

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

# **ТРУДЫ НГТУ им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА**

*Журнал издается с 2010 года*

**№ 2 (113)**

**Нижний Новгород 2016**

УДК 050(06)  
ББК 9я54  
Т 78

Т 78 Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2016. №2(113).  
– 176 с.

*Выходит 4 раза в год*

**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**

**Председатель**

***Федор Михайлович Митенков***

(академик РАН, д. физ.-мат. н., проф.,  
советник директора «ОКБМ Африкантов» по научным вопросам)

**Заместитель председателя**

***Сергей Михайлович Дмитриев***

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

**Ответственный секретарь**

***Владимир Викторович Беляков***

(д. т. н., проф., начальник УНИИИР)

### **ЗАРУБЕЖНЫЕ ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОГО СОВЕТА**

***Пелиновский Дмитрий Ефимович***

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

***Палкович Ласло***

Проф. Сечени Иштван Университет, Дьёр, Венгрия

***Варлаки Петер***

Проф. Сечени Иштван Университет, Дьёр, Венгрия

***Виджай Кумар Чакка***

PhD, проф., Университет Шив Надар, Индия

***Ялцинер Ахмет Джевдет***

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

### **ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОГО СОВЕТА**

***Гуляев Юрий Васильевич***

член Президиума РАН, академик, д. физ.-мат. н., проф.,  
научный руководитель ИРЭ РАН им. В.А. Котельникова

***Гринберг Руслан Семенович***

член-корр. РАН, д. эк. н., проф.,

***Митяков Сергей Николаевич***

научный руководитель Института экономики РАН

Академик РАЕН, член президиума РАЕН,

действительный член АИН им. А.М. Прохорова,

д. физ.-мат. н., проф., директор ИНЭУ НГТУ

***Куркин Андрей Александрович***

д. физ.-мат. н., проф., зав. кафедрой ПМ

***Кондратьев Вячеслав Васильевич***

член-корр. РАН, д. т. н., проф.,

зав. кафедрой ВСТ НГТУ

***Рындык Александр Георгиевич***

д. т. н., проф., зав. кафедрой ИР НГТУ

***Раевский Сергей Борисович***

д. т. н., проф.

***Кошелев Олег Сергеевич***

д. т. н., проф., зав. кафедрой МТКОДСП НГТУ

***Кулепов Виктор Федорович***

д. т. н., проф., директор ДПИ (филиал НГТУ)

УДК 050(06)  
ББК 9я54

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

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

© Нижегородский государственный технический  
университет им. Р.Е. Алексеева, 2016

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

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

*Published since 2010*

**№ 2 (113)**

**Nizhny Novgorod 2016**

*The journal is issued 4 times a year*

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

**EDITORIAL BOARD**

N.Y. 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.Y. Vagin, V.D. Vavilov, V.M. Galkin,  
A.M. Groshev, A.A. Kurkin, A.B. Loskutov, A.Y. Panov, A.E. Khrobostov

**EDITORIAL COUNCIL**

<b>Chairman</b>	<b>Fedor Mikhailovich Mitenkov</b> Member of Russian Academy of Sciences Adviser to the Head of OAO I.I. Afrikantov OKB Mechanical Engineering Doctor of physical and mathematical sciences, professor (Nizhny Novgorod, Russia)
<b>Vice-chairman</b>	<b>Sergei Mikhailovich Dmitriev</b> Doctor of technical sciences, professor Rector of NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
<b>Executive Secretary</b>	<b>Vladimir Viktorovich Belyakov</b> Doctor of technical sciences, professor Head of NNSTU Research and innovative works office (Nizhny Novgorod, Russia)

<b>Dmitri Efimovich Pelenovski</b> <i>László Palkovics</i> <i>Péter Várlaki</i> <i>Vijay Kumar Chakka</i>	<b>Foreign members of Editorial council</b> PhD, Doctor of mathematical sciences, professor McMaster University (Ontario, Canada) The Széchenyi István University (Győr, Hungary) The Széchenyi István University (Győr, Hungary) PhD, Doctor of philosophical sciences, professor Shiv Nadar University (India) professor, head of Ocean Engineering Research Center Middle East Technical University (Turkey)
<b>Yalciner Akhmet Cevdet.</b>	

**Members of Editorial council**

<b>Guliaev Yuri Vasilevich</b>	Member of Russian Academy of Sciences Doctor of physical and mathematical sciences, professor Institute of Radio Engineering and Electronics (IREE) named after Academician V.A. Kotelnikov (Moscow, Russia)
<b>Grinberg Ruslan Semenovich</b>	Associate member of the Russian Academy of Sciences Doctor of physical and mathematical sciences, professor Director of the Institute for International Economic and Political Studies at the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)
<b>Mitiakov Sergei Nikolaevich</b>	Doctor of physical and mathematical sciences, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
<b>Kurkin Andrey Aleksandrovich</b>	Doctor of physical and mathematical sciences, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
<b>Kondratev Viacheslav Vasilevich</b>	Associate member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of technical sciences, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
<b>Ryndyk Alexander Georgievich</b>	Doctor of technical sciences, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
<b>Raevski Sergei Borisovich</b>	Doctor of technical sciences, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
<b>Koshelev Oleg Sergeevich</b>	Doctor of technical sciences, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
<b>Kulepov Viktor Fedorovich</b>	Doctor of technical sciences, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)

*Electronic version of the journal:*  
<http://www.nntu.ru/content/trudy/>



## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ.....</b>	<b>9</b>
<b>Асеева Н.В., Бляхман Л.Г., Громов Е.М., Оносова И.В., Тютин В.В.</b> Солитоны в расширенном нелинейном уравнении Шредингера с псевдорамановским рассеянием и нелинейной дисперсией.....	9
<b>Аристов А.В., Зеленский В.П.</b> Интероперабельность диалоговых приложений в сетевом окружении.....	17
<b>Калинин М.А., Карпычев В.Ю.</b> Методы вычисления оптического потока для задач анализа трехмерной сущности сцены.....	24
<b>Кожевникова Т.В.</b> Расчет волноводной нагрузки на базе отрезка короткозамкнутого прямоугольного волновода с объемной поглощающей вставкой.....	30
<b>Мошкова А.Н., Ерлыкина Е.И., Царапкина Ю.И., Болоненков А.В., Козлова Я.Ю.</b> Использование эмпирических зависимостей для прогнозирования оптимального режима гипоксического прекондиционирования на примере анализа показателей гликолиза мозга.....	37
<b>Матысик О.В.</b> Метод итераций неявного типа решения операторных уравнений в гильбертовом пространстве.....	47
<b>Шагалова П.А., Соколова Э.С., Щербатюк Т.Г., Яшанова М.И.</b> Распознавание кристаллических структур плазмы крови на основе сверточных нейронных сетей... ..	55
<b>Шемарулин И.А., Карпычев В.Ю.</b> Распознавание дорожных знаков на основе цветных контуров.....	60
<b>ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ.....</b>	<b>67</b>
<b>Басов А.А., Кайнова А.В., Кузьма М. М., Субарев М. А., Минеев И. В., Худяков И. С., Яшина А.Н.</b> Моделирование задачи о квантовом осцилляторе.....	67
<b>Гордеев Б.А., Охулков С.Н., Плехов А.С., Титов Д.Ю.</b> Биения, возникающие при синхронизации двух двигателей, установленных на общем вязкоупругом основании	75
<b>Коробко Г.И., Лебедев В.В., Ахлестин П.В.</b> Компенсация нелинейных искажений напряжения в судовых сетях при питании ответственных потребителей.....	86
<b>Панфилов С.Ю., Чивенков А.И., Панфилов И.С., Вихорев Н.Н.</b> Требования к параметрам электромагнитных компонентов преобразователей постоянного напряжения.....	94
<b>Хорьков С.В.</b> Отклонение от линейного протекания тока в упорядоченной двумерной среде.....	101
<b>МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО .....</b>	<b>107</b>
<b>Козлов И.К., Трофимов А.С.</b> Исследование и оптимизация процесса нагрева при контактной стыковой сварки сопротивлением.....	107
<b>Кондратьева Л.Ю.</b> Определение главных размерений корабля береговой охраны типа SWATH на ранних стадиях проектирования.....	115
<b>Кострова З.А., Михеев А.В., Зезюлин Д.В., Макаров В.С., Колотилин В.Е., Бушуева М.Е., Беляков В.В.</b> Эволюция колеса.....	121

---

<b>Кострова З.А., Михеев А.В., Зезюлин Д.В., Макаров В.С., Колотилин В.Е., Бушуева М.Е., Беляков В.В.</b> Историческое изменение конструкции колеса, как опорно-тяговой системы элементов движителей транспортных средств, с позиции применяемых материалов.....	136
<b>Ломакин В.В., Шабанов А.А.</b> Критерии выбора основных параметров силовой установки гибридных автомобилей при проектировании.....	151
<b>Нагорных С.Н., Нагорных Е.В.</b> Случайная компонента скорости вращения вала двигателя внутреннего сгорания со свечей зажигания.....	158
<b>Павлов А.С., Ванюшкин Н.М.</b> Формирование многослойного шва газонаправленной струей при сварке в щелевую разделку кромок.....	162

## CONTENTS

<b>INFORMATICS AND MANAGEMENT IN TECHNICAL AND SOCIAL SYSTEMS....</b>	<b>9</b>
<b>Aseeva N.V., Blyahman L.G., Gromov E.M., Onosova I.V., Tyutin V.V.</b> Solitons in an extended nonlinear Schrödinger equation with the pseudo-Raman scattering and nonlinear dispersion.....	9
<b>Aristov A.V., Zelenskii V.P.</b> Interactive application interoperability in a networked environment.....	17
<b>Kalinin M.A., Karpychev V.Y.</b> Methods of optical flow estimation for 3d scene analysis....	24
<b>Kozhevnikova T.V.</b> Waveguide load computation on the basis of short circuited rectangular volume absorbing loaded waveguide segment.....	30
<b>Moshkova A.N., Erlykina E.I., Tsarapkina Yu.I., A.V.Bolonenkov, Ya.Yu. Kozlova Ya.Yu.</b> Usage of empirical dependences for prognostication of hypoxic preconditioning optimal regime in terms of brain glycolysis indicators analysis.....	37
<b>Matysik O.V.</b> The iteration method of implicit type for solving operator equations in hilbert space.....	47
<b>Shagalova P.A., Sokolova E.S., Shcherbatyuk T.G., Yashanova M.I.</b> Recognition of crystal structures of the blood plasma based on convolutional neural network.....	55
<b>Shemarulin I.A., Karpychev V.Y.</b> Recognition of road signs on the basis of color contours.	60
<b>ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES.....</b>	<b>67</b>
<b>Basov A.A., Kainova A.V., Kuzma M.M., Sybarev M.A., Mineev I.V., Khudyakov I.S., Yashina A.N.</b> Modelling of a quantum oscillator task.....	67
<b>Gordeev B. A., Okhulkov S. N., Plekhov A. S., Titov D.Yu.</b> Beats occurring at unstable synchronization of the two engines mounted on a common viscoelastic base.....	75
<b>Korobko G.I., Lebedev V.V., Akhlestin P.V.</b> Distortion compensation voltage in ship networks when powered ship responsible consumers.....	86
<b>Panfilov S.Y., Chivenkov A.I., Panfilov I.S., Vikhorev N.N.</b> Requirements for the parameters of electromagnetic components dc converters.....	94
<b>Khorkov S.V.</b> The deviation from the linear current flow in an ordered two-dimensional environment.....	101
	107
<b>MECHANICAL AND TRANSPORT: THEORY, TECHNOLOGY, PRODUCTION.....</b>	
<b>Kozlov I.K., Trofimov A.S.</b> Research and optimization of the heating process resistance butt welding.....	107
<b>Kondratieva L.Y.</b> Determination of the main characteristics for patrol swath at the early design stages.....	115
<b>Kostrova Z.A., Miheev A.V., Zeziulin D.V., Makarov V.S., Kolotilin E.V., Bushueva M.E., Belyakov V.V.</b> Evolution of the wheel.....	121
<b>Kostrova Z.A., Miheev A.V., Zeziulin D.V., Makarov V.S., Kolotilin E.V., Bushueva M.E., Belyakov V.V.</b> Historical engineering change of the wheel as a prop – tractive system	136

of elements of a vehicles mover in the aspect of using materials.....	
<b>Lomakin V.V., Shabanov A.A.</b> Selection criteria of the main parameters of hybrid cars powertrain in the design.....	151
<b>Nagornykh S. N., Nagornykh E. V.</b> Random component of the speed of rotation of the shaft internal combustion engine with the spark plugs.....	158
<b>Pavlov A.C., Vanushkin N.M.</b> Multilayer weld formation with directional gas jet by welding in the slotted edge preparation.....	162

# ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

УДК 537.86

Н.В. Асеева, Л.Г. Бляхман, Е.М. Громов, И.В. Оносова, В.В. Тютин

## СОЛИТОНЫ В РАСШИРЕННОМ НЕЛИНЕЙНОМ УРАВНЕНИИ ШРЕДИНГЕРА С ПСЕВДОРАМАНОВСКИМ РАССЕЙЯНИЕМ И НЕЛИНЕЙНОЙ ДИСПЕРСИЕЙ

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,  
(Нижний Новгород)

**Цель работы:** Рассмотрена динамика солитонов в рамках расширенного нелинейного уравнения Шредингера, учитывающего псевдорамановское рассеяние (рассеяние на затухание низкочастотных волнах), нелинейную дисперсию и пространственную неоднородность дисперсии второго порядка.

**Результат:** Показано, что при наличии нелинейной дисперсии сдвиг вниз спектра волновых чисел солитона, вызванный псевдорамановским рассеянием, может быть компенсирован сдвигом спектра вверх, вызванным пространственным уменьшением дисперсии второго порядка. Равновесное состояние является устойчивым при отрицательной величине нелинейной дисперсии и неустойчивым - при положительной. Корректность полученных аналитически решений подтверждается результатами численного счета.

**Научный подход:** Исследование проведено как численно, так и аналитически.

**Новизна:** Результаты исследования новые и могут иметь приложение для исследования и описания динамики интенсивных нелинейных волновых пакетов в плазме или в оптических волоконных линиях связи.

*Ключевые слова:* нелинейное уравнение шредингера третьего порядка, солитон, вынужденное рассеяние, неоднородность, дисперсия второго порядка, нелинейная дисперсия, численный эксперимент.

Существенный интерес к динамике солитонов в настоящее время обусловлен их способностью преодолевать большие расстояния, сохраняя форму и перенося энергию и информацию. Солитонные решения имеют отношение к нелинейным моделям в самых различных областях физики, которые имеют дело с распространением интенсивных волновых полей в диспергирующих средах: оптических импульсов и волновых пучков в пространственных волноводах, электромагнитных волн в плазме, поверхностных волн на глубокой воде и т.д. [1-7]. Также существенный интерес солитоны вызывают в плазмоне [8-10].

Динамика протяженных высокочастотных (ВЧ) волновых пакетов вполне корректно описывается вторым порядком нелинейной теории дисперсионных волн. Основным уравнением этой теории является нелинейное уравнение Шредингера (НУШ) [11, 12], которое учитывает дисперсию второго порядка и кубическую нелинейность. Солитонные решения в этом случае существуют в результате баланса между дисперсионным расплыванием и нелинейным сжатием волнового пакета, в том числе, в [4, 13] были найдены затухающие солитоны НУШ, учитывающего линейные потери ВЧ волн и убывающую в пространстве дисперсию второго порядка.

Динамика интенсивных коротких ВЧ волновых пакетов описывается уже в третьем порядке теории дисперсии нелинейных волн [1], где во внимание принимаются нелинейная дисперсия [14], вынужденное рассеяние Рамана [15-17] и линейная дисперсия третьего порядка. Основным модельным уравнением в этом порядке теории является расширенное нелинейное уравнение Шредингера третьего порядка (НУШ-3) [17-21]. Солитонные решения в рамках расширенного НУШ при учете дисперсии третьего порядка и нелинейной дисперсии

получены в [22-29]. В [30, 31] найдены стационарные волны перепада в рамках расширенного НУШ при учете вынужденного рассеяния и нелинейности дисперсии. Данное решение существует как результат равновесия между нелинейной дисперсией и вынужденным рассеянием. Для локализованных волновых пакетов и солитонов вынужденное рассеяние приводит к сдвигу вниз спектра пакета [15-17] и, соответственно, к распаду импульса. В работе [32] было предложено использование баланса между вынужденным рассеянием и периодическим внешним усилением в протяженных звеньях линии связи. Компенсация рассеяния линейным излучением из центра солитона рассматривалась в [33]. Компенсация вынужденного рассеяния в неоднородных средах рассматривалась в нескольких случаях: в случае периодической дисперсии второго порядка [34, 35], в случае сдвига точки нулевой дисперсии второго порядка [36] и в оптических волокнах с убывающей дисперсией [37].

Интенсивные короткие импульсы ВЧ электромагнитных или ленгмюровских волн, а также поверхностных ВЧ волн на глубокой воде испытывают заметное рассеяние на низкочастотных (НЧ) волнах, вследствие эффекта вязкости. НЧ модами являются ионно-звуковые волны в плазме или внутренние волны в стратифицированной воде. Первая модель, учитывающая рассеяние при взаимодействии с НЧ волнами, построена в [38,39]. В рамках этой модели возникает расширенное НУШ с пространственным аналогом вынужденного рассеяния Рамана, называемым псевдорамановское вынужденное рассеяние.

Это уравнение было выведено из системы двух уравнений захаровского типа [40] для описания связи Ленгмюровских и ионно - звуковых волн в плазме. Вынужденное псевдорамановское рассеяние приводит к сдвигу собственного волнового числа солитона вниз по спектру, аналогично сдвигу собственной частоты при классическом рассеянии Рамана во временном представлении [1, 14-17] и, соответственно, к распаду солитона.

Модельное уравнение, использованное в [38, 39], так же включает плавное пространственное уменьшение дисперсии второго порядка, которое приводит к сдвигу по спектру вверх собственного волнового числа солитона, в результате которого возможна компенсация эффекта вынужденного рассеяния. Равновесие между псевдорамановским рассеянием и убывающей неоднородной дисперсией второго порядка приводит к стабилизации спектра собственных чисел солитона. К настоящему времени рассматривалась динамика солитонов и волновых пакетов в присутствии псевдорамановского рассеяния, но в отсутствие нелинейной дисперсии и дисперсии третьего порядка.

В данной статье рассматривается динамика солитона в рамках расширенного НУШ, с учетом псевдорамановского рассеяния, уменьшающейся вдоль направления распространения солитона дисперсии второго порядка и с учетом нелинейной дисперсии. Показано, что состояние равновесия между псевдорамановским рассеянием и уменьшающейся дисперсией второго порядка является в смысле существования солитона устойчивым (состояние равновесия типа фокус) для отрицательной нелинейной дисперсии и неустойчивым - для положительной нелинейной дисперсии.

### Модельное уравнение и его интегралы

Рассмотрим динамику ВЧ волнового поля  $U(\xi, t)\exp(-i\omega t + ik\xi)$  в рамках расширенного НУШ, учитывающего псевдо-рамановское рассеяние, нелинейную дисперсию и неоднородную дисперсию второго порядка:

$$2i \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \xi} \left[ q(\xi) \frac{\partial U}{\partial \xi} \right] + 2U|U|^2 + 2i\beta \frac{\partial(U|U|^2)}{\partial \xi} + \mu U \frac{\partial(|U|^2)}{\partial \xi} = 0, \quad (1)$$

где  $q(\xi)$  - коэффициент неоднородной дисперсии второго порядка;  $\beta$  - коэффициент нелинейной дисперсии;  $\mu$  - коэффициент псевдо-рамановского вынужденного рассеяния.

Уравнение (1) при нулевых условиях на бесконечности  $U|_{\xi \rightarrow \pm\infty} \rightarrow 0$  имеет следующие интегралы:

$$\frac{dN}{dt} \equiv \frac{d}{dt} \int_{-\infty}^{+\infty} |U|^2 d\xi = 0, \quad (2)$$

$$2 \frac{d}{dt} \int_{-\infty}^{+\infty} K |U|^2 d\xi = -\mu \int_{-\infty}^{+\infty} \left[ \frac{\partial(|U|^2)}{\partial \xi} \right]^2 d\xi - \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dq}{d\xi} \left| \frac{\partial U}{\partial \xi} \right|^2 d\xi, \quad (3)$$

$$N \frac{d\bar{\xi}}{dt} \equiv \frac{d}{dt} \int_{-\infty}^{+\infty} \xi |U|^2 d\xi = \int_{-\infty}^{+\infty} q K |U|^2 d\xi + \frac{3}{2} \beta \int_{-\infty}^{+\infty} |U|^4 d\xi, \quad (4)$$

где  $U \equiv |U| \exp(i\phi)$ ,  $K \equiv \partial\phi / \partial\xi$  - локальное волновое число волнового пакета.

### Аналитические результаты

При анализе системы (2)-(4) будем считать, что масштаб неоднородности линейной дисперсии много больше характерного масштаба огибающей волнового пакета  $D \gg D_{|U|}$ , используем адиабатическое приближение и представим солитон в sech-like виде

$$U(\xi, t) = A(t) \operatorname{sech} \left[ \frac{\xi - \bar{\xi}}{\Delta(t)} \right] \exp \left[ i \int K(\xi, t) d\xi - \frac{i}{2} \int A^2(t) dt \right], \quad (5a)$$

$$K(\xi, t) = k(t) - \frac{3}{2} \frac{\beta A(t)}{q(\bar{\xi})} \operatorname{sech}^2 \left[ \frac{\xi - \bar{\xi}}{\Delta(t)} \right], \quad (5b)$$

где  $\Delta(t) \equiv \sqrt{q(\bar{\xi})} / A(t)$  и выполняется условие  $A^2(t)\Delta(t) = \text{const}$ . Решение (5) имеет два свободных параметра:  $k(t)$  - волновое число и  $\bar{\xi}$  - координата центра масс солитона. При учете (5) система (2)-(4) сводится к системе уравнений:

$$2 \frac{dk}{dt} = -\frac{8q_0^2 A_0^4 \mu}{15q^3(\bar{\xi})} - \frac{q_0 A_0^2 q'(\bar{\xi})}{3q^2(\bar{\xi})} - \frac{2\beta A_0^2 q'(\bar{\xi}) k}{q^2(\bar{\xi})} - q'(\bar{\xi}) k^2, \quad \frac{d\bar{\xi}}{dt} = q(\bar{\xi}) k, \quad (6)$$

где  $q_0 = q(0)$ ,  $A_0 = A(0)$ ,  $q'(\bar{\xi}) = (dq/d\xi)_{\bar{\xi}}$ . Система (6) имеет состояние равновесия (СР)  $8q_0 A_0^2 \mu = -5q'(\bar{\xi}_*) q(\bar{\xi}_*)$ ,  $k_* = 0$ . В частности, при

$$\mu = \mu_* \equiv -5q'(0)/(8A_0^2). \quad (7)$$

СР соответствует исходным параметрам солитона:  $\bar{\xi} = 0$ ,  $k = 0$ . При  $\mu \neq \mu_*$  параметры солитона являются переменными во времени. Для анализа поведения параметров солитона в окрестности СР будем считать дисперсию второго порядка линейно убывающей,  $q' = \text{const} < 0$  и введем новые переменные  $\tau \equiv -tq'A_0/\sqrt{3q_0}$ ,  $y \equiv k\sqrt{3q_0}/A_0$  и  $n = q(\bar{\xi})/q_0$ . Тогда система (6) сводится к виду

$$2 \frac{dy}{d\tau} = -\frac{\lambda}{n^3} + \frac{1}{n^2} + y^2 + \delta \frac{y}{n^2}, \quad \frac{dn}{d\tau} = -ny, \quad (8)$$

где  $\lambda \equiv -8\mu A_0^2/(5q') \equiv \mu/\mu_*$ ,  $\delta \equiv 2\sqrt{3}\beta A_0/\sqrt{q_0^3}$ . СР уравнения (8) в новых переменных имеет вид  $y_* = 0, n_* = \lambda$ . При  $I \equiv -\lambda\delta > 0$  СР - устойчивый фокус, при  $I = 0$  СР - центр, при  $I < 0$  СР - неустойчивый фокус. Траектории уравнения (8) на плоскости  $(y, n)$ , полученные при начальных условиях  $y_0 = 0, n_0 \equiv 1$  и при  $\lambda = 5/4$  показаны на рис. 1 при различных значениях величины  $I$ . В случае  $\mu = \mu_* \equiv 5q'/(8A_0^2)$ , соответствующем  $\lambda = 1$ , СР совпадает с исходными параметрами солитона  $n_0 \equiv 1, y_0 = 0$ . В этом случае параметры солитона во времени остаются неизменными.

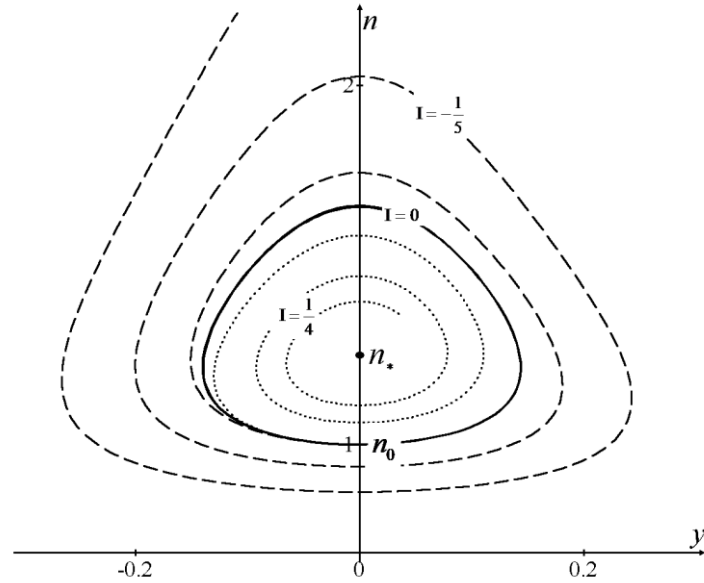


Рис. 1. Траектории (8) на плоскости  $(y, n)$  при  $\lambda = 5/4$ ,  $y_0 = 0, n_0 \equiv 1$  и различных значениях  $I$

### Результаты численного эксперимента

Численно решена задача эволюции во времени исходно заданного волнового пакета  $U(\xi, t=0) = \exp[i\phi(\xi)]\text{sech}\xi$  с пространственным распределением фазы  $\phi(\xi) = -(3/2)\beta \tanh \xi$ , соответствующим волновому числу  $K(\xi) = d\phi/d\xi \equiv -(3/2)\beta \text{sech}^2 \xi$ , в рамках уравнения (1) при  $q(\xi) = 1 - \xi/10$  и при различных величинах  $\mu$  и  $\beta$ . Аналитически предсказанное соответствующее равновесное значение параметра псевдорамановского рассеяния из (8) равно  $\mu_* = 1/16$ . Непосредственно в численном счете при  $\mu = \mu_*$  и  $I = -2\sqrt{3}\beta \equiv -2\sqrt{3}(\mu/\mu_*)\beta \geq 0$ , исходный импульс эволюционирует к стационарному локализованному пакету (рис. 2, а). При  $I < 0$  исходный импульс является неустойчивым во времени (рис. 2, б).

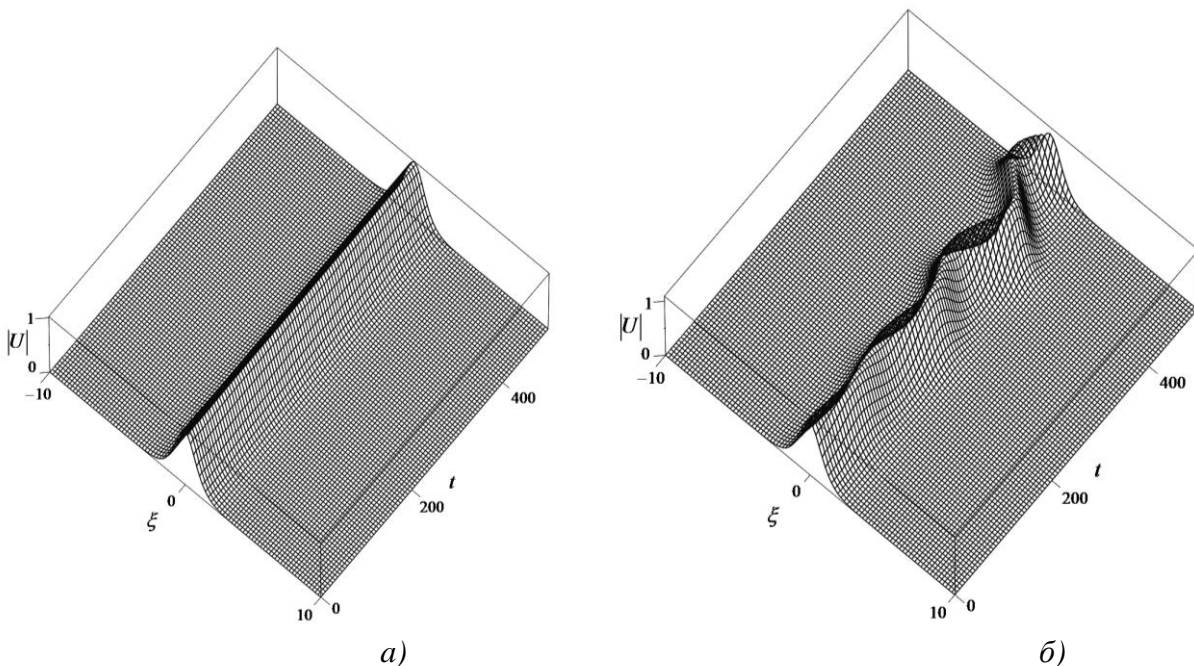


Рис. 2. Результаты численного счета. Распределение  $|U(\xi, t)|$  при  $\mu = 1/16 \equiv \mu_*$  и различных величинах  $I = -2\sqrt{3}\beta \equiv -2\sqrt{3}(\mu/\mu_*)\beta$ : а -  $I \geq 0$ ; б -  $I < 0$



Отличие параметра  $\mu$  от равновесного вызывает изменение во времени параметров солитона (волнового числа и амплитуды). Соответствующее пространственное распределение  $|U|$  в различные моменты времени показано на рис. 3 при  $\mu = 5/64 \equiv (5/4)\mu_*$  и различных значениях  $I = -5\sqrt{3}\beta/2 \equiv -2\sqrt{3}(\mu/\mu_*)\beta$ . При  $I > 0$  импульс асимптотически стремится к равновесному состоянию; при  $I = 0$  параметры импульса меняются периодически с постоянным размахом, т.е. имеет место динамическое равновесие, при  $I < 0$  импульс неустойчиво расплывается при квазипериодическом изменении параметров.

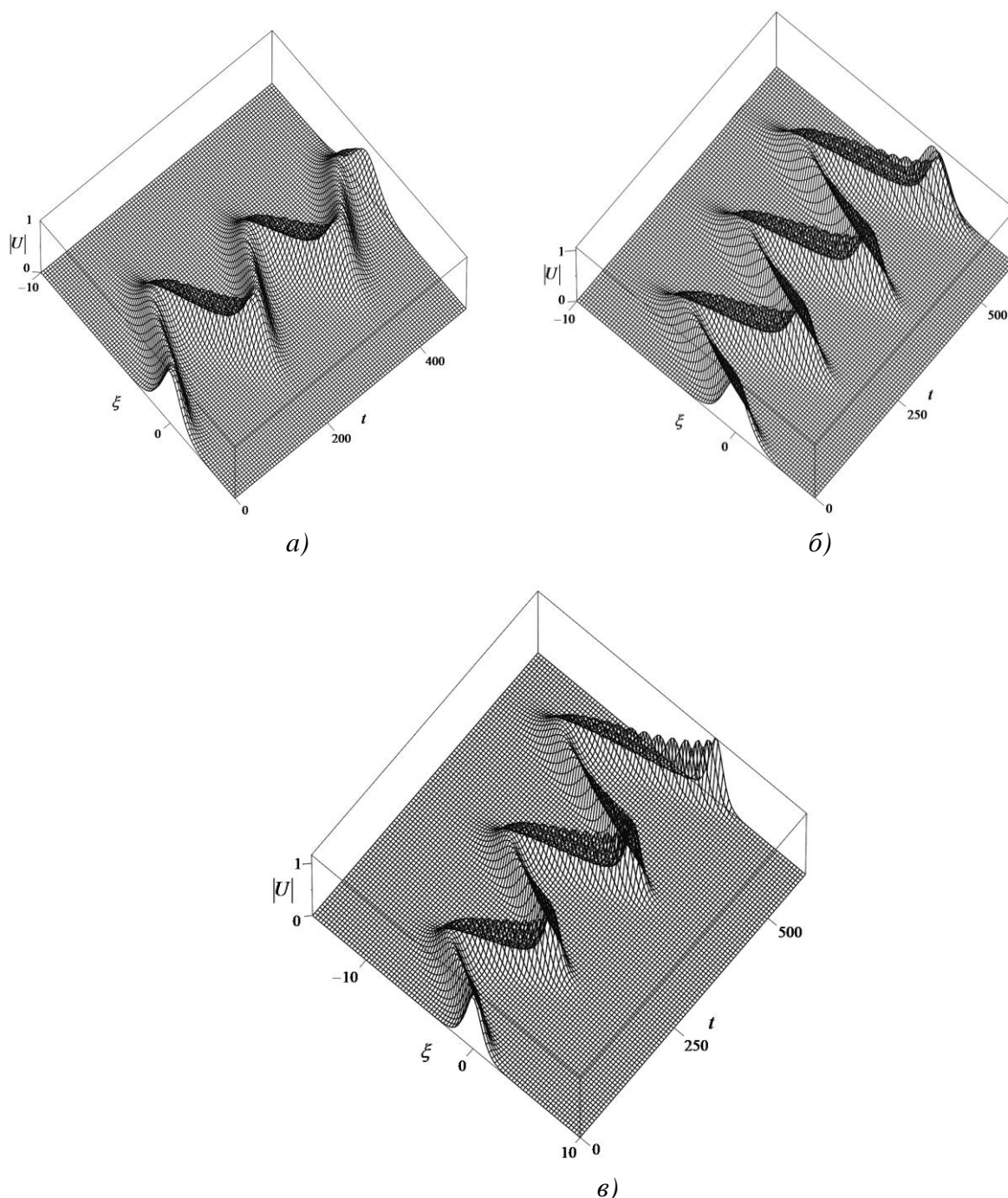
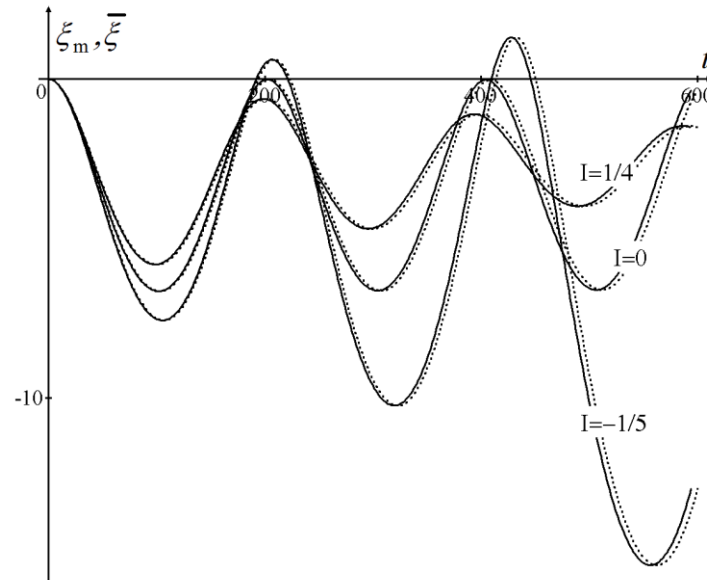


Рис. 3. Результаты численного счета. Распределение  $|U(\xi, t)|$  при  $\mu = 5/64 \equiv (5/4)\mu_*$  и различных величинах  $I = -5\sqrt{3}\beta/2 \equiv -2\sqrt{3}(\mu/\mu_*)\beta$ : а –  $I > 0$ ; б –  $I = 0$ ; в –  $I < 0$

Эта же связь устойчивости солитоноподобного импульса с величиной параметра  $I$  отражена на рис. 4. Здесь показана полученная в результате численного счета зависимость от времени координаты точки максимума модуля огибающей волнового пакета  $\xi_m$  ( $\max|U(\xi, t)| = |U(\xi_m, t)|$ ). Там же приведена для сравнения полученная аналитически координата центра масс волнового пакета  $\bar{\xi} \equiv q_0(n-1)/q'$ , полученная из (6) при  $\mu = 5/64 \equiv (5/4)\mu_*$  и различных величинах  $I = -5\sqrt{3}\beta/2 \equiv -2\sqrt{3}(\mu/\mu_*)\beta$ .



**Рис. 4.** Полученная численно (непрерывная кривая) координата максимума модуля огибающей волнового пакета  $\xi_m$  и полученная аналитически (прерывистая кривая) координата центра масс волнового пакета  $\bar{\xi}$ , в зависимости от времени, при  $\mu = 5/64 \equiv (5/4)\mu_*$  и различных величинах  $I$

Очевидна близость результатов численного эксперимента и результатов, полученных аналитически. Аналогично близки и полученные численно и аналитически величины волнового числа волнового пакета, меняющиеся во времени. И такая близость результатов наблюдается и при прочих величинах параметров  $\mu$  и  $I$ , что подтверждает корректность проведенного аналитического исследования.

### Выводы

В данной работе исследована динамика солитонов в рамках расширенного неоднородного нелинейного уравнения Шредингера, учитывающего эффекты псевдо-рамановского вынужденного рассеяния, линейно убывающей дисперсии второго порядка и нелинейной дисперсии. Результаты были получены аналитически, на основе эволюционных уравнений для интегральных моментов поля. Корректность полученных результатов была доказана в численном эксперименте. Показано, что устойчивые стационарные солитоны существуют за счет баланса между сдвигом вниз по спектру собственного волнового числа солитона, вызванного псевдо-рамановским рассеянием, и сдвигом волнового числа вверх по спектру, вызванного уменьшающейся неоднородной дисперсией второго порядка при отрицательной нелинейной дисперсии. При положительной нелинейной дисперсии солитоноподобные импульсы являются неустойчивыми.

Данная работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (проект РФФИ № 15-02-01919 а).

## Библиографический список

1. E. Infeld, G. Rowlands, *Nonlinear Waves, Solitons, and Chaos*, Cambridge University Press, Cambridge, 2000.
2. G.P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optic*, Academic Press, San Diego, 2001.
3. Y. Yang, *Solitons in Field Theory and Nonlinear Analysis*, Springer, New York, 2001.
4. Y.S. Kivshar and G.P. Agrawal, *Optical Solitons: From Fibers to Photonic Crystals*, Academic, San Diego, 2003.
5. L.A. Dickey, *Soliton Equation and Hamiltonian Systems*, World Scientific, New York, 2005.
6. B.A. Malomed, *Soliton Management in Periodic Systems*, Springer, New York, 2006.
7. T. Dauxois and M. Peyrard, *Physics of Solitons*, Cambridge University Press, Cambridge, 2006.
8. M. Sich, D.N. Krizhanovskii, M.S. Skolnick, A.V. Gorbach, R. Hartley, D.V. Skryabin, E.A. Cerda-Méndez, K. Biermann, R. Hey, and P.V. Santos, Observation of bright solitons in a semiconductor microcavity, *Nature Phot.* **6** (2012) 50-55.
9. M. Kauranen and A.V. Zayats, Nonlinear plasmonics, *Nature Phot.* **6** (2012) 737-748.
10. E. A. Cerda-Ménde, D. Sarkar, D. N. Krizhanovskii, S. S. Gavrilov, K. Biermann, M. S. Skolnick, and P.V. Santos, Exciton-Polariton Gap Solitons in Two-Dimensional Lattices, *Phys. Rev. Lett.* **111** (2013) 146401.
11. V.E. Zakharov, A.B. Shabat, Exact theory of two-dimensional self-focusing and one-dimensional self-modulation of waves in nonlinear media, *Sov. Phys. JETP.* **34** (1972) 62-69.
12. A. Hasegawa, F. Tappert, Transmission of stationary nonlinear optical physics in dispersive dielectric fibers I: anomalous dispersion, *Appl. Phys. Lett.* **23** (1973) 142-144.
13. Tajima K. Compensation of soliton broadening in nonlinear optical fibers with loss, *Opt. Lett.* **12** (1987) 54-56.
14. J.R. Oliveira, M.A. Moura, Analytical Solution for the Modified Nonlinear Schrödinger Equation Describing Optical Shock Formation, *Phys. Rev. E* **57** (1998) 4751-4755.
15. F.M. Mitschke, L.F. Mollenauer, Discovery of the soliton self-frequency shift, *Opt. Lett.* **11** (1986) 659-661.
16. J.P. Gordon, Theory of the soliton self-frequency shift, *Opt. Lett.* **11** (1986) 662-664.
17. Y. Kodama, Optical solitons in a monomode fiber, *J. Stat. Phys.* **39** (1985) 597-614.
18. Y. Kodama and A. Hasegawa, Nonlinear pulse propagation in a monomode dielectric guide, *IEEE J. Quant. Electron.* **23** (1987) 510-524.
19. C.E. Zaspel, Optical solitary wave and shock solutions of the higher order nonlinear Schrödinger equation, *Phys. Rev. Lett.* **82** (1999) 723-726.
20. B. Hong, D. Lu, New Jacobi functions solitons for the higher-order nonlinear Schrödinger equation, *Intern. J. Nonlin. Science* **7** (2009) 360-367.
21. V.I. Karpman, The extended third-order nonlinear Schrödinger equation and Galilean transformation, *The European Physical Journal B* **39** (2004) 341-350.
22. E.M. Gromov, V.I. Talanov, Nonlinear dynamics of short wave trains in dispersive media, *JETP* **83** (1996) 73-79.
23. E.M. Gromov, V.I. Talanov, Short optical solitons in fibers, *Chaos* **10** (2000) 551-558.
24. E.M. Gromov, L.V. Piskunova, V.V. Tyutin, Dynamics of wave packets in the frame of third-order nonlinear Schrödinger equation, *Phys. Lett. A* **256** (1999) 153-158.
25. M.A. Obregon, Yu.A. Stepanyants, Oblique magneto-acoustic solitons in a rotating plasma, *Phys. Lett. A* **249** (1998) 315-323.
26. M. Scalora, M. Syrchin, N. Akozbek, E.Y. Poliakov, G. D'Aguanno, N. Mattiucci, M.J. Bloemer, A.M. Zheltikov, Generalized nonlinear Schrödinger equation for dispersive susceptibility and permeability: application to negative index materials, *Phys. Rev. Lett.* **95** (2005) 013902.
27. S.C. Wen, Y. Wang, W. Su, Y. Xiang, X. Fu, D. Fan, Modulation instability in nonlinear negative-index material, *Phys. Rev. E* **73** (2006) 036617.
28. M. Marklund, P.K. Shukla, L. Stenflo, Ultrashort solitons and kinetic effects in nonlinear metamaterials, *Phys. Rev. E* **73** (2006) 037601.

29. N.L. Tsitsas, N., Rompotis I. Kourakis, P.G. Kevrekidis and D.J. Frantzeskakis, Higher-order effects and ultrashort solitons in left-handed metamaterials, *Phys. Rev. E* **79** (2009) 037601.
30. Y.S. Kivshar, Dark-soliton dynamics and shock waves induced by the stimulated Raman effect in optical fibers, *Phys. Rev. A* **42** (1990) 1757-1761.
31. Y.S. Kivshar, B.A. Malomed, Raman-induced optical shocks in nonlinear fibers, *Opt. Lett.* **18** (1993) 485-487.
32. B.A. Malomed, R.S. Tasgal, Matching intrapulse self-frequency shift to sliding-frequency filters for transmission of narrow solitons, *JOSA B* **15** (1998) 162-170.
33. F. Biancalama, D.V. Skrybin, A.V. Yulin, Theory of the soliton self-frequency shift compensation by the resonant radiation in photonic crystal fibers, *Phys. Rev. E* **70** (2004) 011615.
34. R.-J. Essiambre, G.P. Agrawal, Timing jitter of ultra short solitons in high-speed communication systems. I. General formulation and application to dispersion-decreasing fibers, *JOSA B* **14** (1997) 314-322.
35. R.-J. Essiambre, G.P. Agrawal, Timing jitter of ultra short solitons in high-speed communication systems. II. Control of jitter by periodic optical phase conjugation, *JOSA B* **14** (1997) 323-330.
36. A. Andrianov, S. Muraviev, A. Kim, A. Sysoliatin, DDF-based all-fiber optical source of femto-second pulses smoothly tuned in the telecommunication Range, *Laser Phys.* **17** (2007) 1296-1302.
37. S. Chernikov, E. Dianov, D. Richardson, D. Payne, Soliton pulse compression in dispersion-decreasing fiber, *Opt. Lett.* **18** (1993) 476-478.
38. E.M. Gromov and B.A. Malomed, Soliton dynamics in an extended nonlinear Schrödinger equation with a spatial counterpart of the stimulated Raman scattering, *J. Plasma Phys.* **79** (2013) 1057-1062.
39. E.M. Gromov and B.A. Malomed, Damped solitons in an extended nonlinear Schrödinger equation with a spatial stimulated Raman scattering and decreasing dispersion, *Opt. Comm.* **320** (2014) 88-93.
40. V.E. Zakharov, Collapse of Langmuir waves, *Sov. Phys. JETP* **35** (1972) 908-914.

*Дата поступления  
в редакцию 25.04.2016*

**N.V. Aseeva, L.G. Blyahman, E.M. Gromov, I.V. Onosova, V.V. Tyutin**

## **SOLITONS IN AN EXTENDED NONLINEAR SCHRÖDINGER EQUATION WITH THE PSEUDO-RAMAN SCATTERING AND NONLINEAR DISPERSION**

National Research University Higher School of Economics ( Nizhny Novgorod)

**Purpose:** Evolution of solitons is addressed in the framework of a third-order nonlinear Schrödinger equation (NLSE), including nonlinear dispersion and a pseudo-stimulated-Raman-scattering (pseudo-SRS) term, i.e., a spatial-domain counterpart of the SRS term which is well known as a part of the temporal-domain NLSE in optics. In this context, it is induced by the underlying interaction of the high-frequency envelope wave with a damped low-frequency wave mode. Also spatial inhomogeneity of the second-order dispersion (SOD) is assumed.

**Approach:** The investigation was considered as analytically as numerically.

**Findings:** As a result it is shown that the wavenumber downshift of solitons, caused by the pseudo-SRS, can be compensated with the upshift provided by decreasing SOD coefficients. The soliton is stable in negative nonlinear dispersion case and unstable in positive one. Analytical results and numerical results are in a good agreement.

*Key words:* Third-Order Nonlinear Schrödinger Equation, Soliton, Stimulated Scattering, Inhomogeneous Second-Order Dispersion, Nonlinear Dispersion.

УДК 004.75

А.В. Аристов, В.П. Зеленский

## ИНТЕРОПЕРАБЕЛЬНОСТЬ ДИАЛОГОВЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ В СЕТЕВОМ ОКРУЖЕНИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Предложена модель описания интерфейсов приложений, которая может быть использована при построении комплексных диалоговых систем, обладающих свойством интероперабельности своих компонент.

*Ключевые слова:* гетерогенная среда, семантическая интероперабельность, модели, гипервизор, виртуализация.

При создании информационных систем с повышенными требованиями к свойствам открытости часто возникает проблема включения программных компонент с низким коэффициентом семантической интероперабельности [1]. В работах [2, 3] описаны подходы к повышению способности компонент к взаимодействию с внешним окружением. Отмечается, что, несмотря на дорогостоящие проекты, компаниями IBM, Microsoft, Oracle, SAP и др. цели эффективной семантической интероперабельности не были достигнуты. Одним из перспективных направлений является интероперабельность межсистемных сообщений. В этом случае информационная система может быть рассмотрена с точки зрения совокупности интерфейсов взаимодействия с внешним программным обеспечением, программно-аппаратной платформой и пользователями. Передачу данных и управляющих сигналов программам выполняет в конечном итоге операционная система.

**Постановка задачи.** Рассмотрим систему, состоящую из некоторого множества вычислительных узлов, функционирующих под управлением различных программно-аппаратных платформ. На каждом узле выполняются информационные системы со своим набором интерфейсов.

Требуется разработать технологию построения среды поддержки семантической интероперабельности, которая обладает механизмами включения новых программно-аппаратных комплексов и построения на их основе сервис-ориентированных диалоговых систем. В круг задач входит разработка форматов хранения информации об интерфейсах приложений, включая пользовательский интерфейс, и о доступных функциях системы.

### Информационное обеспечение и потоки сообщений в системе

На рис. 1 представлена схема передачи управляющих сигналов и данных между компонентами среды поддержки семантической интероперабельности.

В состав среды входит четыре подсистемы:

- клиент,
- сервер адресов, на котором располагаются сведения о существующих информационных системах,
- сервер ресурса,
- ресурс, отдельная информационная система с поддержкой CLI.

На узлах хранится информация о поддерживаемых интерфейсах и функциях, которые доступны через этот интерфейс. На специально выделенном сервере адресов хранится информация о существующих в системе приложениях с указанием адреса узла. Запрос к системе выполняется с удаленного клиентского приложения, например, Web-браузера. Предварительно запрашиваются сведения о доступных приложениях или отдельных сервисах, построенных на базе приложений. Клиенту передается список приложений и сервисов. Идентифи-

кационные данные выбранного приложения или сервиса передаются содержащему их узлу. После установления соединения клиенту передается информация о доступных интерфейсах, строится пользовательский интерфейс. Далее клиент взаимодействует с сервером ресурса, который осуществляет прием кода запрашиваемого сервиса и входные данные, преобразует их в инструкции, интерпретируемые информационной системой, и инициирует выполнение этих инструкций. После обработки запроса, результат возвращается от ресурса к серверу, где он передается клиенту, в доступном для него формате.



Рис. 1. Схема передачи управляющих сигналов и данных

Клиент содержит список технологий, которые могут быть использованы для построения пользовательского интерфейса (карта UI), сервер адресов – идентификационные сведения узлов, на которых расположены ресурсы, а также список сервисов, доступных у ресурсов. Сервер ресурса включает описание интерфейсов ресурса и поддерживаемые ресурсом форматы запросов.

В рамках статьи рассматриваются системы с поддержкой интерфейса командной строки.

### Модель интерфейсов CLI информационной системы

Были проанализированы CLI ряда программных систем, работающих под управлением ОС Windows и \*nix. Любая команда CLI может быть описана с помощью шаблона:

[символ\_начала\_команды]имя\_команды [параметр\_1 [параметр\_2 [...]]] (1)

Символ начала команды может быть самым разным, однако чаще всего для этой цели используется косая черта (/). Если строка вводится без этого символа, выполняется некоторая базовая команда. Если же такой базовой команды нет, символ начала команды отсутствует вообще (как, например, в DOS). Параметры команд могут быть представлены в самых разных форматах. В основном применяются следующие правила:

- параметры разделяются пробелами (и отделяются от названия команды пробелом);
- параметры, содержащие пробелы, обрамляются кавычками-апострофами (') или двойными кавычками (");

- если параметр используется для обозначения включения какой-либо опции, выключенной по умолчанию, он начинается с косой черты (/) или дефиса (-);
- если параметр указывает действие из группы действий, назначенных команде, он не начинается со специальных символов;
- если параметр указывает объект, к которому применяется действие команды, он не начинается со специальных символов;
- если параметр указывает дополнительный параметр какой-либо опции, то он имеет формат /опция:дополнительный\_параметр (вместо косой черты также может употребляться дефис).

Примеры приложений, предоставляющих CLI:

- САПР AutoCAD (<http://www.autodesk.ru>);
- система моделирования общего назначения GPSS World (<http://www.minutemansoftware.com>);
- свободный режимный текстовый редактор VIM (<http://www.vim.org/>).

Предлагается описание формата представления CLI приложения с помощью XSD [4], так как, в отличие от большинства языков описания XSD, был разработан для использования в создании программного обеспечения для обработки документов XML, а также:

- обладает мощными средствами для определения сложных структур данных;
- обеспечивает понятный способ описания грамматики языка;
- способен легко модернизироваться и расширяться.

XML-описание входящего сообщения состоит из общего описания формата и описания команды.

```
<xs:element name="inMessage">
  <xs:complexType>
    <xs:element name="command" type="command" minOccurs="1" use="required"/>
    <xs:attribute name="number" type="xs:string"/>
    <xs:attribute name="service" type="xs:string"/>
    <xs:complexType>
  </xs:element>
```

Тег command является контейнером для описания команд, подаваемых на вход CLI.

```
<xs:complexType name="command">
  <xs:sequence>
    <xs:element name="startSymbol" type="startSymbol" minOccurs="0" maxOccurs="1"/>
    <xs:element name="comName" type="tName" use="required" minOccurs="1"
maxOccurs="1"/>
    <xs:element name="comParams" type="comParams" minOccurs="0"
maxOccurs="unbounded"/>
  </xs:sequence>
</xs:ComplexType>
```

Тег startSymbol служит для описания символа начала команды, если в этом есть необходимость.

```
<xs:simpleType name="startSymbol">
  <xs:restriction base="xs:string">
    <xs:enumeration value="/" />
    <xs:enumeration value="-" />
    <xs:enumeration value=":" />
    <xs:whiteSpace value="collapse" />
  </xs:restriction>
</xs:simpleType>
```

Тег comName определяет имя команды.

```
<xs:simpleType name="tName">
```

```

<xs:restriction base="xs:string">
  <xs:whiteSpace value="collapse"/>
  <xs:pattern value="([a-zA-Z])*"/>
</xs:restriction>
</xs:simpleType>

```

Тег comParams является контейнером описаний параметров команды.

```

<xs:complexType name="comParams">
  <xs:sequence>
    <xs:element name="pSeparator" type="pSeparator" use="required" maxOccurs="1"/>
    <xs:element name="paramKey" type="pKey" minOccurs="0" maxOccurs="1"/>
    <xs:element name="pName" type="tName" maxOccurs="1"/>
    <xs:element name="addParam" type="addParam" minOccurs="0" maxOccurs="1"/>
    <xs:element name="pSeparator" type="pSeparator" minOccurs="0" maxOccurs="1"/>
    <xs:element name="pValue" type="xs:string" minOccurs="0" maxOccurs="1"/>
  </xs:sequence>
</xs:complexType>

```

Тег pSeparator описывает разделитель параметров.

```

<xs:simpleType name="pSeparator">
  <xs:restriction base="xs:string">
    <xs:enumeration value=" "/>
    <xs:enumeration value="_"/>
  </xs:restriction>
</xs:simpleType>

```

Тег paramKey описывает элемент включения/выключения опции.

```

<xs:simpleType name="pKey">
  <xs:restriction base="xs:string">
    <xs:enumeration value=" "/>
    <xs:enumeration value="-"/>
  </xs:restriction>
</xs:simpleType>

```

Тег addParam описывает дополнительные параметры в случае их наличия.

```

<xs:simpleType name="addParam">
  <xs:sequence>
    <xs:restriction base="xs:string">
      <xs:element name="colon" type="xs:string" use="required" fixed=":" maxOccurs="1"/>
      <xs:element name="addParName" type="tName" maxOccurs="1"/>
    </xs:restriction>
  </xs:sequence>
</xs:simpleType>

```

Далее представлен пример входящего CLI-сообщения, сформированного в соответствии с предлагаемым форматом и использующего механизм макроподстановок для передачи пользовательских данных.

```

<inMessage>
  <command>
  <startSymbol>@usSymbol</startSymbol>
  <comName>@usCom</comName>
  <comParams>
    <pSeparator >@usSep</pSeparator >
    <pName>@usPName</pName>
  </comParams>
</comParams>

```



```

<pSeparator >@usSep</pSeparator >
<pName>@usPName</pName>
<addParam>
    <colon>:</colon>
    <addParName>>@usAddPName </addParName>
</addParam>
<pValue>@usPValue</pValue>
</comParams>
</command>
</inMessage>

```

Исходящее CLI-сообщение рассматривается как совокупность некоторых текстовых данных.

```

<xs:element name="outMessage">
  <xs:annotation>
    <xs:documentation>OutMessage</xs:documentation>
  </xs:annotation>
  <xs:element name="data" type="xs:string"/>
</xs:element>

```

### Карта сервисов

Сервис представляет собой функцию, которая может быть запрошена у приложения. Для доступа к функции необходимо передать операционной системе, под управлением которой функционирует приложение, информацию о параметрах CLI для последующего ее выполнения. С клиентской системы передаются идентификатор запрашиваемого сервиса и пользовательские данные для обработки. Для каждого приложения подержится xml файл с информацией о доступных сервисах и шаблонах команд, именуемый далее картой сервисов. Шаблон команды включает наименование команд, список ключей, параметров, а также макроподстановок для пользовательских данных.

### Экспериментальная система

Разработана система управления диалоговыми программами, поддерживающими интерфейс командной строки. Схема системы приведена на рис. 2.

Для решения проблемы переносимости интерфейса пользователя использован механизм виртуализации. Суть его состоит в следующем. Для всех серверных информационных систем создается формальное описание интерфейса командной строки CLI и пользовательского интерфейса. Строится карта графического интерфейса пользователя, которая содержит информацию о дереве форм и элементах форм. Дополнительно формируется список доступных сервисов, которые могут быть запрошены пользователем. С каждым сервисом связываются интерфейсы CLI и подмножество элементов GUI, необходимые для взаимодействия с пользователем. По коду сервиса сервер определяет дерево и состав форм, формирует пользовательский интерфейс в javascript коде.

Для обеспечения переносимости пользовательского интерфейса были разработаны:

1. Формат описания интерфейсов (карта интерфейсов) подключаемой информационной системы.
2. Формат описания средств построения/воспроизведения UI клиентской платформы.
3. Формат описания функциональных сервисов (карта сервисов) произвольных информационных систем.

Клиентское приложение – это браузер, в котором формируется удаленный GUI на основе передаваемого с сервера javascript кода. Для повышения эффективности разработки и

обеспечения независимости от браузера была использована библиотека jquery. Сервер ресурсов включает группу php модулей, выполняющих следующие функции:

- прием запросов сервисов от клиентских систем в асинхронном режиме;
- формирование команд на основе поддерживаемых шаблонов инструкций CLI;
- передача команд конечным приложениям;
- прием результатов обработки;
- передача результатов клиентским системам.

Проведено тестирование системы для приложений GPSS World Student (платформа win32) и Midnight Commander (платформа Linux).

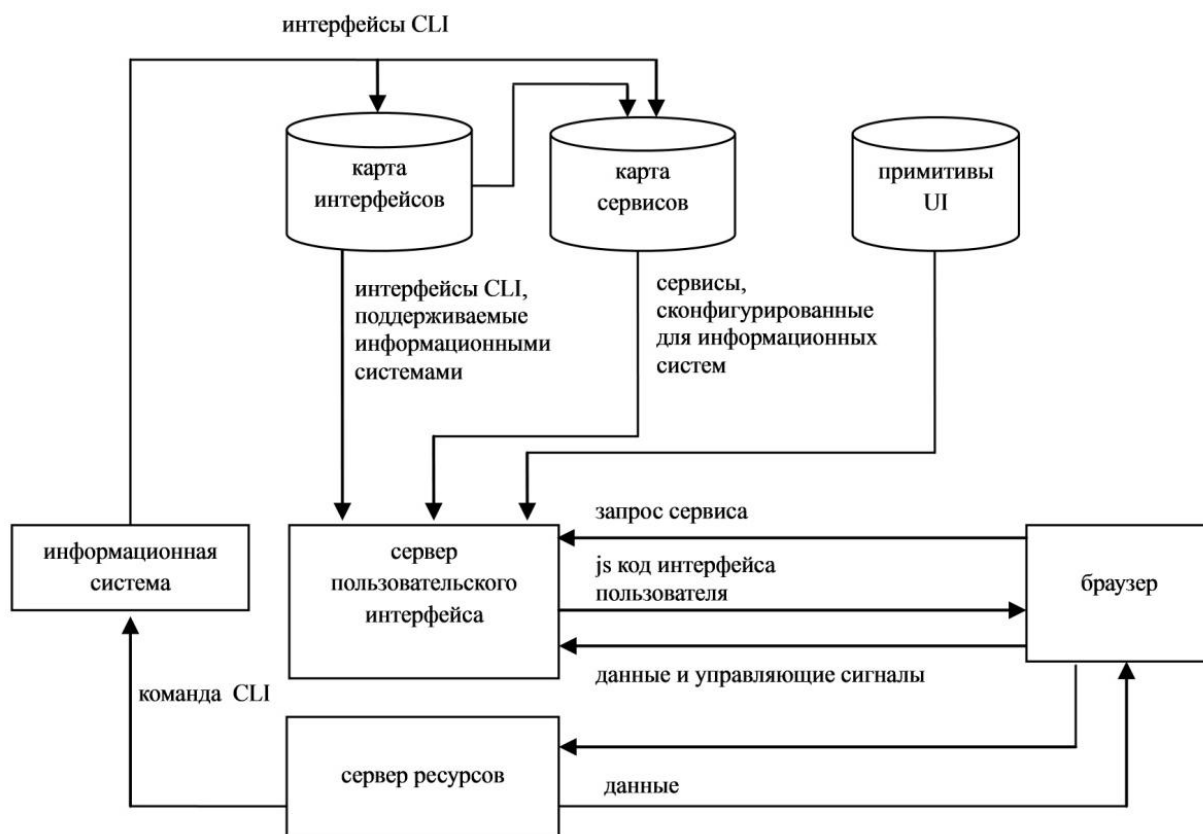


Рис. 2. Схема системы управления диалоговыми программами

### Выводы

Разработана архитектура среды, расширяемой по приложениям на основе разных API операционных систем, поддерживающим интерфейс командной строки. Для обеспечения независимости от программной платформы применялись гипервизоры. Предложен кросс-платформенный формат хранения шаблонов инструкций CLI, на основе которого построены механизмы взаимодействия клиентских систем и серверного программного обеспечения с CLI.

Методика может быть применена при создании систем с поддержкой семантической интероперабельности программных компонент, обладающих другими интерфейсами.

### Библиографический список

1. Батоврин, В.К. Способ количественной оценки интероперабельности / В.К. Батоврин, А.С. Королев // Информационные технологии и вычислительные системы. 2009. №. 5.
2. Бородакий, Ю.В. К проблеме обеспечения интероперабельности Ю.В. Бородакий, Ю.Г. Лободинский, Информационные технологии и вычислительные системы. 2009. №. 5.

3. Батоврин, В.К. Обеспечение интероперабельности – основная тенденция в развитии открытых систем / В.К. Батоврин, Ю.В. Гуляев, А.Я. Олейников // Информационные технологии и вычислительные системы. 2009. №. 5.
4. Официальный сайт консорциума W3C [Электронный ресурс]. - Режим доступа к ресурсу: <http://www.w3.org>

*Дата поступления  
в редакцию 06.05.2016*

**A.V. Aristov, V.P. Zelenskii**

## **INTERACTIVE APPLICATION INTEROPERABILITY IN A NETWORKED ENVIRONMENT**

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

**Subject:** The subject of this study is the open computer systems architecture.

**Purpose:** The aim is to create application interfaces model, which reduces the cost of creating complex information systems.

**Design/methodology/approach:** A theoretical framework is proposed based on methodology of open systems in computer science, cross-platform data formats and UML.

**Findings:** The results can be applied to the design and researching of scalable, extensible integrated information systems whose components operate on different hardware and software platforms.

**Research limitations/implications:** The present study provides a continuation and development methods of constructing integrated information systems in a networked environment.

**Originality/value:** Model describing application interfaces, which can be used in the construction of complex interactive systems, with interoperability of their components was proposed.

*Key words:* heterogeneous environment, semantic interoperability, models, hypervisor, virtualization.

УДК 004.021

М.А. Калинин, В.Ю. Карпычев

**МЕТОДЫ ВЫЧИСЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ПОТОКА ДЛЯ ЗАДАЧ АНАЛИЗА ТРЕХМЕРНОЙ СУЩНОСТИ СЦЕНЫ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматривается задача восстановления трехмерной структуры сцены с помощью использования свойств оптического потока. Приводятся результаты применения различных методов вычисления оптического потока для данной задачи. Предоставляются математические основы дифференциальных методов вычисления оптического потока.

*Ключевые слова:* компьютерное зрение, оптический поток, алгоритм Лукаса-Канаде, алгоритм Фарнебака.

В современных компьютерных системах и системах обработки изображений часто возникает задача определения формы объектов, а также перемещения этих объектов в трехмерном пространстве. Для решения данной задачи существует множество подходов, и один из них – это использование свойств оптического потока.

Оптический поток - это изображение видимого движения объектов, поверхностей или краев сцены, получаемое в результате перемещения наблюдателя (глаз или камеры) относительно сцены. В настоящее время оптический поток находит все новые области своего применения: он интенсивно используется для создания видео и спецэффектов, сжатия видео, стабилизации видео, компьютерном зрении и многих других областях. В оптическом потоке также зашифрована полезная информация о трехмерной структуре сцены. В [3] приводится простой мысленный эксперимент, показывающий это: представьте себя наблюдающим из окна движущегося автомобиля, можно заметить, что удаленные объекты характеризуются гораздо более медленным кажущимся движением по сравнению с близкими объектами, следовательно, скорость кажущегося движения уже позволяет получить определенную информацию о расстоянии.

Таким образом, имея на входе некоторую последовательность кадров, полученную с помощью оптического сенсора или камеры, можно попытаться восстановить запечатленное на них трехмерное пространство. В настоящей статье рассматривается применение различных методов вычисления оптического потока к решению задачи анализа трехмерной сущности и структуры сцены.

Следует отметить, что до настоящего времени для данной задачи не проводилось каких-либо серьезных научных работ. Существует несколько программных продуктов, частично решающих данную задачу, но применяемые алгоритмы и методы решения, используемые в них, закрыты для всеобщего обозрения и дальнейшего исследования.

**Варианты расчета оптического потока**

Суть оптического потока в том, что для каждой точки некоторого изображения находится такой сдвиг ( $dx$ ,  $dy$ ), чтобы исходной точке соответствовала точка на втором, последующем изображении. В [1] оптический поток определяется как векторное поле, где каждый вектор показывает перемещение отдельной точки между двумя последующими кадрами (рис. 1). Для нахождения этого сдвига нужно выбрать какую-либо характеристику точки, которая не изменяется в результате смещения. Обычно такой характеристикой выступает интенсивность (яркость) или цвет (для цветных изображений). Такой подход естественно может давать сбои при сильном изменении освещения сцены или изменения угла падения света. Од-

нако если мы рассматриваем видеопоток, то в большинстве случаев сильного изменения освещения между двумя кадрами не происходит из-за небольшого временного интервала между двумя кадрами.



Рис. 1. Два последующих кадра и векторное поле перемещений

Всего существует два варианта расчета оптического потока: плотный (dense) и выборочный (sparse). Выборочный поток рассчитывает сдвиг отдельных заданных точек (например, некоторых характеристических точек, предварительно найденных одним из алгоритмов детектирования таких точек). Плотный поток считает сдвиги для всех точек изображения. Естественно, выборочный поток вычисляется быстрее (далее будет произведен сравнительный анализ двух существующих реализаций для нахождения плотного и выборочного потока), однако для некоторых алгоритмов разница во времени не такая и большая, а для некоторых задач требуется нахождение потока во всех точках изображения.

### Обзор существующей реализации алгоритмов вычисления оптического потока

Библиотека алгоритмов компьютерного зрения и обработки изображений OpenCV предлагает реализацию нескольких популярных и наиболее производительных алгоритмов. Такими являются алгоритм Лукаса-Канаде, а также алгоритм Фарнебака.

Классический вариант алгоритма Лукаса-Канаде реализован в OpenCV в виде функции *calcOpticalFlowPyrLK*. Данный алгоритм использует выборочный поток, и для некоторого определенного массива точек (для поиска таких точек библиотекой рекомендуется детектор углов Shi-Tomasi) на первом кадре оценивает их расположение на последующем. Входные и выходные параметры данной функции следующие: два изображения (или кадра), следующие друг за другом, массив начального набора характеристических точек, массив результирующих точек, массив который показывает статус поиска каждой точки, массив погрешностей для каждой операции поиска, размер окна по которому производится гауссово усреднение, дополнительные флаги, которые можно использовать для установки начального приближения потока или выбрать метод оценки погрешности, а также пороговое значение градиента.

В результате работы эта реализация стабильно и с хорошей точностью способна обнаруживать как маленькие, так и большие сдвиги. Время работы алгоритма – около 10 мс. для 400 точек (тестирование проводилось на процессоре Intelcore i7 950).

Алгоритм Фарнебака реализован в OpenCV в виде функции *calcOpticalFlowFarneback*. Данная реализация использует плотный поток, поэтому считает сдвиг для каждой точки и нет никакой необходимости использовать дополнительные детекторы точек, как в случае с алгоритмом Лукаса-Канаде. Входные и выходные параметры данной функции: два изобра-

жения (или кадра), следующие друг за другом, выходной поток в формате двухканальной матрицы (матрица векторов), дополнительные флаги, которые можно использовать для установки начального приближения потока или выбрать метод оценки погрешности и пороговое значение градиента.

Этот алгоритм менее стабилен и плохо работает на больших сдвигах. Время работы алгоритма-около 600 мс. для изображения 512x512 пикселей (тестирование проводилось на процессоре Intelcore i7 950).

### Восстановление трехмерной структуры сцены

После вычисления оптического потока мы имеем набор точек на исходном кадре и набор соответствующих им точек на последующем кадре. Взяв пару соответствующих точек, можно выполнить триангуляцию и определить координаты их прообраза в трехмерном пространстве (рис. 2).

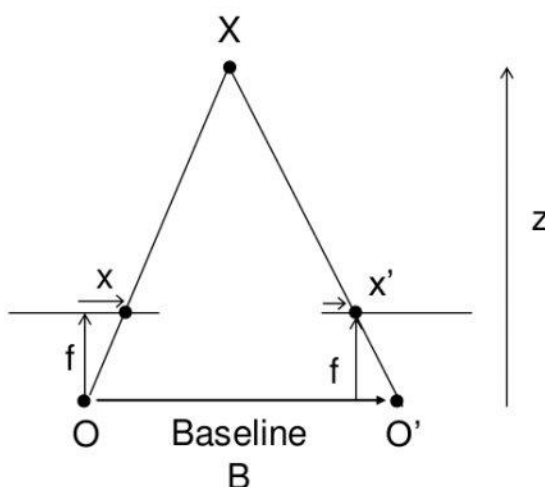


Рис. 2. Триангуляция пары соответствующих точек

Рассмотрим подробнее рис. 2. Здесь расстояние до объекта обозначено буквой  $z$  и вычисляется, используя метод подобных треугольников по следующей формуле:

$$Z = \frac{Bf}{\Delta x}$$

где  $B$  – это шаг камеры (расстояние на которое переместилась камера в реальном мире),  $f$  – фокусное расстояние камеры (расстояние от центра камеры до поверхности ее экрана),  $\Delta x$  – расстояние между соответствующими точками. Если у нас нет встроенного шагомера и мы не знаем, на какую дистанцию переместилась камера в реальном мире, можно немного упростить задачу и предположить, что движение камеры происходит плавно, расстояние между двумя соседними кадрами примерно одинаковое и принять  $B$  за единицу.

Используя данный метод, применим его для соответствующих точек, полученных с помощью OpenCV реализации алгоритма Лукаса-Канаде и алгоритма Фарнебака.



Рис. 3. 1 – первый кадр. 2 – второй кадр. 3 – карта глубин, полученная с помощью оптического потока Фарнебака, более светлым цветом выделены области, расположенные ближе к наблюдателю

На рис. 3 показан результат работы для алгоритма Фарнебака. Для алгоритма Лукаса-Канаде такой карты глубины получить не удалось, ввиду маленького количества характеристических точек. Однако для отдельных характеристических точек на сцене, этот алгоритм работает намного точнее и способен искать совпадения на больших сдвигах, поэтому сейчас ведется работа над объединением свойств этих алгоритмов для корректировки результатов, полученных с помощью алгоритма Фарнебака.

### Математические основы дифференциальных методов вычисления оптического потока

В основе всех дифференциальных методов вычисления оптического потока (таких как алгоритм Лукаса-Канаде и алгоритм Фарнебака) лежит одно важное предположение. Предположим, что значения пикселей переходят из одного кадра в следующий кадр без изменений. Таким образом, мы делаем допущение, что пиксели, относящиеся к одному и тому же объекту, могут сместиться в какую-либо сторону, но их значение останется неизменным. Глобальные условия освещения и освещенность самого движущегося объекта могут меняться от кадра к кадру, но это допущение достаточно хорошо работает на практике, особенно если речь идет о видеопотоке [2].

На математическом языке это предположение можно выразить следующим образом:

$$I(x, y, t) = I(x + u_x, y + u_y, t + 1),$$

где  $I$  - это функция яркости пикселей от положения на кадре и времени. Таким образом,  $x$  и  $y$  - это координаты пикселя в плоскости кадра, вектор  $u$  - смещение, а  $t$  - номер кадра в последовательности. Условимся, что между двумя соседними кадрами проходит единичный отрезок времени.

