

Издается с ноября 2013 года  
Выходит один раз в квартал

№ 1 (10)

Март 2016

# ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

УЧРЕДИТЕЛЬ – САРАТОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ГАГАРИНА Ю.А.

Главный редактор

Зам. главного редактора

Ответственный секретарь

**АРХАНГЕЛЬСКИЙ ЮРИЙ СЕРГЕЕВИЧ**

**БЕКРЕНЕВ НИКОЛАЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ**

**ВЫРЫХАНОВ ДЕНИС АЛЕКСАНДРОВИЧ**

## Редакционная коллегия

<b>И.Н. АНТОНОВ</b>	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
<b>Ю.С. АРХАНГЕЛЬСКИЙ</b>	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
<b>Н.В. БЕКРЕНЕВ</b>	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
<b>В.Б. ДЕМИДОВИЧ</b>	д.т.н., профессор, СПбГЭУ (ЛЭТИ), Санкт-Петербург
<b>Л.С. ЗИМИН</b>	д.т.н., профессор, СамГТУ, Самара
<b>Н.И. ЛОВЦОВА</b>	д.с.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
<b>В.Н. ЛЯСНИКОВ</b>	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
<b>А.Н. МАКАРОВ</b>	д.т.н., профессор, ТГТУ, Тверь
<b>Г.А. МОРОЗОВ</b>	д.т.н., профессор, КНИТУ имени А.Н. Туполева (КАИ), Казань
<b>Ю.П. ПЕРЕЛЫГИН</b>	д.т.н., профессор, ПГУ, Пенза
<b>А.Н. ПЛОТНИКОВ</b>	д.э.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
<b>В.П. РУБЦОВ</b>	д.т.н., профессор, НИУ «МЭИ», Москва
<b>Ф.Н. САРАПУЛОВ</b>	д.т.н., профессор, УрФУ, Екатеринбург
<b>Б.К. СИВЯКОВ</b>	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
<b>А.А. СЫТНИК</b>	д.т.н., профессор, первый проректор СГТУ имени Гагарина Ю.А.
<b>Ю.Б. ТОМАШЕВСКИЙ</b>	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
<b>Г.Г. УГАРОВ</b>	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
<b>В.Н. ХМЕЛЕВ</b>	д.т.н., профессор, БТИ, Бийск
<b>В.А. ЦАРЕВ</b>	д.т.н., профессор, СГТУ Гагарина Ю.А., Саратов
<b>Д.А. ВЫРЫХАНОВ</b>	к.т.н., СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

*Since November 2013*  
*Published Quarterly*

**№ 1 (10)**  
**March 2016**

# **JOURNAL OF ELECTROTECHNICS**

**Scientific and Technical Publication**

The journal is founded by Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Chief Editor**

**Assistant to the Chief Editor**

**Chief Executive Officer**

**ARKHANGELSKIY YURIY SERGEEVICH**

**BEKRENEV NIKOLAY VALERYEVICH**

**VIRIKHANOV DENIS ALEKSANDROVICH**

## **Editorial Board Members**

**I.N. ANTONOV**

Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**YU.S. ARKHANGELSKIY**

Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**N.V. BEKRENEV**

Dr. Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**V.B. DEMIDOVICH**

Dr.Sc., Professor, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

**L.S. ZIMIN**

Dr.Sc., Professor, Samara State Technical University

**N.I. LOVTSOVA**

Dr. Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**V.N. LYASNIKOV**

Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**A.N. MAKAROV**

Dr.Sc., Professor, Tver State Technical University

**G.A. MOROZOV**

Dr.Sc., Professor, Kazan National Research Technological University

**YU.P. PERELYGIN**

Dr.Sc., Professor, Penza State University

**A.N. PLOTNIKOV**

Dr. Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**V.P. RUBTSOV**

Dr.Sc., Professor, National Research University "Moscow Power Engineering Institute"

**F.N. SARAPULOV**

Dr.Sc., Professor, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, Ekaterinburg

**B.K. SIVYAKOV**

Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**A.A. SYTNIK**

Dr.Sc., Professor, First Vice-Rector, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**YU.B. TOMASHEVSKY**

Dr. Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**G.G. UGAROV**

Dr. Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**V.N. KHMELEV**

Dr.Sc., Professor, Biysk Technological Institute

**V.A. TSAREV**

Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**D.A. VIRIKHANOV**

PhD, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

## СОДЕРЖАНИЕ

### ЭЛЕКТРОТЕРМИЯ

<b>Архангельский Ю.С.</b> Потенциал СВЧ электротехнологии .....	5
<b>Юдина В.О., Архангельский Ю.С.</b> Протяжные СВЧ электротехнические установки .....	9
<b>Маркелова К.Д., Архангельский Ю.С.</b> Спасение книг, пострадавших при тушении пожара .....	13
<b>Гусева Н.В., Новичков С.В.</b> Особенности бизнес-планирования в электротермии .....	18

### ЭЛЕКТРОФИЗИКА

<b>Бекренев Н.В., Злобина И.В.</b> Промышленные установки ультразвуковой промывки и очистки прецизионных деталей .....	26
<b>Сарсенгалиев А.М., Злобина И.В., Карачаровский В.Ю., Бекренев Н.В.</b> Исследование ультразвуковой очистки внутренних полостей и каналов в изделиях транспортного и энергетического машиностроения контактным методом .....	35

