5. Сглаживание выходного напряжения осуществляется фильтром, состоящим из катушки индуктивности  $L_4$  конденсатора  $C_1$ .

На рис. 7 показаны пульсации установившегося выходного напряжения преобразователя.

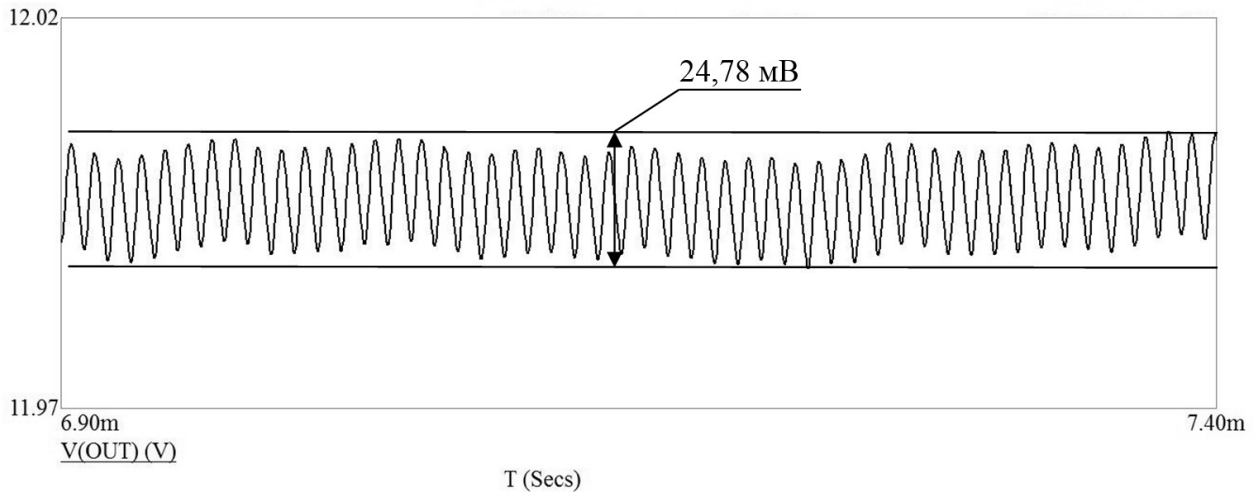


Рис. 7. Пульсация выходного напряжения (Forward топология)

По результатам моделирования можно сделать вывод, что уровень пульсации для прямоходового преобразователя при выходном напряжении 12 В не превышает 20-25 мВ.

### Моделирование SEPIC преобразователя

Модель SEPIC преобразователя с учетом паразитных параметров представлена на рис. 7 [5]. В этой схеме паразитные сопротивления катушек  $L_1$ ,  $L_2$  имитируют резисторы  $R_1$  и  $R_2$  соответственно. Паразитное сопротивление конденсатора  $C_2$  отображает резистор  $R_4$ . Резистор  $R_5$  имитирует нагрузку.

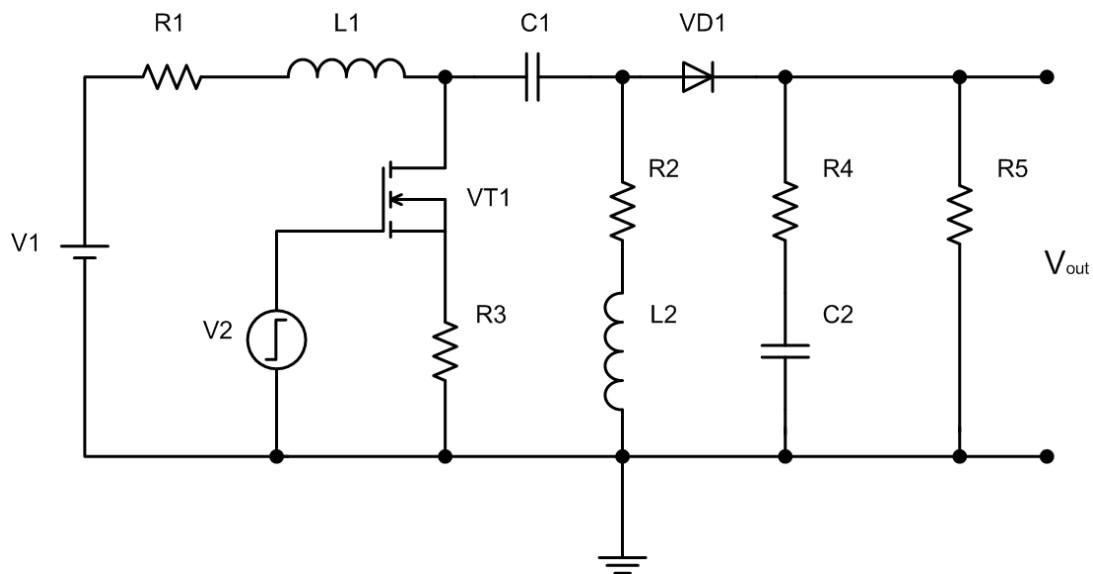


Рис. 8. Схема для моделирования работы импульсного источника питания (SEPIC топология)



Импульсный источник напряжения  $V_2$  в данной схеме – это модель микросхемы, расчет временных параметров которой описан в [5].

Результаты моделирования представлены на рис. 8. Видно, что размах пульсаций выходного напряжения не превышает 10 мВ.

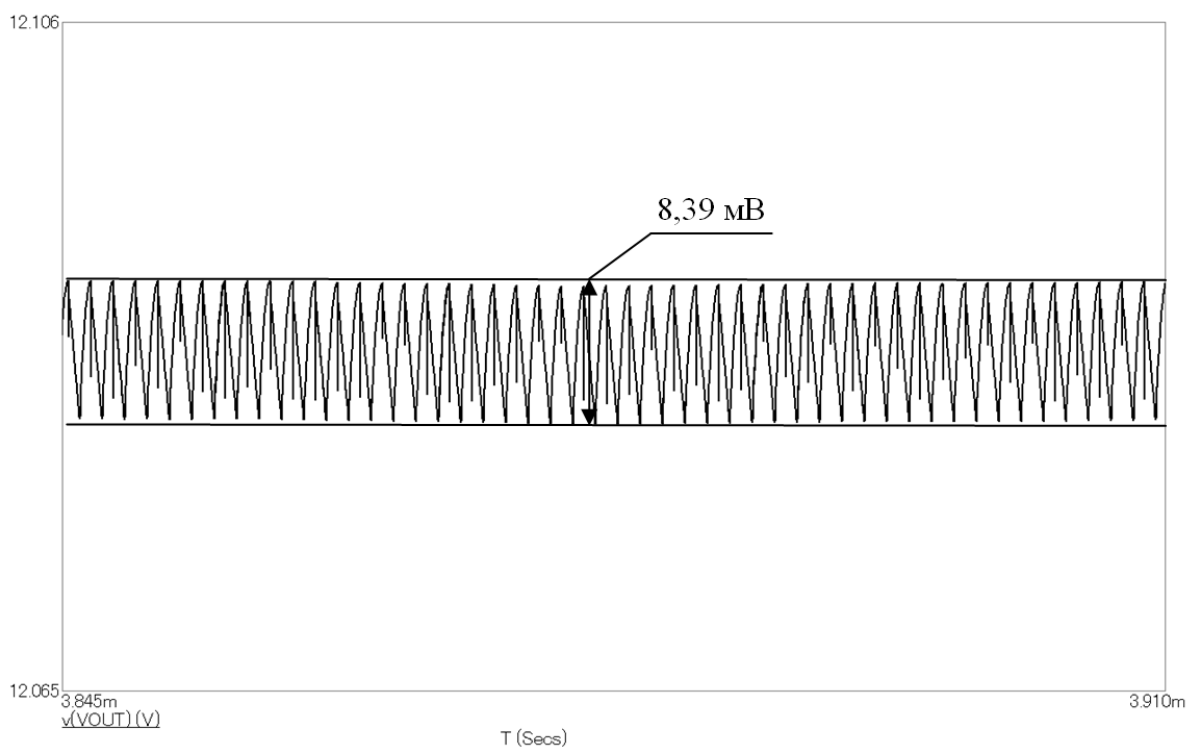


Рис. 9. Пульсация выходного напряжения

### Заключение

Сравнивая рассмотренные схемы, можно сделать вывод о том, что наиболее оптимальными, с точки зрения уровня пульсаций, являются преобразователи, основанные на SEPIC архитектуре. Уровень пульсаций в их выходном напряжении практически в два раза меньше, чем у прямоходовых преобразователей и в четыре, чем у обратноходовых. Однако, с точки зрения использования в сверхточной аппаратуре, все представленные топологии имеют неприемлемые уровни пульсаций. При использовании представленных преобразователей в качестве ИП резко увеличится уровень собственных шумов прибора и, следовательно, увеличивается погрешность обработки результатов высокоточных измерений, что является недопустимым.

В связи с этим в настоящее время ведутся исследования по подавлению пульсаций преобразователей. В качестве одного из решений предполагается использование на выходе ИП режекторных фильтров с центральной частотой ШИМ сигнала.

### Библиографический список

1. **Бабурин, М.** Компоненты для построения источников питания / М.Бабурин, А. Павленко. – М.: Открытый мир, 2013. – 96 с.
2. **Ridley, R.** Analyzing the SEPIC Converter / R. Ridley. – Power Systems Design Europe. – 2006.
3. **Кесслер, М.** Неинвертирующие преобразователи напряжения с высоким КПД на основе синхронной топологии Inverse SEPIC // Мир электронных компонентов. – 2010. – №3. – С. 41–47.

4. **Амелина, М. А.** Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap. Версии 9, 10 / М.А. Амелина, С.А Амелин. – Смоленск: Смоленский филиал НИУ МЭИ, 2012. – 617 с.
5. **Иоффе, Д.** Разработка импульсного преобразователя напряжения с топологией SEPIC // Компоненты и технологии. – 2006. – № 62. – С. 126–132.

*Дата поступления  
в редакцию 01.07.2017*

**R.R. Osmanov, V.G. Titov, G.M. Miryasov**

## **LOW-NOISE POWER SUPPLY FOR HIGH-PRECISIONS INSTRUMENTATION**

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

This article reads about possibility of using switched-mode power supplies in high precision highly sensitive instrumentation. The basic operation principles of most optimal power sources are described. Voltage ripple in the output signal of schemes with Flyback, Forward and SEPIC converter architectures was estimated by a computer simulation.

*Key words:* special-purpose equipment, high-precisions instrumentation, switched-mode power supply, low-noise power supply, Flyback converter, Forward converter, SEPIC converter.

УДК 621.396

А.С. Раевский, С.Б. Раевский, Т.С. Рыжакова

**КРАЕВАЯ ПРИСОЕДИНЕННАЯ ЗАДАЧА КАК ЧАСТНЫЙ СЛУЧАЙ  
ЗАДАЧИ О ВОЗБУЖДЕНИИ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Комплексный резонанс и индивидуальное возбуждение комплексных волн рассматриваются с позиции присоединенной краевой задачи, формулируемой на уравнении Гельмгольца, в правой части которого стоит функция, являющаяся решением однородной краевой задачи.

*Ключевые слова:* комплексный резонанс, комплексные волны, круглый двухслойный экранированный волновод.

**Введение**

Исследование распределения электромагнитного поля в круглом двухслойном экранированном волноводе (КДЭВ) позволило обнаружить эффект резкого возрастания амплитуды поля при переходе из частотной области, соответствующей распространяющимся волнам, в область существования комплексных волн [1-3]. В [4] это явление названо комплексным резонансом (КР). Он отличается от обычного резонанса тем, что проявляется в широком диапазоне частот, соответствующем диапазону существования комплексных волн (КВ). Эта особенность обуславливает невозможность измерения добротности КР обычными резонансными методами [5-7]. Добротность структуры, в которой возникает КР, удобнее оценивать путем сравнения её с добротностью эталонного резонатора, работающего в том же диапазоне частот и дающего то же увеличение амплитуды поля при прохождении сигнала в схеме «на проход». Широкополосность КР позволяет использовать его в датчиках, реагирующих на изменение поля в полосе частот, и поэтому не требующих их постоянной частотной подстройки. Пространственно-временные датчики на КР в силу их широкополосности могут реагировать на любую форму отраженного сигнала.

**Возбуждение в КЭДВ комплексных волн как волн, присоединенных к источнику**

Поскольку КР образуется в результате интерференции двух комплексных волн с комплексно сопряженными амплитудами и волновыми числами, совместно возбуждаемых источником, описываемым действительной функцией координат [1-3], его следует рассматривать как колебание, присоединенное к источнику. Поскольку колебание, соответствующее КР, реализуется только при наличии источника, через который замыкаются локальные потоки мощности КВ, его не следует классифицировать как собственное. Оно описывается присоединенным уравнением Гельмгольца, в правой части которого стоит функция, являющаяся решением однородной краевой задачи для круглого двухслойного экранированного волновода. Представляет интерес рассмотреть вопрос возбуждения КВ, образующих колебание, соответствующее КР, и КВ как волны, описываемой решением самосогласованной краевой задачи.

Так как комплексные волны описываются собственными функциями однородной не-самосопряженной [1-3] краевой задачи, «порождаемой» системой однородных уравнений Максвелла, их поля должны удовлетворять условию:

$$\int_{S_i} \left\{ \vec{E}_n \vec{H}_k \right\} - \left[ \vec{E}_k \vec{H}_n \right] d\vec{S} = \text{const},$$

где  $S_i$  – произвольное сечение исследуемого волновода,  $n$  и  $k$  номера собственных волн.

Это условие может выполняться только либо при отсутствии у подынтегрального выражения зависимости от продольной координаты, либо при тождественном равенстве интеграла нулю. Объединяя эти два варианта, записываем:

$$\int_{S_i} \left\{ \left[ \vec{E}_n \vec{H}_k \right] - \left[ \vec{E}_k \vec{H}_n \right] \right\} d\vec{S} = \begin{cases} N & k = -n, \\ 0 & k \neq -n. \end{cases} \quad (1)$$

Равенство (1) является [8] записью условия ортогональности собственных волн экранированного волновода в энергетическом смысле. С использованием его амплитуды прямой комплексной волны – I, распространяющейся справа от источника, записываем в виде:

$$A = \frac{1}{N} \int_V \left( \vec{j}^e \vec{E}^{(-)} - \vec{j}^m \vec{H}^{(-)} \right) dV, \quad (2a)$$

амплитуду обратной комплексной волны – II, также распространяющейся справа от источника, представляем как

$$\bar{A} = \frac{1}{N} \int_V \left( \vec{j}^e \bar{\vec{E}}^{(-)} - \vec{j}^m \bar{\vec{H}}^{(-)} \right) dV. \quad (2б)$$

В (2а,б)  $\vec{E}^{(-)}$  и  $\vec{H}^{(-)}$  – поля комплексной волны с продольным волновым числом  $\beta^{(-)} = -\beta$ , где  $\beta$  – продольное волновое число прямой волны – I.  $\bar{\vec{E}}^{(-)}$  и  $\bar{\vec{H}}^{(-)}$  – поля комплексной волны с продольным волновым числом  $\bar{\beta}^{(-)} = -\bar{\beta}$ , где  $\bar{\beta}$  – продольное волновое число обратной комплексной волны II.

Вводя обозначения:

$$\begin{aligned} \frac{\omega\mu}{r} \frac{\partial\psi^h}{\partial\varphi} + \beta \frac{\partial\psi^e}{\partial r} &= E_{r_0}; \quad \omega\mu \frac{\partial\psi^h}{\partial r} - \frac{\beta}{r} \frac{\partial\psi^e}{\partial\varphi} = E_{\varphi_0}; \\ -\beta \frac{\partial\psi^h}{\partial r} + \frac{\varepsilon\omega}{r} \frac{\partial\psi^e}{\partial\varphi} &= H_{r_0}; \quad \frac{\beta}{r} \frac{\partial\psi^h}{\partial\varphi} + \omega\varepsilon \frac{\partial\psi^e}{\partial r} = H_{\varphi_0} \end{aligned}$$

и учитывая связи между амплитудными коэффициентами потенциальных функций  $\psi_{1,2}^{e,h}$  во внутреннем и внешнем слоях волновода:

$$\begin{aligned} A_2 &= \frac{\alpha_1^2 A_1}{\alpha_2^2 \chi_{11}(\alpha_2 r_1)}; \\ B_1 &= \frac{\frac{\tilde{\beta}}{r_1} \left( 1 - \frac{\alpha_1^2}{\alpha_2^2} \right) A_1}{\mu_1 \frac{J_1'(\alpha_1 r_1)}{J_1(\alpha_1 r_1)} - \mu_2 \frac{\alpha_1^2 \chi_{21}'(\alpha_2 r_1)}{\alpha_2^2 \chi_{21}(\alpha_2 r_1)}}; \\ B_2 &= \frac{\alpha_1^2 \frac{\tilde{\beta}}{r_1} \left( 1 - \frac{\alpha_1^2}{\alpha_2^2} \right) A_1}{\alpha_2^2 \chi_{21}(\alpha_2 r_1) \left[ \mu_1 \frac{J_1'(\alpha_1 r_1)}{J_1(\alpha_1 r_1)} - \mu_2 \frac{\alpha_1^2 \chi_{21}'(\alpha_2 r_1)}{\alpha_2^2 \chi_{21}(\alpha_2 r_1)} \right]}, \end{aligned} \quad (3)$$

записываем:

$$\begin{aligned} E_r &= -iE_{r_0} e^{-i\beta z}; \quad E_r^{(-)} = iE_{r_0} e^{i\beta z}; \\ \bar{E}_r &= iE_{r_0}^* e^{i\beta^* z}; \quad \bar{E}_r^{(-)} = -iE_{r_0}^* e^{-i\beta^* z}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_\varphi &= -iE_{\varphi_0} e^{-i\beta z}; E_\varphi^{(-)} = -iE_{\varphi_0} e^{i\beta z}; \\
 \bar{E}_\varphi &= iE_{\varphi_0}^* e^{i\beta^* z}; \bar{E}_\varphi^{(-)} = iE_{\varphi_0}^* e^{-i\beta^* z}; \\
 E_z &= \alpha^2 \psi^e e^{-i\beta z}; E_z^{(-)} = \alpha^2 \psi^e e^{i\beta z}; \\
 \bar{E}_z &= \alpha^{*2} \psi^{e*} e^{i\beta^* z}; \bar{E}_z^{(-)} = \alpha^{*2} \psi^{e*} e^{-i\beta^* z}; \\
 H_r &= iH_{r_0} e^{-i\beta z}; H_r^{(-)} = iH_{r_0} e^{i\beta z}; \\
 \bar{H}_r &= iH_{r_0}^* e^{i\beta^* z}; \bar{H}_r^{(-)} = iH_{r_0}^* e^{-i\beta^* z}; \\
 H_\varphi &= -iH_{\varphi_0} e^{-i\beta z}; H_\varphi^{(-)} = -iH_{\varphi_0} e^{i\beta z}; \\
 \bar{H}_\varphi &= -iH_{\varphi_0}^* e^{i\beta^* z}; \bar{H}_\varphi^{(-)} = -iH_{\varphi_0}^* e^{-i\beta^* z}; \\
 H_z &= \alpha^2 \psi^h e^{-i\beta z}; H_z^{(-)} = -\alpha^2 \psi^h e^{i\beta z}; \\
 \bar{H}_z &= -\alpha^{*2} \psi^{h*} e^{i\beta^* z}; \bar{H}_z^{(-)} = \alpha^{*2} \psi^{h*} e^{-i\beta^* z}.
 \end{aligned} \tag{4}$$

Как видим из (4), поля прямой и обратной комплексных волн связаны равенствами:

$$\bar{\vec{E}} = \vec{E}^*; \bar{\vec{H}} = -\vec{H}^*. \tag{5}$$

Полагая, что поля в волноводе возбуждаются токами:  $\vec{I}^e = \vec{j}^e$  и  $I^m = i\vec{j}^m$ , являющимися действительными функциями координат, исходя из выражений (2а,б), с учетом (4) и (5) получаем:

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{1}{N_V} \int \left( -j_r^e E_{r_0} + j_\varphi^e E_{\varphi_0} - \alpha^2 j_z^m \psi^h \right) \sin \beta z dV + \\
 &+ \frac{1}{N_V} \int \left( \alpha^2 j_z^e \psi^e + j_r^m H_{r_0} - j_\varphi^m H_{\varphi_0} \right) \cos \beta z dV + \\
 &+ i \frac{1}{N_V} \int \left( j_r^e E_{r_0} - j_\varphi^e E_{\varphi_0} + \alpha^2 j_z^m \psi^h \right) \cos \beta z dV + \\
 &+ i \frac{1}{N_V} \int \left( \alpha^2 j_z^e \psi^e + j_r^m H_{r_0} - j_\varphi^m H_{\varphi_0} \right) \sin \beta z dV; \\
 \bar{A} &= \frac{1}{N_V} \int \left( -j_r^e E_{r_0}^* + j_\varphi^e E_{\varphi_0}^* - \alpha^{*2} j_z^m \psi^{h*} \right) \sin \beta^* z dV + \\
 &+ \frac{1}{N_V} \int \left( \alpha^{*2} j_z^e \psi^{e*} + j_r^m H_{r_0}^* - j_\varphi^m H_{\varphi_0}^* \right) \cos \beta^* z dV - \\
 &- i \frac{1}{N_V} \int \left( j_r^e E_{r_0}^* - j_\varphi^e E_{\varphi_0}^* + \alpha^{*2} j_z^m \psi^{h*} \right) \cos \beta^* z dV - \\
 &- i \frac{1}{N_V} \int \left( \alpha^{*2} j_z^e \psi^{e*} + j_r^m H_{r_0}^* - j_\varphi^m H_{\varphi_0}^* \right) \sin \beta^* z dV.
 \end{aligned}$$

Видим, что при выбранных источниках амплитуды прямой и обратной комплексных волн, распространяющихся справа от источника, связаны равенством:  $\bar{A} = A^*$ , из которого следует, что обе указанные волны возбуждаются совместно и с одинаковыми по модулю амплитудами.

Совместное существование двух волн приводит к образованию поля стоячей волны, локализованного вблизи источника, рис. 1.

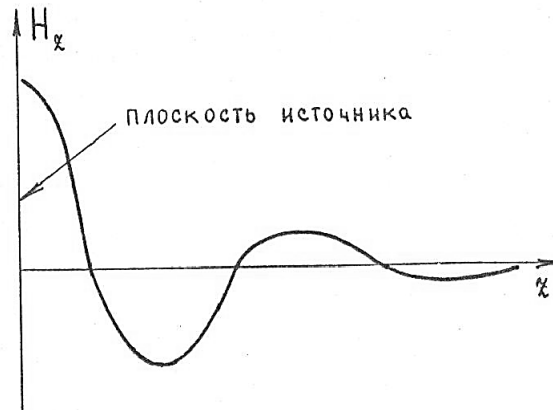


Рис. 1. Суммарное поле двух КВ

При возбуждении поля стоячей волны, затухающего при удалении от источника, рис. 1, можно говорить о возникновении в двухслойном волноводе, в области существования комплексных волн, резонанса, который называется [4] комплексным.

Посмотрим, нельзя ли создать условия для преимущественного возбуждения одной из комплексных волн.

Возьмем функции распределения токов следующего вида:

$$j^e = j_r^e = j_0^e e^{-i\beta z}; \quad j^m = j_m = ij_0^m e^{-i\beta z}, \quad (6)$$

где  $\beta$  совпадает с продольным волновым числом комплексной волны I;  $j_0^e$  и  $j_0^m$  – действительные величины.

Подставив (6) в (2 а, б) и выполнив интегрирование по продольной координате, с учетом выражений (4) получаем:

$$A = \int_S (j_0^m H_{r_0} + ij_0^e E_{r_0}) dS (z_2 - z_1), \quad (7)$$

$$\bar{A} = \frac{1}{2\beta_1} \int_S (j_0^e E_{r_0}^* + ij_0^m H_{r_0}^*) dS [\cos 2\beta_1 z_2 - \cos 2\beta_1 z_1 - i(\sin 2\beta_1 z_2 - \sin 2\beta_1 z_1)], \quad (8)$$

где  $S$  – поперечное сечение волновода;  $[z_1 \div z_2]$  – интервал, в котором заключены источники.

Из (8) видим, что если:

$$z_2 - z_1 = \frac{1}{2} n\lambda_g, \quad (9)$$

амплитуда обратной комплексной волны II равна нулю, в то время как, в соответствии с (7), амплитуда прямой волны I отлична от нуля. В (9)  $\lambda_g = \frac{2\pi}{\beta_1}$ ;  $n=1,2,3\dots$

Таким образом, взяв источники поля типа антенны бегущей волны (6), подбором интервалов по продольной оси волновода, в которых заключены эти источники, можно добиться возбуждения только одной комплексной волны. Это свидетельствует о том, что рассматриваемые комплексные волны могут существовать независимо. При независимом существовании волн с комплексными волновыми числами в системе без диссипации энергии их природа может быть объяснена только при отсутствии переноса этими волнами через поперечное сечение направляющей системы реальной мощности [1-3].

Задача о возбуждении одной КВ источником типа антенны бегущей волны является самосогласованной, а КВ в этом случае следует называть волной, присоединенной к источнику.



Особенностью рассматриваемой задачи о возбуждении является запись правой части уравнения Гельмгольца. Она представляется решением однородной краевой задачи о собственных волнах КДЭВ. Её самосогласованность связана с тем, что волновые числа в правой части уравнения Гельмгольца, которое в данном случае называем присоединенным, совпадают с волновыми числами волн, описываемых присоединенной краевой задачей. Классификация «несамосопряженная краевая задача» относится к однородной задаче, для которой не выполняется второй признак самосопряженности [1-3] – эквивалентность граничных условий прямой и сопряженной краевых задач, определенных на нескольких согласуемых интервалах.

Источники, описываемые действительными функциями координат, возбуждают в круглом двухслойном экранированном волноводе по обе стороны от себя по две комплексные волны с противоположно направленными фазовыми скоростями. Это приводит к возникновению стоячей волны, поле которой локализовано вблизи источника. При этом отрезок волновода, включаемый «на проход» или «на отражение» (в первом случае в плоскости симметрии, перпендикулярной оси волновода, располагаются возбуждающий и воспринимающий электроды, во втором – лишь один возбуждающий электрод), во всем диапазоне комплексных волн ведет себя как резонатор и имеет при этом фильтрующие свойства. Поскольку в отличие от обычного резонанса отмеченное явление, возникающее в двухслойном экранированном волноводе, обнаруживает резонансные свойства (возрастание выходного сигнала в схеме «на проход» и резкое падение коэффициентов стоячей волны  $K_{стU}$  в схеме «на отражение») во всем частотном диапазоне комплексных волн, оно классифицировано [4] как «комплексный резонанс».

Резонансным признаком рассматриваемого явления служит факт увеличения запасенной энергии в указанной ранее полосе частот, что позволяет ввести понятие добротности (в энергетической формулировке), вычислить ее и измерить косвенным методом. Экспериментальные исследования комплексного резонанса привели [9, 10] к созданию полосовых СВЧ-фильтров простой конструкции с теоретически рассчитываемой полосой пропускания.

### Заключение

Задача о возбуждении комплексных волн, формулируемая на присоединенном уравнении Гельмгольца, в котором в правой части стоит решение однородной краевой задачи, является самосогласованной. Её решение, когда правая часть указанного уравнения соответствует бегущей волне, описывает бегущую комплексную волну, присоединенную к источнику. Когда в правой части присоединенного уравнения Гельмгольца стоит функция, соответствующая стоячей волне, краевая задача описывает комплексный резонанс. И в том, и в другом случаях в качестве правой части присоединенного уравнения Гельмгольца берется решение соответствующей однородной краевой задачи.

### Библиографический список

1. **Веселов, Г.И.** Слоистые металло-диэлектрические волноводы / Г.И. Веселов, С.Б. Раевский. – М.: Радио и связь, 1988. – 247 с.
2. **Раевский, А.С.** Неоднородные направляющие структуры, описываемые несамосопряженными операторами / А.С. Раевский, С.Б. Раевский. – М.: Радиотехника, 2004. – 110 с.
3. **Раевский, А.С.** Комплексные волны / А.С. Раевский, С.Б. Раевский. – М.: Радиотехника, 2010. – 223 с.
4. **Веселов, Г.И.** Исследование комплексных волн двухслойного экранированного волновода / Г.И. Веселов, В.А. Калмык, С.Б. Раевский // Радиотехника. – 1980. – Т. 35. – № 9. – С. 59–61.
5. **Будурис, М.** Цепи сверхвысоких частот / М. Будурис, П. Шелевье. – М.: Советское радио, 1979. – 286 с.
6. **Сазонов, Д.М.** Устройства СВЧ / Д.М. Сазонов, А.Н. Гридин, Б.А. Мишустин. – М.: Высш. шк., 1981. – 295 с.

7. Альтман, Дж. Устройства СВЧ / Дж. Альтман. – М.: Мир, 1968. – 487 с.
8. Вайнштейн, Л.А. Электромагнитные волны / Л.А. Вайнштейн. – М.: Радио и связь, 1988. – 440 с.
9. А.с. 934561 СССР. Полосовой фильтр / Калмык В.А., Раевский С.Б., Веселов Г.И.
10. А.с. 1091262 СССР Полосовой фильтр / Калмык В.А., Раевский С.Б., Веселов Г.И.

*Дата поступления  
в редакцию 10.07.2017*

**A.S. Raevskii, S. B. Raevskii, T.S. Ryzhakova**

**THE REGIONAL AFFILIATE TASK AS A SPECIAL CASE  
THE PROBLEM OF EXCITATION**

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

**Purpose:** to consider the complex resonance and individual excitation of complex waves from the position of the adjoint boundary value problem formulated on the Helmholtz equation, on the right-hand side of which there is a function that is a solution of a homogeneous boundary-value problem.

**Design/methodology/approach:** Investigation of the distribution of the electromagnetic field in a circular two-layer shielded waveguide made it possible to observe the effect of a sharp increase in the field amplitude upon transition from the frequency domain corresponding to propagating waves to the region of existence of complex waves.

**Findings:** The problem of the excitation of complex waves, formulated on the adjoint Helmholtz equation, in which the solution of the homogeneous boundary-value problem on the right-hand side is self-consistent. Its solution, when the right-hand side of the equation corresponds to a traveling wave, describes a traveling complex wave connected to the source. When the right-hand side of the adjoint Helmholtz equation has a function corresponding to a standing wave, the boundary value problem describes a complex resonance. In both cases, the solution of the corresponding homogeneous boundary value problem is taken as the right-hand side of the adjoint Helmholtz equation.

**Originality/value:** A feature of the problem of excitation under consideration is the writing of the right-hand side of the Helmholtz equation. It is represented by the solution of a homogeneous boundary-value problem about the eigenwaves of a circular two-layer shielded waveguide. Its self-consistency is related to the fact that the wave numbers on the right-hand side of the Helmholtz equation, which in this case is called the adjoint, coincide with the wave numbers of the waves described by the adjoint boundary value problem.

*Key words:* complex resonance, complex waves, round two-layer shielded waveguide.

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

УДК 620.19:629.5.023

О.А. Белов

## СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ КОМПЛЕКСНОЙ ЗАЩИТЫ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОРПУСОВ КОРАБЛЕЙ И СУДОВ ОТ КОРРОЗИИ

Камчатский государственный технический университет

Коррозия стальных корпусов кораблей и судов является основной причиной износа судна, снижения прочности корпусных конструкций и безопасности плавания. Для обеспечения защиты корпусов от коррозии, достижения требуемого уровня снижения или предотвращения коррозии, необходима реализация комплексного подхода. Такой подход должен быть основан на рациональном использовании различных методов защиты и контроля, учитывающих конструктивные особенности корпусов и условия технической эксплуатации кораблей и судов.

*Ключевые слова:* коррозия, лакокрасочное покрытие, электрохимическая защита, контроль, электрод сравнения, человеческий фактор.

По своим свойствам и химическому составу морская вода является высоко коррозионно-активной средой. Это обстоятельство служит основной причиной интенсивных коррозионных процессов корпуса судна, корпусных конструкций, систем, устройств и механизмов. Интенсивность коррозии определяется комплексом факторов различной природы. Например, усиленная коррозия в области переменной ватерлинии кораблей и судов обусловлена повышенным содержанием кислорода в поверхностных слоях воды. Наличие в морской воде большого количества микроорганизмов также способствует ускорению коррозии и обрастанию соприкасающихся с водой металлоконструкций. Жизнедеятельность микроорганизмов существенно ускоряет процесс разрушения противокоррозионного покрытия и способствует развитию локальных очагов коррозии.

Применение общих методов защиты от коррозии направлено на снижение интенсивности коррозии и предотвращение местных коррозионных, коррозионно-эрозионных и коррозионно-механических повреждений материалов и конструкций. Комплексная защита от коррозии плавучих сооружений должна предусматривать возможность рационального использования различных методов защиты и контроля для обеспечения снижения или предотвращения коррозии [1, 2].