Для знакомства с этим методом сначала рассмотрим одномерный случай. Например, возьмем два одномерных кадра, каждый кадр имеет 1 пиксель в высоту и 20 пикселей в ширину (рис. 4). На втором кадре изображение немного смещено вправо. Именно это смещение мы и хотим найти.



Рис. 4. Два одномерных кадра

Для более удобной работы с этими кадрами мы можем представить их в виде двух функций. В качестве параметра функции будет выступать положение пикселя в кадре, а в качестве выходного значения - его яркость (или интенсивность).

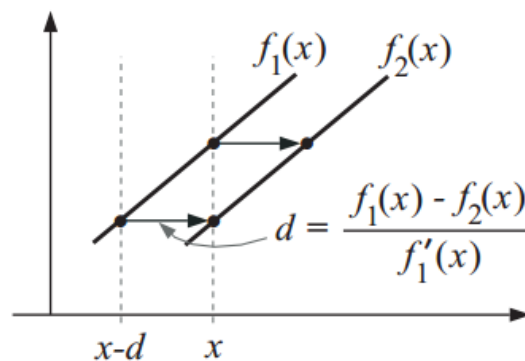


Рис. 5. Два одномерных кадра в виде функций

На таком графике очень хорошо видно искомое смещение (на рис. 5 обозначено как  $d$ ). Если мы внимательно посмотрим на наши графики и исходные кадры, то видно, что

функция  $f_2$  – это просто смещенная функция  $f_1$ . Выражая предыдущее предложение математическим языком, получим

$$f_2(x) = f_1(x - d).$$

Также мы можем записать функции  $f_1$  и  $f_2$  в общем виде:

$$\begin{aligned} f_1(x) &= I(x, y, t), \\ f_2(x) &= I(x, y, t + 1). \end{aligned}$$

В данном одномерном случае  $x$  и  $t$  равны нулю.

Для любой произвольной координаты  $x$ , нам известно значение обеих функций, а также мы можем вычислить производные этих функций в этих координатах.

Для выражения неизвестной величины  $d$  через известные значения функций  $f_1$  и  $f_2$  запишем разложение в ряд Тейлора для  $f_1(x-d)$ :

$$f_1(x - d) = f_1(x) - df_1'(x) + O(d^2 f_1'')$$

На данном этапе нам нужно сделать еще одно предположение. Предположим, что функция  $f_1(x-d)$  хорошо аппроксимируется первой производной и мы можем отбросить все младшие члены ряда Тейлора. После того как мы сделали второе предположение, можно переписать полученную формулу

$$f_1(x - d) = f_1(x) - df_1'(x)$$

Теперь следует проанализировать второе предположение. Отбрасывая все младшие члены ряда Тейлора после первой производной, можно сильно потерять в точности вычислений, но как показывает практика, такой подход сильно упрощает метод, однако если понадобится более высокая точность, можно сделать последовательное приближение.

Из полученной формулы легко выразить искомую величину  $d$ , сделав одну простую замену. Как уже было отмечено:

$$f_2(x) = f_1(x - d).$$

Можно переписать последнее полученное выражение следующим образом:

$$f_2(x) = f_1(x) - df_1'(x).$$

Отсюда выражаем искомую величину

$$d = \frac{f_1(x) - f_2(x)}{f_1'(x)}.$$

Применяя данный метод, мы также можем найти смещение пикселей между двумя соседними кадрами и для двумерного случая.

### Выводы

В данной статье было рассмотрено применение различных вариантов вычисления оптического потока для восстановления трехмерной структуры сцены и получен устойчивый результат для алгоритма Фарнебака для всех точек на сцене. Также была поставлена задача о возможности улучшения этого результата с помощью алгоритма Лукаса-Канаде.

На сегодняшний день существует несколько других подходов к решению проблемы вычисления оптического потока и многие из них также дают неплохие результаты. Например, в последнее время можно заметить повышение интереса к дискретным методам оптимизации блочным методам.

Проблема нахождения оптического потока решается уже не один десяток лет, и существующие методы и реализации продолжают постоянно улучшаться и совершенствоваться. Такая работа продолжается также ввиду того, что от качества и стабильности нахождения оптического потока зависит производительность многих других алгоритмов и систем компьютерного зрения.



## Библиографический список

1. **Форсайт, Д.** Компьютерное зрение. Современный подход / Д.Форсайт, Ж. Понж. – М.: Издательский дом «Вильямс». 2004.
2. **Fleet, J.D.** OpticalFlowEstimation / J.D. Fleet, Y. Weiss. 2006.
3. Искусственный интеллект. Системы и модели. – Интернет ресурс: [www.rriai.org.ru](http://www.rriai.org.ru). 2003.

*Дата поступления  
в редакцию 06.05.2016*

**M.A. Kalinin, V.Y. Karpychev**

**METHODS OF OPTICAL FLOW ESTIMATION FOR 3D SCENE ANALYSIS**

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

**Purpose:** This article considers the problem of restoring 3D structure of the scene by using the properties of optical flow. We also discuss the application of different methods of optical flow estimation for given problem.

**Design/methodology/approach:** This article provides an introduction to mathematical basis of differential methods of estimating optical flow.

**Research limitations/implications:** The present study provides a starting-point for investigation of possibility of improving this result by using of Lucas–Kanade method.

**Originality/value:** In scope of this study, we have obtained a pretty much stable result for Farneback algorithm for all points on the scene

*Key words:* computer vision, optical flow, Lucas–Kanade method, Farneback method.

УДК.621.372.855.4

Т.В. Кожевникова

**РАСЧЕТ ВОЛНОВОДНОЙ НАГРУЗКИ НА БАЗЕ ОТРЕЗКА  
КОРОТКОЗАМКНУТОГО ПРЯМОУГОЛЬНОГО ВОЛНОВОДА  
С ОБЪЕМНОЙ ПОГЛОЩАЮЩЕЙ ВСТАВКОЙ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Изложена методика составления расчетного алгоритма с использованием метода коллокаций. Решена задача дифракции волн на стыке полого прямоугольного волновода и частично заполненного волновода с потерями. Исследована сходимость решений, полученных с помощью разработанного алгоритма. Приведены частотные зависимости коэффициента отражения основной волны от волноводной нагрузки при различных параметрах структуры.

**Цель:** Расчет коэффициента отражения от волноводной нагрузки с объемной поглощающей вставкой.

**Дизайн/методология/подход:** Использование метода коллокаций для решения задачи дифракции волн на стыке полого прямоугольного волновода и частично заполненного волновода с потерями.

**Выводы:** Изложена методика составления расчетного алгоритма. Исследована сходимость решений, полученных с помощью разработанного алгоритма. Приведены частотные зависимости коэффициента отражения основной волны от волноводной нагрузки при различных параметрах структуры.

**Ограничения исследования/развитие исследований:** Настоящие результаты являются основой для развития методики расчета продольно неоднородных систем с потерями методом коллокаций.

**Оригинальность/значение:** Предложена методика расчета согласования системы без потерь и продольно неоднородной системы с потерями.

*Ключевые слова:* волноводная нагрузка, объемные потери, коэффициент отражения, LM-волны, комплексные решения, метод коллокаций.

Волноводные нагрузки выполняют в виде поглощающих вставок переменного профиля в отрезке короткозамкнутого волновода. В маломощных нагрузках вставки имеют вид тонких диэлектрических пластин, покрытых графитовыми или металлическими пленками [1-3]. Объемные поглощающие вставки с большой мощностью рассеяния выполняют из композитных материалов на основе порошков графита, карбонильного железа или карбида кремния. Для уменьшения отражений поглощающим вставкам придают вид клиньев или пирамид.

В работе электродинамический расчет волноводной нагрузки производится на основе метода коллокаций. Поля в стыкуемых волноводах представляются в виде сумм собственных волн. Запись граничных условий (условий непрерывности касательных составляющих электромагнитного поля на границе раздела сред) приводит к системе функциональных уравнений. Граничные условия записываются в нескольких определенным образом выбранных точках, называемых узлами коллокаций. В результате получается система линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных амплитудных коэффициентов в представлениях полей. Количество выбранных узлов коллокаций определяет номер приближения, в котором решается задача.

Как показывает практика, при использовании метода коллокаций существенное влияние на решение краевой задачи оказывает выбор точек, в которых записываются граничные условия (узлов коллокаций). Главной сложностью, возникающей при анализе направляющих структур с помощью метода коллокаций, является отсутствие правила, строго определяющего выбор распределения точек, в которых записываются граничные условия (узлов коллокаций) [4, 5]. Метод коллокаций является достаточно удобным методом расчета электродинамических структур со сложными границами между частичными областями, позволяет быстро и с необходимой точностью получить результаты.

Рассмотрим процедуру составления алгоритма расчета волноводной нагрузки с объемными потерями.

Полый прямоугольный волновод стыкуется с неоднородно заполненным короткозамкнутым прямоугольным волноводом. В поперечном сечении неоднородность представлена диэлектрическим заполнением вдоль широкой стенки волновода. В продольном сечении диэлектрическое заполнение плавно увеличивается вплоть до полного заполнения волновода. Произведем аппроксимацию плавного скоса набором последовательно соединенных отрезков волновода с различной степенью заполнения диэлектриком (рис. 1).

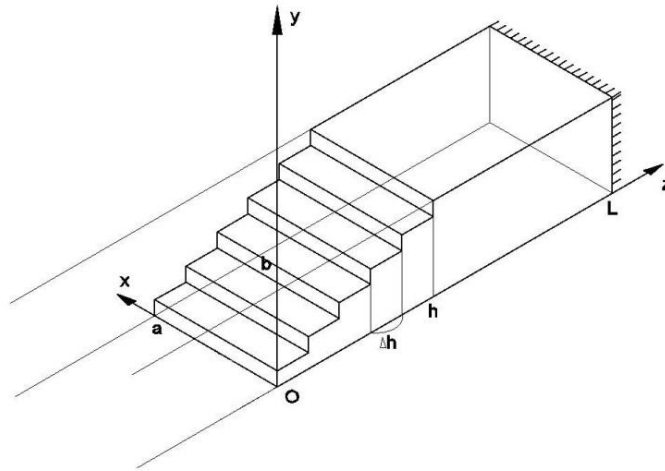


Рис. 1

Каждая ступень имеет длину  $\Delta h$ , при  $z=L$  волновод коротко замкнут. Поскольку в полом волноводе  $I$  (рис. 2) распространяется основная волна  $H_{10}$ , на стыке возбуждаются собственные волны волновода  $LM_{1n}$ , где  $n=0, 1, 2, \dots$ . Поле в волноводе  $I$  представлено прямой волной  $H_{10}$  и суммой отраженных волн  $H_{1n}$  ( $n=0, 1, 2, \dots$ ), в каждой ступени - суммами прямых  $LM_{1n}$  волн неоднородно заполненного волновода, и волн, отраженных от последующей ступени. В последней  $N$ -области поле представлено суммами прямых  $H_{1n}$ -волн однородно заполненного прямоугольного волновода, и волн, отраженных от закорачивающей поверхности.

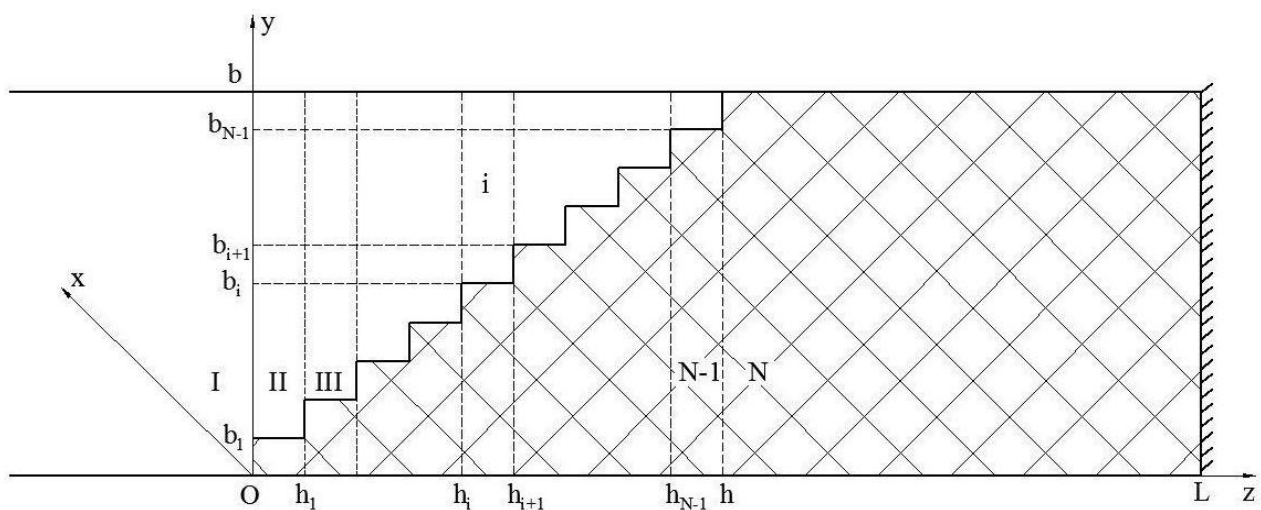


Рис. 2

Продольные компоненты магнитного и электрического векторов Герца для каждой области записываются в виде  
- для области I:

$$P_z^{m(i)} = A \cos \frac{\pi}{a} x e^{-i\beta_{10}z} + \sum_m R_{1m} \cos \frac{\pi}{a} x \cos \frac{\pi m}{b} y e^{i\beta_{1m}^{(i)}z},$$

- для  $i$ -й области при  $y < b_i$

$$P_{z_1}^{m(i)} = \sum_n A_{11n}^{(i)} \cos \frac{\pi}{a} x \cos \chi_{y_{11n}}^{(i)} y e^{-i\beta_{1n}^{(i)}(z-h_i)} + \sum_n \bar{A}_{11n}^{(i)} \cos \frac{\pi}{a} x \cos \chi_{y_{11n}}^{(i)} y e^{i\beta_{1n}^{(i)}(z-h_{i+1})},$$

$$P_{z_1}^{e(i)} = \sum_n B_{11n}^{(i)} \sin \frac{\pi}{a} x \sin \chi_{y_{11n}}^{(i)} y e^{-i\beta_{1n}^{(i)}(z-h_i)} + \sum_n \bar{B}_{11n}^{(i)} \sin \frac{\pi}{a} x \sin \chi_{y_{11n}}^{(i)} y e^{i\beta_{1n}^{(i)}(z-h_{i+1})},$$

- для  $i$ -й области при  $y > b_i$

$$P_{z_2}^{m(i)} = \sum_n A_{21n}^{(i)} \cos \frac{\pi}{a} x \cos [\chi_{y_{21n}}^{(i)} (y-b_i)] e^{-i\beta_{1n}^{(i)}(z-h_i)} + \sum_n \bar{A}_{21n}^{(i)} \cos \frac{\pi}{a} x \cos [\chi_{y_{21n}}^{(i)} (y-b_i)] e^{i\beta_{1n}^{(i)}(z-h_{i+1})},$$

$$P_{z_2}^{e(i)} = \sum_n B_{21n}^{(i)} \sin \frac{\pi}{a} x \sin [\chi_{y_{21n}}^{(i)} (y-b_i)] e^{-i\beta_{1n}^{(i)}(z-h_i)} + \sum_n \bar{B}_{21n}^{(i)} \sin \frac{\pi}{a} x \sin [\chi_{y_{21n}}^{(i)} (y-b_i)] e^{i\beta_{1n}^{(i)}(z-h_{i+1})},$$

- для  $N$ -й области

$$P_z^{m(N)} = \sum_n A_{11n}^{(N)} \cos \frac{\pi}{a} x \cos \frac{\pi n}{b} y e^{-i\beta_{1n}^{(N)}[z-(N-2)\Delta h]} + \sum_n \bar{A}_{11n}^{(N)} \cos \frac{\pi}{a} x \cos \frac{\pi n}{b} y e^{i\beta_{1n}^{(N)}[z-L]},$$

где  $A_{1,21n}^{(i)}$ ,  $B_{1,21n}^{(i)}$  - неизвестные амплитудные коэффициенты волн  $LM_{1n}$ , распространяющихся вдоль оси  $z$ ;  $\bar{A}_{1,21n}^{(i)}$ ,  $\bar{B}_{1,21n}^{(i)}$  - неизвестные амплитудные коэффициенты волн  $LM_{1n}$ , распространяющихся против оси  $z$ ;

$\chi_{1,21n}^{(i)}$ ,  $\beta_{1n}^{(i)}$  - нормированные поперечные и продольные волновые числа этих волн.

Дисперсионные характеристики волн  $LM_{1n}$  рассчитывались на основе решения дисперсионного уравнения [6]

$$-\chi_{y_2} \tilde{\varepsilon}_1 \sin[\chi_{y_2} (\tilde{b}_i - 1)] \cos \chi_{y_1} \tilde{b}_i + \chi_{y_1} \cos[\chi_{y_2} (\tilde{b}_i - 1)] \sin \chi_{y_1} \tilde{b}_i = 0,$$

где  $\tilde{b}_i = b_i/b$  - нормированная толщина диэлектрической вставки,

$$\chi_{y_2} = \sqrt{k^2(1-\tilde{\varepsilon}_1) + \chi_{y_1}^2}.$$

Поскольку рассматриваемый волновод является диссипативной системой, продольные и поперечные волновые числа будут комплексными:

$$\beta = \beta_1 + i\beta_2, \quad \chi_{y_1} = \gamma_{y_1} + i\delta_{y_1}, \quad \chi_{y_2} = \gamma_{y_2} + i\delta_{y_2}.$$

Дисперсионные характеристики волн  $LM_{mn}$  двухслойного волновода с потерями приведены на рис. 3, 4. На этих рисунках представлены зависимости нормированной фазовой постоянной  $\text{Re} \tilde{\beta}_{mn} = \beta_1 a$  и нормированного коэффициента затухания  $\text{Im} \tilde{\beta}_{mn} = \beta_2 a$  от длины волны и от нормированной толщины диэлектрической вставки:

$$\tilde{k} = \frac{2\pi a}{\lambda}; \quad \tilde{\varepsilon} = 4(1-i), \quad \tilde{b}_i = 0.4444, \quad \tilde{k} = 1.9.$$

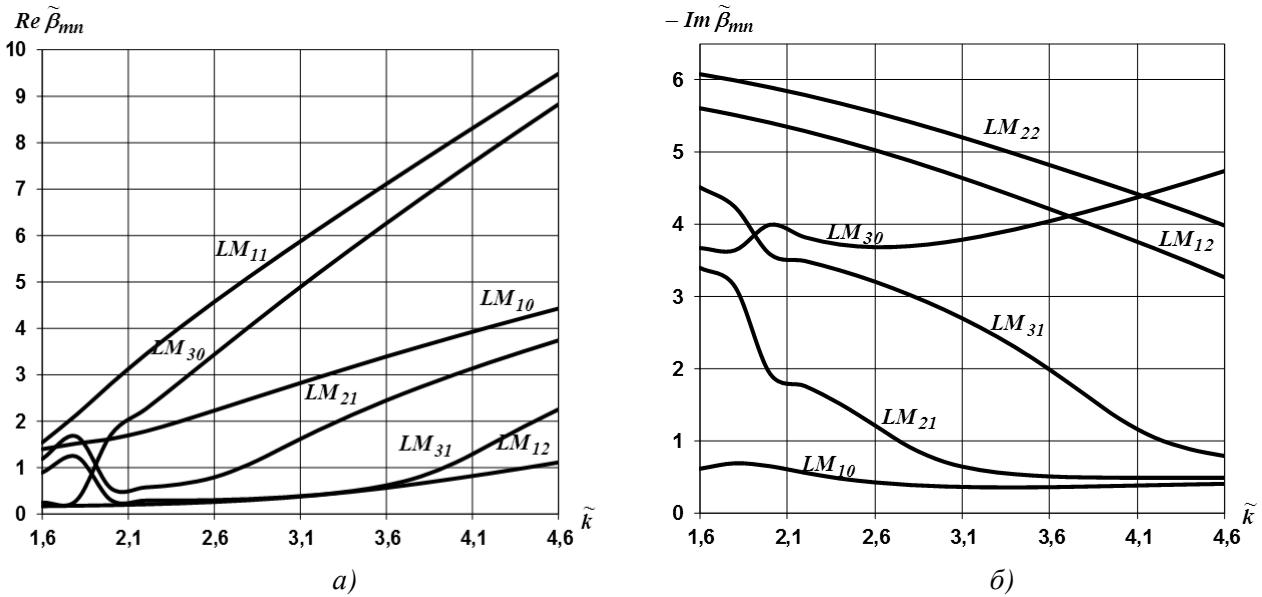


Рис. 3

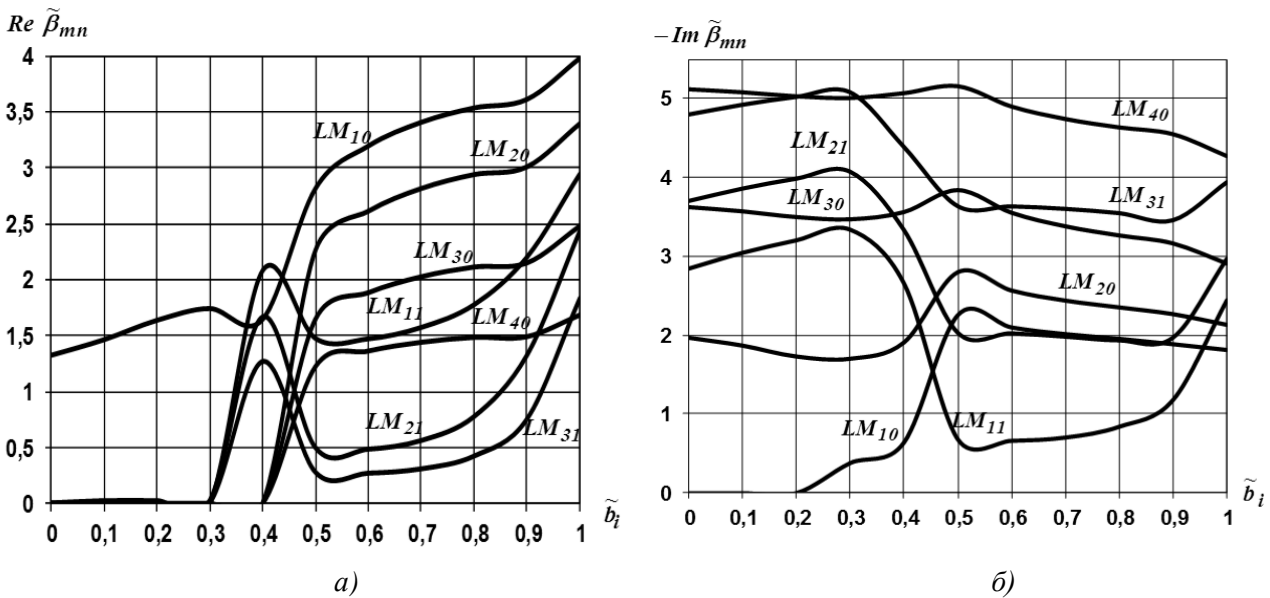


Рис. 4

При составлении алгоритма расчета волноводной нагрузки касательные составляющие электрического и магнитного полей на стыке  $i$ -го и  $(i+1)$ -го ( $i \in 1..N-1$ ) волноводов полагаются непрерывными:

$$E_x^{(i)} \Big|_{z=h_{i+1}} = E_x^{(i+1)} \Big|_{z=h_{i+1}}, \quad E_y^{(i)} \Big|_{z=h_{i+1}} = E_y^{(i+1)} \Big|_{z=h_{i+1}}, \quad H_x^{(i)} \Big|_{z=h_{i+1}} = H_x^{(i+1)} \Big|_{z=h_{i+1}}.$$

Выразив компоненты электрического и магнитного полей через векторы Герца и подставив компоненты полей в граничные условия, получаем систему функциональных уравнений. Исходя из условия равенства нулю касательных составляющих электрического поля на закорачивающей поверхности при  $z=L$ , получаем связь между амплитудными коэффициентами  $N$ -й области:  $\bar{A}_{1ln}^{(N)} = -A_{1ln}^{(N)} e^{-i\beta_{1n}^{(N)}[L-(N-2)\Delta h]}$ .

Для перехода от системы функциональных уравнений к системе линейных алгебраических уравнений граничные условия записываются в нескольких определенных образом выбранных точках, называемых узлами коллокаций. Амплитудные коэффициенты  $R_{1m}, A_{1ln}^{(I)}, \bar{A}_{1ln}^{(I)}, A_{1ln}^{(i)}, \bar{A}_{1ln}^{(i)}, A_{1ln}^{(N-1)}, \bar{A}_{1ln}^{(N-1)}, A_{1ln}^{(N)}$ , число которых определяется количеством ступе-

ней разбиения и числом учитываемых в каждой структуре собственных волн, нормируются на коэффициент  $A$ . В результате получается система линейных неоднородных алгебраических уравнений (СЛАУ) относительно неизвестных амплитудных коэффициентов в представлениях полей. В общем случае, данная система имеет бесконечную размерность. Однако при ее численном решении методом редукции учитывается лишь ограниченное число членов в каждой из сумм. Количество выбранных узлов коллокаций определяет номер приближения.

При использовании метода коллокаций существенное влияние на решение дифракционной задачи оказывает выбор точек, в которых записываются граничные условия. В ходе получения СЛАУ на каждом стыке берется одинаковое число равномерно выбранных по координате  $y$  точек «сшивания». Для каждого узла на каждом стыке записывается три граничных условия, число волн в стыкуемых отрезках волноводов выбирается таким образом, чтобы во всех областях кроме первой и последней число учитываемых волн было одинаковым. Формула, по которой определяется размерность квадратной матрицы, записывается следующим образом

$$3(N-1)c = m_1 + 2(N-2)m + m_N,$$

где  $N$  – число стыкуемых областей;  $c$  – число узлов коллокации,

$m_1, m_N$  – число учитываемых волн в  $I$ -ой и  $N$ -ой областях,

$m$  – число учитываемых волн в промежуточных областях.

В результате решения СЛАУ находятся амплитудные коэффициенты  $R_{1n}, A_{1n}^{(I)}, \bar{A}_{1n}^{(I)}, \dots, A_{1n}^{(i)}, \bar{A}_{1n}^{(i)}, \dots, A_{1n}^{(N-1)}, \bar{A}_{1n}^{(N-1)}, A_{1n}^{(N)}$  для каждой фиксированной длины волны.

Выбор набора волн, который достоверно описывал бы в конечном приближении электромагнитное поле в такой структуре, является достаточно сложной задачей. Количество волн типа  $LM_{1n}$ , учитываемых в стыкуемых областях, является ограниченным вследствие большого уровня затухания волн высших типов. Волны типа  $LE_{1n}$ , которые могут существовать в двухслойных волноводах, имеют структуру поля, не соответствующую структуре поля волны  $H_{10}$ , распространяющейся в тракте, где находится нагрузка: у волн  $LE_{1n}$  отсутствует компонента электрического поля, нормальная к диэлектрическому слою и к широкой стенке волновода. Задача была решена в следующих приближениях: на каждом стыке учитывается либо две точки «сшивания», либо четыре. По числу стыков рассматривалось десять приближений.

Исследование достоверности полученных результатов производилось в несколько этапов. На первом этапе исследовалась сходимость по значению коэффициента отражения основной волны  $H_{10}$  полого прямоугольного волновода от нагрузки. Кроме того, сходимость была проверена по всем амплитудным коэффициентам.

На следующем этапе проводилась проверка точности «сшивания» тангенциальных компонент поля на границах стыкуемых областей  $z = h_i$  ( $i \in 1, 2, \dots, N-1$ ). В узлах коллокаций граничные условия выполняются точно. Погрешность «сшивания» компонент  $H_x$  вне узлов не превышает 30%,  $E_x$  – порядка 10%, компонента  $E_y$  имеет разрыв по координате  $y$  и граничные условия выполняются несколько хуже – погрешность около 40%.

При расчете коэффициента отражения необходимо брать равное количество членов в суммах, описывающих сшиваемые поля, так как равное количество волн, учитываемых в стыкуемых структурах, значительно улучшает качество «сшивания» полей.

Результаты численной реализации алгоритма расчета волноводной нагрузки на базе двухслойного прямоугольного волновода с объемными потерями приведены на рис. 5, 6. При расчетах амплитудный коэффициент  $A=1$ , поэтому коэффициент  $R_{10}$  является искомым ко-

эффицентом отражения волны  $H_{10}$  от волноводной нагрузки. На рисунках  $b/a=0,5$ ; нормированная частота  $\tilde{k} = \frac{2\pi a}{\lambda}$ , нормированная длина нагрузки  $\tilde{L} = \frac{L}{a}$ .

Результаты исследования влияния параметров структуры на коэффициент отражения основной волны  $H_{10}$  от волноводной нагрузки, выполненной на базе двухслойного прямоугольного волновода с объемными потерями, позволяют подобрать такие параметры системы, при которых нагрузку можно считать согласованной.

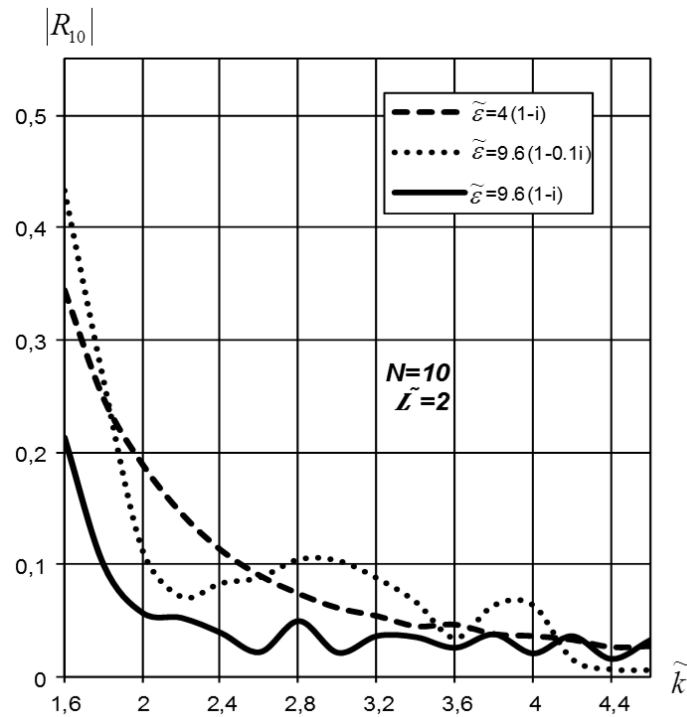


Рис. 5

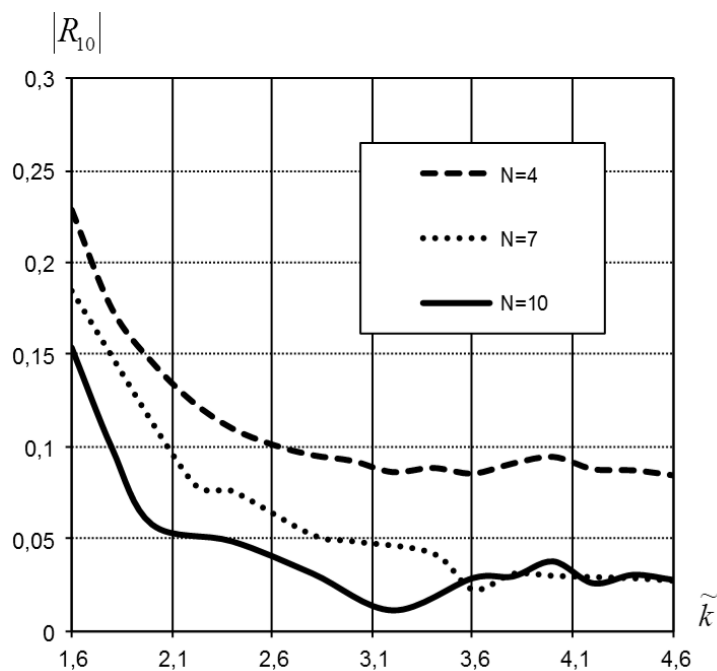


Рис. 6

**Библиографический список**

1. **Веселов, Г.И.** Слоистые металлодиэлектрические волноводы / Г.И. Веселов, С.Б. Раевский. – М.: Радио и связь, 1998.
2. **Иванов, А.Е.** Расчет волноводной нагрузки на базе отрезка волновода с резистивной пленкой / А.Е. Иванов, В.А. Калмык, Т.В. Кожевникова // Изв. вузов СССР. Радиоэлектроника. – 1982. – Т.25. №11. – С. 62–65.
3. **Харитонов, А.А.** Волноводная нагрузка с диагональным расположением резистивной пленки / Изв. вузов СССР. Радиоэлектроника. – 1977. – Т. 20. №2.
4. **Ермошин, В.В.** К вопросу о выборе узлов коллокаций при исследовании открытого прямоугольного диэлектрического волновода / В.В. Ермошин, А.В. Назаров // Радиотехника и электроника – 2007. – Т. 52. – Вып. 10. – С. 1189–1193.
5. **Ермошин, В.В.** Расчет коэффициента отражения от волноводной нагрузки методом коллокаций / В.В. Ермошин, Т.В. Кожевникова, А.В. Назаров, И.Д. Слестникова // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева.– 2010. – №3(82). – С. 124–133.
6. **Егоров, Ю.В.** Частично заполненные прямоугольные волноводы / Ю.В. Егоров. – М.: Советское радио, 1967.

*Дата поступления  
в редакцию 06.05.2016*

**T.V. Kozhevnikova**

**WAVEGUIDE LOAD COMPUTATION ON THE BASIS OF SHORT CIRCUITED RECTANGULAR VOLUME ABSORBING LOADED WAVEGUIDE SEGMENT**

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

**Purpose:** It is to compute the volume absorbing waveguide load reflection coefficient.

**Design/methodology/approach:** The collocation method has been used to solve the problem of wave diffraction at the junction of a hollow rectangular waveguide and a lossy partially filled waveguide.

**Findings:** Algorithm computing techniques have been stated. Precision of solutions with the help of the developed algorithm has been researched. The paper shows frequency dependence of the dominant wave reflection coefficient on the waveguide load in different conditions.

**Research limitations/implications:** This research is the basis to develop the computation of longitudinally inhomogeneous lossy systems by the collocation method.

**Originality/value:** Computation methods have been proposed to coordinate a lossless system and a longitudinally inhomogeneous lossy system.

*Key words:* waveguide, volume losses, reflection coefficient, LM- waves, complex solutions, collocation method.



УДК 577.121.4;519.226

А.Н. Мошкова<sup>1</sup>, Е.И. Ерлыкина<sup>2</sup>, Ю.И. Царапкина<sup>1</sup>, А.В. Болоненков<sup>1</sup>,  
Я.Ю. Козлова<sup>1</sup>**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭМПИРИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ  
ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА  
ГИПОКСИЧЕСКОГО ПРЕКОНДИЦИОНИРОВАНИЯ  
НА ПРИМЕРЕ АНАЛИЗА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ГЛИКОЛИЗА МОЗГА**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева<sup>1</sup>,  
Нижегородская государственная медицинская академия Минздрава РФ<sup>2</sup>

**Цель работы:** Прогнозирование оптимального режима гипоксического прекондиционирования на примере анализа количественной зависимости между показателями глюкозы, лактата и пирувата в мозге крыс при развитии адаптивного состояния животных к нарушению кислородного режима.

**Методология:** В работе решается задача подбора кривой для аппроксимации зависимых отношений показателей гликолиза мозга животных при гипоксическом воздействии 310 мм рт. ст. длительностью 60 мин в течение 1,4,7,14 и 28 суток. Проведены оценка и анализ эффективности этапов гипоксического прекондиционирования, способствующих формированию стойкой адаптации организма животных к тяжелой форме гипоксии.

**Результаты и область применения:** Установлено, что оптимальное краткосрочное прекондиционирование находится в интервале 4-7 дней, оптимальный длительный режим гипоксического прекондиционирования - 28 суток. Развитие адаптивного состояния экспериментальных животных при 7-дневном прекондиционировании и длительном 28-дневном гипоксическом воздействии подтверждено дополнительным экспериментом в барокамере проточного типа при атмосферном давлении 145 мм рт. ст. в течение 10-30 мин. Смертность крыс в этом случае составляла 50%, что свидетельствовало о формировании стойкой адаптации к экстремальному нарушению кислородного режима. Полученные результаты можно рекомендовать при разработке немедикаментозных методов адаптации мозга к тяжелой форме гипоксического воздействия.

**Выводы:** Математический анализ количественной зависимости между экспериментальными показателями в мозге животных в разных условиях гипоксического прекондиционирования позволил определить оптимальные режимы краткосрочного и длительного прекондиционирования, которые следует использовать для реабилитации мозга к неблагоприятным воздействиям окружающей среды, опасным для жизнедеятельности организма.

*Ключевые слова:* глюкоза, лактат, пируват, гипоксическое прекондиционирование, статистический анализ.

Одной из центральных проблем биологии и медицины является исследование влияния неблагоприятных повреждающих факторов внешней среды на жизнедеятельность человека. Решение этой проблемы имеет важное значение для раскрытия защитных механизмов, лежащих в основе приспособительных реакций организма к экстремальным воздействиям. Гипоксия и ишемия приводят к структурно-функциональным повреждениям нейронов мозга и развитию постгипоксических состояний и постстрессовых тревожно-депрессивных расстройств. Такие гипоксические состояния отличаются широкой распространенностью, частота их возникновения в мире неуклонно растет. Борьба с гипоксией и ее последствиями является крайне актуальной задачей. В настоящее время существует два подхода к решению этой задачи: использование медикаментозных средств и немедикаментозных способов, направленных на мобилизацию эндогенных эволюционно приобретенных генетически детерминированных защитных механизмов.

Одним из наиболее эффективных нефармакологических способов является прекондиционирование. Прекондиционирование – это предъявление умеренных экстремальных воздействий, повышающих резистентность мозга, сердца и других органов к неблагоприятным факторам. Гипоксическое прекондиционирование – уникальный феномен человеческого организма, заключающийся в том, что в ответ на снижение поступления кислорода к тканям, организм приспосабливается к новым условиям, быстро компенсируя нарушения на всех уровнях. Вслед за полным восстановлением нарушенной функции происходит сверхвосста-

новление, и с каждым последующим воздействием этого фактора устойчивость организма увеличивается.

Кратковременное и многократное создание гипоксических условий в ткани, повышает устойчивость к недостатку кислорода. Этот способ уже используется при реабилитации пациентов с инфарктом миокарда. Для мозга способ гипоксического прекондиционирования находится в стадии лабораторных исследований с целью применения его для восстановления жизнедеятельности больных, перенесших инсульт.

Математическое моделирование активно применяется в решении биологических задач. Использование статистических моделей количественной зависимости между экспериментальными показателями метаболизма мозга дает возможность прогнозировать развитие адаптивного процесса организма к нарушению кислородного режима. Целью настоящей работы является создание математической модели для прогнозирования оптимальных режимов гипоксического прекондиционирования, которые можно рекомендовать при разработке способов борьбы с гипоксией и ишемией.

### Результаты

Получен набор экспериментальных данных, представляющий собой показатели глюкозы, лактата и пирувата в мозге интактных животных и животных в условиях разных режимов гипоксического прекондиционирования.

Массивы экспериментальных показателей процесса гликолиза мозга (глюкозы( $x_i$ ), лактата( $y_i$ ) и пирувата( $y_i$ )) считали массивами прямых равноточных измерений, так как эксперименты проводились по одной и той же методике средствами измерения одинаковой точности при постоянных условиях. Обработка массивов  $\{x_i\}$  и  $\{y_i\}$  проводилась по следующей схеме.

Рассчитывались:

- 1) средние арифметические значения

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n};$$

- 2) средние квадратические отклонения среднего арифметического

$$\sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}, \sigma_{\bar{y}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n(n-1)}};$$

- 3) дополнительный интервал  $\Delta$  по числу измерений  $n$  и  $\bar{x}, \bar{y}$  дополнительной вероятности  $p = 0,95$  для найденного критерия Стьюдента  $t_p$  с помощью таблиц

$$\Delta = t_p \sigma_{\bar{x}}, \Delta = t_p \sigma_{\bar{y}};$$

- 4) показатель точности определения средней

$$C_S = \frac{\sigma_{\bar{x}}}{\bar{x}} \cdot 100\%, C_S = \frac{\sigma_{\bar{y}}}{\bar{y}} \cdot 100\%.$$

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

Таблица 1

#### Экспериментальные показатели процесса гликолиза мозга лабораторных животных

Условия эксперимента	Глюкоза ( $x_i$ )	Cs, %	Лактат ( $y_i$ )	Cs, %	Пируват ( $y_i$ )	Cs, %
1	2	3	4	5	6	7
Интактные животные	4,116±0,020	0,2	1,969±0,030	0,8	0,421±0,001	0,2
1-дневное преконд.	5,824±0,088	0,7	2,974±0,033	0,5	0,424±0,004	0,5
4-дневное преконд.	4,041±0,062	0,8	2,174±0,022	0,5	0,423±0,004	0,4

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7
7-дневное преконд.	4,471 ±0,070	0,8	2,191 ±0,038	0,8	0,422±0,003	0,4
14-дневное преконд.	4,281 ±0,053	0,6	2,622 ±0,019	0,4	0,406±0,002	0,3
28-дневное преконд.	4,563 ±0,036	0,8	2,038 ±0,023	0,6	0,424±0,004	0,5

Показатель точности определения средней  $C_S$ , не превышающий 1%, свидетельствует о достаточно точной коррекции экспериментальных данных. Проведена попытка аппроксимировать количественную зависимость между глюкозой( $x$ ) и лактатом( $y$ ), глюкозой( $x$ ) и пируватом( $y$ ), определить тесноту связи между этими показателями в мозге интактных животных и животных в условиях разных режимов гипоксического прекондиционирования (1,4,7,14 и 28-дневное прекондиционирование). Исследовать зависимые отношения этих показателей под влиянием гипоксического воздействия и дать оценку режимам прекондиционирования, формирующим адаптивное состояние животных к экстремальным условиям жизнедеятельности организма.

С этой целью решалась задача подбора кривой следующей формулировки.

Дано:

1)  $x_1, x_2, \dots, x_n$  – наблюдаемые показатели независимой переменной  $x$ ,

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

$x$  и  $y$  детерминированно связаны между собой одинаковой экспериментальной ситуацией;

2) семейство некоторых функций.

Требуется: подобрать из этого семейства функцию  $y = f(x, a_0, a_1, \dots, a_m)$  независимой переменной  $x$  и параметров  $a_0, a_1, \dots, a_m$  и определить значения  $a_0, a_1, \dots, a_m$  так, чтобы выбранная функция хорошо аппроксимировала экспериментальную зависимость  $y(x)$ .

При этом функция  $y = f(x, a_0, a_1, \dots, a_m)$  должна удовлетворять следующим условиям:

- должна хорошо объединять экспериментальные показатели;
- быть простой в выражении и удобной для расчета выбранных характеристик;
- давать наименьшую ошибку аналитического прогноза;
- принадлежать классу гладких, по возможности, элементарных функций.

Выбор функции, подходящей для описания количественной зависимости между глюкозой( $x$ ) и лактатом( $y$ ), глюкозой( $x$ ) и пируватом( $y$ ), осуществлялся из семейства элементарных функций:

$$y = a_0x + a_1;$$

$$y = a_0x^2 + a_1x + a_2;$$

$$y = a_0x^3 + a_1x^2 + a_2x + a_3;$$

$$y = a_0 \ln x + a_1;$$

$$y = a_0x^{a_1};$$

$$y = a_0e^{a_1x}.$$

В качестве критерия близости искомой функции к экспериментальным значениям использовали минимум суммы квадрата отклонений теоретической кривой от всех экспериментальных точек  $x_i, y_i$ , т.е.

$$J = \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i, a_0, a_1, \dots, a_m))^2 = \min,$$

где  $n$  – число экспериментальных точек,

$f(x_i, a_0, a_1, \dots, a_m)$  – функция заданной структуры,

$(x_i, y_i)$ , ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) – экспериментальные характеристики процесса гликолиза мозга:

$x_i$  – показатели глюкозы;  $y_i$  – содержание лактата и пирувата.

Подбирались корреляционные тренды для каждого массива экспериментальных  $x_i \rightarrow y_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ). Коэффициенты  $a_0, a_1, \dots, a_m$  функций регрессии  $f(x_i, a_0, a_1, \dots, a_m)$  в каждом рассматриваемом опыте находились методом наименьших квадратов.

Мерой приближения регрессионной модели к экспериментальным показателям служил коэффициент детерминации  $R^2$ , тесноту связи корреляционной зависимости  $x_i \rightarrow y_i$  определял коэффициент корреляции  $r_{xy}$ .

Согласно анализу зависимости глюкозы( $x$ )  $\rightarrow$  лактата( $y$ ) и глюкозы( $x$ )  $\rightarrow$  пирувата( $y$ ) установлено, что поставленной задаче хорошо соответствует линейная функция  $y = a_0x + a_1$ , о чем свидетельствовало равенство  $r_{xy}^2 = R^2$ .

В табл. 2 и табл. 3 представлены рассчитанные значения коэффициентов  $a_0, a_1$   $y = a_0x + a_1$  и также  $r_{xy}, r_{xy}^2, R^2$ .

**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

**Таблица 3**

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

Условия эксперимента	$a_0$	$a_1$	$R^2$	$r_{xy}$	$r_{xy}^2$
1	2	3	4	5	6
Интактные животные	0,0728	0,1209	0,9737	0,9868	0,9737
1-дневное преконд.	0,0478	0,1464	0,9327	0,9657	0,9327

Окончание табл. 3

1	2	3	4	5	6
4-дневное преконд.	0,054	0,2048	0,7628	0,8734	0,7628
7-дневное преконд.	0,0466	0,2131	0,9067	0,9522	0,9067
14-дневное преконд.	0,0386	0,2406	0,9282	0,9634	0,9282
28-дневное преконд.	0,0529	0,1827	0,9474	0,9734	0,9474

Согласно представленным данным близкое к 1, 0 значение  $r_{xy}$ ,  $R^2$  и равенство  $r_{xy}^2 = R^2$  отражают очень тесную форму линейной корреляционной связи между выбранными показателями гликолиза мозга, которая не меняется от режимов гипоксического прекондиционирования. Соответствие линейной функции задаче подбора кривой подтверждалось расчетом значений лактата и пирувата по экспериментально установленным показателям глюкозы. Максимальная относительная ошибка расчета составляла  $\delta = 0,2\%$ , что подтверждает точность выбранной модели.

В табл. 4 указаны расчеты исследуемых показателей.

Таблица 4

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

Условия эксперимента	Глюкоза ( $x_i$ )	Лактат ( $y_i$ )	Линейная аппр. (для лактата)		Пируват ( $y_i$ )	Линейная аппр. (для пирувата)	
			$\bar{y}_{ан.}$	$\delta_{отн.}, \%$		$\bar{y}_{ан.}$	$\delta_{отн.}, \%$
Интактные животные	4,1158	1,9685	1,9688	0,0085	0,4205	0,4205	0,1081
1-дневное преконд.	5,8236	2,9736	2,9735	0,0170	0,4244	0,4248	0,1857
4-дневное преконд.	4,0413	2,1736	2,1735	0,0235	0,4228	0,4230	0,0033
7-дневное преконд.	4,4712	2,1912	2,1912	0,0103	0,4215	0,4214	0,1307
14-дневное преконд.	4,2808	2,6224	2,6227	0,0261	0,4058	0,4058	0,0378
28-дневное преконд.	4,5635	2,0382	2,0380	0,0005	0,4242	0,4241	0,0195

Анализ эффективности режимов гипоксического прекондиционирования проводился визуально по графическому расположению корреляционных трендов  $y = a_0x + a_1$  гипоксического прекондиционирования (1,4,7,14,28 сутки) по отношению к графику  $y = a_0x + a_1$  интактных животных. Оптимальными считали те режимы гипоксических тренировок, корреляционные тренды которых ближе располагались к контрольному тренду.

Графики корреляционных трендов в каждом рассматриваемом случае представлены на рис. 1, 2.

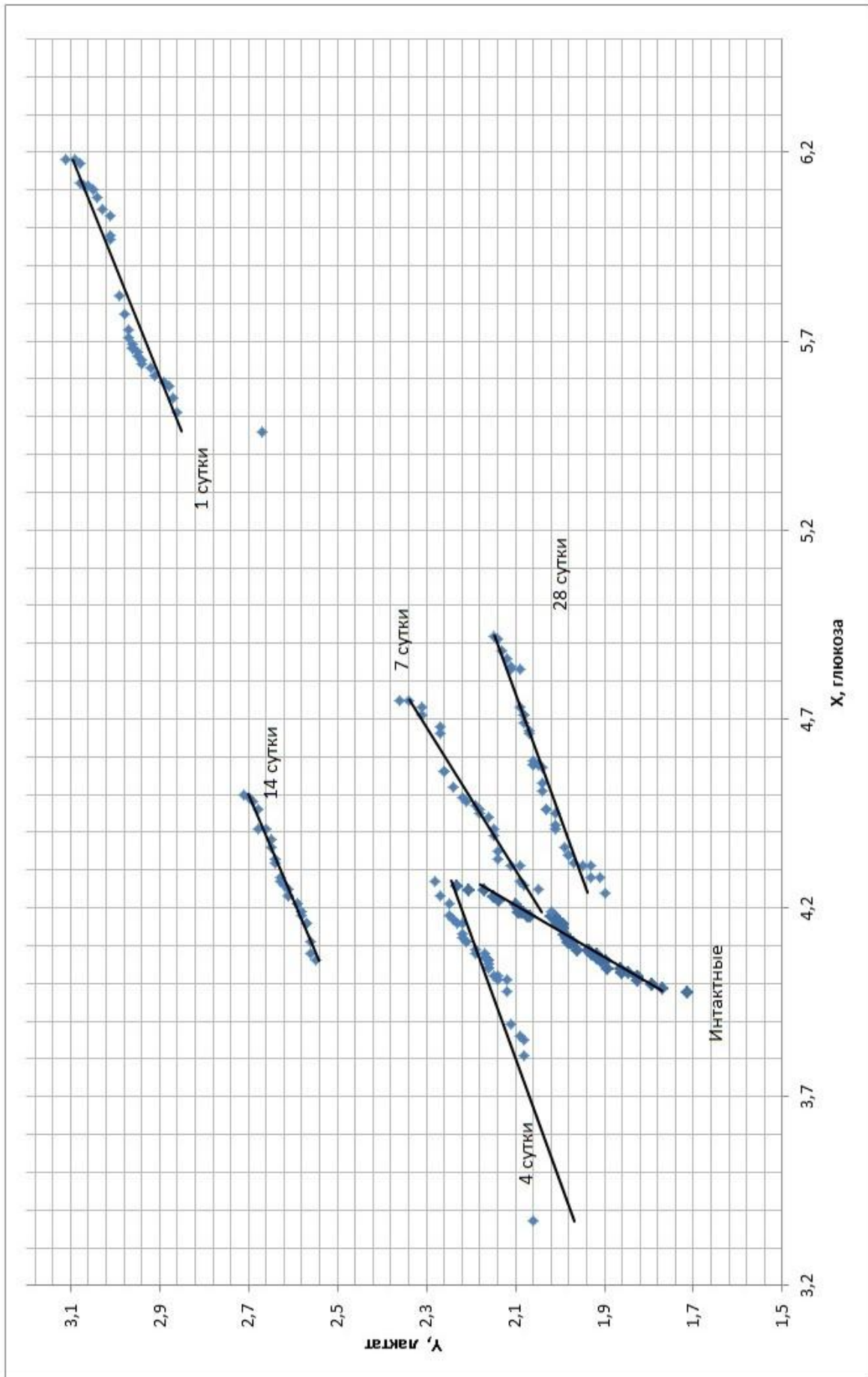


Рис.1 Корреляционные тренды вида  $y = a_0x + a_1$  зависимости глюкозы ( $x_i$ ) → лактата ( $y_i$ ) в разных условиях эксперимента

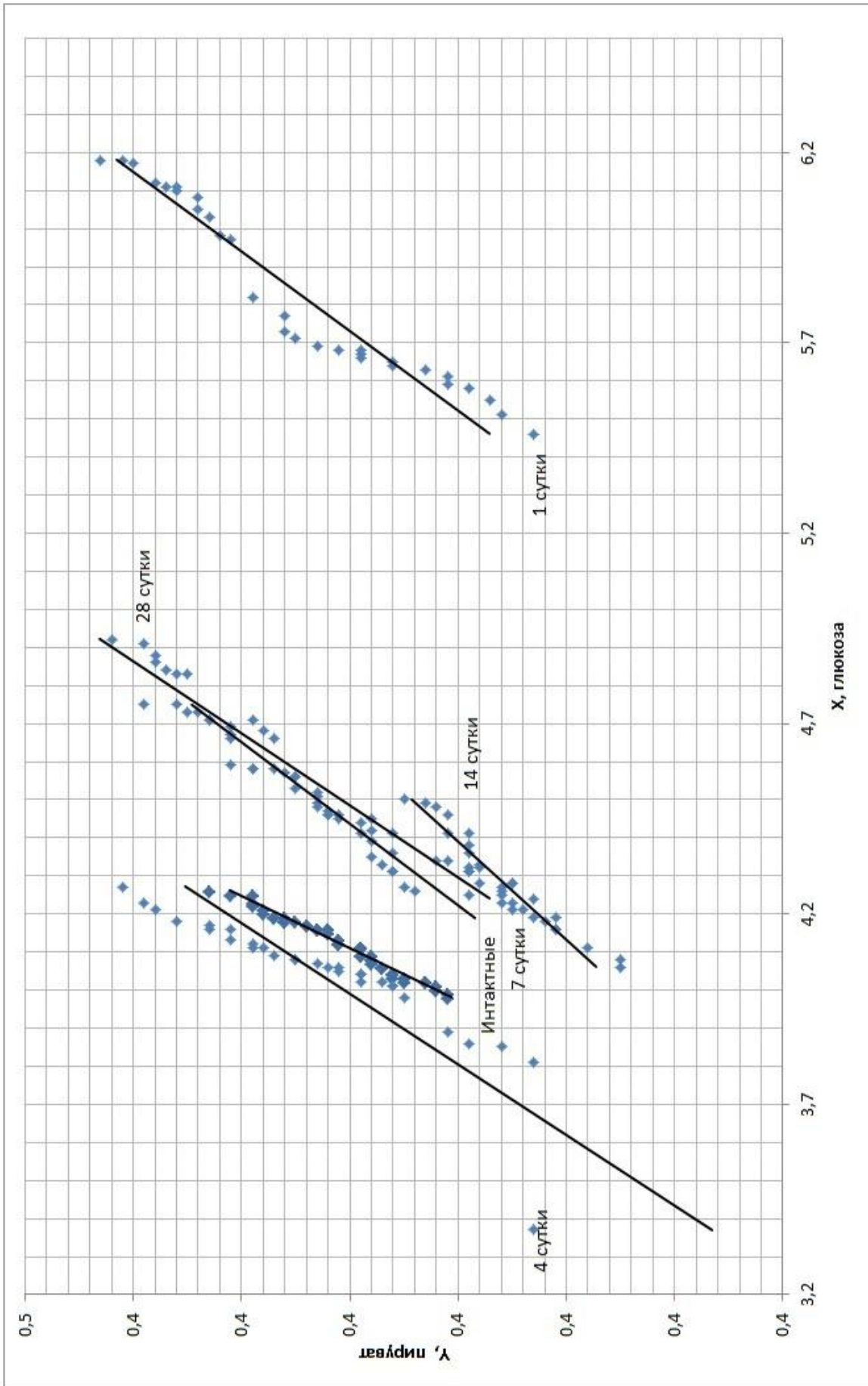


Рис.2 Корреляционные тренды вида  $y = a_0x + a_1$  зависимостей глюкозы ( $x_i$ ) → инсулина ( $y_i$ ) в разных условиях эксперимента



Из рисунков видно, что в том и в других случаях корреляционные тренды интактных животных и животных в условиях гипоксического прекондиционирования в течение 4, 7, 28 суток расположены близко, в отличие от графиков прекондиционирования 1 и 14 суток.

Высказано предположение, что режим краткосрочного прекондиционирования от 4 до 7 суток может формировать стабильную адаптацию организма животных к гипоксическому воздействию, а при длительных гипоксических тренировках в течение одного месяца стойкое развитие адаптивного процесса наступает на 28 сутки.

Это предположение было проверено дополнительно поставленным экспериментом и литературными данными. Так, проведен эксперимент в барокамере проточного типа при атмосферном давлении 145 мм рт.ст., где животные находились в течение 10-30 мин. Смертность экспериментальных животных в этом случае составляла 50%, что подтверждает формирование устойчивой адаптации мозга животных к нарушению кислородного режима. Эффект гипоксического прекондиционирования исследовался в лаборатории института физиологии им. Павлова РАМН С.А. Строевым и М.С. Самойловым (2006), Рыбниковой и др. (2006, 2008) на модели гипобарической гипоксии в течение 6 дней тренировки в серии экспериментов над крысами. Авторы отмечали, что избранный способ 6-дневного прекондиционирования существенно снижал смертность крыс во время тяжелого воздействия гипобарической гипоксии в барокамере проточного типа при давлении 160-180 мм рт. ст. в течение 3 ч.

Балыкиным М.В. с соавторами (2008) проведено сравнительное изучение структурных и ультраструктурных изменений в миокарде, печени и щитовидной железе в эксперименте на собаках в условиях высокогорья (3200 м над уровнем моря) в течение 30 дней. Согласно исследованиям этих авторов, в первые 3 дня тренировок в органах животных возникали реактивные изменения, что свидетельствовало о неустойчивом к гипоксии состоянии собак. После 30-дневной тренировки в горах отмечались признаки структурной адаптации, наиболее выраженные в миокарде правого желудочка и печени.

Таким образом, математический анализ количественной зависимости экспериментальных показателей глюкозы, лактата и пирувата в мозге крыс в условиях разных режимов гипоксического прекондиционирования установил, что:

- между глюкозой ( $x$ )  $\rightarrow$  лактатом( $y$ ) и глюкозой ( $x$ )  $\rightarrow$  пируватом( $y$ ) существует очень тесная корреляционная зависимость, которая не меняется от режимов гипоксического прекондиционирования (1-, 4-, 7-, 14- и 28-дневные тренировки);
- форма количественной зависимости между выбранными характеристиками гликолиза мозга линейная  $y = a_0x + a_1$ , объединяющая большое количество экспериментальных точек  $(x_i, y_i)$  в разных условиях нарушения кислородного режима;
- расположение корреляционных трендов гипоксического прекондиционирования по отношению к контрольному тренду (интактные животные) свидетельствует о наличии оптимальных режимов прекондиционирования;
- оптимальный краткосрочный режим прекондиционирования наблюдается в интервале 4-7 суток, длительное гипоксическое прекондиционирование формирует стойкую адаптацию к тяжелой форме дефицита кислорода на 28 сутки;
- прогнозирование эффективных режимов гипоксического прекондиционирования подтверждено экспериментальными исследованиями различных авторов;
- полученные результаты можно рекомендовать при разработке немедикаментозных методов реабилитации мозга в условиях, опасных для жизнедеятельности организма.



## Библиографический список

1. **Ерлыкина, Е.И.** Прогнозирование направленности развития адаптивного процесса при ишемии / Е.И. Ерлыкина, А.Н. Мошкова // Сборник научных статей VII Российской научно-технической конференции «Здоровье человека в XXI веке». Казань. 3-4 апреля 2015 г. С. 667–674.
2. **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.
3. **Мошкова, А.Н.** Подходы к прогнозированию адаптивного состояния энергетической системы мозга в условиях гипоксии / А.Н. Мошкова [и др.] // Москва. Бюллетень экспериментальной биологической медицины. 2010. –Т.148. – №3. С. 282–285.
4. **Мошкова, А.Н.** Исходные характеристики содержания адениновых нуклеотидов в условиях острого кислородного голодания методами математического анализа / А.Н. Мошкова [и др.] // Труды НГТУ. №1(108). 2015. С. 274–282.
5. **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. №3(110). 2015. – С. 326–333.
6. **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. – С. Петербург. 2010. С. 15–16.
7. **Мошкова, А.Н.** Анализ и прогнозирование концентрации АТФ в мозге животных в условиях гипоксии / А.Н. Мошкова, Е.М. Хватова, И.А. Русакова // Нейрохимия. – Москва. 2009. – Т. 26. – №1. С. 51–55.
8. **Мюррей, Дж.Д.** Математическая биология. Том II. Пространственные модели и их приложения в биомедицине / Дж.Д. Мюррей. – М.: Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Ижевский институт компьютерных исследований, 2011. – 1104 с.
9. **Плюснина, Т.Ю.** Математические модели в биологии: учеб. пособие / Т.Ю. Плюснина, П.В. Фурсова, Л.Д. Тёрлова, Г.Ю. Ризниченко. –2-е изд. доп. – М.: Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2014. – 136 с.
10. **Ризниченко, Г.Ю.** Лекции по математическим моделям в биологии / Г.Ю. Ризниченко. – М.-Ижевск: Изд. РХД, 2011. – 560 с.
11. **Рыбникова, Е.А.** Гипоксическое прекондиционирование предотвращает пост рессорных депрессионных состояний у крыс / Е.А. Рыбникова [и др.] // Доклады А.Н. –2006. –Т. 411. – №1. – С. 1–3.
12. **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. 81.
13. **Рыбникова, Е.А.** Анксиологический эффект гипоксического прекондиционирования у крыс и модели посттравматического стрессового расстройства. / Е.А. Рыбникова [и др.] // ВНД. – 2008. –Т. 58. №4. – С. 475–482.
14. **Самойлов, М.О.** Молекулярные механизмы кратко и долго временных эффектов гипоксического прекондиционирования / М.О.Самойлов [и др.] // Проблемы гипоксии: молекулярные, физиологические и клинические аспекты; под ред. Лукьяновой Л.Д., Ушакова И.Б. – М. 2004. С. 96–112.
15. **Сидняев, Н.И.** Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных: учеб. пособие / Н.И. Сидняев. – М.: Юрайт. 2011. С. 7–148.
16. **Строев, С.А.** Эндогенные антиоксиданты и гипоксическая толерантность мозга / С.А. Строев, М.О. Самойлов. – С. Петербург. 2006. С. 64–78.
17. **Хватова, Е.М.** Прогнозирование пределов устойчивости головного мозга к гипоксии по характеристике адениновых нуклеотидов / Е.М. Хватова, А.Н. Мошкова // Патогенез. 2008. – Т.6. – №3. – С. 92.

18. Erlykina E.I., Moshkova A.N. Characteristics of adenine nucleotide content in acute hypoxia by mathematical analysis methods – European Society for neurochemistry Biannual Mechanisms of Estonia. 14-17 June. 2015. –Springer Plus. 2015. V.4. S.1. P. 11.
19. Moshkova A.N., Khvatova E.M., Rusakova I.A. Analysis and prediction of ATP concentration in the animal brain under Hypoxic Conditions. ISBN:1819-7124 // Neurochemical Journal. 2009. – V.3. – № 1. P. 44–48.

*Дата поступления  
в редакцию 30.04.2016*

**A.N. Moshkova<sup>1</sup>, E.I. Erlykina,<sup>2</sup> Yu.I. Tsarapkina,<sup>1</sup> A.V. Bolonenkov,<sup>1</sup> Ya.Yu. Kozlova<sup>1</sup>**

**USAGE OF EMPIRICAL DEPENDENCES FOR PROGNOSTICATION  
OF HYPOXIC PRECONDITIONING OPTIMAL REGIME IN TERMS  
OF BRAIN GLYCOLYSIS INDICATORS ANALYSIS**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeyev<sup>1</sup>,  
Nizhny Novgorod State Medical Academy<sup>2</sup>

**Objective:** Prognostication of hypoxic preconditioning optimal regime on the example of the analysis of quantitative relationship between the indices of glucose, lactate and pyruvate in rat brain in development of animals' adaptation to oxygen regime violation.

**Methodology:** the current study solves the problem of curve selection to approximate dependent ratios of animal brain glycolysis under hypoxic influence of 310 mm Hg, 60 minutes duration, within 1, 4, 7, 14 and 28 days. The evaluation and analysis of the effectiveness of hypoxic preconditioning steps, promoting formation of resistant animals' adaptation to severe hypoxia have been conducted.

**Results and field of application:** optimal short-term preconditioning has been established to belong to interval of 4-7 days. The optimal long-term regime of hypoxic preconditioning is for 28 days. Development of an adaptive state of experimental animals, with 7-day preconditioning and long-term 28-day hypoxia was confirmed by additional experiments in the flow-type pressure chamber at atmospheric pressure of 145 mm Hg. for 10-30 minutes. Rat mortality in this case was 50%, indicating the formation of persistent adaptation to an extreme violation of the oxygen regime. The obtained results can be recommended for the development of non-drug methods of brain adaptation to severe hypoxia.

**Resume:** Mathematical analysis of the quantitative relationship between the experimental parameters in the brain of animals in different conditions of hypoxic preconditioning allowed to determine the best regimes of short-term and long-term preconditioning, which should be used for the rehabilitation of the brain to the adverse effects of the environment, dangerous for vital activity of the body.

*Key words:* glucose, lactate, pyruvate, hypoxic preconditioning, statistical analysis.

УДК 519.6 + 517.983.54

О.В. Матысик

**МЕТОД ИТЕРАЦИЙ НЕЯВНОГО ТИПА РЕШЕНИЯ ОПЕРАТОРНЫХ  
УРАВНЕНИЙ В ГИЛЬБЕРТОВОМ ПРОСТРАНСТВЕ**

Брестский государственный университет им. А. С. Пушкина, Беларусь

Рассматривается задача приближенного решения в гильбертовом пространстве линейного некорректного уравнения. Задача решается методом итераций неявного типа. Исследована сходимость метода с априорным выбором числа итераций в энергетической норме гильбертова пространства и изучен случай неединственного решения.

*Ключевые слова:* неявный итерационный метод, регуляризация, некорректная задача, гильбертово пространство, операторное уравнение первого рода, самосопряженный оператор, энергетическая норма.

Настоящая работа посвящена итерационному методу решения операторных линейных уравнений в гильбертовом пространстве с ограниченным, положительно определённым, самосопряжённым оператором в предположении, что погрешности имеются в правой части уравнения. Такими операторными уравнениями задаются некорректные задачи, которые были сформулированы в начале прошлого столетия [1-2] и долгое время не изучались, поскольку считалось, что они не могут отвечать никакой физической реальности и поэтому их решение не имеет смысла.

Однако потребности практики привели к необходимости решать некорректные задачи. Для их решения предложены и широко применяются метод регуляризации А. Н. Тихонова [3], метод квазирешений В. К. Иванова [4], метод невязки Д. Л. Филлипса [5] и В. К. Иванова и их модификации. Систематическое изучение некорректных задач и способов их решения началось в 50-х годах XX века, но особенно широкий размах оно приняло в последние 50 лет. Основные результаты отражены в монографиях М. М. Лаврентьева [6], А. Н. Тихонова и В. Я. Арсенина [7], В. К. Иванова, В. В. Васина и В. П. Тананы [8], О. А. Лисковца [9], Г. М. Вайникко и А. Ю. Веретенникова [10].

Наибольшее распространение получили итерационные методы решения некорректных задач [12–22]. Их частое использование связано с тем, что эти методы сравнительно легко программируются на ПЭВМ.

В статье предлагается регуляризирующий алгоритм для некорректных задач, описываемых операторными уравнениями первого рода, в виде неявного итерационного метода, обладающим более высокими скоростными качествами, чем ранее известные методы.

В [23] для предлагаемого метода при решении уравнения с приближенной правой частью исследована сходимость в исходной норме гильбертова пространства, получены априорные оценки погрешности и априорный момент останова, обоснована возможность применения к методу правила останова по поправкам.

В данной статье продолжено изучение предложенного метода. Исследована его сходимость в энергетической норме гильбертова пространства, получены априорный момент останова и условия, когда из сходимости итераций в энергетической норме гильбертова пространства следует их сходимость в исходной норме, доказана сходимость метода в случае неединственного решения.

Сравнение предлагаемого метода с хорошо известным явным методом итераций [6, 10–16]  $x_{n+1,\delta} = x_{n,\delta} + \alpha(y_\delta - Ax_{n,\delta})$ ,  $x_{0,\delta} = 0$  показывает, что порядки их оптимальных оценок одинаковы. Достоинство явных методов в том, что явные методы не требуют обращения оператора, а требуют только вычисления значений оператора на последовательных прибли-

жениях. В этом смысле явный метод [6, 10–16] предпочтительнее рассматриваемого неявного метода. Однако предлагаемый неявный метод обладает следующим важным достоинством. В явном методе [6, 10–16] на параметр  $\alpha$  накладывается ограничение сверху – неравенство  $0 < \alpha \leq \frac{5}{4\|A\|}$ , что может привести на практике к необходимости большого числа итераций.

В предлагаемом неявном методе ограничений сверху на  $\alpha > 0$  нет. Это позволяет считать  $\alpha > 0$  произвольно большим (независимо от  $\|A\|$ ), в связи с чем оптимальную оценку для неявного метода можно получить уже на первых шагах итераций.

Рассмотренный в статье итерационный метод может быть использован для решения прикладных некорректных задач, встречающихся в теории оптимального управления, математической экономике, геофизике, синтезе антенн, акустике, диагностике плазмы, в наземной или воздушной геологоразведке, автоматической обработке результатов физического эксперимента, сейсмике, спектроскопии и медицине (томографии).

Работа выполнена в рамках темы «Итерационные процедуры решения операторных уравнений первого рода» (зарегистрирована в Белорусском институте системного анализа от 20.09.2011 № 20113449)

**Постановка задачи.** В действительном гильбертовом пространстве  $H$  рассматривается уравнение первого рода

$$Ax = y, \quad (1)$$

где  $A$  – положительно определенный, ограниченный и самосопряженный оператор, для которого нуль не является собственным значением, однако принадлежит спектру оператора  $A$ , и, следовательно, задача некорректна. Пусть  $y \in R(A)$ , т.е. при точной правой части  $y$  уравнение (1) имеет единственное решение  $x$ . Для отыскания этого решения предлагается итерационная процедура неявного типа

$$(E + \alpha^2 A^{2k})x_{n+1} = (E - \alpha A^k)^2 x_n + 2\alpha A^{k-1}y, \quad x_0 = 0, \quad k \in N. \quad (2)$$

В случае приближенной правой части  $y_\delta$  ( $\|y - y_\delta\| \leq \delta$ ) соответствующие методу (2) итерации примут вид

$$(E + \alpha^2 A^{2k})x_{n+1,\delta} = (E - \alpha A^k)^2 x_{n,\delta} + 2\alpha A^{k-1}y_\delta, \quad x_{0,\delta} = 0, \quad k \in N. \quad (3)$$

Далее, как обычно, под сходимостью метода (3) понимается утверждение о том, что приближения (3) сколь угодно близко подходят к точному решению уравнения при подходящем выборе  $n$  и достаточно малых  $\delta$ , т.е. если  $\lim_{\delta \rightarrow 0} \left( \inf_n \|x - x_{n,\delta}\| \right) = 0$ .

**Сходимость метода в энергетической норме.** В предположении, что точное решение уравнения (1) истокообразно представимо, ранее [23] для метода (3) получены априорные оценки погрешности и априорный момент останова. В случае, когда нет сведений об истокообразной представимости точного решения, затруднительно получить априорные оценки погрешности и априорный момент останова. И тем не менее, метод (3) можно сделать вполне эффективным, если воспользоваться энергетической нормой гильбертова пространства  $\|x\|_A = \sqrt{(Ax, x)}$ , где  $x \in H$  ([21-22]). Докажем сходимость метода (3) в энергетической норме гильбертова пространства и получим для него в энергетической норме априорные оценки погрешности.

Рассмотрим разность

$$x - x_{n,\delta} = (x - x_n) + (x_n - x_{n,\delta}). \quad (4)$$

Запишем первое слагаемое в виде:

$$x - x_n = A^{-1} (E + \alpha^2 A^{2k})^{-n} (E - \alpha A^k)^{2n} y = (E + \alpha^2 A^{2k})^{-n} (E - \alpha A^k)^{2n} x.$$

Как было показано в [23],  $x - x_n$  бесконечно мало в исходной норме гильбертова про-

странства  $H$  при  $n \rightarrow \infty$ , но скорость сходимости при этом может быть сколь угодно малой, и для ее оценки делалось предположение об истокообразной представимости точного решения. При использовании энергетической нормы нам это дополнительное предположение не понадобится. Действительно, с помощью интегрального представления самосопряженного

оператора  $A = \int_0^M \lambda dE_\lambda$ , где  $M = \|A\|$  и  $E_\lambda$  – соответствующая спектральная функция, имеем

$$\begin{aligned} \|x - x_n\|_A^2 &= \left( A \left( E + \alpha^2 A^{2k} \right)^{-n} \left( E - \alpha A^k \right)^{2n} x, \left( E + \alpha^2 A^{2k} \right)^{-n} \left( E - \alpha A^k \right)^{2n} x \right) = \\ &= \int_0^M \lambda \left( 1 - \alpha \lambda^k \right)^{4n} \left( 1 + \alpha^2 \lambda^{2k} \right)^{-2n} d(E_\lambda x, x). \end{aligned}$$

Для оценки интересующей нас нормы найдем максимум подынтегральной функции

$$f(\lambda) = \lambda \frac{\left( 1 - \alpha \lambda^k \right)^{4n}}{\left( 1 + \alpha^2 \lambda^{2k} \right)^{2n}} \text{ при } \lambda \in [0, M]. \text{ Функция } f(\lambda) \text{ – частный случай при } s=1 \text{ функций,}$$

оцененных в [23]. Там показано, что при условии  $\alpha > 0$   $\max_{\lambda \in [0, M]} |f(\lambda)| \leq (4kn\alpha e)^{-1/k}$ . Следова-

тельно, справедлива оценка  $\|x - x_n\|_A^2 \leq (4kn\alpha e)^{-1/k} \|x\|^2$ . Отсюда  $\|x - x_n\|_A \leq (4kn\alpha e)^{-1/(2k)} \|x\|$ .