### ЭЛЕКТРОХИМИЯ

<b>Райгородский В.М.</b> Электрохимические методы восстановления измененных или уничтоженных маркировочных обозначений на блоках двигателей транспортных средств, изготовленных из серого чугуна .....	43
--	----

### ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

<b>Вырыханов Д.А.</b> Моделирование рабочих процессов электродинамического преобразователя энергии в режиме согласного включения обмоток в единый электрический контур .....	51
<b>Менщиков И.А.</b> Оценка технического состояния электрических машин постоянного тока по форме и уровню импульсных значений тока цепи якоря .....	58
<b>Угаров Г.Г., Мошкин В.И.</b> Электромагнитогидравлические машины ударного и вибрационного действия .....	63
<b>Вырыханов Д.А.</b> Вариационная модель процесса электромеханического преобразования энергии .....	67

### ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

<b>Ларин Е.А.</b> Парогазовые технологии производства электрической и тепловой энергии. перспективы и направления развития и исследований .....	72
<b>Артюхов И.И., Молот С.В., Матвеева Е.Ю.</b> Влияние частотно-регулируемого электропривода на питающую сеть при несимметрии напряжений .....	80
<b>Барышникова Е.С., Васильев Д.А., Иващенко В.А., Томашевский Ю.Б.</b> Интеллектуальная модель прогнозирования электрических нагрузок промышленного предприятия .....	87
<b>Балакин М.М., Степанов С.Ф.</b> Расчет ветровых нагрузок на мультимодульную ветроэлектроустановку в Саратовской области .....	92
<b>Тимофеев М.Н., Томашевский Ю.Б.</b> Обоснование выбора систем с возобновляемыми источниками электроэнергии на базе моделирования природного энергетического потенциала .....	96

### МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

<b>Гестрин С.Г., Щукина Е.В.</b> Математическое моделирование солитонного возбуждения одномерного дефекта кристаллической структуры .....	102
<b>Злобина И.В., Бекренев Н.В.</b> Воздействие СВЧ электромагнитного поля на объекты 3D печати из композиционных порошковых материалов .....	110

### ЭЛЕКТРОНИКА

<b>Тищенко О.Д., Зоркин А.Я., Родионов И.В., Тищенко А.А.</b> Технология изготовления импрегнированных катодов для усилителей прямой волны М-типа с пониженной входной мощностью .....	116
--	-----

### ЛЕТОПИСЬ

<b>Сальников А.Н.</b> Гравитационные волны – теория или реальность? .....	119
К сведению авторов .....	126

## CONTENTS

### ELECTROTHERMY

- Arkhangelskiy Yu.S.** The Potential of Microwave Electrotechnology ..... 5
- Yudina V.O., Arkhangelskiy Yu.S.** Broaching Microwave Electrothermal Installations ..... 9
- Markelova K.D., Arkhangelskiy Yu.S.** Salvation of Books Injured in Fighting Fires ..... 13
- Guseva N.V., Novichkov S.V.** The Features of Business Planning in the Electrothermy ..... 18

### ELECTROPHYSICS

- Bekrenev N.V., Zlobina I.V.** Plants of Ultrasonic Washing and Cleaning of Precision Details ..... 26
- Sarsengaliyev A.M., Zlobina I.V., Karacharovskiy V.Yu., Bekrenev N.V.** Research of Ultrasonic Cleaning of Internal Cavities and Channels in Products of Transport and Power Mechanical Engineering by the Contact Method ..... 35

### ELECTROCHEMISTRY

- Raigorodskiy V.M.** Electrochemical Methods of Restoration of Changed or Destroyed Marked Indications on the Engine Blocks of Vehicles Manufactured from Gray Cast Iron ..... 43

### ELECTROMECHANICS

- Vyrykhanov D.A.** Modeling Workflows Electrodynamic Energy Converter in the Mode Consonant-Breaker in a Single Electric Circuit ..... 51
- Menshikov I.A.** Assessment of Technical Condition of Electrical Machines DC in Shape and Level of the Pulse Current in the Armature Circuit ..... 58
- Ugarov G.G., Moshkin V.I.** Percussive and Vibration Electromagnetic Hydraulic Machines ..... 63
- Vyrykhanov D.A.** Variational Model of the Process Electromechanical Energy Conversion ..... 67

### ELECTRIC POWER SUPPLY

- Larin E.A.** Combined-Cycle Technology of Production of Electric and Thermal Energy. Prospects and Directions of Development and Research ..... 72
- Artyukhov I.I., Molot S.V., Matveeva E.Yu.** Effect of Variable-Frequency Electric Drive on the Power Source During the Voltage Unbalance ..... 80
- Baryshnikova E.S., Vasiliev D.A., Ivashchenko V.A., Tomashevskiy Yu.B.** Combined Model with Elements Fuzzy Inference to Predict the Electrical Loads Industrial Enterprises ..... 87
- Balakin M.M., Stepanov S.F.** The Calculation of Wind Loads on a Wind-Driven Multi-Module in the Saratov Region ..... 92
- Timofeev M.N., Tomashevskiy Yu.B.** The Rationale for the Selection of Systems with Renewable Power Sources Based Simulation of Natural Energy Potential ..... 96