Комплексная организация защиты металлических корпусов кораблей и судов от коррозии должна предусматривать качественное обеспечение следующих мероприятий:

1. Подбор и применение для корпусных конструкций технологичных, коррозионно-стойких материалов;
2. Выполнение специальной обработки судостроительных сталей, с целью улучшения их антикоррозионных качеств;
3. Применение обработки поверхности лакокрасочными защитными покрытиями;
4. Внедрение электрохимической защиты металлических корпусов и их элементов;
5. Обеспечение эффективного контроля работоспособности систем защиты от коррозии.

Первые две группы мероприятий относятся в большей степени к конструктивному на-

правлению, так как листы стали как для постройки судов, так и для замены обшивки корпуса при доковых ремонтах поставляются в готовом к использованию виде. Однако уже на этом этапе необходимо проведение отдельных видов контроля, в том числе лабораторными методами, для проверки антикоррозионных свойств стали и ее соответствия паспортным данным.

Эффективное использование лакокрасочных защитных покрытий, согласно [3, 4], требует последовательной реализации технологических операций: обоснованный выбор лакокрасочных материалов, технологическая обработка поверхности перед нанесением материала, определение состава и консистенции лакокрасочных материалов, обработка поверхности покрытием в соответствии с технологической картой и проведение контрольных мероприятий по определению качества исполнения работ. Основным видом контроля на этом этапе является визуальный контроль, в том числе с применением специальных технических средств контроля.

Для реализации комплексной защиты металлических корпусов кораблей и судов от коррозии на этом этапе, кроме традиционных мероприятий контроля качества исполнения работ, на наш взгляд, необходимо добавить еще два вида объективного контроля.

*Во-первых*, необходим контроль качества лакокрасочных материалов перед применением. Отсутствие централизованных поставок и возможность самостоятельного выбора, как самого материала, так и его поставщика требует обоснованного подхода. Стоимость материала не должна быть приоритетным показателем, так как не отражает способность материала обеспечивать качественную защиту корпуса.

*Во-вторых*, должен проводиться контроль качества работы лакокрасочного защитного покрытия после спуска судна на воду. Комплексная защита от коррозии подводной части корпуса судна должна предусматривать использование лакокрасочных покрытий совместно с применением электрохимической защиты.

Эффективным способом противокоррозионной защиты металлических материалов является электрохимическая защита. Ее реализация основана на снижении скорости коррозии металлических конструкций путем смещения потенциала до некоторого значения, соответствующего минимальной скорости растворения металла. Таким образом, задачей электрохимической защиты является снижение коррозии на участках с местными повреждениями лакокрасочных покрытий, на которых при отсутствии электрохимической защиты развиваются язвенная и точечная коррозия, что способствует увеличению шероховатости обшивки и высоким скоростям местной коррозии.

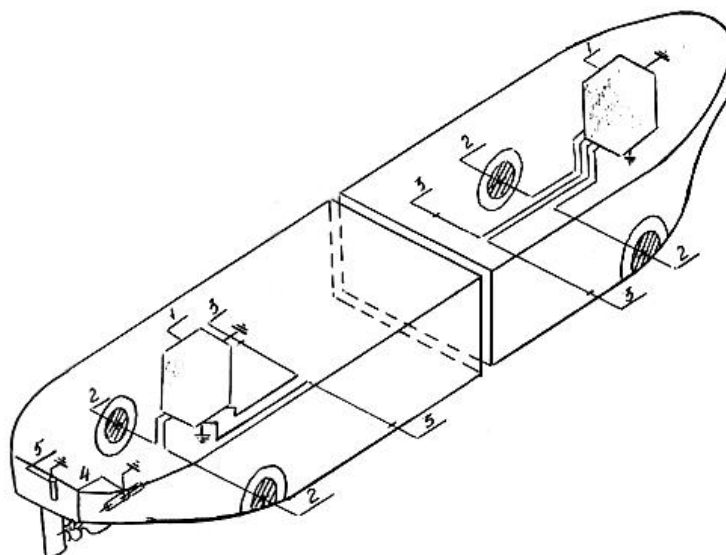
В настоящее время на подводной части корпуса применяется электрохимическая защита двух основных типов: катодная защита (наложенным током) и протекторная защита. Тип электрохимической защиты определяется на этапе проектирования судна с учетом его функционального назначения и предполагаемых условий эксплуатации. В процессе эксплуатации, ремонта и модернизации кораблей и судов следует не только сохранить выбранный тип защиты, но и обеспечить его работоспособность на всех этапах использования судна.

В общем виде система катодной защиты включает в себя три основных элемента: блок электропитания, рабочие анодные узлы и электроды сравнения (рис. 1).

В качестве блока электропитания обычно применяют статические преобразователи с выходным напряжением 12 или 24 В. В системах катодной защиты зарекомендовали себя полупроводниковые выпрямители с автоматическим регулированием.

Стандартный анодный узел состоит из рабочей поверхности анода, в качестве которой служит платиновая фольга толщиной 50 мкм, нанесенная на титановую или ниобиевую основу тепловой прокаткой в среде аргона и изоляционной системы. Типовые системы катодной защиты оборудуются анодными узлами марки АУ-1, АУ-2, АКК и АП в зависимости от характеристик судна.

Электроды сравнения, входящие в типовые системы катодной защиты, представляют собой хлорсеребряные электроды марок ЭСХП-СС и ЭСБС-СС с пористой диафрагмой, которая предохраняет измеритель от воздействия набегающего потока морской воды.



**Рис. 1. Принципиальная схема автоматической катодной защиты:**

1 - автоматический блок электропитания (выпрямитель); 2 - анодные узлы; 3 - электроды сравнения; 4 - контактно-щеточное устройство; 5 - кабель для заземления руля

Система катодной защиты обеспечивает регулирование основных параметров - токоотдачи и протяженности защиты. Расположение кормовых анодов регламентируется размерами судна и составляет расстояние 10–15 м от гребного винта. Хлорсеребряные электроды сравнения располагаются в точках с наименьшим снижением потенциалов. В процессе производства работ на корпусе судна следует обеспечить защиту поверхности анодов и электродов сравнения от загрязнения и механических повреждений.

Таким образом, комплексный подход при использовании катодных систем защиты должен включать себя не только мероприятия по техническому обслуживанию, но и постоянному контролю работоспособности системы в процессе эксплуатации.

Стандартизация и регламент покраски подводной части корпуса судна определяют четыре типа системы окраски. Если система окраски судна, согласно международным стандартам ИСО 8501 – 8504, относится к IV типу, то на таком судне применяется только протекторная защита [3, 4].

**Таблица 1**

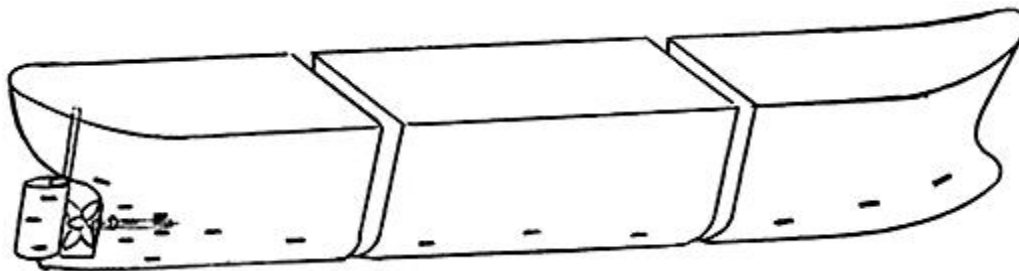
**Основные характеристики материалов протекторной защиты**

Состав сплава	Теоретическая токоотдача, А·час/кг	КПИ, %	Потенциал по НВЭ		Плотность, г/см
			стационарный	рабочий	
Zn to USMil Spec A-18002-j	781	95	-0,82	-0,73	7,1
Al-Zn (3,5-5) In (0,015-0,025)	2600	88	-0,82	-0,70	2,8
Al-Zn (4-6) Zr (до 0,1)	2880	85	-0,82	-0,70	2,8
Al-Zn (4-6) Mg (0,5-1,0) Sn (0,05-0,1)	2880	85	-0,90	-0,80	2,8

Протекторная защита, по сути, является упрощенной разновидностью катодной защиты. В данном случае, на защищаемую поверхность устанавливают протектор, представляю-

щий собой сплав электроотрицательных металлов, растворение в морской воде которых защищает от разрушения основной металл корпусных конструкций. Общая характеристика основных типов протекторных сплавов представлена в табл. 1.

Протекторная защита не предусматривает регулирование тока, поэтому для равномерного распределения тока протекторы равномерно размещаются вдоль подводной поверхности судна. Примерная типовая схема размещения протекторов в подводной части корпуса судна приведена на рис. 2. Чтобы предотвратить отрыв и повреждение протекторов при швартовке судна, их располагают в скуловой части. Для взаимного перекрытия областей защиты расстояние между протекторами у основных типов морских судов, как правило, составляет 6-8 м.



**Рис. 2.** Общая схема расположения протекторов на подводной части корпуса судна

При установке протекторов следует учитывать, как геометрию корпуса судна, так и особенности его эксплуатации. В носовой части корпуса протекторы устанавливаются не только в районе скулы, но и поблизости от скулового киля, поскольку в носовой части корпуса создаются более благоприятные для коррозии условия.

В связи с интенсивными коррозионными процессами в районе кормового подзора и гребного винта должно находиться не менее 1/4 всей протекторной массы, применяемой для защиты кормы. При этом следует учесть не только количественные показатели, но и необходимо обеспечить работоспособность, как отдельных протекторов, так и системы защиты в целом.

В связи с этим, важным этапом организации комплексной защиты металлических корпусов кораблей и судов от коррозии является обеспечение контроля состояния и работоспособности систем защиты. Согласно [5], в процессе эксплуатации системы протекторной защиты периодически один раз в месяц необходимо измерять потенциал корпуса плавучего объекта в контрольных точках по всей длине на заглублении до 0,5–1,0 м переносным хлор-серебряным электродом сравнения и переносным милливольтметром.

Проведенные исследования [6–12] показали, что такая периодичность контроля для обеспечения комплексной защиты корпуса судна от коррозии явно недостаточна, а предлагаемый метод измерения с использованием хлорсеребряного электрода сравнения является трудоемким и не совершенным.

Визуальный осмотр подводной части корпуса судна с помощью водолазов, с использованием подводного телевидения и фотосъемки является достаточно дорогостоящим и не позволяет в полной мере определить работоспособность комплексной системы защиты от коррозии, а значит и качественное непрерывное освидетельствование корпуса судна в соответствии с требованиями руководящих документов [13]. Особенно затруднительно проведение данных мероприятий при недостаточной прозрачности воды в акватории.

Учитывая важность контроля состояния и работоспособности систем защиты, более целесообразным является применение для этих целей способа проф. В.А. Швецова [14], основанного на применении в качестве электрода сравнения устройств на базе электроугольных изделий [15–17]. При этом периодичность измерения потенциала корпуса судна в контрольных точках должна быть не реже одного раза в неделю.



### Выводы

1. Предлагаемые руководящими документами методы организации комплексной защиты металлических корпусов кораблей и судов от коррозии являются недостаточными для достижения поставленной цели.

2. Необходимо дальнейшее совершенствование методологии защиты кораблей и судов от коррозии, с широким применением более совершенных методов контроля на всех этапах технической эксплуатации.

3. Предлагаемый способ непрерывного контроля работоспособности протекторной защиты металлических корпусов плавучих объектов [14] является наиболее эффективным для обеспечения комплексной защиты судов от коррозии.

### Библиографический список

1. **Зобочев, Ю. Е.** Защита судов от коррозии и обрастания / Ю. Е. Зобочев, Э. В. Солинская. – М.: Транспорт, 1984. – 174 с.
2. **Белов, О.А.** Проблемы методологии контроля электрохимической защиты стальных корпусов кораблей и судов / О.А. Белов, А.Б. Дороганов // Вестник Камчатского государственного технического университета. – Петропавловск-Камчатский, 2016. – Вып. 37. – С. 10–13.
3. РД 31.28.10-97 Комплексные методы защиты судовых конструкций от коррозии. Издание официальное. – М.: Стандартинформ, 1998. – 37 с.
4. Руководство по защите корпусов надводных кораблей ВМФ от коррозии и обрастания. – М.: Военное издательство, 2002. – 350 с.
5. ГОСТ 9.056-75. Стальные корпуса кораблей и судов. Общие требования к электрохимической защите при долговременном стояночном режиме [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200015017>. (Дата обращения 20.07.2015 г.)
6. **Белозёров, П.А.** Использование электроугольных изделий при измерении потенциала стальных корпусов кораблей и судов / П.А. Белозёров [и др.] // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер. Морская техника и технология. – 2015. – Вып. 1 (февраль). – С. 27–31.
7. **Белозёров, П.А.** Совершенствование методики измерения защитного потенциала стальных корпусов кораблей и судов / П.А. Белозёров [и др.] // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер. Морская техника и технология. – 2014. – Вып. 4 (ноябрь) – С. 7–12.
8. **Белов, О.А.** Внедрение усовершенствованного способа контроля систем протекторной защиты стальных корпусов судов камчатского флота / О.А. Белов [и др.] // Вестник Камчатского государственного технического университета; Петропавловск-Камчатский, 2017. – Вып. 39. – С. 6–11.
9. **Швецов, В.А.** Обоснование выбора необходимого числа параллельных измерений защитного потенциала стальных корпусов кораблей и судов в контрольной точке / В.А. Швецов [и др.] // Вестник Камчатского государственного технического университета; Петропавловск-Камчатский, 2016. – Вып. 35. – С. 40–46.
10. **Швецов, В.А.** Обоснование возможности исключения внешнего осмотра систем протекторной защиты стальных корпусов судов / В.А. Швецов [и др.] // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер. Морская техника и технология. – 2017. – Вып. 1 (февраль). – С. 29–38.
11. **Белов, О.А.** Оценка технической готовности системы с учетом влияния человеческого фактора // Вестник Камчатского государственного технического университета; Петропавловск-Камчатский, 2014. – Вып. 30. – С. 11–16.
12. **Швецов, В.А.** Обоснование необходимости подготовки операторов для измерения потенциала стальных корпусов судов и кораблей / В.А. Швецов [и др.] // Вестник Камчатского государственного технического университета; Петропавловск-Камчатский, 2016. – Вып. 37. – С. 19–24.
13. НД № 2-030101-009 Руководство по техническому наблюдению за судами в эксплуатации. – СПб.: ФАУ «Российский морской регистр судоходства», 2017. – 289 с.

14. Пат. RU № 2589246. Способ контроля режима работы протекторной защиты стальных корпусов кораблей и судов / Швецов В.А., Адельшина Н.В., Белозеров П.А., Коростылев Д.В., Белавина О.А. / опубл. 10.07.2016, бюл. № 19.
15. Пат. RU № 153280. Устройство для измерения защитного потенциала стальных корпусов кораблей и судов / Швецов В.А., Белозеров П.В., Шунькин Д.В., Диденко А.А., Луценко А.А., Коростелев Д.В., Белавина О.А.; опубл. 10.07.2015, Бюл. №19.
16. Пат. RU № 154475. Устройство для проверки правильности показаний хлорсеребряных электродов сравнения / Швецов В.А., Белозёров П.А., Адельшина Н.В., Белавина О.А., Коростылёв Д.В.; опубл. 27.08.2015, Бюл. № 24.
17. Пат. RU № 169581. Устройство для контроля протекторной защиты стальных корпусов кораблей и судов / Швецов В.А., Белов О.А., Шунькин Д.В., Белавина О.А., Лысянский С.П., Адельшина В.В.; опубл. 23.03.2017, Бюл. № 24.

*Дата поступления  
в редакцию: 09.09.2017*

**O.A. Belov**

## **MODERN STATE OF THE INTEGRATED PROTECTION ORGANIZATION OF METAL CASINGS OF VESSELS AND SHIPS FROM CORROSION**

Kamchatka state technical university

**Purpose:** Corrosion of steel hulls of ships and ships is the main cause of vessel wear, reducing the strength of hull structures and safety of navigation. To ensure the protection of the housings against corrosion, to achieve the required level of reduction or to prevent corrosion, an integrated approach is necessary.

**Methodology** includes theoretical study in the field of ship protection from the corrosion, experimental investigation of the corrosion processes, and invention of special devices to control such processes during ship running. Moreover the effective way of monitoring operating conditions of protecting systems is suggested.

**Research results:** On basis of the worked out method and devices for the control of the protecting systems the necessity of improvement of technical-organizational antirust actions is grounded.

**Findings:** Present methods of complex protection of steel ship hulls from the corrosion are inefficient. Suggested method of monitoring the efficiency of protecting systems for metal hulls of floating objects is the most effective as it provides the complex protection of vessels from the corrosion. Moreover, the following improvement of the protective methods is necessary. Wider implementation of improved methods of monitoring at all stages of technical maintenance more than is required

*Key words:* corrosion, paint coating, electrochemical protection, control, reference electrode, complex methods, human factor.

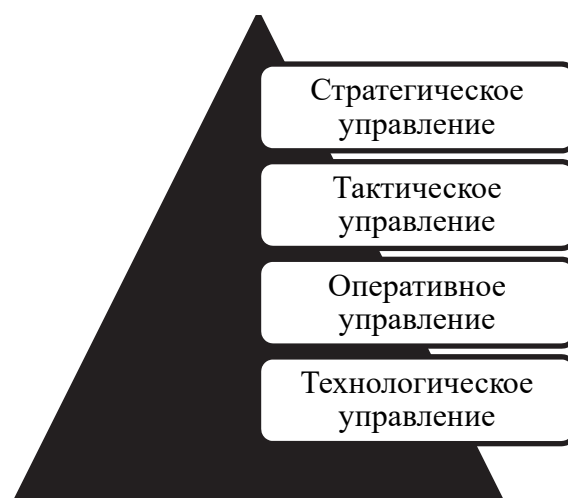
УДК 65.011.56

Е.А. Гаврилюк<sup>1</sup>, С.А. Манцеров<sup>2</sup>**РАЗРАБОТКА СТРАТЕГИИ ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА ОБОРУДОВАНИЯ  
ГАЗОТРАНСПОРТНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ  
НА ОСНОВЕ ИНДЕКСА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ**Филиал ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород» - Инженерно-технический центр<sup>1</sup>,  
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>2</sup>

Проведён анализ метода оценки технического состояния оборудования в рамках стратегии ТОиР. Качественная оценка технического состояния оборудования представляет собой достаточно широкий специфический субъективный показатель, который затруднителен для восприятия и использования (например, при сравнительном анализе). В связи с этим, возникает актуальная задача исследования методологии расчёта и возможности применения универсального количественного показателя – индекса технического состояния (ИТС), в комплексе задач ТОиР.

*Ключевые слова:* техническое обслуживание и ремонт (ТОиР), индекс технического состояния (ИТС), оценка технического состояния, ReliabilityCenteredMaintenance (RCM).

Единая система газоснабжения (ЕСГ) России представляет собой уникальный технологический комплекс, включающий в себя объекты добычи, переработки, транспортировки, хранения и распределения газа. Являясь крупнейшим в мире механизмом, ЕСГ требует развитой системы управления с чётко выраженной иерархической структурой (рис. 1).



**Рис. 1. Иерархическая структура управления предприятием**

На уровне стратегического управления решаются задачи оптимизации бизнес-процессов, организационной структуры, оценки эффективности бизнеса. На уровне тактического управления решаются задачи планирования и бюджетирования (формализация бизнес-процессов). На уровне оперативного управления осуществляется управление производственным процессом, загрузкой оборудования, основными фондами предприятия. Технологическое управление (уровень управления технологией производства) сводится к сбору, обработке и обобщению данных с цехового оборудования.

В связи с комплексной автоматизацией производственных процессов и производств результативность работы любой крупной компании напрямую зависит от наличия у неё со-

вершенной информационной инфраструктуры, от надёжности и стабильности функционирования информационной системы (ИС), эффективности организации информационных потоков. В связи с этим, в настоящее время методы управления процессами и производствами неразрывно связаны с информационными системами управления (ИСУ). Безусловно, найти чёткое разграничение между классами ИС, ввиду тенденции к их интеграции (пересечение выполняемых функций), весьма сложно, однако приведём в соответствие уровни управления и классы ИСУ (рис. 2). В табл. 1 представлено описание каждого класса ИС.



Рис. 2. Иерархическая структура управления предприятием

Таблица 1

Описание классов ИС

Класс ИС	Описание
Supervisory Control And Data Acquisition (SCADA)	Диспетчерское управление и сбор данных
Автоматическая система управления технологическими процессами (АСУ ТП)	Контроль технологических параметров и управление (аналогично SCADA)
Manufacturing Execution System (MES)	Система управления производственными процессами
Enterprise Resource Planning (ERP)	Система управления предприятием, автоматизирующая все подразделения предприятия
Customer Synchronized Resource Planning (CSRP)	Система управления предприятием, ориентированная на конечного потребителя
Online Analytical Processing (OLAP)	Аналитическая обработка данных в реальном времени

Системы ERP и MES взаимосвязаны, но выполняют различные функции в иерархической структуре управления производством. ERP-системы направлены, в первую очередь, на решение административно-хозяйственных и учётно-финансовых задач. То есть ERP-системы, в разрезе газотранспортного предприятия, отвечают на вопрос, кому и сколько объёмов газа должно быть транспортировано. MES-системы оперируют более точной информацией о производственных процессах. MES-система, аккумулируя и обобщая данные, полученные от различных производственных и технологических объектов, выводит на верхний уровень организацию всей производственной деятельности от формирования производственного заказа до получения готовой продукции.

MES-системы формируют связь производственных процессов с бизнес-процессами, что в свою очередь направлено на улучшение финансовых показателей предприятия. Таким

образом, MES-системы являются связующим звеном между финансово-хозяйственными операциями и производственными.

В современных условиях борьбы за высокие производственные и экономические показатели на промышленных предприятиях, задача реформирования сферы ТОиР становится всё более актуальной. ТОиР как один из модулей единой системы управления производством прошёл несколько этапов (преобразований) своего развития. Каждый из этих этапов можно охарактеризовать появлением новой стратегии (метода) ТОиР эксплуатируемого оборудования (рис. 3).

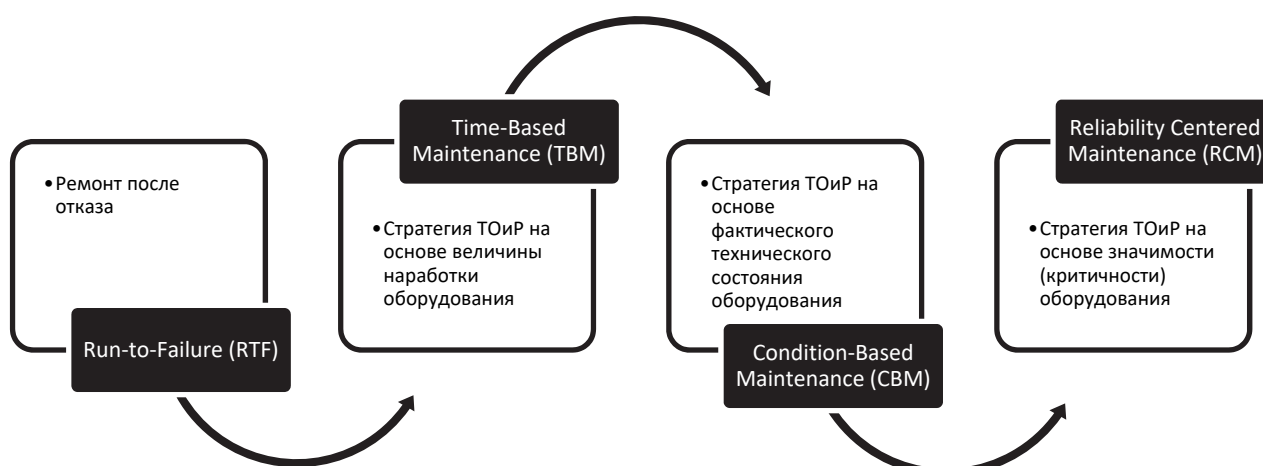


Рис. 3. Этапы развития стратегии ТОиР

Как видно из рис. 3, процесс эволюции ТОиР оборудования имеет тенденцию предупредительного обслуживания с одновременным снижением издержек на это обслуживание. В табл. 2 представлена сравнительная характеристика стратегий ТОиР.

Таблица 2

Сравнительная характеристика стратегий ТОиР

Стратегия	Преимущества	Недостатки
RTF	Простота. Отсутствие затрат на диагностику	Стратегия не предполагает предупреждение отказов. Стратегия в основном применима к простому некритичному оборудованию
TBM	Простота. Отсутствие затрат на диагностику	Стратегия связывает вероятность отказов только с временным фактором
CBM	Высокая достоверность данных	Сложная реализация. Большие затраты на диагностику оборудования. Стратегия применима в основном для крупных промышленных предприятий
RCM	Универсальность. Гибкость	Сложный анализ критичности оборудования (анализ последствий отказов)

На данный момент стратегия ReliabilityCenteredMaintenance (RCM) является самой современной, однако она не имеет чёткого алгоритма и постоянно модернизируется. Единственное, что можно отметить, RCM направлена на нивелирование недостатков и максимальное использование преимуществ предыдущих стратегий.

В силу изложенного, стратегия RCM является весьма гибкой и универсальной стратегией ТОиР с открытой методологией. В данной статье приведён универсальный метод оценки технического состояния оборудования в рамках задач ТОиР. Метод оценки технического состояния оборудования на примере системы автоматического управления газоперекачивающим агрегатом приведён в [1 и 2].

Оценка технического состояния основывается на системе показателей, конфигурация которой связана со структурой оборудования. Системы разбиваются на подсистемы, подсистемы на элементы. Следует помнить, что слишком подробное структурирование приводит к существенному увеличению трудоёмкости диагностических работ, хотя, с другой стороны, приводит к увеличению точности оценки. Вопрос структурирования оборудования является специфическим и должен рассматриваться частным образом, с учётом особенностей конкретного промышленного предприятия.

После структурирования оборудования для каждого элемента выделяются параметры, по которым будет вестись оценка его технического состояния. В основе представленного метода лежит следующий принцип. Каждый технический объект обладает определённым набором свойств (параметров), которые характеризуют его состояние. В течение времени эксплуатации за этими свойствами необходимо наблюдать с целью предупреждения отказов. Основным преимуществом данного метода является, то, что в качестве исходных данных могут использоваться разнородные данные – как объективного (инструментального), так и субъективного (результаты осмотров, инспекций, экспертных оценок состояния) контроля.

В качестве интегрального показателя состояния объекта используется Индекс технического состояния (ИТС). Величина ИТС характеризует состояние объекта как степень соответствия его текущих параметров номинальным (идеальным) значениям. В качестве метода расчёта ИТС удобно использовать метод средневзвешенного значения, который, в случае необходимости, позволит регулировать вес каждого параметра в общей системе оценки:

$$I_1 = \frac{\sum_i p_{2i} I_{2i}}{\sum_i p_{2i}},$$

$$I_2 = \frac{\sum_i p_{3i} I_{3i}}{\sum_i p_{3i}},$$

$$I_3 = \frac{\sum_i p_{4i} I_{4i}}{\sum_i p_{4i}},$$

где  $I_1$  – ИТС системы;

$I_2$  – ИТС подсистемы;

$I_3$  – ИТС элемента;

$p_{2i}$  – вес  $i$ -й подсистемы;

$p_{3i}$  – вес  $i$ -го элемента;

$p_{4i}$  – вес  $i$ -го параметра;

$I_{2i}$  – ИТС  $i$ -й подсистемы;

$I_{3i}$  – ИТС  $i$ -го элемента;

$I_{4i}$  – ИТС элемента по  $i$ -му параметру.

Таким образом, на основе данной информации формируется единая база данных, которая учитывает влияние разнородных параметров и различных структурных единиц на оборудование в целом. Иерархический принцип построения системы оценки позволит на разных уровнях детализировать и фильтровать информацию, что повысит эффективность работы предприятия. ИТС является понятным для широкого круга показателем технического состояния объекта, которым легко могут оперировать в своей работе даже «не технические специалисты» (например, экономисты, менеджеры).



Как видно из методики оценки технического состояния, с помощью индекса, параметры, по которым оценивается техническое состояние объекта, могут добавляться и удаляться при необходимости. Таким образом, представленная методика реализует стратегию RCM следующим образом (рис. 4): для менее ответственного оборудования число параметров оценки может быть минимальным и ограничиваться, например, временем эксплуатации (стратегия TBM), а для более ответственного оборудования число параметров оценки может быть увеличено (стратегия CBM).

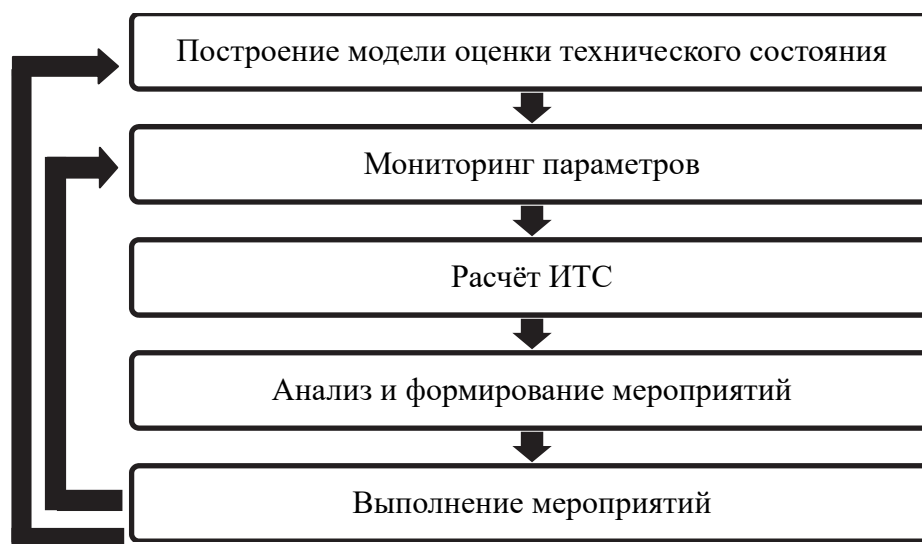


Рис. 4. Стратегия ТОиР на основе ИТС

Таким образом, представленный подход является наиболее гибким и универсальным с унифицированным комплексным показателем (индексом) технического состояния объекта. При дальнейшем развитии методики и создании автоматизированной информационной системы, Индекс может динамически отражать техническое состояние оборудования на протяжении всего его жизненного цикла. На основании ИТС может осуществляться планирование и учет выполнения работ, что в полной мере реализует стратегию RCM.

#### Библиографический список

1. **Гаврилюк, Е.А.** Комплексная оценка технического состояния систем автоматического управления газоперекачивающими агрегатами / Е.А. Гаврилюк, С.А. Манцеров, С.Г. Синичкин // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 11. – С. 2141–2145.
2. **Гаврилюк, Е.А.** Прогнозирование отказов систем автоматического управления газоперекачивающими агрегатами на основе индекса технического состояния и степени риска / Е.А. Гаврилюк, С.А. Манцеров, А.Ю. Панов // *Фундаментальные исследования*. – 2015. – № 7–2. – С. 309–313.
3. **Гаврилюк, Е.А.** Методика оценки технического состояния систем автоматического управления газоперекачивающими агрегатами / Е.А. Гаврилюк, С.А. Манцеров, С.Г. Синичкин // *Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева*. – 2014. – № 5 (107), специальный выпуск. – С. 191–194.
4. **Манцеров, С.А.** Мониторинг состояния объектов на основе методов функциональной систематики // *Труды НГТУ им. Р.Е. Алексева* Современные проблемы механики и автоматизации в машиностроении и на транспорте. – Н. Новгород, – 2008. – Т. 67. – С. 23–27
5. **Манцеров, С.А.** Создание баз данных объектов машиностроения на основе формул функциональной систематики // *Вестник ВГТУ*. – Воронеж. – 2007. Т.3. – №11. – С. 171–176.

6. Манцеров, С.А. Развитие систем единой функциональной систематики для хранения данных о техническом состоянии объекта / С.А. Манцеров, А.Ю. Панов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – Н. Новгород, 2013. – № 6 (ч.1). – С. 235–238.

*Дата поступления  
в редакцию 20.08.2017*

**Е.А. Gavriliuk<sup>1</sup>, S.A. Mantserov<sup>2</sup>**

**DEVELOPMENT OF GAS-TRANSPORT EQUIPMENT MAINTENANCE  
STRATEGY ON BASIS OF TECHNICAL STATE INDEX**

Branch of ООО «Gazprom transgaz Nizhny Novgorod» - Technical engineering centre<sup>1</sup>,  
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev<sup>2</sup>

**Purpose:**At present there are several researches of maintenance strategy of industrial equipment. The essential problem of heterogeneous factors systematization deals with the study of object structure. The problem of qualitative technical state evaluation use deals with its broad interpretation. Moreover it is very difficult to understand and apply for nonexperts (for example economists, managers).