Таким образом, переход к энергетической норме как бы заменяет предположение об истокопредставимости порядка  $s = 1/2$  для точного решения.

Оценим второе слагаемое в (4). Нетрудно показать, что

$$x_n - x_{n,\delta} = A^{-1} \left[ E - \left( E + \alpha^2 A^{2k} \right)^{-n} \left( E - \alpha A^k \right)^{2n} \right] (y - y_\delta).$$

Воспользовавшись интегральным представлением самосопряженного оператора, по-

лучим  $\|x_n - x_{n,\delta}\|_A^2 = \int_0^M \lambda^{-1} \left[ 1 - \frac{\left( 1 - \alpha \lambda^k \right)^{2n}}{\left( 1 + \alpha^2 \lambda^{2k} \right)^n} \right]^2 d(E_\lambda (y - y_\delta), y - y_\delta)$ . Обозначим через

$$g(\lambda) = \lambda^{-1} \left[ 1 - \frac{\left( 1 - \alpha \lambda^k \right)^{2n}}{\left( 1 + \alpha^2 \lambda^{2k} \right)^n} \right]^2 \text{ подынтегральную функцию, а через}$$

$$g_1(\lambda) = \lambda^{-1} \left[ 1 - \frac{\left( 1 - \alpha \lambda^k \right)^{2n}}{\left( 1 + \alpha^2 \lambda^{2k} \right)^n} \right], \text{ тогда } g(\lambda) = g_1(\lambda) \left[ 1 - \frac{\left( 1 - \alpha \lambda^k \right)^{2n}}{\left( 1 + \alpha^2 \lambda^{2k} \right)^n} \right]. \text{ Функция } g_1(\lambda) \text{ была оце-}$$

нена в [23]: при условии  $\alpha > 0$   $g_1(\lambda) \leq 2k(n\alpha)^{1/k}$ . При этом же условии имеем

$\frac{\left( 1 - \alpha \lambda^k \right)^2}{1 + \alpha^2 \lambda^{2k}} \leq 1, \forall \lambda \in [0, M]$ , поэтому  $1 - \frac{\left( 1 - \alpha \lambda^k \right)^{2n}}{\left( 1 + \alpha^2 \lambda^{2k} \right)^n} \leq 1$ , откуда  $g(\lambda) \leq 2k(n\alpha)^{1/k}$ . Таким обра-

зом,  $\|x_n - x_{n,\delta}\|_A^2 \leq 2k(n\alpha)^{1/k} \delta^2$ , откуда  $\|x_n - x_{n,\delta}\|_A \leq 2^{1/2} k^{1/2} (n\alpha)^{1/(2k)} \delta, n \geq 1$ . Поскольку

$$\|x - x_{n,\delta}\|_A \leq \|x - x_n\|_A + \|x_n - x_{n,\delta}\|_A \leq \|x - x_n\|_A + 2^{1/2} k^{1/2} (n\alpha)^{1/(2k)} \delta$$

и  $\|x - x_n\|_A \rightarrow 0, n \rightarrow \infty$ , то для сходимости  $\|x - x_{n,\delta}\|_A \rightarrow 0, n \rightarrow \infty$ , достаточно, что-

бы  $n^{1/(2k)} \delta \rightarrow 0$  при  $n \rightarrow \infty, \delta \rightarrow 0$ . Итак, доказана

**Теорема 1.** При условии  $\alpha > 0$  итерационный метод (3) сходится в энергетической норме гильбертова пространства, если число итераций  $n$  выбирать из условия  $n^{1/(2k)}\delta \rightarrow 0$  при  $n \rightarrow \infty, \delta \rightarrow 0$ .

Запишем теперь общую оценку погрешности для метода (3) в энергетической норме

$$\|x - x_{n,\delta}\|_A \leq (4kn\alpha e)^{-1/(2k)} \|x\| + 2^{1/2} k^{1/2} (n\alpha)^{1/(2k)} \delta, \quad n \geq 1. \quad (5)$$

Оптимизируем оценку (5) по  $n$ . Для этого при заданном  $\delta$  найдем такое значение числа итераций  $n$ , при котором оценка погрешности становится минимальной. Приравняв нулю производную по  $n$  от правой части неравенства (5), получим

$$n_{\text{опт}} = 2^{-(k+2)/2} k^{-(k+1)/2} \alpha^{-1} e^{-1/2} \delta^{-k} \|x\|^k. \quad (6)$$

Подставив  $n_{\text{опт}}$  в оценку (5), найдем ее оптимальное значение

$$\|x - x_{n,\delta}\|_A^{\text{опт}} \leq 2^{(5k-2)/(4k)} k^{(k-1)/(4k)} e^{-1/(4k)} \delta^{1/2} \|x\|^{1/2}. \quad (7)$$

Таким образом, справедлива

**Теорема 2.** Оптимальная оценка погрешности для метода (3) при условии  $\alpha > 0$  в энергетической норме имеет вид (7) и получается при  $n_{\text{опт}}$  из (6).

Отметим тот факт, что для сходимости метода (3) в энергетической норме достаточно выбирать число итераций  $n = n(\delta)$  так, чтобы  $n^{1/(2k)}\delta \rightarrow 0, n \rightarrow \infty, \delta \rightarrow 0$ . Однако  $n_{\text{опт}} = O(\delta^{-k})$ , т. е.  $n_{\text{опт}}$  относительно  $\delta$  имеет порядок  $\delta^{-k}$ , и такой порядок обеспечивает сходимость метода (3).

**Замечание 1.** Из неравенства (7) вытекает, что оптимальная оценка погрешности не зависит от параметра  $\alpha$ . Но  $n_{\text{опт}}$  зависит от  $\alpha$  и, поскольку на  $\alpha$  нет ограничений сверху ( $\alpha > 0$ ), то за счет выбора  $\alpha$  можно получить  $n_{\text{опт}} = 1$ , т.е. оптимальная оценка погрешности будет достигаться уже на первых шагах итераций. Для этого достаточно взять  $\alpha_{\text{опт}} = 2^{-(k+2)/2} k^{-(k+1)/2} e^{-1/2} \delta^{-k} \|x\|^k$ .

Рассмотрим вопрос о том, когда из сходимости в энергетической норме следует сходимость в обычной норме гильбертова пространства  $H$ . Эти условия дает

**Теорема 3.** Если выполнены условия 1)  $E_\varepsilon x_{n,\delta} = 0$ , 2)  $E_\varepsilon x = 0$ , где  $E_\varepsilon = \int_0^\varepsilon dE_\lambda$ ,

$\varepsilon$  – фиксированное положительное число ( $0 < \varepsilon < \|A\|$ ), то из сходимости  $x_{n,\delta}$  к решению  $x$  в энергетической норме следует сходимость в обычной норме гильбертова пространства.

Доказательство. Так как по условию теоремы  $E_\varepsilon x_{n,\delta} = 0$  и  $E_\varepsilon x = 0$ , то

$E_\varepsilon(x_{n,\delta} - x) = 0$  и  $(E_\varepsilon(x_{n,\delta} - x), x_{n,\delta} - x) = 0$ , т. е.  $\int_0^\varepsilon d(E_\lambda(x_{n,\delta} - x), x_{n,\delta} - x) = 0$ . Следова-

тельно, справедливо записать  $\int_0^\varepsilon \frac{1}{\lambda} d(E_\lambda(x_{n,\delta} - x), A(x_{n,\delta} - x)) = 0$ . Тогда получим, что

$$\begin{aligned} \|x_{n,\delta} - x\|^2 &= \int_0^M \frac{1}{\lambda} d(E_\lambda(x_{n,\delta} - x), A(x_{n,\delta} - x)) = \\ &= \int_0^\varepsilon \frac{1}{\lambda} d(E_\lambda(x_{n,\delta} - x), A(x_{n,\delta} - x)) + \int_\varepsilon^M \frac{1}{\lambda} d(E_\lambda(x_{n,\delta} - x), A(x_{n,\delta} - x)) = \end{aligned}$$

$$= \int_{\varepsilon}^M \frac{1}{\lambda} d(E_{\lambda}(x_{n,\delta} - x), A(x_{n,\delta} - x)) \leq \frac{1}{\varepsilon} \|x_{n,\delta} - x\|_A^2.$$

Теорема 3 доказана.

**Замечание 2.** Так как  $x_{n,\delta} = A^{-1} \left[ E - (E + \alpha^2 A^{2k})^{-n} (E - \alpha A^k)^{2n} \right] y_{\delta}$ , то для того, чтобы  $x_{n,\delta}$  удовлетворяло условию  $E_{\varepsilon} x_{n,\delta} = 0$ , достаточно потребовать, чтобы  $E_{\varepsilon} y_{\delta} = 0$ . Таким образом, если  $E_{\varepsilon} x = 0$  и  $E_{\varepsilon} y_{\delta} = 0$ , то из сходимости метода итераций в энергетической норме следует его сходимость в обычной норме пространства  $H$ . Следовательно, для получения оценки погрешности не потребуется предположения истокорпредставимости точного решения.

**Сходимость метода в случае неединственного решения.** Покажем, что метод пригоден и в случае, когда  $\lambda = 0$  является собственным значением оператора  $A$  (случай неединственного решения уравнения (1)).

Обозначим через  $N(A) = \{x \in H / Ax = 0\}$ ,  $M(A)$  – ортогональное дополнение ядра  $N(A)$  до  $H$ . Пусть  $P(A)x$  – проекция  $x \in H$  на  $N(A)$ , и  $\Pi(A)x$  – проекция  $x \in H$  на  $M(A)$ . Справедлива

**Теорема 4.** Пусть  $A = A^* \geq 0$ ,  $y \in H$ ,  $\alpha > 0$ , тогда для итерационного метода (2) верны следующие утверждения:

$$а) Ax_n \rightarrow \Pi(A)y, \|Ax_n - y\| \rightarrow I(A, y) = \inf_{x \in H} \|Ax - y\|;$$

б) итерационный метод (2) сходится тогда и только тогда, когда уравнение  $Ax = \Pi(A)y$  разрешимо. В последнем случае  $x_n \rightarrow P(A)x_0 + x^*$ , где  $x^*$  – минимальное решение.

**Доказательство.** Применим оператор  $A$  к формуле (2), получим

$$A(E + \alpha^2 A^{2k})x_n = A(E - \alpha A^k)^2 x_{n-1} + 2\alpha A^k y,$$

где  $y = P(A)y + \Pi(A)y$ .

Так как  $AP(A)y = 0$ , то получим  $A(E + \alpha^2 A^{2k})x_n = A(E - \alpha A^k)^2 x_{n-1} + 2\alpha A^k \Pi(A)y$ , отсюда  $(E + \alpha^2 A^{2k})(Ax_n - \Pi(A)y) = (E - \alpha A^k)^2 (Ax_{n-1} - \Pi(A)y)$ . Обозначим  $Ax_n - \Pi(A)y = v_n$ ,

$v_n \in M(A)$ , тогда  $(E + \alpha^2 A^{2k})v_n = (E - \alpha A^k)^2 v_{n-1}$ . Отсюда

$v_n = (E + \alpha^2 A^{2k})^{-1} (E - \alpha A^k)^2 v_{n-1}$ , следовательно,  $v_n = (E + \alpha^2 A^{2k})^{-n} (E - \alpha A^k)^{2n} v_0$ .

Имеем  $A \geq 0$  и  $A$  – положительно определен в  $M(A)$ , т.е.  $(Ax, x) > 0 \quad \forall x \in M(A)$ . Так как

$\alpha > 0$ , то  $\left\| (E + \alpha^2 A^{2k})^{-1} (E - \alpha A^k)^2 \right\| \leq 1$ . Поэтому справедлива цепочка неравенств

$$\begin{aligned} \|v_n\| &= \left\| (E + \alpha^2 A^{2k})^{-n} (E - \alpha A^k)^{2n} v_0 \right\| = \left\| \int_0^{\|A\|} \frac{(1 - \alpha \lambda^k)^{2n}}{(1 + \alpha^2 \lambda^{2k})^n} dE_{\lambda} v_0 \right\| \leq \\ &\leq \left\| \int_0^{\varepsilon} \frac{(1 - \alpha \lambda^k)^{2n}}{(1 + \alpha^2 \lambda^{2k})^n} dE_{\lambda} v_0 \right\| + \left\| \int_{\varepsilon}^{\|A\|} \frac{(1 - \alpha \lambda^k)^{2n}}{(1 + \alpha^2 \lambda^{2k})^n} dE_{\lambda} v_0 \right\| \leq \\ &\leq \left\| \int_0^{\varepsilon} dE_{\lambda} v_0 \right\| + q^n(\varepsilon) \left\| \int_{\varepsilon}^{\|A\|} dE_{\lambda} v_0 \right\| \leq \|E_{\varepsilon} v_0\| + q^n(\varepsilon) \|v_0\| \rightarrow 0, \end{aligned}$$

при  $n \rightarrow \infty$ ,  $\varepsilon \rightarrow 0$ . Здесь  $\frac{(1 - \alpha \lambda^k)^2}{1 + \alpha^2 \lambda^{2k}} \leq q(\varepsilon) < 1$  при  $\lambda \in [\varepsilon, \|A\|]$ . Следовательно,  $\nu_n \rightarrow 0$ ,  
 $n \rightarrow \infty$ , откуда  $Ax_n \rightarrow \Pi(A)y$  и  $\Pi(A)y \in A(H)$ . Отсюда  
 $\|Ax_n - y\| \rightarrow \|\Pi(A)y - y\| = \|P(A)y\| = I(A, y)$  [11]. Итак, утверждение *a* доказано.

Докажем *б*. Пусть процесс (2) сходится. Покажем, что уравнение  $Ax = \Pi(A)y$  разрешимо. Из сходимости  $\{x_n\} \in H$  к  $z \in H$  и из *a* следует, что  $Ax_n \rightarrow Az = \Pi(A)y$ , следовательно,  $\Pi(A)y \in A(H)$  и уравнение  $\Pi(A)y = Ax$  разрешимо.

Пусть теперь  $\Pi(A)y \in A(H)$  (уравнение  $\Pi(A)y = Ax$  разрешимо), следовательно,  $\Pi(A)y = Ax^*$ , где  $x^*$  – минимальное решение уравнения  $Ax = y$  (оно единственно в  $M(A)$ ). Тогда (2) примет вид

$$\begin{aligned} (E + \alpha^2 A^{2k})x_n &= (E - \alpha A^k)^2 x_{n-1} + 2\alpha A^{k-1} \Pi(A)y = \\ &= (E - \alpha A^k)^2 x_{n-1} + 2\alpha A^k x^* = (E + \alpha^2 A^{2k})x_{n-1} - \\ &- 2\alpha A^k x_{n-1} + 2\alpha A^k x^* = (E + \alpha^2 A^{2k})x_{n-1} + 2\alpha A^k (x^* - x_{n-1}). \end{aligned}$$

Отсюда  $x_n = x_{n-1} + 2\alpha A^k (E + \alpha^2 A^{2k})^{-1} (x^* - x_{n-1})$ . Последнее равенство разобьем на два:

$$P(A)x_n = P(A)x_{n-1} + 2\alpha (E + \alpha^2 A^{2k})^{-1} A^k P(A)(x^* - x_{n-1}) = P(A)x_{n-1} = P(A)x_0,$$

так как  $AP(A)(x^* - x_{n-1}) = 0$ .

$$\begin{aligned} \Pi(A)x_n &= \Pi(A)x_{n-1} + 2\alpha (E + \alpha^2 A^{2k})^{-1} A^k \Pi(A)(x^* - x_{n-1}) = \\ &= \Pi(A)x_{n-1} + 2\alpha (E + \alpha^2 A^{2k})^{-1} A^k (\Pi(A)x^* - \Pi(A)x_{n-1}) = \\ &= \Pi(A)x_{n-1} + 2\alpha (E + \alpha^2 A^{2k})^{-1} A^k (x^* - \Pi(A)x_{n-1}), \end{aligned}$$

так как  $x^* \in M(A)$ .

Обозначим через  $\omega_n = \Pi(A)x_n - x^*$ , тогда из равенства  $\Pi(A)x_n - x^* = \Pi(A)x_{n-1} - x^* + 2\alpha (E + \alpha^2 A^{2k})^{-1} A^k (x^* - \Pi(A)x_{n-1})$  получим

$$\begin{aligned} \omega_n &= \omega_{n-1} - 2\alpha (E + \alpha^2 A^{2k})^{-1} A^k \omega_{n-1} = \\ &= (E + \alpha^2 A^{2k})^{-1} (E - \alpha A^k)^2 \omega_{n-1} = (E + \alpha^2 A^{2k})^{-n} (E - \alpha A^k)^{2n} \omega_0. \end{aligned}$$

Тогда

$$\begin{aligned} \|\omega_n\| &= \left\| (E + \alpha^2 A^{2k})^{-n} (E - \alpha A^k)^{2n} \omega_0 \right\| = \left\| \int_0^{\|A\|} \frac{(1 - \alpha \lambda^k)^{2n}}{(1 + \alpha^2 \lambda^{2k})^n} dE_\lambda \omega_0 \right\| \leq \\ &\leq \left\| \int_0^\mu \frac{(1 - \alpha \lambda^k)^{2n}}{(1 + \alpha^2 \lambda^{2k})^n} dE_\lambda \omega_0 \right\| + \left\| \int_\mu^{\|A\|} \frac{(1 - \alpha \lambda^k)^{2n}}{(1 + \alpha^2 \lambda^{2k})^n} dE_\lambda \omega_0 \right\| \leq \\ &\leq \left\| \int_0^\mu dE_\lambda \omega_0 \right\| + l^n(\mu) \left\| \int_\mu^{\|A\|} dE_\lambda \omega_0 \right\| \leq \|E_\mu \omega_0\| + l^n(\mu) \|\omega_0\| \rightarrow 0 \end{aligned}$$



при  $n \rightarrow \infty$ ,  $\mu \rightarrow 0$ . Здесь  $\frac{(1 - \alpha \lambda^k)^2}{1 + \alpha^2 \lambda^2} \leq l(\mu) < 1$  при  $\lambda \in [\mu, \|A\|]$ . Таким образом,  $\Pi(A)x_n \rightarrow x^*$ .

Отсюда  $x_n \rightarrow P(A)x_n + \Pi(A)x_n \rightarrow P(A)x_0 + x^*$ . Теорема 4 доказана.

**Замечание 3.** Так как у нас  $x_0 = 0$ , то  $x_n \rightarrow x^*$ , т.е. итерационный метод (2) сходится к нормальному решению, т.е. к решению с минимальной нормой.

В работе изучены некоторые свойства предложенного неявного итерационного метода решения некорректных задач: доказана сходимость метода в энергетической норме гильбертова пространства, получены априорная оценка погрешности и априорный момент останова, изучена сходимость метода в случае неединственного решения.

### Библиографический список

1. **Hadamard, J.** Sur les problemes aux derivees partielles et leur signification physique / J. Hadamard // Bull. Univ. Princeton. 1902. Vol. 13. P. 49–52.
2. **Hadamard, J.** Le problème de Cauchy et les équations aux dérivées partielles linéaires hyperboliques / J. Hadamard. – Paris: Hermann et cie, 1932. – 542 p.
3. **Тихонов, А. Н.** О решении некорректно поставленных задач и методе регуляризации // Доклады АН СССР. – 1963. Т. 151. № 3. С. 501–504.
4. **Иванов, В. К.** О приближенном решении операторных уравнений первого рода / В. К. Иванов // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1966. Т. 6. № 6. С. 1089–1094.
5. **Phillips, D. L.** A technique for the numerical solution of certain integral equations of the first kind / D. L. Phillips // J. Assoc. Comput. Mach. 1962. Vol. 9. № 1. P. 84–97.
6. **Лаврентьев, М. М.** О некоторых некорректных задачах математической физики / М. М. Лаврентьев. – Новосибирск: СО АН СССР, 1962. – 92 с.
7. **Тихонов, А. Н.** Методы решения некорректных задач / А. Н. Тихонов, В. Я. Арсенин. – М.: Наука, 1979. – 288 с.
8. **Иванов, В. К.** Теория линейных некорректных задач и её приложения / В. К. Иванов, В. В. Васин, В. П. Танана. – М.: Наука, 1978. – 206 с.
9. **Лисковец, О. А.** Вариационные методы решения неустойчивых задач / О. А. Лисковец. – Минск: Наука и техника, 1981. – 342 с.
10. **Вайникко, Г.М.** Итерационные процедуры в некорректных задачах / Г.М. Вайникко, А.Ю. Веретенников. – М.: Наука. – 1986. – 178 с.
11. **Bialy, H.** Iterative Behandlung Linearer Funktionsgleichungen / H. Bialy // Arch. Ration. Mech. and Anal. 1959. Vol. 4. N. 2. P. 166–176.
12. **Константинова, Я. В.** Оценки погрешности в методе итераций для уравнений I рода / Я. В. Константинова, О. А. Лисковец // Вестник Белорус. ун-та. Серия 1. – 1973. № 1. С. 9–15.
13. **Samarsky, A. A.** Numerical Methods for Solving Inverse Problems of Mathematical Physics / A. A. Samarsky, P. N. Vabishchevitch. – Berlin : De Gruyter, 2007. – 480 p.
14. **Денисов, А. М.** Введение в теорию обратных задач / А. М. Денисов. – М.: МГУ, 1994. – 207 с.
15. **Vogel, C. R.** Computational methods for inverse problems / C. R. Vogel. – Philadelphia: SIAM, 2002. – 183 p.
16. **Gilyazov, S. F.** Regularization of ill-posed problems by iteration methods / S. F. Gilyazov, N. L. Gol'dman. – Dordrecht ets.: Kluwer Acad. Publ., 2000. – 340 p.
17. **Kilmer, M. E.** Choosing regularization parameters in iterative methods for ill-posed problems / M. E. Kilmer, D. P. O'Leary // SIAM J. Matrix Anal. & Appl. 2001. Vol. 22. N. 4. P. 1204–1221.
18. **Vasin, V. V.** Ill-posed problems with a priori information / V. V. Vasin, A. L. Ageev. – Utrecht : VSP, 1995. – 239 p.
19. **Kabanikhin, S. I.** Inverse and Ill-Posed Problems. Theory and Applications / S. I. Kabanikhin. – Berlin: De Gruyter, 2011. – 459 p.
20. **Bakushinsky, A. B.** Iterative methods for ill-posed problems / A. B. Bakushinsky, V. Yu. Kokurin, A. B. Smirnova. – Berlin : De Gruyter, 2011. – 136 p.

21. **Matysik, O. V. M. A. Krasnosel'skii theorem and iterative methods for solving ill-posed linear problems with a self-adjoint operator** / O. V. Matysik, P. P. Zabreiko // *Comput. Methods Appl. Math. (De Gruyter)*. 2015. Vol. 15. N. 3. P. 373–389.
22. **Матысик, О. В.** Итерационная регуляризация некорректных задач / О. В. Матысик. – Deutschland: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. – 188 с.
23. **Матысик, О. В.** Итерационная регуляризация некорректных уравнений первого рода / О. В. Матысик // *Тр. Нижегород. гос. техн. ун-та им. П.Е. Алексеева*. – 2015. № 4 (111). С. 52–61.

*Дата поступления  
в редакцию 01.04.2016*

**O.V. Matysik**

## **THE ITERATION METHOD OF IMPLICIT TYPE FOR SOLVING OPERATOR EQUATIONS IN HILBERT SPACE**

Brest State University n. a. A. S. Pushkin, Belarus

**Purpose:** Suggest regularizing algorithm for ill-posed problems, study its properties and to compare it with the previously known methods.

**Design/methodology/approach:** To construct the iteration method used is the most common of the currently known approaches to solving ill-posed problems - an approach based on the entered academician A.N. Tikhonov regularizer concept, as well as the general theory of ill-posed problems, the theory of functional analysis and computational mathematics.

**Findings:** Designed and studied effective implicit iteration method for ill-posed problems described by operator equations of the first kind.

**Research limitation/implication:** There are some unresolved questions - the study of convergence of the method in the case is not exactly given operator.

**Originality/value:** The research results can be applied for solving applied incorrect problems encountered in economics, spectroscopy and tomography, geophysical, engineering and management.

*Key words:* Implicit iteration method, regularization, ill-posed problem, Hilbert space, operator equation of the first kind, self-adjoint operator, the energy norm.

УДК 004.8

П.А. Шагалова<sup>1</sup>, Э.С. Соколова<sup>1</sup>, Т.Г. Щербатюк<sup>2</sup>, М.И. Яшанова<sup>2</sup>

## РАСПОЗНАВАНИЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУР ПЛАЗМЫ КРОВИ НА ОСНОВЕ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

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

**Цель:** Исследование применения сверточных нейронных сетей в задаче распознавания кристаллических структур плазмы крови.

**Методология / подход:** аппарат искусственных нейронных сетей.

**Результаты:** предложен подход, основанный на сверточной нейронной сети, позволяющий выполнить поиск кристаллических структур, специфических при диагностике сахарного диабета.

**Применение:** описанный в работе подход позволяет выполнить поиск визуальных шаблонов кристаллических структур биожидкости.

**Оригинальность / значение:** данное исследование может быть использовано при разработке системы автоматизации метода диагностики, основанного на анализе кристаллических структур биологической жидкости.

*Ключевые слова:* сверточная нейронная сеть, машинное зрение, кристаллическая структура, биологическая жидкость.

Клиновидная дегидратация [6] – медицинский метод диагностики, основанный на визуальном анализе структур, полученных в результате кристаллизации биологической жидкости. Этот метод является простым, оперативным, дешевым, безреагентным, малоинвазивным и в настоящее время реализуется специалистами вручную. Автоматизация метода позволит исключить человеческий фактор, снизит трудозатратность и стоимость метода. Задача поиска и распознавания кристаллических структур, образующихся при возникновении патологии, является одной из важных подзадач автоматизации метода. Анализ существующих подходов и разработка алгоритмов, позволяющих выполнить поиск таких структур, и является целью данного исследования.

### Постановка задачи и входные данные

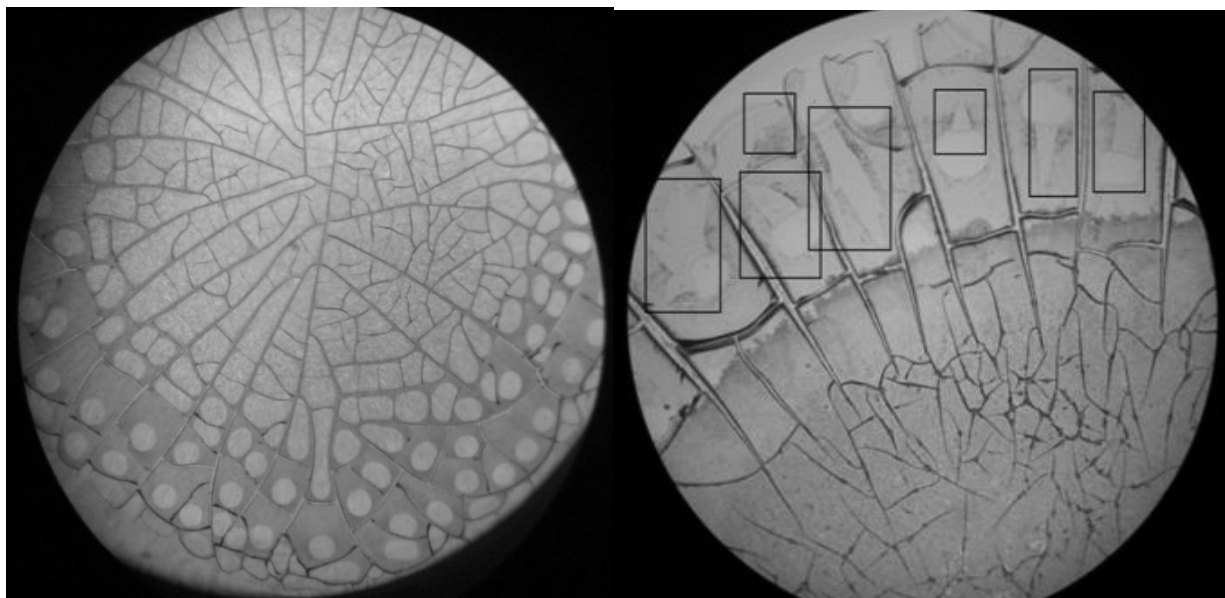
Любое изменение биохимического состояния внутренней среды организма отражается на структуре биожидкости. В данной работе анализируемой биожидкостью является плазма крови и производится поиск элементов, специфических для сахарного диабета. В норме при высыхании капли плазмы крови можно наблюдать регулярные и однородные структуры. При возникновении патологии наблюдаются аномальные и специфические структуры. На рис. 1 приведены примеры изображений, полученных в результате высыхания капли плазмы крови и отмечены кристаллические структуры, которые мы будем рассматривать далее.

Рассматриваемая нами задача относится к классу задач машинного зрения [5]. Входными данными являются изображения пленки, полученной в результате высыхания капли плазмы крови. Для поиска на этих изображениях специфических элементов будем использовать сверточные искусственные нейронные сети [1-3]. Нейронные сети – мощный и гибкий инструмент, для решения задачи предложена архитектура, разработанная и успешно применяемая для распознавания образов. Она активно используется, лежит в основе множества систем распознавания и демонстрирует высокую точность даже в сложных условиях (например, в условиях внутрикласовой изменчивости, перекрытия объектов, изменения освещения).

Предложен следующий алгоритм решения задачи:

- подготовка обучающей выборки;

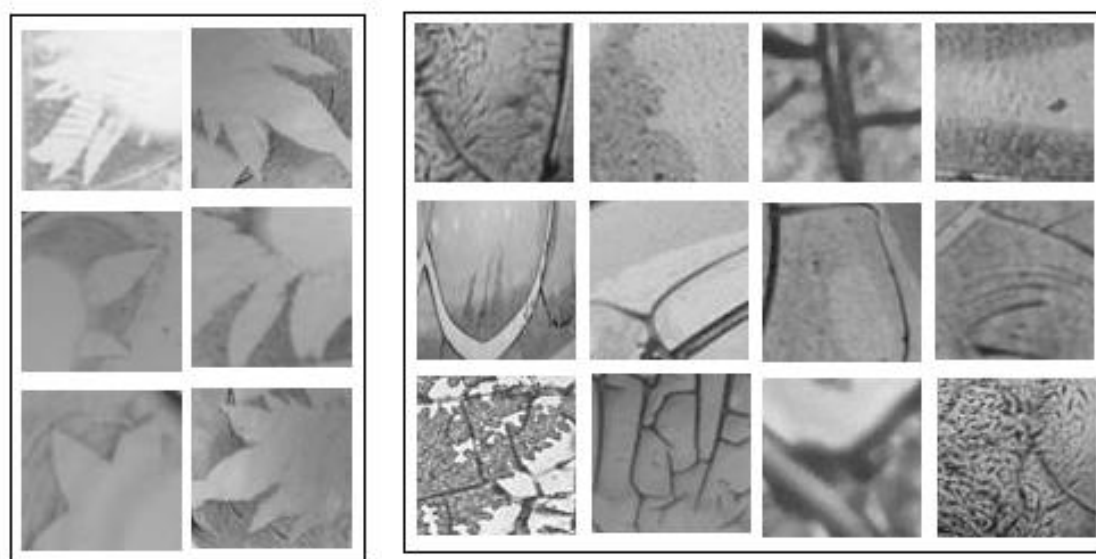
- обучение сверточной нейронной сети для решения задачи распознавания искомых структур;
- проход скользящим окном по входному изображению и применение обученного классификатора для каждого окна;
- использование скользящего окна не только на исходном изображении, но и на его уменьшенных копиях (для поиска объектов разных размеров);
- удаление множественных срабатываний(откликов).



**Рис. 1. Фотографии пленки, полученной в результате кристаллизации капли крови. Слева – норма, справа – сахарный диабет**

### Экспериментальная часть

В базе данных имеется 300 изображений, содержащих требуемые объекты. Из этих 300 изображений 200 были использованы для подготовки обучающей выборки, а остальные 100 - для тестирования системы. Каждый обучающий пример представляет собой фрагмент изображения, размер которого должен быть равен размеру скользящего окна.



**Рис. 2. Обучающая выборка. Слева - примеры искомых структур, справа – примеры фона**

Предварительно каждое изображение было преобразовано из цветного в полутоновое и использован медианный фильтр для устранения импульсного шума. Далее была составлена обучающая выборка, в которую вошли примеры двух классов (рис. 2). Основной класс – фрагменты изображений, содержащие искомые структуры, второй класс – фрагменты фона. На изображениях, предназначенных для обучения, было выделено 350 объектов основного класса. Указанное количество является недостаточным для обучения нейронной сети, поэтому был применен метод, позволяющий сгенерировать дополнительные примеры из существующих. Метод заключается в получении новых примеров путем небольшого смещения или поворота существующих примеров. Применение этого метода дало дополнительно 750 примеров. Фрагменты фоновых обучающих примеров на первом этапе были выбраны произвольно. Количество обучающих примеров второго класса было выбрано равным 8000 с учетом того, что их количество должно в разы превышать количество искомым элементов.

Для разработки архитектуры и обучения нейронной сети был выбран пакет MatConvNet. Выбор именно этого инструмента обусловлен его простотой, функциональностью, гибкостью, наличием документации и возможностью смоделировать любую из известных сверточных нейронных сетей. Подбор параметров искусственной нейронной сети для каждой конкретной задачи осуществляется эмпирическим путем.

В качестве метрик оценки эффективности разрабатываемой системы были использованы точность (precision) и полнота (recall), формулы (1, 2). Первая метрика отражает процент объектов, действительно являющихся объектами основного класса среди всех объектов, распознанных системой как основной класс. Вторая метрика отражает отношение количества найденных объектов основного класса к общему количеству объектов основного класса.

$$Precision = \frac{tp}{tp+fp}, \quad (1)$$

где  $tp$  - количество объектов основного класса, распознанных системой;  
 $fp$  - количество ложных срабатываний;

$$Recall = \frac{tp}{tp+fn}, \quad (2)$$

где  $tp$  - количество объектов основного класса, распознанных системой;  
 $fn$  - количество объектов основного класса, не распознанных системой;

После проведения ряда экспериментов была получена следующая структура нейронной сети (рис. 3).

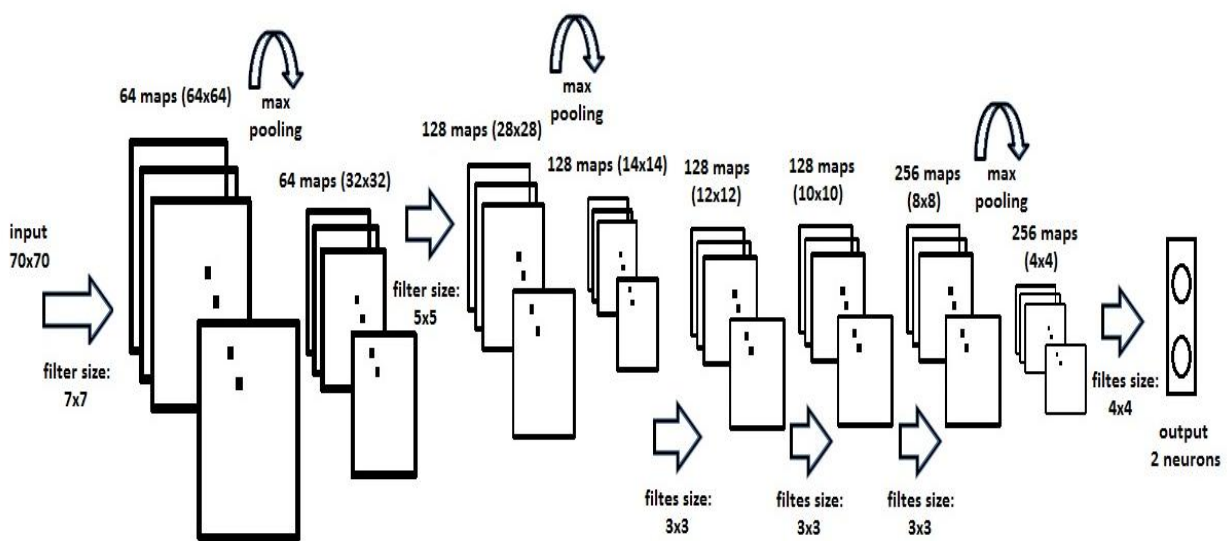


Рис. 3. Архитектура нейронной сети

Представленная архитектура была обучена на сформированной выборке, затем для каждого тестового примера, согласно предложенному алгоритму, была построена пирамида

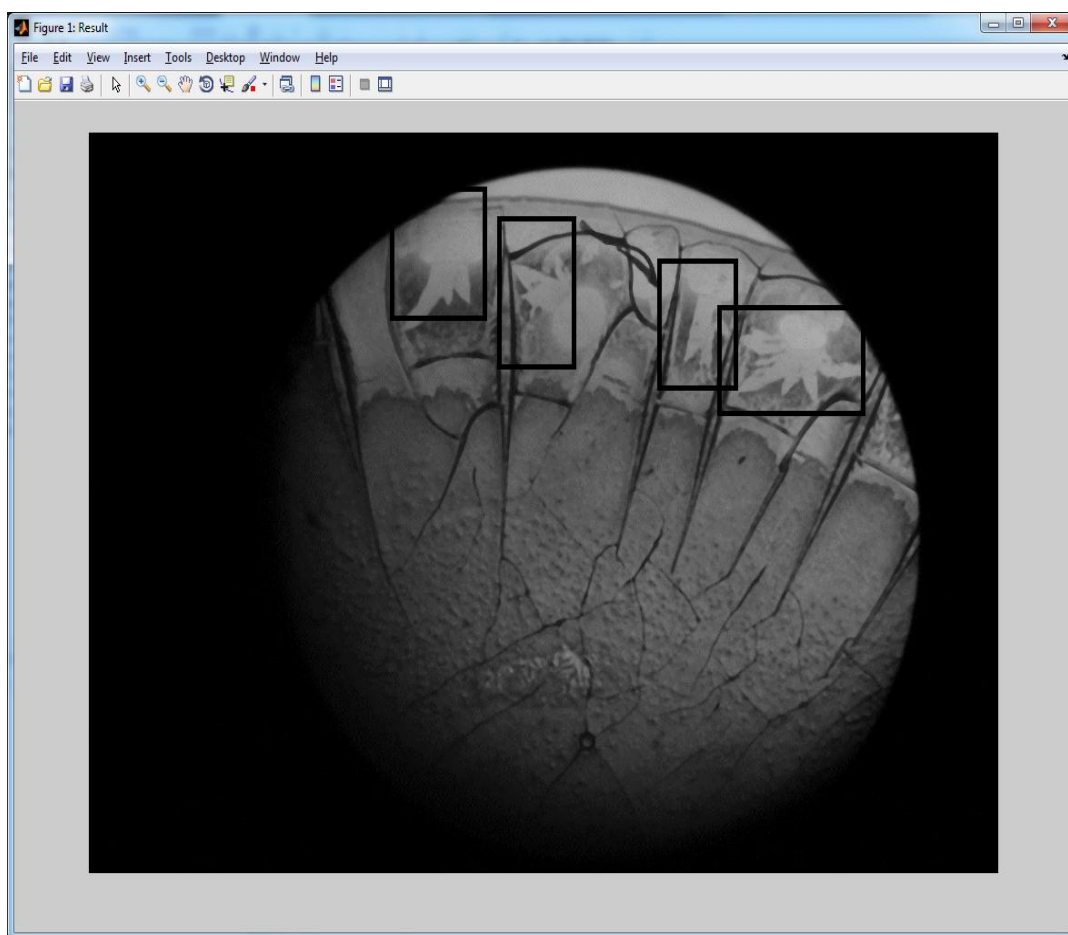
изображений (размеры каждого последующего изображения на 10% меньше предыдущего). Каждое изображение было сканировано скользящим окном, применена обученная нейросеть, составлена карта откликов. Далее удалены повторные срабатывания, подведена статистика по всем тестовым примерам, и рассчитаны метрики.

В результате обучения были получены следующие результаты: точность - 63%, полнота - 71%.

В нашей задаче приоритетным является повышение значения первой метрики – точности. Низкое значение первого параметра обусловлено большим количеством ложных срабатываний. Для сокращения числа ложных срабатываний были выполнены следующие действия:

- нейросеть была применена к обучающему множеству изображений и сохранены фрагменты, на которых сеть ошиблась (т.е. примеры, являющиеся для сети сложными);
- обучающая выборка была дополнена, примерами ложных срабатываний, полученных на предыдущем этапе;
- произведено повторное обучение сети на новой выборке.

В результате получена точность и полнота соответственно равные 84% и 71%, из чего следует, что удалось существенно поднять точность распознавания, путем повторного обучения сети на сложных примерах. На рис.4 представлен результат работы сети.



**Рис. 4. Пример работы сети**

Для дальнейшего увеличения точности можно воспользоваться априорным знанием о возможном местоположении объектов. Искомые объекты располагаются в так называемой периферийной зоне. Выделение центральной и периферийной зон на изображении является

одной из подзадач автоматизации метода клиновидной дегидратации и может быть реализована, используя алгоритмы текстурной сегментации.

### Выводы

В ходе исследования было проанализировано использование сверточных нейронных сетей в задаче распознавания кристаллических структур плазмы крови. Был предложен подход, позволяющий адаптировать использование нейросетевого подхода к рассматриваемой задаче. В рамках работы произведена реализация предложенного подхода для поиска и распознавания структурных элементов, используемых при диагностике сахарного диабета. Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод о том, что подход, предложенный в работе, обеспечивает требуемую точность и может быть использован для решения поставленной задачи.

### Библиографический список

1. **Бухнин, А. В.** Оптимизация баз знаний экспертных систем с применением нейронных нечетких сетей / А. В. Бухнин, Ю. С. Бажанов // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – М., 2007. № 11.
2. **Дмитриев, Д.В.** Адаптация генетических алгоритмов к решению задач назначения точек контроля в объектах с большим числом состояний / Д.В. Дмитриев, Э.С. Соколова, С.Н. Капранов // Нейрокомпьютеры. М., 2007. № 11.
3. **Соколова Э.С.** Выделение детерминированной компоненты временных рядов методом спектрального анализа / Э.С. Соколова, Д.А. Ляхманов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. №5. Часть 1. С.181–184.
4. **Хайкин, С.** Нейронные сети: полный курс / Саймон Хайкин. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. –104 с.
5. **Ясницкий, Л.Н.** Введение в искусственный интеллект : учеб. пособие / Л.Н. Ясницкий. –2-е изд. – М.: Издательский дом «Академия», 2008. –176 с.
6. **Щербатюк, Т.Г.** Возможность наличия оценки окислительного стресса у больных сахарным диабетом типа 2 с помощью метода клиновидной дегидратации / Т.Г. Щербатюк, О.В. Занозина, Н.Н. Боровков, Е.С.Клинова // Российский медико-биологический вестник им. академика И.П. Павлова. 2009. №4. С. 92–97.

*Дата поступления  
в редакцию 16.05.2016*

**P.A. Shagalova, E.S. Sokolova, T.G. Shcherbatyuk, M.I. Yashanova**

### **RECOGNITION OF CRYSTAL STRUCTURES OF THE BLOOD PLASMA BASED ON CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK**

Nizhny novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeyev,  
Nizhny Novgorod State Medical Academy

**Purpose:** Researching of convolutional neural network for recognition of crystal structures of the blood plasma.

**Design / methodology / approach:** Application of artificial neural networks.

**Findings:** Implement of neural network system for detection of crystal structures used for diagnosis of diabetes.

**Research limitations / implications:** current research is used for detection of patterns of crystal structures of biological fluids.

**Originality / value:** The ability to use of the offered approach for automation of method based on analysis of crystal structures of biological fluids.

*Key words:* convolutional neural network, computer vision, crystal structure, biological-LIC fluid.

УДК 004.021

И.А. Шемарулин, В.Ю. Карпычев

**РАСПОЗНАВАНИЕ ДОРОЖНЫХ ЗНАКОВ НА ОСНОВЕ ЦВЕТНЫХ КОНТУРОВ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлен алгоритм распознавания дорожных знаков на основе цветных контуров. Проведены измерения пороговых значений красного цвета в разное время суток и различных погодных условиях. Описаны основные преимущества использования модели HSV. Предложен общий алгоритм детектирования дорожных знаков на изображении.

*Ключевые слова:* компьютерное зрение, нейронная сеть, цветовое пространство, морфологические операции, видеосигнал.

Увеличение числа дорожно-транспортных происшествий на дорогах общего пользования в Российской Федерации является одной из серьёзных проблем настоящего времени. Очевидно, что в большинстве случаев так называемый «человеческий фактор» является главной причиной текущей аварийной ситуации на дорогах. Как правило, водитель, находясь в стрессовой ситуации, не успевает заметить предупреждающие знаки или знаки ограничения максимальной скорости движения. Учитывая это, один из способов решения данной проблемы в виде интеллектуализации процесса управления транспортным средством выглядит вполне применимым, а разработка алгоритмов распознавания дорожных знаков и их реализация в виде автоматизированной системы являются актуальными на сегодняшний день задачами.

В настоящее время на фоне быстрого развития так называемых E-Car'ов интеллектуальных автомобилей, наработки в области распознавания объектов на дороге и разработка различных вспомогательных средств для управления автомобилем требуют пристального внимания.

Несмотря на то, что многие автомобили представительского класса уже оснащены оборудованием, способным выполнять подобные функции, данные технологии нельзя назвать общедоступными. В связи с этим, представляется целесообразным использование программных средств для решения задач распознавания объектов. Именно поэтому предложена методика детектирования и распознавания дорожных знаков без применения сложных технических средств. Эта методика основывается исключительно на обработке данных, полученных с камеры мобильного телефона или видеорегистратора.

Использование существующих алгоритмов распознавания образов является не целесообразным, в связи с их ресурсоемкостью, что исключает возможность их использования в системах реального времени. Исходя из этого, целью данной работы является разработка универсального алгоритма, основной особенностью которого является высокая скорость обработки кадров (преобразование цветового пространства, удаление шумов, сужение области обработки, детектирование потенциального объекта, распознавание дорожного знака) [5].

**Изменение цветовой модели входного видеосигнала**

Входной сигнал с камеры является последовательностью изображений (кадров, полученных с камеры в определенный момент времени). Каждое из этих изображений представлено в цветовой модели RGB.

Все запрещающие знаки ограничения максимальной скорости движения на дорогах РФ имеют круглую форму и контур красного цвета. Именно этот контур позволяет опреде-



лить потенциальный дорожный знак на кадре видеосигнала, поэтому первостепенной является задача выделения областей красного цвета на изображении.

Использование цветовой модели RGB является нецелесообразным в данном случае, так как поиск областей красного цвета предполагает анализ всех трех составляющих  $R$ ,  $G$  и  $B$ . Более того, изменение  $R$  составляющей будет влиять на допустимые значения других составляющих. Именно поэтому для поиска на изображениях объектов по цвету и яркости, как правило, применяется цветовая модель HSV, использование которой и предлагается для решения задачи выделения красных контуров.

HSV – цветовая модель, в которой координатами цвета являются:

1. Hue – цветовой тон (например, красный, зелёный или голубой). От  $0^\circ$  до  $360^\circ$ , однако иногда приводится к диапазону 0–100 или 0–1.
2. Saturation – насыщенность. Варьируется в пределах 0–100 или 0–1. Чем больше этот параметр, тем «чище» цвет, поэтому этот параметр иногда называют чистотой цвета. А чем ближе этот параметр к нулю, тем ближе цвет к нейтральному серому.
3. Value (значение цвета) или Brightness – яркость. Также задаётся в пределах 0–100 или 0–1.

Преобразования из RGB в HSV производятся следующим образом [1]:

$$V \leftarrow \max(R, G, B)$$

$$S \leftarrow \begin{cases} \frac{V - \min(R, G, B)}{V}, & \text{if } V \neq 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$H \leftarrow \begin{cases} 60(G - B) / S, & \text{if } V = R \\ 120 + 60(B - R) / S, & \text{if } V = G \\ 240 + 60(R - G) / S, & \text{if } V = B. \end{cases}$$

Если  $H < 0$ , то  $H = H + 360$ .

В результате преобразований значения цвета будут находиться в следующих диапазонах:

$$0 \leq V \leq 1, \quad 0 \leq S \leq 1, \quad 0 \leq H \leq 360.$$

Пороговые значения тона (Hue) для знаков с красным контуром будут отличаться при изменении времени суток и погодных условий, так как цвет знаков будет изменяться в зависимости от освещённости. Так, красный контур дорожного знака может восприниматься как оранжевый при искусственном освещении в ночное время суток или при свете автомобильных фар. В связи с этим, требуется подобрать пороговые значения цвета при различных уровнях освещённости и в разных погодных условиях. Теоретически подобранные значения отображены в табл. 1. Эти значения требуют дополнительной корректировки на основании данных, полученных экспериментальным путем.

Из табл. 1 видно, что цветовое пространство HSV наиболее подходит для выделения красного контура дорожных знаков при различных погодных условиях и времени суток, так как пороговые значения цветового тона практически постоянны и отличны лишь в ночное время суток (искажение за счет искусственного освещения дорожного полотна и света фар автомобилей).

Если представить изображение в цветовом пространстве RGB, полученное из последовательности кадров в виде матрицы размерности  $M \times N \times 3$ , которая состоит из целых чисел от 0 до 255, которые определяют цвет каждого пикселя исходного изображения.

Таблица 1

Пороговые значения цвета для выделения красных контуров дорожных знаков, на изображениях, полученных с видеорегистрирующего устройства

Цветовое пространство	Ясный день	Дождь/Влажность/Сумерки	Ночь
RGB	120<R<255 0<G<77 0<B<90	120<R<255 0<G<65 0<B<90	100<R<255 0<G<80 0<B<20
HSV	300<H<360 0.7<S<1 0.4<V<1	300<H<360 0.7<S<1 0.4<V<1	30<H<360 0.7<S<1 0.4<V<1

Определение объектов красного цвета на кадрах после конвертации в модель HSV происходит следующим образом:

1. Исходная матрица  $M \times N \times 3$  разделяется на три матрицы  $M \times N$ , соответствующие трем компонентам H, S, V пространства.
2. Если элемент матрицы попадает в интервал между пороговыми значениями из таблицы 1, то значение заменяется на 1, в противном случае – 0. В результате такого преобразования имеем три матрицы  $M \times N$  со значениями 0 и 1.
3. Измененные матрицы объединяются с помощью выполнения операции «логического И».

В результате получим бинарное изображение, белые области которого соответствуют объектам красного цвета, а черные – всем объектам другого цвета.



Рис. 1. Выделение областей красного цвета на изображении

#### Удаление шумов с помощью морфологических операций на бинарных изображениях

В бинарной морфологии двоичное изображение, представляется в виде черных и белых точек (или 0 и 1). Областью изображения является некоторое подмножество точек изображения, а каждая операция двоичной морфологии является некоторым преобразованием над этим множеством. В качестве исходных данных используются двоичное изображение  $B$  и некоторый структурный элемент  $S$ . Результатом операции является двоичное изображение. Основные операции: наращивание, эрозия, замыкание, размыкание [4].

Наращивание бинарного изображения  $A$  структурным элементом  $B$  обозначается

$$A \oplus B \quad (1)$$

и определяется выражением

$$A \oplus B = \bigcup_{b \in B} A_b . \quad (2)$$

Здесь оператор объединения можно считать оператором, который применяется в окрестности пикселей. Структурный элемент  $B$  накладывается на все пиксели бинарного изображения. Когда начало координат структурного элемента совпадает с единичным пикселем, ко всему структурному элементу применяется перенос и логическое сложение (логическое ИЛИ) с соответствующими пикселями бинарного изображения. Результаты операции записываются в выходное бинарное изображение, которое изначально инициализируется нулевыми значениями.

Эрозия бинарного изображения  $A$  структурным элементом  $B$  обозначается

$$A \ominus B \quad (3)$$

и определяется выражением

$$A \ominus B = \{z \in A | B_z \subseteq A\} \quad (4)$$

При выполнении операции эрозии структурный элемент пробегает по всем пикселям изображения. Если в какой-либо позиции каждый единичный пиксель структурного элемента совпадает с единичным пикселем бинарного изображения, то выполняется логическое сложение центрального пикселя структурного элемента с соответствующим пикселем выходного изображения. В результате применения данной операции все объекты, меньшие чем структурный элемент, удаляются, размеры всех объектов уменьшаются, объекты, соединённые тонкими линиями, разъединяются

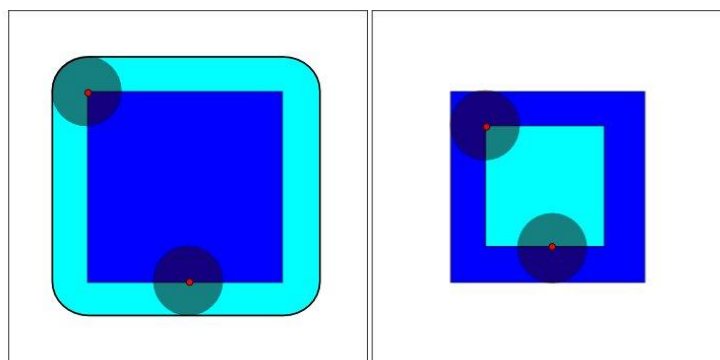


Рис. 2. Нарращивание (слева) и эрозия (справа) темно-синего квадрата дисковым структурным элементом, результирующего на ярко голубой квадрат

Замыкание бинарного изображения  $A$  структурным элементом  $B$  обозначается

$$A \bullet B \quad (5)$$

и определяется выражением:

$$A \bullet B = (A \oplus B) \ominus B \quad (6)$$

Операция замыкания закрывает малые внутренние «дырки» и убирает углубления по краям области. Если сначала применить операцию наращивания, то можно избавиться от малых дыр и щелей, но в данном случае произойдёт изменение контура объекта в большую сторону. Этого можно избежать с помощью операции эрозии, которая выполняется сразу после наращивания таким же структурным элементом.

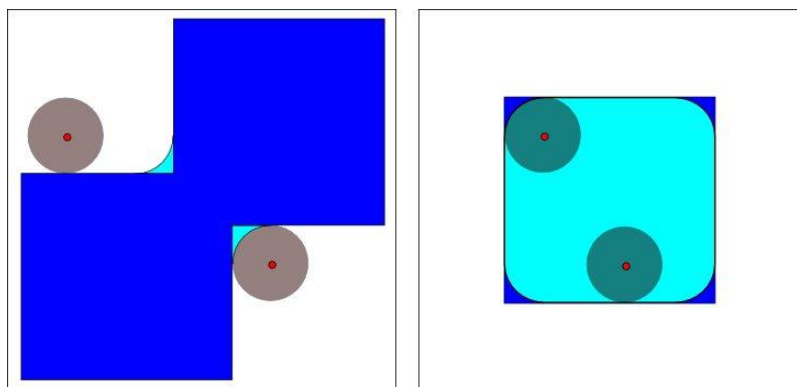
Размыканием бинарного изображения  $A$  структурным элементом  $B$  обозначается

$$A \circ B \quad (7)$$

и определяется выражением

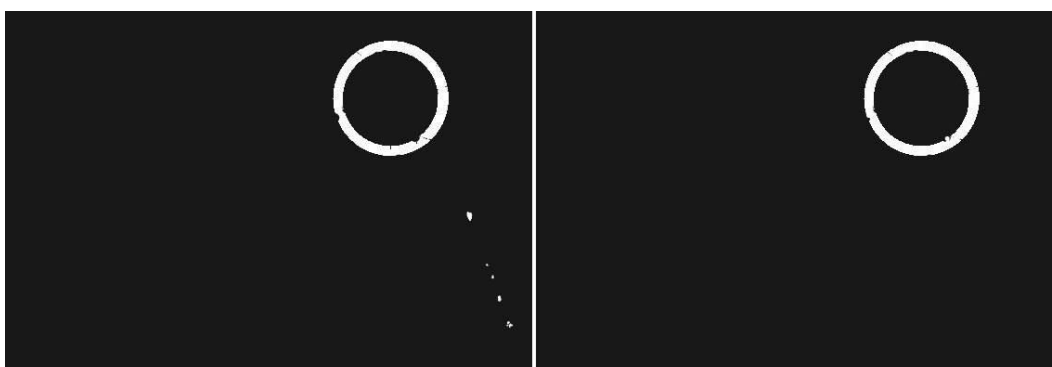
$$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B. \quad (8)$$

В результате замыкания все объекты, меньшие, чем структурный элемент, отсеиваются. При этом рассеивание помогает избежать сильного уменьшения размера объектов. Также замыкание отлично подходит для удаления линий, толщина которых меньше, чем диаметр структурного элемента. Важно помнить, что после выполнения операции контуры объектов сглаживаются.



**Рис. 3. Замыкание (слева) и размыкание (справа) темно-синего квадрата дисковым структурным элементом**

Результаты морфологических операций над изображением представлены на рис. 4. Комбинации описанных операций эффективно удаляют шумы на изображении и делают его более удобным для последующего детектирования потенциального дорожного знака.



**Рис. 4. Удаление шумов с помощью морфологических операций**

### Детектирование потенциальных дорожных знаков

На изображении помимо дорожного знаком могут находиться иные объекты красного цвета, поэтому определение потенциального знака в кадре только лишь по цветовому признаку недостаточно. В связи с этим, необходимо выделить второй признак рассматриваемых дорожных знаков – форма эллипса близкая к кругу.

Для выделения на эллипсов на изображении является целесообразным использование преобразования Хафа. Такой подход применяется для поиска объектов, принадлежащих к определённому классу геометрических фигур.

Множество точек окружности можно представить в виде формулы

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = R^2 \quad (9)$$

где  $R$  – радиус окружности;  $a$ ,  $b$  – координаты ее центра.

Таким образом, формула, определяющая семейство окружностей, представляет собой

$$F(a, b, R, x, y) = (x - a)^2 + (y - b)^2 - R^2. \quad (10)$$

Следовательно, для нахождения окружностей необходимо задать три параметра: радиус окружности и координаты ее центра, что сказывается на скорости вычислений. Поэтому необходимо можно представить задачу определения окружностей с неизвестным радиусом следующим образом:

1. Выделить границы на изображении с помощью детектора границ Канни [2].
2. С помощью оператора Собеля [3] посчитать градиент для ненулевых точек.
3. Определить центр каждой окружности.
4. Определить ненулевые точки, лежащие на одинаковом расстоянии от центра.
5. Выделить окружности заданного радиуса, которые и будут соответствовать объектам поиска.

### Распознавание дорожных знаков

После получения областей потенциальных знаков на изображении необходимо распознать тип дорожного знака, чтобы определить информацию, которую он несет.

В первую очередь все изображения знаков из полученных областей должны быть приведены к единому виду и размеру. Далее эти изображения последовательно должны быть поданы на вход модуля распознавания. Данный этап в настоящее время находится в процессе разработки. В системе для распознавания знаков планируется использование нейронной сети, архитектура которой пока не определена.

### Выводы

Таким образом, можно сделать вывод о целесообразности применения алгоритма распознавания дорожных знаков на основе цветных контуров на практике. На данный момент описанный алгоритм практически полностью реализован за исключением нескольких моментов:

- На основании результатов, полученных в процессе работы экспериментальным путем, необходима корректировка пороговых значений цвета для красных контуров дорожных знаков в разное время суток и при различных погодных условиях.
- Вопрос выбора архитектуры нейронной сети для распознавания объектов на изображении также требует тщательной проработки.
- Алгоритм реализован на языке программирования C++ с использованием кроссплатформенной библиотеки Qt и библиотеки компьютерного зрения OpenCV.
- Ведётся работа по оптимизированию описанного алгоритма для использования на мобильном устройстве на базе OS Google Android.

### Библиографический список

1. **Журавель, И.М.** Краткий курс теории обработки изображений / И.М. Журавель. – М.: Наука, 1999.
2. **Sanny, J.** A Computational Approach to Edge Detection // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. — November 1986. – V. 8, N. 6. – P. 679–697.
3. **Вудс, Р.** Цифровая обработка изображений / Р. Вудс, Р. Гонсалес. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: Техносфера, 2012. – 1104 с.
4. **Яне, Б.** Цифровая обработка изображений / Б. Яне. – М.: Техносфера, 2007. – 584 с.

5. **Brkic, K.** An overview of traffic sign detection methods // Department of Electronics, Microelectronics, Computer and Intelligent Systems Faculty of Electrical Engineering and Computing Unska 3, 10000 Zagreb, Croatia, Tech. Rep, 2010.

*Дата поступления  
в редакцию 06.05.2016*

**I.A. Shemarulin, V.Y. Karpychev**

## **RECOGNITION OF ROAD SIGNS ON THE BASIS OF COLOR CONTOURS**

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

**Purpose** The alternative traffic sign recognition algorithm on the basis of color contours is described. The general algorithm of detection of road signs on the image is proposed.

**Design/methodology/approach** A theoretical framework is proposed based on the analysis of RGB and HSV color models and the use of mathematical morphology to improve the quality of the analyzed image.

**Findings** The assertion that the use of the RGB color model is most applicable solution of the problem of recognition of road signs confirmed by practical experiments. Detailed results are presented. The general algorithm of detection of road signs on the image is proposed as well.

**Research limitations/implications** Measurements of threshold values of red color at different times and in different weather conditions are given. It is necessary to consider the results obtained in the software development of the original problem.

**Originality/value** Moreover, the proposed algorithm is successfully implemented in practice in the scope of Traffic Sign Recognition system and has a number of technical advantages in terms of low resource consumption, high-performance computing and accuracy.

*Key works:* computer vision, neural network, color space, morphological operations, video signal.

# ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

УДК 539.1

А.А. Басов, А.В. Кайнова, М. М. Кузьма, М. А. Субарев,  
И. В. Минеев, И. С. Худяков, А.Н. Яшина

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧИ О КВАНТОВОМ ОСЦИЛЛЯТОРЕ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

**Цель:** Решение задачи нахождения волновой функции, описывающей состояние квантового осциллятора, представляет значительные математические трудности.

**Подход:** Авторами разработана компьютерная программа вычисления полиномов Чебышева-Эрмита, являющихся решением уравнения Шрёдингера для квантового осциллятора.

**Результаты:** Программа позволяет графически представить волновую функцию и квадрат ее модуля (распределение плотности вероятности).

*Ключевые слова:* уравнение Шрёдингера, компьютерное моделирование, квантовый гармонический осциллятор, волновая функция, плотность вероятности, излучение абсолютно черного тела.

В атомной и ядерной физике задача о квантовом осцилляторе имеет большое значение. Модель линейного гармонического осциллятора позволяет описать колебания частиц в атомах, атомных ядрах, молекулах, твердых телах. В квантовой теории понятие силы теряет смысл, поскольку сила по определению является функцией состояния. Но из-за соотношения неопределенностей для микрочастиц о состоянии в классическом смысле нельзя говорить. Поэтому квантовый гармонический осциллятор определяют как поведение частицы массы  $m$ , обладающей потенциальной энергией такой же, как у классического осциллятора  $U = \frac{kx^2}{2}$ , где  $k$  - постоянная. По аналогии с классическим осциллятором константу  $k$  для частицы массы  $m$  можно представить как  $k = m\omega^2$ . Решение уравнения Шрёдингера для такой частицы позволит найти волновую функцию  $\psi(x)$ , определяющую ее состояние, а также спектр собственных значений энергии  $E$ .

Уравнение Шрёдингера в этом случае будет иметь вид [1, 2]:

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2} \left( E - \frac{m\omega^2}{2} x^2 \right) \psi = 0. \quad (1)$$

Полученные аналитическим путем результаты решения данного уравнения представляются в виде собственных функций:

$$\psi = X_0 e^{-\frac{\xi^2}{2}} H_n(\xi) \quad (2a)$$

$$\text{и собственных значений энергии } E_n = \hbar\omega \left( n + \frac{1}{2} \right). \quad (2b)$$

Из (2б) следует, что  $\omega$  имеет смысл циклической частоты фотона, испускаемого или по-

глощаемого при переходе осциллятора из данного «стационарного» состояния в соседнее.

В (2а)  $X_0$  – постоянный нормирующий множитель,  $H_n(\xi)$  – полином степени  $n$ ,  $\xi = \sqrt{\frac{m\omega}{\hbar}} x$ .

Полагая  $n = 0, 1, 2, \dots$  получим следующие полиномы:

$$\begin{aligned} H_0(\xi) &= 1, \\ H_1(\xi) &= 2\xi, \\ H_2(\xi) &= 4\xi^2 - 2, \\ H_3(\xi) &= 8\xi^3 - 12\xi, \\ H_4(\xi) &= 16\xi^4 - 48\xi^2 + 12, \\ H_5(\xi) &= 32\xi^5 - 160\xi^3 + 120\xi \text{ и т.д.} \end{aligned} \tag{3}$$

Это так называемые полиномы Чебышева-Эрмита, которые можно представить в следующем обобщенном виде [3]:

$$H_n(\xi) = (-1)^n e^{\xi^2} \frac{d^n (e^{-\xi^2})}{d\xi^n}. \tag{4}$$

Необходимо заметить, что аналитический путь вычисления данных полиномов и, соответственно, вычисление собственной функции осциллятора представляется весьма громоздкой математической задачей, требующей кропотливой работы и временных затрат.

В связи с этим была разработана авторская программа для численного решения задачи. Одним из самых простых и доступных способов решения уравнения Шрёдингера является метод конечных разностей. Он представляет собой численное решение дифференциальных уравнений, основанное на замене производных разностными схемами. Именно такой подход был использован для вычисления полиномов Чебышева-Эрмита. Результаты расчетов представляются в виде графиков – собственной волновой функции  $\psi(x)$  и распределения плотности вероятности  $|\psi(x)|^2$ . Возможны два пути задания начальных условий – через энергию  $E$ , либо циклическую частоту  $\omega$  колебаний осциллятора.

Пользователю доступны следующие функции:

- 1) изменение масштаба графиков (активные области  $x_{\min}$  и  $x_{\max}$ );
- 2) отображение координат точек графиков (наведение курсора на линию графика);
- 3) изменение шага расчета (активная область  $dx$ );
- 4) изменение масштаба размерной сетки графиков (активная область в правом верхнем углу диалогового окна программы);
- 5) возможность сравнения амплитуд квантового и классического осциллятора (включение чекбокса А0);
- 6) просмотр результатов расчетов с выбранным шагом;
- 7) печать результатов расчетов и диалогового окна программы;
- 8) работа в полноэкранном режиме;
- 9) краткая теоретическая справка (кнопка “Теория” в нижнем правом углу – доступна, если компьютер подключен к интернету).

Программа также производит построение графика распределения плотности вероятности для классического осциллятора (тонкая линия на рисунках).

Были использованы начальные условия:  $\omega = 3 \cdot 10^{15}$  1/с,  $n = 0, 1, 2, 10, 50$ . Результаты расчетов приведены на рис. 1–6.



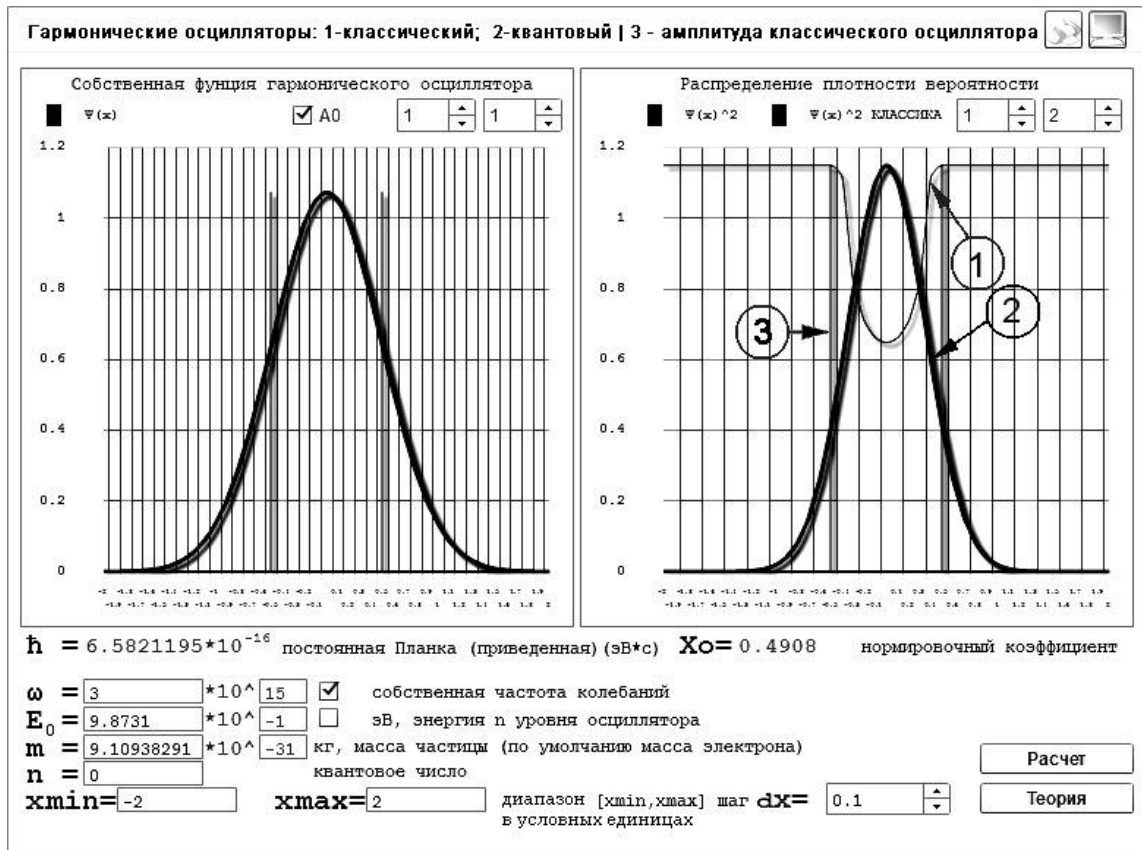


Рис. 1. Графическая иллюстрация решения уравнения Шрёдингера ( $n=0$ )

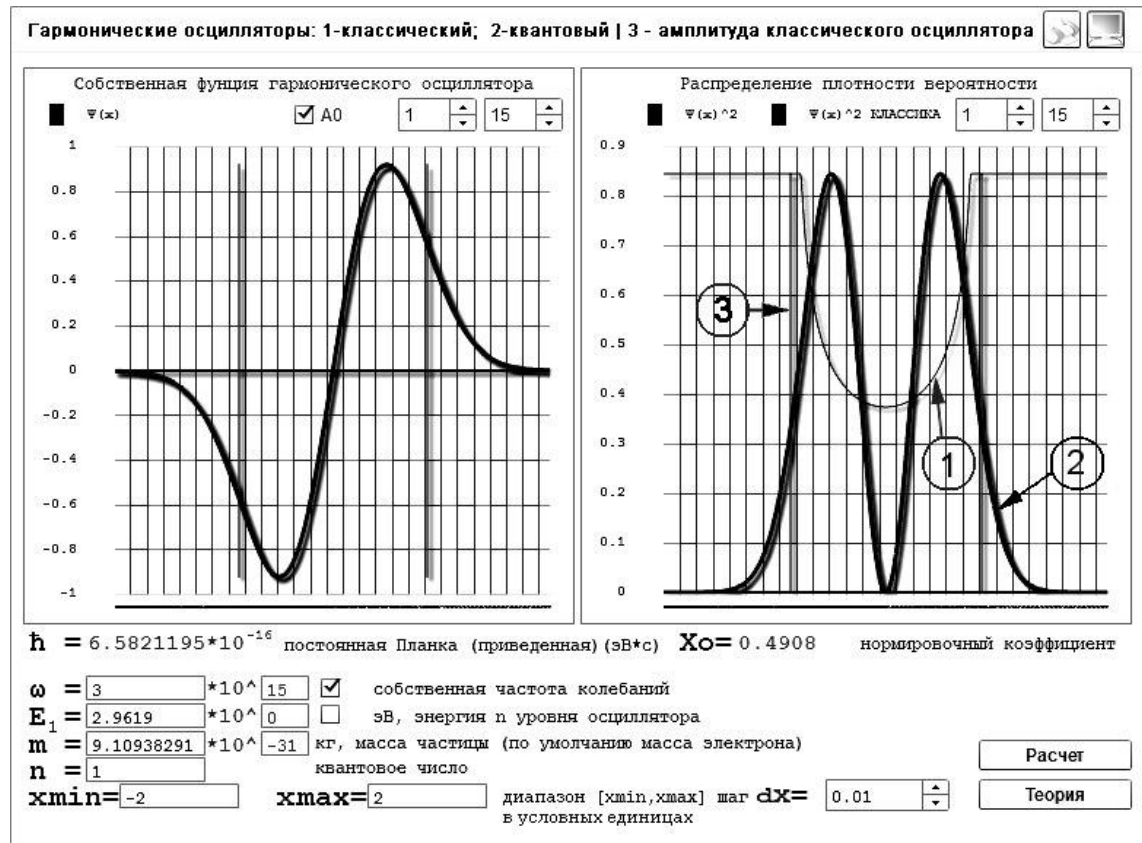


Рис. 2. Графическая иллюстрация решения уравнения Шрёдингера ( $n=1$ )

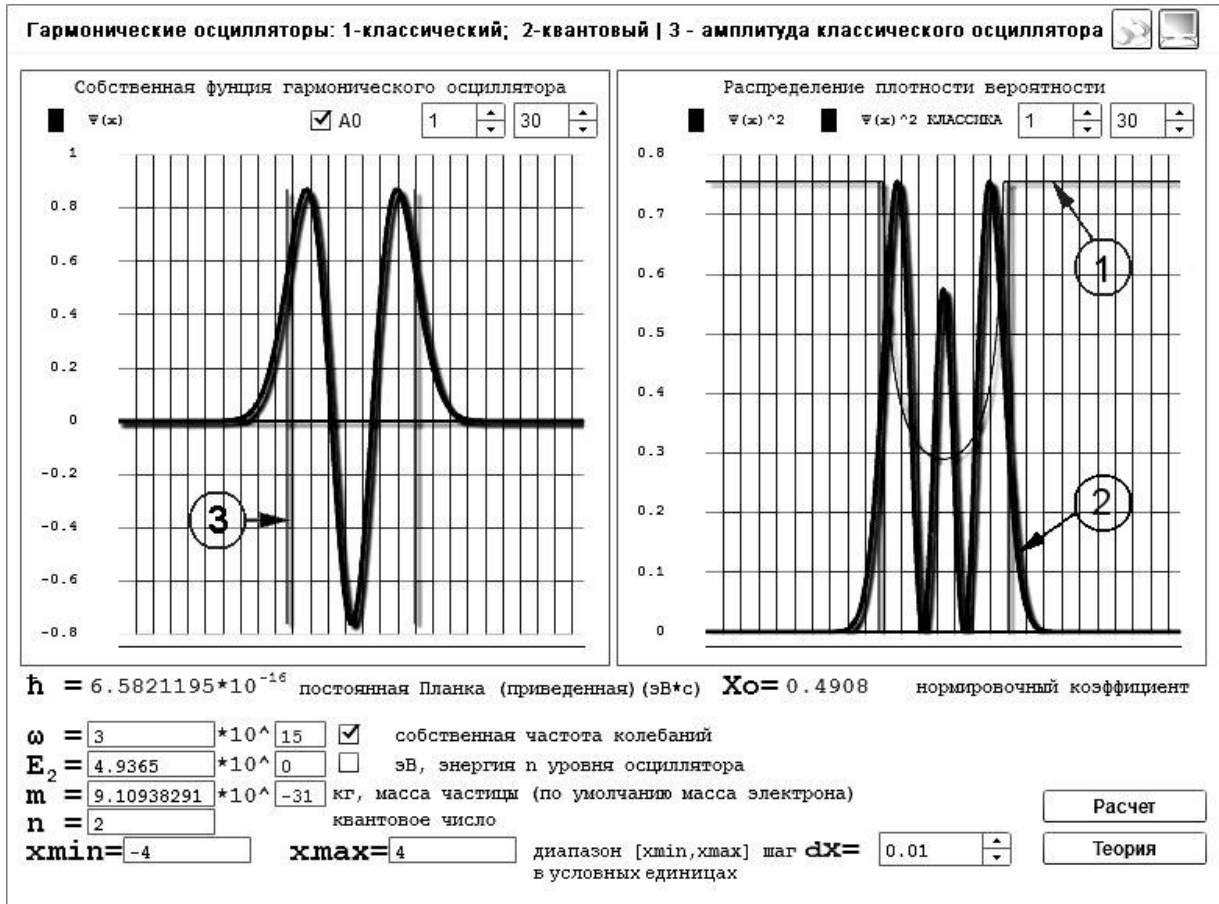


Рис. 3. Графическая иллюстрация решения уравнения Шрёдингера ( $n=2$ )

Полученные результаты хорошо согласуются приводимыми в литературе [3]. Таким образом, программа позволяет визуализировать сложный для восприятия результат решения уравнения Шрёдингера и получить массив данных, являющийся значениями собственной волновой функции и распределения плотности вероятности (рис. 4).