### MATERIALS SCIENCE

- Gestrin S.G., Schukina E.V.** Mathematical Modeling of Soliton Excitations with Strings of Atoms in the Dislocation Core ..... 102
- Zlobina I.V., Bekrenev N.V.** Impact of the Microwave Oven of the Electromagnetic Field on Objects of 3D Press from Composite Powder Materials ..... 110

### ELECTRONICS

- Tischenko O.D., Zorkin A.J., Rodionov V.I., Tishchenko A.A.** Technology for Manufacturing Impregnated Cathodes for Direct Wave Amplifier M-Type with Low Power Input ..... 116

### CHRONICLE

- Salnikov A.N.** Gravitational Waves – Theory or Reality? ..... 119
- Information for Authors ..... 126

# ЭЛЕКТРОТЕРМИЯ

УДК 621.365.5

## ПОТЕНЦИАЛ СВЧ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

Ю.С. Архангельский

## POTENTIAL OF THE MICROWAVE ELECTROTECHNOLOGY

Yu.S. Arkhangelskiy

*Рассмотрен научно-технический потенциал, накопленный СВЧ электротехнологией за годы исследований применения СВЧ электромагнитных колебаний в технологических процессах обработки диэлектриков.*

Ключевые слова: СВЧ электротехнологии, перспективы развития, потенциал

Успехи электроники в освоении диапазона сверхвысоких частот (СВЧ) позволили использовать энергию СВЧ электромагнитных колебаний для радиолокации, а позднее и для термообработки диэлектриков. В 60 – 80-е годы XX в. в электротермии сложилось новое направление – СВЧ диэлектрический нагрев (СВЧ электротермия). В 60 – 70-е годы интерес в СВЧ нагреву, как тогда говорили, был ажиотажным, но в 90-е годы он упал, потому что ожидаемого вытеснения СВЧ электротермическими установками установок с другим энергоподводом не произошло, а в 90-е годы, когда в нашей стране порвались многие научно-технические связи, исследования в области СВЧ электротермии сохранились разве что в нескольких вузах. Но они шли, и сейчас можно говорить о сложившихся теоретических основах СВЧ диэлектрического нагрева, весьма развитом представлении о конструкциях СВЧ электротермических установок и их возможностях [1 - 16]. Когда было установлено наличие так называемой нетепловой

*The paper considers the scientific and technical potential accumulated in the area of the UHF electric technology over the years of research into application of microwave electromagnetic oscillations for technological processes relating dielectric treatment.*

Keywords: microwave electrotechnology, development prospects, potential

СВЧ модификации полимеров [17], стали говорить об СВЧ электротехнологии.

Сейчас, на наш взгляд, есть основание говорить о будущем СВЧ электротехнологии с тревогой. Большие капиталовложения в первую очередь из-за высоких цен на источники СВЧ энергии, которые надо вложить в реализацию технологических процессов с использованием СВЧ электротехнологических установок, являются причиной вытеснения их с рынка технологического оборудования. Переход высшей школы на бакалаврские учебные планы снизил уровень профессиональной подготовки молодого поколения электротехнологов. Интерес к научным исследованиям среди студентов и молодых преподавателей, на наш взгляд, в последние годы снизился, а кадровая политика в вузах направлена на омолаживание профессорско-преподавательского состава.

О проблемах, вызовах и угрозах СВЧ электротехнологии сказано, например, в работах [18, 19]. Так, за десятилетия научных исследований и опытно-конструктор-

ских разработок в области СВЧ электро-технологии сформулирована и решена самосогласованная краевая задача электродинамики, тепломассопереноса и термомеханики [6, 7, 10, 11], позволившая построить математическое моделирование технологических процессов в СВЧ электромагнитном поле [7, 11-16], проведен синтез всех известных типов рабочих камер [7, 13, 20], разработаны система технико-экономических расчетов структуры и параметров установки и ее элементной базы [8, 9, 21-23], методы проектирования СВЧ электротермических установок [24], разнообразные компьютерные программы, используемые при проектировании СВЧ установок (например, [25]), рассмотрены вопросы измерений в СВЧ электротехнологических установках [26, 27].

Современный потенциал СВЧ электро-технологии позволяет оценить целесообразность проектирования СВЧ электротермической установки, оптимизировать структуру и параметры установки и ее элементов, рассчитать геометрию оптимальной по технологическим параметрам рабочей камеры, выбрать СВЧ генератор и его мощность, провести математическое моделирование технологического процесса, провести необходимый эксперимент, то есть создать установку, которая при ее эксплуатации даст спрогнозированную чистую прибыль.