**Method:**Consequently, the task to explore the availability and computing methods of universal quantitative technical state evaluation – Technical State Index (TSI) seems very urgent. The up-to-date approach used in our research seems effective to apply in industrial organization.

**Results:**Maintenance strategy of gas-transport equipment on basis of technical state index is developed.The advanced work deals with the maintenance and technical state prediction on basis of TSI to confirm the comprehensive application of TSI.

**Application domain:**Implementation of developed strategy could increase the efficiency of gas-transport equipment maintenance and repair management. Developed strategy could be used for Decision Support System creation.

*Key words:* maintenance, technical state index (TSI), technical state evaluation, Reliability Centered Maintenance (RCM).

УДК 621.18

А.А. Гусев<sup>1</sup>, А.В. Локтев<sup>2</sup>, А.В. Малахов<sup>2</sup>**ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ  
НА ОБВОДНЕННЫХ УЧАСТКАХ**ОАО "Гипрогазцентр", г. Нижний Новгород<sup>1</sup>,  
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>2</sup>

Приводится специфика расчётов магистральных газопроводов при прокладке на обводнённых участках.

*Ключевые слова:* магистральный газопровод, сопротивление грунта, выталкивающая сила, устойчивость газопровода.

Газопроводы на территории России пролегают как в сухих, суглинистых почвах, так и торфяных и обводнённых. Трассы газопроводов пересекают заболоченную Тундру на тысячи километров. Данная статья раскрывает всю специфику прокладки газопроводов в грунтах, обладающих слабой удерживающей способностью.

При проектировании газопровода на обводнённых участках необходимо учитывать дополнительные нагрузки от выталкивающей силы воды. Возникает опасность изменения проектного положения газопровода, в результате потери продольной устойчивости с выходом (всплытием) на поверхность участков газопровода. В результате выхода (всплытия) газопровода на поверхность образуются арки и гофры, что, в конечном итоге, провоцирует отказы и может привести к аварии на трассе. В связи с этим для обеспечения устойчивости положения газопровода в траншее на проектных отметках производится его балластировка или закрепление. Для этой цели используются конструкции, создающие давление на газопровод (пригрузку), а также конструкции, использующие давление грунта в основании траншеи.

Опыт эксплуатации показал, что расчет таких трубопроводов с учетом действительных условий их работы приобретает важнейшее значение.

Учитывая, что возможно возникновение больших перемещений газопровода при малом сопротивлении грунта, обязательна проверка деформаций трубы при действии всех нагрузок и воздействий. Это в особенности относится к участкам газопровода, имеющим начальный изгиб в вертикальной плоскости или относительно большие углы поворота в горизонтальной плоскости.

Для балластировки и закрепления газопроводов должны применяться способы и конструкции, допущенные к применению в соответствии с действующими нормами и стандартами и имеющие ТУ на их изготовление.

Применяемые для изготовления конструкций материалы должны обладать стойкостью по отношению к агрессивным компонентам грунтов.

Выбор конструкции или способа балластировки газопровода проводится с учетом следующих основных факторов:

- категории местности;
- характера и типа грунтов;
- уровня грунтовых вод;
- рельефа местности;
- схем прокладки, наличия углов поворотов, кривых искусственного гнутья;
- методов производства строительно-монтажных работ;
- условий эксплуатации;
- технико-экономической целесообразности их применения.

В зависимости от конкретных условий строительства газопровода на отдельных участках трассы, строительного сезона, характеристик грунтов, уровня грунтовых вод и схем прокладки должны применяться следующие конструкции и способы балластировки и закрепления газопроводов:

- сборные кольцевые железобетонные или чугунные утяжелители;
- железобетонные утяжелители охватывающего типа;
- анкерные устройства, заполняемые грунтом полимерконтейнеры, а также грунты засыпки, в том числе с использованием полотнищ из нетканого синтетического материала.

### Определение нагрузки от выталкивающей силы воды

На газопровод, прокладываемый на обводнённых участках трассы, действует выталкивающая сила воды. Если на каком-то участке трассы эта сила окажется больше силы тяжести газопровода, вместе с удерживающей способностью грунта, то произойдет всплытие данного участка. Сначала выходят на поверхность углы поворота, а затем примыкающие к ним прямолинейные участки. Это приводит, как правило, к серьёзным последствиям, не редко становясь причиной аварии.

Приведем расчетные формулы для определения нагрузки от выталкивающей силы воды.

Поперечная нагрузка на газопровод от выталкивающей силы воды зависит от уровня воды относительно трубы. Если пренебречь кривизной газопровода, то выталкивающая сила, действующая на единицу длины газопровода, определяется по формуле:

$$q_{\text{в}} = \gamma_{\text{в}} \cdot F_{\text{о}}; F_{\text{о}} = \frac{D_{\text{н}}^2}{8} (\alpha - \sin \alpha),$$

где  $\gamma_{\text{в}}$  - удельный вес воды с учетом растворенных и взвешенных в ней веществ;  
 $D_{\text{н}}$  - наружный диаметр трубы с учетом изоляционного покрытия и футеровки;  
 $\alpha$  - угол, характеризующий уровень воды относительно оси трубы:

$$\alpha = 2\pi, \text{ если } h_{\text{Е}} \leq h;$$

$$\alpha = 2\pi - \arccos \frac{2 \cdot (h_{\text{о}} - h_{\text{в}})}{D_{\text{н}}}, \text{ если } h < h_{\text{в}} \leq h_{\text{о}};$$

$$\alpha = 2 \arccos \frac{2 \cdot (h_{\text{в}} - h_{\text{о}})}{D_{\text{н}}}, \text{ если } h_{\text{о}} < h_{\text{в}} \leq H;$$

$$\alpha = 0 \text{ если } h > H,$$

где  $h_{\text{Е}}$  - расстояние от верха засыпки до уровня воды;  $h$ ,  $h_{\text{о}}$  - расстояние от верха засыпки до верхней образующей и оси газопровода;  $H$  - расстояние от верха засыпки до нижней образующей газопровода.

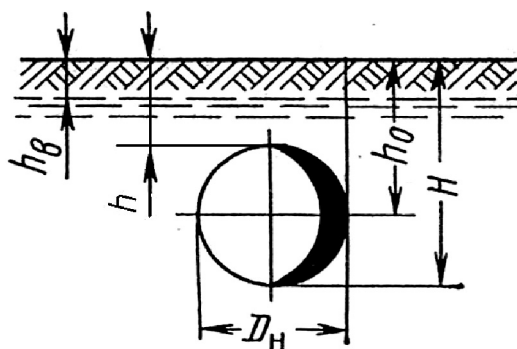


Рис. 1. Принятые обозначения подземного газопровода при обводнении

При  $h_E \leq h$  формула записывается в виде:

$$q_B = \frac{\pi D_H^2}{4} \cdot \gamma_B \approx 0,8 D_H^2 \gamma_B.$$

### Сопротивление грунта перемещениям трубы

Кроме расчетного веса трубы, на газопровод действует нагрузка от грунта, которым засыпан этот газопровод. Грунт обладает удерживающей способностью, которая как вес трубы препятствует всплытию газопровода на поверхность. Далее приведём расчетные формулы для определения сопротивления грунта вертикальным перемещениям трубы.

При расчетах подземных газопроводов, прокладываемых на обводненных участках, можно пользоваться теми же моделями грунта, что и для газопроводов в обычных условиях. При этом изменяются только количественные параметры модели.

На основании проведенных экспериментов установлены эмпирические формулы для определения предельной удерживающей способности грунта. В зависимости от уровня воды предельное сопротивление грунта вертикальным перемещениям трубы определяется по формулам, при  $h_E \leq h$ :

$$q_{пр.гр} = D_H \left[ \gamma_{гр} \cdot h_B + \gamma_{взв} \cdot \left( h - h_0 - \frac{\pi \cdot D_H}{8} \right) \right] + k \cdot \left\{ [\gamma_{гр} \cdot h_B \cdot (2 \cdot h_0 + h_B) + \gamma_{взв} \cdot (h_0 - h_B)^2] \cdot \operatorname{tg} 0,7 \cdot \varphi_{гр} + \frac{0,7 \cdot h_0 \cdot c_{гр}}{\cos 0,7 \cdot \varphi_{гр}} \right\};$$

$$q_{пр.гр} = \gamma_{гр} \cdot \left( h_B \cdot D_H - \frac{\pi \cdot D_H^2}{4} + F_{обв} \right) + \gamma_{взв} \cdot \left[ (h_0 - h_B) \cdot D_H + \frac{\pi \cdot D_H^2}{8} - F_{обв} \right] + k \cdot \left[ \gamma_{гр} \cdot h_B \cdot (2 \cdot h_0 - h_B) \cdot \operatorname{tg} 0,7 \cdot \varphi_{гр} + \gamma_{взв} \cdot (h_0 - h_B)^2 \right] \cdot \operatorname{tg} 0,7 \cdot \varphi_{гр} + \frac{0,7 \cdot h_0 \cdot c_{гр}}{\cos 0,7 \cdot \varphi_{гр}};$$

$$q_{пр.гр} = \gamma_{гр} \cdot D_H \cdot \left( h_0 - \frac{\pi \cdot D_H}{8} \right) + k \cdot \left[ \gamma_{гр} \cdot h_0^2 \cdot \operatorname{tg} 0,7 \cdot \varphi_{гр} + \frac{0,7 \cdot h_0 \cdot c_{гр}}{\cos 0,7 \cdot \varphi_{гр}} \right],$$

где  $D_H$  - наружный диаметр трубы;

$\gamma_{гр}$  - объемный вес грунта в естественном (необводненном) состоянии;

$\gamma_{взв}$  - объемный вес грунта во взвешенном состоянии;

$k$  - коэффициент, характеризующий призму выпора, принимаемый равным единице для газопроводов условным диаметром от 100 см и более и меньше единицы – для трубопроводов меньших диаметров ( $k = D_H / 100$ );

$\varphi_{гр}$  - угол внутреннего трения грунта;

$c_{гр}$  - сцепление грунта;

$F_{обв}$  - площадь сечения трубы, находящейся в обводненном состоянии.

Объемный вес грунта во взвешенном состоянии определяется по формуле:

$$\gamma_{взв} = \frac{\gamma_y - \gamma_B}{1 + \varepsilon},$$

где  $\gamma_y$  - удельный вес грунта (скелета);

$\gamma_B$  - удельный вес воды;

$\varepsilon$  - коэффициент пористости.

При назначении уровня обводнения рассчитываемого участка газопровода следует исходить не только из данных непосредственных изысканий трассы трубопровода, но и учи-

тывать прогнозируемый уровень воды, связанный с гидрогеологическими условиями и их изменениями во времени. При назначении объемного веса необводненного грунта необходимо учитывать изменение его влажности за счет капиллярного подсоса из нижней обводненной части грунта. Коэффициент пористости грунта должен отражать не только результаты изысканий, но и способ и время обратной засыпки траншеи грунтом.

При проектировании газопроводов на участках, сложенных грунтами, которые могут перейти в жидкопластическое состояние, при определении выталкивающей силы следует вместо плотности воды принимать объемный вес разжиженного грунта, определяемый по данным инженерных изысканий.

Кроме поперечных перемещений газопровода, большую опасность представляет его продольное перемещение, которое может вызвать значительные деформации самого газопровода, а при прокладке в насыпи (что характерно в местах пересечения с другими газо- и нефтепроводами) её разрушение.

Сопротивление грунта продольным перемещениям трубы зависит от уровня воды и относительной глубины заложения газопровода. Предельное сопротивление грунта продольным перемещениям трубы на единицу ее длины можно определить по следующей формуле:

$$t_{\text{пр.гр}} = 2 \cdot \pi \cdot D_{\text{н}}^2 \cdot c_h \cdot \left( \gamma_{\text{гр}} \frac{h_{\text{в}}}{h_{\text{о}}} + \gamma_{\text{взв}} \frac{h_{\text{о}} - h_{\text{в}}}{h_{\text{о}}} \right) \cdot \text{tg} \cdot \varphi_{\text{гр}} + 0,6 \cdot \pi \cdot D_{\text{н}} \cdot c_{\text{гр}}.$$

При расчетах следует учитывать, что если  $h_{\text{Е}} > h_{\text{о}}$ , то необходимо принимать  $h_{\text{Е}} = h_{\text{о}}$ . Коэффициент  $c_h$ , учитывающий образование свода естественного равновесия при продольных перемещениях трубы, определяется по следующим зависимостям:

– для песчаных грунтов:

$$c_h = 0,416 \cdot \frac{h}{D_{\text{н}}} - 0,056 \cdot \frac{h^2}{D_{\text{н}}^2} + 0,095;$$

– для глинистых грунтов:

$$c_h = 0,367 \cdot \frac{h}{D_{\text{н}}} - 0,046 \cdot \frac{h^2}{D_{\text{н}}^2} + 0,06.$$

### Сопротивление перемещениям трубы при наличии балластировки

Если удерживающая способность грунта и собственный вес трубы недостаточны для обеспечения заданного положения газопровода, то необходимо использовать разного рода пригрузки, которые создают дополнительную нагрузку, препятствующую вертикальному перемещению трубы.

Таким образом, при определении сопротивления поперечным перемещениям трубы необходимо учитывать не только сопротивление грунта, но и сопротивление, оказываемое дополнительными закрепляющими устройствами. Расчетное предельное сопротивление перемещениям трубы вверх можно записать в виде:

$$q_{\text{пр}} = q_{\text{п.т}} + n_{\text{гр}} \cdot q_{\text{пр.гр}},$$

где  $q_{\text{пт}}$  - положительная плавучесть газопровода;

$n_{\text{гр}}$  - коэффициент перегрузки для грунта, принимаемый согласно СНиП II-45-75 равным 0,8;

$q_{\text{пр.гр}}$  - предельное сопротивление грунта.

Расчетная положительная плавучесть газопровода определяется по формуле:

$$q_{\text{п.т}} = q_{\text{тр}} + q_{\text{доп}} - q_{\text{выт}},$$

где  $q_{\text{тр}}$  - расчетный вес единицы длины газопровода;

$q_{\text{выт}}$  - расчетная выталкивающая сила на единицу длины газопровода.



Под  $q_{доп}$  следует понимать величину пригрузки на единицу длины газопровода. При расчете на эксплуатационный период в  $q_{доп}$  включается расчетный вес продукта. Если балластировка осуществляется с помощью грузов, то при вычислении  $q_{доп}$  следует учитывать выталкивающую силу воды, действующую на данную конструкцию.

При вычислении расчетной положительной плавучести по приведённой ранее формуле необходимо нормативные значения всех составляющих умножать на коэффициент перегрузки, который в соответствии с нормами следует принимать:

- для собственного веса газопровода равным единице;
- выталкивающей силы воды – 1,05 – 1,15;
- для веса железобетонных грузов – 0,95;
- для сплошного обетонирования – 0,93 – 0,9;
- для веса продукта – 0,95.

Если газопровод закрепляется анкерами, то величина  $q_{доп}$  вычисляется по формуле:

$$q_{доп} = B_{анк} / l,$$

где  $B_{анк}$  - расчетное усилие (допускаемая нагрузка) на анкерное устройство;

$l$  - расстояние между анкерами.

Для винтовых анкеров согласно СНиП 2.05.06-85 расчетное усилие ( $B_{анк}$ ) определяется по формуле:

$$B_{анк} = z \cdot k_{гр} \cdot N_{анк} \cdot m_{анк},$$

где  $z$  - число анкеров в одном анкерном устройстве;

$k_{гр}$  - коэффициент несущей способности грунта, в котором находятся лопасти анкеров, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Группа грунта	Грунты	$k_{гр}$
I	Мягкопластичные глины и суглинки, пластичные супеси	1
II	Пески мелкие, плотные и средней плотности, маловлажные, влажные и водонасыщенные; полутвердые, тугопластичные глины и суглинки	2
III	Пески гравелистые, крупные и средней зернистости, маловлажные, влажные и водонасыщенные; твердые супеси, глины и суглинки	3

$N_{анк}$  - максимальная (критическая) нагрузка на один винтовой анкер, завинченный в грунт I группы на глубину не менее шести диаметров лопасти, приведена в табл. 2.

Таблица 2

Диаметр анкера, мм	$N_{анк}$ , Н	Диаметр анкера, мм	$N_{анк}$ , Н
100	6 500	300	30 000
150	7 500	400	53 000
200	13 500	500	83 000
250	21 000	600	120 000

$m_{анк}$  - коэффициент условий работы анкерного устройства, принимаемый равным 0,5 при  $z \leq 2$  и 0,4 – при  $z > 2$ .

### Устойчивость положения и продольная устойчивость газопровода

Расчет газопровода, как и любой другой строительной конструкции, должен производиться на нагрузки и воздействие в условиях строительства и эксплуатации. В процессе строительства должно обеспечиваться проектное положение подземного газопровода. Не касаясь технологии производства работ по укладке газопровода на дно траншеи, рассмотрим те нагрузки и воздействия, которые действуют при этом, а также условия обеспечения проектного положения газопровода.

Укладка газопровода на дно траншеи может производиться при отсутствии обводнения траншеи, причем обводнение может быть уже после засыпки газопровода грунтом. Укладка газопровода в некоторых случаях может производиться и в обводненную траншею. В связи с этим в различный период действуют и различные сочетания нагрузок. В общем случае будем исходить из того, что обводненный грунт обладает определенной удерживающей способностью против поперечных вертикальных (вверх) перемещений трубы. Удерживающая способность определяется расчетом на основании данных гидрогеологических изысканий и прогноза изменения свойств грунтов. В ряде случаев, исходя из возможной недостоверности исходных данных по грунтам, а также с целью обеспечения надежности трубопроводов больших диаметров, согласно нормам, «балластировка грунтом» не учитывается.

При укладке газопровода на дно необводненной траншеи необходимо обеспечить проектное положение газопровода, т.е. соответствующие углы поворота газопровода в вертикальной плоскости при ограничениях по изгибным напряжениям. Углы поворота газопровода часто выполняются упругим изгибом трубопровода под действием собственного веса трубы. Исходя из этого, определяется профиль газопровода. Для обеспечения устойчивости положения газопровода в этом случае необходимо, чтобы выполнялось следующее условие:

$$B_{изг} \leq m \cdot q_{тр}, (*)$$

где  $B_{изг}$  - интенсивность упругих сил;

$m$  - коэффициент условия работы газопровода;

$q_{тр}$  - расчетный вес единицы длины трубы.

Интенсивность упругих сил может определяться в зависимости от направления угла поворота. Отметим, что  $B_{изг}$  зависит не только от угла поворота, но и уровня максимальных напряжений, характеризуемых минимальным радиусом упругого изгиба. Исходя из последнего, ограничивается область применения упругого изгиба газопровода для осуществления поворота газопровода. Профиль траншеи определяется в зависимости от угла поворота и минимального радиуса упругого изгиба оси газопровода. Если в соответствии с принятым в проекте углом поворота и минимальным радиусом упругого изгиба оси трубы условие (\*) не выполняется, то для изгиба трубопровода он может пригружаться балластом. В этом случае условие (\*) запишется в виде:

$$B_{изг} \leq m \cdot (q_{тр} + q_{бал}), (**)$$

где  $q_{бал}$  - расчетная интенсивность поперечной нагрузки от балласта с учетом коэффициента перегрузки.

Если до начала эксплуатации газопровода, возможно его обводнение, то устойчивость положения для этого периода проверяют по условию:

$$B_{изг} + q_{в.т} + q_{в.б} \leq m \cdot (q_{тр} + q_{бал} + q_{пр.гр}), (***)$$

где  $q_{вт}$  - расчетная интенсивность выталкивающей силы, действующей на трубу с учетом коэффициента перегрузки;

$q_{вб}$  - расчетная выталкивающая сила, действующая на конструкцию балластировки с учетом коэффициента перегрузки;

$q_{пр гр}$  - расчетное предельное сопротивление грунта поперечным вертикальным (вверх) перемещениям трубы, с учетом коэффициента перегрузки, равного 0,8.

Левая часть условия (\*\*\*) отражает интенсивность нагрузок, действующих в поперечном направлении оси газопровода вверх, правая – вниз.

Отметим, что при расчете устойчивости положения на период последующего (после укладки газопровода в сухую траншею) обводнения траншеи в предэксплуатационный период в  $q_{бал}$  включается также при наличии анкеров, их удерживающая способность.

При укладке газопровода в обводненную траншею устойчивость его положения на период строительства проверяют по условию:

$$B_{изг} + q_{в.г} + q_{в.б} \leq m \cdot (q_{тр} + q_{бал}).$$

В отличие от предыдущего случая, здесь не учитывается удерживающая способность анкеров и грунта.

При укладке газопровода в необводненную траншею и закреплении его анкерами повышенной несущей способности при последующем обводнении в газопроводе могут возникнуть значительные изгибные напряжения. В связи с этим необходимо произвести проверку против развития чрезмерных деформаций. Особенно это относится к участкам газопроводов, имеющих упругий изгиб выпуклостью вверх. Условия для ограничения деформаций:

$$\sigma_{пр}^H \leq \frac{c}{k} \cdot R_2^H,$$

где  $\sigma_{пр}^H$  - максимальные продольные напряжения от нормативных нагрузок;

$R_2^H$  - нормативный предел текучести металла труб.

При определении продольных напряжений для рассматриваемого периода считается, что пролет газопровода равен расстоянию между анкерами, а в пролете действует соответствующая поперечная нагрузка, направленная вверх. Кроме того, учитываются и продольные напряжения, связанные с упругим изгибом трубы по заданному профилю.

В записанных формулах, определяющих устойчивость положения газопровода в период строительства (до эксплуатации), не отражены нагрузки, связанные с воздействиями деформаций грунта, сопровождающихся изменением его структуры, например, пучение и др. При их наличии необходим расчет, учитывающий действие дополнительных нагрузок. Отметим также, что здесь не учитывается изменение температуры стенок трубы в течение времени от укладки газопровода в траншею и засыпки его грунтом до начала эксплуатации газопроводной системы. Обычно изменение температуры в этот период меньше, чем изменение температуры стенок труб, связанное с температурой транспортируемого продукта. Однако в некоторых случаях, например, если температурные перепады для периода строительства и эксплуатации отличаются по знаку, необходимо и для случая строительства проверять продольную устойчивость газопровода.

### Библиографический список

1. **Айнбиндер, А.Б.** Расчет магистральных трубопроводов на прочность и устойчивость: справочное пособие / А.Б. Айнбиндер. – М.: Недра, 1982. – 341 с.
2. ВСН 39-1.9-003-98. Ведомственные строительные нормы. Конструкции и способы балластировки и закрепления подземных газопроводов. – М.: ИРЦ Газпром, 1998.
3. СНиП 2.05.06-85\* "Магистральные трубопроводы". – М., 1985.
4. СНиП III-42-80\* "Магистральные трубопроводы". – М., 1980.
5. СТО Газпром 2-2.1-459-2010 Нормы проектирования переходов трубопроводов через водные преграды, в том числе в условиях Крайнего Севера. – М., 2010.

6. СТО Газпром 2-2.2-577-2011 Средства балластировки и закрепления газопроводов в проектном положении. Типовые методики испытаний. – М., 2011.
7. СТО Газпром 2-2.2-578-2011 Средства балластировки и закрепления газопроводов в проектном положении. Типовые методики испытаний. – М., 2011.

*Дата поступления  
в редакцию 05.08.2017*

**A.A. Gusev<sup>1</sup>, A.V. Loktev<sup>2</sup>, A.V. Malakhov<sup>2</sup>**

## **THE DESIGN DETAILS OF GAS MAIN PIPELINES FOR THE WATERED GROUNDS**

JSC “Giprogazcenter”, Nizhny Novgorod<sup>1</sup>,  
Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alekseev<sup>2</sup>

**Subject:** This article reveals the specifics of natural gas pipelines in soils with weak retention capacity. The pipeline in flooded areas should take into account the additional load from the lifting force of the water and the resistance to vertical movement of the pipe. In some cases it is necessary to use ballast to create an additional force that prevents the vertical movement of the pipe.

**Results:** Loads are found from the lifting force of the water, the resistance of the soil to the movement of the pipe, the resistance to movement of the pipe in the presence of ballasting. The stability of the position and the longitudinal stability of the pipeline are calculated.

*Key words:* Gas-main pipeline, resistance of soil, buoyant force, pipeline stability.

УДК 621.12

С.Н. Зеленов, П.В. Семашко

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ  
ЦИРКУЛЯЦИОННОГО ПОДШИПНИКА ГТД**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлены результаты экспериментальных исследований по определению оптимальных геометрических размеров циркуляционного подшипника газотурбинного двигателя (ГТД). Сложность и объем данных исследований связаны с большими затратами времени и материальных ресурсов на их проведение в реальном исполнении. Эти причины обусловили необходимость применения современных методов компьютерного моделирования и проектирования технических изделий.

В работе использованы:

- программный комплекс *FlowVision*, предназначенный для моделирования трёхмерных течений жидкости и газа в технических и природных объектах, а также визуализации этих течений методами компьютерной графики;
- геометрическое моделирование исследуемых объектов с помощью программы *Unigraphics*;
- движение к оптимуму по методу "крутого восхождения".

Выполненные исследования показали, что данная методика проектирования газостатических подшипников ГТД, построенная на совместном использовании моделирования энергетических и геометрических параметров, позволяет существенно ускорить и удешевить процесс создания изделия с рациональными геометрическими размерами.

*Ключевые слова:* циркуляционный подшипник, геометрические размеры, методика проектирования, компьютерное моделирование, движение к оптимуму.

Сложность и объем экспериментальных исследований обуславливают большие затраты ресурсов на проведение экспериментов, получение достоверных результатов и разработку необходимых технических средств. Эти причины делают весьма актуальной проблему оптимизации методов и программ исследований, стратегий и планов эксперимента.

Применение методов планирования эксперимента позволяет сократить число опытов и решить поставленную задачу при минимальном объеме экспериментов с заданной точностью.

В данной работе объектом исследования является циркуляционный подшипник газотурбинного двигателя (ГТД). Подшипники с циркуляционным поддувом применяются в высокоскоростных узлах главным образом в тех случаях, когда масса ротора мала по сравнению с возможной подъёмной силой, а дополнительными радиальными нагрузками можно пренебречь. В этих условиях шип при вращении занимает в подшипнике положение, близкое к центральному. Когда скорость вращения чисто аэродинамического подшипника равна нулю, его устойчивая работа возможна только вследствие "жёсткости" аэростатической подушки, создаваемой циркуляционным поддувом.

Циркуляционный подшипник представляет собой цилиндрическую втулку, снабжённую отверстиями для поддува сжатого газа (рис. 1), расположенными симметрично по окружности.

Сжатый газ (рис. 2), подаваемый в цилиндрическую камеру под давлением  $P_0$ , проходит через ряд отверстий в смазочный зазор. В каждом ряду по окружности равномерно распределены 8...12 отверстий, имеющих ступенчатую форму: диаметр выходной части равен 0,5...1,5 мм, а входной для облегчения сверления 2...2,5 мм. Диаметр выходного отверстия должен быть таким, чтобы "жёсткость" аэростатического смазочного слоя была максимальной при заданном давлении поддува.

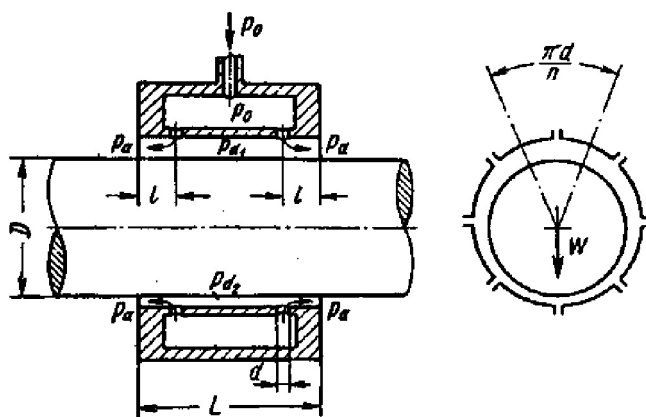


Рис. 1. Циркуляционный подшипник

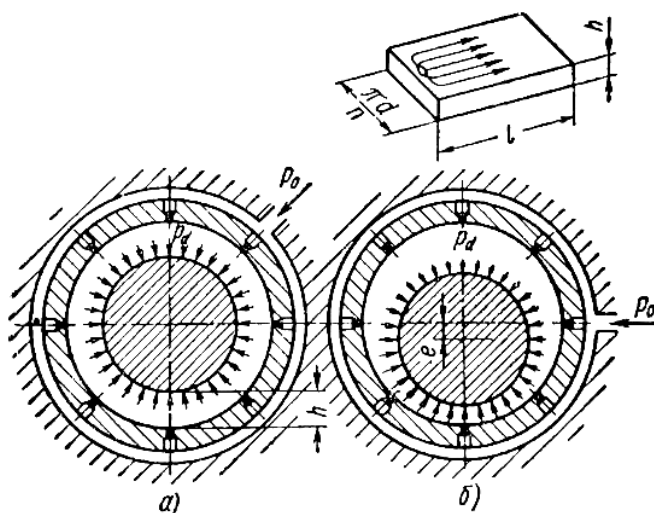


Рис. 2. Распределение давлений по окружности циркуляционного подшипника при различных положениях шипа:

*a* – центральное без нагрузки на вал; *б* – эксцентричное под нагрузкой

Подаваемый в подшипники сжатый газ выполняет три функции:

- предотвращает возникновение скоростного вихря;
- исключает возможность попадания в смазочный зазор абразивной пыли, воды и агрессивных газов за счет создания в зазоре повышенного по сравнению с атмосферным давления и одновременно устраняет необходимость защиты подшипников какими-либо уплотняющими устройствами, что значительно упрощает конструкцию;
- устраняет сухое трение при пуске и остановке.

В момент пуска аэродинамический подшипник с циркуляционным поддувом работает как аэростатический. При неподвижном вале он обеспечивает отделение шипа от подшипника вследствие образования статической газовой подушки. Во время вращения подъемная сила, создаваемая в результате действия сил вязкости в смазочном слое, увлекаемом вращающимся валом, во много раз больше статической подъемной силы.

Одной из задач, решаемых при проектировании аэродинамического подшипника, является достижение наибольшего значения величины подъемной силы при заданных конструктивных ограничениях.

Установим зависимость подъемной силы от трех основных геометрических размеров (факторов): относительной длины подшипника  $\lambda = L/D$ ; относительного эксцентриситета  $\bar{e} = e/h$ , где  $e$  – эксцентриситет, мм;  $h$  – зазор между валом и втулкой подшипника, мм.



Для решения поставленной задачи воспользуемся известными методами планирования экспериментов [1, 2, 3].

На начальном этапе эксперименты проводим по плану центрального композиционного планирования (ЦКП) для трех факторов, где факторы варьируются на пяти уровнях:  $-\alpha, -1, 0, +1, +\alpha$  [3, 4].

Области определения каждого фактора, интервалы варьирования, координаты нулевой точки эксперимента и соответствующие им кодированные значения факторов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Факторы и уровни их варьирования

Факторы	Уровни факторов					Области определения	
	$-\alpha$	-1	0	+1	$+\alpha$	верхние границы	нижние границы
$x_1(\lambda)$	1,1	1,2	1,5	1,8	1,9	1,2	1,8
$x_2(\bar{e})$	0,2	0,3	0,5	0,7	0,8	0,3	0,7
$x_3(h)$	0,012	0,013	0,015	0,017	0,018	0,013	0,017

После проведения в соответствии с планом 15-ти экспериментов получаем уравнение функции отклика. Затем, используя метод "крутого восхождения" [5], осуществим движение к области оптимума функции.

Из-за невозможности проведения дорогостоящих натуральных экспериментов, они моделируются с помощью программы *FlowVision*.

### Компьютерный эксперимент в *FlowVision*

Программный комплекс *FlowVision* предназначен для моделирования трёхмерных течений жидкости и газа в технических и природных объектах, а также визуализации этих течений методами компьютерной графики.

В нашем случае задачей экспериментов является определение подъёмной силы  $W$ , Н.

Для моделирования экспериментов с помощью программы *Unigraphics* строятся 15 моделей развёрнутого зазора циркуляционного подшипника, соответствующих ЦКП эксперимента [3,4]. В табл. 2 представлены принятые геометрические размеры каналов течения газа в подшипнике.

Для решения задачи определения подъёмной силы была выбрана модель *Full Compressible fluid* (Полностью сжимаемая жидкость). В списке рассчитываемых уравнений отмечаем *Energy* (Энергия), *Velocity* (Скорость) и *Turbulence* (Турбулентность). Выбранная модель и рассчитываемые уравнения означают, что рассматривается задача для турбулентного течения, в которой будут решаться уравнения энергии, уравнения Навье-Стокса и уравнения для турбулентных функций переноса. Из физических параметров в данном практическом случае были заданы начальные значения (*Initial Values*): температура газа  $100^\circ\text{C}$ ; избыточное давление 405300 Па.