**Результаты расчета**  
09.02.2016 21:57:55

X	-1	-0.9	-0.8	-0.7	-0.6	-0.5	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1
f(x)	-0.679	-0.6981	-0.6991	-0.6795	-0.638	-0.5743	-0.4893	-0.3855	-0.2661	-0.1359
f(x) <sup>2</sup>	0.461	0.4874	0.4887	0.4617	0.407	0.3298	0.2394	0.1486	0.0708	0.0185
X	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
f(x)	0	0.1359	0.2661	0.3855	0.4893	0.5743	0.638	0.6795	0.6991	0.6981
f(x) <sup>2</sup>	0	0.0185	0.0708	0.1486	0.2394	0.3298	0.407	0.4617	0.4887	0.4874
X	1									
f(x)	0.679									
f(x) <sup>2</sup>	0.461									

Рис. 4. Результаты работы программы ( $n=1, dx = 0,1, x_{min}=-1, x_{max}=1$ )

При увеличении главного квантового числа модель квантового гармонического осциллятора приближается к модели классического осциллятора, что наглядно представлено на рис. 5-6.

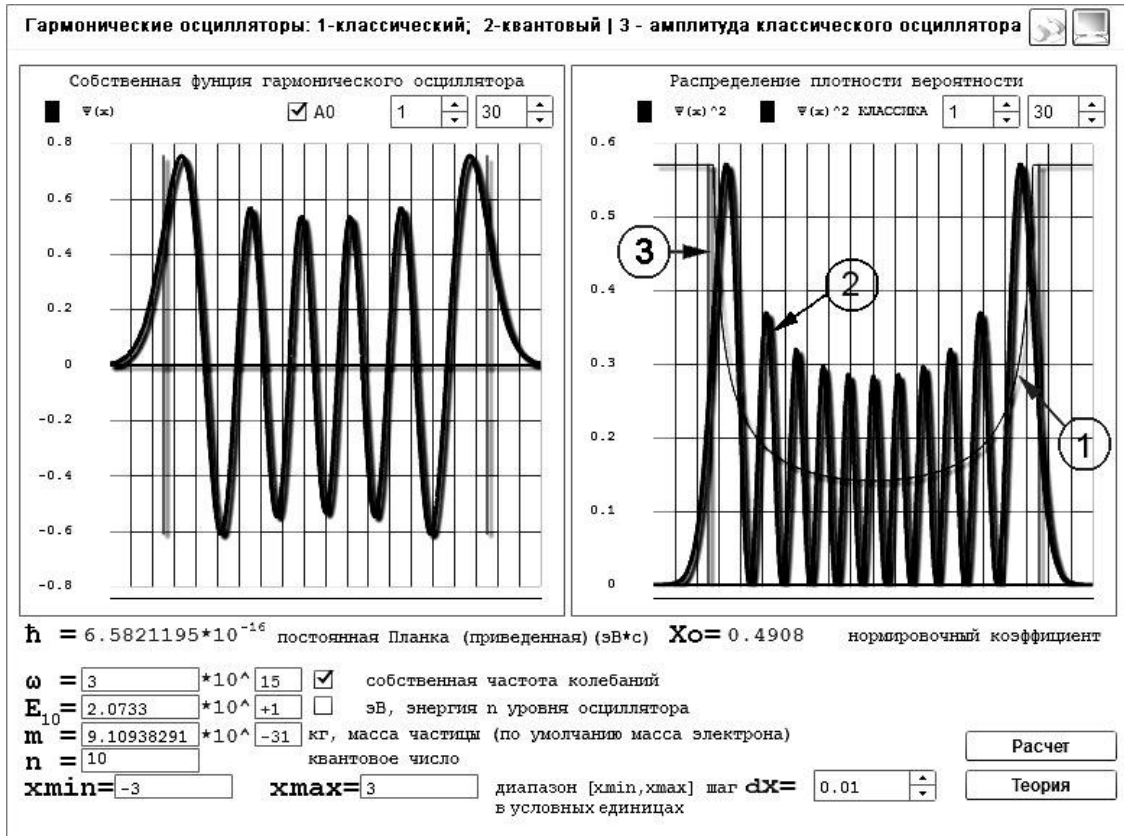


Рис. 5. Результаты расчета квантового осциллятора при больших значениях ( $n=10$ )

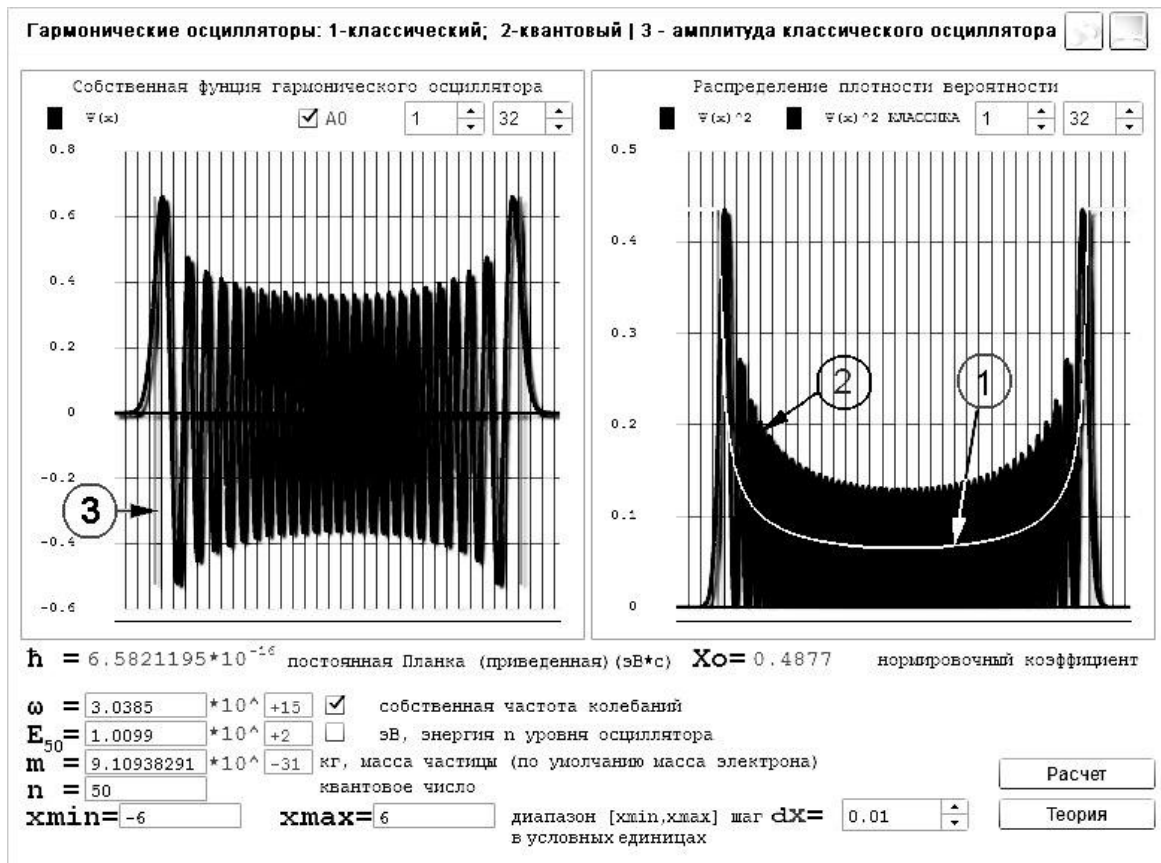


Рис. 6. Результаты расчета квантового осциллятора при больших значениях  $n$

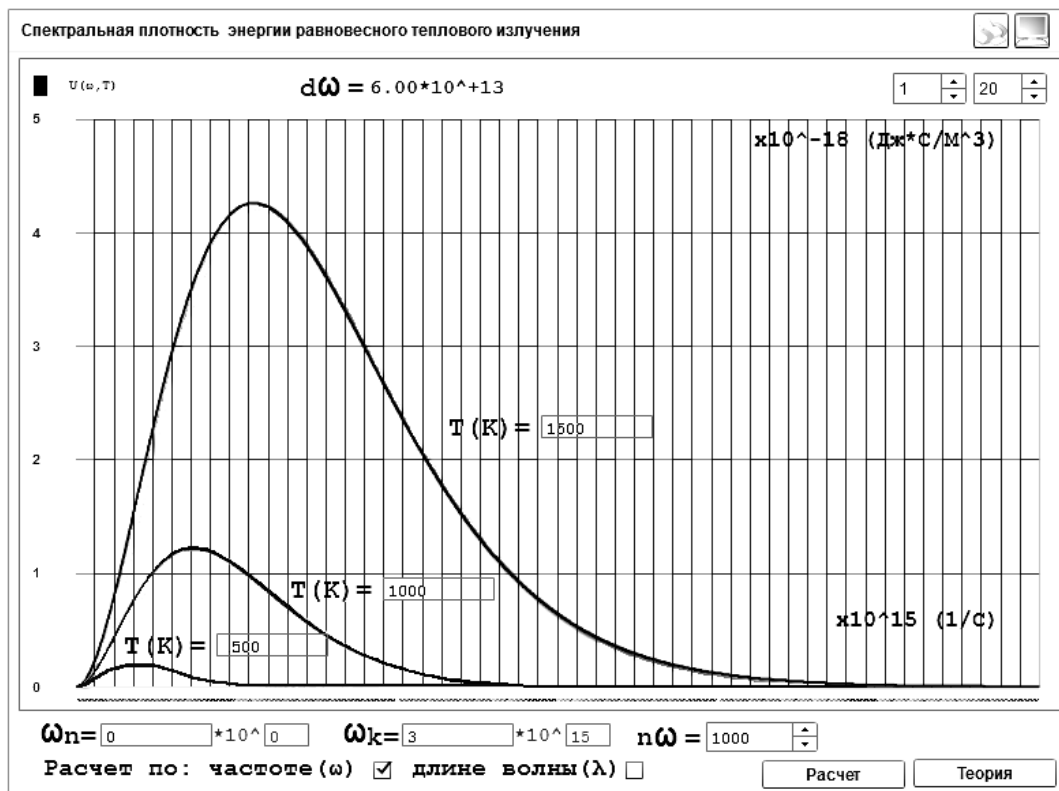


Рис. 7. Зависимость спектральной плотности энергии абсолютно черного тела от его температуры на заданном интервале частот ( $T = 500, 1000, 1500$  К)

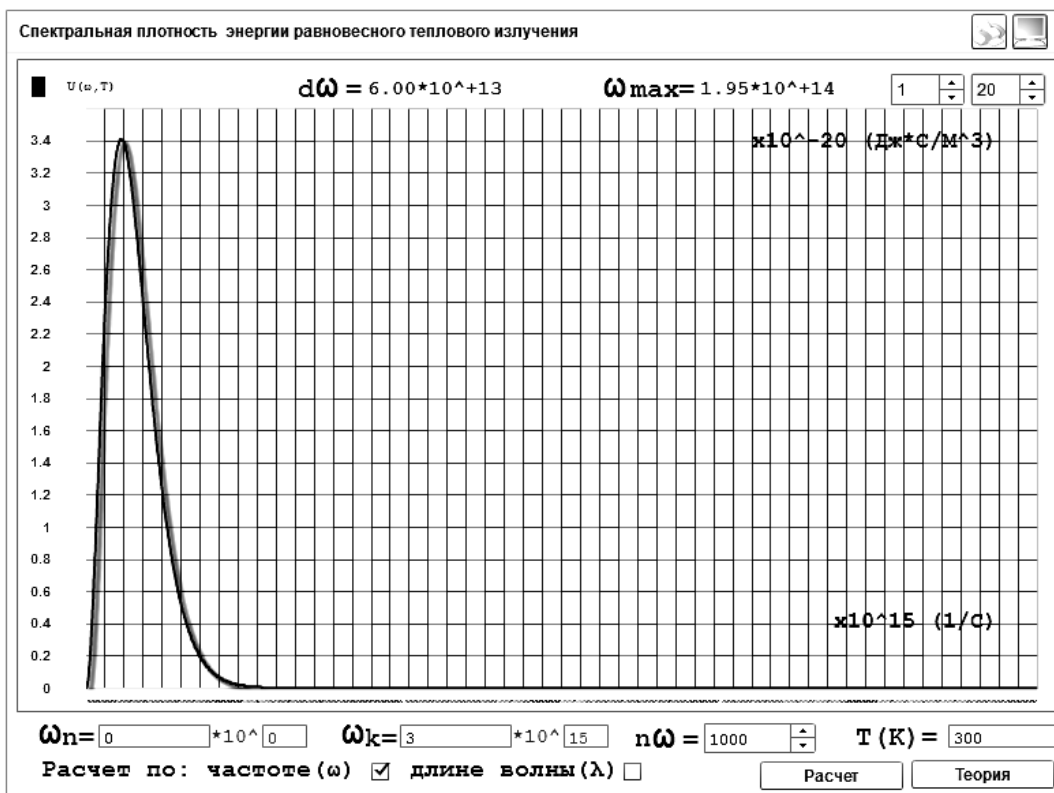


Рис. 8. Зависимость спектральной плотности энергии абсолютно черного тела при комнатной температуре на заданном интервале частот ( $T = 300$  К)

На базе данной программы можно создать виртуальный лабораторный практикум или выполнять расчетно-графические работы.

Представление об атомной системе как об осцилляторе, энергия которого квантована, позволило, как известно, Планку получить выражение для спектральной плотности излучающей способности абсолютно черного тела  $r_{\omega T}$  [4], зависимость которой от температуры тела  $T$  и частоты излучения  $\omega$  хорошо согласовывалась с экспериментальными данными:

$$r_{\omega T} = \frac{1}{4\pi^2 c^2} * \frac{\hbar \omega^3}{\exp\left(\frac{\hbar \omega}{kT}\right) - 1} \quad (5)$$

Авторами разработана программа для графического представления этой функции. Результаты, полученные для различных значений температуры  $T$  абсолютно черного тела, приведены на рис. 7-9.

**Результаты расчета**

02.02.2016, 22:52:49

$T(K) = 1500$

$\omega_n = 0 * 10^0 \quad \omega_k = 3 * 10^{15} \quad d\omega = 3.00 * 10^{+12}$

$\omega$	0.00e-16	3.00e+12	6.00e+12	9.00e+12	1.20e+13	1.50e+13	1.80e+13	2.10e+13	2.40e+13	2.70e+13
$U(\omega, T)$	0.00e-16	6.94e-22	2.75e-21	6.15e-21	1.08e-20	1.68e-20	2.40e-20	3.24e-20	4.20e-20	5.28e-20
$\omega$	3.00e+13	3.30e+13	3.60e+13	3.90e+13	4.20e+13	4.50e+13	4.80e+13	5.10e+13	5.40e+13	5.70e+13
$U(\omega, T)$	6.47e-20	7.77e-20	9.17e-20	1.06e-19	1.22e-19	1.40e-19	1.58e-19	1.77e-19	1.96e-19	2.17e-19
$\omega$	6.00e+13	6.30e+13	6.60e+13	6.90e+13	7.20e+13	7.50e+13	7.80e+13	8.10e+13	8.40e+13	8.70e+13
$U(\omega, T)$	2.39e-19	2.61e-19	2.84e-19	3.08e-19	3.33e-19	3.58e-19	3.85e-19	4.11e-19	4.39e-19	4.67e-19
$\omega$	9.00e+13	9.30e+13	9.60e+13	9.90e+13	1.02e+14	1.05e+14	1.08e+14	1.11e+14	1.14e+14	1.17e+14
$U(\omega, T)$	4.96e-19	5.25e-19	5.55e-19	5.85e-19	6.16e-19	6.48e-19	6.79e-19	7.12e-19	7.45e-19	7.78e-19
$\omega$	1.20e+14	1.23e+14	1.26e+14	1.29e+14	1.32e+14	1.35e+14	1.38e+14	1.41e+14	1.44e+14	1.47e+14
$U(\omega, T)$	8.11e-19	8.45e-19	8.80e-19	9.14e-19	9.49e-19	9.84e-19	1.02e-18	1.05e-18	1.09e-18	1.12e-18

**Рис. 9. Результаты работы программы**

Полученные кривые соответствуют экспериментальным данным [5]. Определенное из графиков значение частоты  $\omega$ , на которую приходится максимум функции, отвечает закону Вина [2].

Достоинствами данных программ являются: высокая наглядность представляемого материала, его доступность и интерактивность, большая дифференциация и индивидуализация процесса образования, а также возможность исследовать многопараметрические задачи, используемые в атомной и ядерной физике и энергетике. Программы являются мультиплатформенными и имеют интуитивно понятный интерфейс. Для корректной работы необходимо только наличие браузера.

Данные программы написаны с помощью языков программирования Java и ActionScripts с использованием компиляторной платформы FlashDeveloper [6].

**Библиографический список**

1. **Демидович, Б.П.** Математические основы квантовой механики / Б. П. Демидович. – СПб.: Лань, 2005.
2. **Ландау, Л. Д.** Квантовая механика (нерелятивистская теория) / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М.: Физматлит, 2004.
3. **Шпольский, Э.В.** Атомная физика / Э.В. Шпольский. – СПб. Лань, 2010.
4. **Планк, М.** О законе распределения энергии в нормальном спектре. Избранные научные труды: [пер. с нем. под ред. А.П. Виноградова] / М. Планк. – М.: Наука, 1975.
5. **Цветков, Ф.Ф.** Тепломассообмен / Ф.Ф. Цветков, Б.А. Григорьев. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006.
6. **Андерсон, Э.** MacromediaFlashMX 2004: [пер. с англ. Д.А. Латышевой] / Э. Андерсон. – М.: ИТ Пресс, 2005.

*Дата поступления  
в редакцию 20.04.2016*

**A.A. Basov, A.V. Kainova, M.M. Kuzma, M.A. Sybarev, I.V. Mineev,  
I.S. Khudyakov, A.N. Yashina**

**MODELLING OF A QUANTUM OSCILLATOR TASK**

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

**Purpose:** The task of calculating a wave function describing the state of quantum oscillator poses considerable mathematic difficulties.

**Design/ methodology/ approach:** The authors developed a computer programme for counting Chebyshev-Hermite polynomials, which are the solution to Schrodinger equation for quantum oscillator.

**Findings:** The programme enables to represent the wave function and its squared absolute value (distribution in frequency) by a diagram.

*Key words:* Schrodinger equation, computer simulation, quantum harmonic oscillator, wave function, probability density, black-body radiation.

УДК. 621.752.3

Б.А. Гордеев<sup>1,2</sup>, С.Н. Охулков<sup>1,2</sup>, А.С. Плехов<sup>2</sup>, Д.Ю. Титов<sup>2</sup>**БИЕНИЯ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ СИНХРОНИЗАЦИИ ДВУХ ДВИГАТЕЛЕЙ,  
УСТАНОВЛЕННЫХ НА ОБЩЕМ ВЯЗКОУПРУГОМ ОСНОВАНИИ<sup>1</sup>**Институт проблем машиностроения Российской академии наук (ИПМ РАН)<sup>1</sup>,  
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>2</sup>

**Объект исследования:** Рассмотрены два основных варианта синхронизации двух двигателей: синхронизация на неподвижном вязкоупругом основании; синхронизация при вибрирующем основании.

**Цель:** В статье приводятся результаты экспериментальных исследований эффектов, возникающих при синхронизации двух двигателей, закрепленных на вязкоупругом основании.

**Результаты:** Проведен анализ спектров и выявлены информативные гармонические составляющие, позволяющие выявить основные гармоники генерируемых вибропроцессов.

**Область применения:** системы демпфирования ударных нагрузок силовых электромеханических установок и механического оборудования.

*Ключевые слова:* переходный процесс, синхронизация, вибрация, гидравлическая опора, эксперимент, низкочастотные биения, спектры вибропроцессов.

В системах со многими источниками вибраций всегда возможна синхронизация на одной или нескольких частотах [1, 2]. Вопросы синхронизации и захвата частоты при испытаниях механических систем с локальными источниками шума и вибрации приобретают все большую актуальность в современном машиностроении. Синхронизация и захват частоты при переходных режимах работы могут приводить к вредным последствиям, вплоть до разрушения силовых агрегатов [1, 2]. Эти процессы усугубляются влиянием внешних вибрационных полей, способствующих значительному увеличению времени переходных процессов в энергоемком оборудовании.

Возрастание времени переходных процессов, в частности, приводит к увеличению энергопотребления и дополнительному росту вредных вибраций, возникновению опасных низкочастотных биений. Эти процессы понижают ресурс работы силовых агрегатов и ведут к разрушению инженерных конструкций. Поэтому задача снижения уровней вибрации в стационарных и переходных режимах работы энергоемких машин всегда актуальна [2]. Захват угловой скорости вращения ротора электродвигателя и его синхронизация внешними источниками вибрации происходит во время разгона ротора из состояния покоя.

Переходный процесс может сопровождаться рядом нежелательных явлений. К примеру, угловая скорость вращения ротора может и не достичь своего номинального значения, а останется в установившемся режиме гораздо меньшей. Это свидетельствует о вредном действии вибрационного момента на вал ротора, от чего необходимо освободиться либо, по возможности, свести к минимуму. Отмеченные явления существенно осложняются действием внешнего вибрационного поля даже тогда, когда частоты внешних возмущений не совпадают с номинальной угловой скоростью вращения ротора [4–6]. Эффективным способом снижения уровня вибраций частей электромашин является использование гидравлических опор в качестве демпферов.

В некоторых электромеханических системах синхронизация играет положительную роль. Синхронизация механического или электрического колебательного контура и весьма стабильного кварцевого генератора широко используется в импульсной технике примерно с середины 50-х годов прошлого столетия. Здесь синхронизация является полезным эффектом. Синхронизация используется с пользой во многих горных машинах – сепараторах, грохотах.

Однако если синхронизация возникла в системе нескольких электродвигателей, кото-

рые создают повышенную нагрузку на платформу, где они установлены, то синхронизация, естественно, – явление вредное.

Экспериментальные исследования эффектов синхронизации проводились при работе двух электродвигателей на закрепленных на общем неподвижном основании и общем вязкоупругом основании. Общее вязкоупругое основание установлено на четырёх гидравлических опорах (рис .1).



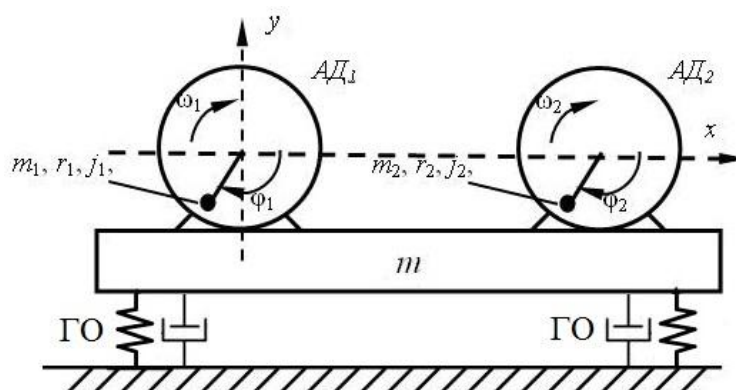
**Рис. 1. Электромеханическая система двух асинхронных двигателей, установленных на общем вязкоупругом основании**

На стальных крепежных пластинах жестко закреплены электродвигатели типа АИР 63 В4 0,37 1500, мощностью в 370 Вт с одинаковыми механическими и частотными характеристиками (рис. 1). Крепежные пластины, в свою очередь, жестко закреплены на стальной платформе (основание). Вся система установлена на вибростенде. Между вибростендом и платформой установлены гидроопоры.

Рассмотрены два основных варианта: синхронизация на вязкоупругом основании; и синхронизация при вибрирующем основании за счет сторонних внешних воздействий. Проведен анализ спектров и выявлены информативные гармонические составляющие, позволяющие судить о наличии биений.

### Теоретическая часть

Физическую модель системы двух двигателей, закрепленных на вязкоупругом основании с одной степенью свободы [3] представим как систему двух двигателей, закрепленных на платформе, установленной на вязкоупругих гидроопорах (рис. 2).



**Рис. 2. Физическая модель системы двух двигателей, вращающихся в одном направлении, закрепленных на платформе, установленной на вязкоупругие гидравлические опоры**



Для электромеханической системы на рис. 2 заданы: суммарная жесткость обечаек гидроопор –  $C$ ; массы первого и второго двигателей –  $m_1, m_2$ ; масса платформы –  $m$ ; моменты инерции роторов –  $I_1, I_2$ ; радиусы эксцентров –  $r_1$  и  $r_2$ ; крутящие моменты приложенные к валам двигателей –  $M_1, M_2$ ;  $\varphi_1, \varphi_2$  – углы поворота роторов отсчитываемые от направления оси  $x$ .

Для электромеханической системы также задаются коэффициенты вязкого сопротивления вертикальному движению корпусов двигателей –  $\eta_{1.1}, \eta_{1.2}$ ; коэффициенты вязкого сопротивления вращению роторов –  $\eta_{2.1}, \eta_{2.2}$  (рис. 2). Источники вибрации – двигатели с неуравновешенными роторами, обладающие моментами инерции  $I_j$ .

Неуравновешенные роторы двигателей генерируют под действием центробежных сил вынуждающие силы, действующие на вязкоупругое основание [2, 3, 13]:

$$F_1 = F_{01} \sin(\Omega_1 t + \varphi_1); F_2 = F_{02} \sin(\Omega_2 t + \varphi_2);$$

где  $F_{01} = m_1 \cdot \Omega_1^2 \cdot r_1, F_{02} = m_2 \cdot \Omega_2^2 \cdot r_2$  – центробежные силы,  $m_1, m_2$  – массы эксцентров с радиусами  $r_1$  и  $r_2$  соответственно,  $\Omega_1, \Omega_2$  и  $\varphi_1, \varphi_2$  – угловые частоты и начальные фазы вращения неуравновешенных роторов первого, второго двигателей соответственно.

При этом предполагается, что значения  $\Omega_1, \Omega_2$  заданы и не зависят от процесса колебаний вязкоупругой платформы, на которой установлены двигатели с неуравновешенными роторами.

Если используются двигатели, обладающие небольшой мощностью, то процесс колебаний вязкоупругой электромеханической системы заметно влияет на величины  $\Omega_1, \Omega_2$  и последние также колеблются около некоторого среднего значения. Вследствие влияния колебаний вязкоупругой платформы на угловые скорости вращения роторов двигателей их работа в некотором диапазоне угловых скоростей становится неустойчивой [3, 13].

При эксплуатации двигателей, установленных на вязкоупругом основании, необходимо учитывать эти явления. Такие явления можно наблюдать у мотор-компрессора локомотива, энергетическая установка которого находится в общем корпусе, расположенном на вязкоупругом основании [7]. При составлении системы дифференциальных уравнений введем обобщенные координаты. За обобщенные координаты выбираем углы поворота роторов –  $\varphi_1, \varphi_2$  и вертикальные перемещения платформы с двигателями –  $y$ . По теореме о движении центров масс для первого и второго двигателей дифференциальные уравнения движения центров масс записываются в виде [13]

$$\begin{cases} (m + m_1) \cdot \frac{dV_{cm1}}{dt} = -\eta_{1.1} \dot{y}_1 - cy_1 + (m + m_1)g, \\ (m + m_2) \cdot \frac{dV_{cm2}}{dt} = -\eta_{1.2} \dot{y}_2 - cy_2 + (m + m_2)g. \end{cases} \quad (1)$$

где  $V_{cm1}; V_{cm2}$  – линейная скорость центра масс двигателей электромеханической системы;  $g$  – ускорение свободного падения.

Ускорения центра масс первого и второго двигателей определим по формулам

$$\begin{cases} \frac{dV_{cm1}}{dt} = \ddot{y}_1 - \frac{m \cdot r_1}{m + m_1} \cdot (\dot{\Omega}_1 \cdot \sin \varphi_1 + \Omega_1^2 \cdot \cos \varphi_1), \\ \frac{dV_{cm2}}{dt} = \ddot{y}_2 - \frac{m \cdot r_2}{m + m_2} \cdot (\dot{\Omega}_2 \cdot \sin \varphi_2 + \Omega_2^2 \cdot \cos \varphi_2) \end{cases} \quad (2)$$

Подставляя (1) в (2), получим первые дифференциальные уравнения движения для первого и второго двигателей:

$$\begin{cases} (m + m_1) \cdot \ddot{y}_1 - m \cdot r_1 \cdot (\ddot{\varphi}_1 \cdot \sin \varphi_1 + \dot{\varphi}_1^2 \cdot \cos \varphi_1) = -\eta_{1.1} \dot{y}_1 - cy_1 + (m + m_1)g, \\ (m + m_2) \cdot \ddot{y}_2 - m \cdot r_2 \cdot (\ddot{\varphi}_2 \cdot \sin \varphi_2 + \dot{\varphi}_2^2 \cdot \cos \varphi_2) = -\eta_{1.2} \dot{y}_2 - cy_2 + (m + m_2)g. \end{cases} \quad (3)$$

Запишем дифференциальные уравнения вращательного движения эксцентриксов для первого и второго двигателей с эксцентриситетами  $r_1$  и  $r_2$ :

$$\begin{cases} I_1 \cdot \ddot{\varphi}_1 = M_1 - \eta_{2,1} \cdot \dot{\varphi}_1 + m \cdot r_1 \cdot \ddot{y}_1 \cdot \sin \varphi_1 - m \cdot g \cdot r_1 \cdot \sin \varphi_1, \\ I_2 \cdot \ddot{\varphi}_2 = M_2 - \eta_{2,2} \cdot \dot{\varphi}_2 + m \cdot r_2 \cdot \ddot{y}_2 \cdot \sin \varphi_2 - m \cdot g \cdot r_2 \cdot \sin \varphi_2. \end{cases} \quad (4)$$

Отправной пункт дальнейших рассуждений состоит в том, что механические колебания массы  $m$  влияют на угловую скорость роторов двигателей  $\Omega_1$ ,  $\Omega_2$  и моменты  $M_1$ ,  $M_2$ , передаваемые статорами на роторы, зависят от угловых скоростей  $\Omega_1$ ,  $\Omega_2$ .

Зависимости  $M_1=M(\Omega_1)$  и  $M_2=M(\Omega_2)$  являются характеристиками двигателей и определяются их конструкцией и параметрами.

Во многих случаях характеристику электродвигателей можно принять в виде линейных функций:

$$\begin{cases} M_1 = M_{01} - b_1 \Omega_1 \\ M_2 = M_{02} - b_2 \Omega_2 \end{cases}, \quad (5)$$

где  $b_1, b_2 = \text{const}$ .

Величины  $M_{01}$  и  $M_{02}$  зависят от рабочего питающего напряжения двигателей. Изменяя рабочие питающие напряжения, можно изменять характеристики двигателей.

С учетом (5), обозначая

$$\eta_{1,1} = b_1 + \eta_{2,1} \text{ и } \eta_{1,2} = b_2 + \eta_{2,2},$$

преобразуем (4) к виду

$$\begin{cases} I_1 \cdot \ddot{\varphi}_1 = M_{01} - \eta_{1,1} \cdot \dot{\varphi}_1 + m \cdot r_1 \cdot \ddot{y}_1 \cdot \sin \varphi_1 - m \cdot g \cdot r_1 \cdot \sin \varphi_1, \\ I_2 \cdot \ddot{\varphi}_2 = M_{02} - \eta_{1,2} \cdot \dot{\varphi}_2 + m \cdot r_2 \cdot \ddot{y}_2 \cdot \sin \varphi_2 - m \cdot g \cdot r_2 \cdot \sin \varphi_2. \end{cases} \quad (6)$$

Уравнения (3) и (6) представляют собой систему дифференциальных уравнений движения конструкции электромеханической системы, изображенной на рис. 2.

Далее рассмотрим вопрос о трансформации энергии в данной электромеханической колебательной системе (рис. 2). В таких колебательных системах часто наблюдается явление трансформации энергии одного вида колебаний в другой или от одного тела системы к другому. В первом случае происходит периодическое затухание колебания одного вида и возникновение вследствие этого колебания другого вида. Во втором случае возникают биения, проявляющиеся в периодической амплитудной модуляции вибросигналов, генерируемых двигателями системы [10-13].

Рассмотрим данную электромеханическую систему, имеющую две обобщенные координаты  $q_1$  и  $q_2$ , отсчитываемыми от положения устойчивого равновесия системы. Исходим из того, что электромеханическая система совершает малые колебания с номинальными частотами вращения роторов первого, второго двигателей  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$  около положения устойчивого равновесия.

Взаимное воздействие двух двигателей друг на друга в колебательной электромеханической системе определяется через отношение обобщенных координат, равное отношению амплитуд колебаний  $\mu_1$  и  $\mu_2$  [12, 13].

Действие первого двигателя на второй определяется через отношение обобщенных координат, равное отношению амплитуд колебаний  $\mu_1$ :

$$\frac{q_2}{q_1} = \frac{A_2}{A_1} = \frac{F_{02}}{F_{01}} = \mu_1,$$

откуда

$$q_1 = F_{01} \sin(\Omega_1 t + \varphi_1); \quad q_2 = \mu_1 \cdot q_1 = \mu_1 \cdot F_{01} \sin(\Omega_1 t + \varphi_1).$$

Действие второго двигателя на первый определяется через отношение обобщенных координат, равное отношению амплитуд колебаний  $\mu_2$ :

$$\frac{q_1}{q_2} = \frac{A_1}{A_2} = \frac{F_{01}}{F_{02}} = \mu_2,$$

откуда

$$q_2 = F_{02} \sin(\Omega_2 t + \varphi_1); \quad q_1 = \mu_2 \cdot q_2 = \mu_2 \cdot F_{02} \sin(\Omega_2 t + \varphi_1).$$

Угловые частоты  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$  являются частотами свободных колебаний электромеханической системы. Соответствующие этим частотам колебания называют *главными колебаниями системы*. Меньшую из частот  $\Omega_1$  или  $\Omega_2$  называют *основной частотой*, а первое главное колебание, имеющее эту частоту, – *основным колебанием*. Колебание с меньшей частотой является основным в результирующем колебании системы [11].

Величины  $\mu_1$  и  $\mu_2$ , представляющие собой отношение обобщенных координат или амплитуд колебаний в каждом из главных колебаний, характеризуют *формы главных колебаний* и их называют *коэффициентами распределения*. *Формы главных колебаний электромеханической системы не зависят от частоты колебаний и определяются только параметрами колебательной системы*.

В электромеханической колебательной системе каждый из двух двигателей может совершать биения. При упрощающем предположении  $A_1=A_2=Y_m$  и  $\varphi_{01} = \varphi_{02}$  в результате сложения двух гармонических колебаний с близкими частотами возникают биения

$$y_{\text{рез}} = y_1 + y_2 = Y_m [\sin(\Omega_1 t) + \sin(\Omega_2 t)] = 2 \cdot Y_m \cdot \cos\left(\frac{\Omega_1 - \Omega_2}{2} t\right) \cdot \sin\left(\frac{\Omega_1 + \Omega_2}{2} t\right). \quad (7)$$

Если частоты  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$  очень близки друг к другу, то в электромеханической колебательной системе движение можно рассматривать как гармоническое колебание с амплитудой и фазой, медленно изменяющимися во времени [10-13]. Период изменения амплитуды колебаний двигателей и период биений определяются по формулам

$$T_Y = \frac{4\pi}{\Omega_1 + \Omega_2}, \quad (8)$$

$$T_6 = \frac{2\pi}{\Omega_1 - \Omega_2}. \quad (9)$$

Период биений равен половине периода изменения амплитуды биений. В процессе биений за время, равное половине периода  $T_6$ , двигатели обмениваются энергией.

### Экспериментальная часть

В электромеханической системе на каждом из двигателей типа АИР 63 В4 0,37 1500 в 370 Вт жестко закреплены диски с эксцентриситетами (рис.1). На левом и правом дисках закреплены грузики, создающие моменты инерции  $J_1 = 10,125 \cdot 10^{-5}$  кг·м<sup>2</sup>,  $J_2 = 6,125 \cdot 10^{-5}$  кг·м<sup>2</sup> соответственно. Круговая частота вращения роторов обоих двигателей  $\Omega_1 = \Omega_2 = 157$  рад/с, или  $f_{\text{вр}} = 25$  Гц. Круговая частота вибростенда  $\Omega_{\text{вс}} = 113,1$  рад/с.

Измерения уровней вибрации при работе двух электродвигателей, закрепленных на общем неподвижном основании и общем вязкоупругом основании, проводились виброанализатором «ОКТАВА – 110ВМ», предназначенным для измерения среднеквадратичных, эквивалентных и пиковых уровней виброускорения, а также октавных и третьоктавных уровней виброускорения в децибелах низкочастотной широкополосной вибрации. Акселерометры закреплялись на платформе между двигателями. Измеряемые прибором виброускорения в децибелах (дБ) затем переводились в линейные виброускорения ( $A$ , м/с<sup>2</sup>) и линейные виброперемещения ( $S$ , м).

Виброускорения в линейных единицах получают из соответствующих уровней по формулам, которые взяты из руководства по применению измерителя общей и локальной вибрации ОКТАВА-110В/101ВМ [14]. Соответствующие формулы для уровней определяют взаимосвязи между уровнями виброускорения, скорости и смещения в  $L_A$ (дБ),  $L_V$ (дБ) и  $L_S$ (дБ) соответственно [14]:

$$L_A = L_V + 20\lg(f) - 10; L_V = L_S + 20\lg(f) - 60; L_S = L_A - 20\lg(f) + 70.$$

Виброускорение, скорость и перемещения в линейных единицах могут быть получены из соответствующих уровней по формулам [13]

$$A = 10^{\frac{L_A - 120}{20}}, V = 10^{\frac{L_V - 146}{20}}, S = 10^{\frac{L_S - 222}{20}}.$$

Амплитудно-частотные спектры виброускорений, полученные после обработки вибросигналов от акселерометров при проведении замеров вибрационного воздействия на первый и второй двигатели, закреплённых на платформе, установленной на гидроопоры, выявляют (рис. 3) преобладающие частоты колебаний в спектре вибрационного воздействия и уровни виброускорений.

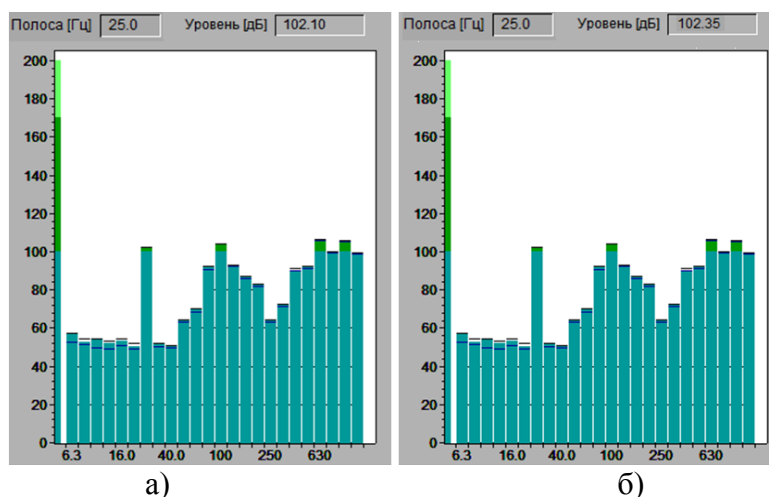


Рис. 3. Спектры виброускорений (1/3 октавы) при неподвижном вязкоупругом основании:  
а – при работе левого двигателя; б – при работе правого двигателя

Для представленных на рис. 3 при частоте 25 Гц уровни виброускорений в 102,10 дБ и 102,35 дБ для работающих левого и правого двигателей при выключенном вибростенде виброперемещения составят величину  $\approx 0,137 \cdot 10^{-3}$  м, определяемую как  $L_S = 102,1 - 20\lg(25) + 70 = 144,76$  дБ,

$$S = 10^{\frac{L_S - 222}{20}} = 10^{\frac{144,76 - 222}{20}} \approx 0,137 \text{ мм}.$$

На рис. 4 представлен спектр виброускорений на неподвижном вязкоупругом основании и одновременной работе левого и правого двигателей (на частоте 25 Гц уровень виброускорения составляет 103,07 дБ).

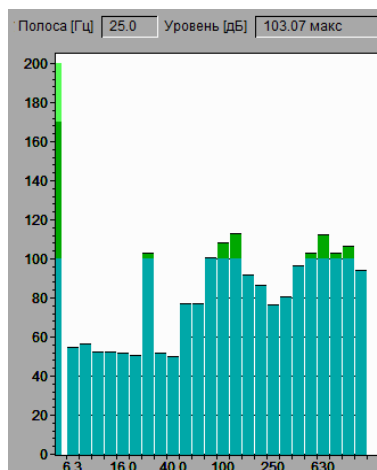
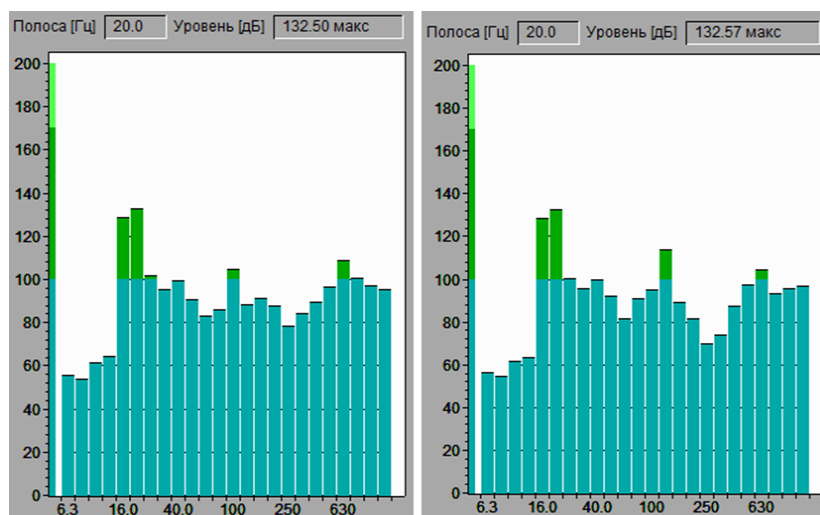


Рис. 4. Спектр виброускорений (1/3 октавы) при одновременной работе левого и правого двигателей и неподвижном вязкоупругом основании

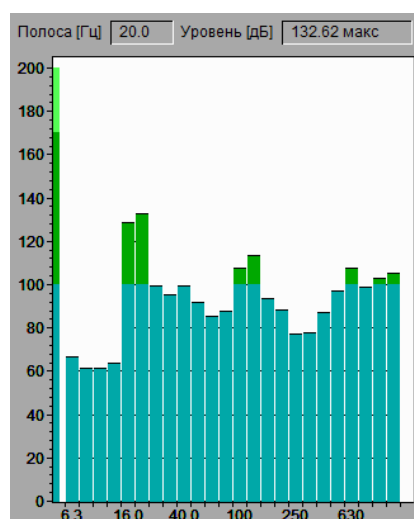
Амплитудно-частотный спектр виброускорений (рис. 4), полученный после обработки вибросигналов от вибрационного воздействия при первом и втором работающих двигателях и выключенном вибростенде не является равномерным. Здесь спектр виброускорений во всей полосе повторяет спектры отдельно работающих двигателей. Это указывает, что периодического перетока энергии колебательного движения в электромеханической системе от одного двигателя к другому двигателю нет, т.е. данная энергия периодически не оказывается как бы сосредоточенной то в одном, то в другом двигателе [2, 3].

На рис. 5 представлены спектры виброускорений при вибрирующем вязкоупругом основании и работе левого и правого двигателей. При частоте 20 Гц уровень виброускорения составляет 132,5 дБ при работающем левом и 132,57 дБ правом двигателях.



**Рис. 5. Спектры виброускорений (1/3 октавы) при вибрирующем вязкоупругом основании:**  
*a* – при работе левого двигателя; *б* – при работе правого двигателя

На рис. 6 представлен спектр виброускорений при вибрирующем вязкоупругом основании и одновременной работе левого и правого двигателей (на частоте 20 Гц уровень виброускорения составляет 132,62 дБ).



**Рис. 6. Спектр виброускорений (1/3 октавы) при одновременной работе левого и правого двигателей и вибрирующем вязкоупругом основании**

Амплитудно-частотный спектр виброускорений (рис. 6), полученный после обработки вибросигналов от вибрационного воздействия при первом и втором работающих двигателях

и включенном вибростенде не является равномерным, и в основном данный спектр также повторяет спектры отдельно работающих двигателей (рис. 5). На рис. 6 амплитуды спектральных составляющих виброускорений во всей полосе повышены по сравнению с амплитудами спектра виброускорений на (рис. 5). Это можно объяснить только возросшим уровнем возбуждаемой вибростендом вибрации.

Кроме того, в спектре (рис. 6), а также и в спектрах виброускорений отдельно работающих двигателей (рис. 5) наблюдается рядом стоящие с полосой частот 20 Гц и спектральные составляющие в полосе частот 16 Гц. Их средняя частота равна частоте возбуждения вибростенда  $f_{вс} = (f_{16} + f_{20})/2 = 18$  Гц.

В электромеханической системе (рис.1) возникает взаимное действие вибростенда и работающих двигателей. В этом случае может наблюдаться переток энергии колебательного движения в электромеханической системе от одного двигателя к другому через платформу вибростенда за счёт возбуждаемой им вибрации. В результате чего в электромеханической системе могут возникать биения, когда частоты  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$  главных колебаний двигателей близки друг к другу.

Для представленных на рис. 5 и рис. 6 в полосе частот 20 Гц уровней виброускорений в 132,50 дБ, 132,57 дБ и 132,62 дБ максимальные уровни виброперемещений работающих левого и правого двигателей при включенном вибростенде и совместно составят величину  $\approx 4,99 \cdot 10^{-3}$  м, определяемую как  $L_S = 132,62 - 20\lg(20) + 70 = 175,979$  дБ

$$S = 10^{\frac{L_S - 222}{20}} = 10^{\frac{175,979 - 222}{20}} \approx 4,99 \text{ мм.}$$

Для оценки распределения энергии колебательного движения в электромеханической системе от одного двигателя к другому через платформу вибростенда по возникающим биениям, когда частоты  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$  главных колебаний двигателей близки друг к другу, необходимо моделирование гармонических колебаний по данным, полученным в ходе эксперимента.

#### *Моделирование гармонических колебаний*

В данной работе авторы исследуют влияние параметров вибрационного процесса двух работающих двигателей с неуравновешенными роторами, закреплённых на одной платформе, установленной на гидроопорах. Целью работы являлось моделирование процессов сложения колебаний от двух работающих двигателей, а также как частный случай выделение биения этих колебаний.

При моделировании процессов сложения двух гармонических колебаний по данным, полученным в ходе эксперимента, удобно эти гармонические колебания двигателей представить по формулам:

$$y_1 = A_1 \cos(\Omega_1 t + \varphi_1); y_2 = A_2 \cos(\Omega_2 t + \varphi_2).$$

При действии вибрации – на работающие левый и правый двигатели их уровни виброускорений в полосе спектра виброускорений 25 Гц примем 102,35 дБ, что соответствует их равным амплитудам виброперемещений  $A_1 = A_2 = Y_m = 0,137 \cdot 10^{-3}$  м, (рис. 3) и (рис. 6). Пусть при действии вибрации вибростенда имеем расстройки двигателей по частоте  $\Delta f_{дв.1} = f_{1.1} - f_{1.2} = 1$  Гц и  $\Delta f_{дв.2} = f_{2.1} - f_{2.2} = 1$  Гц.

Тогда круговые частоты главных колебаний двигателей при включённом вибростенде равны  $\Omega_1 = 2\pi f_1 = 157,0795$  рад/с и  $\Omega_2 = 2\pi f_2 = 150,796$  рад/с.

При таких условиях для результирующего колебания, применяя формулу для суммы косинусов, получим

$$y_{рез} = 2 \cdot A_1 \cdot \cos\left(\frac{\Omega_1 - \Omega_2}{2} t\right) \cdot \cos\left(\frac{\Omega_1 + \Omega_2}{2} t + \frac{\pi}{2}\right),$$

где  $a = \left| 2 \cdot A_1 \cdot \cos\left(\frac{\Omega_1 - \Omega_2}{2} t\right) \right|$  определяет закон изменения амплитуды результирующего колебания со временем. Так как множитель  $a$  может изменяться от  $-2$  до  $+2A$ , берем его абсолютную величину.

На рис. 7 – рис. 10 и представлены результаты моделирования гармонических колебаний по данным, полученным в ходе эксперимента.

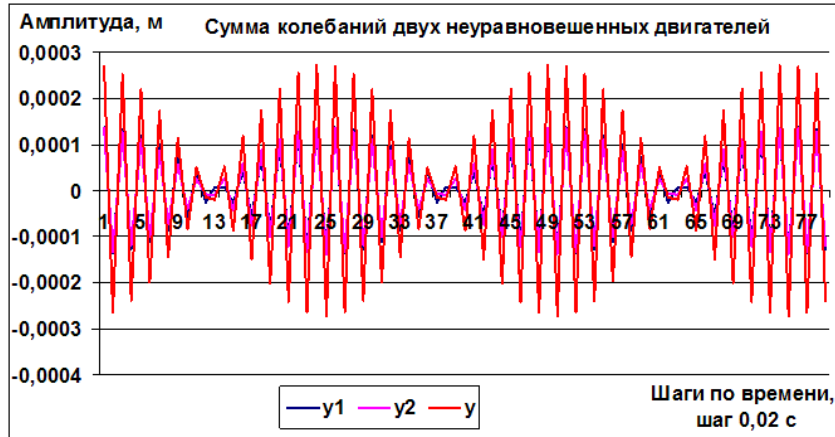


Рис. 7. Сумма колебаний двух неуравновешенных двигателей при  $\Delta f_{дв.1} = 1$  Гц

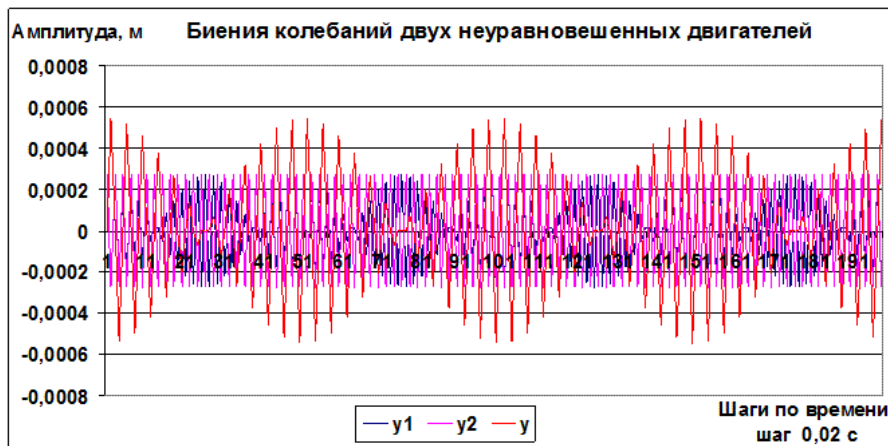


Рис. 8. Биения колебаний двух неуравновешенных двигателей при  $\Delta f_{дв.1} = 1$  Гц

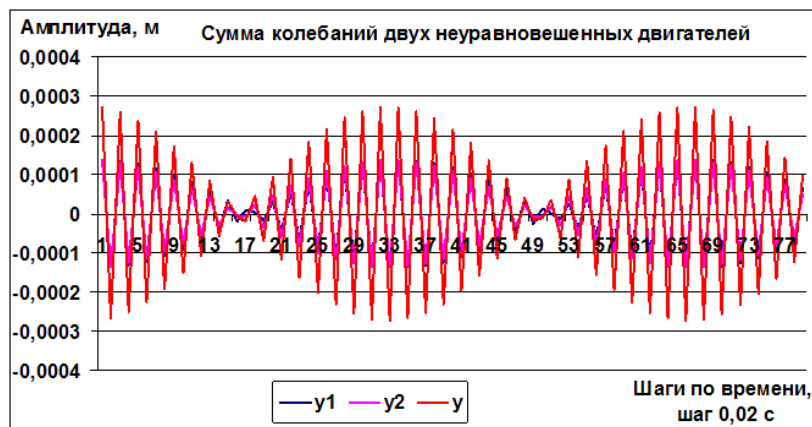


Рис. 9. Сумма колебаний двух неуравновешенных двигателей при  $\Delta f_{дв.2} = 0,75$  Гц

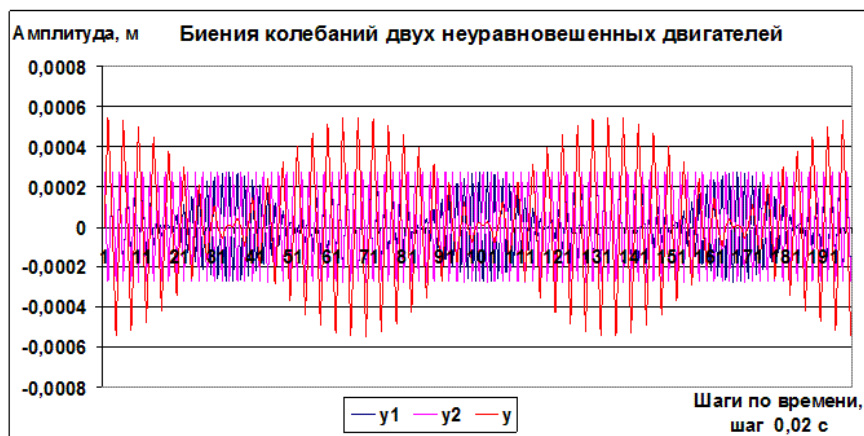


Рис. 10. Биения колебаний двух неуравновешенных двигателей при  $\Delta f_{дв.2} = 0,75$  Гц

В результате эксперимента было выявлено, что синхронизация осуществляется по тому двигателю, который ранее достиг стационарного режима. Обнаружено возрастание амплитуд низкочастотных гармоник спектра при синхронизации двигателей на вибрирующем основании. При этом за счет зависимости амплитуды колебаний от частоты нарушается линейность всей электромеханической системы, что вызывает низкочастотные биения. Следовательно, в данном случае синхронизация нарушается.

Выражение (7) дает возможность определить разностную частоту низкочастотных биений, которую невозможно замерить без сложных акустических приборов. Эти значения позволят сравнить их с диапазоном возможных резонансных частот и принять решение по подавлению виброколебаний.

Факт нарушения синхронизации при дополнительном вибровозмущении вязкоупругого основания предоставляет еще одну возможность нивелировать это отрицательное явление взаимной синхронизации.

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

#### Библиографический список

1. **Блехман, И.И.** Синхронизация в природе и технике / И.И. Блехман. – М.: Наука, 1971. – 352 с.
2. **Кононенко, В.О.** Нелинейные колебания механических систем / В.О. Кононенко. – Киев: Наук. думка, 1980. – 382 с.
3. Вибрации в технике. Т. 2. Колебания нелинейных механических систем / И.И. Блехман [и др.]. – М.: Машиностроение, 1979. – 351 с.
4. **Фролов, К.В.** Колебания машин с ограниченной мощностью источника энергии и переменными параметрами // Нелинейные колебания и переходные процессы в машинах. – М.: Наука, 1972. – С. 5–16.
5. **Нагаев, Р.Ф.** Квазиконсервативные синхронизирующиеся системы / Р.Ф. Нагаев. – СПб.: Наука, 1996. – 252 с.
6. **Ходжаев, К.Ш.** Резонансные и нерезонансные случаи в задаче о возбуждении механических колебаний // Прикладная математика и механика. – 1968. – Т. 32. Вып. 1. – С. 85–100.
7. **Гордеев, Б.А.** Причины возникновения синхронизации в рельсовом транспорте / Б.А. Гордеев [и др.] // Приволжский научный журнал. – 2009. – № 4. – С. 47–53.
8. **Гордеев, Б.А.** Задача синхронизации вращения пары двигателей на упругом основании / Б.А. Гордеев, Д.А. Ковригин, А.В. Леонтьева // Вестник машиностроения. – 2011. – № 10. – С. 3-7.
9. **Гордеев, Б.А.** Причины возникновения фазовой синхронизации двух асинхронных двигателей в зависимости от параметров системы / Б.А. Гордеев, А.В. Леонтьева // Прикладная механика и технологии машиностроения: моделирование динамических систем: сборник научных трудов. – 2011. – Вып. 3. – С. 80–90.



10. **Бабаков, И.М.** Теория колебаний / И.М. Бабаков. – М.: Наука, 1968. – 560 с.
11. **Тимошенко, С.П.** Колебания в инженерном деле / С.П. Тимошенко. – М.: Наука. 1967. – 444 с.
12. **Журавлев, В.Ф.** Прикладные методы в теории колебаний / В.Ф. Журавлев, Д.М.Климов. – М.: Наука, 1988. – 328 с.
13. **Быховский, И.И.** Основы теории вибрационной техники / И.И. Быховский. – М.: Машиностроение, 1968. – 362 с.
14. Измеритель общей и локальной вибрации портативный ОКТАВА-110В/101ВМ. Руководство по эксплуатации. РЭ 4277-002-76596538-05; «ОКТАВА-ЭЛЕКТРОНДШАЙН» ООО «ПКФ Цифровые приборы». – М., 2006. С. 28.

*Дата поступления  
в редакцию 17.05.2016*

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

### **BEATS OCCURRING AT UNSTABLE SYNCHRONIZATION OF THE TWO ENGINES MOUNTED ON A COMMON VISCOELASTIC BASE**

Institute of problems of mechanical engineering Russian Academy of Sciences (KIAM RAS)<sup>1</sup>,  
Nizhny Novgorod state technical university n. a. R. E. Alexeyev<sup>2</sup>

**The object of study:** In the article considered two main options of synchronization of two motors: synchronization on a fixed elastic base and synchronization with a vibrating base.

**Objective:** The article presents the results of experimental studies of the effects occurring at synchronization the two engines mounted on elastic foundation.

**Results:** Carry out spectral analysis and identify informative harmonic components that allow defining main harmonics generated by the vibration process.

**Application field:** in the system of shock damping of power electrical installations and mechanical equipment.

*Key words:* transitional process; synchronization; vibration; hydraulic support; experiment; low frequency beats; spectrum of vibrating processes.

УДК 621.317.629.12

Г.И. Коробко<sup>1</sup>, В.В. Лебедев<sup>2</sup>, П.В. Ахлестин<sup>1</sup>

## КОМПЕНСАЦИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЯ В СУДОВЫХ СЕТЯХ ПРИ ПИТАНИИ ОТВЕТСТВЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта»<sup>1</sup>,  
ООО «СТАНДАРТ», Нижний Новгород<sup>2</sup>

Показано применение активного устройства компенсации высших гармоник напряжения в судовой единой электроэнергетической системе. Разработана и предложена методика определения коэффициента нелинейных искажений напряжения на «чистой шине», от которой питаются ответственные потребители.

*Ключевые слова:* активный компенсатор, высшие гармоники, единая электроэнергетическая система, «чистая шина», судовые ответственные потребители.

На речных и морских судах достаточно широко используют единую электроэнергетическую систему (ЕЭС) для питания гребной электрической установки (ГЭУ) и общесудовых потребителей (ОСП). Такую систему применяют на ледоколах, пассажирских, промысловых судах и судах технического флота. На рис. 1 представлена блок-схема ЕЭС переменного тока. В её состав входят главные генераторы G1, G2, G3, обеспечивающие питание энергией ГЭУ. Аварийно - стояночный дизель – генератор G4 – обеспечивает питание общесудовых потребителей в режиме стоянки судна и питание потребителей, влияющих на живучесть судна при аварийных режимах. Преобразователи частоты: ПЧ1 управляет электродвигателем подруливающего устройства М1, ПЧ2 и ПЧ3 управляет двумя гребными электродвигателями М2 и М3 соответственно.

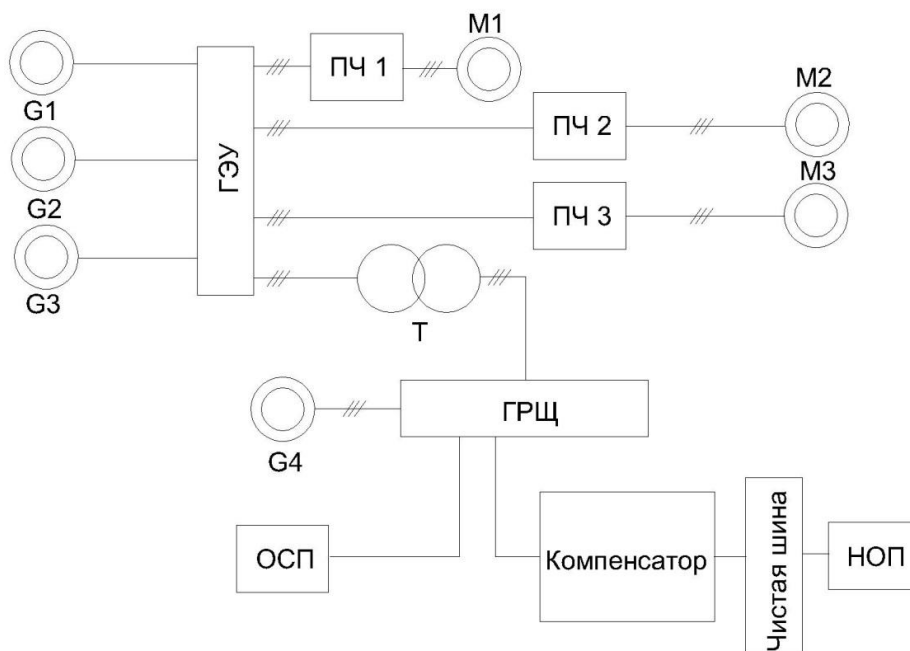


Рис. 1. Блок-схема единой электроэнергетической системы

В ходовом режиме секция ОСП получает питание от главного распределительного

щита – ГРЩ, через силовой понижающий трансформатор - Т. Наиболее ответственные потребители (НОП) получают питание от так называемой «чистой шины» - ЧШ, подключаемой к ГРЩ через компенсатор.

Ответственные потребители судна должны получать достаточно высокое качество электроэнергии, предъявляемое Российским морским регистром судоходства – РМРС [1] и Российским речным регистром – РРР [2].

Примерами таких потребителей являются:

1. Навигационные системы.
2. Гироскопические навигационные устройства.
3. Навигационные устройства отображения, обработки и регистрации.
4. Лаг и эхолот.
5. Магнитные судовые компасы.
6. Авторулевой.
7. Комплексная система автоматика.
8. Пожарная сигнализация.
9. Аэрозольное пожаротушение.
10. Топливная система и т.д.

Искажения кривой напряжения и тока, вносимые статическими преобразователями в судовую сеть, вызывают [4]:

- понижение эффективности при выработке, передаче и использовании электроэнергии;
- повышение токов и напряжений высших гармоник вследствие параллельного и последовательного резонансов;
- старение изоляции электрического оборудования и сокращение, вследствие этого, срока его службы;
- неверную работу систем управления;
- вибрацию электродвигателей;
- пульсацию вращающего момента электродвигателей;
- перегрев обмоток трансформаторов, двигателей и другого оборудования;
- отключение оборудования при искажении напряжения сети.

Одним из важных показателей качества электроэнергии является - коэффициент несинусоидальности кривой напряжения судовой сети, обусловленной работой силовых полупроводниковых устройств, не должен превышать 10 % [1]. Применение силовых полупроводниковых устройств, вызывающих искажение синусоидальности кривой напряжения более 10 %, является в каждом случае предметом специального рассмотрения Регистром. Значение коэффициента несинусоидальной кривой напряжения не должно превышать 10% и определяется по формуле

$$K_{II} = \frac{1}{U_c} * \left( \sqrt{\sum_{n=2}^{200} U_n^2} * 100\% \right),$$

где  $U_c$  – действующее значение напряжения сети;

$U_n$  – напряжение гармонической составляющей  $n$ -го порядка;

$n$  – порядок высшей гармонической составляющей;

$K_{II}$  - коэффициент нелинейных искажений.

Значение  $K_{II}$  регламентируется для полностью укомплектованной судовой энергетической системы.

По особому согласованию с Регистром допускается использование отдельных шин с  $K_{II} > 10\%$  для питания мощных источников гармонических составляющих напряжений и не восприимчивого к ним электрооборудования при условии, что указанные шины подключаются к основным шинам сети через развязывающие устройства.

Для снижения искажений сетевого напряжения, питающего ответственных потребителей, в ЭЭС (рис. 2) включён компенсатор К.

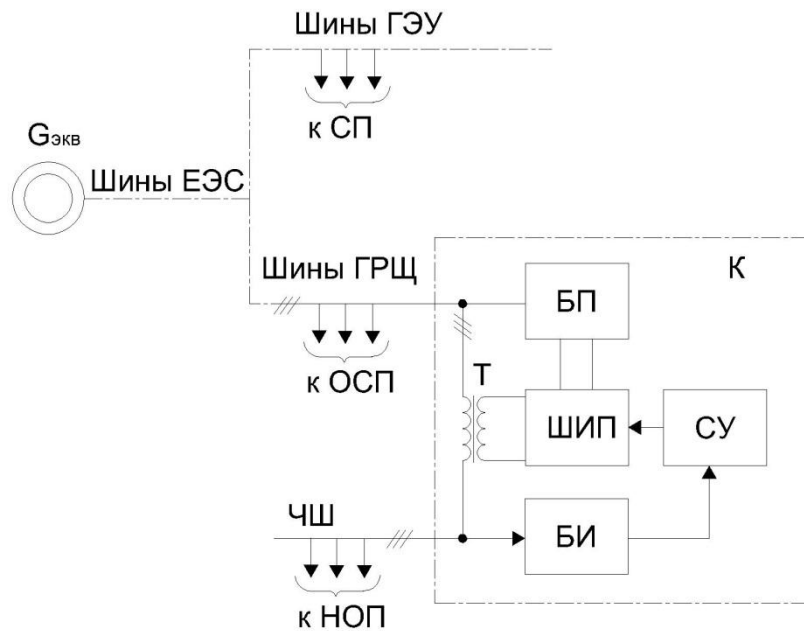


Рис. 2. Схема электроснабжения судна с компенсатором К, подключённым к чистой шине

Блок схема компенсатора состоит из вольтодобавочного трансформатора - Т, вторичная обмотка которого включена между шинами ГРЦ и «чистой шиной» - ЧШ. Первичная обмотка трансформатора получает управляющее напряжение от широтно – импульсного преобразователя – ШИП, подключенного к блоку питания – БП. Система управления – СУ получает напряжение на «чистой шине» от блока измерения – БИ и формирует сигнал компенсации для управления ШИПа. Вольтодобавочным трансформатором передаётся в сеть сумма высших гармоник напряжения, которые находятся в противофазе с высшими гармониками напряжения на шинах ГРЦ [4].

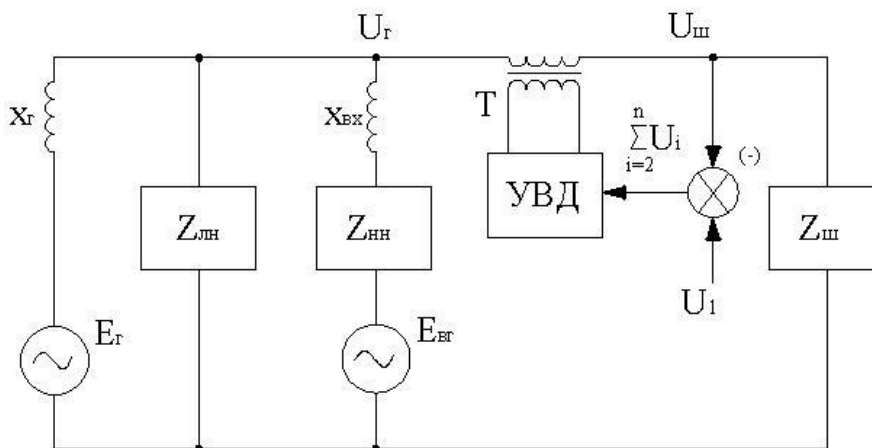


Рис. 3. Общая схема замещения ЭЭС с активным компенсатором

Схема замещения ЭЭС при компенсации нелинейных искажений, вносимых работой эквивалентным мощным нелинейным преобразователем, показана на рис. 3. Преобразователь представлен блоком  $Z_{\text{НН}}$  и генератором высших гармоник ЭДС  $E_{\text{ВГ}}$ . На входе преобразователя

зователя введено эквивалентное индуктивное сопротивление  $X_{ex} = X_m + X_p + X_l$ , где  $X_m$  – приведенное индуктивное сопротивление вольтодобавочного трансформатора;  $X_p$  – индуктивное сопротивление реактора или входного трансформатора;  $X_l$  – индуктивное сопротивление линии. Создаваемые преобразователем токи высших гармоник в контурах системы приводят к искажению напряжения на шинах ЕЭС [5].