Перспективными, на наш взгляд, направлениями и темами исследований в области СВЧ электротехнологии являются:

- применение СВЧ электротехнологии в атомной энергетике, в нефтяной и газовой промышленности, в машино- и приборостроении, в строительстве и производстве строительных материалов, в пищевой промышленности, в сельском хозяйстве и переработке сельскохозяйственной продукции, в животноводстве, птицеводстве и пчеловодстве, в фармакологии, в производстве новых материалов, в нанотехнологии;

- тепло- и массопередача в СВЧ электромагнитном поле;

- термомеханические процессы в СВЧ электромагнитном поле;
- выравнивание нагрева по объему диэлектрика;
- рабочие камеры на полосковом волноводе;
- транспортные системы СВЧ электротехнологических установок;
- системы управления и измерения в СВЧ электротехнологии;
- технико-экономический аспект СВЧ электротехнологии;
- социальный аспект СВЧ электротехнологии;
- высокотемпературные СВЧ электротермические установки;
- ущерб и резервирование в СВЧ электротехнологии;
- конкурентноспособность СВЧ электротехнологических установок;
- предотвращение СВЧ излучений из рабочих камер;
- обработка в СВЧ электротехнологических установках взрывоопасных и пожароопасных объектов;
- обработка в СВЧ электромагнитном поле диэлектриков с большим объемом и поверхностью;
- измерения в СВЧ электротехнологии;
- программное обеспечение СВЧ электротехнологии;
- источники питания СВЧ генераторов источников СВЧ энергии;
- надежность СВЧ электротехнологического оборудования;
- проектирование СВЧ электротехнологических установок на базе теории риска;
- применение СВЧ энергии в медицине;
- нетепловая СВЧ модификация полимеров.

Приведенный список умышленно не структурирован и не исчерпывает возможные направления и темы работ в области СВЧ электротехнологии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Пюшнер Г.** Нагрев энергией сверхвысоких частот / Г. Пюшнер. – М.: Энергия, 1968. 311 с.
2. СВЧ энергетика / Под ред. Э. Окресса. – М.: Изд-во "Мир", 1971. Т 1-3.
3. **Рогов И.А.** Сверхвысокочастотный и инфракрасный нагрев пищевых продуктов / И.А. Рогов, С.В. Некрутман. – М.: Пищевая промышленность, 1976. 210с.
4. **Рогов И.А.** Техника сверхвысокочастотного нагрева пищевых продуктов / И.А. Рогов, С.В. Некрутман, Г.В. Лыпов. – М.: Легкая и пищевая промышленность. 1981. 199 с.
5. **Рогов И.А.** Электрофизические методы обработки пищевых продуктов / И.А. Рогов. – М.: Агропромиздат, 1988. 325 с.
6. **Архангельский Ю.С.** Сверхвысокочастотные нагревательные установки для интенсификации технологических процессов / Ю.С. Архангельский, И.И. Девяткин. – саратов: Сарат. ун-т, 1983. 140 с.
7. **Архангельский Ю.С.** СВЧ электротермия / Ю.С. Архангельский. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 1998. 408 с.
8. **Толстов В.А.** Эффективность электротехнологических установок / В.А. Толстов, Ю.С. Архангельский. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2000. 148 с.
9. **Архангельский Ю.С.** Элементная база СВЧ электротермического оборудования / Ю.С. Архангельский, В.А. Воронкин. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2003. 212 с.
10. **Архангельский Ю.С.** Установки сверхвысокочастотного диэлектрического нагрева / Ю.С. Архангельский. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2010. 280 с.
11. **Архангельский Ю.С.** Справочная книга по СВЧ электротермии / Ю.С. Архангельский. – Саратов: Изд-во "Научная книга", 2011. 560 с.
12. **Архангельский Ю.С.** Электрофизические методы СВЧ обработки / Ю.С. Архангельский и др. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т. 2014. 196 с.
13. **Архангельский Ю.С.** Камеры с бегущей и со стоячей волной / Ю.С. Архангельский, Е.В. Колесников. – Саратов: Буква. 2015. 232 с.
14. **Сатаров Н.К.** Микроволновые установки с бегущей волной для термообработки диэлектрических материалов / И.К. Сатаров, В.В. Комаров. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т. 2000. 120 с.
15. **Морозов Г.А.** Низкоинтенсивные СВЧ технологии (проблемы и реализация) / Г.А. Морозов и др. – М.: Радиотехника, 2003. 112 с.
16. **Анфеногентов В.И.** Математическое моделирование СВЧ нагрева диэлектриков / В.И. Анфиногентов. – Казань: Казан. гос. техн. ун-т. 2006. 140 с.
17. СВЧ модификация полимеров / Ю.С. Архангельский и др. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т. 2012. 288 с.
18. **Архангельский Ю.С.** Перспективы СВЧ электротехнологии / Ю.С. Архангельский, Е.В. Колесников // Вестник СГТУ, 2010, №3(47). С. 100-103.
19. **Архангельский Ю.С.** О современных проблемах СВЧ электротехнологии / Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии, 2014. №2(3) С. 41 – 46.
20. **Архангельский Ю.С.** Камеры лучевого типа СВЧ электротехнологических установок / Ю.С. Архангельский и др. – Саратов: Изд-кий дом "Полиграфия Поволжья", 2010. 229 с.
21. **Гришина Е.М.** Технико-экономическая оптимизация СВЧ электротермического оборудования, собранного на камерах с бегущей волной / Е.М. Гришина, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии, 2014. №1(2). С. 33- 35.
22. **Гришина Е.М.** Технико-экономическая оптимизация структуры и параметров СВЧ электротермического оборудования на камерах лучевого типа / Е.М. Гришина, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии, 2013, №1(1). С. 34 – 36.
23. **Гришина Е.М.** Технико-экономическая оптимизация СВЧ электротермического оборудования, собранного на камерах со стоячей волной / Е.М. Гришина, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии, 2013, №2(3). С. 17 – 20.