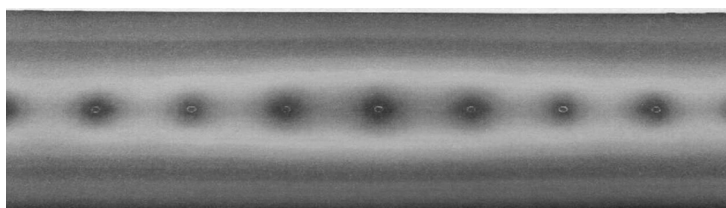
Задаём расчётную сетку, сконцентрированную в плоскостях питательных отверстий и плоскости распространения газа в зазоре подшипника с размерами  $70 \times 5 \times 18$  мм.

Пример визуализации результатов эксперимента с моделью № 1 представлен на рис. 3.

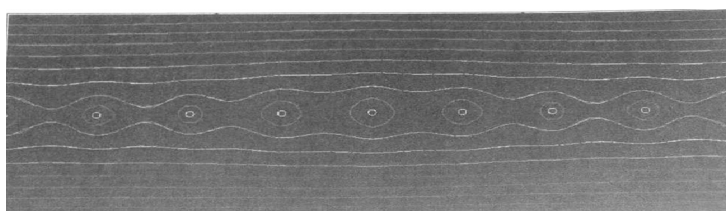
Таблица 2

## Геометрические параметры каналов

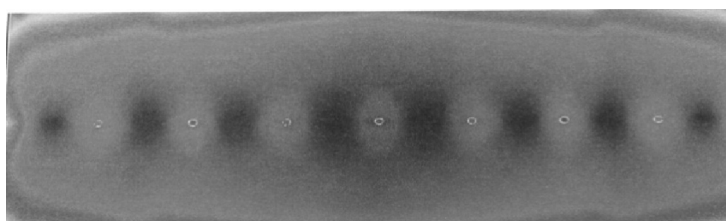
№ модели	$L/D$	$e/h$	$h$ , мм	$D$ , мм	$L$ , мм	$e$ , мм	Части ЦКП ПФЭ 2 <sup>3</sup>
1	1,2	0,3	0,013	30	36	0,0039	ПФЭ 2 <sup>3</sup>
2	1,8	0,3	0,013	30	54	0,0039	
3	1,2	0,7	0,013	30	36	0,0091	
4	1,8	0,7	0,013	30	54	0,0091	
5	1,2	0,3	0,017	30	36	0,0051	
6	1,8	0,3	0,017	30	54	0,0051	
7	1,2	0,7	0,017	30	36	0,0119	
8	1,8	0,7	0,017	30	54	0,0119	
9	1,9	0,5	0,015	30	57	0,0075	"звездные точки"
10	1,1	0,5	0,015	30	33	0,0075	
11	1,5	0,8	0,015	30	45	0,012	
12	1,5	0,2	0,015	30	45	0,003	
13	1,5	0,5	0,018	30	45	0,009	
14	1,5	0,5	0,012	30	45	0,006	"нулевая точка"
15	1,5	0,5	0,015	30	45	0,0075	



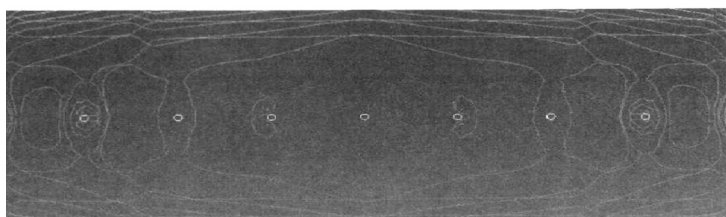
а)



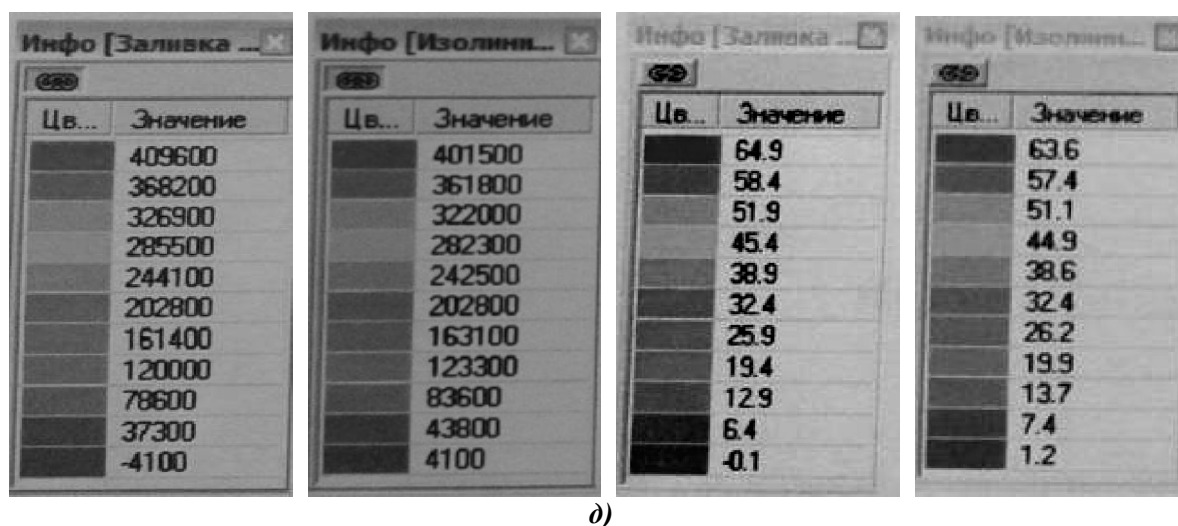
б)



в)



г)



**Рис. 3. Результаты визуализации эксперимента модели №1:**

*a* – заливка из давления; *б* – изолинии давления; *в* – заливка из скорости; *г* – изолинии скорости;  
*д* – значения расчетных параметров соответственно *a*, *б*, *в*, *г*

Найденные для различных сочетаний геометрических параметров газоподводящих каналов подшипника значения подъемной силы приведены в табл. 3.

**Таблица 3**

**Величина подъемной силы**

№ модели	W, Н	№ модели	W, Н
1	190,0	9	314,8
2	235,0	10	273,8
3	428,8	11	466,3
4	474,5	12	31,2
5	156,9	13	225,6
6	178,4	14	439,7
7	406,4	15	295,8
8	409,4		

Далее необходимо определить вид уравнения регрессии для нахождения оптимума функции подъемной силы.

**Движение к оптимуму по методу "крутого восхождения"**

Движение к оптимуму по методу "крутого восхождения" осуществляется с помощью локального описания поверхности отклика изучаемого объекта по планам ПФЭ  $2^k$  или ДФЭ  $2^{k-p}$  в направлении градиента параметра оптимизации.

Приближенное математическое описание объекта исследований по планам ПФЭ и ДФЭ в виде линейной модели

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i \cdot x_i$$

позволяет находить область оптимума путем движения по градиенту, так как коэффициенты  $b_i$  этой модели являются оценками частных производных функции отклика, т. е. компонентами градиента функции отклика  $y = \varphi(x_i)$ .

Расчёт движения к оптимуму по методу "крутого восхождения" производится следующим образом.

Перепишем таблицу ЦКП с учётом значений функции отклика из табл. 2, в результате получим табл. 4.

Таблица 4

## Исходные данные для определения коэффициентов уравнения регрессии

№	$x_0$	$x_1(L/D)$	$x_2(e/h)$	$x_3(h, \text{мм})$	$\varphi(W, H)$
1	1	-1	-1	-1	190,0
2	1	1	-1	-1	235,0
3	1	-1	1	-1	428,8
4	1	1	1	-1	474,5
5	1	-1	-1	1	156,9
6	1	1	-1	1	178,4
7	1	-1	1	1	406,4
8	1	1	1	1	409,4
9	1	1,414	0	0	314,8
10	1	-1,414	0	0	273,8
11	1	0	1,414	0	466,3
12	1	0	-1,414	0	31,2
13	1	0	0	1,414	225,6
14	1	0	0	-1,414	439,7
15	1	0	0	0	295,8

Вычислительный алгоритм реализуется по следующим этапам.

По формуле  $b_i = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N x_{iu} y_u$  определяются коэффициенты регрессии:

$$b_0 = \frac{1}{15} (190 + 235 + 428,8 + 474,5 + 156,9 + 178,4 + 406,4 + 409,4 + 314,8 + 273,8 + 466,3 + 31,2 + 225,6 + 439,7 + 295,8) = 301,7733;$$

$$b_1 = \frac{1}{15} (-190 + 235 - 428,8 + 474,5 - 156,9 + 178,4 - 406,4 + 409,4 + 314,8 \cdot 1,414 - 273,8 \cdot 1,414 + 0 \cdot 466,3 + 0 \cdot 31,2 + 0 \cdot 225,6 + 0 \cdot 439,7 + 0 \cdot 295,8) = 11,5449;$$

$$b_2 = \frac{1}{15} (-190 + 235 - 428,8 + 474,5 - 156,9 + 178,4 - 406,4 + 409,4 + 314,8 \cdot 0 - 273,8 \cdot 0 + 1,414 \cdot 466,3 - 1,414 \cdot 31,2 + 0 \cdot 225,6 + 0 \cdot 439,7 + 0 \cdot 295,8) = 104,9354;$$

$$b_3 = \frac{1}{15} (-190 + 235 - 428,8 + 474,5 - 156,9 + 178,4 - 406,4 - 409,4 + 314,8 \cdot 0 - 273,8 \cdot 0 + 0 \cdot 466,3 + 0 \cdot 31,2 + 1,414 \cdot 225,6 - 1,414 \cdot 439,7 + 0 \cdot 295,8) = -31,9958.$$

Таким образом, уравнение регрессии в кодированных переменных будет иметь вид:

$$y = 301,7733 + 11,5449 x_1 + 104,9354 x_2 - 31,9958 x_3.$$

На основании принятых ранее исходных данных, устанавливаем границы факторного пространства:  $1,2 < x_1 < 1,8$ ;  $0,3 < x_2 < 0,7$ ;  $0,013 < x_3 < 0,017$  (мм).

В качестве центра плана возьмём точку  $x_{i0}$  с координатами:  $x_{10} = 1,5$ ;  $x_{20} = 0,5$ ;  $x_{30} = 0,015$ , а интервалы варьирования выберем:  $\Delta x_1 = 0,3$ ;  $\Delta x_2 = 0,2$ ;  $\Delta x_3 = 0,002$  в соответствующих размерностях.

Осуществим движение к максимуму параметра оптимизации (подъёмная сила). Примем за базовый фактор  $x_1$ , шаг движения в направлении градиента по  $x_1$  равным  $\delta x_1 = 0,01$ , тогда вспомогательный множитель  $\theta = \theta_0 = \delta x_1 / (b_1 \cdot \Delta x_1) = 0,01 / (11,54493 \cdot 0,3) = 0,00288727$ .

При  $\theta_0 = 0,00288727$  рассчитываем шаги движения по  $x_2$  и  $x_3$ :

$$\delta x_2 = \theta_0 \cdot b_2 \cdot \Delta x_2 = 0,00288727 \cdot 104,9354 \cdot 0,2 = 0,061;$$

$$\delta x_3 = \theta_0 \cdot b_3 \cdot \Delta x_3 = 0,00288727 \cdot (-31,99582) \cdot 0,002 = -0,0001848.$$

Для перехода от уравнения регрессии в кодированных переменных и расчёта значений функции отклика в натуральных значениях  $y^p$  воспользуемся формулой

$$x_i = \frac{1}{\Delta x_i} (x_i - x_{i0}),$$

в результате получим уравнение регрессии в натуральных переменных:

$$y^p = 301,7733 + 38,483(x_1 - 1,5) + 524,677(x_2 - 0,5) - 15997,913(x_3 - 0,015).$$

Результаты расчёта подъёмной силы по полученному уравнению приведены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты расчета величины подъемной силы

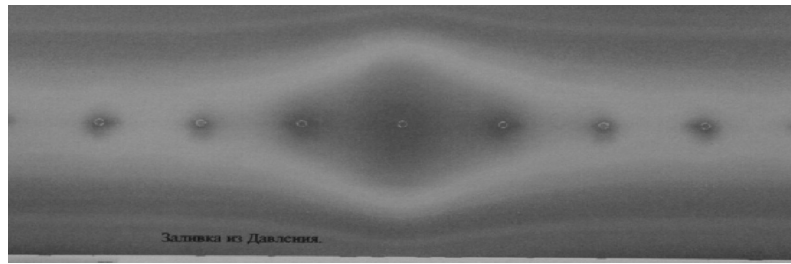
№ опыта	Факторы			Отклик
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$y^p$
1	1,5	0,5	0,015	301,773
2	1,51	0,561	0,015	336,907
3	1,52	0,621	0,015	372,041
4	1,53	0,682	0,014	407,174

При движении к оптимуму были рассчитаны четыре «мысленных» опыта, при этом была достигнута граница факторного пространства по второму фактору. Анализ величин и знаков уравнения регрессии показывает, что для увеличения подъёмной силы следует уменьшать, величину зазора между валом и втулкой подшипника и наоборот увеличить относительную длину подшипника. Найденные значения геометрических параметров:  $x_1 = 1,53$  - относительная длина подшипника,  $x_2 = 0,682$  - относительный эксцентриситет,  $x_3 = 0,014$ , мм, - зазор между валом и втулкой подшипника близки к оптимальным для принятых условий и могут быть заложены в основу дальнейшей конструктивной разработки ГТД.

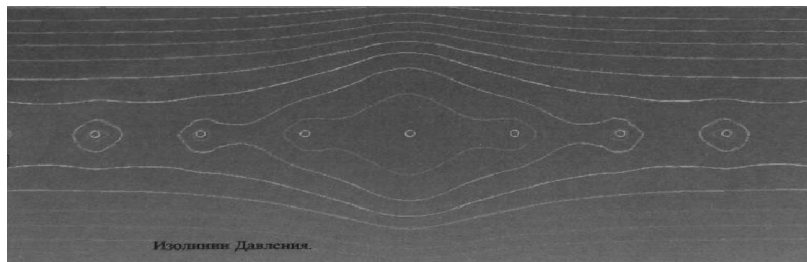
Для проверки правильности расчётов реализуем в *FlowVision* опыт №4, в котором было достигнуто максимальное значение функции отклика – величины подъёмной силы. Результаты визуализации расчетов показаны на рис. 4.

Сравнение результатов визуализации всех проведенных в соответствии с планом экспериментов показало, что в опыте №4 (рис. 4) зона повышенного давления соответствует центральному положению газового шипа, а ее границы занимают наибольшую площадь, что и обеспечивает подшипнику с рациональными размерами создание максимальной подъёмной силы.

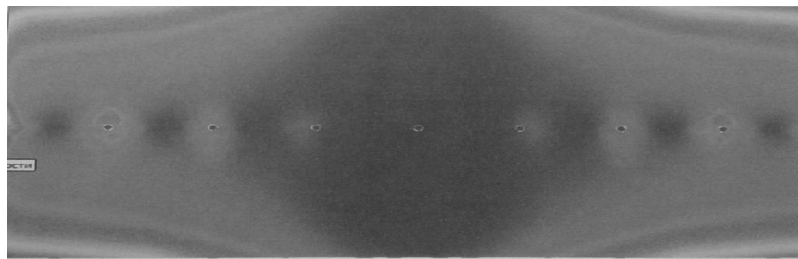




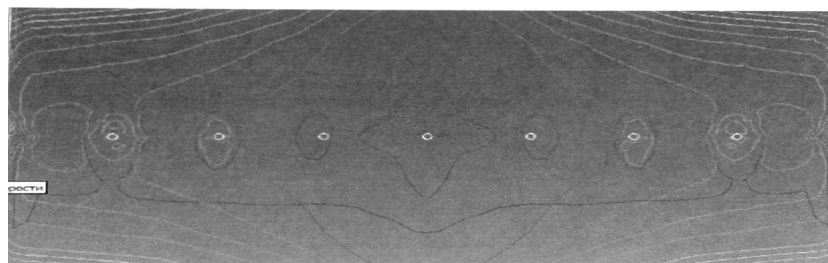
а)



б)



в)



г)

Цв...	Значение
410400	410400
369000	369000
327500	327500
286100	286100
244600	244600
203200	203200
161700	161700
120300	120300
78800	78800
37400	37400
-4100	-4100

Цв...	Значение
402300	402300
362500	362500
322700	322700
282800	282800
243000	243000
203200	203200
163400	163400
123600	123600
83700	83700
43900	43900
4100	4100

Цв...	Значение
121	121
109	109
97	97
84	84
72	72
60	60
48	48
36	36
23	23
11	11
-1	-1

Цв...	Значение
119	119
107	107
95	95
84	84
72	72
60	60
48	48
36	36
25	25
13	13
1	1

д)

**Рис. 4. Результаты визуализации эксперимента модели №4:**  
 а – заливка давления; б – изолинии давления; в – заливка скорости; г – изолинии скорости;  
 д – значения расчетных параметров соответственно на рис. а, б, в, г



В заключение отметим, что рассмотренный в статье пример совместного использования компьютерного моделирования течения газа в зазорах подшипника и методов планирования эксперимента (ДФЭ с ЦКП и «метода крутого восхождения») показал возможность существенного упрощения и ускорения процесса решения задачи поиска рациональных размеров газостатических подшипников. Такая методика позволяет с большей эффективностью и достоверностью принимать технические решения при создании новых изделий.

#### Библиографический список

1. **Налимов, В.В.** Теория эксперимента / В. В. Налимов. – М.: Наука, 1971. – 208 с.
2. Рогов, В. А. Методика и практика технических экспериментов: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / В. А. Рогов, Г. Г. Позняк. – М.: Академия, 2005. – 288 с.
3. **Бажан, П.И.** Основы научных исследований на речном транспорте: учеб. пособие для студентов институтов водного транспорта / П. И. Бажан, Б. И. Вайсблат, И. И. Трянин. – Горький: Волго-Вятское кн. изд-во, 1990. – 319 с.
4. **Семашко, П.В.** Использование многофакторного планирования при исследовании сопловых аппаратов / П. В. Семашко, С. Н. Зеленев // Технические науки: теоретические и прикладные аспекты: сб. ст. Международной научно-практической конференции 16 июня 2014 г. Уфа. Издательство "Аэтерна", 2014. – С. 47–52.
5. **Михайлов, В.И.** Планирование экспериментов в судостроении / В. И. Михайлов, К.М. Федосов. – Л.: Судостроение, 1978. – 160 с.

*Дата поступления  
в редакцию 05.08.2017*

**S.N. Zelenov, P.V. Semashko**

#### **DETERMINATION OF THE OPTIMUM GEOMETRIC DIMENSIONS OF THE CIRCULATING BEARING GTD (gas-turbine engine)**

Nizhniy-Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

**Purpose:** Solved the specific task of finding optimal geometric dimensions of the circulating bearing of a gas turbine engine (GTE).

**Design/methodology/approach:** Theoretical foundation is sharing a computer simulation of the gas flow in the channels bearing sizes of geometric modeling and planning of experiments in the form of the "steep ascent".

**Findings:** The application of the proposed methodology in product design practice significantly reduces the volume and to improve the reliability of research results.

**Research limitations/implications:** The results of the work can be regarded as initial data for more complex, with a large number of variables of practical tasks.

**Originality/value:** the proposed methodology allows solving tasks of optimization design of various technical products with minimal investment of time and money.

*Key words:* Circulating bearing, the geometric dimensions, design procedure, computer modeling, movement to the optimum.

УДК 62-52: 656.56

**О.В. Крюков****АВТОМАТИЗАЦИЯ НЕФТЕПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ СТАНЦИЙ  
ТРАНСПОРТА НЕФТЕПРОДУКТОВ**ОАО «Гипрогазцентр» (Н. Новгород),  
Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева

Рассмотрены результаты реализации пилотного проекта автоматизации энергоэффективного транспорта нефтепродуктов по магистральным трубопроводам. Предложена функциональная схема и современные технические средства автоматизированных систем управления нефтеперекачивающими станциями и алгоритмы управления основными технологическими установками транспорта углеводородного сырья.

*Ключевые слова:* автоматизация, магистральные нефтепроводы, электропривод, нефтеперекачивающие станции, технические средства АСУТП.

Надежный и энергоэффективный транспорт нефтепродуктов является одним из стратегических направлений в экономике многих стран, включая Россию и Казахстан. В этой связи особую актуальность приобретает дальнейшее развитие нефтетранспортной инфраструктуры для обеспечения роста экспорта нефти. Для этого ЗАО «КазТрансОйл» как основной оператор поставок казахстанской нефти на экспорт выполняет комплекс работ [1].

Среди прочих можно выделить оптимизацию поставок нефти, объединение всей системы нефтяных трубопроводов Казахстана в единую технологическую систему, обеспечение взаимодействия с операторами, потребителями и поставщиками нефти, действующими на территории России, организацию менеджмента качества нефти и воздействия на окружающую среду в соответствии с требованием международного стандарта ISO. Поставленные задачи решаются на основе современных информационных технологий [2-6].

Нефтегазовый проектный институт АО «Гипрогазцентр» по заказу компании АВВ (Германия) выполнил комплекс проектных работ по созданию АСУ ТП нефтеперекачивающих станций (НПС) магистральных нефтепроводов (МН), проходящих по территории Республики Казахстан. Состав работ определялся в соответствии с ГОСТ 34.601-90 "АСУ. Стадии создания". АО "Гипрогазцентр" участвовал в комплексном обследовании объектов с выработкой предложений по подготовке технологии объектов к автоматизации, разработке проекта и рабочей документации, включая информационно – алгоритмическое обеспечение, проведении авторского надзора и подготовку документации "Как построенно" [7-13].

В данном проекте заказчиком была поставлена задача создания системы автоматизированного диспетчерского контроля и управления нефтепроводами и технологическими объектами ЗАО «КазТрансОйл», которая должна обеспечить автоматизированное управление всеми технологическими объектами, повышение уровня безопасности эксплуатации нефтепроводов, обеспечение качества нефти в соответствии с требованиями стандарта ISO, мониторинг технологического оборудования, обнаружение и локализацию утечек [14-16]. Объекты, для которых выполнялось проектирование АСУ ТП, выделены серым цветом на рис. 1 и рис. 2.

Основными объектами автоматизации явились головные нефтеперекачивающие станции (ГНПС), линейные НПС и станции подогрева нефти (СПН).

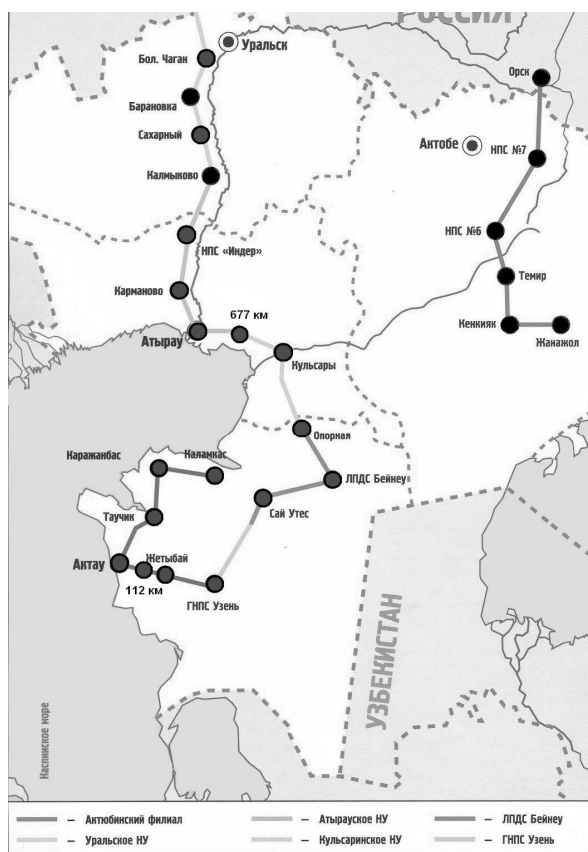


Рис. 1. Схема трубопроводов Западного и Актюбинского филиалов «КазТрансОйл»

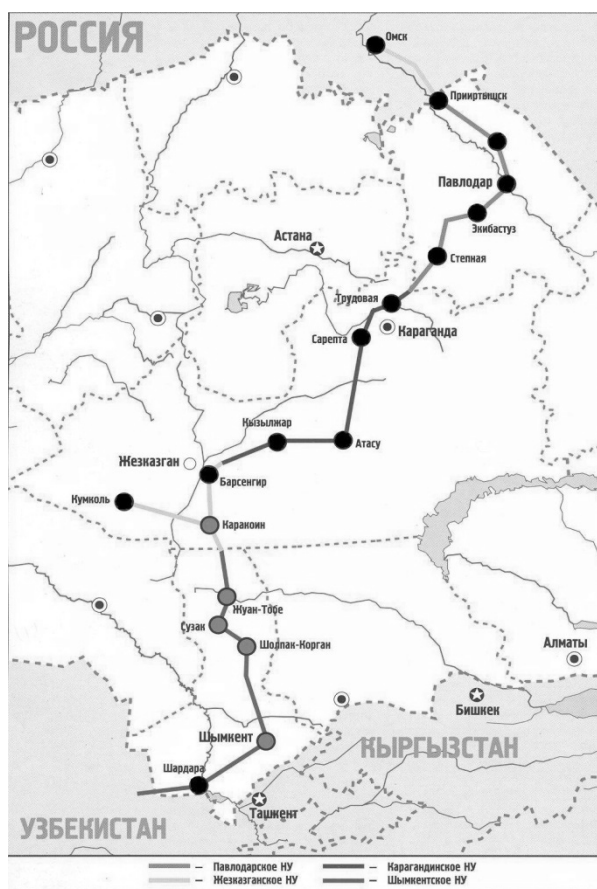


Рис. 2. Схема трубопроводов восточного филиала «КазТрансОйл»

### Особенности проекта

В составе названных объектов вошли магистральные насосные, подпорные насосные, резервуарные парки, наливные/сливные железнодорожные эстакады и танкерные причалы, узлы пуска и приема устройств очистки и диагностики трубопроводов, пункты подогрева нефти, узлы регулирования давления нефти с запорной арматурой, узлы учета нефти, вспомогательные системы, обеспечивающие функционирование НПС.

При разработке проекта была решена задача использования однородных ПТС на каждом из уровней управления. Для автоматизации НПС, нефтехранилищ и СПН были использованы программно-технические средства Freelance 2000 (поставки ABB Automation Systems GmbH), которые обеспечивают высокий уровень масштабирования, резервирование, диагностирование до уровня канала, простоту обслуживания, функции мониторинга и контроля [17-23].

Функциональность АСУ ТП обеспечила создание автоматизированной многоуровневой системы на базе современных ПТС, реализацию принципа управления «сверху» путем приема в автоматическом режиме плановых заданий и установок работы НПС с вышестоящего уровня, обеспечение непрерывного контроля работы основного технологического оборудования и систем жизнеобеспечения станции, оптимизацию режимов работы станций, повышение технико-экономических показателей за счет своевременного определения, локализации и устранения утечек, а также сокращения простоев за счет определения оптимального режима перекачки.

Особенностью проектируемой СА являлось внедрение ее на существующих, действующих объектах (НПС, СПН), что предъявляло соответствующие требования к основной технологии и системам жизнеобеспечения. При этом заказчиком были поставлены задачи по замене устаревшего и изношенного оборудования КИП, исполнительных устройств и механизмов, систем локальной автоматики на современные микропроцессорные системы с интеграцией в создаваемую АСУ ТП НПС МН. В составе работ был проведен анализ наличия введенных в действие микропроцессорных систем и современной датчиковой аппаратуры, по результатам которого выработаны решения по их интеграции в АСУ ТП.

В ходе детального технического обследования определен объем реконструкции морально и физически устаревшего технологического и электротехнического оборудования, а также части трубопроводов. Разработаны предложения по подготовке объектов к внедрению новой современной системы АСУ ТП.

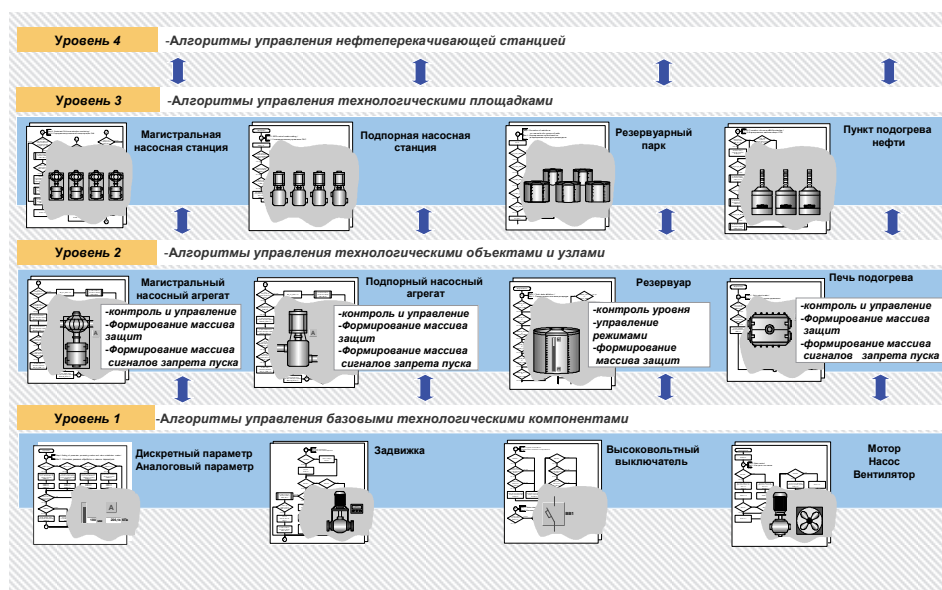


Рис. 3. Функциональная структура алгоритмического обеспечения АСУ ТП

Учитывая динамику изменений технологических задач и развития инфраструктуры объектов, АСУ ТП создавалась изначально с открытой архитектурой, позволяющей дополнять систему при вводе в строй новых технологических объектов или участков магистральных нефтепроводов, либо заменять морально устаревшие компоненты системы при минимальных затратах на стыковку с существующим комплексом ПТС.

Система диспетчерского контроля и управления нефтепроводами и технологическими объектами ЗАО «КазТрансОйл» является многоуровневой. Благодаря тому, что технологическое оборудование во многом подобно, были созданы стандартные алгоритмические модули, которые адаптировались для конкретных объектов автоматизации. Таким образом, однородность создаваемой системы была обеспечена не только на аппаратном уровне технических средств, но и на алгоритмическом и программном уровне.

Проиллюстрируем проектные решения на примере АСУ ТП головной НПС (4-й уровень диспетчерского управления), где представлены практически все виды ПТС, примененные в проекте. Структурная схема АСУ ТП ГНПС представлена на рис. 4.

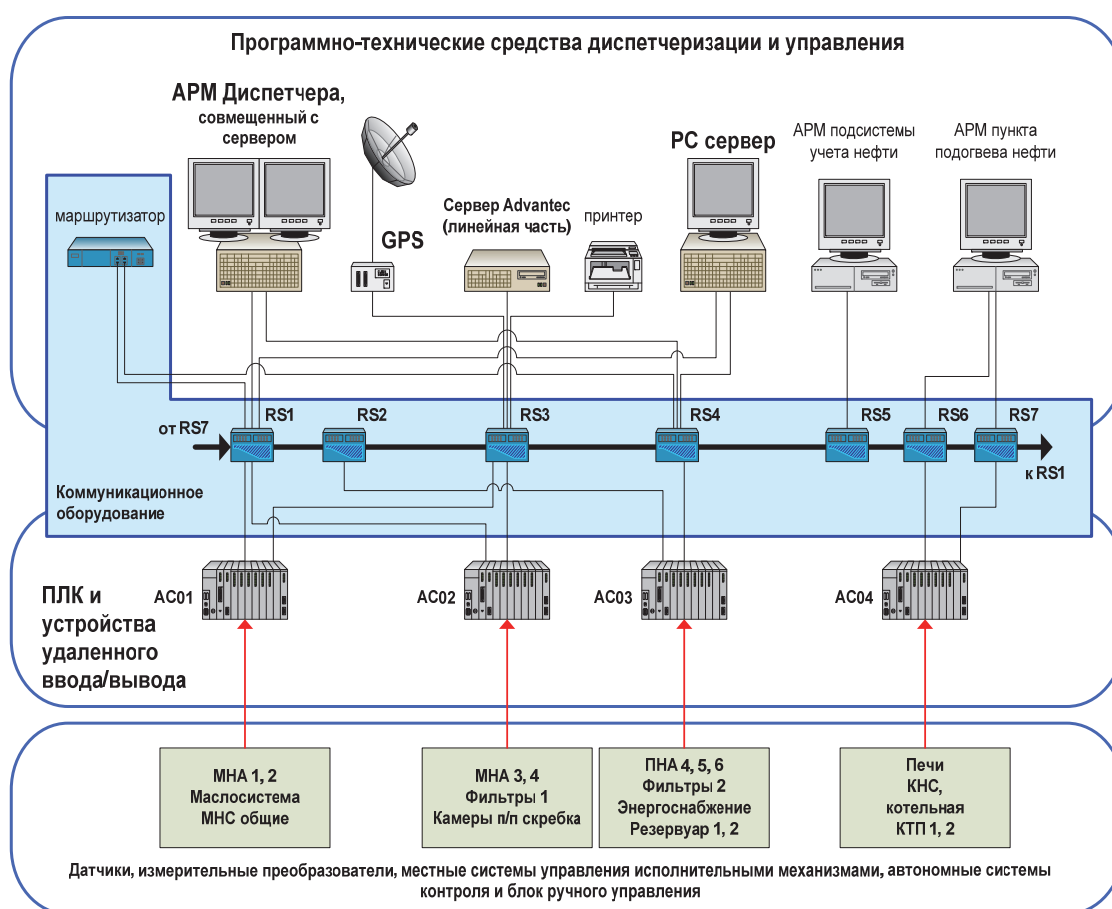


Рис. 4. Структурная схема АСУ ТП ГНПС

Структура комплекса программно-технических средств АСУ ТП ГНПС (как и всей АСУ ТП НПС МН ЗАО «КазТрансОйл») базируется на следующих основных принципах построения АСУ ТП:

- централизованный, иерархический контроль и управление технологическими объектами и магистральными нефтепроводами;
- открытая архитектура IT-взаимодействия компонентов АСУ;
- распределенная структура подсистемы сбора и обработки;
- оптимизация распределения функций сбора информации, контроля, управления на базе объектно-ориентированного подхода;



- простота ТО и высокая степень готовности ПТС;
- короткое время восстановления системы;
- самодиагностика и выборочное дублирование или резервирование компонентов комплекса ПТС.