В схеме замещения эквивалентный генератор представлен источником синусоидальной ЭДС  $E_g$  основной гармоники и эквивалентным индуктивным сопротивлением  $X_g$ . Кроме того, в схеме предусмотрена линейная нагрузка  $Z_{лн}$ , которая в общем случае может содержать активно-индуктивную составляющую и ЭДС (для асинхронных электродвигателей). Для компенсации нелинейных искажений напряжения на «чистой шине» в схему введено устройство вольтодобавки (УВД) подключенное к вольтодобавочному трансформатору (Т). Управление устройством осуществляется сигналом разности напряжения на «чистой шине»,

который в общем случае содержит весь спектр гармоник  $U_c = U_1 + \sum_{i=2}^n U_i$ . Таким образом, на

входе УВД будет сигнал суммы  $\sum_{i=2}^n U_i$ , находящийся в противофазе с высшими гармониками напряжения на шине [4]. Анализ схемы замещения выполнялся для первой гармоники и отдельно для всех высших гармоник, источником которых является нелинейная нагрузка. Учитывая, что в первом случае сигнал на входе вольтодобавочного устройства равен нулю, схема замещения будет иметь вид, показанный на рис. 4.

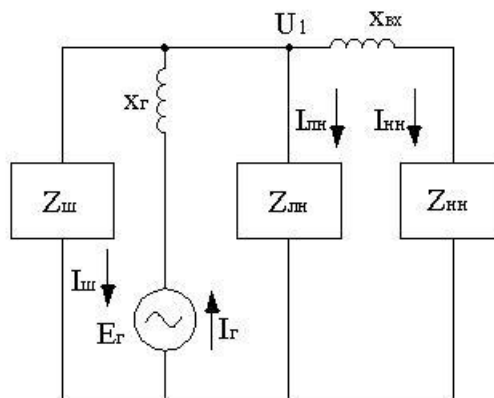


Рис. 4 Схема замещения ЕЭС для основной (первой) гармоники.

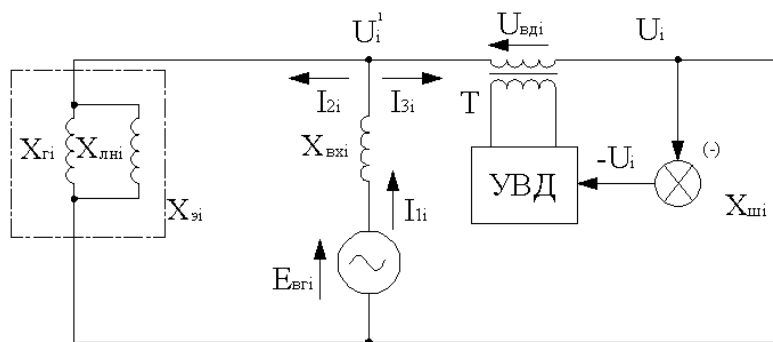


Рис. 5 Схема замещения ЕЭС с вольтодобавкой для высших гармоник

Напряжение на зажимах шины генератора равно  $U_1 = E_2 - I_2 * X_2$ , где ток генератора  $I_2 = I_{лн} + I_{нн} + I_{ш}$  равен сумме нагрузок токов линейной  $I_{лн}$ , нелинейной  $I_{нн}$ , «чистой шины»  $I_{ш}$  и определяется известными методами по их параметрам. Поскольку генератор оснащен автоматической системой регулирования возбуждения, то напряжение на его зажимах в установившемся режиме будет равно номинальному при изменении величины, характера и соотношения линейных и нелинейных нагрузок. Схема замещения ЕЭС для высших гармоник представлена на рис. 5.

Для высших гармоник тока индуктивное сопротивление элементов схемы определяется как  $X_i = X_1 * i$ , где  $i$  – номер гармоники. Линейную нагрузку представим индуктивным сопротивлением  $X_{лнi}$ . Тогда включенные параллельно  $X_{2i}$  и  $X_{лнi}$  можно заменить на эквивалентное внешнее индуктивное сопротивление:

$$X_{эi} = \frac{X_{2i} * X_{лнi}}{X_{2i} + X_{лнi}}$$

Будем считать, что индуктивное сопротивление трансформатора (Т) равно нулю. Для определения напряжения высших гармоник на «чистой шине» используем выражение

$$U_i = I_{3i} * X_{шi}. \quad (1)$$

На основании схемы замещения (рис. 5) запишем законы Кирхгофа:

$$\begin{aligned} I_{1i} - I_{2i} - I_{3i} &= 0, \\ E_{э2i} &= X_{эxi} * I_{1i} + X_{эi} * I_{2i}, \\ E_{э2i} - U_{эди} &= X_{эxi} * I_{1i} + X_{шi} * I_{3i}. \end{aligned} \quad (2)$$

Используя систему уравнений (2), получаем выражения для токов в виде

$$I_{1i} = \frac{E_{э2i} - U_{эди} - X_{эxi} * I_{1i}}{X_{шi}} + \frac{E_{э2i} - X_{эxi} * I_{1i}}{X_{эi}} \quad (3)$$

$$I_{2i} = \frac{E_{э2i} - X_{эxi} * I_{1i}}{X_{эi}} \quad (4)$$

$$I_{3i} = \frac{E_{э2i} - U_{эди} - X_{эxi} * I_{1i}}{X_{шi}}. \quad (5)$$

Преобразуем выражение (3) к виду

$$I_{1i} = \frac{E_{э2i} * K_x}{X_{эi}} + \frac{U_{эди} * K_x}{X_{шi}}, \quad (6)$$

где  $K_x = \frac{X_{эi}}{X_{эi} + X_{эxi}}$  – коэффициент соотношения эквивалентного и входного индуктивных сопротивлений для высших гармоник.

Преобразовав выражение (5), получаем

$$I_{3i} = \frac{E_{э2i} - U_{эди}}{X_{шi}} - K_x * \frac{X_{эxi}}{X_{шi}} * \left( \frac{E_{э2i}}{X_{эi}} - \frac{U_{эди}}{X_{шi}} \right). \quad (7)$$

Подставив выражение (7) в уравнение (1), получим

$$U_i = E_{э2i} * \left( 1 - \frac{X_{эxi}}{X_{эi}} * K_x \right) - U_{эди} * \left( 1 - \frac{X_{эxi}}{X_{шi}} * K_x \right). \quad (8)$$

Поскольку  $U_{вдi} = U_i * K_{вд}$ , где  $K_{вд}$  – общий коэффициент усиления (передачи) вольтодобавочного устройства и трансформатора, уравнение (8) получаем в виде

$$U_i = \frac{E_{\theta zi} * K_x}{1 + K_{\theta d} * (1 - K_{ui})}, \quad (9)$$

где  $K_{ui} = K_x * \frac{X_{\theta xi}}{X_{ui}}$  - коэффициент индуктивного сопротивления «чистой шины».

В выражении коэффициента  $K_{ui}$  значение  $K_x$  примерно равно  $0,7 \div 0,8$ , а отношение  $\frac{X_{\theta xi}}{X_{ui}}$  составляет  $0,03 \div 0,05$ , тогда величина  $K_{ui}$  лежит в диапазоне  $0,02 \div 0,04$ . В большинстве случаев  $K_{ui}$  можно пренебречь, и выражение (9) принимает вид

$$U_i = \frac{E_{\theta zi} * K_x}{1 + K_{\theta d}}. \quad (10)$$

Величина коэффициента нелинейных искажений может быть определена из графических зависимостей  $K_{II} = f(S_{np}^*, X_2)$  [6], где  $S_{np}^*$  – приведенная относительная мощность эквивалентного преобразователя. Для предварительного расчёта  $K_{II}$  используем составленную таблицу 1 для двух основных схем преобразователей при значении  $S_{np}^* = 1$ , (6-фазная мостовая и 12-фазная 2-мостовая схемы).

Таблица 1

X <sub>Г</sub> , о.е.		0,06	0,08	0,1	0,12	0,14	0,16	0,18	0,2	0,22	0,24	0,26	0,28	0,3
K <sub>И0</sub> , %	6 <sup>ти</sup> Фазная мостовая	13	16,5	19,5	22	24,5	27	29	31	32,5	34	35,5	37	38,5
	12 <sup>ти</sup> Фазная 2 <sup>х</sup> мостовая	8,5	11	13,5	15,5	17,5	19	20,5	22	23,5	25	26	27	28

Расчёт фактического значения коэффициента нелинейных искажений при любой величине  $S_{np}^*$  и выбранной схемы преобразователя определяется выражением

$$K_{ИС} = K_{И0} * K_S + K_{cx} * X_2 * (1 - K_S) * K_S, \quad (11)$$

где  $K_S = S_{np}^*$  – относительный коэффициент мощности нелинейной нагрузки.  $K_{cx}$  - коэффициент схемы равен 100 - для 6-фазной мостовой и 65 для 12- фазной 2-мостовой схемы.

В соответствии с выражением (10) изменение коэффициента вольтодобавки  $K_{\theta d}$  приводит к пропорциональному изменению всех высших гармоник напряжения  $U_i$ . Можно показать, что в этом случае будет иметь такое же изменение величины коэффициента нелинейных искажений напряжения. Следовательно, с учётом выражений (10) и (11) получаем коэффициент нелинейных искажений напряжения в общем виде:

$$K_{II} = \frac{K_{ИС} * K_x}{1 + K_{\theta d}}. \quad (12)$$

В качестве нелинейной нагрузки рассмотрим трёхфазный мостовой выпрямитель с выбранными значениями  $K_S$ . Величину максимального коэффициента нелинейных искажений  $K_{И0}$ , для конкретного значения  $X_2 = 0,14$ , выбираем из табл. 1. После выполнения расчётов, на рис. 6 и 7 представлены графические зависимости коэффициента нелинейных искажений  $K_{II}$  от величины коэффициента вольтодобавки  $K_{\theta d}$ , полученные в соответствии с выражением (12).

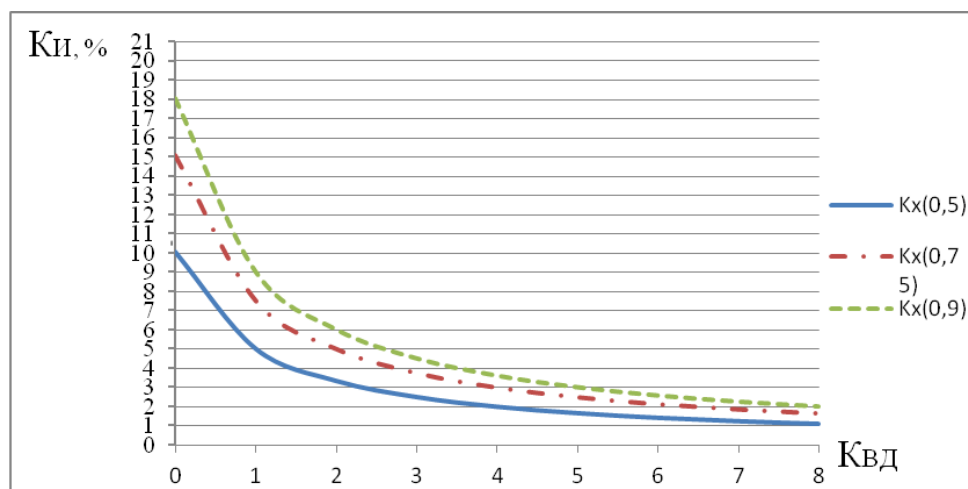


Рис. 6. Зависимость  $K_{II} = f(X_{\text{вд}})$  при  $X_2 = 0,14$  и  $K_S = 0,7$

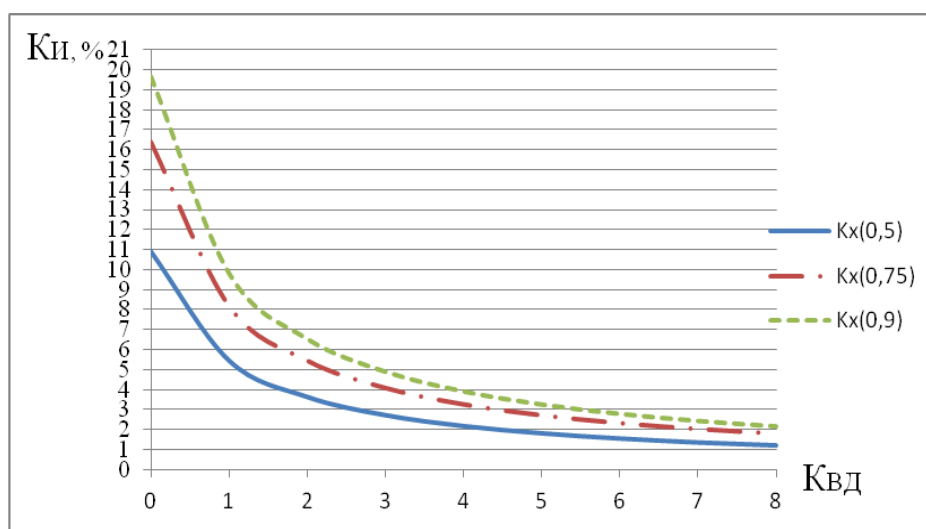


Рис. 7. Зависимость  $K_{II} = f(X_{\text{вд}})$  при  $X_2 = 0,14$  и  $K_S = 0,8$

Таким образом, использование активного принципа вольтодобавки позволяет эффективно компенсировать нелинейные искажения напряжения на «чистой шине». При величине коэффициента вольтодобавки, равной 6 и более, величина коэффициента искажений становится меньше 2 %.

Анализ высших гармоник в сетях ЭЭС судов показывает, что необходимо применение различных устройств как пассивных, так и активных, для снижения нелинейных искажений на шинах электростанции. В результате математического описания составленной схемы замещения судовой электроэнергетической системы были получены выражения для расчёта коэффициента нелинейных искажений напряжения на «чистой шине», от которой получают питание наиболее ответственные потребители.

#### Библиографический список

1. Российский Морской Регистр Судоходства. Правила классификации и постройки судов (в 4-х т.) Т3. – С.-Петербург, 2015.
2. Российский Речной Регистр. Правила классификации и постройки судов (в 4-х томах). Т3. – М., 2008.
3. **Коробко, Г.И.** Использование принципа вольтодобавки для компенсации нелинейных искажений напряжения./ Г.И. Коробко, В.В. Лебедев, П.В. Ахлестин // Вестник ВГАВТ. – Н.Новгород: ВГУВТ. – 2015. – №43. – С. 303–307.



4. **Лебедев, В.В.** Активный вольтодобавочный компенсатор нелинейных искажений напряжения судовой сети: дисс. ... канд. техн. наук, специальность 05.09.03, 2014. Нижний Новгород. –132 с.
5. **Коробко Г.И.** Повышение качества электроэнергии в судовых электроэнергетических системах с использованием вольтодобавочных устройств / Г.И. Коробко [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород. 2012. Т 78 №1 (94). – С. 192–203.
6. Качество электрической энергии на судах: справочник / В.В. Шейнихович [и др.]. – Л.: Судостроение, 1988. –160 с.

*Дата поступления  
в редакцию 11.05.2016*

**G.I. Korobko, V.V. Lebedev, P.V. Akhlestin**

**DISTORTION COMPENSATION VOLTAGE IN SHIP NETWORKS  
WHEN POWERED SHIP RESPONSIBLE CONSUMERS**

Volga state University of water transport,  
llc «STANDARD», Nizhny Novgorod

**Conclusion:** The above equivalent circuits of a ship uniform electropower system, allowed us to receive expression for calculation of the factor of nonlinear distortions of tension. An increasing the factor of the voltage booster equal to 6 and more, the factor of nonlinear distortion of tension is less than 2%.

**Design/methodology/approach:** Analytical computation.

**Findings:** The analysis shows that ship uniform electro power systems work at maximum permissible level of the highest harmonicas of tension. Use of the active compensator on the basis of the voltage booster allows to compensate effectively nonlinear distortions on the pure tire.

*Key words:* active compensator, the highest harmonicas, unified power system, «the pure tire», responsible consumers.

УДК 621.314

С.Ю. Панфилов<sup>1</sup>, А.И. Чивенков<sup>1</sup>, И.С. Панфилов<sup>2</sup>, Н.Н. Вихорев<sup>1</sup>**ТРЕБОВАНИЯ К ПАРАМЕТРАМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОМПОНЕНТОВ  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ**Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева<sup>1</sup>,  
ОАО «НПП «Полет», Нижний Новгород<sup>2</sup>

Данная работа направлена на освещение проблемы предварительного проектирования электромагнитных компонентов импульсных преобразователей напряжения для радиоэлектронных устройств. В статье большое внимание уделено особенностям различных типов одноктных преобразователей, заключающиеся в режимах намагничивания, размагничивания и перемагничивания сердечников трансформаторов. Предложена методика выбора магнитопроводов по требуемому его объему или массе с учетом частных гистерезисных циклов работы сердечника, приведены необходимые для расчета выражения и соотношения параметров элементов.

*Ключевые слова:* дроссель, трансформатор, одноктный преобразователь, перемагничивание и размагничивание сердечника, транзистор, остаточная индукция, петля намагничивания, объем сердечника.

Из-за многообразия схемных (по принципу действия) и технических характеристик преобразователей постоянного напряжения в постоянное (ППН) зачастую не возможно для них использовать унифицированные серийно изготавливаемые электромагнитные компоненты (ЭМК) [1,2]. Оптимальным разрешением этой проблемы является разработка или использование унифицированных конструкций ЭМК и организация заказной системы их производства по техническим требованиям (условиям) заказчика. Поэтому актуальным остается совершенствование методик расчета ЭМК с учетом их режимов работы в ППН [3-5].

Существуют четыре основные схемы одноктных трансформаторных (с гальванической развязкой) ППН, различающихся по принципу действия [6-10]:

- тип P1 - с размагничивающей обмоткой W3 трансформатора по первичной стороне (рис. 1, а);
- тип P2 - с размагничивающей обмоткой W3 трансформатора по вторичной стороне (рис. 1, б);
- тип P1P2 - с размагничивающей обмоткой W3 трансформатора по первичной и перемагничивающей W4 по вторичной стороне (рис. 1, в);
- тип P2P2 - с размагничивающей W3 и перемагничивающей W4 обмоткой трансформатора по вторичной стороне (рис. 1, г).

Каждая из схем содержит по одному трансформатору и дросселю, но работающих в каждой из схем в различных режимах даже при одинаковых входных и выходных параметрах ППН.

В приведенных ППН передача энергии от первичного источника в нагрузку происходит только при намагничивании сердечника трансформатора в одну сторону, а частота следования импульсов напряжения на выходной фильтр равна частоте работы силового транзистора.

В ППН типов P1 и P2 сердечник трансформатора намагничивается (в интервалы времени включенного транзистора через обмотку W1) и размагничивается (в интервалы времени выключенного транзистора через обмотку W3) по частным гистерезисным циклам, причем мгновенные значения магнитной индукции  $b$  и намагничивающей силы  $h$  могут принимать только положительные значения, т.е. ток намагничивания трансформатора может принимать только положительные или нулевые значения. Предельным частным циклом намагничивания при этом будет являться петля намагничивания с координатами  $B_r$  (значение остаточной ин-

дукции кривой намагничивания материала сердечника) и  $B_H$  (значение индукции на начале изгиба кривой намагничивания материала сердечника).

Отличие ППН типа Р2 от ППН типа Р1 состоит в формировании направления рекуперации энергии, накопленной в трансформаторе в интервал времени включенного силового транзистора: в ППН типа Р1 энергия возвращается в первичный источник, а в ППН типа Р2 направляется в нагрузку.

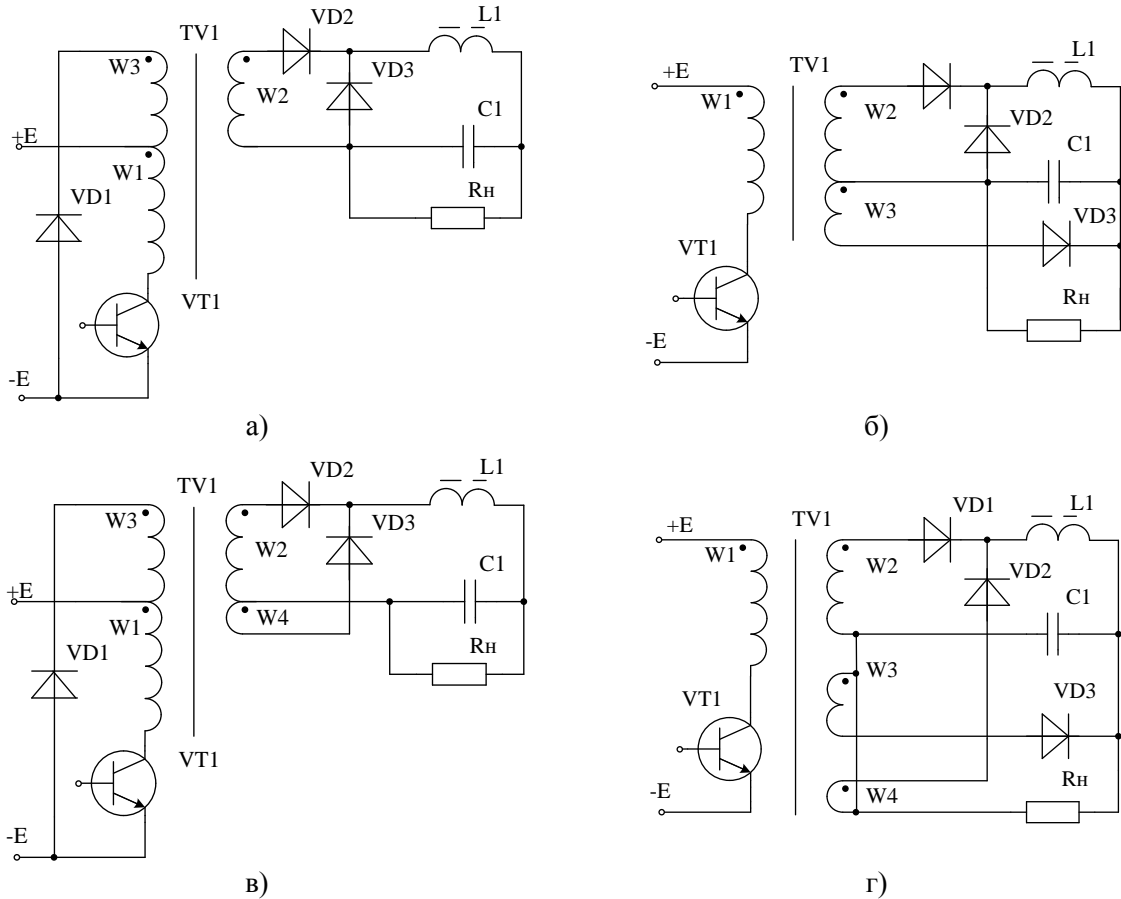


Рис. 1. Основные схемы однотактных трансформаторных ППН

Оптимальным режимом работы ППН обоих типов является режим, при котором ток дросселя не прерывается (не принимает нулевых значений), а ток намагничивания трансформатора, наоборот, должен обязательно принимать нулевые значения в интервал времени выключенного транзистора.

Для ППН типа Р2 такими условиями является

$$L_{w1} > \frac{Ek_3}{2I_H k_I n_{21} f}; \tag{1}$$

$$n_{31} < \frac{Ek_3(1-k_3)}{2I_H k_I L_{w1} f} = (1-k_3)n_{21}; \tag{2}$$

$$L_{DP} > \frac{EK_3(1-\kappa_3)n_{21}}{2I_H(1-k_I)f}. \tag{3}$$

где  $E$  - входное напряжение;

$n_{SM}$  - отношение числа витков s-обмотки к числу витков M-обмотки трансформатора;

$k_3$  - относительное время включенного состояния транзистора – параметр, обратно пропорциональный скважности  $Q$ ;

- $L_{W1}$  - индуктивность первичной обмотки трансформатора;  
 $I_H$  - ток нагрузки преобразователя;  
 $f$  - тактовая частота преобразования.  
 $k_I$  - коэффициент, учитывающий отношение тока размагничивающей обмотки к току вторичной обмотки  $W2$  (рекомендуемые значения  $k_I < 0,1$ );  
 $L_{ДР}$  - индуктивность дросселя фильтра.

В ППН типа Р1 ограничительные условия на значения индуктивности первичной обмотки трансформатора не налагаются и должны выполняться следующие условия:

$$n_{31} = 1; \quad (4)$$

$$L_{ДР} > \frac{E k_3 (1 - k_3) n_{21}}{2 I_H f}. \quad (5)$$

В ППН типов Р1П2 и Р2П2 принципиально возможно осуществить перемагничивание по предельной петле, т.е. мгновенные значения магнитной индукции  $b$  и намагничивающей силы  $h$  могут принимать не только положительные значения, но и отрицательные. Предельным циклом намагничивания сердечника трансформатора при этом будет являться петля намагничивания с координатами  $B_H$  и  $-B_H$ .

Перемагничивание сердечника трансформатора до отрицательных значений магнитной индукции осуществляется за счет энергии дросселя, накопленной в интервал времени включенного транзистора. Схемно это достигается тем, что трансформатор снабжается дополнительной обмоткой  $W4$ , включенной последовательно с дросселем. Ток дросселя протекает через обмотку  $W4$  только в интервал времени выключенного транзистора.

В ППН типа Р1П2 энергия, накопленная в трансформаторе в интервал времени включенного транзистора, передается в первичный источник в интервал времени выключенного транзистора. Кроме того, в первичный источник возвращается и часть энергии дросселя. В ППН типа Р2П2 энергии трансформатора и дросселя передаются только в нагрузку.

Эффективное использование свойств преобразователей типов Р1П2 и Р2П2 достигается при обеспечении перемагничивания сердечника трансформатора к моменту очередного включения транзистора до отрицательных значений магнитной индукции, вплоть до предельной  $-B_H$ . При этом в интервал времени выключенного транзистора значения могут принимать и большие по модулю отрицательные значения, что на принципе работы не отражается.

Условием режима обеспечения отрицательных значений магнитной индукции в ППН типа Р1П2 является

$$L_{ДР} > \frac{E \left[ k_3^2 (n_{31} n_{41} - 3n_{43} - 4n_{21} + 2n_{41}) + 4k_3 (n_{21} + n_{43}) - n_{43} \right]}{8 I_H f}. \quad (6)$$

Условием режима обеспечения предельного перемагничивания сердечника трансформатора в ППН типа Р1П2 является

$$L_{ДР} > \frac{E k_3 \left[ (1 - k_3) (n_{21} - n_{41}) + k_3 n_{41} (1 + n_{31}) \right]}{2 (I_H - i_{ДР \min}) f}, \quad (7)$$

где  $i_{ДР \min}$  - значение тока дросселя в момент очередного включения транзистора.

С учетом того, что

$$i_{ДР \min} > \frac{H_H I_{CP}}{W4}, \quad (8)$$

получим условие (7) как зависимость от типоразмера сердечника трансформатора

$$L_{ДР} = \frac{\mu_{СР}\mu_0 E k_3 k_{3\max} C n_{41} [(1 - k_3)(n_{21} - n_{41}) + k_3 n_{41}(1 + n_{31})]}{2f(\mu_{СР}\mu_0 n_{41} E I_H k_{3\max} - B_{II} l_{СР} S_{СТ} f B_{P k_{3\max}})}, \quad (9)$$

где  $H_{II}$  - значение намагничивающей силы, соответствующее точке изгиба кривой намагничивания;

$l_{СР}$  - средняя длина магнитопровода,

$S_{СТ}$  - площадь поперечного сечения магнитопровода;

$B_{P k_{3\max}}$  - перепад магнитной индукции сердечника трансформатора при  $k_{3\max}$ ;

$k_{3\max}$  - максимальное относительное время включенного состояния транзистора.

Условием режима обеспечения отрицательных значений магнитной индукции в ППН типа Р2П2 является

$$L_{ДР} > \frac{E k_3 n_{21} L_{W1} [k_3 (n_{21} - n_{41}) - n_{21} (2 + n_{43} - k_3 n_{43})]}{E k_3 (2 + n_{43} - k_3 n_{43}) - 2 I_H f (2 n_{21} - n_{41}) L_{W1}}. \quad (10)$$

При предельном перемагничивании (в момент включения транзистора значение индукции соответствует режиму насыщения) возможны несколько вариантов работы сердечника трансформатора:

- ток намагничивания в момент времени выключения транзистора принимает имеет отрицательные значения (вариант 1);
- ток намагничивания в момент времени выключения транзистора принимает положительные значения (вариант 2).

Условие варианта 1

$$L_{ДР} = \frac{A_1 E k_{3\max} n_{41} [A_2 k_3 n_{41} + n_{21}^2 (1 - k_3)]}{2 A_1 (n_{21} - n_{41}) I_H k_{3\max} f - A_3 l_{СР} S_{СТ} f B_P}, \quad (11)$$

варианта 2

$$L_{ДР} = \frac{A_1 E k_3 [A_2 k_3 n_{41} + n_{21} (1 - k_3)]}{2 A_1 (n_{21} - n_{41}) I_H f - A_4 l_{СР} S_{СТ} f B_{II}}, \quad (12)$$

где  $B_P$  - заданный перепад магнитной индукции;

$$A_1 = \mu_{СР}\mu_0 k_{3\max} n_{41}; \quad (13)$$

$$A_2 = n_{21} + k_3 (1 - n_{41}); \quad (14)$$

$$A_3 = 2 n_{21} B_{II} k_{3\max} - k_3 B_{PAB} n_{41}; \quad (15)$$

$$A_4 = 2 n_{21} B_{PAB} k_3 - n_{41} (2 k_3 B_{PAB} - k_{3\max} B_{II}). \quad (16)$$

В [2] предлагается производить предварительный выбор сердечников дросселей (накопительных ЭМК) по эмпирическому выражению, используя понятие электромагнитной мощности и действующего значения токов дросселя. При этом действующее значение тока не в полной мере отражает реальные процессы, протекающие в дросселе, поскольку соотношения действующего, максимального и минимального токов зависят от формы тока, которая в общем случае зависит от принципа действия ППН.

Предлагается целесообразным на начальном этапе проектирования дросселя, используя результаты расчета ППН, определять типоразмер сердечника по максимальному (пиковому) значению тока дросселя и его индуктивности.

Для этого, преобразуя выражение для определения индуктивности дросселя

$$L_{ДР} = \mu_{СР}\mu_0 \frac{S_{СТ}}{l_{СР}} W^2 \quad (17)$$

и закона полного тока

$$H_{\max} = \frac{I_{\max} W}{l_{CP}}, \quad (18)$$

получим выражение для требуемого объема сердечника дросселя

$$V_{CT} \geq S_{CT} l_{CP} = \frac{L_{ДР} I_{\max}^2}{\mu \mu_0 H_{\max}^2}, \quad (19)$$

где  $\mu_{CP}$  – средняя относительная магнитная проницаемость материала сердечника;  
 $\mu_0$  – абсолютная магнитная проницаемость;  
 $W$  – число витков ЭМК;  
 $H_{\max}$  – максимальная намагничивающая сила;  
 $I_{\max}$  – максимальный ток ЭМК.

Выражение (19) позволяет определить типоразмер сердечника дросселя по его минимальному допустимому объему или массе (при известной удельной массе материала).

Особенностью ППН типа Р2 является необходимость выполнить ряд условий для полного размагничивания трансформатора (до остаточной индукции  $B_r$ ) при выключенном транзисторе и обязательному протеканию тока через дроссель. Это возможно? только если объем сердечника трансформатора будет соответствовать условию

$$V_{CT} \leq \frac{2\mu_{CP}\mu_0 E I_H \kappa_3 n_{21}}{B_p^2 f} \quad (20)$$

где  $B_p$  – рабочий размах индукции;

Для обеспечения непрерывности тока дросселя в ППН типа Р2 необходимо выполнить условие

$$V_{CT} \leq \mu_{CP}\mu_0 E \kappa_3 n_{21} \frac{2I_H L_{ДР} f - E \kappa_3 (1 - \kappa_3) n_{21}}{B_p^2 f^2 L_{ДР}}. \quad (21)$$

При проектировании трансформаторов для ППН типа Р1П2 для перемагничивания сердечника трансформатора сердечник должен удовлетворять условиям

$$V_{CT} \leq \frac{\mu_{CP}\mu_0 E \kappa_{3\max} n_{41} I_H}{B_p B_H f} \quad (22)$$

или

$$V_{CT} \leq \frac{\mu_{CP}\mu_0 E^2 \kappa_{3\max} n_{41} (n_{21} - n_{41})}{R_H B_p B_H f}, \quad (23)$$

где  $B_H$  – значение индукции на начале изгиба кривой намагничивания материала сердечника;

$R_H$  – сопротивление нагрузки ППН.

Для трансформаторов ППН типа Р2П2 объем сердечника должен удовлетворять условиям

$$V_{CT} \leq \frac{2\mu_{CP}\mu_0 E \kappa_{3\max} n_{41} (n_{21} - n_{41}) I_H}{B_p f (2n_{21} B_H \kappa_{3\max} - \kappa_3 B_p n_{41})}, \quad (24)$$

или

$$V_{CT} \leq \frac{2\mu_{CP}\mu_0 E \kappa_{3\max} n_{41} (n_{21} - n_{41}) I_H \kappa_3}{B_H f [2n_{21} B_p \kappa_3 - n_{41} (2\kappa_3 B_p - \kappa_{3\max} B_H)]}, \quad (25)$$

Для ППН типа Р2 размах индукции  $B_p$  сердечника трансформатора не должен превышать  $B_H - B_r$ , а для ППН типов Р1П2 и Р2П2 – не более  $2B_H$ . Средняя относительная магнит-

ная проницаемость материала сердечника должна соответствовать выбранному частному циклу намагничивания (перемагничивания).

При выводе выражений были сделаны следующие допущения: не учитывались реальные параметры элементов и пульсации напряжения на конденсаторе.

В приведенных выражениях все величины имеют размерность системы СИ.

### Выводы

В однотактных ППН с размагничиванием и перемагничиванием сердечника трансформатора возможны различные режимы работы, которые в общем случае характеризуются режимом работы дросселя выходного фильтра и намагничивания сердечника трансформатора. На режимы работы значительное влияние оказывает величина индуктивности выходного фильтра. Кроме того, на режимы работы ППН типов P2, P1P2 и P2P2 влияет величина индуктивности первичной обмотки трансформатора (эффективный объем сердечника трансформатора).

Получены аналитические выражения регулировочных характеристик для различных режимов работы ППН и выражения, позволяющие определить параметры преобразователей типов P и PП, соответствующие границам режимов работы. Погрешность полученных выражений не превышает 12-15% и позволяет проводить предварительный выбор параметров элементов ППН на начальной стадии проектирования силовой части источников вторичного электропитания.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение №14.577.21.0073 о предоставлении субсидии от 05.06.2014, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57714X0073).*

### Библиографический список

1. **Чивенков, А.И.** Расширение функциональных возможностей инвертора напряжения систем интеграции возобновляемых источников энергии и промышленной сети / В.И. Гребенщиков, А.П. Антропов, Е.А. Михайличенко // Инженерный вестник Дона. – 2013. – №1. – <http://www.ivdon.ru/magazine/issue/107?page=3>
2. **Соснина, Е.Н.** Нормирование энергопотребления образовательных учреждений на основе нейросетевого подхода. / А.В. Шалухо, Р.Ш. Бедретдинов, И.А. Липужин // Инженерный вестник Дона. 2013. h№ 3. <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1841>.
3. **Severns R.** Modern DC – to – DC switchmode converter circuits / G. Bloom // Van Nostrand Reinhold Co, 1985.
4. **Severns R.** Switchmode Converter Topologies-Make Them Work For You!, Intersil, Inc., Application Note AO35, 1980.
5. **Тылес М.Г.** Пути повышения массогабаритных показателей однотактных преобразователей постоянного напряжения с гальванической развязкой / С.Ю. Панфилов, И.В. Полетаев, А.В. Тюрин // Проблемы преобразовательной техники: тез. докл. 4 Всесоюз. науч.-техн. конф., Черновцы, сент. – Киев. 1987. Ч. 2. – С. 222–224.
6. **Александров, В.В.** К расчету накопительных магнитных элементов импульсных преобразователей напряжения / М.Г. Тылес, С.Ю. Панфилов // Техника средств связи. Сер. ТРС. – 1982. – Вып. 9 (29) – С. 75–78.
7. **Тылес, М.Г.** Однотактные преобразователи напряжения с размагничиванием и перемагничиванием сердечника трансформатора / С.Ю. Панфилов, И.В. Полетаев, А.В. Тюрин // Специальная техника средств связи. Сер. СВЭП. – 1983. – Вып. 1. – С. 57–62.
8. **Тылес, М.Г.** Унифицированные полярно-инвертирующие преобразователи напряжения в гибридно-пленочном исполнении / С.Ю. Панфилов, А.В. Тюрин // Специальная техника средств связи. Сер. СВЭП. – 1984. – Вып. 1. – С. 39–47.
9. **Панфилов, С.Ю.** Схема управления силовым транзистором на основе однотактного трансформаторного преобразователя / Н.Н. Вихорев, И.С. Панфилов, А.И. Чивенков, Д.Н. Лапаев

// Актуальные проблемы электроэнергетики: материалы научно-технической конференции / НГТУ. – Н.Новгород. – 2014. – С. 186–189.

10. **Вихорев, Н.Н.** Источник питания катода установки ионного легирования / И.С. Панфилов, А.И. Чивенков, С.Ю. Панфилов // Современные технологии и технический прогресс: сб. статей по материалам IV Международной научно-практической конференции (22 июля 2015 г., город Воронеж). – 2015. – С. 62–65.

*Дата поступления  
в редакцию 27.04.2016*

**S.Y. Panfilov<sup>1</sup>, A.I. Chivenkov<sup>1</sup>, I.S. Panfilov<sup>2</sup>, N.N. Vikhorev<sup>1</sup>**

### **REQUIREMENTS FOR THE PARAMETERS OF ELECTROMAGNETIC COMPONENTS DC CONVERTERS**

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alexeyev<sup>1</sup>,  
JSC "SIE" POLET"<sup>2</sup>

**Purpose:** This work aims to cover preliminary design problems of components of electromagnetic pulse voltage converters for electronic devices.

**Design/methodology/approach:** Synthesis of analytical expressions, allowing to make an indicative calculation of the DC/DC converters.

**Findings:** Analytical expressions adjusting characteristics for various modes of converters DC and expression, allowing to define the parameters of single-ended converters of various types corresponding to the boundaries of operating modes.

**Research limitations/implications:** The design of the power unit with a power supply of electronic equipment.

**Originality/value:** A selection method for electromagnetic components of magnetic circuits in the required volume subject private hysteresis cycles of their work, are given the necessary mathematical expressions.

*Key words:* inductor, transformer, single-ended converter, magnetization and demagnetization of the core transistor, residual induction, magnetization loop, the volume of the core.



УДК 537.311.3

С.В. Хорьков

## ОТКЛОНЕНИЕ ОТ ЛИНЕЙНОГО ПРОТЕКАНИЯ ТОКА В УПОРЯДОЧЕННОЙ ДВУМЕРНОЙ СРЕДЕ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Изучается влияние особых областей периодической двумерной среды на её нелинейную эффективную проводимость. Показано, что распределение локальных токов и полей существенно зависит от отношения линейных проводимостей её компонент. Такая зависимость приводит к расходимости коррелятора четвёртой степени от поля и, следовательно, к расходимости функций отклика связанной с данным коррелятором. Определено значение отношения линейных проводимостей компонент, при котором нелинейная эффективная проводимость изучаемой среды обнаруживает особенность в поведении.

*Ключевые слова:* неоднородные проводящие структуры, протекание, проводимость, нелинейная проводимость.

Проводящие среды интенсивно изучаются в связи с широким практическим применением. Ввиду особой роли дуальной симметрии [1] оказываются выделенными двумерные системы. Неоднократно отмечалась глубокая аналогия между двумерными случайными системами и периодическими решетками [1-4], позволяющие отнести их к одному классу универсальности в критической области, т.е. вблизи перехода металл-диэлектрик. Двумерные системы привлекательны и с точки зрения экспериментальной реализации, т.к. методы современной нанотехнологии позволяют создавать плёнки с заданной текстурой.

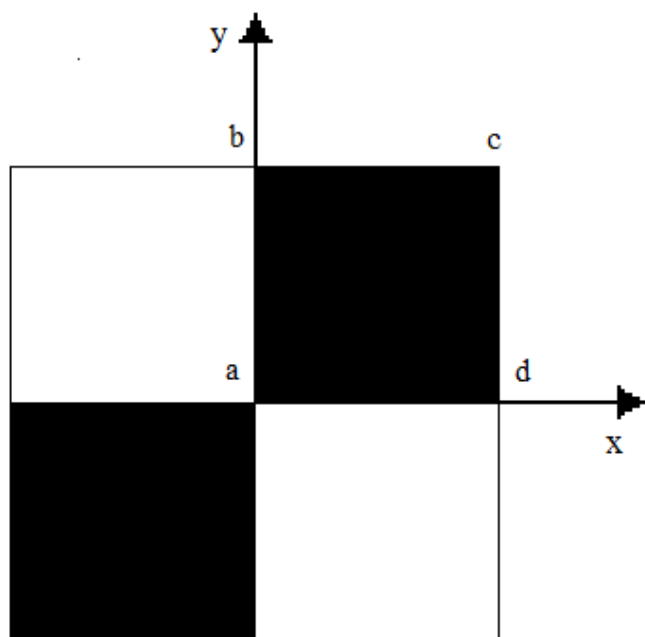


Рис. 1

В данной работе рассматривается плёнка с чередующимися в шахматном порядке ячейками. Пусть проводимости чёрной ячейки равна  $\sigma_1$ , а белой соответственно -  $\sigma_2$ . Фрагмент такой плёнки представлен на рис. 1. Данная среда находится на пороге протекания, поскольку концентрации компонент материалов равны. Как показано в работе [1], эффективная линейная проводимость рассматриваемой среды зависит от проводимостей ячеек по закону  $\sigma_{\text{eff}} = \sqrt{\sigma_1 \sigma_2}$ . Отметим, что такое же выражение для проводимости справедливо и для двумерной среды со случайным, но одинаковым по концентрации разбросом компонент [1]. Аналогично ведут себя и квадратичные корреляторы полей  $\langle \bar{e}^2 \rangle$  и токов  $\langle \bar{j}^2 \rangle$ , где скобки  $\langle \dots \rangle$

обозначают усреднение по площади плёнки локального значения квадратов поля  $\bar{e}^2$  и тока  $\bar{j}^2$  соответственно. Это и позволяет отнести данные среды к одному классу универсальности.

В ряде экспериментальных работ [5-8] был обнаружен нелинейный отклик неупорядоченных плёнок, находящихся в критической области в зависимости от концентрации хо-

рошо проводящей компоненты. В работе [7] было показано, что нелинейная эффективная проводимость  $\chi_{\text{eff}}$  неоднородной среды определяется коррелятором  $\langle \bar{e}^4 \rangle$ :

$$\chi_{\text{eff}} = \langle \chi \bar{e}^4 \rangle / \langle \bar{e}^4 \rangle, \quad (1)$$

где  $\chi$  - локальная нелинейная проводимость компонент, а  $\bar{e}$  - локальное электрическое поле эквивалентной среды, полученное в линейном приближении. Выражение (1) справедливо только в случае слабой нелинейности, когда в локальном законе Ома добавляется следующее слагаемое в разложении тока  $\bar{j}$  по полю  $\bar{e}$ , т.е.

$$\bar{j} = \sigma \bar{e} + \chi \bar{e}^3. \quad (2)$$

Эффективная линейная и нелинейная проводимости многокомпонентной среды входят в выражение для усреднённого тока  $\bar{J}$ :

$$\bar{J} = \sigma_{\text{eff}} \bar{E} + \chi_{\text{eff}} \bar{E}^3, \quad (3)$$

где  $\bar{J} = \langle \bar{j} \rangle$ ,  $\bar{E} = \langle \bar{e} \rangle$ . Нелинейный отклик среды будет существенным, если в выражении (3) слагаемые станут одного порядка. Определим критическое поле нелинейности выражением

$$E_c = \sqrt{\sigma_{\text{eff}} / \chi_{\text{eff}}}, \quad (4)$$

а критический ток

$$J_c = \sigma_{\text{eff}} E_c. \quad (5)$$

Задачей данной работы является определение нелинейной эффективной проводимости  $\chi_{\text{eff}}$  среды по выражению (1), фрагмент которой, представлен на рис.1. Как отмечалось выше для этого необходимо вычислить распределение электрического поля  $\bar{e}$  в среде в линейном приближении. Такая задача была решена в работе [3]. Точное решение было получено с привлечением методов теории краевых задач аналитических функций. В силу двумерности среды удобно воспользоваться комплексным представлением векторов поля  $e(z) = e_x - ie_y$  и тока  $j(z) = j_x - ij_y$  (здесь  $z = x + iy$ ), которые являются аналитическими функциями внутри квадратов (исключая границы). Для комплексных векторов закон Ома сохраняет прежний вид:  $j(z) = \sigma(z)e(z)$ . Приведем выражение для электрического поля в ячейках с проводимостями  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  соответственно

$$e_1(z) = C(\cos \theta + \sin \theta) \exp[i\pi/2(1/2 - \gamma)] X(z) + C(\cos \theta - \sin \theta) \exp[i\pi/2(\gamma - 1/2)] X^{-1}(z), \quad (6)$$

$$e_2(z) = \frac{C}{\sqrt{h}} (\cos \theta + \sin \theta) \exp[i\pi/2(1/2 + \gamma)] X(z) + \frac{C}{\sqrt{h}} (\cos \theta - \sin \theta) \exp[i\pi/2(-\gamma - 1/2)] X^{-1}(z), \quad (7)$$

где

$$X(z) = \left[ \frac{\text{cn}(Kz/L, k)}{\text{sn}(Kz/L, k) \text{dn}(Kz/L, k)} \right]^{2\gamma}, \quad (8)$$

$\text{sn}(\cdot), \text{cn}(\cdot), \text{dn}(\cdot)$  - эллиптические функции Якоби;  $K$  - полный эллиптический интеграл с модулем  $k$  (для квадрата  $k = 1/\sqrt{2}$ ,  $K \approx 1.8541$ ),  $L$  - длина стороны квадратной ячейки;  $\theta$  - угол

между средним полем  $\vec{E}$  и осью "ox";  $C = |\vec{E}|\sqrt{1+h}/2I$ ;  $I = \frac{\pi^{3/2}}{2K \cos(\pi\gamma)} \left[ \Gamma\left(\frac{3}{4} + \frac{\gamma}{2}\right) \Gamma\left(\frac{3}{4} - \frac{\gamma}{2}\right) \right]^{-1}$ ;

$\Gamma(\cdot)$ - гамма-функция. Параметр  $\gamma$  связан с отношением проводимостей ячеек  $h = \frac{\sigma_1}{\sigma_2}$  уравнением

$$\operatorname{tg}(\pi\gamma) = \frac{1-h}{2\sqrt{h}}, \quad 0 \leq \gamma \leq \frac{1}{2}. \tag{9}$$

Проанализируем распределение локального электрического поля в среде. Первое и второе слагаемые в (6) и (7) представляют собой частные решения, которые соответствуют направлениям внешнего поля по диагонали "ac" и "bd" соответственно (см. рис. 1). Функция  $X(z)$  вблизи вершин "a" и "c" имеет интегрируемые особенности

$$X(z) \propto \frac{1}{z^{2\gamma}}, \tag{10}$$

а в смежных углах "b" и "d":

$$X(z) \propto z^{2\gamma}. \tag{11}$$

Понятно, что для функции  $X^{-1}(z)$ , соответствующей направлению внешнего поля по диагонали "bd", особыми являются углы "d" и "b". Таким образом, при произвольном направлении внешнего поля общее решение имеет особенности во всех углах структуры. На рис. 2 и рис. 3 иллюстрируется распределение локального электрического поля в смежных ячейках при направлении внешнего тока вдоль оси "ox". Особенности типа (10) в окрестности особого угла будут играть важную роль в формировании нелинейного режима протекания тока.

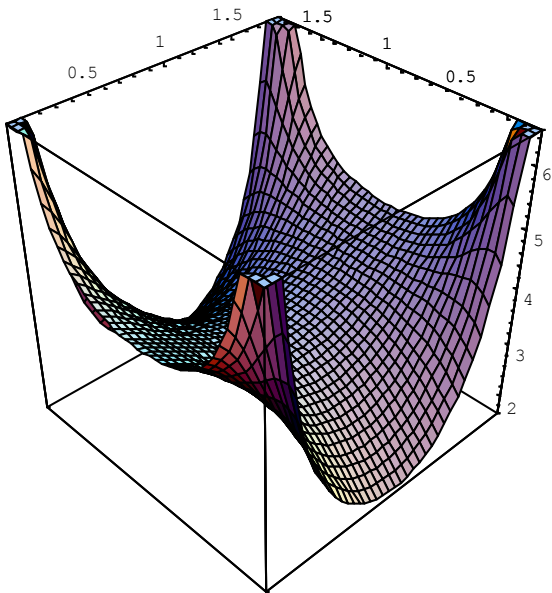


Рис. 2

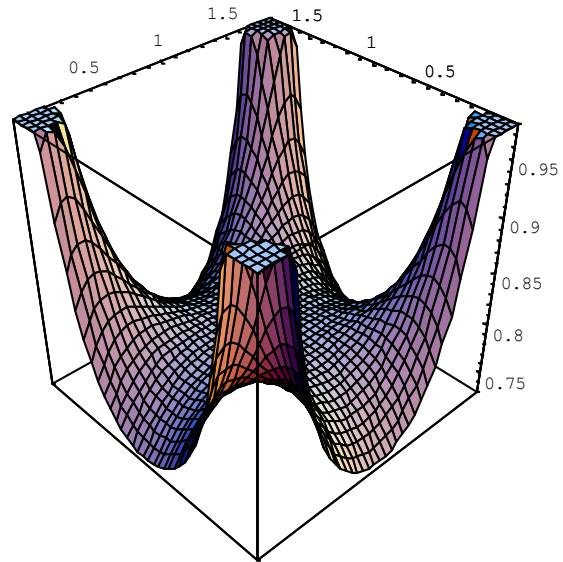


Рис. 3

Качественное объяснение асимптотик, состоит в следующем. На расстояниях вблизи угла, много меньших чем размер ячейки, в рассматриваемой системе отсутствуют характерные пространственные масштабы. Поэтому решение уравнения Лапласа в этой области масштабов имеет степенной вид (10). Показатель степени зависит от распределения зарядов на границах областей с разной проводимостью и, тем самым, от параметра  $h$ .

Приступим к непосредственному вычислению нелинейной эффективной проводимости рассматриваемой среды. Для простоты будем полагать, что средний ток  $\vec{J}$  направлен по

диагонали «ас» квадратных ячеек (см. рис. 1). Как показано в работе [3], в этом случае локальные комплексные поля в соседних ячейках связаны соотношением

$$e_2(z) = \frac{i}{\sqrt{h}} \overline{e_1(\bar{z})}, \quad (12)$$

где черта сверху означает комплексное сопряжение. Запишем абсолютную величину электрического поля в квадрате с проводимостью  $\sigma_1$  в виде

$$|e_1(z)| = \frac{1}{I} \sqrt{\frac{(1+h)}{2}} |X(z)| |\bar{E}|, \quad (13)$$

где

$$I(\gamma) = \frac{\pi^{3/2}}{2K \cos(\pi\gamma)} \left[ \Gamma\left(\frac{3}{4} + \frac{\gamma}{2}\right) \Gamma\left(\frac{3}{4} - \frac{\gamma}{2}\right) \right]^{-1}, \quad (14)$$

$\Gamma(x)$  - гамма-функция. Используя (12), (14) и (1) получим выражение для нелинейной проводимости, удобное для анализа:

$$\chi_{eff} = \frac{(h^2 \chi_1 + \chi_2)(h+1)^2}{8I^4 h^2} \langle |X(z)|^4 \rangle. \quad (15)$$

Как уже отмечалось, функция  $X(z)$  имеет особенность и при некоторых значениях параметра  $\gamma$  интеграл по  $z$  в  $\langle |X(z)|^4 \rangle$  может расходиться. Можно показать, что величина нелинейной проводимости увеличивается с уменьшением  $h$ , и при стремлении  $h$  к некоторому пороговому значению  $h_c$  ведет себя как

$$\chi_{eff} = \frac{C}{h - h_c}, \quad (16)$$

где

$$C = \frac{\pi^2 (h_c^2 \chi_1 + \chi_2)(h_c + 1)}{4I_c^4 K^2 \sqrt{h_c}}, \quad I_c = I(\gamma_c). \quad (17)$$

Из выражения (9) нетрудно получить  $h_c = (\sqrt{2} - 1)^2$ . При значениях  $h \leq h_c$  интеграл для  $\chi_{eff}$  расходится. Поясним природу расходимости. Из общего выражения для  $\chi_{eff}$  нетрудно заметить, что аномальный рост нелинейной проводимости связан с ростом корреляторов  $\langle |e(z)|^4 \rangle_{1,2}$ , так как все остальные сомножители в формуле конечны. Основной вклад в интеграл  $\langle |e(z)|^4 \rangle_{1,2}$  для  $\chi_{eff}$  дают области вблизи особых углов с асимптотическим поведением решения пропорционального  $z^{-2\gamma}$ . Поэтому для оценки коррелятора при  $h \rightarrow h_c$  достаточно рассмотреть малые окрестности этих точек, а точнее окрестность одного особого угла в элементарной ячейке. При любом направлении внешнего поля решение в этой области имеет вид (10). На основе этих рассуждений получим

$$\langle |e(z)|^4 \rangle_{1,2} \propto \iint |z|^{-8\gamma} dx dy \propto \int r^{-8\gamma+1} dr. \quad (18)$$

Интеграл (18) расходится при  $\gamma \geq 1/4$ . Из соотношения (9) нетрудно получить соответствующий интервал по  $h$ :  $h \leq h_c$ . Для определения степени расходимости по  $(h - h_c)$ , разложим величину  $\gamma$  в показателе подынтегральной функции (18) в ряд по малому параметру  $(h - h_c)$  и получим

$$\langle |e(z)|^4 \rangle_{1,2} \propto \int r^{-1+\text{const}(h-h_c)} dr \propto \frac{1}{h-h_c}.$$

При стремлении  $h \rightarrow h_c$  расходится лишь нелинейная проводимость, поэтому из формул (4), (5) для  $E_c$  и  $J_c$  видно, что зависимость критического поля и критического тока нелинейности вблизи  $h_c$  будет полностью определяться поведением  $\chi^{\text{eff}}$ , то есть

$$E_c, J_c \propto (h-h_c)^{1/2}. \quad (19)$$

### Выводы

Хорошо известно, что в однородных проводящих средах электрический ток пропорционален приложенному напряжению. Такая зависимость имеет место в слабых электрических полях. В сильных полях зависимость тока от напряжения может стать нелинейной. Сильным полем называется такое, в результате которого за время свободного пробега (время релаксации) носители тока приобретают скорость по порядку величины сравнимую со скоростью хаотического движения. Создание сильных полей в однородных проводниках практически невозможно из-за большого тепловыделения и вследствие этого их плавления.

В неоднородных проводящих средах нелинейные эффекты наблюдаются в сравнительно слабых полях [5]. Одно из возможных объяснений состоит в том, что в среде имеются области, в которых локальное электрическое поле может сильно превысить среднее поле в данном образце. Вследствие этого электронный газ сильно разогревается. Это приводит к зависимости локальной проводимости от температуры.

В данной работе изучается нелинейный отклик неоднородной двумерной среды со структурой шахматной доски. Получено выражение для эффективной нелинейной проводимости среды. Было показано, что ввиду особенностей локального тока и поля вблизи углов структуры линейная зависимость между средним током и средним полем невозможна при конечном значении отношения линейных проводимостей компонент ячеек. Найдены зависимости критического поля и тока нелинейности от параметра  $h$ . Отметим, что в работе [10] изучалась нелинейная эффективная проводимость бинарной среды со случайным, но равным по концентрации распределением её компонент. Результаты, полученные там, существенно отличаются от результатов данной работы.

### Библиографический список

1. Дыхне, А.М. Проводимость двумерной двухфазной системы // ЖЭТФ. – 1970. – Т. 59. – С. 110–115.
2. Балагуров, Б.Я. О проводимости двумерных систем с макроскопическими неоднородностями // ЖЭТФ. – 1980. – Т. 79. – С. 1561–1572.
3. Емец, Ю.П. Преобразование симметрии двумерной двухкомпонентной электропроводной системы // ЖЭТФ. – 1989. – Т. 96. – С. 701–711.
4. Емец, Ю.П. Электрические характеристики композиционных материалов с регулярной структурой / Ю.П. Емец. – Киев: Наукова думка, 1986.
5. Gefen, Y. Nonlinear behavior near the percolation metal-insulator transition / Y. Gefen, W.H. Shih, R.B. Laibowitz, J.M. Viggiano // Phys. Rev. Lett. – 1986. – V. 57. – P. 3097–3100.
6. Chakrabarty, R.K. Nonlinear  $I-V$  characteristics near the percolation threshold / R.K.Chakrabarty, K.K. Bardhan, A. Basu // Phys. Rev. – 1991. – V. B44. – P. 6773–6779.
7. Stroud, D. Nonlinear susceptibilities of granular matter / D. Stroud, P.M. Hui // Phys.Rev.- 1988. – V. B37. – P. 8719–8724.
8. Aharony, A. Crossover from linear to nonlinear resistance near percolation // Phys. Rev. Lett. – 1987. – V. 58. – P. 2726–2727.

9. Жигальский, Г.П. Шум вида  $1/f$  и нелинейные эффекты в тонких металлических пленках // УФН. – 1997. – Т. 167. №.6. – С. 623–648.
10. Сатанин, А.М. Нелинейная проводимость неупорядоченной среды на пороге протекания // Письма в ЖЭТФ. – 1995. – Т. 62. – С. 301–304.

*Дата поступления  
в редакцию 23.04.2016*

**S.V. Khorkov**

## **THE DEVIATION FROM THE LINEAR CURRENT FLOW IN AN ORDERED TWO-DIMENSIONAL ENVIRONMENT**

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

We investigate the impact of specific areas of periodic two-dimensional environment on its nonlinear effective conductivity. It is shown that the distribution of local currents and fields substantially depends on the ratio of the linear conductivities of the components. This dependence leads to the divergence of the correlator to the fourth power of the field and, hence, to divergence of the response function associated with the correlator. Defined value of the ratio of the linear conductivities of the component at which the effective nonlinear conductivity of the studied environment detects a peculiarity in the behavior.

*Key words:* inhomogeneous conducting structures, percolation, conductivity, nonlinear conductivity.

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

УДК 621.791

И.К. Козлов, А.С. Трофимов

## ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА НАГРЕВА ПРИ КОНТАКТНОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКЕ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Проведено экспериментальное исследование процесса нагрева при формировании сварного соединения в процессе изготовления круглозвенных цепей контактной стыковой сваркой. Установлен характер распределения тока по сварочным и шунтирующим цепям, особенности его изменения в процессе сварки. Разработана методика и программа моделирования термомеханического процесса при контактной стыковой сварке сопротивлением.

*Ключевые слова:* контактная сварка, регистрация процессов, термомеханическое состояние, сварная цепь.

Контактная стыковая сварка применяется во многих отраслях промышленности. С ее помощью свариваются трубопроводы, арматурные стержни железобетонных изделий, железнодорожные рельсы (бесстыковые пути), длинномерные заготовки из различных конструкционных сталей и цветных металлов, сварные цепи. Из существующих разновидностей контактной стыковой сварки (оплавлением и сопротивлением) наибольший интерес представляет контактная стыковая сварка сопротивлением (Ксс). По сравнению со стыковой контактной сваркой оплавлением (Ксо) данный вид сварки обладает следующими преимуществами:

- отсутствие интенсивного искрообразования, угара и брызг металла;
- более высокий коэффициент использования металла;
- высокая производительность и относительно низкая энергоемкость процесса;
- простота, гигиеничность и более низкая стоимость оборудования.

Основными недостатками Ксс являются:

- необходимость в более тщательной подготовке торцевых поверхностей и мест токоподвода;
- получение качественных сварных соединений изделий сечением до 300 мм<sup>2</sup> (условного диаметра до 20 мм).

В процессе сварки ток протекает через предварительно сжатые торцы деталей, нагревая приконтактную зону до температур 1200-1350°C. Нагрев зоны термомеханического влияния (в дальнейшем ЗТМВ) приводит к значительному снижению сопротивления металла пластическому деформированию. Приложенное усилие сжатия, в соответствии с заданным характером изменения, обеспечивает интенсивную пластическую деформацию металла в ЗТМВ и обеспечивает формирование сварного твердофазного соединения. Принципиальная схема процесса сварки круглозвенных цепей приведена на рис. 1.

Определяющим фактором процесса нагрева является не только значение сварочного тока, но циклограмма его изменения. Получение качественных сварных соединений возмож-

но только при условии локализации зоны тепловыделения и соответственно локализации интенсивной пластической деформации непосредственно в зоне контакта свариваемых поверхностей. Увеличение размеров зоны прогрева выше предельных значений приведет к смещению зоны интенсивной пластической деформации от стыка, в зоне стыка формируется зона торможения, и качественное сварное твердофазное соединение не формируется.

При производстве цепей принята двух и трех стадийная циклограмма процесса. На первой стадии значение сварочного тока максимально, на второй и третьей стадиях сварочный ток и длительность его протекания существенно ниже. Основной прогрев и формирование ЗТМВ происходит на первой стадии, последующие несколько «смягчают» жесткость режима первой стадии. Чрезмерное увеличение длительности второй и третьей стадий ведут к опасности увеличения размеров ЗТМВ и снижению интенсивности пластической деформации в зоне стыка.

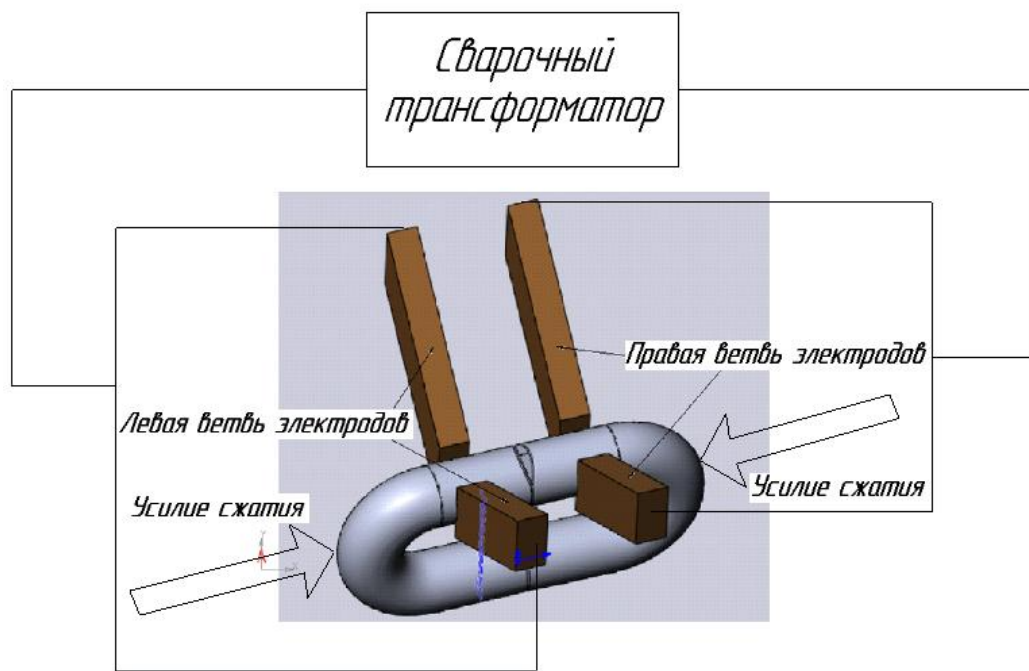


Рис. 1. Принципиальная схема сварки круглозвенных цепей

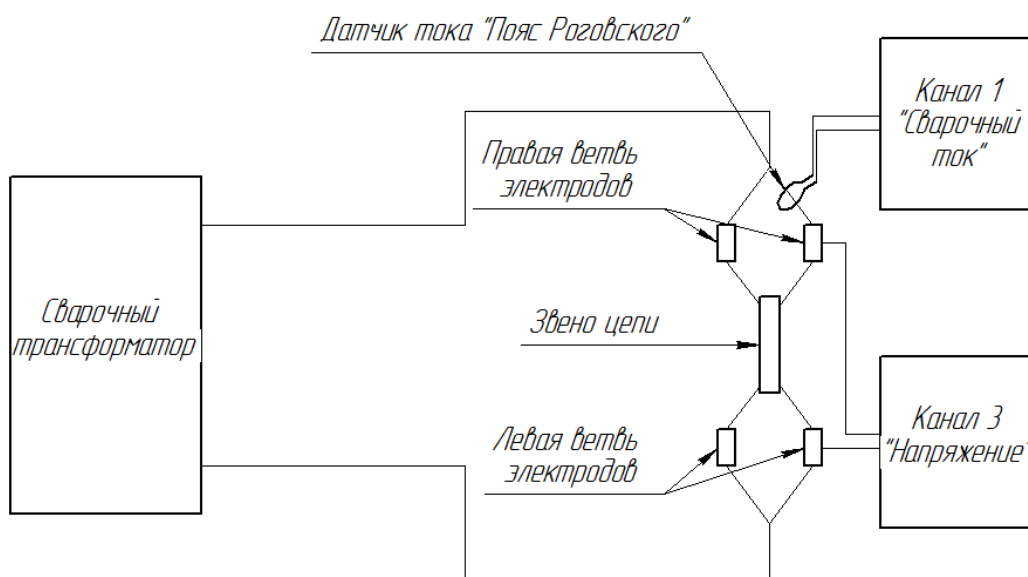
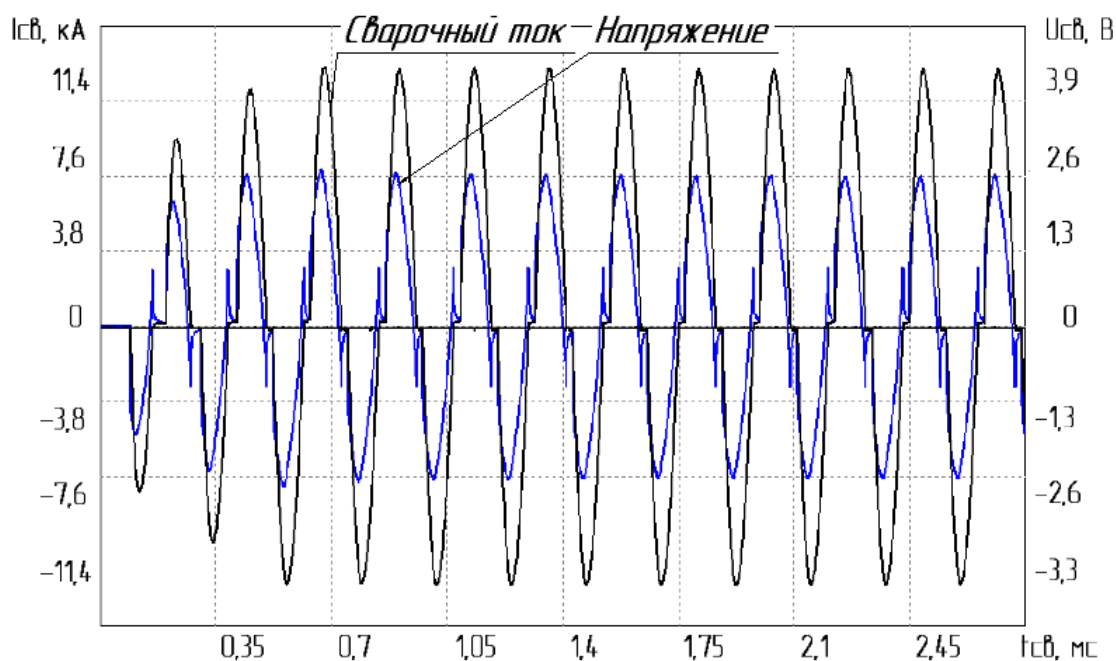


Рис. 2. Схема подключения MPC-02У и датчика тока

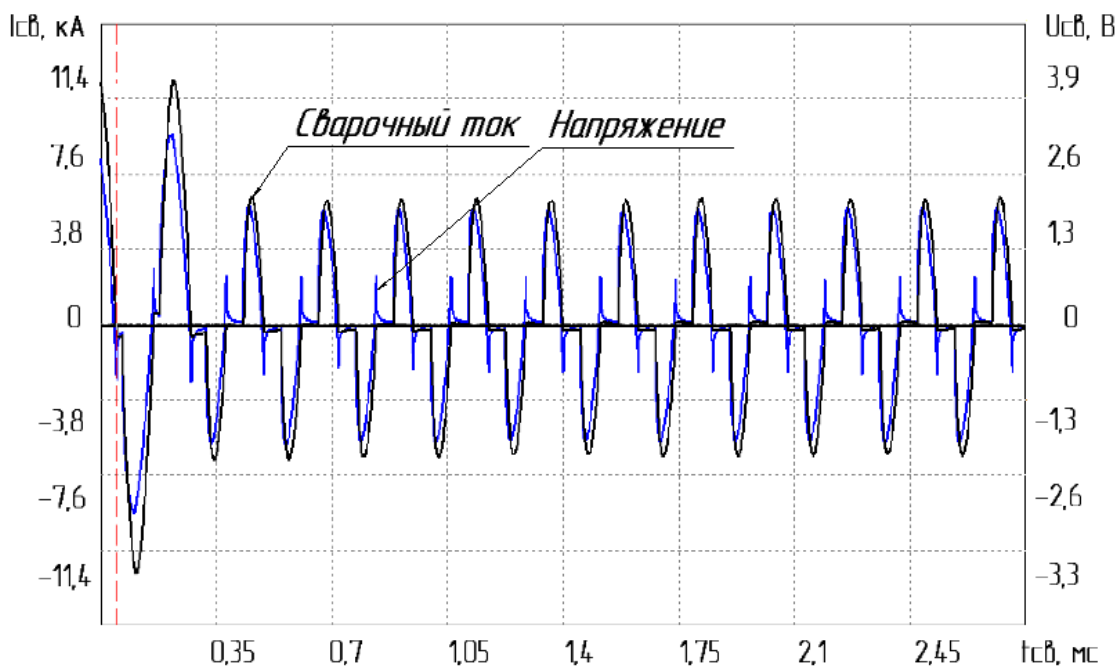


Проведенные исследования ставили задачу мониторинга процесса сварки, в том числе регистрацию и измерения реальных значений сварочного тока, его длительности и циклограммы процесса. Электрические параметры процесса сварки, а именно сварочный ток, а так же падение напряжения на вторичном контуре фиксировали при помощи мобильного регистратора МРС-02У. В качестве датчика тока использовали “пояс Роговского”. Схема подключения МРС-02У и датчика тока показана на рис. 2.

Регистрация производилась на машине переменного тока фирмы Wafios модели КЕН-8 при сварке цепи типоразмера 20x80 (рис. 3) и на машине постоянного тока фирмы Vitari модель SH-2 при сварке цепи типоразмера 13x39 (рис. 4), как при максимальном потреблении энергии в цеху, так и во время обеденного перерыва. Результаты измерений с машины КЕН-8 сведены в табл. 1, а машины SH-2 в табл. 2.



а)



б)

Рис. 3. Регистрограммы тока и напряжения для стадии 1 (а) и стадии 2 (б) (машина КЕН-8)

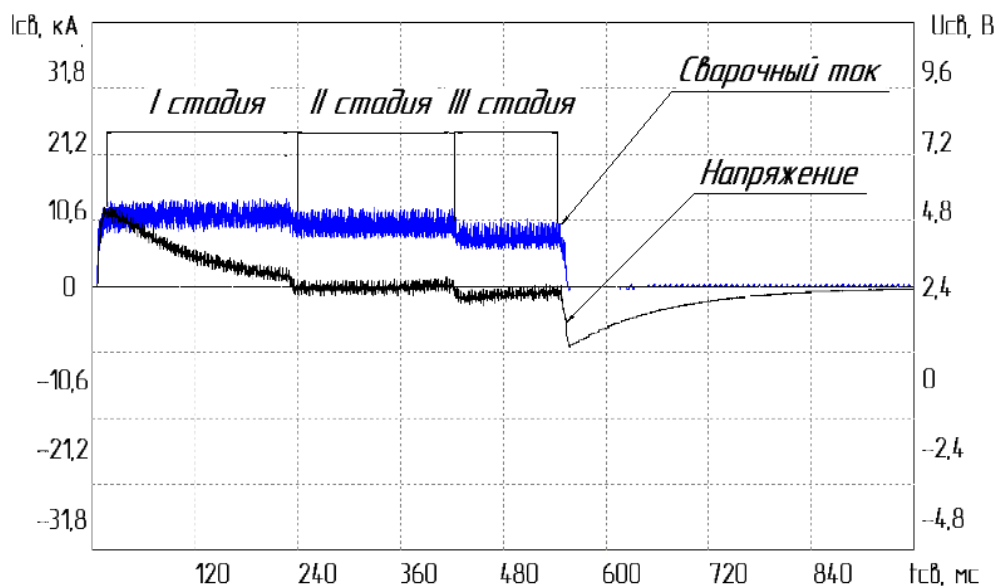
При сварке на переменном токе, за счет фазовой регулировки его значений, возможны перерывы прохождения тока. Это приводит не только к пульсирующему характеру нагрева, но и значительно большему, чем в случае сварки на постоянном токе, уходу теплоты из ЗТМВ.