24. **Колесников Е.В.** Проектирование электротехнологических установок / Е.В. Колесников. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2006. 283 с.

25. **Архангельский Ю.С.** Компьютерное моделирование СВЧ электротермических процессов и установок / Ю.С. Архангельский, С.В. Тригорлый. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2006. 212 с.

26. **Архангельский Ю.С.** Измерения в СВЧ электротехнологии / Ю.С. Архангельский, С.Р. Калганова. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2008. 152 с.

27. **Архангельский Ю.С.** Измерения в СВЧ электротехнологических установках / Ю.С. Архангельский, С.Г. Калганова, Р.К. Афаров. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2008. 262.

---

**Архангельский Юрий Сергеевич** – заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор кафедры «Электропитание промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Yuri S. Arkhangelskiy** – Dr.Sc., Professor, Honored Master of Sciences of the Russian Federation, Department of Power Supply for Industrial Facilities, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

*Статья поступила в редакцию 09.02.16, принята к опубликованию 19.02.16*

### УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Редакция публикует при каждой статье краткие сведения об авторах. В связи с этим просим вас при направлении статьи в редакцию сообщать:

1. Полные имена и отчества всех авторов.
2. Место работы и должность.

Кроме того, напоминаем, что на каждую статью следует представлять краткий (4-5 предложений) реферат на русском и английском языках (включая название), а также ключевые слова.

## ПРОТЯЖНЫЕ СВЧ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

В.О. Юдина, Ю.С. Архангельский

## BROACHING MICROWAVE ELECTROTHERMAL INSTALLATIONS

V.O. Yudina, Yu.S. Arkhangelskiy

Рассмотрены компоновка, элементная база и расчет протяжных СВЧ электротехнологических установок для модификации тонких протяжных диэлектрических материалов и изделий.

Ключевые слова: протяжная СВЧ электротермическая установка, транспортная система, электропривод, электродвигатель

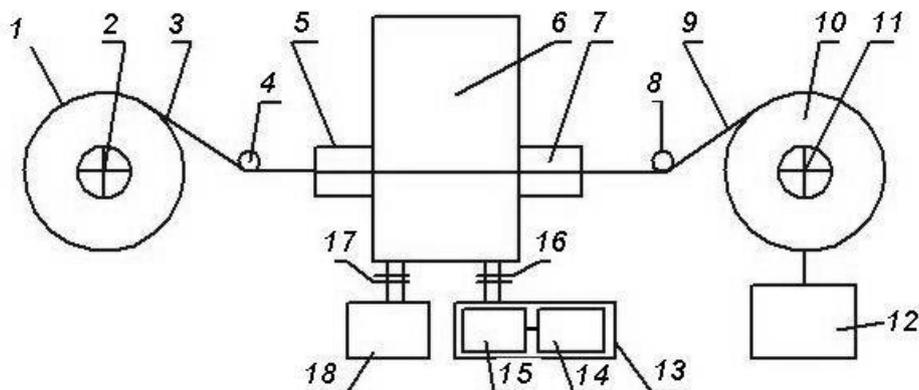
Протяжная СВЧ электротехнологическая установка предназначена для модификации тонких диэлектрических материалов и изделий, таких как бумага, нити, волокна и т.п. В процессе обработки модифицируемый объект непрерывно перемещается через рабочую камеру с помощью размоточно-намоточного механизма. Под действием СВЧ электромагнитного поля в зависимости от технологического процесса происходит тепловая или нетепловая модифи-

We consider the configuration, hardware components and calculation of the broaching microwave electro-technological installations used to modify the broaching thin dielectric materials and products.

Keywords: broaching microwave electro-thermal installation, transportation system, electric drive, engine

кация диэлектрического объекта [1, 2]. При тепловой модификации изменяются температура, влажность, а при нетепловой – у объекта улучшаются какие-либо свойства или появляются новые, причем при незначительном нагреве или вовсе без заметного повышения температуры.

Компоновка протяжной СВЧ электротехнологической установки показана на рис. 1.