Принятая концепция построения структуры комплекса ПТС предусматривает применение открытых международных стандартов для всех уровней IT-взаимодействия компонентов СА. Таким образом, обеспечивается будущее расширение и модернизация АСУ ТП.

Принятая концепция построения структуры комплекса ПТС определяет взаимосвязь между устройствами и уровнями ПТК с максимально возможным приближением к функционально-групповому принципу построения технологического объекта управления (ТОУ).

Структурная схема технических средств АСУ ТП ГНПС разработана по принципам многоуровневой, иерархической информационно-управляющей системы и имеет трехуровневую иерархию:

1. ПТС диспетчеризации и управления;
2. ПЛК AC800F и устройства удаленного ввода/вывода S800;

3. Датчики, измерительные преобразователи, местные системы управления исполнительными механизмами, автономные системы контроля и блок ручного управления.

Структура реализована в виде распределенной по технологическим объектам системы, с целью образования локальных децентрализованных структур.

ПТС на уровне ДП ГНПС могут функционировать в режимах:

- автоматизированный режим работы в полном составе;
- автоматизированный режим с включением резервных элементов системы;
- автоматизированный режим работы не в полном составе.

Первый режим является основным, два последних – резервными для обеспечения живучести системы при возникновении внештатных или аварийных ситуаций. Для повышения надежности задачи диагностики комплекса ПТС выполняются на всех уровнях с использованием функций самодиагностики. На уровне контроллеров формируются диагностические признаки состояния, измерительных каналов, модулей S800, источников питания. На уровне сервера SCADA диагностируются состояния контроллера и сети Ethernet.

Аппаратура системы диагностируется автоматически в процессе работы. При необходимости может быть организован режим контроля системы для более глубокой диагностики, в этом случае контроль должен запускаться оператором с рабочих мест системы. Данные о неисправности аппаратуры вводятся в базу данных, отображаются на экране с указанием отказавшего узла системы с точностью до блока и регистрируются в протоколе событий.

В АСУ ТП ГНПС реализованы функции: коммуникационные, информационные, дистанционного управления, формирования отчетов, настройки компонент АСУ ТП.

В число автоматизируемых ТОУ входят СПН, предназначенные для подогрева транспортируемой высоковязкой нефти. При перекачке с подогревом СА должна обеспечивать выполнение соответствующих расчетов и определение условий работы нефтепровода с наименьшим энергопотреблением и поддержание оптимального режима эксплуатации. При этом осуществляется контроль за состоянием с дистанционным управлением печами подогрева, задвижками технологических нефтепроводов, системой внутренней циркуляцией нефти, системой топливообеспечения горелок печей, системой стационарного пожаротушения.

САУ обеспечивают автоматические защиты от недопустимых режимов работы ТП, в том числе защиту от перелива нефти в резервуары при достижении в них максимального (аварийного) уровня нефти и переключение потока нефти в специально выделенные емкости.

Важной составляющей внедряемой SCADA является возможность обнаружения утечек (СОУ) для определения дефектов, возникших под влиянием природных факторов или хищений из нефтепровода, и позволяющая исключить или значительно сократить катастрофические экологические последствия.



## Выводы

Таким образом, комплекс проектных работ по созданию АСУ ТП нефтеперекачивающих станций магистральных нефтепроводов, проходящих по территории Республики Казахстан, позволил создать интегрированную систему диспетчерского контроля и управления трубопроводами и технологическими объектами. Проектные решения дали возможность обеспечить выполнение современных требований к созданию подобных больших автоматизированных систем: функциональность, надежность, устойчивость, однородность, совместимость.

## Библиографический список

1. **Сманкулов, А.С.** КазТрансОйл: стратегия успеха // Нефтегазовая вертикаль. – 2002. – № 15 (82). – С. 65–67.
2. **Milov, V.R.** Intellectual management decision support in gas industry / V.R. Milov, B.A. Suslov, O.V. Kryukov // Automation and Remote Control. – 2011. – Т. 72. – № 5. – С. 1095–1101.
3. **Захаров, П.А.** Системы автоматизации технологических установок для эффективного транспорта газа / П.А. Захаров, Н.В. Киянов // Автоматизация в промышленности. – 2008. – № 6. – С. 6–10.
4. **Крюков, О.В.** Встроенная система диагностирования и прогнозирования работы асинхронных электроприводов // Известия ВУЗов. Электромеханика. – 2005. – № 6. – С. 43–46.
5. **Серебряков, А.В.** Оптимизация управления автономными энергетическими установками в условиях стохастических возмущений // Промышленная энергетика. – 2013. – № 5. – С. 45–49.
6. **Горбатушков, А.В.** Принципы построения инвариантных электроприводов энергетических объектов / А.В. Горбатушков, С.Е. Степанов // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника: тр. IV ВНИПК; под общ. ред. В.Ю. Островляничка. – 2010. – С. 38–45.
7. **Крюков, О.В.** Прикладные задачи теории планирования эксперимента для инвариантных объектов газотранспортных систем // Труды IX Международной конференции «Идентификация систем и задачи управления», SICPRO `12, 2012. – С. 222–236.
8. **Kadin, S.N.** Questions related to the development of metrological assurance in the design of Gazprom facilities / S.N. Kadin, A.P. Kazachenko, A.V. Reunov // Measurement Techniques. – 2011. – Т. 54. – № 8. – С. 944–952.
9. **Серебряков, А.В.** Экологические направления электросбережения и задачи энергосбережения при реконструкции объектов ОАО «Газпром» // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2015. – № 8. – С. 23–33.
10. **Титов, В.В.** Разработка АСУ автономными энергетическими установками // Автоматизация в промышленности. – 2009. – № 4. – С. 35–37.
11. **Киянов, Н.В.** Опыт проектирования и реализации АСУ электротехнических систем на базе сетей Ethernet для различных объектов / Н.В. Киянов, Д.Н. Прибытков // Автоматизация в промышленности. – 2007. – № 12. – С. 54–57.
12. **Крюков, О.В.** Коммуникационная среда передачи данных сети Ethernet на полевом уровне различных объектов // Автоматизация в промышленности. – 2012. – № 12. – С. 26–30.
13. **Крюков, О.В.** Информационный подход к оценке совместимости многофункциональных систем управления электрооборудованием // Компрессорная техника и пневматика. – 2014. – № 1. – С. 40–45.
14. **Babichev, S.A.** Automated monitoring system for drive motors of gas-compressor units / S.A. Babichev, P.A. Zakharov // Automation and Remote Control. – 2011. – Т. 72. – № 1. – С. 175–180.
15. **Babichev, S.A.** Automated safety system for electric driving gas pumping units / S.A. Babichev, V.G. Titov // Russian Electrical Engineering. – 2010. – Т. 81. – № 12. – С. 649–655.
16. **Kryukov, O.V.** Methodology and tools for neuro-fuzzy prediction of the status of electric drives of gas-compressor units // Russian Electrical Engineering. – 2012. – Т. 83. – № 9. – С. 516–520.
17. **Крюков, О.В.** Анализ и техническая реализация факторов энергоэффективности инновационных решений в электроприводных турбокомпрессорах // Автоматизация в промышленности. – 2010. – № 10. – С. 50–53.

18. **Степанов, С.Е.** Встроенные системы мониторинга технического состояния электроприводов для энергетической безопасности транспорта газа / С.Е. Степанов, В.Г. Титов // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2012. – №2. – С. 5–10.
19. **Степанов, С.Е.** Пути модернизации электроприводных ГПА // Електромеханічні І енергозберігаючі системи. – 2012. – №3 (19). – С. 209–212.
20. **Степанов, С.Е.** Принципы автоматического управления возбуждением синхронных машин газокomppressorных станций / С.Е. Степанов, А.С. Плехов // Автоматизация в промышленности. – 2010. – № 6. – С. 29-31.
21. **Крюков, О.В.** Регулирование производительности электроприводных газоперекачивающих агрегатов преобразователями частоты // Компрессорная техника и пневматика. – 2013. – № 3. – С. 21–25.
22. **Крюков, О.В.** Частотное регулирование производительности ЭГПА // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2014. – № 6. – С. 39–43.
23. **Аникин, Д.А.** Проектирование систем управления ЭГПА / Д.А. Аникин, И.Е. Рубцова // Газовая промышленность. – 2009. – № 2. – С. 44–47.

*Дата поступления  
в редакцию 05.08.2017*

**O.V. Kryukov**

## **AUTOMATION OF OIL PUMPING STATIONS TRANSPORT OF OIL PRODUCTS**

JSC “Giprogazcenter” (Nizhny Novgorod),  
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

Results of implementation of the pilot project of automation of energy efficient transport of oil products on the main pipelines are considered. The function chart and modern technical means of automated control systems for oil pumping stations and control algorithms of the main technological installations of transport of hydrocarbonic raw materials is offered.

*Key words:* Automation, main oil pipelines, electric drive, oil pumping stations, ACS TP technical means.

УДК 621.81:658.512

С.Ф. Магницкая, О.С. Кошелев

**ЭВОЛЮЦИЯ И РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ КЛАССИФИКАЦИИ  
И ГРУППИРОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАРШРУТОВ ОБРАБОТКИ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматривается последовательность развития методов классификации и группирования деталей перед их обработкой с целью увеличения серийности производства. Проводится анализ методов и предлагается усовершенствование способов группирования с целью формирования технологических маршрутов изготовления деталей с применением «универсальной» заготовки, позволяющее увеличить прочность деталей и коэффициент использования материала.

*Ключевые слова:* метод, классификация, группирование, деталь, совершенствование, технологический процесс, структура материала, прочность, коэффициент использования материала.

В современном машиностроении в зависимости от назначения и условий производства применяются в основном три вида организации технологических процессов (ТП): единичный, типовой и групповой. Каждый из них имеет свои преимущества и недостатки. Разработка того или иного ТП имеет определённые причины.

Разработка единичного ТП характерна для оригинальных деталей в любом типе производства. Такой процесс позволяет, если в нём сформировать ещё и целевую для данной детали заготовку, получить достаточно высокое качество детали с учётом всех её особенностей. Вместе с тем, единичный ТП требует больших временных затрат на его разработку, достигающих порой нескольких рабочих дней и превышающих во много раз технологическое время обработки детали. Кроме того, единичные технологии приводят к появлению большого разнообразия ТП, а также оборудования, приспособлений и инструмента [1].

В конце 30-х годов прошлого века проф. А.П. Соколовским были заложены основы типизации ТП. Основная задача в этом случае состояла в том, чтобы уменьшить время на разработку ТП (основные затраты при создании процесса). По А.П. Соколовскому главным этапом в типизации технологических процессов является классификация деталей машин, а её главными признаками – конфигурация детали, её назначение и технологические задачи при изготовлении. Детали, подвергающиеся механической обработке, классифицируются по конфигурации по трём основным видам: детали вращения, многоосные детали, плоские детали. Эти три вида подразделяются на 15 классов, внутри каждого класса они делятся на группы, подгруппы и типы. На каждом этапе классификации детали приобретают большее сходство по конструкции, размерам, массе. Это позволяет привести всё многообразие поверхностей и их сочетаний к минимальному количеству типов, для которых можно разработать типовые ТП обработки и тем самым сократить время и упростить процесс проектирования ТП.

Дальнейшее развитие идеи типизации – групповая обработка деталей, общенаучные положения которой в 50-е годы XX века разработал проф. С.П. Митрофанов. Если при построении типовых ТП к одному типу относят детали по общности конфигурации, технологического маршрута и содержанию операций, то при групповой обработке детали группируются по общности операций обработки и оборудования, на котором эти операции выполняются, и использованию единой технологической оснастки. В состав группы могут быть включены детали из разных классов. Групповая обработка может ограничиваться отдельными групповыми операциями и может применяться для построения группового технологического процесса обработки детали в целом.

Группа деталей создаётся таким образом, чтобы их конфигурация позволяла сохранить при переходе обработки с одной детали на другую в пределах группы планы обработки элементарных поверхностей и осуществить обработку при неизменной наладке или с минимальными переналадками станка (замена свёрл, перестановка упоров, замена установочных или зажимных устройств группового приспособления и т.п.) и затратами времени.

Схема групповой наладки станка должна удовлетворять комплексной детали, включающей в себя все поверхности деталей группы. Таким требованиям может удовлетворять наиболее сложная деталь группы или специально созданная деталь.

Цель применения групповых технологий – перенести высокопроизводительные методы и принципы поточно-массового производства в мелко- и среднесерийное производство за счёт суммирования размеров партий заготовок нескольких наименований, близких по конфигурации и размерам, закрепляемых за оборудованием, располагаемым по технологическому маршруту в линию. Оборудование комплектуют по обработке комплексной детали или самой трудоёмкой детали в группе. Остальные детали обрабатывают с пропуском отдельных операций (рабочих мест) или инструментальных позиций.

Эффективность групповых технологических процессов и их внедрение очевидно, но сопряжено со сложностью организации оперативного планирования, внедрения расчёта необходимых межоперационных заделов. Это требует совместной работы технологов, конструкторов, экономистов и работников планово-производственных служб предприятия. Таким образом, проблема продолжает существовать.

Анализ машиностроительного производства показал [2], что товары серийного производства составляют примерно 75-80% от всей выпускаемой продукции, и сопровождается это очень низким уровнем интенсивности обрабатывающего производства. А именно, станок может работать непрерывно 24 ч в сутки и 365 дней в году, возможный фонд времени работы его составит 8760 ч. Однако станки простаивают в выходные и праздничные дни, в 3-ю смену. Это составляет 53% теоретически возможного фонда времени работы станка. Если же не организована и 2-я смена, то с учетом потерь организационно-технического характера (необходимость запуска деталей на обработку партиями, несогласованность по времени работы отдельных станков) деталь непосредственно в обработке на станке находится 5-10% времени производственного цикла.

Оператор станка основную часть своего рабочего времени расходует на взаимодействие со станком. Для обеспечения работы станка в течение указанного ранее времени оператору требуется весь рабочий день. Даже, если исключить сменные потери времени работы одного станка (для чего необходимо минимум три станочника), время полезной работы станка составило бы 30-40% от общего фонда времени.

После изложенного становится очевидным, что оператор не может обеспечить работу оборудования с требуемой интенсивностью.

Это привело к дальнейшим попыткам совершенствования концепций развития в проектировании технологических процессов. На уровне собственно обработки - появлению станков с ЧПУ, на уровне дальнейшего развития теории – появлению методов модульного технологического проектирования. Последнее является отражением современного развития производства и своеобразным продолжением развития идей типизации А.П. Соколовского. Оно объединяет в себе преимущества единичного, типового и группового процессов, придавая им дополнительную гибкость.

В современном машиностроении наметились две тенденции:

*Первая* – увеличение номенклатуры выпускаемой продукции при одновременном уменьшении объёма серий изделий внутри номенклатуры и ускорение смены выпускаемой продукции, изменяющее характер производства.

*Вторая* – стандартизация, унификация и типизация в единичном и мелкосерийном производстве, приводящая к росту серийности выпуска изделий.

В результате действия указанных тенденций доминирующим типом становится се-

рийное многономенклатурное производство при непрерывном росте общего объёма выпуска изделий и требований к их качеству.

Такой тип производства обладает признаками как единичного производства, характеризующегося широкой номенклатурой изготавливаемых деталей, так и массового производства, отличающегося выпуском однотипных деталей в больших количествах. Каждая из особенностей предъявляет свои требования к технологии, оборудованию, оснастке, методам организации производства и управления им. Требования эти противоречивы: в одном случае нужны универсальные станки, в другом – специальные. Возникает задача сочетания этих двух требований – высокой производительности массового производства и высокой гибкости единичного. Цель может быть достигнута, если производство будет построено по модульному принципу с применением типовых и унифицированных решений.

Модульный принцип был предложен проф. Б.М. Базровым в 80-х годах прошлого века в развитие методов, описанных ранее, и широко используется в различных областях техники. Эффект от его применения зависит от того содержания, которое вкладывается в понятие модуля. Авторы модульной технологии предлагают изменить объект классификации, использующийся в типовом и групповом процессах, заложив в основу классификации признаки, отражающие связи между служебным назначением детали и конструктивными формами её отдельных поверхностей [1].

Это связано со следующими причинами:

1. В тех случаях, когда за объект классификации принимают детали, их группирование усложняется, так как они описываются большим числом характеристик. В результате новые конструктивные формы деталей часто не укладываются в сформированные типы. В итоге наблюдается непрерывный рост классификатора деталей и, как следствие, это приводит к росту типовых процессов обработки.

2. Если же в качестве объекта классификации принимается тип поверхности и группирование идёт по геометрическому признаку, то деталь условно может состоять из элементарных поверхностей таких, как плоские, цилиндрические, конические, резьбовые и др.

Недостатком такого подхода является то, что при делении детали на отдельные поверхности теряются связи между ними, обусловленные совместным выполнением одних служебных функций и предъявленных требований к точности взаимного расположения поверхностей. Этот способ классификации не учитывает того, что элементарные поверхности детали попадают в разные группы. Указанный подход может приводить к «неправильному» ТП и нарушению связей (например, изменению структуры материала детали и ухудшению её служебных характеристик), определяющих качество изделия. Следствием того, что связи между отдельными поверхностями по совместному выполнению ими служебного назначения детали не учитываются, последовательность обработки поверхностей может быть многовариантной. Возникает большое количество вариантов процесса изготовления одной и той же детали: чем больше поверхностей у детали, тем больше вариантов маршрута, затрудняется разработка однозначных правил построения маршрута и поиск оптимального варианта.

Как следует из изложенного, задача сокращения разнообразия технологических маршрутов существующими методами проектирования не решается должным образом. Для решения этой проблемы необходимо, прежде всего, правильно выбрать признаки классификации. Из приведенного анализа признаков классификаций следует: признак надо искать между назначением детали и отдельной поверхностью. Другое требование к объекту классификации – неизменность объекта независимо от конструкции детали и технологии ее изготовления.

С учетом изложенного, в качестве такого признака классификации предложен модуль поверхностей (МП), представляющий собой сочетание поверхностей, объединенных выполнением той или иной служебной функции детали.

В действительности деталь выполняет ограниченное число служебных функций: служит базой для других деталей; осуществляет собственно рабочие процессы – резцы, штампы,



литейные формы и др.; передаёт потоки энергии от одной части технического устройства к другой - крутящие моменты, усилия и др. Для осуществления этих функций детали требуются исполнительные поверхности, которые в зависимости от рода выполняемых служебных функций можно разделить на базирующие и рабочие. Чтобы связать исполнительные поверхности в единое пространственное тело, необходимы еще и связующие поверхности. Отсюда все МП разделены на три класса по служебному признаку - базирующие (МПБ), рабочие (МНР) и связующие (МПС). Их полная классификация содержит 26 наименований [1].

Признаки, заложенные в основу классификации МП, отражают связи между служебным назначением детали и её конструктивными формами; исключают зависимости между МП и принадлежностью детали к определённому изделию или отраслевой принадлежностью. В итоге предложенная классификация приобретает обобщённый характер, а МП в силу конструктивного постоянства и независимости принадлежности детали рассматриваются как элементы, из которых путём их набора можно построить любую деталь без учёта при классификации технологических признаков.

Для удобства изготовления, использования эффективных методов обработки целесообразно разные МП, изготавливаемые по одному ТП, объединять в одну группу - создавать интегральные модули поверхности (МПИ). Для каждого МПИ использовать свой набор эффективных методов обработки. Таким образом создавать одинаковый технологический процесс их изготовления.

Для конкретного МПИ разрабатывается соответствующий технологический модуль (технологический блок – ТБ), представляющий собой часть технологического процесса. ТБ содержит последовательность переходов в соответствии с МПИ обработки детали, её размерами, требованиями к качеству, а также заготовительным интегральным модулем МПИ<sub>заг.</sub>, который определяет материал и величину припусков, подлежащих съёму с каждой поверхности МПИ.

В свете изложенного обратим особое внимание на выбор заготовки и ТП последующей её обработки.

Современное развитие машиностроения характерно усилением по разным причинам тенденции перехода от массового производства к единичному и мелкосерийному. Это приводит к тому, что приходится отказываться от специальной заготовки (поковки или отливки) для конкретной детали и переходить к «универсальной» заготовке, используемой для различных деталей. Причина такого перехода в стоимости специальной заготовки, так как специальная заготовка дорого обходится для единичного производства (стоимость штампов, форм для литья и т.п. включаются в себестоимость одной детали), в то время как в массовом производстве стоимость затрат на получение заготовки распределяется на группу деталей.

В качестве «универсальной» заготовки в настоящее время чаще всего используют прутки или сляб. Финишные методы обработки переходят к такой «универсальной» заготовке. Это приводит к ухудшению прочностных характеристик изделия, так как в процессе обработки перерезаются волокна в материале. Это уменьшает прочностные характеристики детали и для ответственных деталей приходится идти на увеличение их размеров, а следовательно, и массы детали. Такое изменение конструкции особенно плохо для изделий транспорта (автомобилей, летательных аппаратов, судов и пр.) - машина в этом случае помимо полезного груза должна «возить» и себя, а это влияет на расход топлива и КПД процесса. Кроме того, увеличение размеров детали ведёт к увеличению расхода материала при изготовлении. Для того чтобы избежать таких последствий при создании ТБ конкретного МПИ<sub>заг.</sub>, необходимо учитывать ещё и структуру материала заготовки и последствия её изменения при финишной обработке. Другими словами, структуру материала заготовки следует учитывать в зависимости от формы и назначения детали. Возможностями «управлять» структурой материала в наибольшей степени обладают процессы обработки материалов давлением (ОМД) с последующей правильно выбранной термообработкой. Отсюда следует, что для ответственных деталей наиболее целесообразно использовать в качестве заготовки поковку. Поэтому



учёт структуры материала и её изменений в процессе финишной обработки должен дополнить рассмотренные ранее процессы группирования.

Принципиально такой подход впервые описан в работе [3]. В дальнейшем он был доработан авторами настоящей статьи и далее предлагается следующий порядок разработки ТП детали:

1. Известными методами (например, [4]) провести группирование деталей, подлежащих обработке, по принципу идентичности поверхностей;

2. Провести анализ служебного назначения поверхностей. Это делается для того, чтобы из трёх классов поверхностей выявить МПБ, МПР и сочетные связующие, к которым предъявляются особые требования (прочностные характеристики) к структуре материала, из которого изготовлена деталь;

3. Провести анализ общности структур поверхностей при разных размерах деталей, входящих в ТБ МПИ и отвечающих за работоспособность деталей;

4. Провести анализ особенностей нарушения структур материала под МПР и сочетными связующими поверхностями деталей МПИ, получаемых из одинаковой по размерам МПИ<sub>заг.</sub>. При этом рассмотреть заготовки, полученные разными способами при одном методе обработки (например, методом ОМД), так как один и тот же метод обработки при разных технологических способах (свободной ковке, ковке в штампах, протяжке, осадке, высадке) позволяет широко изменять структуру материала, а значит и прочностные характеристики заготовки и детали [5]. В зависимости от способа получения заготовки один и тот же метод при механической обработке приведет к разному нарушению структуры заготовки;

5. Задать требования к способу получения заготовки и включить их в технические условия изготовления детали;

6. Провести выбор одинаковой заготовки МПИ<sub>заг.</sub> с целью использования более прогрессивного способа её получения, позволяющего сформировать конфигурацию детали с использованием одинаковых МПИ;

7. Соответствующим образом с учетом общности заготовки окончательно сформировать перечень типовых интегральных модулей поверхностей и типовых технологических блоков их обработки для создания модульного технологического процесса изготовления детали. Использование МТП также позволит создать более обоснованный комплекс требований с эксплуатационной точки зрения к МПИ<sub>заг.</sub>, получить более прочные детали и экономить материал за счёт рационального применения специальных заготовок, получаемых методами ОМД и литья.

### Выводы

Авторами статьи предложен более точный подход к решению задачи выбора заготовки с учётом получения определённой структуры материала МПИ<sub>заг.</sub> (увеличенной прочности) в сочетных поверхностях.

При этом в ТБ при создании МПИ<sub>заг.</sub> закладываются принципы конструктивного постоянства и независимости от принадлежности детали к конкретному изделию. В конечном итоге, такой подход к созданию ТБ даёт возможность отойти от общей (в виде прутка) заготовки, используемой в современной практике технологии изготовления деталей, к выбору «специальной» заготовки, наиболее приближённой к форме готовой детали, получаемой методами ОМД или литья.

Уточнена методика группирования поверхностей деталей для выбора заготовки, повышающей прочность сочетных поверхностей.

### Библиографический список

1. Солнышкин, Н.П. Технологические процессы в машиностроении: учеб. пособие / Н.П. Солнышкин, А.Б. Чижевский, С.И. Дмитриев. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2000. – 344 с.

2. **Аверьянов, О.И.** Основы инжиниринга в машиностроении / О.И. Аверьянов, И.О. Аверьянова. – М.: МГИУ, 2007. – 64 с.
3. **Кошелев, О.С.** К вопросу о группировании деталей с точки зрения общности заготовки для их получения // Заготовительные производства в машиностроении. – 2012. – № 9. – С. 45–46.
4. **Базров, Б.М.** Основы построения технологического процесса изготовления детали: справочник // Инженерный журнал. 2006. № 12; 2007. № 2, 11. Приложение.
5. **Воронцов, А.П.** Теоретическое обоснование технологической механики. Степень деформации и накопленная деформация // Вестник машиностроения. – 2014. – № 3. – С. 56–64.

*Дата поступления  
в редакции 20.08.2017*

**S.F. Magnizkaja, O.S. Koshelev**

**THE EVOLUTION AND DEVELOPMENT OF METHODS  
OF CLASSIFICATION AND GROUPING OF PARTS IN THE FORMATION  
OF THE TECHNOLOGICAL PROCESSING ROUTES**

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

A sequence of methods of classification and grouping pieces before processing them in order to increase production. Methods of analysis carried out and proposed improvement grouping methods in order to form the process flow of manufacturing parts by using the “universal” preform, allowing to increase the strength of parts and material utilization.

**Purpose:**The history of development of classification methods details with the aim of further improvements and additions of classification methods.

**Design/methodology/approach:**Existing methods based on comparison of the treated surfaces is added, based on the structure of the component material.

**Findings:**The proposed method of forming a work piece in accordance with the structure of the material of the part.

**Research limitations/implications:**Increases the strength of the product/

**Originality/value:**The method allows to increase the durability of the product and the utilization the material.

*Key words:* method, classification, clustering, detail, improvement, process, structure, material, strength, material utilization.

УДК 629.113

В.С. Макаров

**РАЗРАБОТКА НАУЧНО ОБОСНОВАННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ  
ПО СОЗДАНИЮ ПОДВИЖНЫХ КОМПЛЕКСОВ МОНИТОРИНГА БЕРЕГОВЫХ ЗОН**

Нижегородский государственный технический университет им Р.Е.Алексеева

Рассматриваются актуальность создания подвижных комплексов мониторинга береговых зон, необходимых для обеспечения социально-экономической и экологической безопасности, а также хозяйственной деятельности на береговых территориях и прилегающих акваториях. Рассмотрены методики оценки подвижности при стохастическом задании условий движения и соответствующих параметрах взаимодействия движителей шасси подвижных комплексов мониторинга береговых зон, позволяющие производить выбор рациональных параметров специальных транспортно-технологических средств и подвижных комплексов мониторинга на стадии их разработки, а также выбор рационального движителя для заданных условий эксплуатации. Данный метод дает научно обоснованные технические решения для подвижных комплексов мониторинга береговых зон.

*Ключевые слова:* береговая зона, подвижный комплекс мониторинга, метод проектирования.

Порядка 40% населения Земли проживает на узкой прибрежной полосе вдоль океанов и морей. Прибрежные зоны Российской Федерации занимают около 2/3 ее границ и порядка 10% от береговых зон поверхности суши Земли. Кроме того, большая часть населения проживает вдоль береговых зон внутренних водных объектов, в частности, озер, прудов, рек, ручьёв, искусственных водохранилищ. *Для множества наблюдений береговая зона – это пограничная область суши и водной среды, состоящая из собственно берега, определяемого уровнем колебания воды при отливах и приливах, береговой линии и берегового склона.* Ширина береговой зоны может быть от нескольких десятков метров до нескольких сот метров. Основные факторы, определяющие характер береговой зоны – геологические, климатические, инженерная деятельность человека и др. Береговая зона характеризуется временным непостоянством и меняет свое положение в зависимости от времени года, штормовых условий, фазы прилива, давления атмосферы и многих других причин. Береговые зоны и прибрежные территории – это место проживания большого числа людей и их культурной деятельности. Как следствие, развиваются сопутствующие отрасли промышленности, сельское, лесное, рыбное хозяйства. Происходит добыча природных ископаемых, нефти, газа, руд. В прибрежных и береговых зонах последнее время развивается альтернативная энергетика. Также всегда береговые зоны являлись объектом туризма и отдыха, а также районами для научно-исследовательской деятельности. Поэтому обеспечение безопасности жизнедеятельности, государственной и экологической (техногенной и природной) безопасности на этих территориях является важной и актуальной задачей. Для обеспечения безопасности необходимо проводить мониторинг прибрежных территорий и прилегающих акваторий в широких территориальных и пространственно-временных рамках. Мониторинг может быть реализован либо посредством большого числа стационарных постов, либо с использованием подвижных комплексов. Наиболее целесообразным в настоящее время является создание подвижных наземных комплексов мониторинга береговых зон. Использование специальных шасси и роботов при таких измерениях представляется весьма перспективным. Такие системы подходят для долгосрочного развертывания, так как они дают возможность непрерывного получения данных, охватывая несколько сотен метров от береговой линии. При этом возникает ряд проблем, связанных с необходимостью обеспечения подвижности в труднодоступных береговых зонах при движении по водонасыщенному грунтовому и заснеженному опорному основаниям, и требует от шасси подвижных комплексов возможности адаптации собственной структуры к обширному диапазону условий эксплуатации. Особые условия экс-

плуатации требуют разработки научно обоснованных технических решений по созданию подвижных комплексов мониторинга (ПКМ) береговых зон.

При этом можно выделить следующие направления исследования:

- особые условия эксплуатации, не характерные для обычных наземных комплексов, обуславливают разработку методик и проведение исследований с целью получения характеристик дорожно-грунтовых поверхностей в береговой зоне с учетом сезонности;
- специфика устанавливаемого оборудования (его тип и массово-габаритные параметры) на подвижный комплекс мониторинга обуславливает разработку методов формирования облика и определения параметров шасси;
- необходимость длительной автономной работы подвижных комплексов мониторинга обуславливает разработку рациональных конструкций шасси, которая учитывает специфику работы в береговой зоне, а также энергоэффективного управления движением.

Поэтому разработка научно обоснованных технических решений по созданию комплексов мониторинга, работающих в условиях береговых зон с целью повышения безопасности, является актуальной для экономики нашей страны.

Анализ условий движения по береговым зонам позволил выделить основные характеристики дорожно-грунтовых оснований как в теплое время года [1-4], так и в зимний период [5-16]. Данные параметры используются для математического моделирования. Но также необходимо знать начальные условия, а именно характеристики шасси ПКМ, оптимизацию которых в дальнейшем нужно производить с учетом условий движения. Выбор этих параметров должен быть произведен с учетом специфики устанавливаемого оборудования (его типа и массово-габаритные параметров), и может быть получен основываясь на инженерном опыте [17-22]. Это позволяет выбрать исходные данные для проектирования и последующей оптимизации конструкции транспортно-технологических машин и шасси ПКМ.