**Таблица 1**

**Результаты измерений сварочного тока, времени его протекания и напряжения на вторичном контуре (машина КЕН-8)**

Характер замера	Стадия I				Стадия II			
	$I_{св1}$ , кА	$U_1$ , В	$t_1$ , мс	Перерыв прохождения тока за половину периода, мс	$I_{св2}$ , кА	$U_2$ , В	$t_2$ , мс	Перерыв прохождения тока за половину периода, мс
В обеденный перерыв с первого электрода правой ветви	13,2	2,6	1360	1,6	5,6	1,5	560	4,6
В рабочее время с первого электрода правой ветви	12,5	2,5	1360	1,6	5,5	1,4	560	4,6
В рабочее время со второго электрода правой ветви	15,2	3,7	1360	1,5	6,7	2,1	560	4,6

Анализируя полученные результаты необходимо отметить, что имеется неравномерное распределение сварочного тока, проходящего через сварочные электроды правой и левой ветвей, а также снижение электрических параметров в рабочее время относительно значений, снятых в обеденный перерыв. После визуального осмотра токопроводящих элементов вторичного контура было замечено частичное разрушение гибких токопроводящих шин, причем разрушение на четырех гибких шинах неодинаково, что и вызывает неравномерное распределение тока в ветвях. Вследствие частичного разрушения гибких токопроводящих шин их активное сопротивление увеличивается, в результате чего в процессе сварки происходит их перегрев. Замером пирометром была установлена температура нагрева шин, которая варьировалась от 100 до 150°C.



**Рис. 4. Регистрограмма тока и напряжения, (машина SH-2)**

Таблица 2

Результаты измерений сварочного тока, времени его протекания и напряжения во вторичном контуре (машина SH-2)

Условия измерения	Стадия I			Стадия II			Стадия III		
	$I_{св1}$ , кА	$U_1$ , В	$t_1$ , мс	$I_{св2}$ , кА	$U_2$ , В	$t_2$ , мс	$I_{св3}$ , кА	$U_3$ , В	$t_3$ , мс
В рабочее время	10,6	2,7	240	7,5	2,4	200	6	1,9	120

По имеющимся данным был произведен теоретический расчет количества теплоты затрачиваемого и требуемого для нагрева металла между электродами ( $L_{уст}$ ) до температуры 800°C. Для машины КЕН-8 полные значения сварочного тока и напряжения были получены путем сложения их составляющих, измеренных на противоположных электродах в процессе работы, а для машины SH-2 путем увеличения их в два раза. Результаты расчета представлены в табл. 3. Расстояние между электродами соответственно 27 и 12,5 мм для машин КЕН-8 и SH-2.

Таблица 3

Результаты расчета количества теплоты требуемого и затрачиваемого на нагрев зоны термомеханического влияния

Машина	Параметры режима		Выделившееся количество энергии, кДж	Потеря энергии в результате шунтирования сварочного тока, кДж	Количество теплоты для нагрева $L_{уст}$ , кДж	Количество теплоты затрачиваемое на нагрев $L_{уст}$ , кДж
КЕН-8	$I_1$ , А	27 200	253	105	36	36
	$U_1$ , В	6,2				
	$t_1$ , с	1,36				
	$I_2$ , А	12 100				
	$U_2$ , В	3,5				
	$t_2$ , с	0,56				
SH-2	$I_1$ , А	21 200	47	13	7	8
	$U_1$ , В	5,4				
	$t_1$ , с	0,24				
	$I_2$ , А	15 000				
	$U_2$ , В	4,8				
	$t_2$ , с	0,2				
	$I_3$ , А	12 000				
	$U_3$ , В	3,8				
$t_3$ , с	0,12					

Была разработана математическая модель термомеханического состояния деталей в процессе сварки (рис. 5), адекватность которой проверяли, сравнивая результаты моделирования с фактическими значениями температур и деформации в ЗТМВ.

Основу математической модели процесса контактной стыковой сварки сопротивлением послужила методика, разработанная для процесса рельефной сварки [6].

Математическая модель процесса включает в себя подмодели электрического поля, температурного поля и подмодель процесса пластической деформации, которые рассматриваются во времени последовательно, что позволяет учесть их взаимосвязь. Моделирование процесса на основе указанной модели производилось методом конечных разностей для принятой линейной модели. Свариваемые детали плоскостями, перпендикулярными оси симметрии детали разбивались на слои высотой равной  $h_{i,t}$ .

В пределах элементарного шага по времени  $\Delta t$  определялась величина осадки рассматриваемого слоя. В процессе расчета, исходя из значения приложенного сварочного усилия  $P_{св}$ , производилось вычисление средних значений удельного усилия в слоях  $\sigma_{i,t}^{(p)}$ .

Значение  $\sigma_{i,t}^{(p)}$  в процессе расчета сравнивалось со значением удельного усилия, необходимого для осадки слоя при скорости осадки  $V=1\text{с}^{-1}$ .

В случае, если значение  $\sigma_{i,t}^{(p)}$  превышает значение  $\sigma_{i,t}^{(1)}$  считается, что имеет место пластическая деформация слоя, величина которой определяется из условия, что отношение  $\sigma_{i,t}^{(p)}/\sigma_{i,t}^{(1)}$  равно значению скоростного коэффициента  $K_v$ .

Для углеродистых стали значение  $K_v$  определяется из выражения

$$K_v = (\ln(h_0/h)/t_{\text{деф}})^{0,125}. \quad (1)$$

В процессе сварки происходит изменение размеров слоев - их толщины  $h_{i,t}$  и площади поперечного сечения  $S_{i,t}$ .

$$S_{i,t+\Delta t} = S_{i,t} \exp\left(\left(\frac{\sigma_{i,t}^{(p)}}{\sigma_{i,t}^{(1)}}\right)^8 \cdot \Delta t\right); \quad h_{i,t+\Delta t} = h_{i,t} \exp\left(\left(\frac{\sigma_{i,t}^{(p)}}{\sigma_{i,t}^{(1)}}\right)^8 \cdot \Delta t\right). \quad (2)$$

Введем переменные

$$A = \frac{(S_{j-1,t} + S_{j,t})h_{i,t}}{S_{j,t}(h_{i-1,t} + h_{i,t})}; \quad B = \frac{(S_{j+1,t} + S_{j,t})h_{i,t}}{S_{j,t}(h_{i+1,t} + h_{i,t})}; \quad C = \frac{\lambda \Delta t}{c \gamma h_{i,t}^2} = \frac{a \Delta t}{h_{i,t}^2}. \quad (3)$$

Значение температуры в слое, с учетом тепловыделения в слое от мгновенного значения сварочного тока  $I_{\text{МГН}}$  и с учетом зависимости  $(\rho/c\gamma)$  от температуры, определяется по формуле

$$T_{i,t+\Delta t}^{(\lambda)} = T_{i,t} + G[(T_{i-1,t} - T_{i,t})A + (T_{i+1,t} - T_{i,t})B] + (I_{\text{МГН}})^2 (\rho/c\gamma)_0 (1 + \beta T_{i,t}) \Delta t / (S_{j,t})^2. \quad (4)$$

Для выполнения второго закона термодинамики необходимо

$$\frac{1}{AG} - 1 - \frac{B}{A} \geq 0. \quad (5)$$

Выражение (5) используется для проверки устойчивости решения на каждом шаге вычислений и, в случае необходимости, служит основанием для уменьшения величины шага по времени.

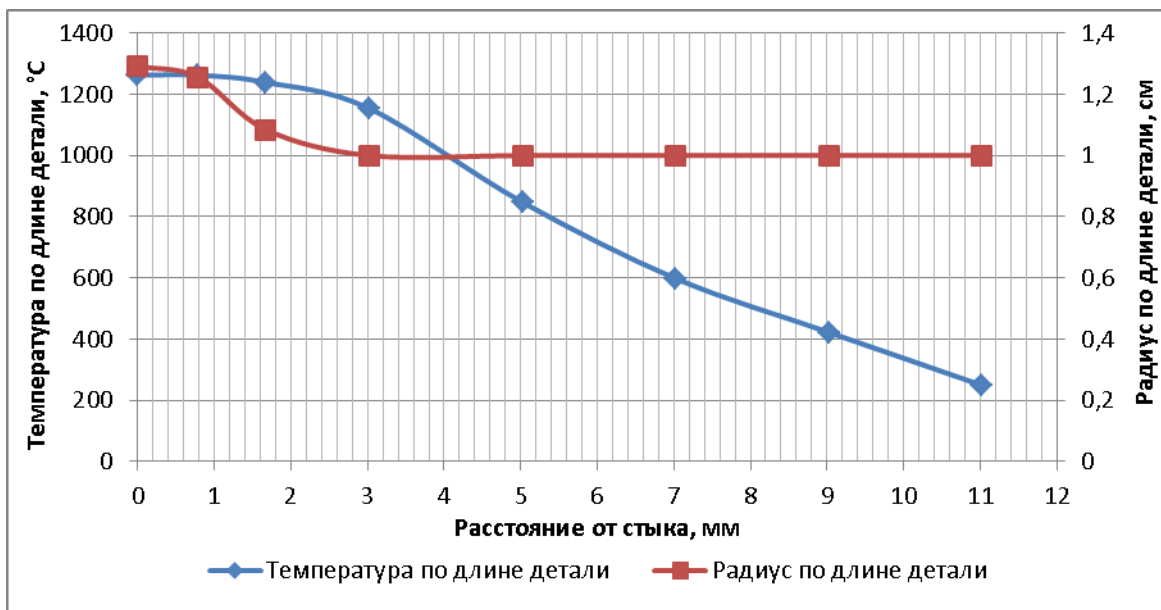


Рис. 5. Распределение температуры и радиуса поперечного сечения по длине детали в конце сварки (типоразмер 20x80, машина КЕН-8)



Рис. 6. Сваренное звено цепи 20x80 без обрезки грата

### Выводы

1. Получение качественных сварных соединений возможно только при условии локализации зоны тепловыделения и соответственно локализации интенсивной пластической деформации непосредственно в зоне контакта свариваемых поверхностей. Увеличение размеров зоны прогрева выше предельных значений приведет к смещению зоны интенсивной пластической деформации от стыка, в зоне стыка формируется зона торможения, и качественное сварное твердофазное соединение не формируется.

2. Имеет место несимметричное распределение тока в сварочных электродах правой и левой ветвей и соответственно к неравномерности прогрева ЗТМВ, что связано с износом и частичным разрушением токопроводящих гибких шин вторичного контура.

3. При сварке на переменном токе за счет фазовой регулировки его значения возможны перерывы прохождения тока. Это приводит не только к пульсирующему характеру нагрева, но и значительно большему, чем в случае сварки на постоянном токе, уходу теплоты из ЗТМВ.

4. Разработана математическая модель термодформационного состояния деталей в процессе стыковой сварки сопротивлением, что обеспечило возможность моделирования процесса.

### Библиографический список

1. **Смирнов, В.В.** Оборудование для контактной сварки: справочное пособие / В.В. Смирнов; под ред. В.В. Смирнова. – СПб.: Энергоиздат. Санкт-Петербургское отд-ние, 2000. – 848 с.
2. **Банов, М.Д.** Технология и оборудование контактной сварки: учебник для студ. учреждений сред. проф. образования / М.Д.Банов. – 3-е изд., стер. – М.: Издательский центр “Академия”, 2008. – 224 с.
3. **Чуларис, А.А.** Технология сварки давлением / А.А. Чуларис, Д.В. Рогозин. – Ростов н/Д: Феникс, 2006. – 221 с.

4. **Козлов, И.К.** Особенности мониторинга процесса сварки и состояния сварочного оборудования // Сварка и диагностика. – 2013. – №4. – С. 59–62.
5. **Коновалов, Н.А.** Прогнозирование качества сварных соединений по данным мониторинга процесса контактной стыковой сварки оплавлением / Н.А. Коновалов, В.А.Ерофеев, С.И. Полосков // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2014. – №1. – С. 73–81.
6. **Козлов, И.К.** Область применения и оптимизация технологии рельефной Т-образной сварки. Фундаментальные исследования. – М. – 2013. – № 11 (часть 5). – С. 875–879.

*Дата поступления  
в редакцию 10.05. 2016*

**I.K. Kozlov, A.S. Trofimov**

## **RESEARCH AND OPTIMIZATION OF THE HEATING PROCESS RESISTANCE BUTT WELDING**

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

**Purpose:** The study of metal heating and deformation process when forming a join by the butt resistance welding method.

**Approach:** The results of the welding process monitoring are introduced, including registration and measuring of the actual welding current data and the sequence diagram, also the results of the study of metal heating and plastic deformation process.

**Findings:** Heat penetration zone uprising over the limit values leads to a shift of the intensive plastic deformation area away from the butt, in the butt area a braking area is formed, and no quality weld join is formed by solid phase.

**Research implications:** The obtained research results demonstrate the new optimization method of butt resistance welding technological process. The method is based on the thermal deformation state of the thermal-mechanic effect area modeling.

**Value:** A mathematic model of the components thermal deformation state in the resistance butt welding process was designed, that made the modeling process possible.

*Key words:* resistance welding, registration processes, thermal deformation, welding chains.

УДК 629.5.02

Л.Ю. Кондратьева

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛАВНЫХ РАЗМЕРЕНИЙ  
КОРАБЛЯ БЕРЕГОВОЙ ОХРАНЫ ТИПА SWATH  
НА РАННИХ СТАДИЯХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова

При проектировании судов с малой площадью ватерлинии (СМПВ) весьма важной оказывается оценка главных характеристик на ранних стадиях проектирования. На анализ базы современных судов прототипов уходит много времени. На сегодняшний день использование подобных регрессионных зависимостей на ранних стадиях проектирования позволяет существенно сократить время потраченное на формирование начальной точки поиска.

Описана разработка зависимостей созданных на основании статистической обработки 1999-2015гг. патрульных судов типа SWATH (судно с малой площадью ватерлинии). В связи с тем, что в статистику были включены суда конкретного назначения и типа, полученные формулы позволяют достаточно точно определять начальные характеристики для кораблей береговой охраны с малой площадью ватерлинии. Среднеквадратичное отклонение не превысило допустимых норм, а следовательно точность полученных формул можно считать высокой. Регрессионные зависимости позволяют определить не только главные размерения, но и параметры, свойственные исключительно этому типу судна, такие как аппроксимированный диаметр подводного корпуса или расстояние между стойками.

*Ключевые слова:* статистические данные, патрульное судно, судно с малой площадью ватерлинии, главные размерения.

Береговая охрана (БОХР)—специализированные военизированные службы ряда государств, предназначенные для контроля за соблюдением правового режима территориальных и внутренних вод, морской экономической зоны и континентального шельфа, находящегося под юрисдикцией государства, обеспечения безопасности плавания в территориальных водах, оказания помощи судам терпящим бедствие, а также борьбы с контрабандой и пиратством.

В процессе проектирования, в частности, на ранних стадиях разработки проекта, очень часто возникает необходимость приближенного определения главных характеристик КБО (например, в оптимизационной задаче для формирования начальной точки поиска). В таком случае пользуются формулами, полученными при обработке статистических данных. В настоящее время такие формулы для КБО типа СМПВ (судно с малой площадью ватерлинии), построенных до 2015 г, остаются неизвестными. В связи с этим задача по сбору и статистическому анализу данных по современным патрульным СМПВ с целью получения зависимостей для основных характеристик кораблей представляется актуальной.

Регрессионные зависимости для пассажирских СМПВ были предложены в [1], а в [2] разработаны подобные формулы для традиционных КБО. В [5] опубликованы некоторые статистические данные по КБО типа СМПВ, однако зависимости для вычисления главных размерений не составлены.

Конечной целью исследования является разработка регрессионных зависимостей на основании статистических данных по современным патрульным судам с малой площадью ватерлинии.

В данной работе решение этой задачи получено путем обобщения данных по КБО постройки 1999–2015 гг. База таких данных была создана автором на основе информации, полученной из отечественных и иностранных периодических изданий.

Для того чтобы обработать собранные данные и определить оптимальную форму связи главных размерений патрульных судов была использована специально разработанная программа, в которой проверялось 15 разнообразных зависимостей (линейная –  $y = a x + b$ , логарифмическая –  $y = a \ln(x) + b$ , степенная –  $y = a x^b$ , гипербола –  $y = a/x + b$ , и т.п.). Значение коэффициентов уравнений  $a$  и  $b$  определялись при помощи метода наименьших квадратов. Если зависимость между параметрами оказывалась нелинейной, то сначала выполнялось линеаризирующее преобразование, и качество прогноза проверялось с помощью уравнения  $y = a x + b$ . После этого, используя обратное преобразование [4], рассчитывались значения коэффициентов  $a$  и  $b$ . Вычисление проводилось для всех семи зависимостей. Окончательный вид оптимальной формы зависимости выбирался по минимуму остаточной дисперсии.

Статистическая обработка данных по современным КБО водоизмещением  $D = 60\text{--}1000$  т с использованием данной методики дала возможность автору предложить следующие формулы для определения главных размерений корабля на начальных этапах проектирования (рис. 1–8).

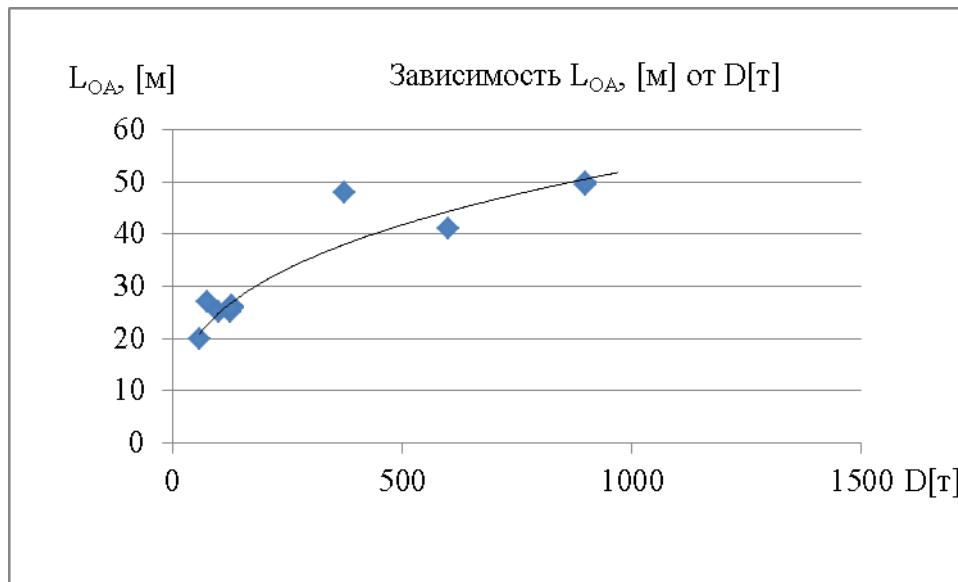


Рис. 1. Зависимость длины судна  $L_{OA}$  (м) от водоизмещения  $D$  (т)

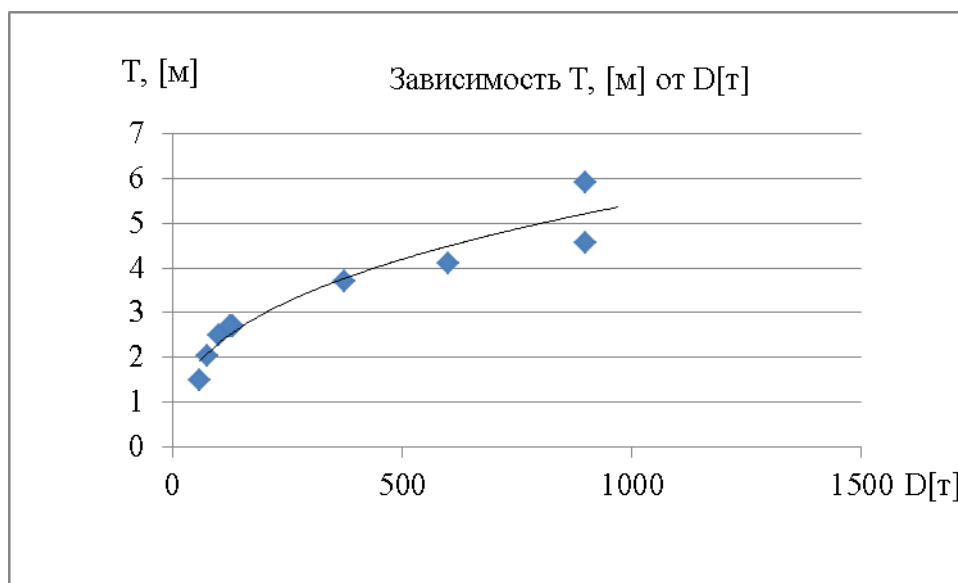


Рис. 2. Зависимость осадки судна  $T$  (м) от водоизмещения  $D$  (т)



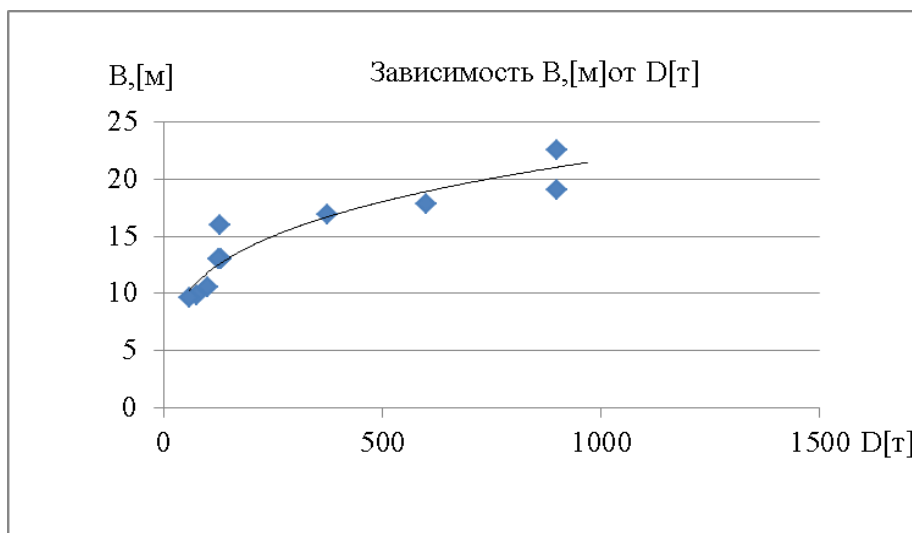


Рис. 3. Зависимость ширины судна  $B(м)$  от водоизмещения  $D(т)$

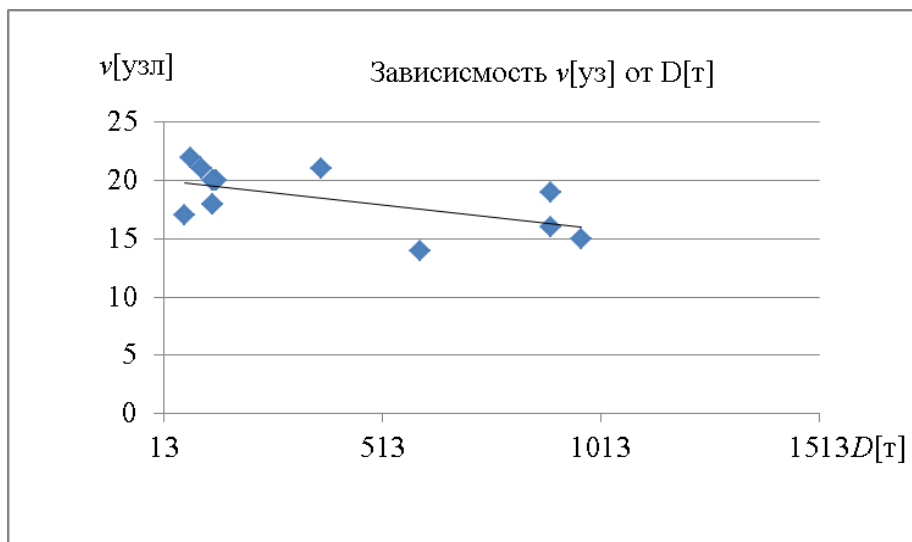


Рис. 4. Зависимость скорости судна  $v(узл)$  от водоизмещения  $D(т)$

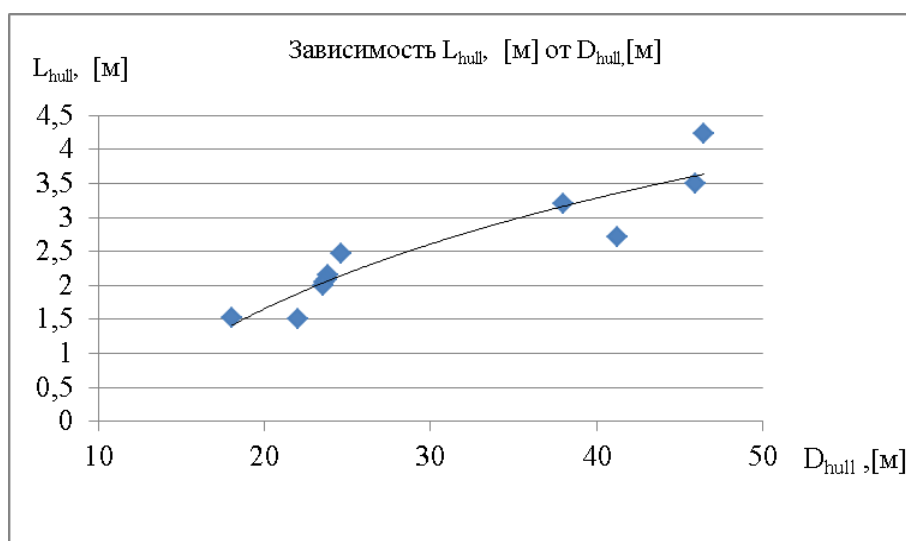


Рис. 5. Зависимость длины подводного корпуса  $L_{hull}(м)$  от диаметра подводного корпуса  $D_{hull}(м)$

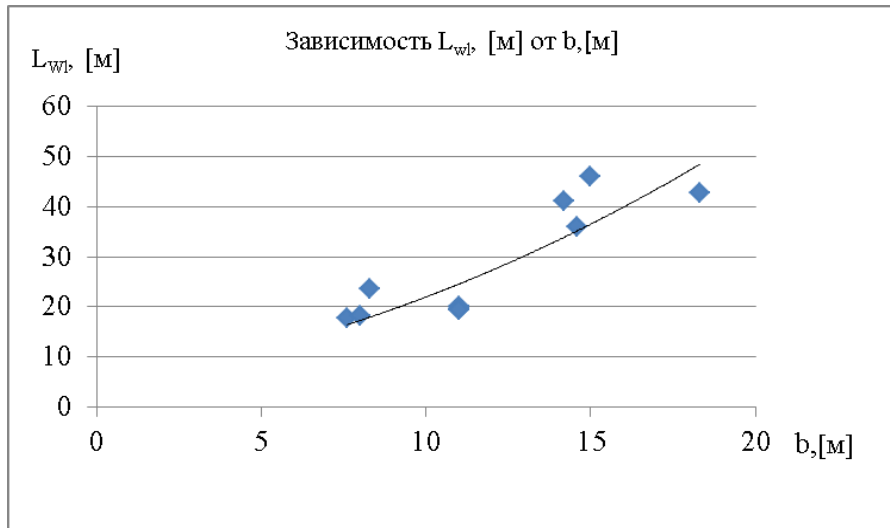


Рис. 6. Зависимость длины ватерлинии  $L_{WL}$  (м) от расстояния между стойками  $b$  (м)

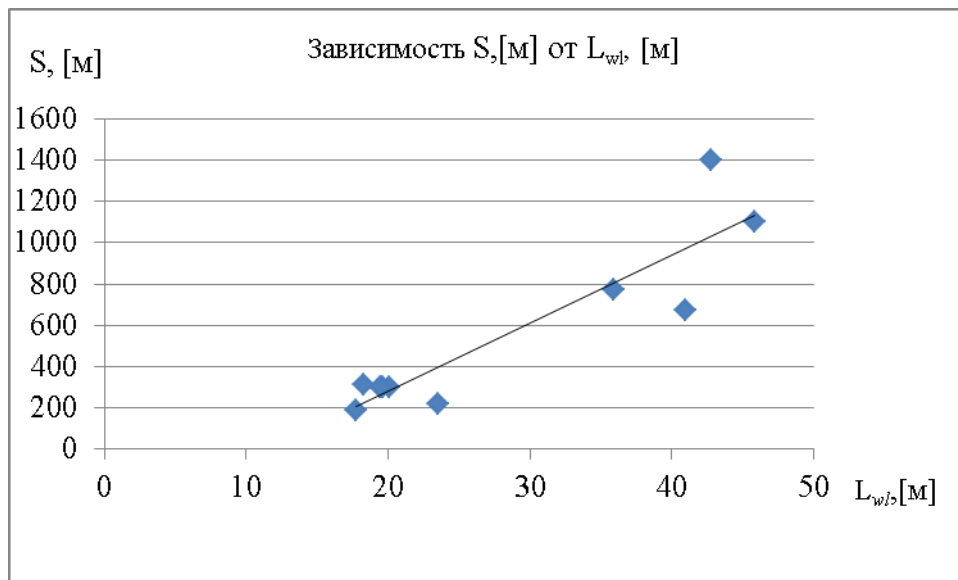


Рис. 7. Зависимость площади смоченной поверхности  $S$  (м<sup>2</sup>) от длины ватерлинии  $L_{WL}$  (м)

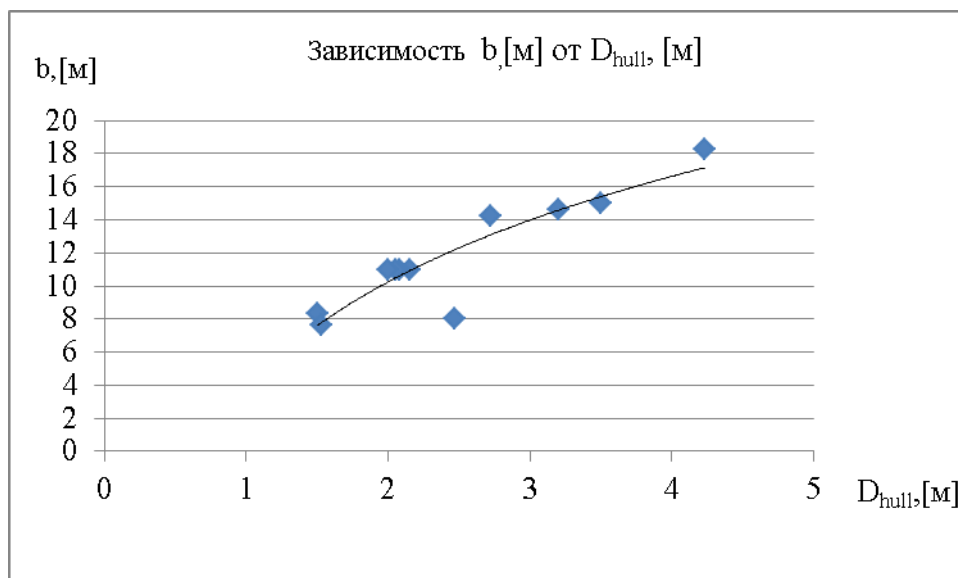


Рис. 8. Зависимость отстояния между стойками  $b$  (м) от диаметра подводного корпуса  $D_{hull}$  (м)

$$L_{OA} = 5,5448D^{0,3478}; R^2=0,9089,$$

$$B = 3,4983 D^{0,2637}; R^2=0,8662,$$

$$T = 0,4199 D^{0,3702}; R^2=0,9152,$$

$$v = -0,0042D + 20,112; R^2=0,4763$$

где  $L_{\max}$  – наибольшая длина, м;  $L$ – длина конструктивной ватерлинии, м;  $B$ – ширина, м;  $T$  – осадка, м;  $D$  – водоизмещение корабля, т,  $v$  – скорость судна.

Подводная часть СМПВ требует особого внимания на ранних стадиях проектирования, а следовательно необходимость регрессионных зависимостей также актуальна для геометрических характеристик подводных корпусов.

$$L_{hull} = 2,3471 \ln(D_{hull}) - 5,3738; R^2=0,8558,$$

$$L_{WL} = 0,0819(b^2) - 0,8546b + 5,247; R^2=0,8641$$

$$S = 32,803 L_{WL} - 373,51; R^2=0,8327,$$

$$b = 9,2049 \ln(D_{hull}) + 3,8664; R^2=0,8066,$$

где  $L_{hull}$  – длина подводного корпуса, м;  $L_{WL}$ – длина конструктивной ватерлинии, м;  $b$ – расстояние между стойками, м;  $S$  – площадь смоченной поверхности, м<sup>2</sup>;  $D_{hull}$  – аппроксимированный диаметр подводного корпуса, м.

### Выводы

1. Судно с малой площадью ватерлинии имеет нетипичные соотношения главных размерений, а регрессионные зависимости, полученные в данной статье, помогут уже на начальных этапах проектирования определять геометрические характеристики судов, предназначенных для патрулирования морских границ.

2. Полученные формулы существенно сокращают время работы с судами - прототипами на ранних стадиях проектирования.

### Библиографический список

1. **Бойко, А.П.** Разработка методики оптимального проектирования судов с малой площадью ватерлинии: дисс. ... канд. техн. наук: 629.05.02/ А. П. Бойко// Д., 2010 - Николаев НУК- 2010 С. 32–45.
2. **Дам, С. Т.** Выбор основных проектных характеристик кораблей береговой охраны: дис. к-та техн. наук: 629.05.02/ Дам Суан Туан; Украинский государственный морской технический университет имени адмирала Макарова– Д., 2003 – Бібліогр.: С. 7–96.
3. Правила классификации и постройки морских судов // Российский морской регистр судоходства, 2015.
4. **Akakura, Takahashi.** Ship Demensions of Design Ship under Given Confidence Limits // Technical Note of the Ports and Harbour Research Institute, 1998. – № 911.
5. Josip Medaković, A Comparison of Hull Resistances of a Mono-Hull and A SWATH Craft [Text]/ Josip Medaković, Ban Dario, Branko Blagojević//University of Split, IJESIT Volume 2, Issue 4, July 2013,Croatia, pp 155-162.

Дата поступления  
в редакцию 23.04.2016

**L. Yu. Kondratieva**

**DETERMINATION OF THE MAIN CHARACTERISTICS FOR PATROL SWATH  
AT THE EARLY DESIGN STAGES**

Admiral Makarov National University of Shipbuilding

**Purpose:** The specific dependents for determination of the main characteristics of patrol ships with small waterline area have been developed in this article.

**Design/methodology/approach:** The regression formulas were derived by using the statistical method in this paper. The investigation on the basis of statistical data 1999-2015 years have been conducted .

**Findings :** The vessel with a small area of the waterline has an atypical relations of the main dimensions, and regression formulas, obtained in this article, can help at the early stages of design to determine the geometrical characteristics of ships designed for patrolling of sea borders The derived formulas significantly reduce the time to work with vessels prototypes early in the design.

**Originality/value:** Regression dependence for the passenger SWATH have been proposed in [1] and the similar formulas for traditional patrol ships have been developed [2]. In [5] published some statistics data about patrol SWATH, but the dependence for calculating of the the main dimensions was not done there. Consequently the investigation of obtaining of regression relationships are actuality.

*Key words:* statistical data patrol vessel, vessel with small waterline area, main dimensions.

УДК 629.113

З.А. Кострова, А.В. Михеев, Д.В. Зезюлин, В.С. Макаров,  
В.Е. Колотилин, М.Е. Бушуева, В.В. Беляков

## ЭВОЛЮЦИЯ КОЛЕСА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрена эволюция колеса – от первого деревянного катка до современных разработок – непневматических (безвоздушных) шин. Целью исследования эволюции колеса является систематизация имеющихся на сегодняшний день сведений о появлении первого колеса, этапах развития колеса; рассмотрение колеса как средства технического прогресса и как результата развития общества; составление условной классификации существующих видов колес.

*Ключевые слова:* колесо, эволюция колеса, первое автомобильное пневматическое колесо, Роберт Томсон, Дж. Данлоп, металлоупругие колеса, пружинящие колеса, гусматики, гранулированные колеса, радиальные и диагональные шины, сферическое колесо, нестандартные колеса, колеса марсоходов, моносферическое колесо-робот, квадратное колесо, эллипсоидное колесо, непневматические (безвоздушные) шины, классификация колес.

Колесо – одно из самых важных изобретений в области механики за всю историю человечества. Основным преимуществом колеса как механизма является возможность экономии работы при перемещении груза за счет замены силы трения скольжения, возникающей на границе двух взаимно перемещаемых тел, значительно меньшей по величине силой трения качения [1]. В общем количестве транспортно-технологических машин (ТТМ) парк колесной техники составляет более 70%. Колесный движитель является наиболее распространенной тягово-опорной системой, которая применяется на ТТМ [2].

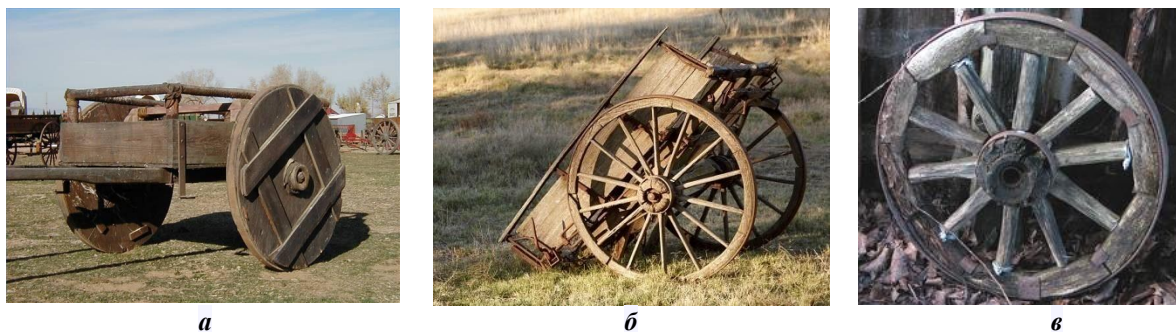
Предшественником колеса можно считать деревянный каток, который подкладывался под перемещаемый груз. Самым ранним «колесом» считается находка в Румынии - её относят к последней четверти V тысячелетия до н. э. (рис. 1). Следующие упоминания о колесе встречаются в Древней Месопотамии в конце 4-го тысячелетия до н. э. Первые колеса для повозок делались сплошными, их отрезали от бревен или сшивали из нескольких досок и затем обрезают по кругу (дисковые колеса, рис. 2, а). Деревянные колеса быстро приходили в негодность. Уже в середине III тысячелетия до н. э. беговую дорожку деревянных колес оборащивали в кожу, а к 2000 г. до н. э. стали забивать в обод медные гвозди острием наружу – для лучшего сцепления с землей. Колеса еще сплошные, но уже не вырезанные из цельного ствола, а составные, сколоченные из трех частей. Примерно тогда же люди приручают лошадь, и повозки разделяются на быстрые конные двуколки - боевые колесницы и экипажи правителя и двухосные телеги с впряженным волом – для хозяйства.



Рис. 1. Одно из первых колес

Эволюция колеса напрямую связана с эволюцией дорог. Колесные повозки не могли двигаться по пересеченной местности. Сначала дороги прокладывали между поселениями и местами, где проводились работы - например, между полем и деревней. Впоследствии дороги стали соединять различные населенные пункты. Во II тысячелетии до н. э., конструкция колеса совершенствуется: на Южном Урале появляется колесо со спицами (рис. 2, б), в Малой Азии – со ступицей и гнутым ободом. Позднее, в I-м тысячелетии до н. э. кельты для увеличения прочности колёс своих колесниц стали применять металлический обод (рис. 2, в). На

этой стадии развитие колеса затормозилось на долгие годы, практически 3000 лет оно оставалось неизменным [3].



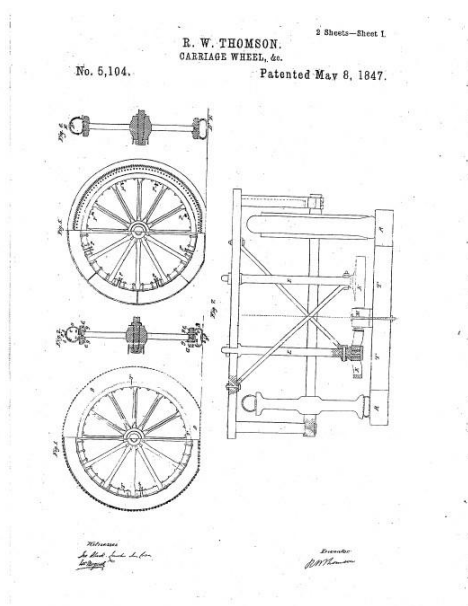
**Рис. 2. Эволюция колеса в 4 - 1 тысячелетии до н.э.:**

*а* - одно из первых колес для повозок;  
*б* - колесо со спицами; *в* - колесо с металлическим ободом

Огромный шаг в технико-технологической эволюции колеса произошел в XIX веке, когда появились первые пневматические шины. Первым изобретателем шины принято считать Роберта Томпсона (патент №10990 от 10 июня 1846 года) (рис. 3). Шина Томпсона состояла из камеры и наружного покрытия. Камера изготавливалась из нескольких слоев обычной парусины, пропитанной и покрытой каучуком или раствором гуттаперчи. Наружное покрытие шины делалось из кожи и крепилось с помощью заклепок. Томпсон оборудовал экипаж воздушными колесами и провел испытания, измеряя силу тяги экипажа. Испытания показали уменьшение силы тяги на 38 % на щебеночном покрытии и на 68 % на покрытии из дробленой гальки. Особо отмечались бесшумность, удобство езды и легкий ход кареты на новых колесах.

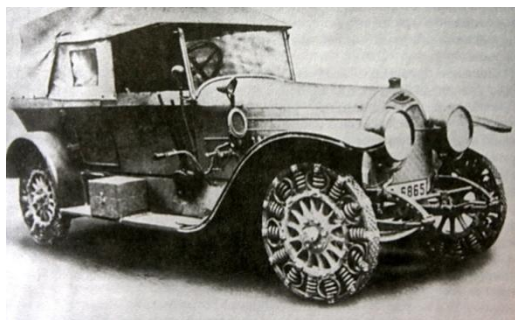
После смерти Томпсона в 1873 году, его изобретение было забыто. В 1888 году Джон Данлоп сделал сплошные деревянные колеса для детского велосипеда, с желобом на наружной поверхности, из старого резинового фартука склеил трубки, соединил их концы и надел на колеса. Сверху Данлоп покрыл каждую камеру полосой полотна, края которого прибил гвоздями к колесу. В камеры вклеил отрезки тонких резиновых трубок и накачал через них воздух. 23 июля 1888 г. Дж. Б. Данлопу был выдан патент № 10607 на изобретение [4]. Через

два года Чальд Кингстон Уэлтчем отделил камеры от покрышки и для увеличения прочности и упругости шины предложил вставлять в ее края проволоочные кольца и сажать их на обод, с углублением к центру. Последнее открытие дало изобретению Данлопа путь к применению пневматических шин на автомобилях. Тогда же англичанин Бартлетт и француз Дидье изобрели вполне приемлемые способы монтажа и демонтажа шин. Всё это определило возможность применения пневматической шины на автомобиле. Первыми, кто стал использовать пневматические шины на автомобилях, были французы Андре и Эдуард Мишлен, которые уже имели достаточный опыт в производстве велосипедных шин. Шины первых автомобилей напоминали велосипедные - имели очень небольшую ширину и высоту профиля. Такие шины имели низкие показатели грузоподъемности, проходимости, управляемости, долговечности и комфортабельности,



**Рис. 3. Первое автомобильное пневматическое колесо (1846 г.)**





**Рис. 4. Первый автомобиль с металлоупругими пружинящими колёсами (1865 г.)**

для повышения плавности хода автомобиля. В патенте №152422 от 1902 года описана конструкция колеса с пружинящей ступицей. Одна из частей ступицы жёстко установлена на оси, а другая связана с деревянным ободом при помощи деревянных спиц. Части ступицы связаны между собой упругими элементами, которые обеспечивают уменьшение динамического воздействия неровностей дороги на транспортное средство. Колесо с пружинящими спицами по патенту №166065 от 2 декабря 1904 г. содержит обод, связанный со ступицей при помощи пружин и жестких металлических спиц. Спицы шарнирно закреплены на ступице и ободе колеса и предотвращают боковое и угловое перемещение ступицы относительно обода. В 1916 году немецкая компания Mercedes-Benz оснастила свой автомобиль металло-

были ненадёжны и не приспособлены к быстрому монтажу [5].

Еще одним шагом в эволюции КД явилось появление металлоупругих колёс. Первые металлоупругие колёса появились в 1865 г. (рис. 4).

В конце XIX века их ставили на английские мотоциклы «Квадрант», а в начале XX столетия - на некоторые модели автомобилей [6]. Конструкторами того времени было изобретено большое число пружин колёс, отличительной особенностью конструкции которых являлось наличие металлических упругих элементов, предназначенных в первую очередь



**Рис. 5. Автомобиль с металлоупругими колёсами (1916 г.)**



**Рис. 6. Робот-вездеход Tri-Star IV (2011г.)**

упругими колёсами собственной конструкции (рис. 5) [7].

Достоинствами металлоупругих колёс являются плавность хода, возможность работы в экстремальных условиях (низких и сверхнизких температур, в кислых средах, в условиях ионизирующих излучений). Недостатки: большая масса, повышенный шум при качении, меньшие демпфирующие свойства, требуется большое пространство для размещения упругих элементов при незначительном вертикальном перемещении ступицы относительно обода. Идея использования упругих элементов в конструкции колёсного движителя используется не только при проектировании наземного транспорта, но и при изготовлении космических аппаратов.

В 2011 году группой инженеров под руководством профессора Сигео Хиросе из Токийского технического института в рамках совместного проекта с Японским агентством аэрокосмических исследований разработан робот-вездеход Tri-Star IV (рис. 6), на который ус-

тановили колеса с металлическими упругими спицами. Данная конструкция колеса позволяет роботу перемещаться по горизонтальным и наклонным поверхностям с различного рода неровностями [7]. Применение металлоупругих колёс было обусловлено не только низкой надёжностью первых пневматических шин, но и нехваткой и дороговизной натурального каучука - единственного материала, из которого до 1932 г. получали резину. Эта проблема приобрела особую актуальность в Германии во время первой мировой войны. Поэтому на некоторых армейских автомобилях начали испытывать шины, не имеющие ни грамма резины. Они представляли собой стальные пружины, зажатые между двумя металлическими ободами: малым, внутренним, и большим, наружным. Понятно, что такие шины не боялись проколов, но в целом себя не оправдали и на броневиках применения не нашли.

Англичане для своих машин фирмы «Остин» придумали следующее. Каждый броневый автомобиль имел два комплекта колёс. В обычных условиях машина разезжала на пневматиках и могла быстро перебрасываться по дорогам с одного участка фронта на другой. Однако перед тем как вступать в соприкосновение с противником, машину «переобували» в другие колёса, так называемые боевые. Шины их были выполнены из сплошной резины и, кроме того, имели специальные выступы, улучшающие сцепление с грунтом. Неудобства такой системы были очевидны. Нужно было постоянно возить с собой четыре лишних колеса и тратить дорогое время на их замену. При этом скорость в бою была недостаточной.

Перед первой мировой войной А. Гуссом был разработан специальный наполнитель для шин броневых автомобилей, легкий и упругий, который после заливки в шину застывал и становился сухим, мелкопористым, словно пробка. Такие шины были пулестойкими и по имени изобретателя названы гусматиками. Броневые автомобили, обутое в гусматики, пошли в бой. Изготовители гарантировали пробег в 1000 верст, но фактически он нередко доходил до 3000 вест, что было по тем временам отличным показателем (рис. 7). В ходе войны эластичные наполнители шин применялись также на немецких и английских броневиках. Немецкий наполнитель был неплохой, а английская масса (рабберин) уступала гусматику в эластичности и долговечности [8].



Броневый автомобиль «Фиат-Омский» на шинах типа «гусматик» (1917-1923 гг.)



45-мм противотанковая пушка образца 1942 года

Рис. 7. Шины типа «гусматик»

Преимуществом таких колёс на сегодняшний день являются устойчивость и сохранение работоспособности покрышек в случае механических повреждений (проколы, пулевые или осколочные воздействия), низкий коэффициент сопротивления качению, высокий срок эксплуатации (в 1,5-2 раза выше пневматических покрышек) и минимальные затраты на техническое обслуживание во время их эксплуатации. Но есть и недостатки: сниженный коэффициент упругости (что существенно ограничивает допустимые скорости передвижения транспортного средства и, как следствие, область применения шин), данные шины проигрывают пневматическим шинам по своим демпфирующим свойствам (демпфирующие свойства



гусматика составляют около 80%), специфика монтажа требует квалифицированной помощи специалистов (для монтажа шин гусматик необходимо специальное оборудование), низкая эластичность, что не дает возможности эксплуатировать их на более высоких скоростях (при длительном движении на высокой скорости данные покрышки быстро нагреваются, происходит резкий нагрев и выделение газов, что может спровоцировать самовозгорание или разрыв покрышки).

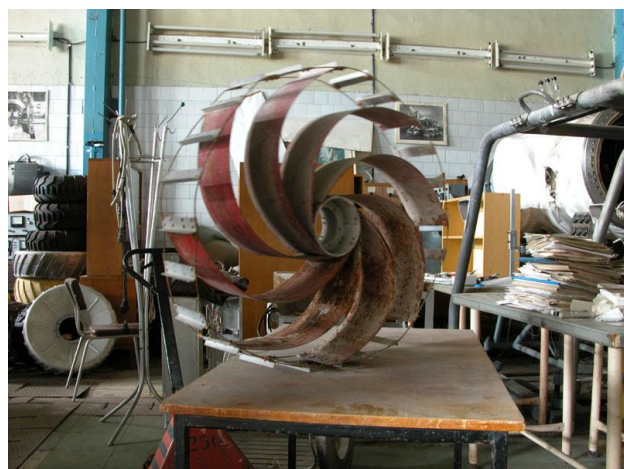
Потребовалось много лет постепенного совершенствования конструкции пневматической шины и способа ее изготовления, прежде чем она окончательно вытеснила литую резиновую. Стали применяться все более надежные и долговечные материалы, появился в шинах корд - особо прочный слой из упругих текстильных нитей. В середине 50-х годов появилась новая разработка в конструкции шин. Основной особенностью новой шины, предложенной фирмой «Мишлен», был жесткий пояс, состоящий из слоев металлокорда. Нити корда располагались радиально от борта до борта. Такие шины получили название радиальных [9]. Результатом испытания новой шины фирмы «Мишлен» явилось увеличение ходимости почти вдвое по сравнению со стандартными (при диагональном расположении нитей корда). Радиальные шины повышают безопасность эксплуатации автомобилей за счет улучшения устойчивости и управляемости при движении; повышенного сцепления на дорогах с сухим и мокрым покрытиями; уменьшения риска механических повреждений и проколов в зоне протектора.



**Рис. 8. Колесо лунохода (1970 г.)**



**Рис. 9. Колесо для лунохода из упругой сетки (1970 г.)**



**Подрессоривание колеса с помощью металлических лент**



**Подрессоривание колеса с помощью цилиндрических пружин**

**Рис. 10. Пробные варианты колес для лунохода (1970 г.)**

В середине XX века начинается освоение и исследование космоса, возникает потребность эксплуатации КД в новых условиях. Создание и запуск лунного самоходного аппарата стало важным этапом в изучении Луны. Идея создания лунохода родилась в 1965 г. в ОКБ-1 (ныне РКК «Энергия» им. С.П. Королева). Создание лунохода было поручено Машиностроительному заводу им. С.А. Лавочкина (ныне НПО им. С.А. Лавочкина) и ВНИИ-100 (ныне ОАО «ВНИИТрансмаш») [10]. Колесо планетохода должно одновременно сочетать в себе множество требований. Вот несколько вариантов колес, созданных во ВНИИТМ со времен лунохода и до наших дней. В одном из вариантов колеса состоят из трех титановых ободов, с закрепленной на них стальной сеткой с грунтозацепами из того же титана. На твердой поверхности опора происходит на средний обод, на мягком же грунте обод проникает глубоко и тогда работает сетка (рис. 8). Еще один вариант - здесь внешняя поверхность колеса сделана из упругой сетки, однако под сеткой размещены ленточные пружины, которые работают, когда при ударах сетка проминается. Профиль колеса мешает боковому сползанию. Грунтозацепы (в середине) работают главным образом при прогибании сетки на твердых грунтах (рис. 9). Еще два пробных варианта колес для лунохода - колесо подрессоривается, в одном случае, с помощью упругих металлических лент, в другом - с помощью цилиндрических пружин вдоль оси колеса (рис. 10) [11].

6 сентября 2012 года был опубликован патент US20120223497 A1 - гранулированные колеса - разработка ученых из канадского университета Макгилла. За основу была взята идея беспалого робота, который с легкостью захватывает любые предметы, не повреждая их. Разработка получила название iRing [12]. Колесо состоит из ступицы, гибкой ткани шины и заполнителя - металлических частиц. Ткань шины может быть выбрана из широкого диапазона материалов - хлопок, искусственные материалы (полиэфир), металлы.

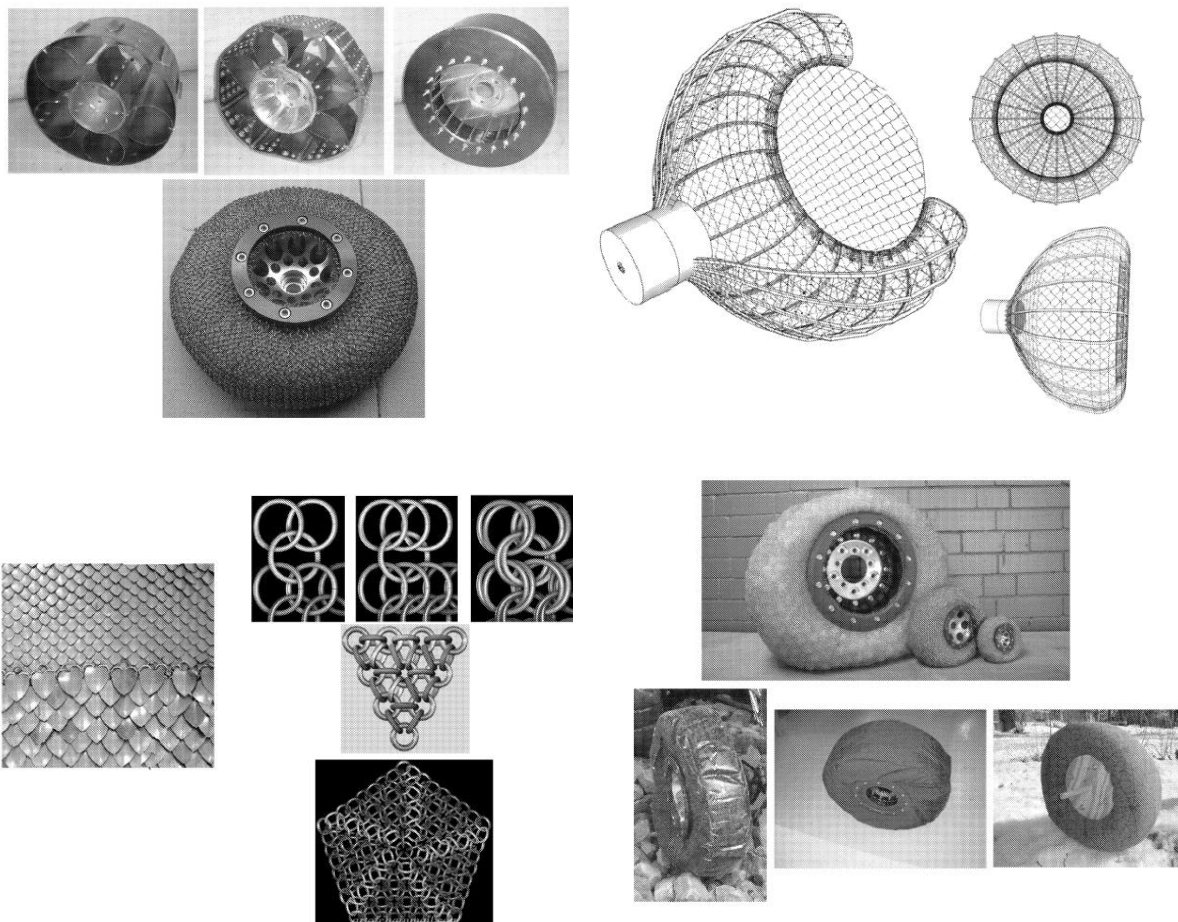


Рис. 11. Гранулированные колеса (2012 г.)

В одном из вариантов такое колесо состоит из ступицы, каркас сделан из стали («кольчуги») и заполнен пластиковыми шариками (рис. 11) [13].

Достоинства такой конструкции колеса следующие: колеса, наполненные мелкими твердыми гранулами, легко обтекают любые возникающие на пути объекты, что приводит к увеличению площади пятна контакта и улучшению тягового усилия, бокового сопротивления; гранулированные колеса проходят по местности любого рельефа, форсируют даже объекты, чьи габариты превосходят размеры самих шин; увеличивают сопротивление качению, что снижает вибрацию корпуса; способны работать в условиях сверхнизких температур (внеземные поверхности). Недостатки: больше затраты энергии на качение; малая экспериментальная база по наработке на отказ (не хватает данных по эксплуатации в разных климатических и технологических условиях).

В последние годы было предложено несколько нестандартных безвоздушных колес (рис. 12). Например, студенты инженерного колледжа Чарльза Дэвидсона при университете Сан-Хосе изобрели мотоцикл Spherical Drive System со сферическими колесами (рис. 12, а). Колеса могут вращаться в любом направлении и при необходимости развернуться буквально на месте. При изготовлении сфер использовались углеродное волокно и фиброгласс.

Ещё одним примером нестандартного сферического колеса может явиться разработанный в 2012 году шведской компанией Rotundus робот GroundBot (рис. 12, б) - сферическое устройство с двумя камерами по бокам, которые снимают изображение в трехмерном формате и дающими угол обзора 360°. Управление ботом осуществляется с помощью системы, основанной на использовании GPS. Также робот оснащен ИК камерами, которые позволяют видеть в темноте. На GroundBot также можно установить оборудование, которое регистрирует радиоактивное излучение, задымленность в помещении или наличие открытого огня. Максимальная скорость - 10 км/ч, встроенного аккумулятора хватает на 8-16 часов, время перезарядки составляет 3-4 часа, диаметр 60 см, вес - 25 кг. На сегодняшний день эти роботы уже нашли применение в военных операциях и в службах охраны.

В 2004 году компания Audi разработала концепт-кар, Audi RSQ, специально для фильма «Я, робот». Автомобиль имеет скрытые внутри крыльев сферические колеса - такое транспортное средство может двигаться в любом направлении в любой момент времени без необходимости выполнения сложных маневров для разворота, то есть имеет шесть степеней свободы. Был создан аналог данного автомобиля, наглядно показывающий принципы работы сферического колеса из детского конструктор Lego (рис. 12, в).

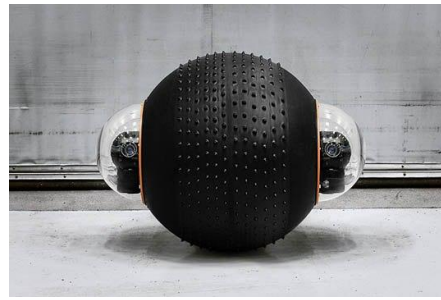
На рис. 12, д - российский аппарат «Марсоход» с цилиндрическими алюминиевыми колесами с увеличенными грунтозацепами. На рис. 12, е - варианты марсоходов космического агентства НАСА - Spirit (2003 год), Opportunity (2004 год) и Curiosity (2011 год). Марсоходы имеют по 6 колес, каждое из которых выполнено из цельного куска алюминия, размер колеса 50 на 40 см, величина грунтозацепа - 7,5 мм. У Curiosity грунтозацепы неровные, что дает возможность избежать бокового скольжения. По форме колеса напоминают конус. На внешнем краю каждого колеса имеется ободок, который также необходим для придания прочности и жесткости всей конструкции. Помимо этого, внутри находится дополнительный обод, который является базой для дисков колес. Одна из секций шины имеет отверстия, выполняющие роль одометрического маркера. Их наличие позволяет навигационному программному обеспечению аппарата измерять прогресс движения марсохода по мягким поверхностям путем фотографирования оставленных колесами следов.

На рис. 12, ж - еще один пример нестандартных колес - квадратные колеса (патент №2786540 от 26 марта 1957 года). За счет остроугольных граней данные колеса работают в условиях бездорожья лучше, чем круглые. Колеса установлены на плавающую ось и автоматически выравнивают положение друг относительно друга, а внутренняя геометрия обеспечивает плавность хода на ровных поверхностях. В 1960-е было построено несколько ходовых моделей с квадратными колесами для армии США. На рис. 12, ж фигуры 4 и 5 - частный случай квадратного колеса - шестигранное колесо.





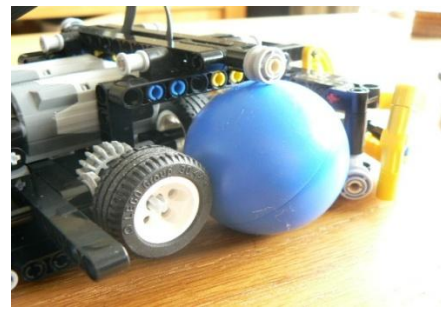
а



б



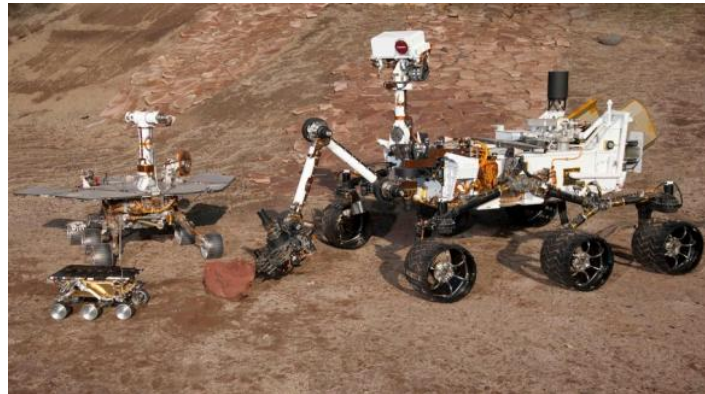
в



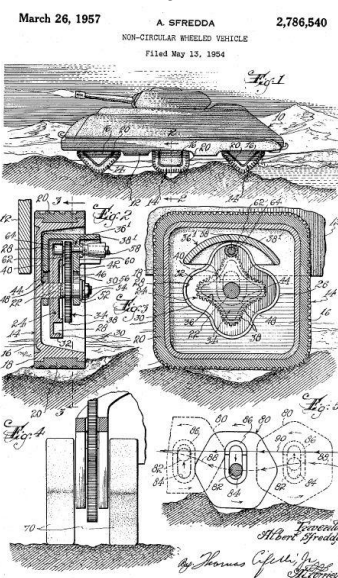
г



д



е



ж



з

### Рис. 12. Нестандартные колеса:

- а - мотоцикл со сферическими колесами (2012 г.); б - моносферическое колесо-робот (2012 г.);  
в - концепт-автомобиль Audi со сферическими колесами (2004 г.);  
г - аналог концепт - автомобиля Audi из конструктора Lego;  
д - российский аппарат «Марсоход»; е - марсоходы НАСА (2003 – 2011 гг.); ж - пример квадратного колеса (1957 г.);  
з - пример эллипсоидного колеса (1946 г.).

На рис. 12, з – пример эллипсоидного колеса. Данный вид колес был разработан в 40е годы, в США. На рис. 12, з изображен трактор М7 с эллипсоидными колесами, испытания которого проводились в 1946 году. Колеса на специальной качающейся подвеске синхронизированы по отношению друг к другу на 90 градусов, что не позволяет кузову проседать резко. Испытания сразу выявили ряд недостатков эллипсоидных колес: длительное движение по твердому грунту на таких колесах приводило к расшатыванию элементов кузова; при определенном наклоне овальных колес машина двигалась исключительно по прямой, поворот был невозможен; был обнаружен повышенный износ покрышек в верхней и нижней точках эллипсоида колес.

Достижения химии полимеров в настоящее время позволяют применять для изготовления колёс автомобиля неметаллические материалы, в частности полиуретан. Следует отметить, что в настоящее время разработкой колёс и шин из полимерных материалов занимаются ведущие мировые автомобильные компании. Преимуществами таких шин являются устойчивость к механическим повреждениям (проколы, порезы), поскольку в них нет герметичной камеры (продолжает движение при повреждении 30% структуры шины); меньшее сопротивление качению, что позволяет экономить до 10% топлива; ниже нагрев, как следствие, увеличение срока эксплуатации шины; требуется меньше сырья при производстве; количество основных производственных операций при изготовлении шин уменьшилось с 8 до 4, что значительно снижает энергозатраты и выбросы вредных веществ в атмосферу; нет необходимости проверять давление воздуха в шинах; возможна работа на пересеченной местности; в перспективе установка полиуретановых шин будет доступна на любой автомобиль.



Рис. 13. Шины Michelin Tweel (2004 г.)



Рис. 14. Шины Polaris (2012 г.)

Недостатки: сильные вибрации на больших скоростях; для производства требуется специально обученный персонал, высокотехнологичное оборудование; необходимо специальное оборудование для обслуживания; на данном этапе разработок шины не рассчитаны на длительные переезды, т.к. при преодолении больших расстояний возникает их перегрев; не рассчитаны на высокие скорости (до 80 км/ч); жесткость конструкции никак не регулируется. В 2004 г. на автомобильной выставке в Париже фирма Michelin представила автомобильную шину с упругими деформируемыми спицами из полиуретана.

Шины Michelin Tweel (рис. 13) в сравнении с традиционными пневматическими шинами имеют меньшую массу и высокую боковую жесткость, что, в свою очередь, улучшает большинство эксплуатационных свойств автомобиля. Конструктивно Tweel представляет собой систему цельных внутренних ступиц, прикрепленных к полуоси. Вокруг них расположены полиуретановые спицы, соединенные в определенной последовательности. Через спицы проходит растяжной хомут, формируя внешний край шины (часть, которая соприкасается с дорогой) [6].

Конкурентом для Michelin стала компания Polaris, продемонстрировав своё видение



«шин будущего» (рис. 14). Конструктивно они достаточно похожи, но в Polaris внесли одно улучшение: спицы заменили на систему сот, наподобие пчелиного улья. Плюс применили в собственной разработке другие композиционные материалы. Стали заметны преимущества новинки: получившиеся ячейки в зависимости от скорости движения проявляют разные параметры жесткости: то они жесткие, то они гибкие, а как следствие - лучше поддерживается форма колеса вкупе с хорошим поглощением неровностей. Таким образом, непневматические шины из полиуретановых эластомеров можно условно разделить на «спицевые» и «сотовые». «Спицевые» шины состоят из жёсткой ступицы, соединенной с протектором посредством гибких деформируемых спиц из полиуретана. Вся конструкция при этом функционирует как единое целое.



Рис. 15. Шины Bridgestone (2015 г.)

Безвоздушные шины Bridgestone показали миру свой «рисунок»: теперь в профиле закручивающиеся в обе стороны спицы, благодаря которым шина становится более упругой (рис. 15). В Bridgestone к выбору исходных материалов подошли достаточно «зелено» и предложили создавать новые шины из переработки старой резины. Впрочем, практика показала возможность применения подобной конструкции лишь в гольф-карах: максимальная скорость ограничивается уже даже не 80, а 64 км/ч, а грузоподъемность одного колеса всего 150 кг.

Шины без воздуха I-Flex (Hankook) (рис. 16) сделали неожиданный поворот этой отрасли. Корейская фирма создала шины, в которой собственно шина и обод - одно целое. 95% I-Flex - это переработанные материалы.



Рис. 16. Шины Hankook (2013 г.)

Показали их в первый раз на Франкфуркском автошоу 2013 года, выполнены I-Flex были в размере 14" и имели довольно оригинальный дизайн, который приглянулся посетителям. Сейчас подобные безвоздушные шины устанавливают на малолитражные модели Volkswagen Up. Последней новостью мира безвоздушной резины стал выпуск шин Hankook I-Flex пятого поколения, в которых инженерами удалось перевалить «80-километровый барьер». По результатам серии испытаний было выявлено, что новый рисунок вместе с новыми перерабатываемыми материалами теперь упирается в скоростной предел 130 км/ч. Дополнительным преимуществом новинки стала возможность установки новых Hankook I-Flex-V на стандартный обод [16].

Есть подобные разработки и в России. Многие из них выполнены в МИТХТ им. М.В. Ломоносова, НИИШПе, Братском государственном университете, Псковском государственном университете. Кафедра «Автомобильный транспорт» Братского государственного

ного университета также имеет опыт в разработке колёс с упругими спицами, сделан опытный образец пресс-формы для изготовления шины с упругими деформируемыми спицами из эластичного полиуретана методом литья [15-19].

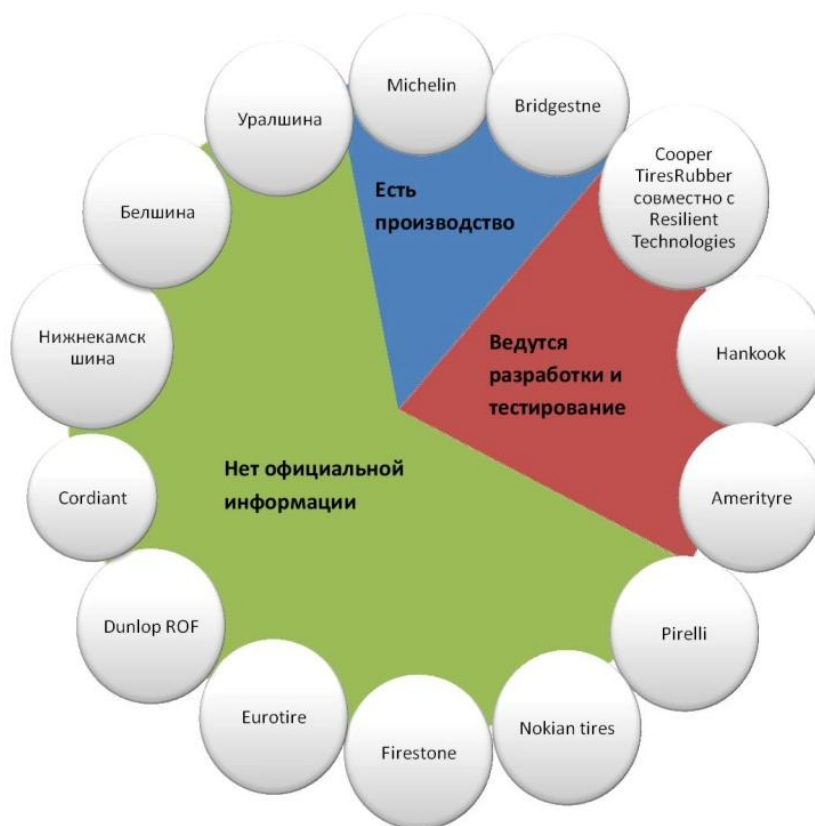


Рис. 17. Этапы разработки и производства эластичных шин у различных производителей

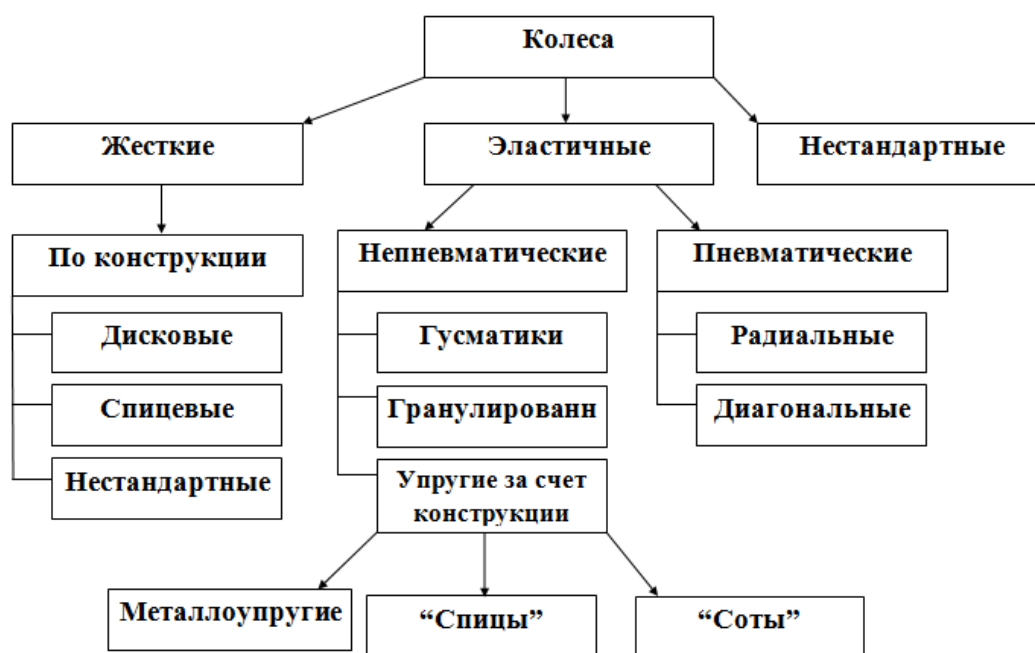


Рис. 18. Условная классификация колес

Одной из значимых проблем рассмотренных шин является невозможность регулиро-

вания жесткости конструкции. Существуют разработки по регулированию жесткости «сотовых» структур колеса и элементов с помощью подведения к ним электрического тока и применения электрозависимых по жесткости полимерных материалов.