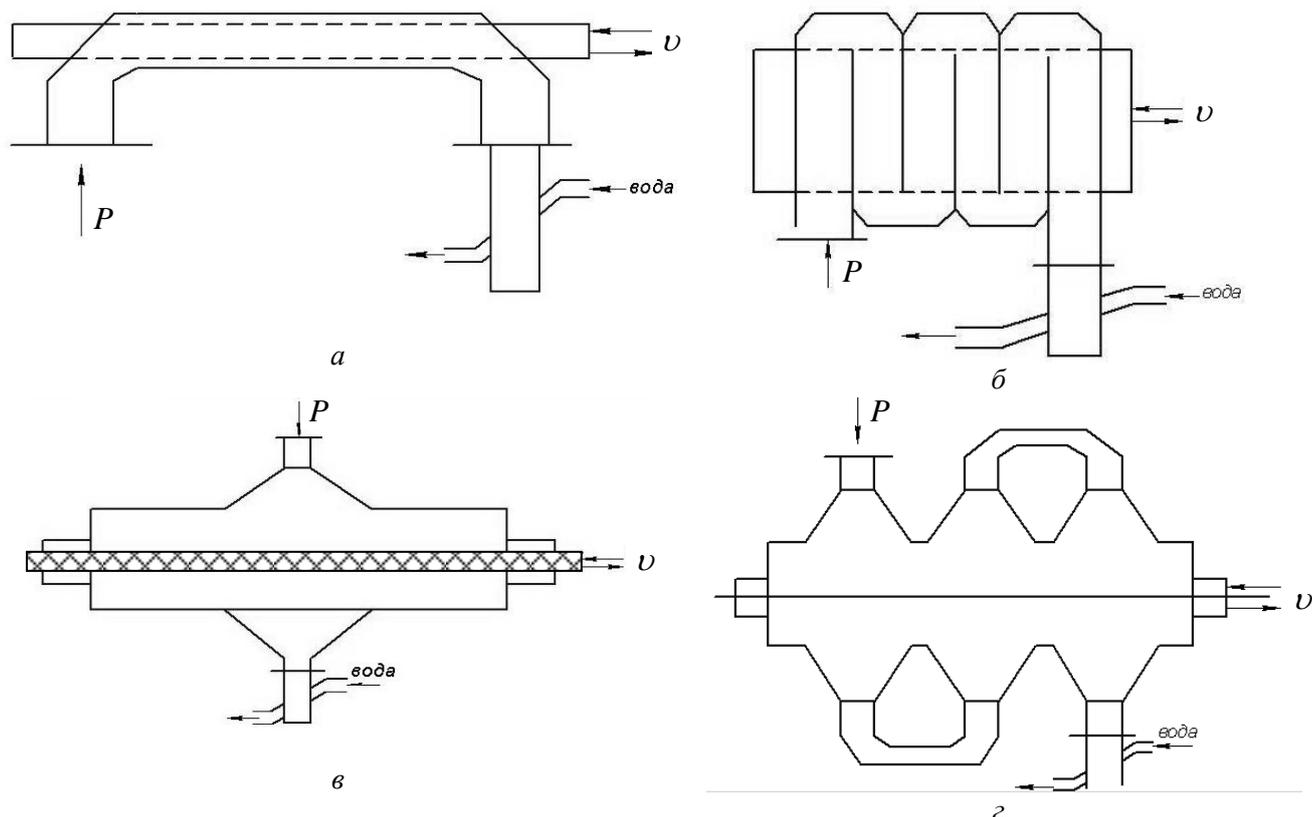
**Рис. 1.** Протяжная СВЧ электротехнологическая установка (1, 10 – рулоны диэлектрика; 2, 11 – барабаны; 3, 9 – лента диэлектрика; 4, 8 – направляющие ролики; 5, 7 – шлюзы рабочей камеры; 6 – рабочая камера; 12 – электропривод; 13 – источник СВЧ энергии; 14 – источник питания СВЧ генератора; 15 – СВЧ генератор; 16 – фланцы соединения СВЧ генератора с рабочей камерой; 17 – фланцы соединения рабочей камеры с воздуходувкой; 18 – воздуходувка)

Преимуществом протяжных СВЧ электротехнологических установок являются высокая равномерность модификации и, как следствие, высокое качество обработки.

Установка состоит из следующих элементов: рабочая камера 6, источник СВЧ энергии 13, размоточно – намоточный механизм 2, 4, 8, 11, 12, воздуходувка 18.

Источник СВЧ энергии 13 традиционно состоит из СВЧ генератора на магнетроне 15 и источника питания магнетрона 14 [1 - 3]. Каких - либо особых требований к источнику СВЧ энергии здесь, как правило, не предъявляется.

Рабочая камера 6 собрана на камере с бегущей волной (КБВ) (рис. 2 а, б) или на камере лучевого типа (КЛТ) (рис. 2 в, г).



**Рис. 2.** Рабочие камеры протяжных СВЧ электротехнологических установок: а – КБВ на прямоугольном волноводе; б – КБВ на прямоугольном меандровом волноводе; в – КЛТ с рупорным излучателем; г – КЛТ с меандровой рупорной системой

КБВ строится на прямоугольном волноводе, и если ширина ленты диэлектрика меньше ширины узкой стенки волновода, то ленту можно транспортировать внутри волновода вдоль его оси в середине широкой стенки и параллельно узкой (рис. 2 а).

Если ширина обрабатываемой ленты диэлектрика больше ширины узкой стенки волновода, то ленту транспортируют через продольные щели в широких стенах волновода, а сам волновод изогнут меандром (рис. 2 б).

В КЛТ (рис. 2 в, г) для увеличения КПД по использованию СВЧ энергии может быть

использована меандровая рупорная система (рис. 2 г), но при этом увеличиваются длина и металлоемкость рабочей камеры.

Если в рабочей камере распространение СВЧ энергии совпадает с направлением транспорта обрабатываемого диэлектрика, то установка называется установкой попутного типа, а если не совпадает, то установкой встречного типа.

Приводная система протяжного механизма состоит из электродвигателя, редуктора, ведущего барабана, пассивного барабана и натяжной ленты [4]. Лента может

поддерживаться равномерно расположенными по всей длине транспортной системы роликовыми опорами.

К воздухоподувке каких-либо специальных требований не предъявляется, но рабочая камера должна иметь отверстия для удаления паров.

Рассчитываются в подобных СВЧ электротехнологических установках в первую очередь длина рабочей камеры по направлению движения обрабатываемого объекта, мощность СВЧ генератора, мощность электродвигателя размоточно – намоточного механизма, целесообразность применения установки для реализации данного технологического процесса и ее экономическая эффективность.