Методика задания параметров дорожно-грунтовых оснований, характерных для береговых зон, по данным, полученным в [1-4], позволяет оценить конструкцию ПКМ. Для расчета подвижности ПКМ при движении по песчано-гравийным опорным основаниям береговых зон целесообразно использовать математическую модель расчета контактных напряжений движителя с полотном пути, приведенную в работах Я.С. Агейкина, Н.С. Вольской [23-25]. Расчет нормальных и сдвиговых напряжений производится по зависимостям [23-25]:

$$q_{\beta} = \left[ \frac{(H_{\Gamma} - z)}{b(1 + 1,75\varphi_0)(k_{\beta_1} \cdot b \cdot \rho \cdot X_1 + k_{\beta_2} \cdot c_0 \cdot X_2 + k_{\beta_3} \cdot \rho \cdot X_3 \cdot z) \cdot \cos\beta} + \frac{a \cdot b}{E \cdot z} \operatorname{arctg} \frac{(H_{\Gamma} - z)}{a \cdot b \cdot \cos\beta} \right]^{-1};$$

$$\tau = \left[ q_{\beta} \cdot \operatorname{tg} \varphi_0 + c_0 \left( 1 - \frac{S_{t_0}}{S_t} \right) \right] \left[ 1 - \exp \left( - \frac{S_{t_0}}{k_{\tau}} \right) \right].$$

Зависимости для расчета обобщенных функций сопротивления и сцепления определяются исходя из значений напряжений, возникающих в элементарной площадке с последующим интегрированием по площади контакта.

$$\Phi_f = b M_a^{-1} \int_0^{h_t} p dh, \quad \Phi_{\varphi} = b M_a^{-1} \int_A \tau dA.$$

Расчетные схемы для колесного и гусенично-модульного движителей приведены на рис. 1 [23-25].

Анализ соотношения обобщенных функций сопротивления и сцепления позволяет оценить возможность движения шасси в условиях береговых зон по песчаным и песчано-гравийным опорным основаниям, а также оценить значения конструкционных параметров, при которых не будет происходить потеря подвижности шасси. В соответствии с этим была разработана методика, блок-схема которой приведена на рис. 2.

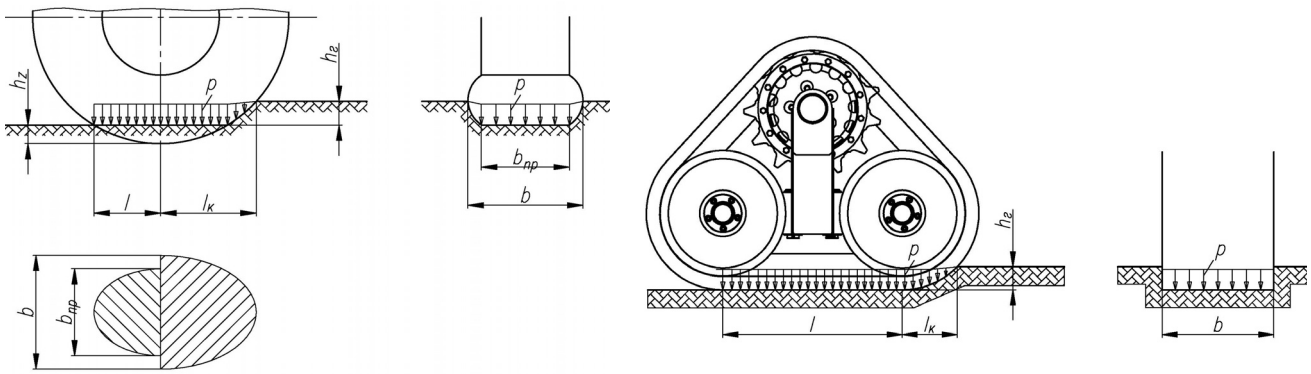


Рис. 1. Расчетные схемы взаимодействия колесного и гусенично-модульного движителей с грунтом

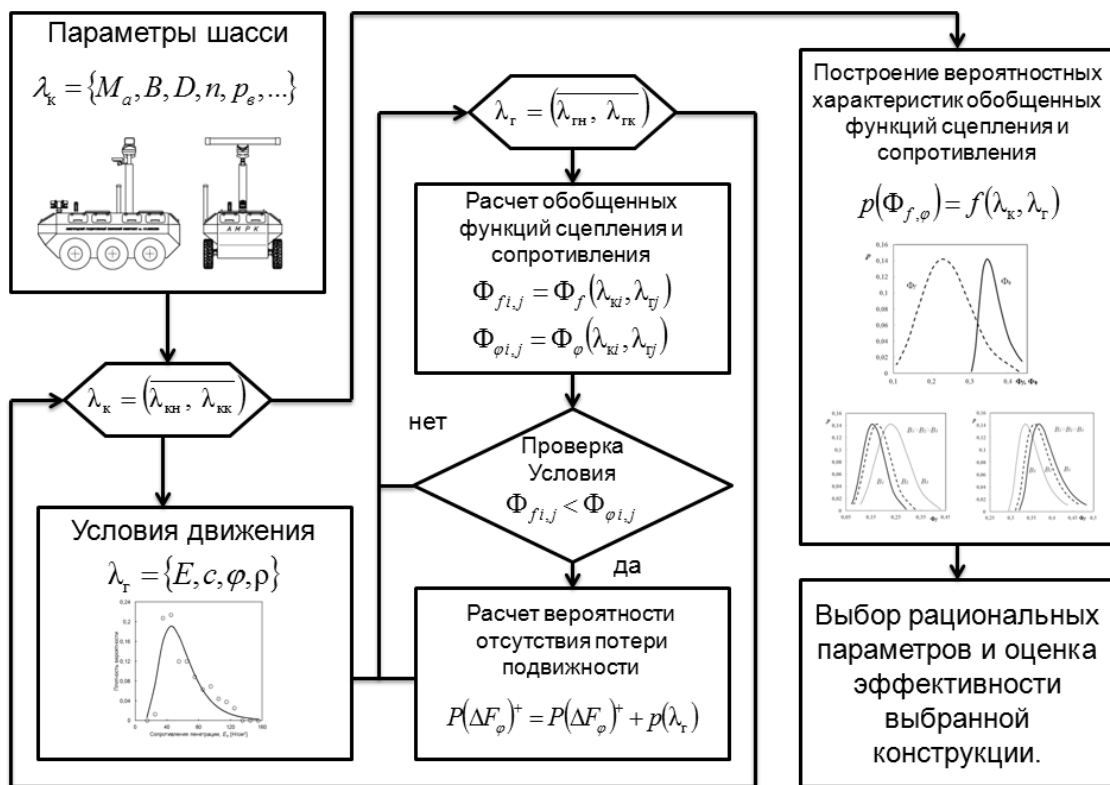


Рис. 2. Блок-схема методики оценки конструкционных параметров шасси ПКМ и расчета критерия эффективности

В предложенной методике используется цикл со счётчиком (перебор), в котором базовые параметры шасси ПКМ  $\lambda_k = \{M_a, B, D, n, p_v, \dots\}$  изменяют своё значение от заданного начального значения  $\lambda_{кн}$  до конечного значения  $\lambda_{кк}$  с некоторым шагом  $\Delta\lambda_k$ , и для каждого параметра тело цикла выполняется один раз. Начальные значения параметров  $\lambda_k$  задаются исходя из инженерного опыта [17-22] и требований к конструкции предоставляемых техническим заданием. В данной работе проанализировано изменение значений параметров от среднего на 20%:

В качестве данных о характеристиках опорного основания выступают значения  $\lambda_r = \{E, c, \phi, \rho\}$ , а также их статистические характеристики, которые задаются, используется цикл со счётчиком (перебор). Основные параметры опорного основания  $\lambda_r$  изменяют своё



значение от заданного начального значения  $\lambda_{ГН}$  до конечного значения  $\lambda_{ГК}$  с некоторым шагом  $\Delta\lambda_{Г}$ , и для каждого параметра тело цикла выполняется один раз. При этом каждому значению  $\lambda_{Г}$  соответствует свое значение плотности вероятности  $p(\lambda_{Г})$ .

Для каждого соотношения параметров  $\lambda_{Г}$  и  $\lambda_{К}$  рассчитывается значения обобщенных функций сопротивления  $\Phi_f$  и сцепления  $\Phi_{\varphi}$ . Проверяется условие  $\Phi_f < \Phi_{\varphi}$ . Если условие выполняется, то рассчитывается коэффициент, учитывающий вероятность того, что машина не потеряет подвижность по условию опорной проходимости при заданных условиях  $\lambda_{Г}$  и  $\lambda_{К}$ . Изменяя параметры опорного основания  $\lambda_{Г}$  и получая значения  $\Phi_f$  и  $\Phi_{\varphi}$ , строятся зависимости, учитывающие вероятностные характеристики в виде  $p(\Phi_f) = f(\lambda_{Г}, \lambda_{К})$  и  $p(\Phi_{\varphi}) = f(\lambda_{Г}, \lambda_{К})$  при заданных  $\lambda_{К}$ .

Анализ существующих алгоритмов управления распределения мощности по двигателям с целью оценки эффективности и расхода топлива при движении шасси в условиях береговых зон при разных условиях движения позволил дать рекомендации по их применимости. Решение данной задачи рассмотрено на примере регулирования потоков мощности в трансмиссии для многофункционального вездеходного транспортного средства с гидрообъемной трансмиссией (ГОТ).

Основные уравнения для расчета параметров движения машин с ГОТ подробно рассмотрены в работах: С.В. Бахмутова, Р.Х. Курмаева, А.В. Лепешкина, С.Б. Шухмана и др. [26-30]. Анализ различных алгоритмов управления для трансмиссий с индивидуальным приводом подробно рассмотрен в работах В.А. Горелова, Г.О. Котиева, И.А. Плиева, и др. [31-34]. В качестве исследуемых были приняты следующие законы управления трансмиссией: индивидуальное регулирование внешнего скольжения колес борта по известной линейной скорости движения центра масс шасси; «высокопороговое» регулирование колес борта шасси – сигнал подается датчиком «сильного» колеса, т. е. находящегося в лучших условиях движения; регулирование буксования колес по средней угловой скорости колес борта шасси.

На основании математических моделей была разработана программа в MATLAB/Simulink, позволяющая выбрать регулировки трансмиссии таким образом, чтобы обеспечивать наибольшую эффективность и топливную экономичность при движении в условиях береговых зон. Для оценки энергетической эффективности используется показатель, равный отношению «полезной» работы силы тяги на колесах. Так как в каждый момент времени оцениваемые параметры принимают разные значения, то рассматривался интегральный показатель за время движения машины, по зависимостям [35]:

- для эффективности  $K_{\text{эф}}^{\text{инт}} = \int_T K_{\text{эф}} dt$ , где  $K_{\text{эф}}$  – коэффициент эффективности в каждый момент времени;  $T$  – общее время движения;
- для топливной экономичности  $Q_{\text{эф}}^{\text{инт}} = \int_T Q dt$ .

Было получено [35], что эффективность работы системы управления ГОТ тем выше, чем изменчивее характеристики опорных оснований, по которым едет машина. Поэтому можно сделать вывод о том, правильно выбранные алгоритмы управления позволяют повысить эффективность работы ГОТ до 10% и снизить расход топлива до 18%.

Таким образом, выбрав варианты конструкции, для которых вероятность отсутствия потери подвижности будет минимальна. Определившись с алгоритмами распределения потоков мощности по двигателям, обеспечивающим наибольшую эффективность и наименьший расход топлива, можно сравнить выбранные конструкции по условию обеспечения наибольшего времени автономной работы или расходу топлива. Этот показатель особенно важен для ПКМ автономного движения.



Одним из способов, позволяющим решать поставленные задачи, является имитационное моделирование в программных комплексах, таких как Adams, Универсальный механизм и др. На рис. 3 показана блок-схема методики моделирования динамики мобильного робототехнического комплекса (МРК) [2, 4, 36, 37] и расчета эффективности по условию минимального расхода топлива (наибольшего пробега) при случайных условиях задания движения в береговых зонах, при выбранных рациональных параметрах шасси, обеспечивающих движение без потери подвижности и при выбранных алгоритмах управления распределения мощности по двигателям.

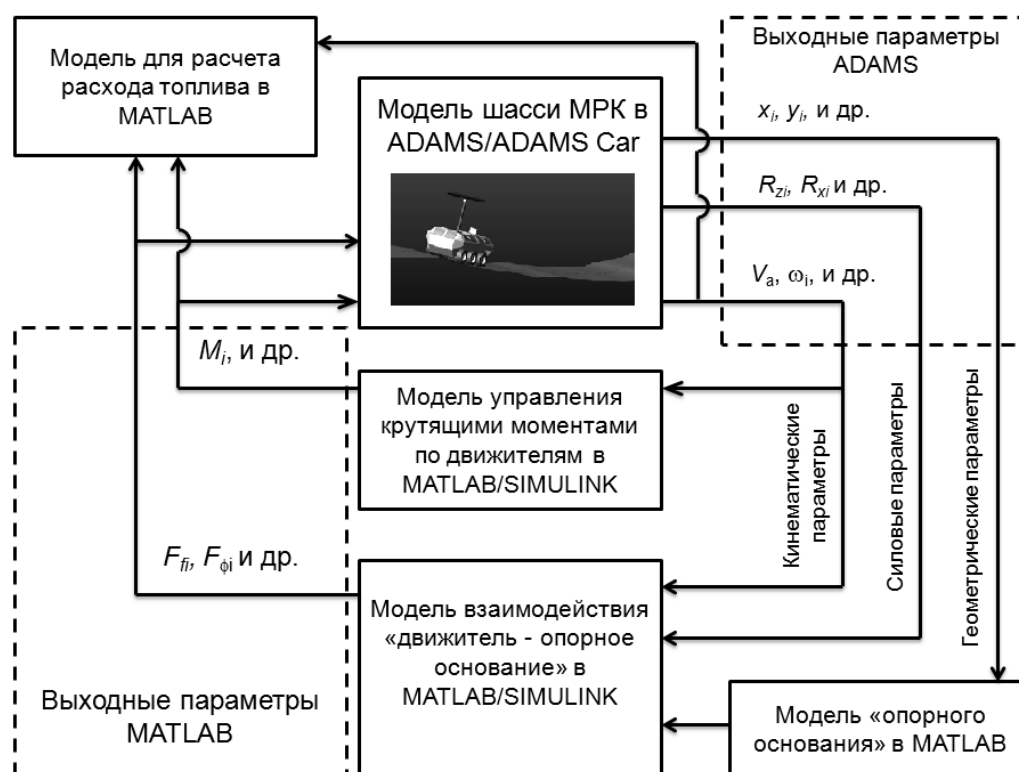


Рис. 3. Блок-схема методики моделирования динамики МРК

Расчет для колесного и гусеничного вариантов шасси МРК показал, что расход топлива при одном и том же пробеге со скоростями 10 км/ч (обусловлены спецификой работы МРК) для первого варианта на 17% меньше для песчано-гравийного и песчаного опорных оснований.

Таким образом, при правильно выбранных конструкционных параметрах шасси МРК колесный вариант будет предпочтительнее с точки зрения расхода топлива при движении по песчаным и песчано-гравийным опорным основаниям береговой зоны.

При движении ПКМ в зимний период по снежному полотну пути необходимо учитывать, что параметры снега меняются значительно на протяжении всего периода [5-16]. Поэтому рассмотрим более подробно методику расчета эффективности специальных шасси по снежному полотну пути с учетом изменчивости характеристик в течение зимнего периода. Для расчета проходимости машин целесообразно использовать подход, описанный в работах профессора Л.В. Барахтанова [38, 39]. Совместное рассмотрение зависимости запаса силы тяги от высоты снега и тяговой характеристики машины позволяет построить поверхность проходимости в зависимости от высоты снега и скорости движения машины.

Для расчета тяговой силы и сил сопротивления нужно знать нормальные и сдвиговые напряжения, наиболее удобной математической моделью для снежного полотна пути являются зависимости [16, 38, 39]:

$$q = h\gamma(1 - hh_{\max}^{-1})^{-1}, \tau = 0,8e^{-K_1\delta\ell} [c_0A + Bq \operatorname{tg} \varphi_0].$$

Для расчета сил, возникающих при движении колесной машины по снегу, целесообразно использовать методику расчета, предложенную В.В. Беляковым [38, 40], для гусеничных машин Л.В. Барахтановым [38, 39]. Рассмотрев аналитические зависимости для расчета сил сопротивления, сцепления, запаса силы тяги, тяговой силы и зная параметры снежного покрова и параметры машины, можно оценить эффективность движения машины в течение зимнего периода.

Для расчета проходимости, подвижности и эффективности шасси МРК по снегу в стохастической постановке для начала необходимо задаться параметрами снега в каждый момент времени [5-16]. Для описания наступления совместного события, а именно сочетания всех возможных значений высоты и плотности необходимо ввести матрицу состояний снежного покрова размерностью  $n \times n$ , где  $ij$ -й элемент представлен в следующем виде:  $[\rho_i, H_j, p(\rho H)_{ij}]$ , где  $\rho_i$  – плотность его элемента;  $H_j$  - высота -го элемента;  $p(\rho H)_{ij}$  - вероятность сочетания  $\rho_i$  и  $H_j$ , определяется как произведение вероятностей соответствующих элементов. Задаваясь параметрами машины, исследуют возможность ее движения и силовые факторы. Принципиальная блок-схема приведена на рис. 4.

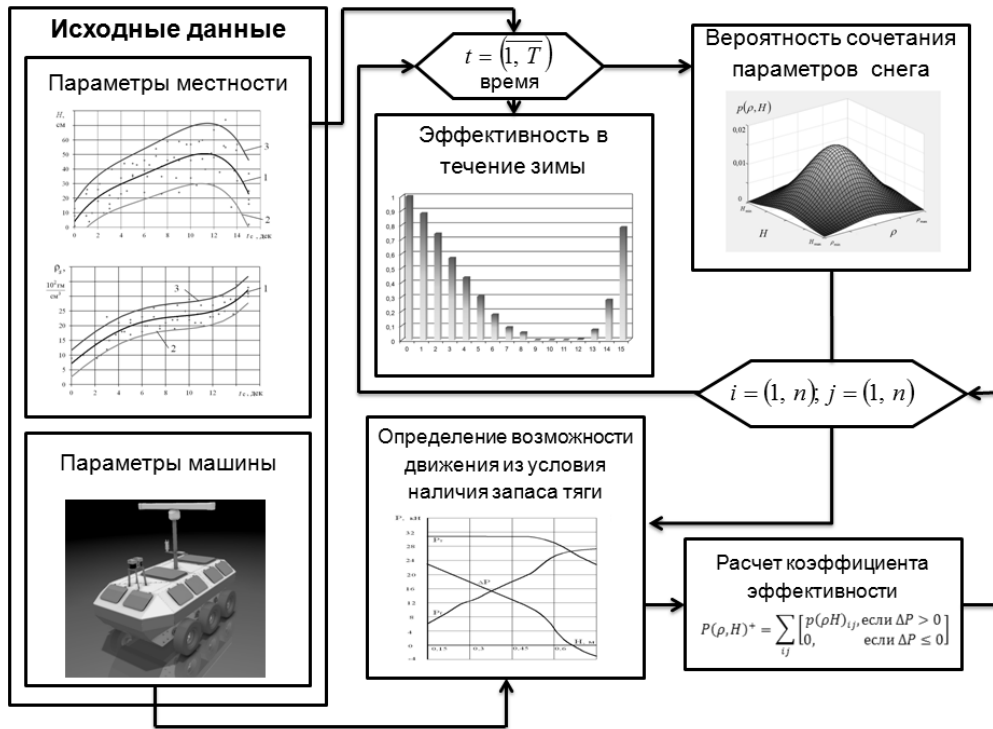
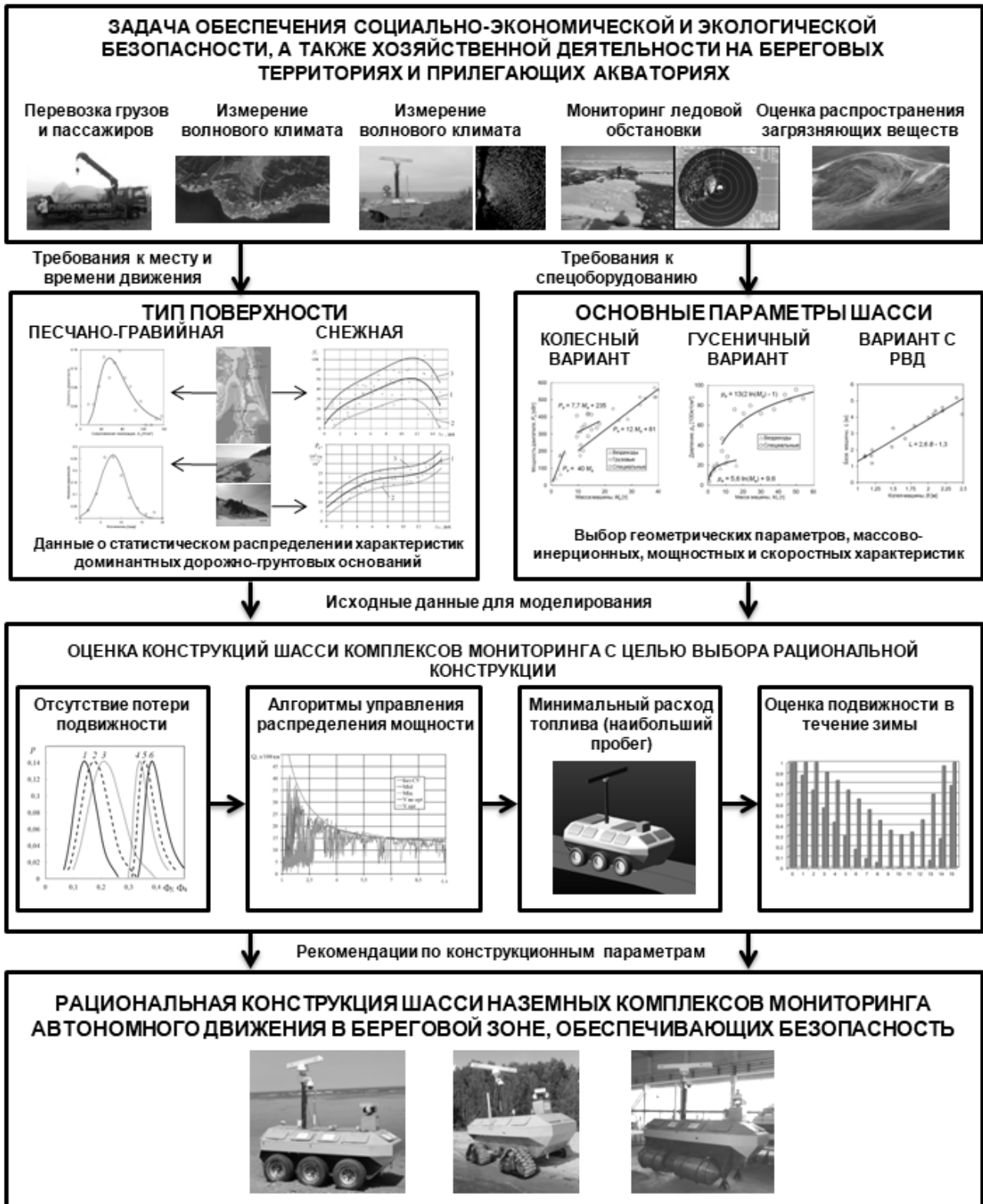


Рис. 4. Блок-схема методики расчета эффективности специальных шасси по снежному полотну пути с учетом изменчивости характеристик в течение зимнего периода

Критерий по потери проходимости можно определить так, вероятность возможного времени движения шасси в течение зимнего времени без потери проходимости:  $K_{ТА} = \sum_{t=0}^T \frac{[P(\rho, H)^+]_i}{T+1}$ , где  $[P(\rho, H)^+]_i$  – накопленная вероятность в момент времени  $t$ , определяется исходя из возможности движения с заданными параметрами  $\rho_i$  и  $H_j$ . Фактически можно определить исходя из следующих соображений:

$$P(\rho, H)^+ = \sum_{ij} \begin{cases} p(\rho H)_{ij}, & \text{если } \Delta P > 0, \\ 0, & \text{если } \Delta P \leq 0, \end{cases}$$

где  $\Delta P$  – запас силы тяги.



**Рис. 5. Блок-схема метода проектирования шасси комплексов мониторинга, работающих в условиях береговых зон и обеспечивающих социально-экономическую и экологическую безопасность, а также хозяйственную деятельность на береговых территориях и прилегающих акваториях**

В соответствии с предложенной методикой были проведены расчеты, пример для МРК на колесном и гусеничном ходу на прилегающих территориях берега залива Терпения

о. Сахалин. С точки зрения возможности передвижения в зимнее время составляет для МРК с колесным двигателем  $K_{ТА} = 0,34$ , с гусеничным –  $K_{ТА} = 0,70$ .

Таким образом, используя последовательность действий, изложенных в данной статье, можно предложить метод проектирования шасси ПКМ, работающих в условиях береговых зон и обеспечивающих социально-экономическую и экологическую безопасность, а также хозяйственную деятельность на береговых территориях и прилегающих акваториях. Блок-схема методики показана на рис. 5.

На основании потребности в обеспечении безопасности в той или иной деятельности формируются требования к месту и времени мониторинга, и требования к исследовательскому оборудованию. Зная место и время проведения мониторинга, определяют тип поверхности, на которой будет работать исследовательский комплекс. Это может быть либо песчано-гравийное опорное основание, либо снежное полотно пути. При необходимости проводят дополнительные замеры характеристик берега. Требования к оборудованию дают данные по необходимым габаритам шасси и массе перевозимого груза. Это позволит определить основные параметры шасси на основании регрессионных уравнений соотношения параметров машин.

После выбора исходных данных производят анализ конструкций с точки зрения выбора рациональных для заданных условий эксплуатации. Сначала оценивают конструкцию с точки зрения отсутствия потери проходимости и выбирают приемлемые варианты. Далее производят оценку и выбор алгоритмов управления распределения потоков мощности по двигателям. Используя полученные данные, оценивают возможности времени автономного движения. При этом выбирают машину с наименьшим расходом топлива. Далее подвижность вариантов шасси производят по критерию вероятности возможного времени движения шасси в течение зимнего времени без потери проходимости.

Таким образом, указанная последовательность действий позволяет дать рекомендации к рациональным конструкциям шасси подвижных комплексов мониторинга, работающих в условиях береговых зон и обеспечивающих социально-экономическую и экологическую безопасность, а также хозяйственную деятельность на береговых территориях и прилегающих акваториях.

*Представленные результаты получены при финансовой поддержке грантов Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации НШ-6637.2016.5 и молодых ученых - кандидатов наук МК-5854.2016.5.*

#### Библиографический список

1. **Макаров, В.С.** Статистическое моделирование грунтовых поверхностей береговых зон как полотна пути мобильных робототехнических комплексов мониторинга, контроля и диагностики природной среды / В.С. Макаров, В.И. Филатов, В.В.Беляков // Инновации на транспорте и в машиностроении: сб. тр. IV международной научно-практической конференции; под ред. В.В. Максарова / отв. ред. И.В. Павлов. – СПб.: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». – 2016. – Т. IV. – С. 83–86.
2. **Куркин, А.А.** Исследования прибрежных районов охотского моря с использованием наземного мобильного робота / А.А. Куркин [и др.] // Экологические системы и приборы. – 2016. – № 8. – С. 11–17.
3. **Макаров, В.С.** Экспериментально-теоретические исследования физико-механических характеристик песчаного грунта / В.С. Макаров, Д.В. Зезюлин, В.В. Беляков // Электронный научный журнал «Транспортные системы» («Transport systems»). 2016. № 2. URL: [http://transport-systems.ru/assets/2\\_001.pdf](http://transport-systems.ru/assets/2_001.pdf) (дата обращения: 27.11.2016).

4. **Zaytsev, A.** Coastal monitoring of the Okhotsk Sea using an autonomous mobile robot / A. Zaytsev, [et al.] // *Science of Tsunami Hazards*. – 2017. – V. 36. – № 1. – P. 1–12.
5. **Макаров, В.С.** Статистический анализ характеристик снежного покрова // *Современные проблемы науки и образования*. – 2013. – № 1; URL: <http://www.science-education.ru/107-8289> (дата обращения: 05.02.2013)
6. **Макаров, В.С.** Оценка эффективности движения колесных машин на основании статистических характеристик снежного покрова / В.С. Макаров [и др.] // *Труды НГТУ*. – Н. Новгород, 2013. – №1(98). – С. 150–157.
7. **Макаров, В.С.** Формирование снежного покрова в зависимости от ландшафта местности и оценка подвижности транспортно-технологических машин в течение зимнего периода / В.С.Макаров [и др.] // *Труды НГТУ*. – Н.Новгород, 2013. – №2(99). – С. 155–160
8. **Макаров, В.С.** Характер изменения снежного покрова как полотна пути с учетом неравномерности его залегания на местности / В.С. Макаров [и др.] // *Современные проблемы науки и образования*. – 2013. – № 4; URL: <http://www.science-education.ru/110-9696> (дата обращения: 23.07.2013).
9. **Макаров, В.С.** Многоуровневая модель снега как полотна пути для транспортно-технологических машин на примере территории Российской Федерации / В.С. Макаров, Д.В. Зезюлин, В.В. Беляков // *Фундаментальные исследования*. – 2013. – № 10 (часть 2). – С. 270–276.
10. **Макаров, В.С.** Снег как полотно пути для транспортных средств / В.С. Макаров, Д.В. Зезюлин, В.В. Беляков // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. – 2014. – №4. – С. 21–24.
11. **Беляков, В.В.** К вопросу выбора экспериментальных данных для составления статистических моделей снежного покрова как полотна пути для транспортно-технологических машин / В.В. Беляков [и др.] // *Труды НГТУ*. – Н.Новгород, 2014. – №1(103). – С. 136–141.
12. **Макаров, В.С.** Анализ влияния местности на параметры снежного покрова / В.С.Макаров, Д.В. Зезюлин, В.В. Беляков // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. – 2014. – №8. – С. 21–25.
13. **Makarov, V.** Prediction of all-terrain vehicles mobility in snowscape scenes / V. Makarov, D. Zeziulin, V. Belyakov // 18th International Conference of the International Society for Terrain-Vehicle Systems, ISTVS 2014; South Korea.
14. **Макаров, В.С.** Обзор исследований по влиянию местности на характеристики снежного покрова / В.С. Макаров, Д.В. Зезюлин, В.В. Беляков // *Труды НГТУ*. – Н.Новгород, 2014. – №3(105). – С. 154–162.
15. **Папунин, А.В.** О влиянии ландшафта местности на характеристики снежного покрова и на проходимость транспортных средств / А.В. Папунин [и др.] // *Труды НГТУ*. – Н.Новгород, 2014. – №4(106). – С. 331–335.
16. *Полотно пути транспортно-технологических машин (справочные материалы к теории «машина-местность»): учебник / под ред. В.В. Белякова, А.А. Куркина; Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2014. – 447 с.*
17. **Зубов, П.П.** Обзор существующих конструкций сочлененных гусеничных машин и рекомендации по выбору их параметров / П.П. Зубов [и др.] // *Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева*. – 2015. – № 2 (109). – С. 170–176.
18. **Барахтанов, Л.В.** Обоснование рациональной конструкции вездеходного транспортного средства с колесной формулой 8x8 / Л.В. Барахтанов [и др.] // *Вестник машиностроения*. – 2015. – № 6. – С. 3–5.
19. **Колотилин, В.Е.** Статистическая модель выбора геометрических параметров, массово-инерционных и мощностных характеристик транспортно-технологических машин на роторно-винтовых / В.Е. Колотилин [и др.] // *Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева*. – 2015. – № 3 (110). – С. 156–208.
20. **Береснев, П.О.** Статистическая модель выбора геометрических параметров, массо-инерционных, мощностных и скоростных характеристик многоосных колесных транспортно-техноло-



- гических машин / П.О. Береснев [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2015. – № 4 (111). – С. 136–150.
21. **Макаров, В.С.** Анализ параметров сочлененных гусеничных машин / В.С. Макаров [и др.] // Беспилотные транспортные средства: проблемы и перспективы: сб. матер. 94 международной научно-технической конференции: Ассоциации автомобильных инженеров / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2016. – С. 195–198.
  22. **Береснев, П.О.** Статистическая модель выбора геометрических параметров, массоинерционных, мощностных и скоростных характеристик гусеничных транспортно-технологических машин / П.О. Береснев [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2016. – №1(112). – С. 109–164.
  23. **Агейкин, Я.С.** Вездеходные колесные и комбинированные движители. Теория и расчет / Я.С. Агейкин. – М.: Машиностроение, 1972. – 184 с.
  24. **Агейкин, Я.С.** Проходимость автомобилей / Я.С. Агейкин. – М.: Машиностроение, 1981. – 232 с.
  25. **Вольская, Н.С.** Разработка методов расчета опорно-тяговых характеристик колесных машин по заданным дорожно-грунтовым условиям в районах эксплуатации: дисс. ... докт. техн. наук: 05.05.03 / Вольская, Н.С. – М., 2010.
  26. **Шухман, С.Б.** Теория силового привода колес автомобилей высокой проходимости / С.Б. Шухман, В.И. Соловьев, Е.И. Прочко. – М.: Агробизнесцентр, 2007. – 336 с.
  27. **Белоусов, Б. Н.** Прикладная механика наземных тягово-транспортных средств с мехатронными системами: монография / Б. Н. Белоусов, С. Б. Шухман; общ. ред. Б. Н. Белоусов. – М.: Агроконсалт, 2013. – 610 с.
  28. **Шухман, С. Б.** Гидрообъемный привод большегрузных полноприводных автомобилей для эксплуатации на грунтах с низкой несущей способностью / С. Б. Шухман, А. В. Лепёшкин, Р. Х. Курмаев // Приводная техника. – 2007. – № 6.
  29. **Курмаев, Р.Х.** Использование гидрообъемных трансмиссий в конструкции автотранспортных средств / Р.Х. Курмаев, С.Е. Петров // Известия «МАМИ». – 2009. – № 2. – С. 108–115.
  30. **Шухман, С.Б.** Схемные решения автоматического управления гидрообъемной трансмиссией полноприводного АТС / С.Б. Шухман, С.В. Бахмутов, В.Э. Маляревич // Автомобильная промышленность. – 2007. – №3. – С. 15–18.
  31. **Горелов, В.В.** Закон управления с функцией систем активной безопасности для электромеханических трансмиссий многоосных колесных машин / В.В. Горелов [и др.] // Известия ВУЗов. Машиностроение. – 2013. – № 9. – С. 56–66.
  32. **Горелов, В.А.** Разработка закона управления индивидуальным приводом движителей многоосной колесной машины / В.А. Горелов, Г.О. Котиев, А.В. Мирошниченко // Известия ВУЗов. Машиностроение. – 2012. – № 1. – С. 49–59.
  33. **Горелов, В.А.** Алгоритм управления индивидуальным приводом колесных движителей транспортных средств / В.А. Горелов, Г.О. Котиев, А.В. Мирошниченко // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2011. Спец. вып. «Энергетическое и транспортное машиностроение». – С. 39–58.
  34. **Bauer, M.** Fuzzy logic traction controllers and their effect on longitudinal vehicle platoon systems / M. Bauer, M. Tomizuka // Vehicle system dynamics. – 1996. – V. 25. – P. 277–303.
  35. **Береснев, П.О.** Оценка энергоэффективности вездеходного транспортного средства с гидрообъемной трансмиссией / П.О. Береснев [и др.] // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. – 2016. – № 1 (27). – С. 2–8.
  36. **Kurkin, A.** Unmanned Ground Vehicles for Coastal Monitoring / A. Kurkin [et al.] // International Journal of Imaging and Robotics. Volume 17; Issue No. 1; Year 2017; – P. 64–75.
  37. **Kurkin, A.A.** Autonomous Mobile Robotic System for Environment Monitoring in a Coastal Zone / A.A. Kurkin [et al.] // Procedia Computer Science. – 2017. – № 103– P. 459–465.
  38. Снегоходные машины / Л.В. Барахтанов, В.И. Ершов, С.В. Рукавишников, А.П. Куляшов. – Горький: Волго-Вятское кн. изд-во, 1986. – 191 с.
  39. **Барахтанов, Л.В.** Повышение проходимости гусеничных машин по снегу: дисс. ... докт. техн. наук: 05.05.03 / Барахтанов Л.В. – Горький, 1988. – 352 с.