Этапы разработки и производства эластичных шин у различных производителей данной продукции показаны на рис. 17. На сегодняшний день многие крупные производители шин нацелены на производство безвоздушных шин. Американский город Пидмонт в штате Южная Каролина стал местом расположения нового завода компании Michelin по производству безвоздушной радиальной шины Tweel. Новый завод позволит компании Michelin увеличить объем производства шин Michelin X Tweel SSL для мини-погрузчиков с бортовым разворотом и приступить к выпуску новой шины Michelin X Tweel TURFTM, которая будет устанавливаться в качестве оригинального оборудования для газонокосилок John Deere ZTRAKTM 900 с функцией разворота на месте [20].

На основании вышеприведенного описания типов колес и шин, а также их характеристик можно предложить следующую условную классификацию (рис. 18).

Полученные данные могут быть использованы при проектировании математической модели непневматической шины по методикам, представленным в работах [2, 13-60].

#### Библиографический список

1. **Тарановский В.Н.** Автомобильные шины: Устройство, работа, эксплуатация, ремонт / В. Н. Тарановский, В. А. Гудков, О. Б. Третьяков. – М.: Транспорт, 1990. – 272 с.
2. **Беляков, В.В.** Статистическая модель выбора геометрических параметров, массоинерционных, мощностных и скоростных характеристик многоосных колесных транспортно-технологических машин / В.В. Беляков [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2015. – №4(111). – С. 136–147.
3. **Добровольский, А.В.** Универсальная научно-популярная онлайн-энциклопедия «КРУГОСВЕТ». URL: [http://www.krugosvet.ru/enc/nauka\\_i\\_tehnika/tehnologiya\\_i\\_promyshlennost/koleso.html](http://www.krugosvet.ru/enc/nauka_i_tehnika/tehnologiya_i_promyshlennost/koleso.html). Дата доступа 16.02.2016.
4. URL: <http://vkrse.com/event/680>. Дата доступа 12.02.2016.
5. URL: <http://www.pirelli-tyres.com/cpravochnik/istoriya-shin.php>. Дата доступа 17.02.2016.
6. **Мазур, В.В.** Способы повышения живучести и безопасности автомобильных шин // Системы. Методы. Технологии. – 2009. – №1. – С. 41–45.
7. **Манфановский, С.Б.** Совершенствование колесных движителей внутренним подрессориванием колес / С.Б. Манфановский, А.А. Енаев // Вестник Псковского государственного университета. – 2013. – №3. – С. 87–95.
8. **Глаголев, Л.Д.** Бронемшины. История броневедомобиля. URL: <http://btr9.narod.ru/index.htm>. Дата доступа 20.02.2016.
9. **Маргиева, Г.И.** Автомобильные шины вчера, сегодня, завтра / Г.И. Маргиева // Международная научно-практическая конференция «Образование. Наука. Производство». Т. 2. Промышленность и транспорт. – 2012. – С. 111–133.
10. URL: <http://ria.ru/spravka/20101117/295093399.html>. Дата доступа 21.02.2016.
11. **Котович, С.В.** Движители специальных транспортных средств. Часть 1 / С.В. Котович. – МАДИ (ГТУ). – М., 2008. – 161 с.
12. Автоматические и интеллектуальные системы транспортных средств / В.В. Беляков [и др.] под общей ред. В.В. Белякова, Л. Палковича. – Нижний Новгород – Будапешт, 2012. – 475 с.
13. Peter Radziszewski, Sudarshan Martins. Particulate Filled Wheel: pat. US20120223497 A1 The Royal Institution For The Advancement Of Learning/Mcgill University. 2012.
14. URL: <http://krossovery.info/bezvozdushnye-shiny-konstrukciya-preimushhestva-nedostatki-ceny/>. Дата доступа 21.02.2016.
15. **Мазур, В.В.** Автомобильная шина из эластичного полиуретана с упругими деформируемыми спицами: пат. 2397877 Российская Федерация. 2010.
16. **Мазур, В.В.** Упругое колесо транспортного средства: пат. 2335409 Российская Федерация. 2010.



17. **Енаев, А.А., Мазур В.В.** Колесо транспортного средства повышенной эластичности: пат. 2180290 Российская Федерация. 2002.
18. **Мазур В.В.** Колесо транспортного средства с упругими спицами: пат. 2336178 Российская Федерация. 2010.
19. **Мазур, В.В., Енаев А.А.** Пресс-форма для изготовления колес из полимерных композиционных материалов: патент на полезную модель 79490 Российская Федерация. 2009.
20. **Киселев А.** Michelin открывает новый завод по производству безвоздушных радиальных шин. URL: <http://auto.premier.ua/news.aspx?newsid=20645>. Дата доступа 02.02.2016.
21. **Беляков, В.В.** Концепция подвижности наземных транспортно-технологических машин / В.В. Беляков, Беляев А.М., Бушуева М.Е., Вахидов У.Ш., Гончаров К.О., Зезюлин Д.В., Колотилин В.Е., Лелиовский К.Я., Макаров В.С., Папунин А.В., Тумасов А.В., Федоренко А.В. // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2013. – № 3 (100). – С. 145–174.
22. **Беляков, В.В.** Подвижность наземных транспортно-технологических машин / В.В. Беляков, Д.В. Зезюлин, В.Е. Колотилин, В.С. Макаров // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2013. – № 4. – С. 72–77.
23. **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. – № 10-2. – С. 270–276.
24. **Вахидов, У.Ш.** Математическое описание дорог типа «stone-road» / У.Ш. Вахидов, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 3. – С. 151.
25. **Вахидов, У.Ш.** Определение характеристик микропрофиля в поймах рек северного кавказа / У.Ш. Вахидов, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Интеллектуальные системы в производстве. – 2011. – № 1. – С. 82–88.
26. **Редкозубов, А.В.** Определение характеристик микропрофиля дорог, предназначенных для движения транспортно-технологических машин / Макаров В.С., Гончаров К.О., Беляков В.В., Зезюлин Д.В., Беляев А.М., Папунин А.В., А.В. Редкозубов // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 5. – С. 113.
27. **Макаров, В.С.** Характер изменения снежного покрова как полотна пути с учетом неравномерности его залегания на местности / В.С. Макаров, А.В. Папунин, Д.В. Зезюлин, В.В. Беляков // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 4. – С. 33.
28. **Гончаров, К.О.** Проведение замеров микропрофиля поверхности движения типа ровное поле / К.О. Гончаров, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Леса России и хозяйство в них. – 2012. – Т. 1-2. – № 42-43. – С. 29–30.
29. **Макаров, В.С.** К вопросу выбора экспериментальных данных для составления статистических моделей снежного покрова как полотна пути для транспортно-технологических машин / В.В. Беляков, Д.В. Зезюлин, В.Е. Колотилин, В.С. Макаров, А.В. Федоренко // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2014. – № 1 (102). – С. 136–141.
30. **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.
31. **Редкозубов, А.В.** О целесообразности моделирования дорог при помощи фрактального исчисления / А.В. Редкозубов, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Леса России и хозяйство в них. – 2012. – Т. 1-2. – № 42-43. – С. 87–88.
32. Полотно пути транспортно-технологических машин (справочные материалы к теории «машина - местность») / В.В. Беляков. [и др.]; под общей редакцией В.В. Белякова и А.А. Куркина. Нижний Новгород, 2014. – 447 с.
33. **Барахтанов, Л. В.** Проходимость автомобиля / Л. В. Барахтанов, В. В. Беляков, В. В. Кравец. – Н. Новгород: НГТУ, 1996. – 200 с.
34. **Куркин, А.А.** Новые тенденции в обследовании цунами / А.А. Куркин, Е.Н. Пелиновский, В.В. Беляков, В.С. Макаров, Д.В. Зезюлин // Экологические системы и приборы. – 2014. – № 12. – С. 40–55.
35. **Папунин, А.В.** О влиянии ландшафта местности на характеристики снежного покрова и на проходимость транспортных средств / А.В. Папунин, В.С. Макаров, Д.В. Зезюлин, В.В. Беляков // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2014. – № 4 (106). – С. 331–335.
36. **Беляков, В.В.** Многокритериальная оптимизация в задачах подвижности, конкурентоспособ-

- ности автотракторной техники и диагностики сложных технических систем / В.В. Беляков, М.Е. Бушуева, В.И.Сагунов. – Н. Новгород, НГТУ, 2001. – 271 с.
37. **Папунин, А.В.** О влиянии характерных участков ландшафта местности подвижность транспортных средств / А.В. Папунин, А.В. Редкозубов, В.В. Беляков // Актуальные вопросы образования и науки сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: в 11 частях. – 2014. – С. 112-113.
  38. **Федоренко, А.В.** Анализ изменения плотности снежного покрова в зимний период / А.В. Федоренко, В.В. Беляков // Актуальные вопросы образования и науки: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: в 11 частях. – 2014. – С. 140–142.
  39. **Беляев, А.М.** Анализ изменения высот снежного покрова в зимний период / А.М. Беляев, В.В. Беляков // Актуальные вопросы образования и науки сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: в 11 частях. 2014. – С. 28–30.
  40. **Гончаров, К.О.** Характер изменения жесткости, связности и угла внутреннего трения снега в зависимости от плотности и продолжительности залегания снежного покрова / К.О. Гончаров, В.В. Беляков // Актуальные вопросы образования и науки: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: в 11 частях. – 2014. – С. 48–50.
  41. **Макаров, В.С.** Анализ данных для составления статистических моделей снежного покрова как полотна пути для транспортных средств / В.С. Макаров, Д.В. Зезюлин, В.В. Беляков // Актуальные вопросы образования и науки: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: в 11 частях. – 2014. – С. 96–97.
  42. **Макаров, В.С.** Обзор исследований по влиянию местности на характеристики снежного покрова / В.С. Макаров, Д.В. Зезюлин, В.В. Беляков // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2014. – № 3 (105). – С. 154–162.
  43. **Папунин, А.В.** О влиянии ландшафта местности на характеристики снежного покрова и на проходимость транспортных средств / А.В. Папунин, В.С. Макаров, Д.В. Зезюлин, В.В. Беляков // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2014. – №4(106). – С. 331–335.
  44. **Редкозубов, А.В.** Математическая модель поверхности движения лесных дорог / А.В. Редкозубов, Д.В. Зезюлин, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2014. – №4(106). – С. 348–352.
  45. **Макаров, В.С.** О влиянии влажности снега на изменение характеристик снежного покрова и на проходимость транспортных средств / В.С. Макаров, Д.В. Зезюлин, В.В. Беляков // Международный журнал экспериментального образования. – 2014. – №8-2. – С. 62.
  46. **Макаров, В.С.** Об изменении характеристик снежного покрова в течение зимы и их влияние на проходимость транспортных средств / В.С. Макаров, Д.В. Зезюлин, В.В. Беляков // Международный журнал экспериментального образования. – 2014. – №8-2. – С. 89–90.
  47. **Макаров, В.С.** Учет особенностей ландшафта при построении характеристик снежного покрова в течение зимы / В.С. Макаров, А.В. Папунин, Д.В. Зезюлин, А.М. Беляев, В.В. Беляков // Перспективы развития науки и образования: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: в 8 частях. – 2013. – С. 87–88.
  48. **Михеев, А.В.** Оценка деформации колеса, оснащенного непневматической шиной при компьютерном моделировании вертикального статического нагружения / А.В. Михеев, В.В. Беляков, В.С. Макаров, Д.В. Зезюлин, З.А. Кострова // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2015. – №2(109). – С. 162–169.
  49. **Зубов, П.П.** Обзор существующих конструкций сочлененных гусеничных машин и рекомендации по выбору их параметров / В.С. Макаров, Д.В. Зезюлин, З.П.П.убов, В.В. Беляков, В.Е.Колотилин, А.А. Куркин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева 2015. – №2(109). – С. 170–176.
  50. **Макаров, В.С.** Методика расчета и оценка проходимости колесных машин при криволинейном движении по снегу: дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.03. – Н. Новгород, 2009.– 161 с.
  51. **Гончаров, К.О.** Оценка влияния экскавационно-бульдозерных эффектов на проходимость многоосных колесных машин при криволинейном движении по снегу: дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.03. – Н. Новгород, 2010. – 259 с.
  52. **Зезюлин, Д. В.** Разработка методики выбора конструкционных параметров движителей, обеспечивающих эффективность движения колесных машин по снегу: дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.03. – Н. Новгород, 2013. – 218 с.

53. **Зезюлин, Д.В.** К вопросу определения эффективности транспортных средств в зимний период / Д.В.Зезюлин, В.В. Беляков // В сборнике: Актуальные вопросы образования и науки сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: в 11 частях. – 2014. – С. 74–75.
54. **Куркин, А.А.** Новые тенденции в обследовании цунами / А.А. Куркин, Е.Н. Пелиновский, В.В. Беляков, В.С.Макаров, Д.В. Зезюлин // Экологические системы и приборы. – 2014. – № 12. – С. 40–55.
55. **Зезюлин, Д.В.** Методика расчета сопротивления качению колеса по снежному полотну пути с учетом неравномерности распределения давлений в зоне контакта / Д.В.Зезюлин, В.С.Макаров, В.В. Беляков // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – №3. – С. 52.
56. **Макаров, В.С.** Оценка эффективности колесных машин в течение зимы с учетом изменчивости характеристик снежного покрова / Макаров В.С., Колотилин В.Е., Беляков В.В., Зезюлин Д.В. // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2014. – № 4 (106). – С. 342–347.
57. **Тесленко, Д.С.** Использование метода конечных элементов для решения задач террамеханики / Д.С. Тесленко, В.В.Беляков, В.С. Макаров, Д.В. Зезюлин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2014. – №5. – С. 52–58.
58. **Беляков, В.В.** Шасси Робототехнического комплекса мониторинга прибрежной зоны / В.В.Беляков, А.А. Куркин, Д.В. Зезюлин, В.С. Макаров // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2014. – №4(106). – С. 353–357.
59. **Папунин, А.В.** Оценка проходимости колесных машин с учетом изменчивости характеристик снежного покрова в течение зимы / А.В.Папунин, В.С.Макаров, В.В. Беляков // В сборнике: Наука и образование в XXI веке сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: в 34 частях. – 2013. – С. 115–116.
60. **Зезюлин, Д.В.** метод повышения эффективности движения колесных машин по снегу путем выбора рациональных параметров движителей / Д.В.Зезюлин, В.С. Макаров, В.В. У.Ш. Беляков, Вахидов // Фундаментальные исследования. – 2013. – №10-6. – С. 1203–1208.

*Дата поступления  
в редакцию 16.05.2016*

**Z.A. Kostrova, A.V. Miheev, D.V. Zeziulin, V.S. Makarov,  
E.V. Kolotilin, M.E. Bushueva, V.V. Belyakov**

## **THE EVOLUTION OF THE WHEEL**

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

This article describes the evolution of the wheel - from the first wooden roller to nowadays developments - non-pneumatic (airless) tires. The aim of researching of evolution of the wheel is systematization of all available information about appearance of the first wheel, the wheel stages of development; consideration of the wheel as a means of technological progress and as a result of the development of society; compilation of conditional classification of all existing types of wheels.

*Key words:* wheel, evolution of the wheel , first car pneumatic wheel , Robert Thompson, J. Dunlop, metallelastic wheels , sprung wheel , airless tire , granulated wheels , radial and bias tires, spherical wheel, custom wheels, wheel rovers, spherical mono - wheel robot, square wheel, wheel ellipsoidal, non-pneumatic ( airless ) tire, wheel classification.

УДК 629.113

**З.А. Кострова, А.В. Михеев, Д.В. Зезюлин, В.С. Макаров,  
В.Е. Колотилин, М.Е. Бушуева, В.В. Беляков**

## **ИСТОРИЧЕСКОЕ ИЗМЕНЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ КОЛЕСА, КАК ОПОРНО-ТЯГОВОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВ ДВИЖИТЕЛЕЙ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ, С ПОЗИЦИИ ПРИМЕНЯЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрено изменение конструкции колеса как системы элементов – от первого деревянного катка до современных разработок химии полимеров – непневматических (безвоздушных) шин, а также изменения каждой составляющей колеса в историческом контексте. Целью исследования является систематизация имеющихся на сегодняшний день сведений о причинах и предпосылках изменений материалов элементов колеса под влиянием изменяющихся требований внешней среды, в зависимости от технического прогресса, а также влияние этих изменений на сам технический прогресс.

*Ключевые слова:* колесо, изменение элементов колеса, дисковое колесо, спицованное колесо, первое автомобильное пневматическое колесо, деревянное колесо, колесная пара, автомобиль на колесной паре, паровая машина Кюньо, Ричард Трэтвик, пневматическая шина, металлическая шина, ступица, диск, беговая дорожка, металлоупругие колеса, пружинящие колеса, Фордсон, гранулированное колесо, гусматики, шина Ламберта, радиальные и диагональные шины, сферическое колесо, магнитная подвеска, колеса марсоходов, колеса луноходов, непневматические (безвоздушные) шины.

Для приведения транспортного средства в движение необходим движитель - устройство, преобразующее энергию двигателя, либо внешнего источника в полезную работу по перемещению транспортного средства. Наиболее известным и распространенным движителем является колесо [1, 60]. На сегодняшний день наиболее распространенным является колесо с пневматической шиной. В общем виде колесо состоит из диска с ободом и шины. Шина, в свою очередь, состоит из каркаса (корда), протектора, беговой дорожки.

Предшественником колеса многие исследователи считают деревянный каток, который подкладывали под перемещаемый груз. Самым ранним «колесом» считается находка в Румынии - её относят к последней четверти V тысячелетия до н. э. (рис. 1) [60]. Колесо было сделано из глины и представляло собой сплошную конструкцию – предположительно, это были колеса детской игрушки. В данном случае все составляющие колеса, о которых говорилось ранее, неразделимы и шина, как таковая, отсутствует. Беговая дорожка также есть неотделимая составляющая колеса. Еще одним вариантом



**Рис. 1. Одни из первых колес  
(V тыс. до н.э.) из глины и камня**

первых колес является каменное колесо – данные колеса вырезали из мягкого камня.

С возникновением и развитием рыночных отношений у человека возникла необходимость перемещения грузов на большие расстояния. Появились первые повозки и первые колеса для повозок делались сплошными, их отрезали от бревен или сшивали из нескольких досок и затем обрезали по кругу (дисковые колеса, рис. 2).



**Рис. 2. Одно из первых колес для повозок в 4 - 1 тысячелетии до н.э.**

Такие колеса быстро приходили в негодность, поэтому уже в III тысячелетия до н. э. беговую дорожку деревянных колес оборачивали в кожу, а к 2000 г. до н. э. стали забивать в обод медные гвозди острием наружу - для лучшего сцепления с землей. Колеса еще сплошные, но уже не вырезанные из цельного ствола, а составные, сколоченные из трех частей. Таким образом, на данном этапе можно говорить о появлении первой безвоздушной (непневматической) шины как защитного элемента дискового колеса. Еще одним недостатком цельного деревянного колеса является его вес и, как решение данной проблемы, во II тысячелетии до н. э. конструкция деревянного колеса совершенствуется: появляется колесо со спицами -

прообразом современного диска, а в дальнейшем, для увеличения прочности конструкции - появляется металлический обод (еще один вариант непневматической шины) (рис. 3) [2].



*а*



*б*

**Рис. 3. Деревянные колеса в 4 - 1 тысячелетии до н.э.:**  
*а* - колесо со спицами; *б* - колесо с металлическим ободом

Работа осуществлялась квалифицированными рабочими - колесниками вручную. Внешнее кольцо «связывало» части колеса вместе, создавая износостойкую поверхность по периметру колеса. Таким образом, подобные шины могли выдерживать очень сильное давление. Тогда и появилось слово «шина», относящееся к металлическим полосам, которые связывали колеса [3].

Чуть позже появились также колеса, состоящие целиком из металла, но в связи со сложностью добычи металла, а также временем, которое требовалось на изготовление такого колеса, более распространенными оставались деревянные колеса. Несмотря на многочисленные изменения в производстве и изготовлении колес, их конструкция к XVIII веку практически не претерпела значительных изменений.

Стоит отдельно сказать о появлении и развитии железнодорожной индустрии – а в контексте данной статьи интересно рассмотрение событий, явлений и проблем, которые привели к появлению современных колесных пар (рис. 4, *а*).

В середине XVI века появился прообраз современной железной дороги – это были деревянные лежни – для доставки грузов из рудников, в движение повозку приводили лошади. Уже на тот момент такая система могла перевезти груза в четыре раза больше, чем по обычной дороге. Тележка и колеса были деревянными (рис. 4, *б*).

В 1705 году Томас Ньюкомен изобретает первую паровую машину, которая была усо-



вершенствована Джеймсом Уаттом и в 1784 году им был получен патент №1432 на универсальный по применению паровой двигатель. Также в XVIII веке появляется первая чугунная колеяная дорога, в 1803 году Ричардом Третвиком был сконструирован первый паровоз (рис. 4, в) – колесная пара уже металлическая, колеса спицованные, в 1825 Джорджем Стефансоном была создана первая железная дорога общественного пользования.

Все эти открытия и изобретения послужили основой для создания современных колесных пар. На рис. 4, г приведен пример колесной пары поезда (спицованной). На рис. 4, д пример трамвайной колесной пары, колеса уже дисковые, цельнолитые. Колесная пара состоит из оси и двух укрепленных на ней колес.

Компания Mercedes в сотрудничестве с британской фирмой Interfleet, специализирующейся на железнодорожных системах, переоборудовала небольшой автомобиль Smart Forfour в машину для езды по рельсам. Специалисты установили на месте стандартных легкосплавных дисков и покрышек цельнометаллические колёса.



**Рис. 4. Эволюция колесной пары:**

*а* – современная колесная пара (XXI в.); *б* – прообраз современной железной дороги (XVI в.); *в* – паровоз Ричарда Третвика (1803 г.); *г* – колесная пара современного поезда (XXI в.); *д* – трамвайная колесная пара (XXI в.); *е* – автомобиль Smart Forfour (2015 г.)

Условия работы элементов колесной пары существенно отличаются друг от друга, поэтому для каждого элемента выбирают материал, более всего удовлетворяющий условиям работы. Также, в зависимости от конструкции колесного центра их классифицируют на спицевые, дисковые и цельнокатные. Например, для вагонов электропоездов применяют колесные пары с литыми спицевыми центрами, а для прицепных вагонов – со стальными цельнокатными колесами, изготовленными из Ст1. Оси работают при высоких знакопеременных нагрузках, поэтому их изготавливают из специальной мартеновской стали, обладающей повышенными механическими свойствами. Изнашиваемую часть колеса делают сменной в виде бандажа. Материал бандажа должен быть достаточно твердым, чтобы сопротивляться износу и смятию, и в то же время достаточно вязким, чтобы сопротивляться ударным усилиям. Бандажи изготавливают прокаткой на специальных станках из углеродистой мартеновской стали.



Рис. 5. Паровая машина Кюньо (1768 г.)

С появлением первых самодвижущихся систем (в литературе первое упоминание об автомобиле датируется 1768 годом – речь идет о паровой машине Кюньо, представленной на рис. 5: колеса деревянные, спицованные, с металлическим ободом), а также с появлением и исследованием свойств каучука, привезенного из Америки, колеса начали обтягивать массивными каучуковыми бандажами – на этом этапе эволюции колеса можно говорить о появлении первой непневматической резиновой шины. В то время они назывались грузолентами.

Самым главным достоинством таких шин, по сравнению с существовавшими до этого «металлическими шинами», являлись упругость, амортизирующие свойства и увеличение плавности хода транспортного средства.

Дальнейшее развитие колеса связано с изобретением в 1846 году Робертом Томпсоном первой пневматической шины (рис. 6).

Камера изготавливалась из нескольких слоев обычной парусины, пропитанной и покрытой каучуком или раствором гуттаперчи. Наружное покрытие шины делалось из кожи и крепилось с помощью заклепок. Колесо имело металлические спицы и металлический обод. Массовое применение и развитие пневматические шины получили не сразу, а спустя много лет.



Рис. 6. Первая пневматическая шина, (1846 г.)

В 1890 году Чальд Кингстон Уэлтчем отделил камеры от покрышки и для увеличения прочности и упругости шины предложил вставлять в ее края проволочные кольца и сажать их на обод, с углублением к центру – здесь можно говорить о выделении корда как составляющей современного колеса.

В это же время (1865 год) появились первые металлоупругие колеса [4]. Их отличительной особенностью являлось наличие металлических упругих элементов, которые повышали плавность хода автомобиля (рис. 7, а). Вместо эластичной каучуковой покрышки ставили пружины со стальными грунтозацепами – фактически спицы были заменены металлическими пружинами. В период первой мировой войны промышленность не успевала в полном объеме обеспечить покрышками все армейские автомобили. Именно тогда Германия достаточно активно использовали так называемые пружинные колеса.

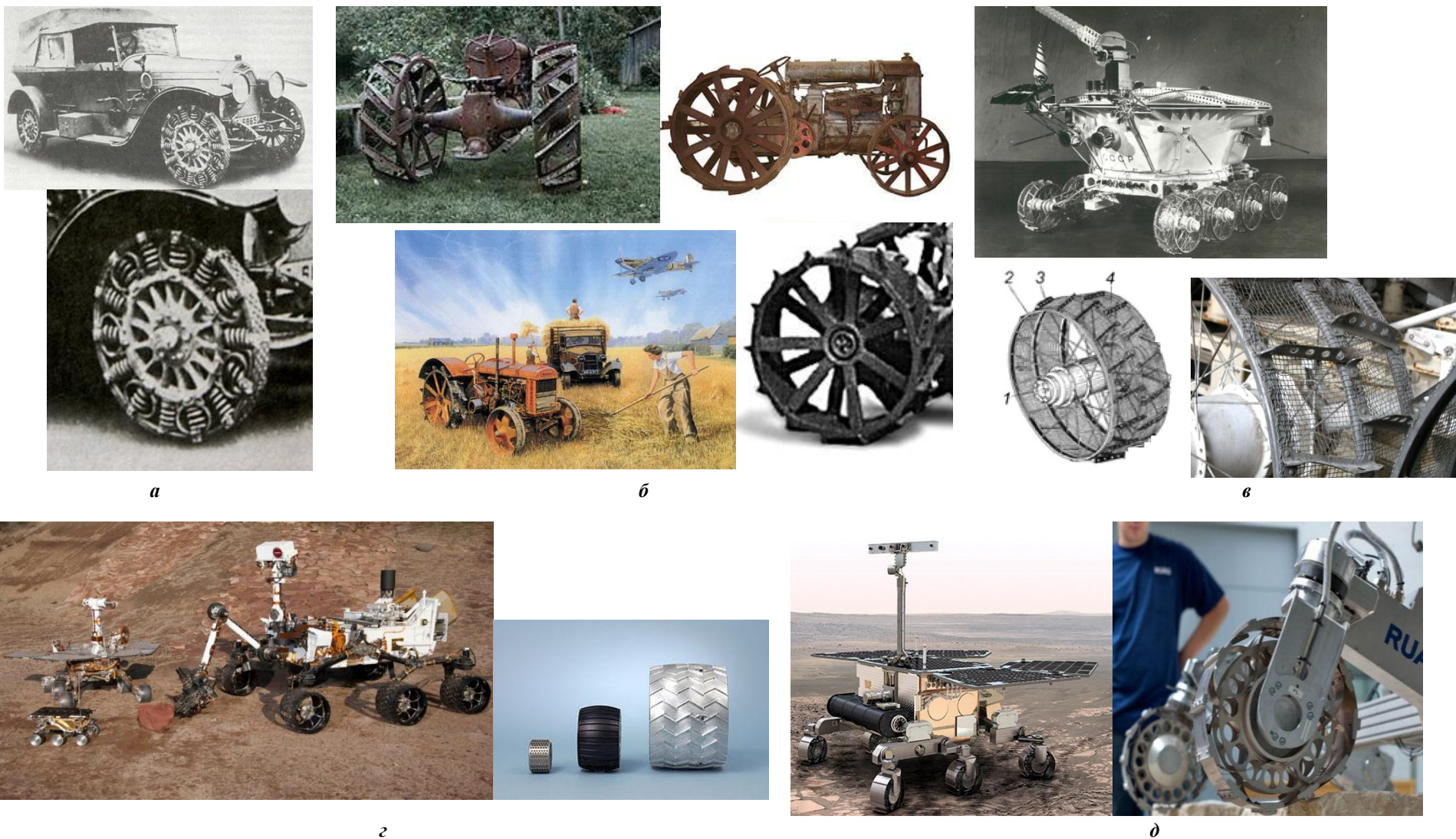
Решением ряда задач сельскохозяйственной отрасли США в 1907 году стал предложенный конструкторами Генри Форда первый опытный образец трактора с двигателем внутреннего сгорания Fordson. Почти все тракторы на тот момент имели маломощные двигатели и были неэкономичны в эксплуатации. Это был первый в мире безрамный трактор. Его схема до сих пор применяется в колесных тракторах – картер двигателя составляет единое целое с шасси; еще одним достоинством такого трактора являлась простота конструкции и малая металлоемкость. В 1924 году СССР заключил контракт с компанией Fordson и на заводе «Красный Путиловец» началось производство тракторов «Фордзон» (рис. 7, б). На рисунке подробно представлена конструкция колес – они полностью состоят из металла, имеют крупные грунтозацепы, два задние колеса увеличенные – ведущие, два передние – направляющие, конструкция колес спицованная. В период перед второй мировой войной были попытки сделать из этих тракторов бронетехнику [5].

В начале XX века, с развитием техники и технологий, с началом исследования и освоения космоса, возникает потребность эксплуатации колесных движителей в новых нестандартных условиях. В 1965 году ОАО «ВНИИТрансмаш» разработали ряд вариантов металлоупругих колес для луноходов. На рис. 7, в – луноход-1 и колесо лунохода: внешняя поверхность колеса сделана из упругой сетки, однако под сеткой размещены ленточные пружины, которые работают, когда при ударах сетка проминается. На схеме устройства колеса лунохода: обод 2 колеса лунохода образован тремя титановыми кольцами, соединенными между собой титановыми грунтозацепами 3. Крайние обручи имеют несколько меньший диаметр, чем средний. Каждый обод соединен стальными спицами с алюминиевой ступицей 1. Наружная поверхность обручей обшита стальной сеткой 4. На этом же рисунке более подробно представлены грунтозацепы колеса луноход-1.

На рис. 7, г - марсоходы космического агентства НАСА - Spirit (2003 год), Opportunity (2004 год) и Curiosity (2011 год). Марсоходы имеют по шесть колес с грунтозацепами, каждое из колес выполнено из алюминиевого сплава, и закреплены на титановых спицах; каждое колесо имеет каркасный протектор и три обода – два тонких по краям и один толстый, к которому крепятся спицы. По форме колеса напоминают конус. Также на этом рисунке представлены колеса указанных марсоходов в сравнении. Колеса марсохода Curiosity имеют внешние повреждения, полученные за почти три года работы. Данная проблема связана с недостаточным запасом прочности колесного полотна (толщина колесного полотна всего 0,75 мм).

На рис. 7, д еще один пример металлоупругого колеса марсохода миссии Экзомарс 2018. Аппарат обладает шестью колесами, каждая колесная пара подвешена на независимой поворотной вагонетке, каждое колесо может независимо вращаться. Колеса сделаны из сплава алюминия и специальных сталей цилиндры, состоят из сегментов, внутри которых находятся демпфирующие ленты. При попадании на вязкую поверхность колесо не уходит под песок, а просто выталкивается за счет сжатия внутренних сегментов.





**Рис. 7. Металлоупругие колеса:** *а* – металлоупругие пружинящие колеса (1865 г.); *б* – первые трактора Фордзон (1924 г.); *в* – луноход-1 и колесо для лунохода из упругой сетки (1970 г.); *г* - марсоходы НАСА (2003 – 2011 гг.); *д* – марсоход и колеса марсохода миссии Экзомарс – 2018 (2016 г.)

Одной из современных разработок колес для внеземных исследований является гранулированное колесо - 6 сентября 2012 года был опубликован патент US20120223497 A1 [6] - разработка ученых из канадского университета Макгилла. Колесо состоит из ступицы, гибкой ткани шины и наполнителя - металлических частиц. Ткань шины может быть выбрана из широкого диапазона материалов - хлопок, искусственные материалы (полиэфир), металлы (рис. 8). Достоинством такой конструкции: колеса, наполненные мелкими твердыми гранулами, легко обтекают любые возникающие на пути объекты, что приводит к увеличению площади пятна контакта и улучшению тягового усилия, бокового сопротивления; гранулированные колеса проходят по местности любого рельефа, форсируют даже объекты, чьи габариты превосходят размеры самих шин; увеличивают сопротивление качению, что снижает вибрацию корпуса; способны работать в условиях сверхнизких температур (внеземные поверхности)

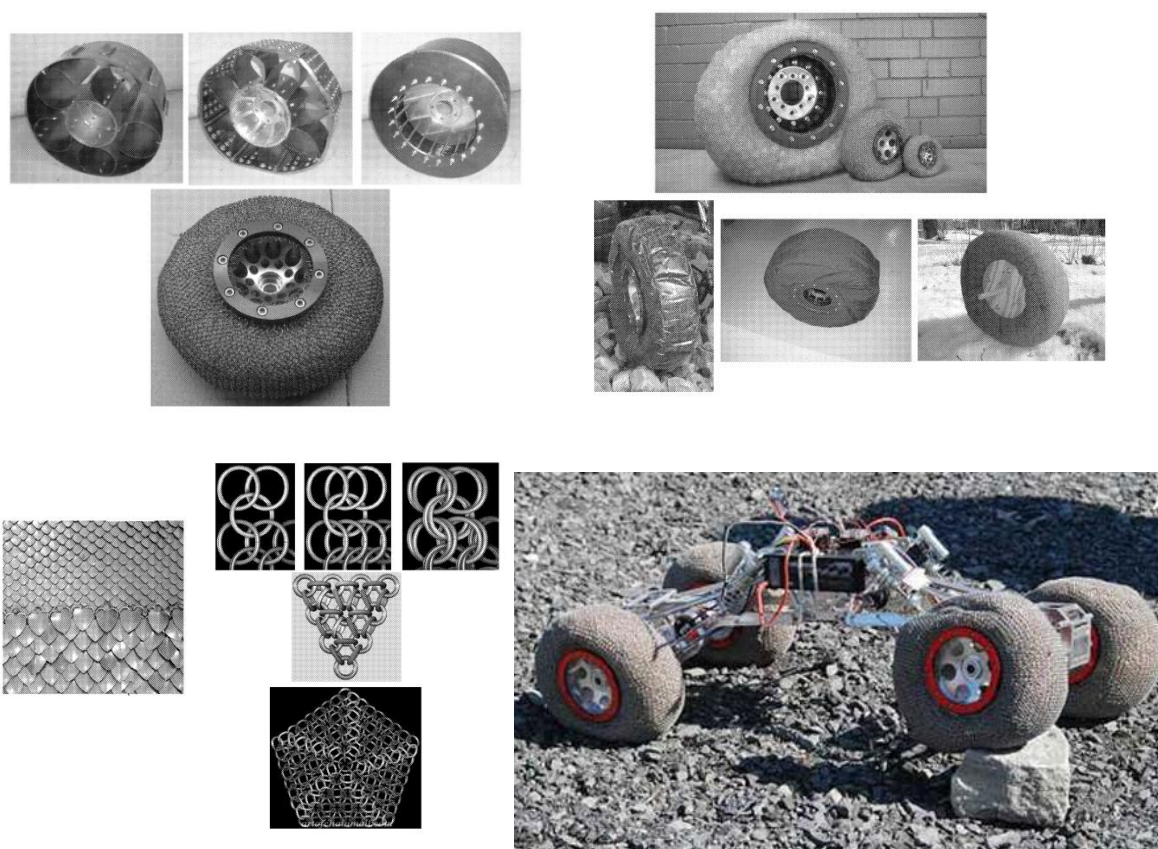


Рис. 8. Гранулированные колеса (2012 г.)

Во время первой мировой войны возникла проблема выхода из строя бронетехники и невозможности ведения боя в связи с проколом шины. Решением данной проблемы на тот момент стало открытием А. Гуссом смеси, состоящей из глицерина и желатина. Колеса представляли собой резиновую оболочку, внутренний объем которой заполнен эластичной массой – гусматическим составом (рис. 9, а). После войны такие шины не нашли широкого распространения, так как данные шины проигрывают пневматическим шинам по своим демпфирующим свойствам, специфика монтажа требует квалифицированной помощи специалистов и их невозможно эксплуатировать на высоких скоростях. Колесо имело спицованную металлическую структуру, но также гусматика «натягивались» и на дисковые колеса.

Одним из вариантов гусматиков являются шины Ламберта – система запатентована в 1920 году – непневматическая шина в которой, для снижения жесткости каучука были просверлены отверстия (рис. 9, б). Производство было открыто в 1920 году (рис. 9, в), но закры-



лось в 1925 году. Причина была в следующем: резина после высверливания в достаточном для мягкости хода количестве не имела достаточной прочности, и напротив - если отверстия сверлить в рассуждении сохранения прочности шины - то не достигалось необходимых амортизирующих свойств [7]. До наших дней сохранилось несколько экземпляров шин Ламберта (рис. 9, з).



а



б



в



г



д



е

**Рис. 9. Непневматические (безвоздушные) шины:**

а - броневедомобиль «Фиаг-Омский» на шинах типа «гусмагик» (1917-1923 гг.); б – шины Ламберта (1920 г.); в – шины Ламберта на витрине магазина (1924 г.); г – шины Ламберта, сохранившиеся до наших дней; д - шины Michelin Tweel (2004 г.); е - шины Polaris (2012 г.)

В 2005 году компанией Мишлен [8] международному рынку были предложены автомобильные шины с упругими деформируемыми спицами из полиуретана (рис. 9, д). Конку-

рентом для Michelin стала компания Polaris: спицы заменили на систему сот (рис. 9, *е*) и применили композиционные материалы собственной разработки. «Спицевые» шины состоят из жёсткой ступицы, соединенной с протектором посредством гибких деформируемых спиц из полиуретана. Корейская фирма Hankook создали безвоздушные шины I-Flex, 95% которой – это переработанная резины пневматических шин, вышедших из употребления. Оставшиеся 5% состава являются собственной разработкой фирмы Hankook.

Подобные шины имеют как преимущества, так и недостатки. К основным преимуществам можно отнести устойчивость к механическим повреждениям и возможность функционирования транспортного средства (ТС) с 30% повреждений, меньшая масса шины, как следствие, уменьшение массы ТС в целом, высокая боковая жесткость, меньшее сопротивление качению, сокращение количества основных производственных операций (как следствие, снижение энергозатрат и выбросов в окружающую среду), возможность работы на пересеченной местности. К основным недостаткам можно отнести сильные вибрации на больших скоростях, существование скоростных ограничений ТС, необходимость специального оборудования для установки и обслуживания данных шин. Одной из проблем рассмотренных шин является невозможность регулирования жесткости конструкции – решением может быть подведение к ним электрического тока и применения электрозависимых по жесткости полимерных материалов.

Все колеса, показанные на рис. 9, имеют непневматические шины, полимерную беговую дорожку, спицованную структуру. Однако гусматики имеют цельнолитую структуру, тогда как остальные – ячеистую и спицованную структуры.

Сегодня существует ряд разработок, дающих возможность движения транспортного средства в любом направлении (шесть степеней свободы), без выполнения разворота.

Данная задача может быть решена с помощью сферического колеса. Сегодня существует ряд разработок сферических колес. Например, концепт-кар фирмы Audi RSQ (рис. 10, *а*). Данная модель была разработана компанией Audi специально для фильма «Я, робот». Автомобиль был представлен в 2004 году на выставке «Автошоу» в Нью-Йорке. Колеса скрыты внутри крыльев автомобиля, а принцип работы таких колес представлен на рис. 10, *б* – из конструктора Лего был собран аналог автомобиля Audi RSQ.

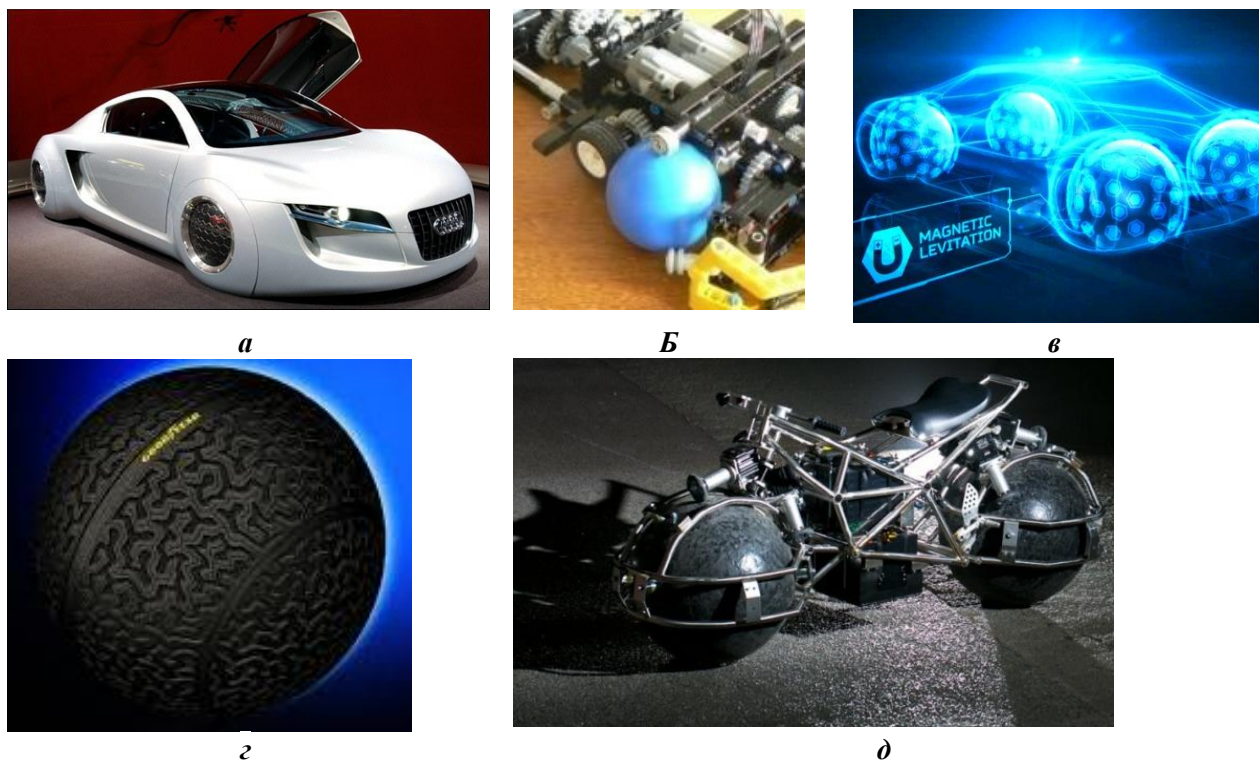
Компания Goodyear представила концепт сферических колес Eagle-360 (рис. 10, *в*). В конструкции используется бесконтактная подвеска, использующая эффект магнитной левитации. Сенсоры, расположенные внутри Eagle-360, будут отслеживать такие внешние параметры как состояние дороги, степень износа шин (в случае сильного износа машина автоматически изменит ориентацию колес, что позволит увеличить пробег), погодные условия; данная информация передается на центральный процессор, который осуществляет контроль за давлением воздуха в шинах, скоростью и направлением вращения колес. По задумке дизайнеров и инженеров компании, колеса можно будет распечатать на 3D принтере.

За основу рисунка протектора (рис. 10, *г*) взята поверхность коралла семейства Favedae, который действует как «губка» (специальный материал «губки» поглощает воду и выбрасывает ее впоследствии в результате действия центробежной силы, что поможет избежать эффекта аквапланирования), обеспечивающая максимальное сцепление с дорогой при любых условиях [9, 10]. Однако на сегодняшний день такие колеса существуют только в виде концепта.

Группа студентов из государственного университета Сан-Хосе создала электрический мотоцикл на сферических колесах (две массивные сферы заключены в своеобразный каркас из труб), состоящих из углеродистого стекловолокна и фибerglassa (рис. 10, *д*). За счет применения этих материалов колеса не являются тяжелыми. Система получила название Spherical Drive System. За основу была взята система электрического самобалансирующегося транспортного средства Segway (основан на работе системы гироскопов). Сферы приводятся в движение фрикционным механизмом, на который подаётся усилие от трех роторов со сме-

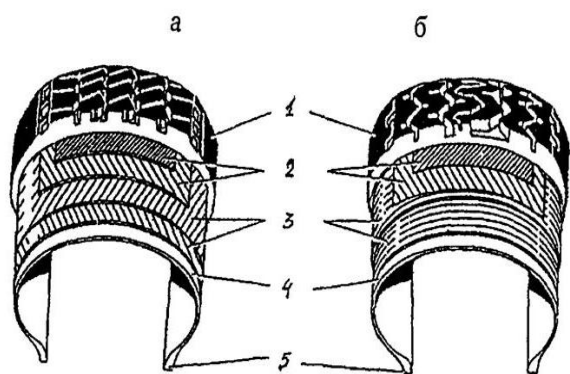


щенным центром тяжести. На сегодняшний день инженеры работают над усовершенствованием программного обеспечения.



**Рис. 10. Сферические колеса:**

*а* – концепт-автомобиль Audi со сферическими колесами (2004 г.);  
*б* - аналог концепт - автомобиля Audi из конструктора Lego; *в* – концепт сферических колес Eagle-360, 2016 г.; *г* – покрышка концепт сферических колес Eagle-360, 2016 г.;  
*д* – мотоцикл на сферических колесах, 2012 г.



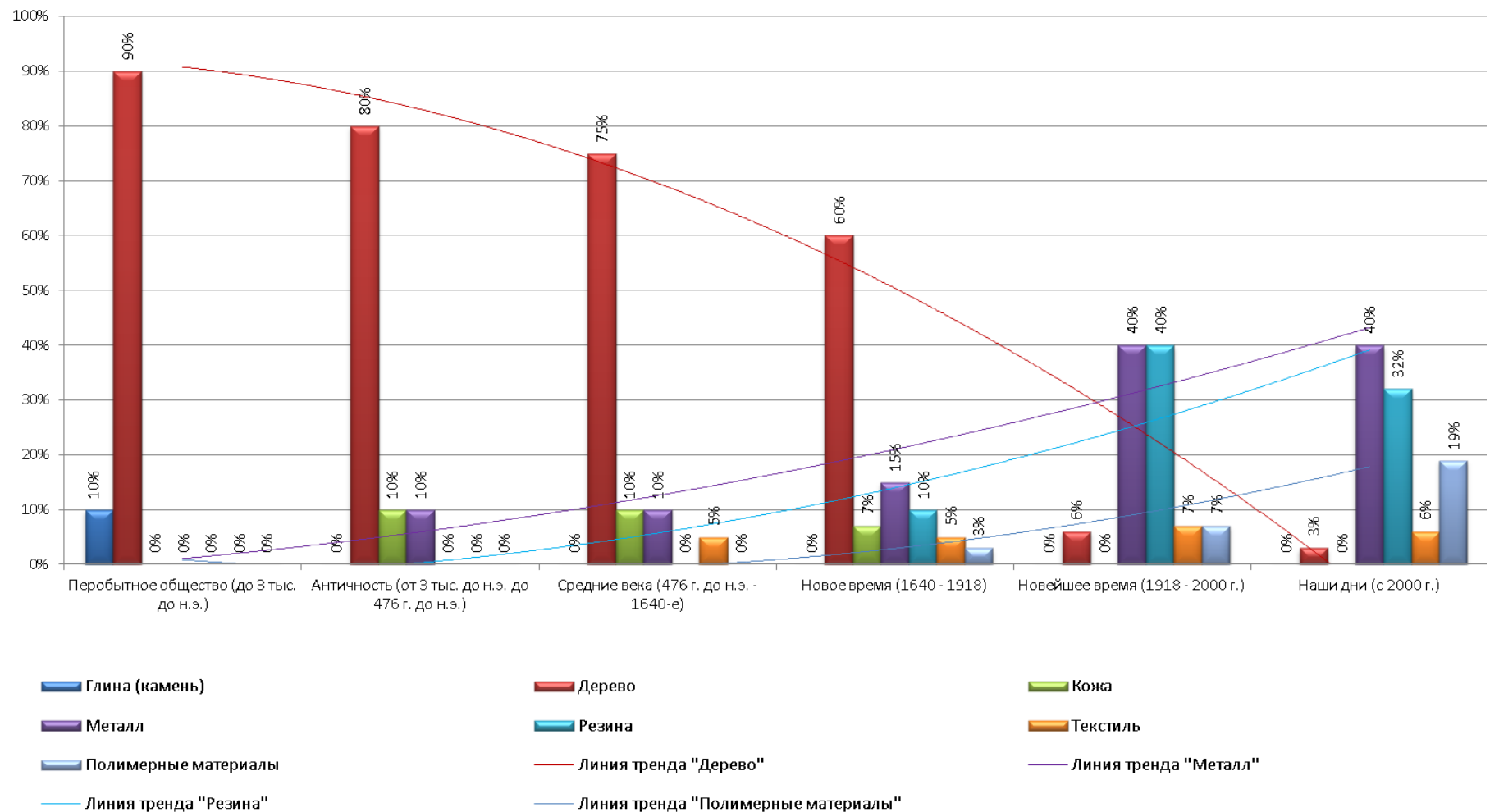
**Рис. 11. Покрышки диагональной (а) и радиальной (б) конструкции**

каркаса; 5 – борт. Наибольшее распространение сегодня имеют шины радиальной конструкции. На основании вышеприведенного описания типов колес и шин, их характеристик и составляющих можно предложить график изменения материалов колеса (рис. 12) – от первых глиняных и деревянных колес до современных колес космических аппаратов

Полученные данные могут быть использованы при проектировании математической модели непневматической шины по методикам, представленным в работах [12-63].

Переход к современным шинам начался с 1920–30-х годов, после усовершенствования технологии производства шин и появления искусственного каучука, в шинах появился корд - особо прочный слой из упругих текстильных нитей. В середине 50-х годов появилась новая разработка в конструкции шин: был создан жесткий пояс, состоящий из слоев металлокорда. Нити корда располагались радиально от борта до борта. Такие шины получили название радиальных (рис. 11).

У диагональных шин нити корда расположены диагонально. [11] На рис. 11: 1 – протектор и беговая дорожка; 2 – слой брекера; 3 – слой каркаса; 4 – резиновая прослойка



**Рис. 12. Изменения материалов колеса от первобытного общества до наших дней**

## Библиографический список

1. **Михеев, А.В.** Оценка деформации колеса, оснащенного непневматической шиной при компьютерном моделировании вертикального статического нагружения / А.В. Михеев [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2015. – №2 (109). – С. 162–169.
2. **Добровольский, А.В.** Универсальная научно-популярная онлайн-энциклопедия. URL: [http://www.krugosvet.ru/enc/nauka\\_i\\_tehnika/tehnologiya\\_i\\_promyshlennost/koleso.html](http://www.krugosvet.ru/enc/nauka_i_tehnika/tehnologiya_i_promyshlennost/koleso.html). Дата доступа 28.03.2016.
3. История создания автомобильных шин. URL: <http://auto-history.jimdo.com>. Дата доступа 20.03.2016.
4. **Мазур, В.В.** Способы повышения живучести и безопасности автомобильных шин // Системы. Методы. Технологии. – 2009. – №1. – С. 41–45.
5. Бр – трактор Фордзон. URL: [http://vsetanki.com/tank\\_info/128/](http://vsetanki.com/tank_info/128/). Дата доступа 05.04.2016.
6. **Peter Radziszewski, Sudarshan Martins.** Particulate Filled Wheel: pat. US20120223497 A1 The Royal Institution For The Advancement Of Learning/McGill University. 2012.
7. Непневматическая эластичная шина из 1920 года. URL: <http://strangernn.livejournal.com/1028345.html>. Дата доступа 25.03.2016.
8. Безвоздушные шины: конструкция, преимущества, недостатки, цены. URL: <http://krossovery.info/bezvozdushnye-shiny-konstrukciya-preimushhestva-nedostatki-ceny/>. Дата доступа 21.02.2016.
9. Сферические колеса на магнитной подвеске обеспечат маневренностью автомобиля – роботы будущих поколений. URL: <http://www.dailytechinfo.org/auto/7929-sfericheskie-kolesa-na-magnitnoy-podveske-obespechat-manevrennostyu-avtomobili-roboty-buduschih-pokoleniy.html/>. Дата доступа 21.03.2016.
10. **Еникеев, А.** Goodyear представила концепт сферических колес для беспилотных автомобилей. URL: <https://nplus1.ru/news/2016/03/03/sphericaltires>. Дата доступа 02.04.2016.
11. **Маргиева, Г.И.** Автомобильные шины вчера, сегодня, завтра // Международная научно-практическая конференция «Образование. Наука. Производство». – Т. 2. Промышленность и транспорт. – 2012. – С. 111–133.
12. **Беляков, В.В.** Статистическая модель выбора геометрических параметров, массо-инерционных, мощностных и скоростных характеристик многоосных колесных транспортно-технологических машин / В.В. Беляков [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2015. – №4(111). – С. 136–147.
13. **Мазур, В.В.** Автомобильная шина из эластичного полиуретана с упругими деформируемыми спицами: пат. 2397877 Российская Федерация. 2010.
14. **Мазур, В.В.** Упругое колесо транспортного средства: пат. 2335409 Российская Федерация. 2010.
15. **Енаев, А.А., Мазур В.В.** Колесо транспортного средства повышенной эластичности: пат. 2180290 Российская Федерация. 2002.
16. **Мазур, В.В.** Колесо транспортного средства с упругими спицами: пат. 2336178 Российская Федерация. 2010.
17. **Мазур, В.В., Енаев А.А.** Пресс-форма для изготовления колес из полимерных композиционных материалов: патент на полезную модель 79490 Российская Федерация. 2009.
18. **Киселев, А.** Michelin открывает новый завод по производству безвоздушных радиальных шин. URL: <http://auto.premier.ua/news.aspx?newsid=20645>. Дата доступа 02.02.2016.
19. **Беляков, В.В.** Концепция подвижности наземных транспортно-технологических машин / Беляков В.В., Беляев А.М., Бушуева М.Е., Вахидов У.Ш., Гончаров К.О., Зезюлин Д.В., Колотилин В.Е., Лелиовский К.Я., Макаров В.С., Папунин А.В., Тумасов А.В., Федоренко А.В. // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2013. – № 3 (100). – С. 145–174.
20. **Беляков, В.В.** Подвижность наземных транспортно-технологических машин / Беляков В.В., Зезюлин Д.В., Колотилин В.Е., Макаров В.С. // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2013. – № 4. – С. 72–77.
21. **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. – № 10-2. – С. 270–276.

22. **Вахидов, У.Ш.** Математическое описание дорог типа «stone-road» / У.Ш. Вахидов, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 3. – С. 151.
23. **Вахидов, У.Ш.** Определение характеристик микропрофиля в поймах рек Северного Кавказа / У.Ш. Вахидов, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Интеллектуальные системы в производстве. – 2011. – № 1. – С. 82–88.
24. **Редкозубов, А.В.** Определение характеристик микропрофиля дорог, предназначенных для движения транспортно-технологических машин / Макаров В.С., Гончаров К.О., Беляков В.В., Зезюлин Д.В., Беляев А.М., Папунин А.В., Редкозубов А.В. // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 5. – С. 113.
25. **Макаров, В.С.** Характер изменения снежного покрова как полотна пути с учетом неравномерности его залегания на местности / Макаров В.С., Папунин А.В., Зезюлин Д.В., Беляков В.В. // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 4. – С. 33.
26. **Гончаров, К.О.** Проведение замеров микропрофиля поверхности движения типа ровное поле. К.О. Гончаров, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Леса России и хозяйство в них. – 2012. – Т. 1-2. – № 42-43. – С. 29–30.
27. **Макаров, В.С.** К вопросу выбора экспериментальных данных для составления статистических моделей снежного покрова как полотна пути для транспортно-технологических машин / Беляков В.В., Зезюлин Д.В., Колотилин В.Е., Макаров В.С., Федоренко А.В. // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2014. № 1 (102). С. 136–141.
28. **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.
29. **Редкозубов, А.В.** О целесообразности моделирования дорог при помощи фрактального исчисления / А.В. Редкозубов, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Леса России и хозяйство в них. – 2012. – Т. 1-2. – № 42-43. – С. 87–88.
30. Полотно пути транспортно-технологических машин (справочные материалы к теории «машина - местность») / В.В. Беляков [и др.]; под общ. ред. В.В. Белякова и А.А. Куркина. – Нижний Новгород, 2014. – 447 с.
31. **Баракханов, Л. В.** Проходимость автомобиля / Л. В. Баракханов, В. В. Беляков, В.В. Кравец. – Н. Новгород: НГТУ, 1996. – 200 с.
32. **Куркин, А.А.** Новые тенденции в обследовании цунами / А.А. Куркин, Е.Н. Пелиновский, В.В.Беляков, В.С. Макаров, Д.В. Зезюлин // Экологические системы и приборы. – 2014. – № 12. – С. 40–55.
33. **Папунин А.В., Макаров В.С., Зезюлин Д.В., Беляков В.В.** О влиянии ландшафта местности на характеристики снежного покрова и на проходимость транспортных средств. Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2014. № 4 (106). С. 331-335.
34. **Беляков, В.В.** Многокритериальная оптимизация в задачах подвижности, конкурентоспособности автотракторной техники и диагностики сложных технических систем / В.В. Беляков, М.Е. Бушуева, В.И. Сагунов. – Н.Новгород, НГТУ, 2001. – 271 с.
35. **Папунин, А.В.** О влиянии характерных участков ландшафта местности подвижность транспортных средств / Папунин А.В., Редкозубов А.В., Беляков В.В. // Актуальные вопросы образования и науки: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: в 11 частях. 2014. – С. 112-113.
36. **Федоренко, А.В.** Анализ изменения плотности снежного покрова в зимний период / Федоренко А.В., Беляков В.В. // Актуальные вопросы образования и науки: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: в 11 частях. 2014. С. 140-142.
37. **Беляев, А.М.** Анализ изменения высот снежного покрова в зимний период / Беляев А.М., Беляков В.В. // В сборнике: Актуальные вопросы образования и науки сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: в 11 частях. – 2014. – С. 28-30.
38. **Гончаров, К.О.** Характер изменения жесткости, связности и угла внутреннего трения снега в зависимости от плотности и продолжительности залегания снежного покрова / Гончаров К.О., Беляков В.В. // Актуальные вопросы образования и науки сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: в 11 частях. – 2014. – С. 48–50.
39. **Макаров, В.С.** Анализ данных для составления статистических моделей снежного покрова



- как полотна пути для транспортных средств / Макаров В.С., Зезюлин Д.В., Беляков В.В. // Актуальные вопросы образования и науки: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: в 11 частях. – 2014. – С. 96–97.
40. **Макаров, В.С.** Обзор исследований по влиянию местности на характеристики снежного покрова / В.С.Макаров, Д.В. Зезюлин, В.В. Беляков // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2014. – № 3 (105). – С. 154–162.
  41. **Папунин, А.В.** О влиянии ландшафта местности на характеристики снежного покрова и на проходимость транспортных средств / Папунин А.В., Макаров В.С., Зезюлин Д.В., Беляков В.В. // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2014. №4(106). – С. 331–335.
  42. **Редкозубов, А.В.** Математическая модель поверхности движения лесных дорог / Редкозубов А.В., Зезюлин Д.В., Макаров В.С., Беляков В.В. // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2014. – №4(106). – С. 348–352.
  43. **Макаров, В.С.** О влиянии влажности снега на изменение характеристик снежного покрова и на проходимость транспортных средств / В.С. Макаров, Д.В. Зезюлин, В.В. Беляков // Международный журнал экспериментального образования. – 2014. – №8-2. – С. 62.
  44. **Макаров, В.С.** Об изменении характеристик снежного покрова в течение зимы и их влияние на проходимость транспортных средств / В.С. Макаров, Д.В. Зезюлин, В.В. Беляков // Международный журнал экспериментального образования. – 2014. – №8-2. – С. 89-90.
  45. **Макаров, В.С.** Учет особенностей ландшафта при построении характеристик снежного покрова в течение зимы / Макаров В.С., Папунин А.В., Зезюлин Д.В., Беляев А.М., Беляков В.В. // Перспективы развития науки и образования: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: в 8 частях. – 2013. – С. 87–88.
  46. **Михеев, А.В.** Оценка деформации колеса, оснащенного непневматической шиной при компьютерном моделировании вертикального статического нагружения / Михеев А.В., Беляков В.В., Макаров В.С., Зезюлин Д.В., Кострова З.А. // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2015. – №2(109). – С. 162–169.
  47. **Зубов, П.П.** Обзор существующих конструкций сочлененных гусеничных машин и рекомендации по выбору их параметров / Макаров В.С., Зезюлин Д.В., Зубов П.П., Беляков В.В., Колотилин В.Е., Куркин А.А. // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева 2015. – №2(109). – С. 170–176.
  48. **Макаров, В.С.** Методика расчета и оценка проходимости колесных машин при криволинейном движении по снегу: дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.03. – Н. Новгород, 2009. – 161 с.
  49. **Гончаров, К.О.** Оценка влияния экскавационно-бульдозерных эффектов на проходимость многоосных колесных машин при криволинейном движении по снегу: дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.03. – Н. Новгород, 2010. – 259 с.
  50. **Зезюлин, Д. В.** Разработка методики выбора конструкционных параметров движителей, обеспечивающих эффективность движения колесных машин по снегу: дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.03. – Н. Новгород, 2013. – 218 с.
  51. **Зезюлин, Д.В.** К вопросу определения эффективности транспортных средств в зимний период / Д.В. Зезюлин, В.В. Беляков // Актуальные вопросы образования и науки сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: в 11 частях. – 2014. – С. 74–75.
  52. **Куркин, А.А.** Новые тенденции в обследовании цунами / Куркин А.А., Пелиновский Е.Н., Беляков В.В., Макаров В.С., Зезюлин Д.В. // Экологические системы и приборы. – 2014. – № 12. – С. 40–55.
  53. **Зезюлин, Д.В.** Методика расчета сопротивления качению колеса по снежному полотну пути с учетом неравномерности распределения давлений в зоне контакта / Д.В. Зезюлин, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – №3. – С. 52.
  54. **Макаров, В.С.** Оценка эффективности колесных машин в течение зимы с учетом изменчивости характеристик снежного покрова / Макаров В.С., Колотилин В.Е., Беляков В.В., Зезюлин Д.В. // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2014. – № 4 (106). – С. 342–347.
  55. **Тесленко, Д.С.** Использование метода конечных элементов для решения задач террамеханики / Тесленко Д.С., Беляков В.В., Макаров В.С., Зезюлин Д.В. // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2014. – №5. – С. 52-58.
  56. **Беляков, В.В.** Шасси робототехнического комплекса мониторинга прибрежной зоны / Беляков В.В., Куркин А.А., Зезюлин Д.В., Макаров В.С. // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2014. №4(106). С. – 353–357.

57. **Папунин, А.В.** Оценка проходимости колесных машин с учетом изменчивости характеристик снежного покрова в течение зимы / Папунин А.В., Макаров В.С., Беляков В.В. // Наука и образование в XXI веке: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: в 34 частях. – 2013. – С. 115–116.
58. **Зезюлин, Д.В.** Метод повышения эффективности движения колесных машин по снегу путем выбора рациональных параметров движителей / Зезюлин Д.В., Макаров В.С., Беляков В.В., Вахидов У.Ш. // Фундаментальные исследования. 2013. №10-6. – С. 1203–1208.
59. **Колотилин, В.Е.** Статистическая модель выбора геометрических параметров, массово – инерционных и мощностных характеристик транспортно – технологических машин на роторно – винтовых движителях. / Колотилин В.Е., Михеев А.В., Береснев П.О., Беляев А.М., Папунин А.В., Макаров В.С., Зезюлин Д.В., Беляков В.В., Куркин А.А. // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2015. – №3(110). – С. 156–208.
60. **Новоженков, В.А.** Чудо коммуникаций и древнейший колесный транспорт Евразии / В.А. Новоженков; под ред. Е. Е. Кузьминой. – М.: Таус, 2012. – 500 с.
61. **Береснев, П.О.** Статистическая модель выбора геометрических параметров, массогабаритных, мощностных и скоростных характеристик гусеничных транспортно-технологических машин / Береснев П.О., Филатов В.И., Еремин А.А., Беляев А.М., Папунин А.В., Макаров В.С., Зезюлин Д.В., Колотилин В.Е., Беляков В.В., Куркин А.А. // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2016. – №1(112). – С. 109–164.
62. **Клубничкин, В.Е.** Моделирование движения гусеничных машин по лесным дорогам / Клубничкин В.Е., Клубничкин Е.Е., Макаров В.С., Зезюлин Д.В., Редкозубов А.В., Беляков В.В. // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2016. – №1(112). – С. 171–176.
63. **Береснев, П.О.** Статистическая модель выбора геометрических параметров, массоинерционных, мощностных и скоростных характеристик многоосных колесных транспортно-технологических машин / Береснев П.О., Михеев А.В., Беляев А.М., Папунин А.В., Кострова З.А., Колотилин В.Е., Еремин А.А., Макаров В.С., Зезюлин Д.В., Беляков В.В., Куркин А.А. // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2015. №4 (111). – С. 136–150.

*Дата поступления  
в редакцию 29.04.2016*

**Z.A. Kostrova, A.V. Miheev, D.V. Zeziulin, V.S. Makarov,  
E.V. Kolotilin, M.E. Bushueva, V.V. Belyakov**

**HISTORICAL ENGINEERING CHANGE OF THE WHEEL  
AS A PROP – TRACTIVE SYSTEM OF ELEMENTS OF A VEHICLES MOVER  
IN THE ASPECT OF USING MATERIALS**

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

This article describes the engineering change of the wheel as a system of elements - from the first wooden rinks to the developments of polymers chemistry - non-pneumatic (airless) tires, and changes of each component of the wheels in a historical context also. The aim of this reserch is systematization of the information about the causes and preconditions of changing of the material elements of the wheel depending on the changing requirements of the external environment, depending on the technological progress and the impact of these changes on technological progress.

*Key words:* the wheel, the engineering change of the elements of the wheel, disc wheel, spoke wheel, the first pneumatic tyre, wooden wheel, pair of wheels, a vehicle wheel pair, a steam machine Cuneo, Richard Trevik, pneumatic tyre, metal tyre, hub, disc, treadmill, metallelastic wheels, sprung wheel, Fordson, granulated wheels, airless tyre, Lambert's tyre, radial and diagonal tyres, spherical wheel, magnetic suspension, wheel Rovers, the Rovers wheel, non-pneumatic (airless) tires.

УДК. 629.113

В.В. Ломакин, А.А. Шабанов

**КРИТЕРИИ ВЫБОРА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ ГИБРИДНЫХ АВТОМОБИЛЕЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ**

Университет машиностроения (МАМИ), Москва

Рассмотрены критерии выбора параметров силовой установки и проблемы, с которыми сталкиваются зарубежные и отечественные производители гибридных автомобилей.

*Ключевые слова:* силовая установка, гибридные автомобили, статистические коэффициенты.

Для легковых автомобилей максимальную мощность двигателя обычно выбирают исходя из обеспечения максимальной скорости на дороге. Максимальная скорость достигается на высшей передаче. Максимальная скорость и мощность заявляются производителем в техническом описании на транспортное средство, и проверяется при сертификационных испытаниях. Двигатель также должен обеспечивать хорошие динамические качества автомобилю при обгонах на дороге. Динамические качества автомобиля зависят от величины максимального крутящего момента двигателя и его расположения на внешней скоростной характеристике.

Составляющие дорожной нагрузки определяют мощность двигателя. Если построить в графическом виде суммарную мощность сопротивления движения автомобиля в функции скорости и мощность двигателя в тех же координатах, то пересечение мощностей определит значение максимальной скорости. Расчеты по составляющим входящим в уравнения движения автомобиля показывают, что наибольшее значение на мощность влияют потери при разгоне. Мощность при определенной массе автомобиля и моменте его инерции определяется величиной ускорения и конечной скоростью разгона. Завышенная мощность и, соответственно рабочий объем двигателя, у обычного автомобиля позволяют иметь достаточно интенсивную разгонную характеристику и большую максимальную скорость автомобилю, но это приводит к существенному увеличению расхода топлива, не только на режимах максимальных нагрузок, но и на малых нагрузках. У гибридного автомобиля используют ДВС меньшей мощности, так как силовая установка включает еще и электродвигатель, при этом суммарная мощность силовой установки не меньше, чем у обычного автомобиля. Но за счет использования электротяги расход топлива у гибридного автомобиля существенно меньше, чем у обычного автомобиля. Мощность электродвигателя линейно растет с ростом скорости, поэтому динамика гибридного автомобиля не уступает другим автомобилям.

При проектировании гибридного автомобиля и выборе мощности на первом этапе удобно использовать статистические данные автомобильных каталогов. Анализ параметров силовых установок гибридных автомобилей (HEV) показывает, что суммарная мощность энергоустановки, как правило, выбирается несколько меньшей или равной мощности ДВС, установленного на автомобиле аналоге. Это дает определенный результат снижения расхода топлива на гибридном автомобиле [1, 2]. Под аналогом понимается традиционный бензиновый автомобиль того же производителя и класса. По статистическим коэффициентам в первом приближении выбрать параметры силовой установки.

Энергетические параметры силовой установки можно в первом приближении выбрать по статистическим критериям (коэффициентам). Для этого можно использовать статистическую информацию о мощностных параметрах различных моделей гибридных автомобилей, имеющуюся в технической литературе [3, 4]. Коэффициент  $k_1 = N_{эл}/N_{двс}$ , приведенный табл. 1, характеризует отношение мощностей электродвигателя и ДВС гибридных автомо-

билей. Для анализа статистических данных, характеризующих энергетические параметры силовых установок по различным моделям гибридных автомобилей удобно рассматривать изменение коэффициента  $k_1$  и других параметров силовых установок в зависимости от рабочего объема ( $V_h$ ) поршневых двигателей, так как  $V_h$  влияет на мощность и топливную экономичность силовой установки гибридного автомобиля.

На рис. 1 показаны статистические данные коэффициента  $k_1$  различных гибридных автомобилей. Значение коэффициента  $k_1$  для разных гибридных автомобилей изменяется в широких пределах от 0,0045 (BMW 7) и 0,073 (Mercedes-Bens S400) до 0,95 (Toyota Camry). Наименьшее значение коэффициента  $k_1$  имеют модели автомобилей с 15 кВт электродвигателями и большим рабочим объемом ДВС, а наибольшее автомобиль Toyota Camry с 105 кВт электродвигателем и небольшим рабочим объемом ДВС равным 1,36 л. Следует отметить, что большое значение коэффициента  $k_1$  еще не является гарантией достижения низкого расхода топлива автомобилем. Так, у автомобиля Hyundai Sonata с 30 кВт электродвигателем ( $k_1=0,24$ ) расход топлива ниже в испытательных американских циклах EPA относительно бензинового аналога, чем у Ford Escape с 70 кВт электродвигателем ( $k_1=0,61$ ). Это также характерно и для гибрида Toyota Camry и для других моделей. Если у автомобиля Hyundai Sonata снижение расхода топлива составляет 45% в городском цикле и 29% в смешанном цикле, то у второго автомобиля 36% и 18% соответственно, а у третьего 36% и 24%.

У гибридных автомобилей Honda Insight и Honda Civic с 10 и 15 кВт электродвигателями коэффициент  $k_1$  также имеет низкие значения 0,15 и 0,23. Однако на этих гибридных автомобилях получено значительное снижение расхода топлива относительно аналогов. Данный результат достигнут в определенной степени благодаря тому, что у данных моделей автомобилей рабочий объем ДВС был снижен относительно аналога Honda Civic с 2,0 л до 1,34 л, при этом мощность основного двигателя была также снижена со 148 кВт до 65 и 70 кВт соответственно. Принятое решение позволило значительно уменьшить расход топлива в испытательных циклах.

Сравнительная оценка топливной экономичности гибридных автомобилей относительно аналогов приведена в табл. 1. Для сравнения эффективности работы силовых установок гибридных автомобилей снижение расхода топлива по испытательным американским федеральным циклам EPA и европейским EU показано в процентах. Там же приведены значения коэффициента  $k_1$  энергетической установки и показатели топливной экономичности гибридных автомобилей.