Весьма строгие методы расчета рабочих камер на КБВ и КЛТ приведены в работах [5, 6], однако на стадии первых оценок целесообразности проектирования таких установок расчеты могут быть существенно упрощены. Так, длина рабочей камеры, показанной на рис. 2 а, может быть в первом приближении найдена, если задаться КПД по использованию СВЧ энергии, по соотношению:

$$L = \frac{1}{2\alpha} \ln(1 - \eta) , \quad (1)$$

где  $\eta$  – КПД установки по использованию СВЧ энергии,  $\alpha$  – коэффициент затухания в волноводе с тонким слоем диэлектрика, расположенным на середине широких стенок параллельно узким стенкам, причем [1]

$$\alpha = \frac{\pi^2 d \varepsilon' \operatorname{tg} \delta}{2a\lambda \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}} . \quad (2)$$

Здесь  $d$  – толщина слоя обрабатываемого диэлектрика;  $\varepsilon'$  и  $\operatorname{tg} \delta$  – его относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь,  $a$  – ширина широкой стенки волновода;  $\lambda$  – длина волны СВЧ генератора.

Мощность СВЧ генератора при первых оценочных расчетах может быть определе-

на по соотношению

$$P = Gc(T - T_o) + G_u r , \quad (3)$$

где  $G = \frac{m}{\tau}$ ,  $G_u = \frac{m_o}{\tau}$ ;  $m$ ,  $m_o$  – масса обрабатываемого диэлектрика, находящегося в рабочей камере и масса воды, которую надо испарить из объема диэлектрика, находящегося в рабочей камере;  $c$  – удельная теплоемкость диэлектрика;  $T_o$  – начальная температура диэлектрика;  $T$  – температура, до которой надо нагреть диэлектрик;  $\tau = \frac{L}{v}$  – время обработки диэлектрика;  $L$  – длина рабочей камеры;  $v$  – скорость движения диэлектрика через рабочую камеру.

Если в установке происходит только нагрев, то  $G_u = 0$ . При нетепловой модификации мощность СВЧ генератора выбирают такой, чтобы обеспечить в рабочей камере заданную напряженность электрического поля [2].

Основной характеристикой при расчете протяжного механизма является производительность, на которую влияет множество факторов, но основной из них – скорость движения ленты.

Мощность электродвигателя транспортной системы находится по соотношению [7]

$$P = \frac{k_o S L_l \rho g v}{1000 \eta} \quad (4)$$

где  $k_o$  – опытный коэффициент, зависящий от транспортера и длины транспортной системы;  $S$  – площадь поперечного сечения ленты;  $L_l$  – длина всей ленты;  $\rho$  – удельная плотность ленты;  $g$  – ускорение свободного падения;  $v$  – скорость движения ленты,  $\eta$  – КПД электродвигателя.

В конечном счете следует определить металлоемкость рабочей камеры, затраты на ее изготовление, на приобретение источника СВЧ энергии, электродвигателя и оценить целесообразность проектирования СВЧ установки, рассчитав сравнительный интегральный эффект

$$\Delta \mathcal{E}_{\Sigma} = \mathcal{E}_{\Sigma_2} - \mathcal{E}_{\Sigma_1} \quad (5)$$

где  $\mathcal{E}_{\Sigma_2}$ ,  $\mathcal{E}_{\Sigma_1}$  – чистые прибыли на заданном временном интервале при применении

СВЧ и альтернативной установок [8,9].

При  $\Delta \mathcal{E}_{\Sigma} > 0$  можно принять решение о целесообразности проектирования СВЧ электротермической установки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Архангельский Ю.С.** СВЧ электротермия / Ю.С. Архангельский. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 1998. 408с

2. СВЧ модификация полимеров / Ю.С. Архангельский и др. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2012. 288с

3. **Архангельский Ю.С.** Справочная книга по СВЧ электротермии / Ю.С. Архангельский. – Саратов: Изд-во «Научная книга», 2011. 560с.

4. Справочник инженера-электрика сельскохозяйственного производства / Под ред. В.М. Баутина. – М.: Информагротех, 1999. 536 с

5. **Архангельский Ю.С.** Камеры лучевого типа СВЧ электротехнологических установок / Ю.С. Архангельский и др. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т. 2010. 229с.

6. **Архангельский Ю.С.** Компьютер-

ное моделирование СВЧ электротермических процессов и установок / Ю.С. Архангельский, С.В. Тригорлый. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т. 2006. 212с.

7. **Москаленко В.В.** Электрический привод / В.В. Москоленко - М.: ИЦ «Академия», 2005. 368 с.

8. **Гришина Е.М.** Технико – экономическая оптимизация СВЧ электротермического оборудования, на камерах с бегущей волной / Е.М. Гришина, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии, 2014 №1 (2). С. 33-35.

9. **Гришина Е.М.** Технико – экономическая оптимизация структуры и параметров СВЧ электротермического оборудования на камерах лучевого типа / Е.М. Гришина, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии, 2013 №1 (1). С. 34-36.