40. **Беляков, В.В.** Взаимодействие со снежным покровом эластичных движителей специальных транспортных машин: автореф. дисс...докт. техн. наук: 05.05.03 / Беляков В.В. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – 32 с.

*Дата поступления  
в редакцию 22.07.2017*

**V.S. Makarov**

**DEVELOPMENT OF SCIENTIFICALLY BASIC TECHNICAL DECISIONS  
ON CREATING MOBILE COMPLEXES  
OF MONITORING OF THE COASTAL ZONES**

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

This article discusses the relevance of the mobile complexes coastal zone monitoring necessary to ensure socio-economic and environmental security, as well as economic activities in the coastal areas and adjacent water areas.

Methods for estimating the mobility under stochastic setting of the conditions of motion and corresponding parameters of the interaction of the chassis movers of mobile complexes coastal zone monitoring are considered. They make it possible to select the rational parameters of special transport-technological means and mobile monitoring complexes at the stage of their development, as well as the choice of a rational propulsor for the given operating conditions. The method provides scientifically-based technical solutions for mobile complexes coastal zone monitoring.

*Key words:* coastal zone, mobile monitoring complex, design method

УДК 621.316.71

Р.Д. Пастухов<sup>1</sup>, В.В. Проворов<sup>2</sup>, А.Р. Кварталов<sup>1</sup>**АНАЛИЗ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ  
АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ НАВЕДЕНИЯ  
С ЦЕЛЬЮ ИХ ИЗУЧЕНИЯ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ВУЗА**Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева<sup>1</sup>,  
Центральный научно-исследовательский институт «Буревестник»<sup>2</sup>

Рассматривается автоматизированная сложноподчиненная система управления с применением соответствующих устройств и механизмов для стабилизации и регулирования наведения рабочего органа механизированного модуля на объект. Представлены функциональная схема системы управления с использованием ЭВМ в контуре управления электроприводом и описание взаимодействия составных частей машины.

Проводится анализ работы автоматизированной системы управления объектом наведения с целью выявления причин возникновения недостатков существующей системы и нахождения возможных путей их устранения. Ставится задача использования принципов цифровой обработки информации в автоматике наведения для изучения соответствующих разделов в курсе теории автоматического управления.

Даются рекомендации по улучшению характеристик автоматизированной системы наведения.

*Ключевые слова:* электродвигатель, система управления, точность наведения, привод, объект управления.

В современной военной технике в качестве объектов сопровождения наиболее распространенными являются различные бронированные высокопроходимые машины с установленными на них средствами огневого поражения целей.

Учитывая современные темпы ведения боя, необходима разработка систем управления различной техникой, обеспечивающих максимальную точность наведения на цель за минимальное время и сохранение положения рабочего органа наведения машины вне зависимости от внешних воздействий. Это требует высокой интеграции взаимодействия всех частей машины и применения высокоскоростных вычислительных устройств.

Для решения поставленной задачи необходимо рассмотреть принцип работы исполнительных устройств и их взаимодействие в системе наведения с объектом управления.

Для выполнения задачи слежения за целью, на машину устанавливается поворотный механический модуль с объектом управления и вспомогательное оборудование для осуществления задачи наведения.

Управление движением машины осуществляется экипажем.

Механический модуль изделия представляет собой поворотную платформу со станком, на которой установлен объект управления. На поворотной платформе расположена большая часть рабочих органов машины. Отработка заданного положения объекта в пространстве происходит за счет электродвигателей - приводов горизонтального и вертикального наведения с редукторами, передающими вращающий момент на объект управления, расположенный на платформе.

С помощью датчиков угла (рис. 1) происходит преобразование угла поворота в электрический сигнал, который позволяет определить угол поворота платформы вместе с механическим модулем относительно всей машины. В качестве указателя угловой скорости поворота используется специальный датчик – гироскоп (рис. 2).

Стабилизация и регулирование положения прибора наведения в пространстве осуществляется своей системой автоматического регулирования, которая должна отслеживать моментальные характеристики объекта управления.



Рис. 1. Датчик угла поворота объекта управления



Рис. 2. Гиротахометр

Для обеспечения заданного положения рабочего органа машины, применяются соответствующие устройства и механизмы, называемые электроприводом (рис. 3).



Рис. 3. Электрический привод

Современный электропривод – это электромеханическая система, состоящая из электромеханических и механических преобразователей, управляющих и информационных устройств и устройств сопряжения с внешними электрическими, механическими, управляющими и информационными системами, предназначенная для приведения в движение исполнительных органов рабочей машины и управления этим движением в целях осуществления технологического процесса.

Электропривод, как и любая другая система, имеет свои собственные параметры (координаты): угловая скорость вращения двигателя, скорость движения перемещаемого объекта, ток якоря электродвигателя постоянного тока и другие. Управление координатами электропривода осуществляется при помощи различных комбинаций воздействий на рабочие органы системы, которые вырабатываются схемами управления.

Для отслеживания объектом управления меняющегося положения органа управления на движущейся машине применяется стабилизатор, состоящий из приводов вертикального и горизонтального наведения (ВН и ГН) и системы стабилизации. Привод ГН, в свою очередь, содержит датчик линейных ускорений.

Принципы работы приводов ВН и ГН в режимах стабилизации и стабилизированного наведения во многом схожи. Каждый из этих двух приводов представляет собой систему автоматического регулирования, работа которой основана на принципе отработки рассогласования (ошибки), т.е. на сравнении действительного значения регулируемого параметра с его заданным значением.

При анализе систем автоматического управления широко используют функциональные схемы. На рис. 4 показана функциональная схема САУ, которая включает следующие элементы:

1 – задающее устройство, которое задает режим работы, подает командный, начальный импульс или сигнал;

2 – элемент сравнения. В него входит сигнал  $XI$  от задающего устройства, сигнал  $X0$ , определяющий норму или уровень контролируемой величины. С учетом сигнала от элемента

9-й главной обратной связи элемент 2 сравнивает поступившие сигналы и посылает дальше скорректированный сигнал  $X_2$ ;

3 – преобразующий элемент. Поступающий в него сигнал преобразуется в другую форму, более удобную для дальнейшей передачи. Например, если сигнал  $X_2$  был дан в форме гидравлического (пневматического, механического) давления, то элемент 3 преобразует его в электрический ток. Так как подобного рода преобразование может требовать дополнительной энергии, то элемент 3 связан с источником энергии ПЭ;

4 – суммирующий элемент. В него поступают два сигнала:  $X_3$  и  $X_8$  от корректирующего элемента (элемента памяти) 8. Эти сигналы суммируются элементом 4 в сигнал  $X_4$  и направляются в следующий элемент;

5 – элемент усиления. Входящий сигнал  $X_4$  может быть слабым и для последующей передачи должен быть усилен. Это делается элементом 5, который связан с источником энергии ПЭ;

6 – исполнительный элемент, исполняет полученный сигнал (электродвигатель, электромагнитное реле, серводвигатель);

7 – регулируемый объект, или рабочая машина.

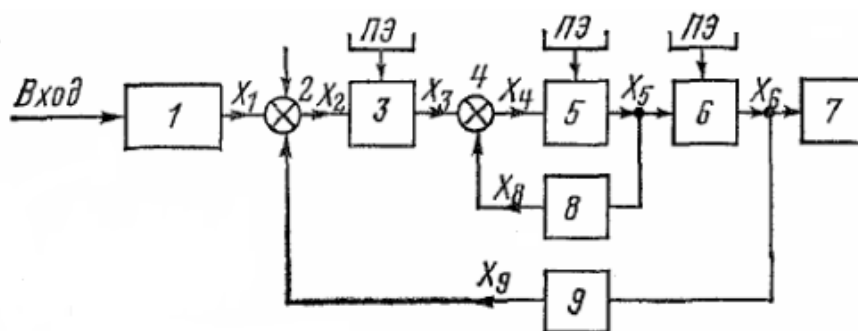


Рис. 4. Функциональная схема САУ

Каждый элемент автоматики – это преобразователь энергии, на вход которого подается величина  $X'$ , а с выхода снимается величина  $X''$ . Для каждого элемента в установившемся режиме существует определенная зависимость  $X''(X')$ , называемая статической характеристикой.

Существующие схемы управления электроприводом делятся на две основные категории: замкнутые и разомкнутые.

Замкнутая система автоматического управления характеризуется наличием обратных связей, она имеет, по крайней мере, одну (главную) обратную связь, соединяющую выход системы с ее входом. Кроме того, могут быть внутренние (дополнительные) обратные связи, соединяющие выход и вход отдельных элементов САУ, например, связь  $X_8$  (рис. 4). Благодаря этому, отслеживаются мгновенные значения координат электропривода на их соответствие заданным. Поскольку разомкнутые системы таких связей не имеют, то в разомкнутых САУ задающее устройство (включающая, регулирующая аппаратура) не получает информацию о фактическом режиме работы электроустановки (приводного электродвигателя или рабочей машины).

Замкнутые схемы управления электроприводов применяются в тех случаях, когда требуется обеспечить движение исполнительных органов машин с высокими показателями качества регулирования – большим диапазоном регулирования координат и точностью их поддержания, заданным качеством переходных процессов, а также высокой экономичностью и оптимальным функционированием самого электропривода. Другими словами, силовая часть такого электропривода имеет структуру «преобразователь – двигатель», в которой двигатель питается от специального управляемого преобразователя. Кроме того, замкнутые схемы управления позволяют получить высокую жесткость механических характеристик электропривода. Жесткость механических характеристик электропривода обеспечивается нали-

чием обратных связей по току и напряжению. Кроме того, применение обратных связей позволяет в системах «преобразователь – двигатель» не только получить жесткие механические характеристики двигателя, но и дает возможность обеспечить желаемое качество переходных процессов при пуске, торможении или реверсировании двигателей.

При минимальной скорости вращения обратная связь по току максимальна, а по мере увеличения скорости вращения она ослабляется. Так как к работе приводов ВН и ГН предъявляются повышенные требования в отношении жесткости механических характеристик, в схеме применено стабилизированное питание, которое обеспечивает стабильность выходных значений характеристик электропривода вне зависимости от стороннего возмущающего воздействия.

Характеристики разомкнутых систем управления электроприводами, построенных по той же структуре «преобразователь – двигатель», не могут иметь высокую жесткость из-за наличия внутреннего сопротивления как преобразователя, так и двигателя.

Главный недостаток систем с обратными связями - это невозможность определения точного соответствия полученных значений координат заданным.

Точное отслеживание положения механического модуля поворотной платформы машины в предлагаемой к рассмотрению конструкции обеспечивается введением цифровой системы автоматического управления электропривода, где объектом регулирования является положение рабочего органа машины. Каждый из отслеживаемых параметров ВН и ГН является зависимой величиной от скорости сигнала задания и от его фактического моментального значения, отслеживание которого возможно благодаря наличию обратных связей и соответствующих датчиков. Таким образом, цифровая система автоматического управления представляет собой сложноподчиненную систему, регулируемую три основные координаты: угловое положение объекта регулирования в системе координат машины, угловую скорость вращения механического модуля поворотной платформы в соответствующей плоскости и ток якоря электродвигателя.

Поворот механического модуля поворотной платформы, контроль за объектом управления, за прибором наведения и стопорением механического модуля осуществляется оператором с помощью пульта управления наводчика (ПУН) (рис. 5).



Рис. 5. Пульт управления наводчика

Кроме того, для корректного выполнения практических задач специальной техники, необходимо учитывать, что при движении изменяется положение машины в пространстве относительно земли, т.е. необходимо обеспечить стабилизацию положения прибора наведения на объекты относительно всех трех осей. Иными словами, необходим учет колебаний объекта стабилизации – крен, тангаж и рысканье. Таким образом, для решения задачи повышения точности наведения предлагается использовать как ключевые принципы работы систем автоматизированного управления электроприводом (САУЭП), так и стабилизацию положения рабочего органа машины. Для этого в известную систему стабилизации машин дополнительно вводится с соответствующими связями задающее устройство стабилизации с датчиками положения независимо стабилизированного в пространстве инерциального объекта по ГН и ВН, датчик положения по ВН, модули расчета скорости вращения вала электро-

двигателя от усилителей мощности по ГН и ВН, которые включаются в аппаратуру системы управления рабочим отделением модуля экипажа машины.

Управление электродвигателями в САУЭП осуществляется блоком управления БУ (рис. 6), который вырабатывает регулируемое по величине напряжение, прикладываемое к якорным цепям электродвигателей. Величина напряжения формируется силовыми транзисторными ключами, соединёнными в мостовую схему и работающими в режиме широтно-импульсной модуляции. Выходное напряжение формируется исходя из поступивших в БУ сигналов.



Рис. 6. Блок управления

Приводы БУ имеют автоматический и полуавтоматический режим управления.

В полуавтоматическом режиме наведение объекта управления на цель производится с помощью поворота корпуса пульта управления наводчика, от которого в БУ поступает сигнал по внешнему интерфейсу CAN о скорости поворота пульта управления. Чем быстрее производится поворот пульта, тем с большей скоростью осуществится вращение механического модуля поворотной платформы.

При работе в автоматическом режиме приводы горизонтального и вертикального наведения координируются по сигналам, полученным с модуля телетепловизионного дальнометра (МТТД) (рис. 7).

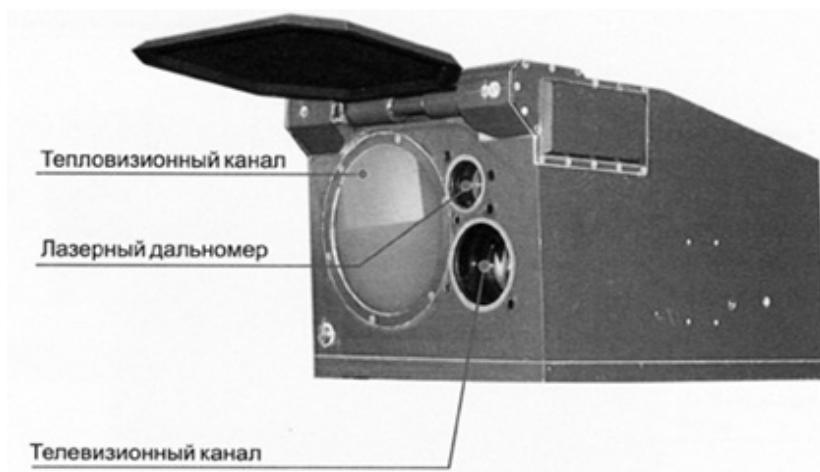


Рис. 7. Модуль телетепловизионный дальномерный (МТТД)

МТТД обеспечивает:

- обнаружение целей днем и ночью, в том числе, в сложных климатических условиях;
- высокоточное цифровое позиционирование;
- измерение дальности до объекта наведения;
- передачу видеoinформации по протоколу HD-SDI.

Контроль за процессом наведения осуществляется с пульта управления цифрового (ПУЦ) (рис. 8) и монитора бортовой ЭВМ, на которые поступают текущие и заданные значе-



ния углового положения механического модуля поворотной платформы и изображение объекта наведения, а также проводится высокоточная цифровая обработка сигналов и введение их в систему управления наведением рабочим органом машины по протоколу CAN.

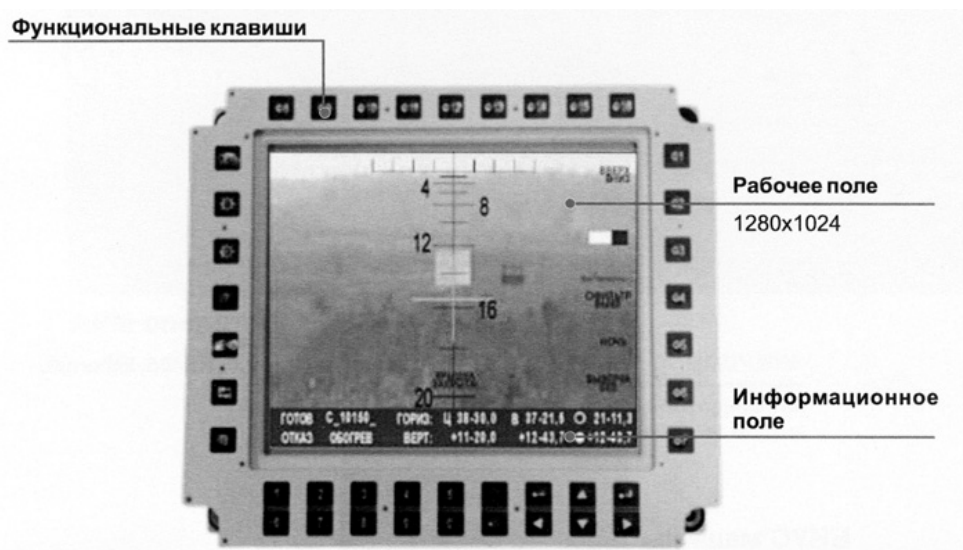


Рис. 8. Пульт управления цифровой

Обмен данными в машине между МТТД, ПУН, ПУЦ и датчиками угла цифровыми горизонтального и вертикального наведения (ДУЦ ВН и ДУЦ ГН) происходит посредством интерфейса CAN. Кроме того, обмен данными между оборудованием машины и блоком управления проходит по каналу с протоколом RS – 485.

Протоколы CAN и RS – 485 используют дифференциальный сигнал, способствующий высокому уровню помехозащищенности.

Таким образом, в состав системы наведения входят (рис. 9).

- блок управления (БУ) (осуществляющий сбор и обработку информации от исполнительных элементов);
- электродвигатель привода вертикального наведения (ЭД ВН);
- электродвигатель привода горизонтального наведения (ЭД ГН);
- датчики углового положения приводов вертикального и горизонтального наведения (ДУ ВН и ДУ ГН);
- пульт управления цифровой (ПУЦ);
- панель управления наводчика (ПУН);
- стопора электромеханические приводов (Ст ВН и Ст ГН);

Схема соединения составляющих системы управления наведением объекта управления представлена на рис. 9.

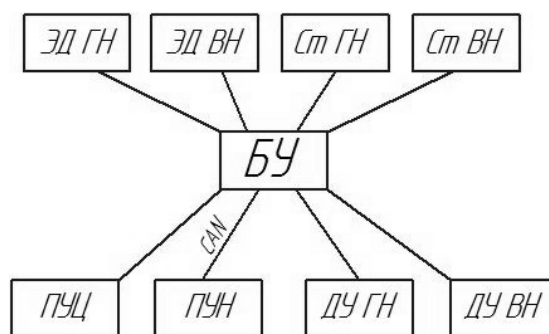


Рис. 9. Схема системы управления наведением объекта управления

## Выводы

Рассмотрев систему управления наведения на объект управления, можно полагать, что данная система отражает общую мировую тенденцию в развитии и модернизации систем наведения.

Взаимодействие составных частей машины с включенным в контур управления бортового вычислительного устройства обеспечивает максимальную скорость и точность наведения и позиционирования в пространстве с учетом различных погрешностей и внешних факторов, влияющих на эффективность наведения рабочего органа.

Дальнейшее улучшение характеристик системы наведения возможно путем замены существующего оборудования более совершенным, а также выполнение работы по облегчению всей конструкции в целом, что положительно повлияет на технические характеристики изделия.

## Библиографический список

1. Замкнутые системы автоматического управления [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://electricalschool.info/automation/1526-zamknutyie-sistemy-avtomaticheskogo.html>.
2. Система управления и стабилизации вооружения боевого модуля управления [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.findpatent.ru/patent/254/2548941.html>.
3. Система дистанционного управления вооружением [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.findpatent.ru/patent/255/2550407.html>.
4. Стабилизатор вооружения боевого модуля [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.findpatent.ru/patent/255/2551626.html>.
5. Элементы стабилизатора вооружения модернизированного танка ПТ-76Б [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://topwar.ru/34626-staryu-dobryu-plavun.html>.
6. Дистанционно-управляемая турельная установка [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://nevskii-bastion.ru/6s21/>.
7. Привод вертикального наведения и стабилизации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.findpatent.ru/patent/253/2530438.html>.
8. Системы управления огнем танков и БМП [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://military.wikireading.ru/55245>.

*Дата поступления  
в редакцию 20.08.2017*

**R.D. Pastukhov<sup>1</sup>, V.V. Provorov<sup>2</sup>, A.R. Kvartalov<sup>1</sup>**

## THE ANALYSIS OF AUTOMATED AIMING SYSTEM FUNCTIONS FOR THE PURPOSE OF THEIR RESEARCH IN THE STUDY PROCESS OF TECHNICAL UNIVERSITY

Nizhny Novgorod state technical university of R. E. Alekseev<sup>1</sup>,  
Central Research Institute "Burevestnik"<sup>2</sup>

**Purpose:** Consideration is being given to the automated complex control system with the use of corresponding devices and mechanisms for stabilization and control of aiming the mechanized module working body to an object.

**Methods** The function chart of the control system with the use of a computer in electric drive control loop and the description of machine components interaction are presented.

The work analysis of an automated object aiming control system is carried out in order to identify the causes of deficiencies in existing systems and to find the possible ways of their elimination is carried out.

The task of using the principles of digital information processing in aiming automatic equipment for studying the appropriate sections of the of automated control system is setted.

**Results:** Recommendations about improving performance of automated targeting system are given.

*Key words:* electric motor, control system, aiming accuracy, drive, object of control.

УДК 621.43.057

С.А. Плотников, А.С. Зубакин

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ДВИГАТЕЛЯ 1Ч 6,8/5,4  
ПРИ РАБОТЕ С ДОБАВКАМИ ГЕНЕРАТОРНОГО ГАЗА**

Вятский государственный университет, г. Киров

Альтернативная энергетика набирает обороты. Генераторный газ – перспективное альтернативное топливо, но работа ДВС на генераторном газе сопровождается снижением развиваемой мощности. Решение данной проблемы – добавление бензина к генераторному газу. Изучение процессов сгорания, определение оптимального угла опережения зажигания, анализ характеристик – цель данной работы. Среди поставленных задач – модернизация испытательного стенда для работы ДВС на генераторном газе.

Методика проведения экспериментов выбиралась с учетом специфики работы ДВС для привода электрогенератора на генераторном газе. Результатом работы является определение оптимальных регулировочных характеристик при работе на разных видах топлива. Полученные оптимальные углы опережения зажигания составляют: на генераторном газе –  $40^{\circ}$ , для смеси генераторного газа и бензина –  $33^{\circ}$ .

*Ключевые слова:* генераторный газ, индикаторные показатели, характеристики на генераторном газе, сгорание в ДВС, индикаторная диаграмма, смесь генераторный газ+бензин.

Доля альтернативной энергетики в мировой экономике ежегодно увеличивается. Интерес к ней проявляют всё больше и в России. Энергия биомассы является одним из перспективных видов. Анализ способов преобразования биомассы в энергию выявил процесс газификации, как наиболее перспективный [1, 2]. Получаемый при этом генераторный газ (далее ГГ) целесообразно использовать как топливо для ДВС.

Применение ГГ как топлива известно уже более века, но широкому применению мешало технологическое несовершенство оборудования и недостаточная изученность процесса сгорания генераторного газа в ДВС. Массовое применение такого топлива позволило бы снизить или полностью исключить использование бензина в отдалённых районах страны или при чрезвычайных ситуациях.

Целью данной работы является изучение процессов сгорания, анализ характеристик искрового двигателя на ГГ, смесях генераторного газа и бензина (далее ГГ + Б). Для достижения этой цели были поставлены задачи: определить оптимальный угол опережения зажигания при работе на ГГ и ГГ + Б, снять скоростные и регулировочные характеристики, снять индикаторные диаграммы для последующего анализа.

Анализ литературных источников об использовании ГГ как топлива выявил теоретическое падение развиваемой мощности на 10-15% даже при модернизации двигателя (установка оптимального угла опережения зажигания (УОЗ), повышение степени сжатия, установка системы зажигания с высокой энергией, применение системы управления двигателем [3] и т.д.). В противном случае наблюдается фактическое падение мощности до 50%.

На оптимальный угол опережения зажигания влияют многие факторы, но наибольшее значение имеет химический состав топлива. При работе газового генератора химический состав изменяется в зависимости от многих условий, в первую очередь, от вида топлива. При снятии характеристик в качестве топлива использовался древесный уголь.

Для компенсации падения мощности двигателя при работе ГГ было выдвинуто предположение о необходимости добавки бензина к ГГ.

Для получения индикаторных диаграмм и снятия характеристик была разработана установка на базе моторного стенда КИ-541СТЭ-7 и искрового бензинового двигателя 1Ч 6,8/5,4 в стандартном исполнении. Созданная лабораторная установка позволяет снять основные характеристики двигателя, записать индикаторные диаграммы для последующего анализа процесса сгорания (рис. 1) [4].

Для повышения надёжности воспламенения топливной смеси, на двигатель была установлена электронная система зажигания высокой мощности (рис. 2, а). Данная система позволяет во время работы двигателя регулировать УОЗ в пределах  $\pm 40^{\circ}$  относительно первоначальной установки.

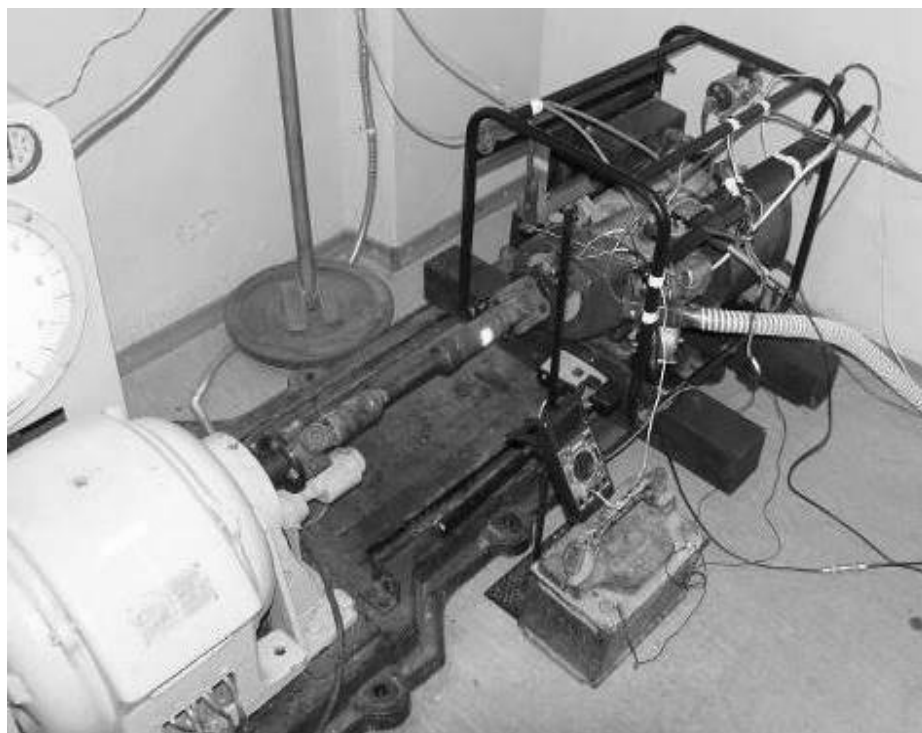


Рис. 1. Общий вид лабораторной установки

Для получения индикаторных диаграмм в головку блока цилиндров двигателя был установлен датчик индикаторного давления (рис. 2, б). Для преобразования давления в графическое изображение процесса сгорания использовалось программное обеспечение Diamag 2 (рис. 3).

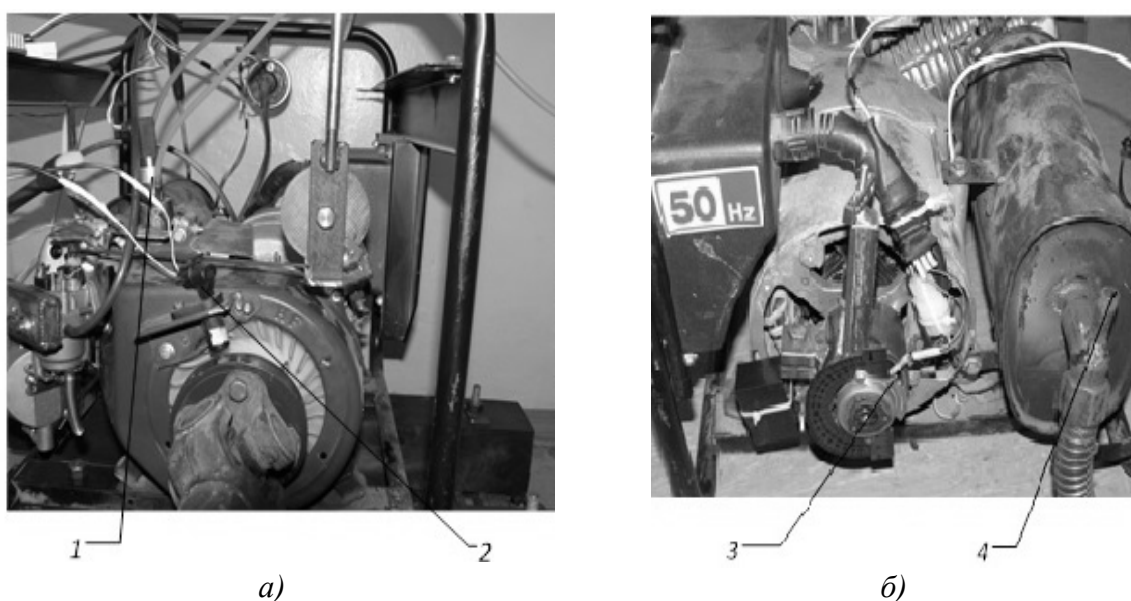


Рис. 2. Датчик индикаторного давления (а) и система изменения УОЗ (б):  
1 - датчик индикаторного давления с холодильником; 2 - датчик ВМТ;  
3 - датчик зажигания; 4 - место отбора ОГ

Снятие индикаторных диаграмм производилось при частоте вращения коленчатого вала  $3000 \text{ мин}^{-1}$  и одинаковой развиваемой мощности при работе на разных видах топлива [5].