Коэффициенты, характеризующие другие энергетические параметры силовой установки, такие, как соотношение крутящих моментов ДВС и электродвигателя, суммарной мощности силовой установки и полной массы автомобиля, рассчитанные по данным каталогов [3], приведены в табл. 2. Коэффициент  $k_2 = M_{кэл} / M_{кд}$ , характеризующий соотношение величин крутящих моментов электродвигателя и ДВС, находится у обычных гибридов (HEV) в пределах 0,65-1,46.

Максимальное значение  $k_2=2,8$  имеет силовая установка нового типа (PHEV) гибридного автомобиля Chevrolet Volt с 55 кВт электромотором. Данный автомобиль имеет также на порядок более мощную, чем у обычных гибридов литий-ионную батарею с энергоемкостью 16 кВтч и имеет возможность подзарядки ее от электросети, что позволяет ему проехать расстояние на одной зарядке 61 км. Силовая установка данных автомобилей вследствие специфики их работы заслуживает отдельного рассмотрения. Следует отметить, что в последние годы с бурным развитием автомобильного парка обычных гибридов (HEV), появились необычные гибриды (PHEV) Chevrolet Volt, Toyota Prius Plug-in, и др. Эти гибриды отличаются тем, что их можно подзаряжать от электросети (plug-in hybrid vehicle – подзаряжаемый гибридный автомобиль). Они максимально используют электрическую тягу, а если батарея разрядилась, переходят на тягу от ДВС. Для подзарядки используется обычная электросеть или используются специальные зарядные устройства.

Третий коэффициент  $k_3 = N_{двс} / N_{\Sigma}$  характеризует соотношение мощности ДВС к сум-

марной мощности силовой установки и находится в пределах 0,73-0,9. Гибридный автомобиль Chevrolet Volt имеет наименьшее значение  $k_3=0,57$ . Коэффициент  $N1=N_{\Sigma}/m_{\Sigma}$  характеризует соотношение суммарной мощности силовой установки к полной массе автомобиля и находится в пределах 0,044-0,096. Наибольшее значение  $N1$  имеют скоростные гибридные автомобили, такие как Porsche Cayenne. Автомобиль имеет максимальную скорость 242 км/ч и высокие динамические качества, разгон с места до 100 км составляет 6,5 с.

Таблица 1

**Влияние коэффициента  $k_1$  на снижение расхода топлива гибридных автомобилей относительно аналогов в испытательных циклах**

№	Автомобиль	$k_1=N_{эл}/N_{двс}$ , кВт/кВт	Расход топлива в испытательном цикле, л/100 км	Снижение расхода топлива относительно аналога, %
1	Toyota Corolla (гибрид)	0,82	EU 3,8/3,8/3,8	56/31/43
2	Toyota Corolla (впрыск бен.)	-	EU 8,7/5,5/6,7	-
3	Toyota Camry (гибрид)	0,95	EPA 6,9/7,1/6,9	36/ - /24
4	Toyota Camry (впрыск бен.)	-	EPA 10,7/7,3/9,1	-
5	Hyundai Sonata (гибрид)	0,24	EPA 6,4/6,0/6,2	45/ - /29
6	Hyundai Sonata Fe (впрыск бен.)	-	EPA 11,7/6,9/8,7	-
7	Ford Escape (гибрид)	0,61	EPA 7,6/6,9	36/18
8	Ford Escape (впрыск бен.)	-	EPA 11,8/8,4	-
9	Lexus RX (гибрид)	0,67	EPA 7,3/8,4/7,8	49/ - /26
10	Lexus RX 350 (впрыск бен.)	-	EPA 14,3/8,4/10,6	-
11	Mercedes-Bens S400(гибрид)	0,073	EU 10,8/6,4/4,8	0/ - /41
12	Mercedes-Bens S350 (впрыск бен.)	-	EU 10,8/6,5/8,1	-
13	Cadillac Escalade (гибрид)	0,24	EU 11,6/10,7/11,1 EPA 11,8/10,2	41 /5/24 54/22
14	Cadillac Escalade (впрыск бен.)	-	EU 20,1/11,3/14,5 EPA 18,1/13,1	-
15	Porsche Cayenne (гибрид)	0,139	EU 8,7/7,9/8,2	45/6/27
16	Porsche Cayenne (впрыск бен.)	-	EU 15,9/8,4/11,2	-
17	BMW 7 (гибрид)	0,045	EU 12,6/7,6/9,4	26/15/21
18	BMW 7 (впрыск бен.)	-	EU 17,1/8,9/11,9	-

Анализ эксплуатационных характеристик гибрида Honda Insight и его бензинового аналога Honda Inspire показывает, что рациональный выбор рабочего объема ДВС энергоустановки и оптимальное использование электродвигателя на различных режимах, позволяет снизить расход топлива на 36% в смешанном европейском цикле [3, 4]. Значительная часть

экономии топлива была достигнута за счет уменьшения литража ДВС с 3,47л до 1,34л и уменьшения снаряженной массы автомобиля. При этом суммарная мощность энергоустановки составила 72 кВт при мощности электродвигателя 10 кВт. Относительно аналога мощность была снижена более чем в два раза, максимальная скорость гибридного автомобиля составила 186 км/ч, а время разгона до 100 км/ч - 12,6 с.

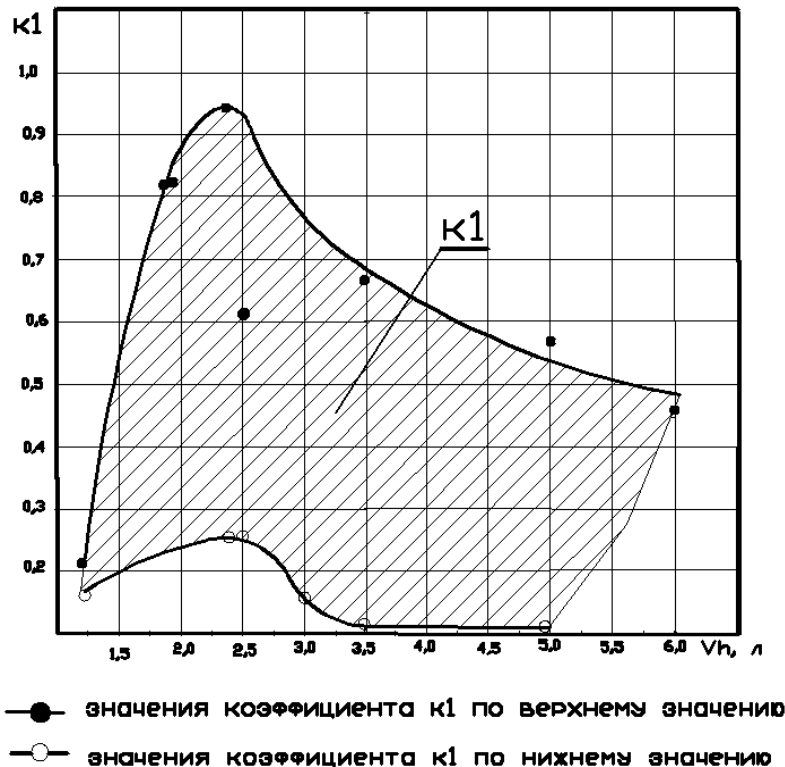


Рис. 1. Значение коэффициента  $k_1$  в зависимости от рабочего объема ДВС у различных гибридных автомобилей

Мощность электродвигателя линейно растет с ростом скорости, поэтому динамика гибридного автомобиля не уступает традиционным автомобилям. Автомобили фирмы Toyota с бензиновыми ДВС одного класса с рабочим объемом 1,6 - 1,8 л имеют на 18% меньший расход топлива в испытательных циклах, чем автомобили той же фирмы литражом 3,5 л.

Коэффициент  $K_1 = N_{эл}/N_{двс}$ , приведенный в табл. 1, характеризует отношение мощностей электродвигателя и ДВС гибридного автомобиля. Значение коэффициента  $K_1$  для гибридных автомобилей изменяется в широких пределах от 0,073 до 0,95. Оптимальное соотношение мощностей основных источников тягового усилия от ДВС и электродвигателя, а также энергоемкости и мощности накопителя энергии зависит от того, в каких режимах движения будет эксплуатироваться гибридный автомобиль.

Коэффициент  $k_2$  характеризует соотношение величин крутящих моментов электродвигателя и ДВС,  $k_2 = M_{кдвс}/M_{кэл}$  и находится в пределах 0,69-3,1. Коэффициент  $k_3$  характеризует соотношение мощностей ДВС и суммарной мощности силовой установки  $k_3 = N_{двс}/N_{\Sigma}$ . Коэффициент  $N_1$  характеризует соотношение суммарной мощности силовой установки к полной массе автомобиля  $N_1 = N_{\Sigma}/m_{\Sigma}$  (кВт/кг) и находится в пределах 0,039-0,125. Коэффициенты, характеризующие энергетические параметры силовой установки, такие как соотношение крутящих моментов ДВС и электродвигателя, мощностей ДВС и электродвигателя, суммарной мощности силовой установки по отношению к полной массе автомобиля приведены также в табл. 2.

Таблица 2

## Характеристики автомобилей с бензиновыми ДВС и с комбинированными энергоустановками

Автомобили	Масса, кг	Литраж ДВС, л	Мощность ДВС, кВт (пном) / N1=Nдвс/mΣ	Крутящий момент ДВС, Нм (при Mк max)	Мощность электро-двигателя, кВт (при Mк max) K1= Nэл/ Nдвс	Крутящий момент электро-двигателя, Нм K2=Mкдвс/Mкэл	Суммарная мощность сил.установ, кВт/Нм K3=Nдвс/NΣ	Расход топлива л/100км	CO2	V, км/ч
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Toyota Corolla (впрыск бен.)	1250 1750	1,8	108(6400)	180(4000)	-	-	-	EU 8,7/5,5/6,7	155	
Toyota Corolla (гибрид)	1380 Σ1805	1,8	73(5200)/ /0,04	142(4000)	60/0,82	207/0,69	100/0,73	EU 3,8/3,8/3,8	89	
Toyota Camry (впрыск бен.)	1500	2,5	125(6000)	233(4000)	-	-	-	EPA 7,6/11,2 10,7/7,3/9,1		180
Toyota Camry (гибрид)	1670	2,36	110 (6000)	187 (4400)	105 /0,95	270/0,69	139/0,79	EPA 6,9/7,1/6,9 7,6/6,7/7,1	92	180
Toyota Prius (гибрид)	1370 Σ1805	1,8	73 (5200) /0,04	142 (4000)	60 /0,82	207/0,69	100/0,73	EU 3,9/3,7/3,9 EPA 6,2/5,6/5,9	89 92	180
Nissan Altima (впрыск бен.)	1350 1485	2,5	128 (5600)	245 (3900)	-	-	-	EPA 7,6/10,2/8,8		
Nissan Altima (гибрид)	1575 Σ2055	2,5	116 (5200) /0,056	220 (2800)	30/0,26	270/0,81	148/0,78	EPA 7,1/6,7		
Honda Crossrad (впрыск бен.)	1410 1480	1,8	103(6300)	175 (4300)	-	-	-	8,6		
Honda Insight (впрыск бензина)	1610	3,47	206(6200)	340 (5000)	-	-	-	9,0		
Honda Insight (гибрид)	1200- Σ1650	1,34	65 (5800) /0,039	121 (4500)	10/0,15	79/0,65	72 /0,9	EU 4,2/4,6/4,4	101	182
Honda Civic (впрыск бен.)	1265 1700	2,0	148(7800)	195(5600)	-	-	-	EU 12,7/7,9/9,1	215	235
Honda CR-Z (гибрид)	1200 Σ1520	1,5	84(6100) /0,055	145(4800)		174/0,83	91/0,92	EU 6,1/4,4/4,5	117	200
Honda Civic (впрыск бен.)	1195 1220	1,8	103 (6300)	175 (4300)	-	-	-	EPA 8,1		
Honda Civic (гибрид)	1249 Σ1720	1,34	70 (6000) /0,041	123 (4600)	15/0,23	103/1,19	8,4/0,83	EU 5,2/4,3/4,6	109	185

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Mercedes-Bens S350 (впрыск бен.)	1835 2505	3,5	225(6500)	370(3500)	-	-	-	EU 10,8/6,5/8,1	189	
Mercedes-Bens S400(гибрид)	1880 Σ2550	3,5	205(6000) /0,080	350 (3500-5500)	15/0,073		220/0,93	EU 10,8/6,4/4,8	188	
Hyundai Sonata (впрыск бен.)	1725 2505	2,35	128(6000)	126(3750)	-	-	-	EPA 11,7/6,9/8,7		190
Hyundai Sonata (гиб- рид )	1515	2,36	126(6000)	212(4250)	30/0,24		156/0,81	EPA 6,4/6,0/6,2		
BMW 7 (впрыск бен.)	1945 2575	4,4	300(5500)	600 (1700-4500)	-	-	-	EU 17,1/8,9/11,9	278	
BMW 7 (гибрид)	2045 Σ2635	4,4	330(5500) /0,125	650 (2000-4500)	15/0,045	210/3,1		EU 12,6/7,6/9,4	219	
Ford Escape (впрыск бен.)	1495	2,5	127(6000)	232(4500)	-	-	-	EPA 11,8/8,4 12,4/9,4		180
Ford Escape (гибрид)	1665 Σ1735	2,5	115(6000) /0,066	184(4500)	70/0,61		132/0,87	EPA 8,7/7,8/8,1 7,6/6,9		170
Lexus LS 460 (впрыск бен.)	1945 2495	4,6	280(6400)	493(4100)	-	-	-	EU 17,2/8,4/11,6	261	
Lexus LS 600h (гиб- рид смеш.)	2270 Σ2400	5,0	290 (6400) /0,12	520(4000)	165/0,57	300/1,73	327/0,89	EU 11,2/8,0/9,3	218	
Lexus RX 350 (впрыск бен.)	1895 2545	3,5	204(6200)	346(4700)	-	-	-	EPA 14,3/8,4/10,6	250	
Lexus RX (гибрид)	2045 Σ2560	3,5	183(6000) /0,071	317(4800)	123/0,67	333/0,95	219/0,83	EPA 7,3/8,4/7,8 EU 6,6/6,0/6,3	148	
Porsche Cayenne (впрыск бен.)	1995 2765	3,6	220(6300)	400(3000)	-	-	-	EU 15,9/8,4/11,2	263	
Porsche Cayenne (гибрид)	2240 Σ2910	3,0	245(6500) /0,084	440 (3000-5250)	34/0,139	300/1,47	279/0,87	EU 8,7/7,9/8,2	193	
Ford Fusion (впрыск бен.)	1490 1515	2,5	130(6000)	233(4500)				EPA 10,2/7,1/8,7		180
Ford Fusion (гибрид)	1665	2,5	116(6000)	185(2250)	30/0,26		143/0,81	EPA 6,5/5,7/6,3		180



На рис. 2 приведены статистически данные коэффициента  $\kappa_3$  и  $N_1$  по гибридным автомобилям.

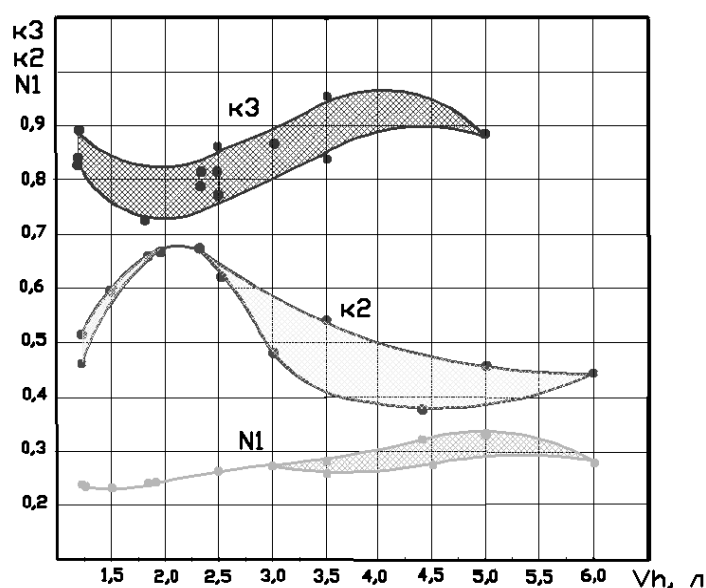


Рис. 2. Коэффициенты  $\kappa_2$ ,  $\kappa_3$  и  $N_1$ , характеризующие энергетические параметры силовой установки

Таким образом, определяющую роль в снижении расхода топлива автомобилем играет не сама по себе выбранная мощность электродвигателя силовой установки, а другие ее характеристики, такие, как алгоритм работы энергоустановки, определяющий режим включения электродвигателя на различных режимах движения автомобиля, а также конструктивные особенности силовой установки, позволяющие работать ДВС в оптимальной зоне многопараметрической характеристики ДВС. Но при этом необходимо отметить, что для реализации оптимального с точки зрения экономичности алгоритма необходима определенная мощность электродвигателя, которая обеспечивает работу на электротяге в широком диапазоне нагрузок городского и магистрального цикла. Исходя из приведенных статистических данных, можно на первом этапе проектирования гибридного автомобиля выбрать соотношение мощностей его силовых агрегатов.

#### Библиографический список

1. Загарин, Д.А. Плюс электропривод / Д.А. Загарин [и др.] // Энергоэффективность и энергосбережение. 2013. № 9–10.
2. Ломакин, В.В. К вопросу выбора мощности ДВС энергетической установки гибридных автомобилей / В.В. Ломакин, А.В. Шабанов, А.А. Шабанов // Журнал автомобильных инженеров. ААИ. – 2013. – № 1 (78). – С. 26–29.
3. Каталоги автомобилей 2012–2015 г. Automobil revue.
4. Electric & Hybrid Vehicle Technology International. 2010–2015.

Дата поступления  
в редакцию 18.05.2016

V.V. Lomakin, A.A. Shabanov

#### SELECTION CRITERIA OF THE MAIN PARAMETERS OF HYBRID CARS POWERTRAIN IN THE DESIGN

Moscow state university of mechanical engineering (MAMI)

The selection criteria of the powertrain parameters and problems faced by foreign and domestic manufacturers of hybrid cars were considered.

Key words: powertrain, hybrid car, static coefficient.

УДК 621.43.05, 537.5

С.Н. Нагорных<sup>1</sup>, Е.В. Нагорных<sup>2</sup>**СЛУЧАЙНАЯ КОМПОНЕНТА СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ВАЛА  
ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ СО СВЕЧЕЙ ЗАЖИГАНИЯ**Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева<sup>1</sup>,  
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского<sup>2</sup>

Измерена случайная компонента скорости вращения вала двигателя внутреннего сгорания со свечой зажигания, ее плотность вероятности, аппроксимированная стационарным решением уравнения Фоккера-Планка. Найдены два критических параметра режимов работы свечи и двигателя внутреннего сгорания. Рассмотрены тепловые и электромагнитные виды работы статистического запаздывания зажигания свечи для стимулированной (экзоэлектронной) эмиссии металлов. Измерения проводились на двигателе ВАЗ 11163 в стационарном режиме холостого хода. Применялась стандартная схема зажигания свечи. Погрешность измерения скорости вращения вала по бортовому компьютеру была  $\pm 5$  оборотов в минуту. Результаты измерения случайной компоненты скорости вращения вала можно применять для конструирования и контроля режимов работы двигателя внутреннего сгорания с преимущественно холостым ходом. Другим вариантом применения результатов работы является конструирование новых свечей зажигания.

*Ключевые слова:* вал двигателя внутреннего сгорания, случайная скорость вращения, плотность вероятности, статистическое время запаздывания, зажигание свечи, экзоэлектронная эмиссия.

В [1] детально рассмотрена термодинамика работы двигателя внутреннего сгорания (ДВС). Кроме того, даны регулярные неустановившиеся режимы работы ДВС, которые определены как одновременное изменение двух параметров холостого хода (ХХ). Неустановившиеся режимы состоят из переходных (например, пуск ДВС) и статических (например, неработающий; (ХХ), нагруженный ДВС) режимов, которые на самом деле могут быть стационарными. Самым быстрым фактором, реагирующим на подачу топлива, названа скорость вращения вала.

В действительности таким процессом является работа свечи зажигания. В [2] природа работы ДВС определена как случайные колебания давления воздушно-топливной смеси (ВТС), через временные ряды нормально распределенных величин, с двумя параметрами. Приведена техника измерения виброакустического спектра 2-5 кГц стяжной шпильки блока цилиндров. Вибросигнал синхронизировался узкополосным фильтром от индуктивного датчика оборотов вала ДВС. Действительно, сигнал являлся спектром случайных колебаний стяжной шпильки, но связь этих колебаний со случайными колебаниями давления ВТС не рассмотрена. Очевидно, что в сигнал как-то вмешиваются изгибно-крутильные колебания вала и изгибно-растягивающие колебания напряжений корпуса двигателя в месте расположения шпильки. Нормальную плотность вероятности случайных величин вибросигнала авторы [2] не приводят.

Целью данной работы является измерения скорости вращения вала ДВС  $X$  предварительным определением её как случайной величины  $X$ , получение её плотности вероятности и объяснение с точки зрения режимов работы свечи и ДВС. Измерения  $X$ , температуры, напряжения аккумулятора проводились на ВАЗ 11183 по бортовому компьютеру. Погрешность  $X$  составляла  $\pm 5$  об/мин. Применялась стандартная катушка зажигания и свечи BCPR6ES фирмы NGK.

На рис. 1 приведены результаты измерения плотности вероятности  $X$  на ограниченном участке [760;860] оборотов в минуту и её возможная аппроксимация (кривая с треугольниками) в MS Excel. График рис. 1 даётся стационарной функцией  $P_s(x)$  [3], а не функцией нормальной плотности вероятности:

$$P_{s(x)} = N \cdot x^{\frac{2\lambda}{\sigma^2} - \nu} \cdot e^{-\frac{2x}{\sigma^2}}, \quad (1)$$

где  $N$  - нормирующая постоянная,  $\nu=1$  по Стратоновичу,  $\nu=2$  по Ито и два важных параметра:  $\lambda$  - разность двух динамических параметров,  $\sigma^2$  - интенсивность белого шума. Самым быстрым процессом работы ДВС является работа свечи зажигания, т.к. она задает момент и режим горения (ВТС) и только как следствие скорость вращения вала ДВС. Определим  $X$  как  $t_p^{-1}$  - обратное время зажигания и горения свечи относительно момента подачи напряжения на свечу в нагруженном режиме на ограниченном интервале  $t_p$ :

$$t_p = t_{CB3} + t_\phi + t_2, \quad (2)$$

где  $t_{CB3}$  - статистическое время запаздывания [4],  $t_\phi$  - время формирования электрического разряда до режима горения,  $t_2$  - время горения разряда и ВТС.

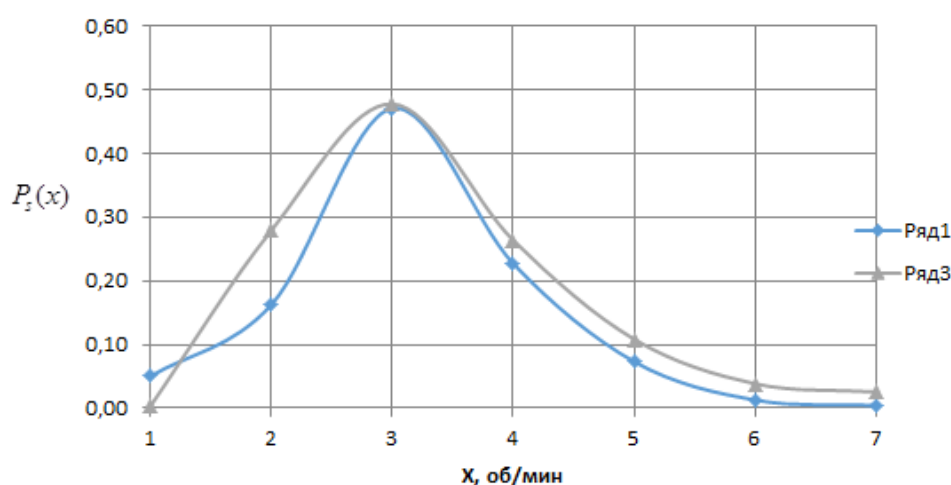


Рис. 1. Плотность вероятности случайной компоненты скорости вращения

Нагруженным режимом свечи назовём равенство (2) в интервале средней температуры свечи  $500-900^{\circ}C$  и образовании в межэлектродном промежутке объемного заряда перед диффузионным пробоем.

При включении сцепления и движении с постоянной скоростью по прямой на гладкой дороге скорость вращения вала становится детерминированной в рамках погрешности электронного тахометра (интервал случайной величины  $X$  стягивается в точку). Это означает, что функция (1) переходит в дельта-функцию  $\delta(x-x_0)$ . В [3] доказано, что это соответствует стремлению к нулю отношения двух параметров

$$\frac{2\lambda}{\sigma^2} \rightarrow 0 \quad (3)$$

при  $\nu=1$  за счёт  $\lambda \rightarrow 0$ . Тогда запуск двигателя, как переходный процесс [1], можно объяснить переходом  $\delta(x)$  в  $P_s(x)$ . Согласно [3] определим постоянную  $\lambda$  как:

$$\lambda = J_- + J_+, \quad (4)$$

где  $J_-$  - производная по времени от числа электронов в секунду,  $J_+$  - производная по времени от числа положительных ионов в секунду, уходящих с катода свечи (нейтрализованных на катоде). Таким образом, переход с режима ХХ на нагруженный режим свечи и ДВС (4) связан с  $J_- \rightarrow -J_+$  и почти полным равенством скоростей уходящего тока электронов и положительных ионов с катода свечи. Уточняем, при сгорании ВТС положительные ионы ВТС адсорбируются на катоде свечи. При этом уходящая производная тока возрастает, и на свече

начинают работать катоды из другого материала, легче обеспечивающую десорбцию положительных ионов, что и реализуется на практике ( $Pt$ ).

Если свеча прогрета выше  $850^{\circ}C$ , положительные ионы почти не адсорбируются на катод во время горения ВТС, а значит, и почти нет десорбции  $J_+ \ll J_-$ , т.е.  $J_+ \approx 0$ , которая необходима для перехода в нагруженный режим  $J_- \approx J_+$  при заметном  $J_-$ . Десорбция также нагружает диффузионный пробой в свече на горение ВТС в цилиндре. Когда это нарушается, то искровой пробой возбуждает в горении ВТС ударные волны, т.е. детонацию (видим на практике даже разрушения ДВС). Если средняя температура свечи меньше  $450^{\circ}C$ , адсорбция превышает десорбцию. Свеча покрывается продуктами горения или топливом  $J_+ \gg J_-$  и электроны нейтрализуются положительно адсорбированными ионами и их число не увеличивается при вылете из катода  $J_- = 0$ , что нарушает (4, 3). Свеча может выйти из строя (нарушены электроизоляционные свойства) при пуске двигателя, как это происходит на практике.

По данным Тихомирова А.Н. при работе ДВС на газе (4000 оборотов в минуту, XX) со временем теряется крутящий момент из-за изменения состояния свечи значительно раньше, чем при работе на бензине. Переход на бензин заметно восстанавливает состояние свечи и крутящий момент. Замена свечи полностью восстанавливает крутящий момент ДВС. Это можно объяснить следующим образом. Т.к. ток горения свечи идет через зону проводимости окисла и за счет туннельного механизма и скачка температуры (приблизительно  $1500^{\circ}C$ ), то поверхностный потенциал со временем почти не меняется на бензиновой ВТС и повышается на газе. Если ток горения свечи идет через центр хемосорбции окисла по туннельно-термическому механизму, то, по-видимому, бензиновая ВТС создает дополнительный центр, частично уносит продукты горения, дает объемное горение ВТС. Газовая ВТС не создает дополнительные центры, не уносит продукты горения, частично дает поверхностное горение ВТС. Скачки температуры, примерно  $1500^{\circ}C$ , и средняя температура  $850-450^{\circ}C$  не вызывает стационарной термоэлектронной эмиссии, так как  $0,13$  эВ меньше поверхностного потенциала до дна зоны проводимости  $\sim 0,5$  эВ. Это активирует окисление свечи, на которой наблюдаются цвета побежалости ( $F, F'$  - центры окраски в окисле или центры хемосорбции). Туннельно-темоэлектронный механизм эмиссии электронов в [4] назван стимулированной экзотермической эмиссией.

Важным элементом рассматриваемых процессов является возникновение случайного запаздывания  $t_{CB3}$  пробоя в свече от катушки индуктивности.

Вторичная обмотка по команде индуктивного датчика оборотов вала возбуждает и прикладывает к свече высоковольтное колебание напряжения. В силу изменения во времени полей электрической и магнитной напряженности  $\vec{E}, \vec{H}$  (свеча с промежутком между электродами  $l$ ) согласно уравнениям Максвелла возникает краевое условие для плотности тока проводимости (электронной эмиссии)  $\dot{\vec{\sigma}} = \vec{j}$  ( $\sigma$  - поверхностный заряд на катоде свечи). Она равна плотности тока смещения в зазоре  $l$  свечи, заполненным ВТС,  $\vec{j}_{\text{смещ}} = \dot{\vec{D}}$  ( $\vec{D}$  - вектор эл. смещения). Краевое условие, т.е. непрерывность числа силовых линий плотности тока, имеет вид

$$\dot{\vec{\sigma}} = \dot{\vec{D}} \quad (5)$$

и равенство для замкнутой цепи вторичной катушки и свечи:

$$\vec{j}_n = \vec{j} + \vec{j}_{\text{смещ}}, \quad (6)$$

где  $\vec{j}_n$  - плотность полного (суммарного) тока. При изменении во времени  $\vec{H}(t)$ , вызванного  $\vec{j}$ , растёт  $\vec{D}(t)$  и увеличивается  $\vec{\sigma}(t)$ . Тогда имеем [4]

$$\dot{\vec{\sigma}}(t) = \frac{2}{t_{CB3}(t)}, \quad (7)$$

где  $\bar{t}_{CЗВ}(t)$  - среднестатистическое время запаздывания пробоя свечи двумя случайными электронами из катода при атмосферных условиях. При этом обнаружено сходство рис. 1 и плотности вероятности  $t_{CЗВ}(t)$  воздушного разрядника [4]. Если бы выполнялось начальное условие  $J_+ = j_{смещ} = 0$ , то реализовался бы конденсаторный пробой с задержкой на 180 градусов фазы колебания напряжения катушки зажигания теми же случайными начальными электронами и возможной детонацией. Иначе возникает случайное колебание напряжения смещения, приложенное к свече без запаздывания. Через некоторое время это напряжение превысит напряжение зажигания свечи электронами проводимости. Если это время больше  $t_{CЗВ}(t)$ , то мы имеем  $t_{CЗВ}(t)$  в зажигании свечи. Когда  $t_{CЗВ} \approx t_2$ , наблюдаются на практике пропуски зажигания ВТС. Если время меньше  $t_{CЗВ}(t)$ , то мы не имеем случайного запаздывания зажигания свечи. Оба варианта дают случайный импульс валу ДВС на ХХ. Таким образом, работа свечи зажигания объясняет появление случайной компоненты скорости вращения вала и переходы на стационарные режимы ДВС.

### Библиографический список

1. **Орлин, А.Г.** Двигатели внутреннего сгорания. Теория поршневых и комбинированных двигателей / А.С. Орлин А.С., М.Г. Круглов, М.Г. Круглов. – М.: Машиностроение, 1983. – 375 с.
2. **Кирюхин, С.Н.** Математическая модель дизельного двигателя. Научные проблемы специальных военно-строительных и фортификационных комплексов, обустройства войск и управления производственной деятельностью строительных предприятий МО РФ / С.Н. Кирюхин, А.О.Шиманская // Сборник научных трудов НИГ-1 ВИТУ. СПб. – 2006. – Вып. 5. – С. 543–552.
3. **Нагорных, С.Н.** Плотность вероятности как решение уравнения Фоккера-Планка в индуцированных шумом переходах / С.Н. Нагорных, Д.С. Саблуков // Журнал Средневожского математического общества. – 2015. – Т. 17. № 1. – С. 11–13.
4. **Нагорных, С.Н.** Роль вакансионных дефектов в стимулированной (экзоэлектронной) эмиссии металлов: автореф. дис... канд. физ.-мат. наук / С.Н. Нагорных. – Горький: ГГУ, 1975. – 19 с.

*Дата поступления  
в редакцию 23.04.2016*

**S. N. Нагорных<sup>1</sup>, Е. V. Нагорных<sup>2</sup>**

### **RANDOM COMPONENT OF THE SPEED OF ROTATION OF THE SHAFT INTERNAL COMBUSTION ENGINE WITH THE SPARK PLUGS**

The Nizhny Novgorod state technical university n. a. R. E. Alexeyev<sup>1</sup>,  
Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod<sup>2</sup>

A random component of crankshaft engine rotation velocity is measured. The probability density of rotation velocity is found. It is approximated by the stationary solution of Fokker-Plank equation. The critical parameters of noise-induced transitions of a spark plug and an engine under operating conditions are given. A random component of rotation velocity is characterized by the statistic delay of a spark plug ignition by stimulated (exoelectron) emission of the cathode. The measurements are made for VAZ 11183 engine performed in the stationary idle running. The standard spark plug ignition is used. The measurement error of the engine rotation velocity by aboard computer comes to  $\pm 5$  revolutions per minutes. The measurement results of a random component of crankshaft rotation velocity may be used for construction and control of the engine operating conditions with primary idle running. Another application of the results is construction a new spark plug ignition.

*Key words:* crankshaft engine, rotation velocity, probability density, statistic time delay, spark plug ignition, exoelectron emission.

УДК 621.791.754

А.С. Павлов<sup>1</sup>, Н.М. Ванюшкин<sup>2</sup>

### ФОРМИРОВАНИЕ МНОГОСЛОЙНОГО ШВА ГАЗОНАПРАВЛЕННОЙ СТРУЕЙ ПРИ СВАРКЕ В ЩЕЛЕВУЮ РАЗДЕЛКУ КРОМОК

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>1</sup>,  
АО Ковылкинский электромеханический завод<sup>2</sup>

Исследован процесс формирования многослойного шва газонаправленной дополнительной струей при автоматической аргодуговой сварке в щелевую разделку кромок. Показано влияние основных параметров режима сварки, а также изменения размера и расположения газового сопла на формирование слоёв шва.

*Ключевые слова:* щелевая разделка, газонаправленное сопло, глубина проплавления, толщина жидкой прослойки, автоматическая сварка в защитных газах.

Критерием качественного формирования сварного соединения при многослойной сварке неплавящимся электродом цилиндрических деталей и исключении глубоких подрезов на вертикальных стенках щелевого зазора является наличие вогнутой формы поверхности каждого слоя шва [1, 2]. Для получения этой благоприятной формы в процессе сварки используются поперечные колебания при вращении изогнутого неплавящегося электрода. Однако наряду с этим, из-за кривизны образовавшегося вогнутого профиля при оплавлении и стекании части металла со стенок под воздействием силового воздействия дуги при поперечном перемещении её в щелевом зазоре в центральной зоне хвостовой части сварочной ванны образуется выпуклый гребень расплавленного металла, а формирование поверхности сварного шва нарушается. Движение металла у передней стенки ванны при маятниковом колебании дуги приобретает волновой характер и оказывает существенное влияние на изменение толщины жидкой прослойки под дугой, и как следствие, уменьшение глубины проплавления металла.

Наиболее опасной зоной является место встречи сварочной дуги при её поперечном перемещении с отраженной от стенки щелевой разделки волной жидкого металла, поскольку в нём наиболее вероятно появление несплавления шва с проплавляемой поверхностью (рис. 1).

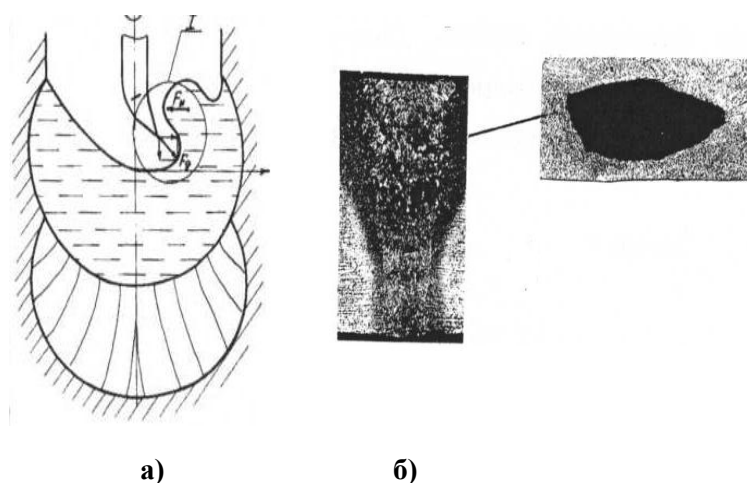
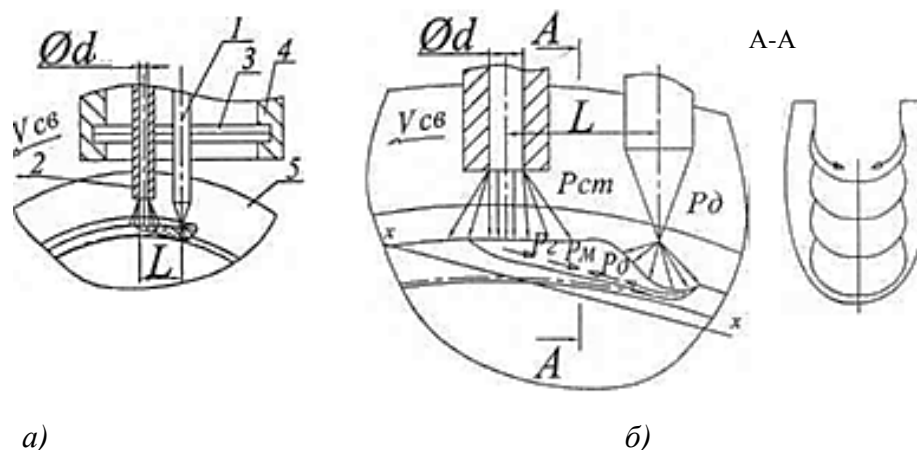


Рис. 1. Перемещение гребня вытесненного металла сварочной ванны при колебаниях дуги (а) и макрошлиф сварного шва с дефектом несплавления (б)

В настоящее время наметилась тенденция совершенствования технологии сварки с управлением качеством шва воздействием на сварочную ванну дополнительными струями аргона [3, 4]. Для снижения вероятности появления межслойных несплавлений, а также изучения особенностей формирования слоёв шва исследовали процесс автоматической сварки неплавящимся электродом при его стационарном положении в разделке с подачей сварочной проволоки перед дугой и воздействии дополнительной газовой струи на хвостовую часть сварочной ванны (рис. 2).



**Рис.2. Схема процесса сварки специальной горелкой (а) и расположения сил в сварочной ванне (б):**

1 – неплавящийся вольфрамовый электрод; 2 – сопло для подачи управляющей струи газа; 3 – многослойная сетка; 4 – сопло защитного газа; 5 – свариваемые детали

Дуга, воздействуя на поверхность сварочной ванны, создаёт в расплавленном металле силу  $P_d$ , которая перемещает жидкий металл из передней части ванны в её хвостовую часть вдоль объёмно-криволинейной поверхности фронта кристаллизации [6] с оттеснением металла на кромки щелевой разделки, образуя вогнутую форму поверхности формирующегося сварного шва. Движение потока жидкого металла из хвостовой части в центральную зону ванны осуществляется вдоль поверхности ванны [6]. При воздействии на хвостовую часть сварочной ванны управляющей газовой струёй создаются в расплавленном металле силы  $P_г$  и  $P_м$ , соответственно от давления струи и составляющей веса жидкого металла, способствующие нежелательному увеличению толщины жидкой прослойки под дугой. Сохранение постоянства толщины этой прослойки возможно в случае равенства этих сил, т. е.  $P_d = P_г + P_м$ . Выполнение этого условия, по-видимому, возможно при направлении определенной величины газового потока через сопло диаметром  $d$ , расположенным на расстоянии  $L$  от оси электрода, в хвостовую часть сварочной ванны (рис. 2).

Рабочие параметры газоструйного потока можно представить как стационарный адиабатический поток с установившимся течением по трубе (сопло 2, рис. 2) и со свободным истечением струи («утопленная струя») [5]. Без учёта теплообмена с внешней средой основными параметрами, описывающими состояние струи в каждом её сечении, будут усреднённые значения плотности газа  $\rho$ , скорости потока  $\omega_1$  и площади его поперечного сечения  $F$ . Согласно условию неразрывности струи, при постоянном расходе газа  $G$  для сечений 1 и 2 (сечение потока на срезе и пятне нагрева соответственно).

$$G = \rho_1 \cdot \omega_1 \cdot F_1 = \rho_2 \cdot \omega_2 \cdot F_2, \quad (1)$$

где  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – усреднённые значения плотности газа управляющего газового потока соответственно в поперечных сечениях 1 и 2;  $\omega_1$  и  $\omega_2$  – скорости газа управляющего газового потока соответственно в поперечных сечениях 1 и 2;  $F_1$  и  $F_2$  – площади поперечного сечения управляющего газового потока соответственно в поперечных сечениях 1 и 2.

При свободном истечении из сопла диаметр струи на расстоянии от среза сопла до пятна давления на поверхности сварочной ванны несколько расширяется. При этом пятно давления увеличивается:

$$F_2 = \kappa \cdot F_1, \quad (2)$$

где  $\kappa$  – коэффициент зависящий от диаметра сопла и длины струи. Например при диаметре сопла 2 мм ( $F_1 = 3,14 \text{ мм}^2$ ) пятно давления от струи длиной 5 – 6 мм, согласно результатам эксперимента, около  $7 \text{ мм}^2$ . Тогда  $F_2 = 2,2 \cdot F_1$ .

Известно [5], что полный импульс потока  $Y$  представляет собой сумму секундного количества движения и силы давления газа:

$$Y = G \cdot \omega + p \cdot F, \quad (3)$$

где  $Y$  – полный импульс управляющего газового потока;  $G$  – расход газа управляющего газового потока;  $\omega$  – скорость потока газа;  $p$  – давление потока газа.

Если принять значение  $Y_1$  на срезе сопла равным значению  $Y_2$  на пятне давления, тогда:

$$G_1 \cdot \omega_1 + p_1 \cdot F_1 = G_2 \cdot \omega_2 + p_2 \cdot F_2, \quad (4)$$

где  $\omega_2$  – скорость потока в пятне давления;  $p_2$  – давление потока газа на жидкий металл ванны–управляемый параметр, регулирующий толщину жидкой прослойки под дугой.

Приняв  $\omega_2 = 0$  и подставив выражение  $\omega_1$  из равенства (1), получим:

$$p_2 = \frac{G_1^2 + p_1 \cdot F_1}{\kappa \cdot F_1}. \quad (5)$$

Поскольку параметры  $F_1$  и  $p_1$  по условию величины постоянные, можно записать функциональную зависимость давления от расхода газа следующим образом:

$$p_2 = \kappa \cdot G_1^2 + c. \quad (6)$$

При отсутствии дополнительного потока ( $G_1 = 0$ ) процесс переходит из газодинамического в газостатический и коэффициент  $c$  отражает зависимость давления газа от изменения его объемного параметра ( $F \cdot \Delta l$ ).

Экспериментальные исследования влияния основных параметров режима сварки по щелевому зазору на толщину жидкой прослойки под дугой  $\sigma_{ж}$  и глубину проплавления  $h_{прс}$  проводили на макрошлифах по схеме, приведенной на рис. 3.

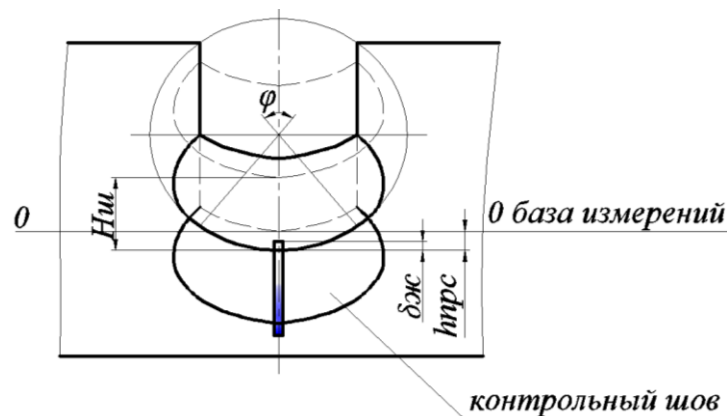


Рис.3. Схема измерения толщины жидкой прослойки  $\sigma_{ж}$  и глубины проплавления  $h_{прс}$

Эксперименты по автоматической сварке в щелевую разделку шириной 8 мм производили на трубных образцах из стали 30ХГСА диаметром 113 мм с толщиной стенки 18 мм. Предварительно на каждом образце наплавляли контрольные слои швов с применением при-



садочной проволоки Св.20Х2ГСНВМ-ВИØ 1,6 мм. По центру наплавленного слоя насверливали отверстия Ø1 мм и вставляли танталовый зонд с таким расчётом, чтобы при сварке следующего слоя происходило его оплавление.

Толщину жидкой прослойки под дугой определяли по нерасплавленному погружённому в жидкий металл концу зонда. Глубину проплавления шва определяли по расстоянию между поверхностью предыдущего (контрольного) слоя шва и зоной проплавления следующего слоя шва. Параметры режима изменяли в следующих пределах: сварочный ток  $J_{св} = 150 \dots 600$  А, скорость сварки  $V_{св} = 4 \dots 15$  м/ч, скорость подачи присадочной проволоки  $V_{п.п} = 4 \dots 50$  м/ч (без участия управляющей газовой струи). При обработке экспериментальных данных установлено, что наибольшее влияние на глубину проплавления оказывает сварочный ток (рис. 4). Максимальная глубина проплавления слоя шва составила 3,5...4,0 мм. При этом появление несплавлений не исключалось.

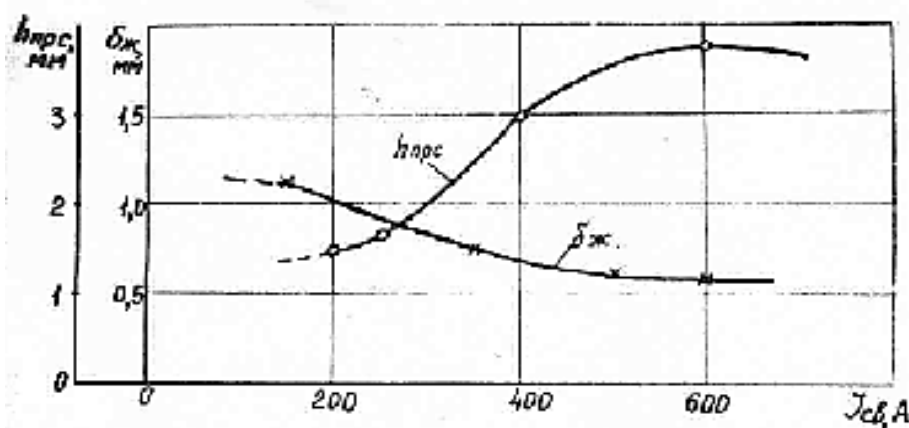


Рис.4 . Зависимость глубины проплавления слоя шва  $h_{прс}$  и толщины жидкой прослойки под дугой  $\sigma_{ж}$  от сварочного тока  $J_{св}$  при  $V_{св} = 5$  м/ч,  $V_{п.п.} = 6$  м/ч

Наиболее качественное формирование сварного шва получали при значениях сварочного тока  $J_{св} < 250$  А при глубине проплавления слоя шва  $h_{прс} = 1,2 \dots 1,5$  мм.

При образовании толстого слоя жидкого металла под дугой затрудняется передача тепла дуги поверхности предыдущего слоя и вероятность появления межслойных несплавлений увеличивается. В этой связи следовало установить зависимость глубины проплавления слоя шва  $h_{прс}$  и толщины жидкой прослойки под дугой  $\sigma_{ж}$  при сварке многослойного шва при обработке полученных экспериментальных данных (рис. 5).

Экспериментально установлена корреляционная зависимость между значениями  $h_{прс}$  и  $\sigma_{ж}$  вида:  $h_{прс} = 1,2 \sigma_{ж}^2 - 6,5 \sigma_{ж} + 6,9$ .

Стабильное формирование слоёв шва в виде вогнутого мениска получали при значениях  $h_{прс} = 1,2 \dots 1,5$  мм при  $\sigma_{ж} = 0,5 \dots 1,0$  мм.

В качестве варьирующих факторов выбирали параметры режима из условия формирования слоёв сварного шва с вогнутой поверхностью, значения которых приведены в табл. 1, 2. Обработку экспериментальных данных и построение математической модели зависимости влияния диаметра дополнительного управляющего сопла  $d$ , расстояния между неплавящимся электродом и дополнительным управляющим соплом  $L$  и давления дополнительной управляющей газовой струи  $P_{ст}$  на глубину проплавления предыдущих слоёв сварного шва  $h_{прс}$ , толщину слоёв многослойного сварного шва, на глубину проплавления кро-

мок щелевой разделки и, соответственно, ширины сварного шва, а также формы вогнутого мениска выполняли с помощью метода построения парных зависимостей. Глубину проплавления предыдущих слоёв сварного шва определяли при исследовании также на поперечных макрошлифах (рис. 6).

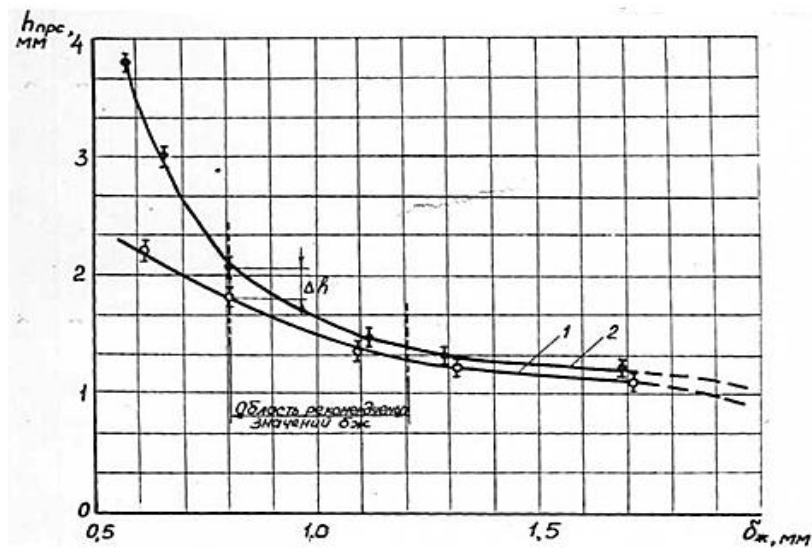
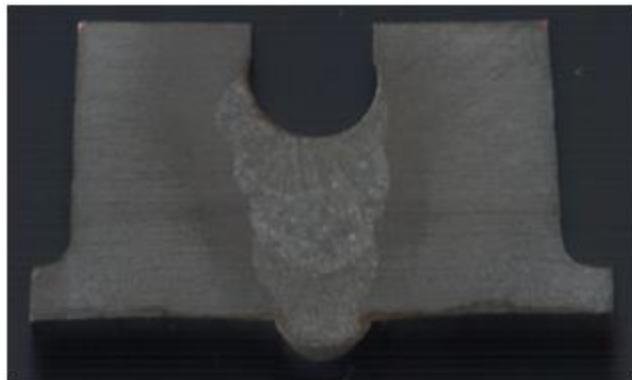
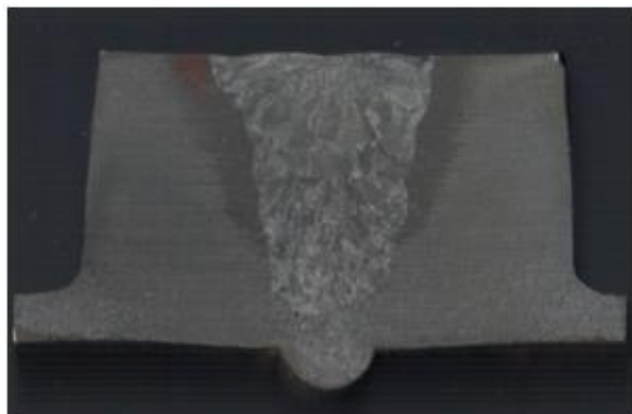


Рис.5. Зависимость глубины проплавления слоя шва  $h_{прс}$  от толщины жидкой прослойки  $\sigma_{ж}$  :

1 – минимальные; 2 – максимальные значения  $h_{прс}$



а)



б)

Рис. 6. Макрошлифы швов сварных соединений:

а – заполняющих слоев шва; б – после выполнения облицовочного слоя шва

Образование мениска (вогнутости) поверхности слоя шва при сварке по щелевому зазору возможно при условии проявления эффекта капиллярности, при этом ширина шва не должна превышать своего критического значения и при определённых значениях глубины проплавления кромок и слоя шва.

$$B < B_{кр}; B = B_{кр} = B_{щ} + 2 \cdot H_{пр}, \tag{7}$$

где  $B$  – ширина шва;  $B_{кр}$  – критическая ширина слоя шва;  $B_{щ}$  – ширина щелевого зазора;  $H_{пр}$  – глубина проплавления кромок.

Заданную высоту расплавления кромок  $H_{сл}$  определяют из соотношения:

$$n \cdot F_3 \cdot V_{п.п} / V_{св} \cdot B_{щ} < H_{сл} < n \cdot F_3 \cdot V_{п.п} / V_{св} \cdot B_{щ} + m \cdot a_k, \tag{8}$$

где  $H_{сл}$  – заданная высота расплавления кромок;  $F_3$  – площадь сечения присадочной проволоки;  $V_{п.п}$  – скорость подачи присадочной проволоки;  $V_{св}$  – скорость сварки;  $B_{щ}$  – ширина щелевого зазора;  $m, n$  – эмпирические коэффициенты, зависящие от формы разделки кромок (принимается  $m=0,7$  и  $n=1,2$ );  $a_k$  – капиллярная постоянная свариваемого металла (принимается  $a_k = 2$  мм).

Таблица 1

Основные факторы и уровни их варьирования для построения зависимости

$$H_{пр} = F(I_{св}, d, P_{ст}) \text{ при } L = 3 \text{ мм}$$

№ образцов	Уровень варьирования	$I_{св}$ , А (X1)	$d$ , мм (X2)	$P_{ст}$ , Па (X3)
2, 4, 6	Основной (интервал варьирования)	215 ± 35	3 ± 1	1,1 ± 0,66
	Верхний	250	4	1,76
	Нижний	180	2	0,44

Таблица 2

Основные факторы и уровни их варьирования для построения зависимости

$$H_{пр1} = F(I_{св}, L, P_{ст}) \text{ при } d = 3 \text{ мм}$$

№ образцов	Уровень варьирования	$I_{св}$ , А (X1)	$L$ , мм (X2)	$P_{ст}$ , Па (X3)
1, 3, 5	Основной (интервал варьирования)	225 ± 45	5 ± 2	0,64 ± 0,21
	Верхний	270	7	0,85
	Нижний	180	3	0,43

Таблица 3

Значения параметров  $H_{пр}$  и  $H_{пр1}$

$I_{св}$ , А	$d$ , мм	$P_{ст}$ , Па	Расчетные данные	Экспериментальные данные	$I_{св}$ , А	$L$ , мм	$P_{ст}$ , Па	Расчетные данные	Экспериментальные данные
			$H_{пр}$ , мм (Y1)	$H_{пр}$ , мм				$H_{пр1}$ , мм (Y1)	$H_{пр1}$ , мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
180	2	0,425	0,75	0,839	180	3	0,425	0,51	0,603

Окончание табл. 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
190	2,3	0,615	1,03	1,031	193	3,6	0,485	0,58	0,709
200	2,6	0,805	1,31	1,158	206	4,2	0,545	0,76	0,785
210	2,9	0,995	1,58	1,559	219	4,8	0,605	1,34	1,054
220	3,2	1,185	1,86	1,735	232	5,4	0,665	1,92	2,09
230	3,5	1,375	2,13	2,235	245	6,0	0,725	2,5	2,479
240	3,8	1,565	2,41	2,235	258	6,6	0,785	3,08	3,093
250	4,0	1,755	2,66	2,479	271	7,0	0,845	3,55	3,644

Расчётные значения  $H_{пр}$ ( $Y1$ ) и  $H_{пр1}$ ( $Y2$ ) определялись из уравнений 9 и 10:

$$Y1 = 1,71 + 0,16 \cdot X1 + 0,266 \cdot X2 + 0,52 \cdot X3 \quad (9)$$

$$Y2 = 1,35 + 0,223 \cdot X1 + 0,395 \cdot X2 + 0,634 \cdot X3 \quad (10)$$

На основании обработки полученных данных и построенных графиков (рис. 7) видно, что воздействие дополнительной управляющей газовой струи способствует увеличению глубины проплавления, толщины и ширины слоёв многослойного сварного шва.

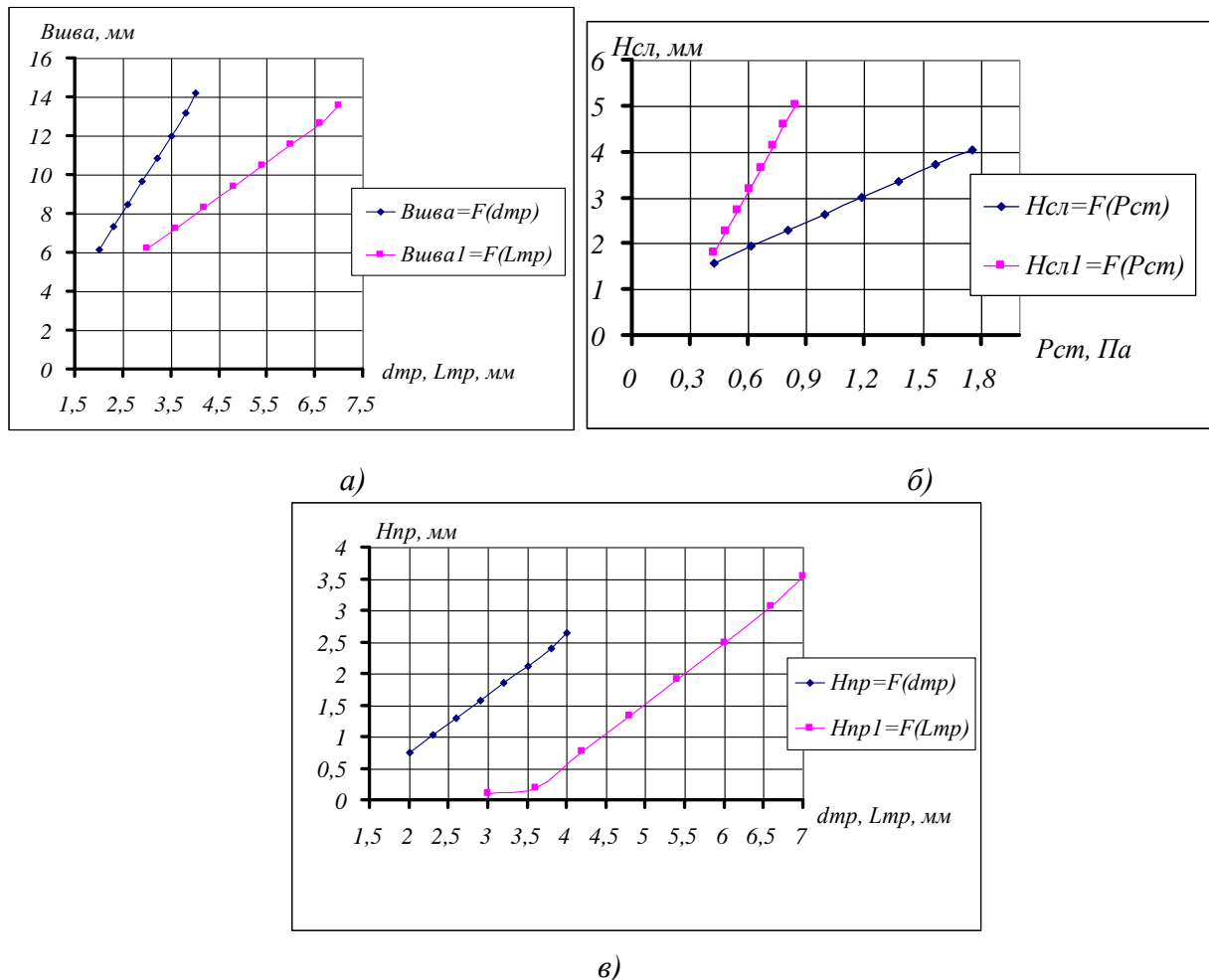


Рис. 7. Зависимость размеров сварного шва (ширины шва  $B_{шва}$  и глубины проплавления  $H_{пр}$ )

от диаметра от интенсивности воздействия управляющей дополнительной газовой струи:

а, в – соответственно ширины шва  $B_{шва}$  и глубины проплавления от диаметра сопла  $d$  и расстояния между неплавящимся электродом и дополнительным управляющим соплом  $L$ ;

б – толщины слоя шва от давления газовой струи  $P_{ст}$

Дополнительный управляющий газовый поток образует газовую заслонку в виде воронки в жидком металле сварочной ванны и тем самым препятствует движению потока жидкого металла из хвостовой части в центральную зону ванны и в зону сварочной дуги вдоль поверхности ванны, вытесняя жидкий металл на края щелевой разделки и приподнимает его на кромки, способствуя образованию мениска. Создавая газовую заслонку движению и попаданию жидкого металла под сварочную дугу, дополнительный газовый поток способствует, тем самым, уменьшению толщины жидкой прослойки под дугой и повышению влияния сварочной дуги на увеличение глубины проплавления основного металла и толщина слоя шва (рис. 7, б).

С увеличением диаметра дополнительного газового сопла увеличивается диаметр управляющей газовой струи, следовательно, и площади, на которую он воздействует. При сохранении давления газовой струи (увеличении расхода при увеличении диаметра управляющего сопла) газовая струя образует воздушную заслонку (воронку в жидком металле сварочной ванны) большего диаметра, тем самым, увеличивая влияние сварочного тока на глубину проплавления.

Увеличение эффекта воздействия дополнительного газового потока на ширину многослойного сварного шва при увеличении диаметра  $d$  в сравнении с увеличением расстояния  $L$  (рис. 7, а) связано с поднятием большего объёма жидкого металла газовой струёй на кромки щелевой разделки и дополнительным оплавлением их за счет тепла жидкого металла.

С увеличением расстояния между сварочной дугой и дополнительной управляющей газовой струёй увеличивается степень переохлаждения жидкого металла, происходит уменьшение температуры жидкого металла хвостовой части сварочной ванны, увеличение вязкости и уменьшение объёма жидкого металла на кромках щелевой разделки, соответственно, меньшим оплавлением их за счёт снижения тепла жидкого металла. Также в промежутке между сварочной дугой и газовой заслонкой при увеличении расстояния, увеличивается объём жидкого металла и происходит повышение толщины слоя сварного шва (рис. 7, б).

Из полученных результатов можно сделать вывод, что дополнительная газовая струя оказывает наибольшее влияние на размеры сварного шва и является наиболее эффективным средством управления формой сварного шва. При управляющем воздействии газовой струи уменьшается толщина жидкой прослойки под дугой, увеличивается глубина проплавления и снижается вероятность появления несплавлений.

#### Библиографический список

1. Штрикман, М.М. Определение оптимальной глубины проплавления при сварке по щелевому зазору с поперечными колебаниями дуги / М.М. Штрикман, А.С. Павлов // Сварочное производство. – 1983. – №3. – С. 26–28.
2. Штрикман, М.М. Кристаллизация шва при сварке по щелевому зазору с поперечными колебаниями электрода / М.М. Штрикман, А.С. Павлов // Автоматическая сварка. – 1983. – №6. – С. 56–58.
3. А.с.1323288 СССР. Способ дуговой сварки в защитных газах в узкую разделку с поперечными колебаниями электрода / М.М. Штрикман, А.С. Павлов, В.А. Колчин. 1987. БИ №26.
4. А.с.1480994 СССР. Способ дуговой сварки в защитных газах в узкую разделку с поперечными колебаниями неплавящимся электродом / А.С. Павлов, М.М. Штрикман. 1988. БИ №19.
5. Штрикман, М.М. Дуговая сварка с воздействием на сварочную ванну направленных газоструйных потоков / М.М. Штрикман, А.С. Павлов, А.Н. Сабанцев, В.Н. Егоров // Сварочное производство. – 1999. – №12. – С. 3–6.

6. Демянцевич, В.П. Особенности движения жидкого металла в сварочной ванне при сварке неплавящимся электродом / В.П. Демянцевич, В.И. Матюхин // Сварочное производство.- 1972. – №10. – С. 1–3.

*Дата поступления  
в редакцию 15.04. 2016*

**A.C. Pavlov<sup>1</sup>, N.M. Vanushkin<sup>2</sup>**

## **MULTILAYER WELD FORMATION WITH DIRECTIONAL GAS JET BY WELDING IN THE SLOTTED EDGE PREPARATION**

The Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alexeyev <sup>1</sup>,  
Joint-stock company Kovytkino electromechanical plant<sup>2</sup>

**Purpose:** To study the possibility of obtaining the quality welded joint of thick-walled pipes with the slotted edge preparation by the new process providing the multilayer weld formation weld necessary form.

**Approach:** An experimental study of the process of obtaining the quality welded joint with the slotted edge preparation using automatic argon-arc welding with additional directional gas jet has been performed.

**Findings:** The welding torch for this welding method has been developed. Processing of the experimental results by means of metallographic studies has been carried out also mathematical models based on relation between size weld and the parameters of the welding method have been made.

**Research implications:** This study has shown the influence the main parameters of the welding conditions as well as changes of size and positions of the gas nozzle on the layer formation of the joint.

**Value:** The proposed welding method provides obtaining of higher quality indicators of welded joint and is easier to implement than current welding methods.

*Key words:* slit edge preparation, directional gas nozzle, depth of penetration, thickness of interlayer liquid metal, automatic welding in shielding gases.

## НАШИ АВТОРЫ

### ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

**Асеева Наталья Владимировна** - канд. физ.-мат. наук, доцент, зав. кафедрой Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики»;  
naseeva@hse.ru

**Аристов Алексей Владиславович** – аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
drevnigtck@yandex.ru

**Бляхман Людмила Григорьевна** – ст. преподаватель Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики»;  
lblyahman@hse.ru

**Болоненков Александр Викторович** – магистрант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
vm@nntu.nnov.ru

**Громов Евгений Михайлович** – д-р физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики»;  
egromov@hse.ru

**Зеленский Владимир Павлович** – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
zelensky@nntu.nnov.ru

**Ерлыкина Елена Ивановна** - д-р биол. наук, профессор Нижегородской государственной медицинской академии; vm@nntu.nnov.ru

**Карпычев Владимир Юрьевич** – д-р, техн. наук, профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
kavlyr@yandex.ru

**Кожевникова Татьяна Вадимовна** – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
physics@nntu.nnov.ru.

**Козлова Яна Юрьевна** – студент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
vm@nntu.nnov.ru

**Калинин Михаил Андреевич**, студент второго курса магистратуры  
michaelkalinn@gmail.com

**Матысик Олег Викторович** – канд. физ.-мат. наук, доцент, зав. кафедрой Брестского государственного университета им. А.С. Пушкина.  
matysikoleg@mail.ru

**Мошкова Альбина Николаевна** – д-р биол. наук, профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
vm@nntu.nnov.ru

**Оносова Ирина Вадимовна** – сотрудник Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики»;  
vonosova@hse.ru

**Соколова Элеонора Станиславовна** – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
essokolowa@gmail.com

**Тютин Виктор Владимирович** - канд. физ.-мат. наук, доцент, зам.зав. кафедрой Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики»;  
vtyutin@hse.ru

**Царапкина Юлия Игоревна** – студент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
vm@nntu.nnov.ru

**Шагалова Полина Анатольевна** – ассистент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
polli-shagalova@yandex.ru

**Шемарулин Илья Александрович**, студент второго курса магистратуры  
element1417@gmail.com

**Щербатюк Татьяна Григорьевна** – д-р биол. наук, проф. зав. кафедрой Нижегородской государственной медицинской академии; ozone\_stg@mail.ru

**Яшанова Мария Игоревна** – зав. группой биомаркеров гетерогенных патологий Нижегородской государственной медицинской академии;  
yammi2006@rambler.ru

### ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

**Ахлестин Пётр Владимирович** – аспирант Волжского государственного университета водного транспорта;  
mitohondrius@yandex.ru

**Басов Анатолий Аркадьевич** – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; Basov.AA@yandex.ru

**Вихорев Николай Николаевич** - магистр техники, инженер, аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева; nnvikhorev@gmail.com

**Гордеев Борис Александрович** – д-р техн. наук, профессор, гл. научн. сотр. Института проблем машиностроения РАН; gord349@mail.ru

**Кайнова Анастасия Валерьевна** – студент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; anastasia.d@nstu.edu.com

**Коробко Григорий Иванович** - канд. техн. наук, доцент Волжского государственного университета водного транспорта; tv-out@narod.ru

**Кузьма Матвей Михайлович** - студент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; Kuzma.matvey@mail.ru

**Лебедев Василий Владимирович** - канд. техн. наук, сотрудник ООО «СТАНДАРТ»; valeb1@yandex.ru

**Панфилов Иван Сергеевич** - магистр техники, инженер ОАО «НПП «Полет», аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева; mfnn@mail.ru

**Панфилов Сергей Юрьевич** - канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; yurevich.sergej@mail.ru

**Плехов Александр Сергеевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры НГТУ им. Р.Е. Алексеева; arplehov@mail.ru.

**Минеев Иван Владимирович** - студент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; ivan.m@nstu.edu.com

**Охулков Сергей Николаевич** - канд. физ.-мат. наук, старш. научн. сотрудник Института проблем машиностроения РАН; oxulkovs@mail.ru,

**Субарев Михаил Алексеевич** – студент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; specblack@yandex.ru

**Титов Дмитрий Юрьевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры НГТУ им. Р.Е. Алексеева; arplehov@mail.ru

**Хорьков Сергей Васильевич** – канд. физ.-мат. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; comphys@nntu.nnov.ru

**Худяков Илья Сергеевич** - студент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; ilia.kh@nstu.edu.com

**Чивенков Александр Иванович** - канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой НГТУ им. Р.Е. Алексеева; Chyvenkov@mail.ru

**Яшина Алла Николаевна** - канд. физ.-мат. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; alla.nic.yashina@gmail.com

### **МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО**

**Беляков Владимир Викторович** – д-р техн. наук, профессор, начальник УНИИИР НГТУ им. Р.Е. Алексеева; nauka@nntu.nnov.ru

**Бушуева Марина Евгеньевна** – канд. техн. наук, доцент (кафедры информатики и систем управления) НГТУ им. Р.Е. Алексеева, декан ФДП и ДОУ НГТУ им. Р.Е. Алексеева; bme@nntu.nnov.ru

**Ванюшкин Николай Михайлович** – инженер-технолог 1 категории АО Ковылкинского электромеханического завода, соискатель НГТУ им. Р.Е. Алексеева; kolan555@mail.ru

**Зезюлин Денис Владимирович** – канд. техн. наук, старший преподаватель НГТУ им. Р.Е. Алексеева; balakhnaman@gmail.com

**Кострова Зоя Александровна** – аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева; zzz2015@yandex.ru

**Колотилин Владимир Евгеньевич** - канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; transfer@nntu.nnov.ru

**Кондратьева Лилия Юрьевна** - аспирант Национального университета кораблестроения им. адмирала Макарова (г. Николаев, Украина); muschil@mail.ru

**Козлов Игорь Константинович** - канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; monitorweld@rambler.ru



---

**Ломакин Владимир Владимирович** – канд.техн.наук, доцент Университета машиностроения (Москва);

avt@mami.ru

**Макаров Владимир Сергеевич** – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; Makvl2010@gmail.com

**Михеев Артур Владимирович** – магистрант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

micheev-av@mail.ru

**Трофимов Андрей Сергеевич** - магистрант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

trof-andreyu@rambler.ru

**Нагорных Сергей Николаевич** – канд. физ.-мат. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; algoritm@sandy.ru

**Нагорных Елена Владимировна** – канд. физ.-мат. наук, доцент, НГУ им. Н.И. Лобачевского; pavlyonkova@mech.unn.ru

**Павлов Александр Сергеевич** – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; as-pavlov@list.ru

**Шабанов Андрей Александрович** – аспирант Университета машиностроения (Москва); avt@mami.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.nnov.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 экспертизы, выпиской из заседания кафедры, рекомендующей статью к опубликованию, сведениями об авторах и рецензией.
- 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**

**№ 2 (113)**

Редакторы: **Н.Н. Максимова, О.В. Пугина**  
Технический редактор **Т.П. Новикова**

*Редакция:*

603950, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24.  
rsl@nntu.nnov.ru

Подписано в печать 09.06.2016. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Бумага офсетная.

Печать трафаретная. Усл. печ. л. 22,0. Тираж 300 экз. Заказ .

---

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева.  
Типография НГТУ.

Адрес университета и полиграфического предприятия:  
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24.

**Индекс 44757**  
**Объединенный каталог «Пресса России»**

**Свидетельство о регистрации**  
**периодического печатного издания**  
**ПИ № ФС 77-56417 от 11 декабря 2013**