Полученные при снятии характеристик индикаторные диаграммы для различных УОЗ представлены на рис. 4. Индикаторная диаграмма работы на бензине показывает оптимальный угол опережения зажигания равный  $\Theta_3=26^\circ$  до ВМТ. При этом угле нарастание давления происходит менее интенсивно и достигает максимума через  $11-13^\circ$  после ВМТ. Максимальное давление снижается до  $3,68 \text{ МПа}$ , падение давления  $Pz$  незначительно по сравнению с углом  $\Theta_3$ , равным  $28^\circ$  ( $3,87 \text{ МПа}$ ). Уменьшение УОЗ до  $\Theta_3=24^\circ$  приводит к ещё большему падению давления  $Pz$  до  $3,27 \text{ МПа}$  с одновременным ростом температуры ОГ, при данном УОЗ пик максимального давления  $Pz$  достигается при  $17^\circ$  после ВМТ. Полученные данные подтверждают теоретические выкладки по сгоранию бензина в камере сгорания.

Анализ диаграммы работы двигателя на генераторном газе (рис. 4, б) показывает увеличение продолжительности горения по сравнению с работой на бензине на  $76\%$ . Снижение индикаторного давления обусловлено низкой теплотой сгорания и химическим составом генераторного газа. При УОЗ, равном  $\Theta_3=40^\circ$ , пик максимального давления  $Pz$  ( $2,23 \text{ МПа}$ ) приходится на  $13-15^\circ$  после ВМТ, что является оптимальным. При других УОЗ ( $\Theta_3=43^\circ$  и  $\Theta_3=37^\circ$ ) давление  $Pz$ , соответственно  $2,36 \text{ МПа}$  и  $18,2 \text{ МПа}$ , при этом пик давления находится в ВМТ или при  $20^\circ$  после ВМТ, что не оптимально с точки зрения совершаемой работы.

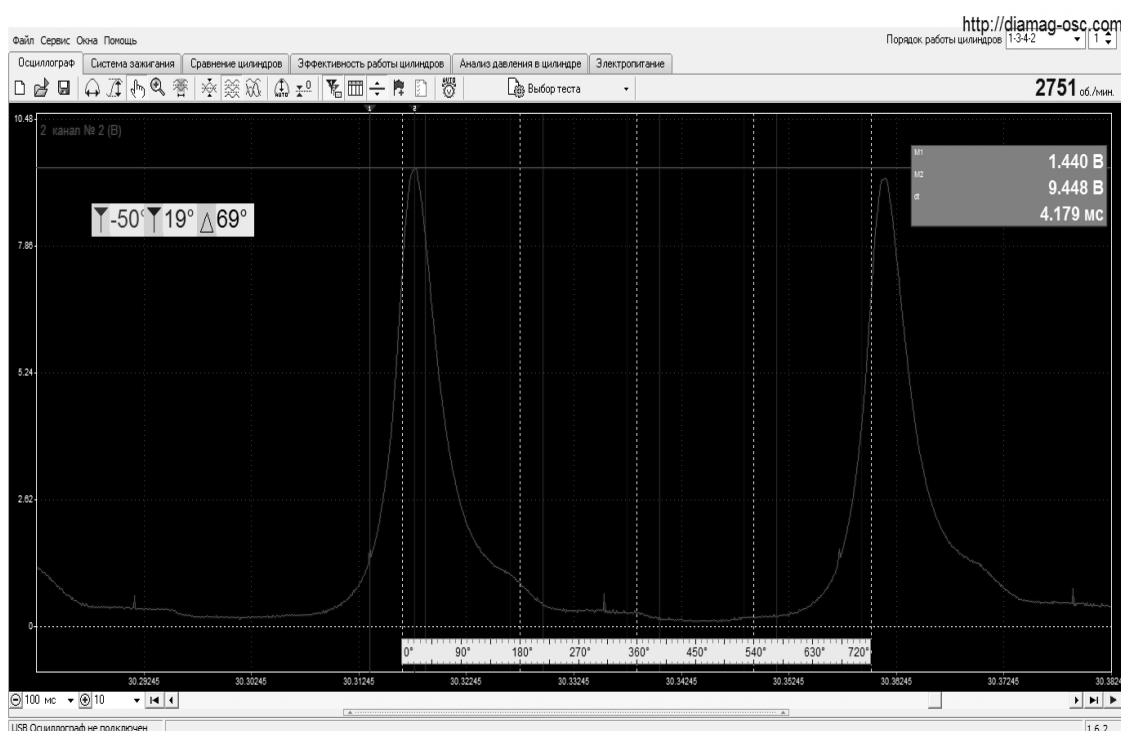
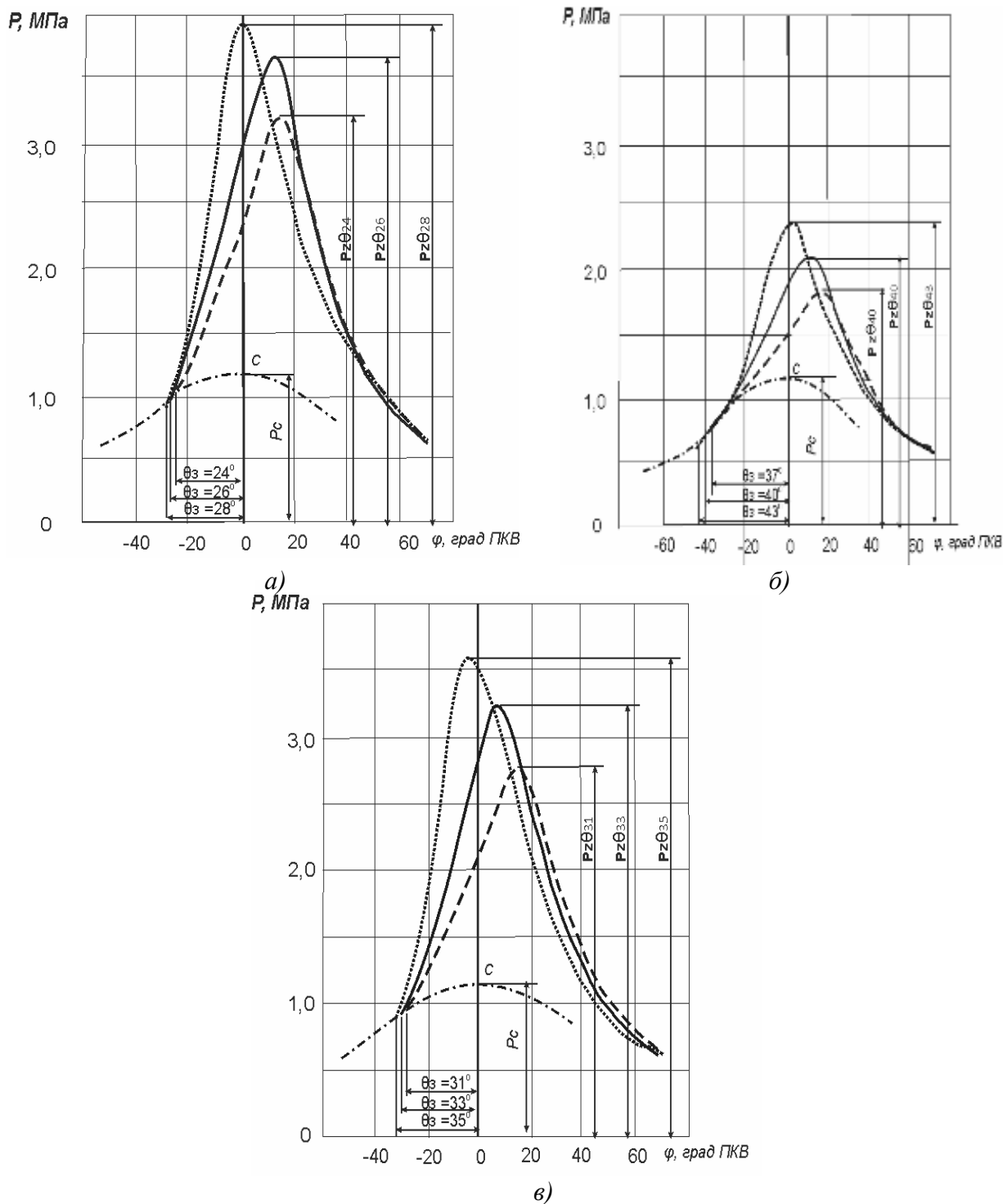


Рис. 3. Индикаторная диаграмма, записанная с помощью программы Diamag 2

Индикаторная диаграмма работы испытуемого двигателя на смеси бензина и ГТ (рис. 4, в) показывает снижение  $Pz$  относительно работы на бензине, при этом значение выше относительно работы на генераторном газе. Оптимальная скорость сгорания смеси наблюдается при  $\Theta_3=33^\circ$ . Максимальное давление  $Pz$  ( $3,27 \text{ МПа}$ ) немного ниже, чем при  $\Theta_3=35^\circ$  ( $3,61 \text{ МПа}$ ), но выше, чем при  $\Theta_3=31^\circ$  ( $2,76 \text{ МПа}$ ). При этом пик давления  $Pz$  находится на линии сжатия, что вызывает противодействие движению поршня, совершая отрицательную работу и, соответственно понижается КПД двигателя (рис. 5). При позднем УОЗ ( $\Theta_3=31^\circ$ ) основная работа сгорания происходит на линии расширения, что также снижает мощность и, следовательно,



КПД. Анализ иностранных источников [6] выявил аналогичные зависимости и показатели при работе ДВС на генераторном газе.



**Рис. 4. Индикаторные диаграммы работы двигателя при работе:**

*a* – на бензине; *б* – на генераторном газе; *в* – на смеси ГГ + Б

При использовании генераторного газа как топлива наблюдается значительное падение мощности - на 45% (рис. 5), в то же время падение мощности при использовании смеси ГГ +Б составляет всего 15%.

Помимо падения мощности, при работе на ГГ наблюдается рост удельного расхода топлива с 275 до 468 г/кВт×ч, по сравнению с работой на бензине. Удельный расход смеси



ГГ + Б составляет 319 г/кВт×ч. Часовой расход при работе на различных видах топлива находится в пределах 1,0-1,15 кг/ч.

При работе на генераторном газе наблюдается рост температуры ОГ, что связано с увеличением продолжительности горения газа. Вместе с увеличением УОЗ температура ОГ снижается с 645 до 625<sup>0</sup>С. При работе ДВС на бензине температура ОГ снижается с 561<sup>0</sup>С при  $\Theta_3=16^0$  до 548<sup>0</sup>С при  $\Theta_3=32^0$ . При работе на смеси ГГ+Б наблюдаются соответственно значения температуры ОГ, равные 581<sup>0</sup>С при  $\Theta_3=25^0$  и 568<sup>0</sup>С при  $\Theta_3=34^0$ .

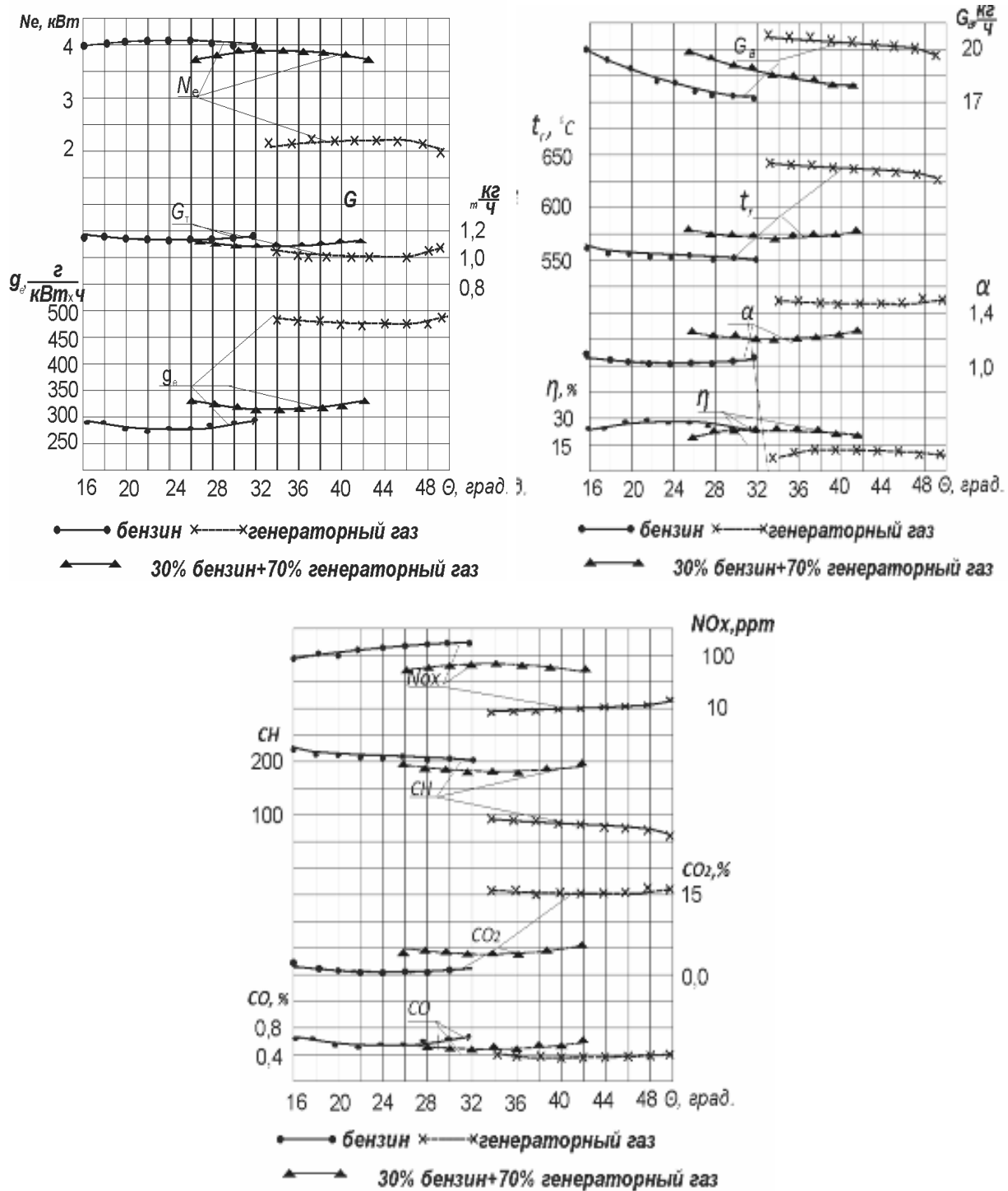


Рис. 5. Регулировочные характеристики двигателя 1Ч 6,8/5,4 при  $n=3000 \text{ мин}^{-1}$

Характерной особенностью сгорания ГГ является необходимость подачи большего количества воздуха в рабочей смеси, чем при работе на бензине ( $\alpha = 1,45$  и  $\alpha = 1,0$  соответственно при проведении экспериментов). При работе на смеси ГГ+Б коэффициент избытка воздуха равен  $\alpha=1,2$ .

При работе на ГГ наблюдается значение эффективного КПД, равное 14%, что ниже в 2 раза, чем на бензине (29%), при работе на смеси ГГ+Б значение эффективного КПД составляет  $\eta=23\%$ . При этом максимум эффективного КПД достигается при оптимальном УОЗ.

Значение УОЗ напрямую влияет и на показатели токсичности (рис. 5). При увеличении УОЗ выбросы суммарных оксидов азота  $\text{NO}_x$  повышаются, а выбросы несгоревших углеводородов  $\text{CH}$  снижаются. УОЗ также влияет на показатели выбросов углекислого газа  $\text{CO}_2$ . При работе двигателя на смеси ГГ+Б наблюдается рост  $\text{CO}_2$  и  $\text{CO}$  при определенных значениях углов  $\Theta_3$ . Полученные результаты требуют дальнейшего изучения с целью определения природы данного явления.

Проведённые экспериментальные исследования выявили возможность использования смеси ГГ и бензина для искровых ДВС и позволили сформулировать следующие *выводы*:

1. Использование генераторного газа как моторного топлива в чистом виде вызывает ухудшение эффективных показателей работы двигателя. Целесообразно использовать смесь генераторного газа и бензина.

2. Работа двигателя на чистом генераторном газе вызывает снижение эффективной мощности на 40-45%, при работе на смеси генераторного газа и бензина это снижение составляет 10-15%.

3. Работа двигателя на чистом генераторном газе вызывает увеличение продолжительности процесса сгорания по сравнению с работой на бензине и снижение максимального давления цикла.

4. Оптимальное значение угла опережения зажигания при работе на генераторном газе для данного двигателя составляет  $40^\circ$ , а для смеси генераторного газа и бензина  $33^\circ$ .

### Библиографический список

1. Палицын, А.В. Современное состояние и перспективы развития газификации биомассы как направления альтернативной энергетики / А.В. Палицын, А.С. Зубакин, В.М. Механиков // Вузовская наука – региону: мат. XI Всеросс. науч.-техн. конф. – 2013. – С. 201–204.
2. Плотников, С.А. Улучшение эксплуатационных показателей дизелей путем создания новых альтернативных топлив и совершенствования топливоподающей аппаратуры: дисс. ... в 2 ч.; Ч. 1 / Плотников С.А.; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2011.
3. Пат. РФ № 2605870, МКИ<sup>7</sup> F02B43/08. Система питания ДВС генераторным газом / Плотников С.А., Острецов В.Н., Киприянов Ф.А., Палицын А.В., Зубакин А.С., Коротков А.Н.
4. Плотников, С.А. Исследование электростанции, работающей на альтернативном топливе / С.А. Плотников, А.С. Зубакин, А.Н. Коротков // Улучшение эксплуатационных показателей сельскохозяйственной энергетики: по матер. IX Международной научно – практической конференции «Наука – Технология – Ресурсосбережение». – Киров, 2016. – Вып. 17. – С. 220–224.
5. Плотников, С.А. Некоторые результаты применения альтернативных топлив для снижения токсичности ДВС. ОБЩЕСТВО, НАУКА, ИННОВАЦИИ. (НПК-2016) [Электронный ресурс] С.А.Плотников, А.С. Зубакин // Всерос. ежегод. науч.-практ. конф.: сб. статей, 18-29 апреля 2016 г. / Вят. гос. ун-т. – Киров, 2016. – С. 1352–1357.
6. Sridhar, G. Biomass derived producer gas as a reciprocating engine fuel-an experimental analysis / G. Sridhar, P.J. Paul, H.S. Mukunda // Biomass and Bioenergy, 2001. – № 21. – P. 61–72.

*Дата поступления  
в редакцию 22.08.2017*

**S.A. Plotnikov, A.S. Zubakin**

**INVESTIGATION OF THE ENGINE WORKING PROCESS  
USING GENERATOR GAS ADDITIVES**

Vyatka State University (Kirov)

**Subject:** Generator gas is a promising alternative fuel. But the operation of the ICE on the generator gas is accompanied by a decrease in the developed power. The solution to this problem is the addition of gasoline to the generator gas.

**Purpose:** The study of combustion processes, the determination of the optimal ignition timing, the analysis of characteristics - the purpose of this work.

**Objectives:** Among the tasks set is the modernization of the test stand for the operation of the internal combustion engine on the generator gas.

**Methodology:** The procedure for conducting the experiments was selected taking into account the specific features of the ICE for driving the generator on the generator gas.

**Results:** The result of the work is the determination of optimal control characteristics when working on different types of fuel. The obtained optimal ignition timing is: on the generator gas - 400, for a mixture of generator gas and gasoline -330.

*Key words:* Gas generator, display indicators, specifications on generator gas, combustion in internal combustion engines, indicator diagram.

## НАШИ АВТОРЫ

### ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

**Арабаджи Мария Ильинична** – младший инженер-программист ООО «Харман»;  
semikova-maria@mail.ru

**Викулова Елена Николаевна** – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
vikelni@mail.ru

**Гай Василий Евгеньевич** – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
iamuser@inbox.ru

**Галкин Владимир Михайлович** – д-р. физ.-мат. наук, профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
vm@nntu.ru

**Дербасов Максим Олегович** – магистр технических наук, интерн АО «Интел»;  
ntfs.hard@gmail.com

**Елисеев Михаил Евгеньевич** – канд. физ.-мат. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
vm@nntu.ru

**Ерофеева Лариса Николаевна** – канд. физ.-мат. наук, доцент, зав. кафедрой НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
vm@nntu.ru

**Ерлыкина Елена Ивановна** – д-р биолог. наук, профессор Нижегородской государственной медицинской академии;  
erlyk@yandex.ru

**Козлова Яна Юрьевна** – магистр НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
chocolate10.03@mail.ru

**Логанов Сергей Викторович** – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
oaa-ood@yandex.ru

**Лещева Светлана Викторовна** – канд. физ.-мат. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
vm@nntu.ru

**Мохнина Наталья Вячеславовна** – канд. физ.-мат. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
vm@nntu.ru

**Мошкова Альбина Николаевна** – д-р биолог. наук, профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
anmoshkova@mail.ru

**Мурач Елена Ивановна** – канд. биолог. наук, ассистент Нижегородской государственной медицинской академии;  
Elena\_murach@mail.ru

**Плеханова Анна Феликсовна** – д-р экон. наук, профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
docplekhanova@gmail.com

**Подкладкин Алексей Сергеевич** – магистрант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
alekseypd@gmail.com

**Пособилов Николай Егорович** – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
posne44@mail.ru

**Поляков Игорь Владимирович** – магистр технических наук, аспирант им. Р.Е. Алексеева;  
polyakovigor92@gmail.com

**Пресняков Игорь Александрович** – мл. инженер-программист ООО «Харман»;  
indigouse@live.com

**Райкин Леонид Исаакович** – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
raykinl@yandex.ru

**Сангалова Марина Евгеньевна** – канд. пед. наук, доцент АФ ННГУ им. Н.И. Лобачевского  
vm@nntu.ru

**Субботина Мария Николаевна** – ведущий электроник, аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
mnsubbotina@gmail.com

**Узбекова Александра Сергеевна** – канд. экон. наук, доцент;  
uzbekovaal@mail.ru

**Царапкина Юлия Игоревна** – магистр НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
julka1377@mail.ru

**Шибанов Николай Александрович** – преподаватель Нижегородского института управления – филиала РАНХиГС при Президенте РФ;  
shibanov.n.a@gmail.com

**Юрова Надежда Вячеславовна** – старш. преподаватель НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
vm@nntu.ru

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

**Гордеев Борис Александрович** – д-р техн. наук, профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева, гл. научн. сотр. ИПМ РАН; gord349@mail.ru

**Ермолаев Артем Игоревич** – аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева; acidwolfvx@rambler.ru

**Кисиленко Кирилл Игоревич** - аспирант, ассистент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; (8312) 436-82-33.

**Кузьменков Александр Николаевич** – аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева; fae\_nir@nntu.ru

**Малахов Василий Алексеевич** – д-р техн. наук, профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева; (8312) 436-82-33.

**Мирясов Георгий Михайлович** – доцент кафедры электрооборудования, электропривода и автоматики НГТУ им. Р.Е. Алексеева; fae\_nir@nntu.ru

**Мякишева Мария Сергеевна** – магистрант НГТУ им. Р.Е. Алексеева; m\_myakisheva@inbox.ru

**Нечаев Артём Сергеевич** - магистрант НГТУ им. Р.Е. Алексеева; art.s.nechaev@gmail.com

**Осмехин Александр Николаевич** – канд. техн. наук, инженер-конструктор АО «ОКБМ Африкантов» (Россия, г. Н.Новгород); (831) 241-87-72.

**Охулков Сергей Николаевич** – канд. физ.-мат. наук, старш. научн. сотрудник ИПМ РАН, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; oxulkovs@mail.ru

**Палачев Максим Алексеевич** – магистрант НГТУ им. Р.Е. Алексеева; palachyov@gmail.com

**Плехов Александр Сергеевич** – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; aplehov@mail.ru

**Раевский Сергей Борисович** – д-р техн. наук, профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева; physics@nntu.ru

**Раевский Алексей Сергеевич** – д-р физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой НГТУ им. Р.Е. Алексеева; physics@nntu.ru

**Рыжакова Татьяна Станиславовна** – канд. техн.наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; physics@nntu.ru

**Стрелков Владимир Федорович** – д-р техн. наук, профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева; strelkov.428@mail.ru

**Титов Дмитрий Юрьевич** – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; dm\_titov@list.ru

**Щербаков Владимир Викторович** – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; physics@nntu.nnov.ru

## МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

**Белов Олег Александрович** – канд. техн. наук, зав. кафедрой «Электрооборудование и радиооборудование судов» Камчатского государственного технического университета; Voa-1@mail.ru

**Гаврилюк Евгений Алексеевич** – инженер Филиала ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород» – Инженерно-технический центр, аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева eugene\_gavr@mail.ru

**Гусев Алексей Анатольевич** – инженер 3-й категории отдела комплексного проектирования линейной части магистральных газопроводов ОАО "Гипрогазцентр" (г. Нижний Новгород); gusev.ggc@yandex.ru

**Зеленов Сергей Николаевич** – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; tseu@nntu.ru

**Зубакин Алексей Сергеевич** – аспирант Вятского государственного университета (г. Киров); expert35@mail.ru

**Кварталов Александр Рафаилович** - канд наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; paumov@nntu.ru

**Кошелев Олег Сергеевич** – д-р техн. наук, профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева; kos7shef3@Yandex.ru

**Крюков Олег Викторович** – д-р техн.наук, доцент НГТУ, главн. специалист ОТД и НТИ АО «Гипрогазцентр» (г. Н. Новгород); o.kryukov@ggc.nnov.ru

**Локтев Александр Васильевич** – канд. техн. наук; доцент, профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
prof.loktev@yandex.ru

**Магницкая Светлана Фёдоровна** – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
kos7shef3@Yandex.ru

**Макаров Владимир Сергеевич** – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
makvl2010@gmail.com

**Малахов Алексей Валентинович** – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.А. Алексеева;  
alex19590612@yandex.ru

**Манцеров Сергей Александрович** – канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
mca\_9@nntu.ru

**Пастухов Роман Дмитриевич** – студент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
r.pas55@yandex.ru

**Плотников Сергей Александрович** – д-р техн. наук, профессор Вятского государственного университета (г. Киров);  
Plotnikovsa@bk.ru

**Проворов Владислав Валентинович** – начальник конструкторского подразделения АО ЦНИИ «Буревестник»;  
vvprovorov@gmail.com

**Семашко Петр Владимирович** – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
tseu@nntu.ru



## РЕКОМЕНДАЦИИ ПО НАПИСАНИЮ АВТОРСКИХ РЕЗЮМЕ

(АННОТАЦИЙ, РЕФЕРАТОВ К СТАТЬЯМ)

Авторский реферат на английском языке должен быть понятен без ссылки на саму статью. Это краткое точное изложение содержания документа, включающее основные фактические сведения и выводы описываемой работы. Объем не менее 10 строк (100–250 слов – 850 знаков). Реферат включает: 1) предмет, тему, цель работы; 2) метод или методологию проведения работы; 3) результаты и область их применения; 4) выводы. Таблицы, формулы, рисунки (нумерация в реферате может не совпадать с текстом статьи) включаются, если раскрывают основное содержание документа и позволяют сократить объем реферата.

Реферат можно начать с изложения результатов работы и выводов. Сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте реферата. Следует применять терминологию, характерную для иностранных специальных текстов, избегать терминов, являющихся прямой калькой русскоязычных слов. Текст должен быть связным с использованием слов «следовательно», «более того», «например», «в результате» (*consequently, moreover, for example, the benefits of this study, as a result*). Необходимо использовать активный, а не пассивный залог, т.е. «The study tested», но не «It was tested in the study».

Авторское резюме из *International Journal of Operations & Production Management*. V.22.N 8

**B. Meijboom, M. Houtepens**

### STRUCTURING INTERNATIONAL SERVICE OPERATIONS: A THEORETICAL FRAMEWORK AND A CASE STUDY IN THE IT-SECTOR

#### The name of organization

**Purpose:** The specific challenges with which companies pursuing international manufacturing strategies are faced, if their output also contains a service dimension, are addressed.

**Design/methodology/approach:** A theoretical framework is proposed based on three virtually complementary perspectives by integrating international production, demand, and contemporary ICT-based theory. Subsequently, an exploratory case study in a pure service environment is described that illustrates the value of the framework.

**Findings:** It is possible, for example, to apply the theoretical framework to case studies in internationally-operating companies delivering a mix of goods and services.

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

**Originality/value:** Moreover, the framework has proven to be useful in improving the European structure of the case company. This is a notable and promising side-effect of the exploratory study, at least from a managerial point of view.

*Key words:* multinationals, service operations, location, decision making, case studies.

**ПРИНИМАЕМ В ПЕЧАТЬ НАУЧНЫЕ СТАТЬИ В ЖУРНАЛ  
«ТРУДЫ НГТУ им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»**

*Адрес редакции: 603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24*

*Телефон: 8(920)00-37-877*

*E-mail: [rsl@nntu.ru](mailto:rsl@nntu.ru)*

**ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ, НАПРАВЛЯЕМЫХ В РЕДАКЦИЮ**

- В редакцию направляют **два экземпляра** статьи, отпечатанных на лазерном принтере на белой бумаге формата А4, с одной стороны листа, через один интервал 12 кеглем. Сноски и примечания 10 кеглем. Поля: левое, правое и нижнее – 20 мм, верхнее – 25 мм.
- Желательно, чтобы объем статьи не превышал 10 страниц текста и 4–6 рисунков. Все страницы должны быть пронумерованы. Минимальное количество страниц – 6.
- Статью необходимо сопроводить актом экспортного и экспертного контроля, выпиской из заседания кафедры, рекомендующей статью к опубликованию, сведениями об авторах и рецензией от внешней организации, подписанной доктором наук и заверенной печатью.
- Статья должна быть подписана **всеми авторами**.
- Текст набирают без переносов, используя формат *Word for Windows* и стандартные шрифты *Times New Roman* и *Symbol*.
- Формульные выражения выполняют строго в редакторе MS Equation 3 –12 кегль. Размерность физических величин должна соответствовать системе СИ.
- Первая страница статьи должна содержать следующую информацию: УДК (код по универсальному десятичному классификатору); инициалы и фамилии авторов (в таком порядке); название статьи; место работы всех авторов (полное название организации, город); аннотацию; ключевые слова (не более 10).
- Изложение материала должно быть ясным, логически выстроенным. Рекомендуется следующая структура статьи: вводная часть с обоснованием необходимости и изложением цели работы, теоретический анализ, методика, экспериментальная часть, результаты и выводы (не более 0,5 страницы), библиографический список.
- Сокращение слов, кроме общепринятых, не допускается.
- Таблицы (11 кегль жирный) должны иметь названия, их следует располагать по тексту статьи, ссылки на таблицы (табл. 1).
- Диаграммы выполняются в формате Excel.
- Графический материал (только в черно-белом изображении) должен быть четким и не требовать перерисовки. Изображение выполняется в формате **jpf** или **tif** с разрешением **300 dpi**. Рисунки выполняются по ГОСТ, подрисовочная подпись 11 жирный кегль.
- К статье следует приложить CD с файлами: текста статьи с библиографией на русском языке; **фамилиями авторов, названием статьи, информацией о месте работы всех авторов, аннотацией и ключевыми словами на английском языке**.
- В сведениях об авторах следует сообщить: ФИО (полностью), место работы, должность, ученую степень и звание, телефон и адрес электронной почты.

**ТРУДЫ НГТУ  
им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА**

**№ 3 (118)**

Редакторы: **Т.В.Третьякова, Е.В. Комарова**  
Технический редактор **Т.П. Новикова**

*Редакция:*  
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24.  
[rsl@nntu.ru](mailto:rsl@nntu.ru)

Подписано в печать 25.09.2017. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Бумага офсетная.  
Печать трафаретная. Усл. печ. л. 23,5. Тираж 300 экз. Заказ .

---

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева.  
Типография НГТУ.

Адрес университета и полиграфического предприятия:  
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24.

**Индекс 44757**  
**Объединенный каталог «Пресса России»**

**Свидетельство о регистрации**  
**периодического печатного издания**  
**ПИ № ФС 77-56417 от 11 декабря 2013**