---

**Юдина Виолетта Олеговна** – магистрант кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Архангельский Юрий Сергеевич** – заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Violetta O. Yudina** – Master Student, Department of Automated Electrical Engineering Plants and Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Yuri S. Arkhangelskiy** – Dr.Sc., Professor, Honored Master of Sciences of the Russian Federation, Department of Power Supply for Industrial Facilities, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

*Статья поступила в редакцию 09.02.16, принята к опубликованию 19.02.16*

## СПАСЕНИЕ КНИГ, ПОСТРАДАВШИХ ПРИ ТУШЕНИИ ПОЖАРА

К.Д. Маркелова, Ю.С. Архангельский

## PRESERVATION OF FIRE-AFFECTED BOOKS

K.D. Markelova, Yu.S. Arkhangel'skiy

*Рассмотрены способы и средства спасения книг, пострадавших при тушении пожара.*

Ключевые слова: *книги, пожар, вода, сушка*

При пожаре в библиотеках обычно часть книг страдает от воды, используемой при тушении пожара. Намокшие книги плесневеют и начинают гнить. К счастью, подобное случается редко, однако последний пожар в одном из НИИ РАН показал, что гарантировать полную защиту библиотек от пожара все-таки нельзя, и нужны способы и средства спасения книг, намокших во время тушения пожара.

Рассмотрим имеющиеся возможности.

Во-первых, следует удалить с обложки и из книги свободную воду и эвакуировать книги в сухое помещение. Если, например, средние габариты книги 21x15x3 см, из 1,5 миллиона книг намокло 500 тысяч, то для их размещения потребуется 4-5 комнат площадью 60 м<sup>2</sup> каждая.

Во-вторых, следует воспользоваться одним из следующих способов сушки.

**Экстренная сушка.** Экстренную сушку придётся вести одновременно на нескольких нагревательных устройствах (сушилках). Количество таких устройств зависит от их производительности, количества намокших книг, их влажности и времени до необратимого поражения книг гниением. Главный из этих параметров – производительность. Она может быть определена для выбранного устройства заблаговременно, экспериментально.

В качестве установки (средства) для экстренной сушки следует выбирать распро-

*We consider the methods and techniques with a focus on safety and preservation of books affected during fire-fighting operations.*

Keywords: *books, fire, water, drying*

странённые устройства, например, бытовые СВЧ печи (рис. 1 а), печи сопротивления косвенного действия с нагревом конвекцией (рис. 1 б) и нагревом тепловым излучением (рис. 1 в).

При этом нужно иметь в виду, что устройства, показанные на рис. 1, не предназначены для сушки, и для удаления паров воды рабочие камеры этих устройств следует периодически проветривать с помощью настольного или напольного вентилятора. СВЧ печь должна быть выключена. Количество и продолжительность такого проветривания должны быть определены экспериментально.

Для испарения влаги со всей поверхности садки книг в СВЧ печах должны быть приподняты над подом рабочей камеры печи, для чего должны быть использованы опоры из радиопрозрачного диэлектрика (стекло, древесина, керамика, пластики).

Нужно иметь в виду, что сухая бумага плохо поглощает СВЧ энергию, поэтому в СВЧ печи следует размещать балластный поглотитель энергии (не менее 200 г воды).

Наконец, отметим, что в устройстве, показанном на рис. 1 б, книги в разных кюветах будут нагреваться и сохнуть по-разному: чем дальше от нагревателя расположена кювета, тем нагрев и сушка будут идти медленнее, поэтому можно рекомендовать время от времени перекладывать книги из одной кюветы в другую.

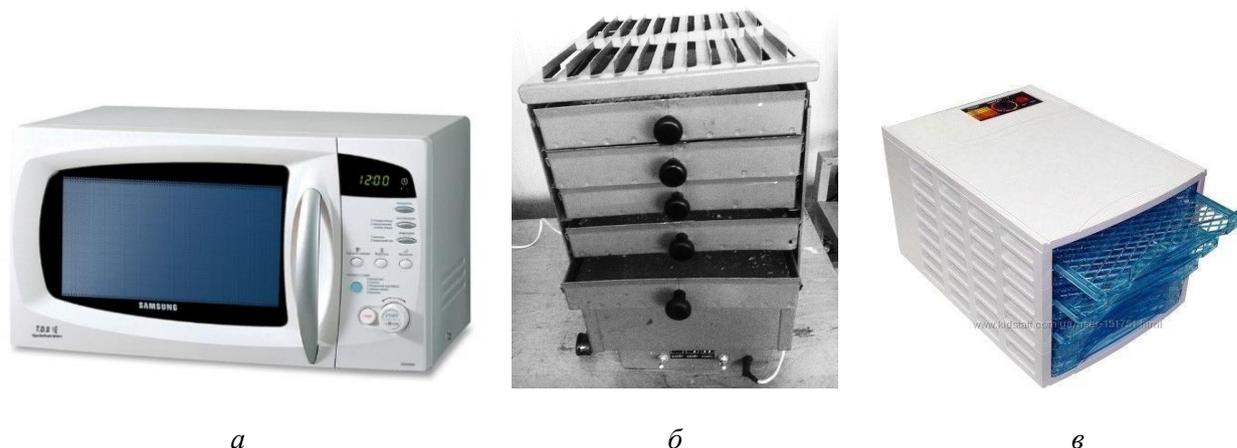


Рис. 1. Устройства для экстренной сушки книг: а – бытовая СВЧ печь; б– печь сопротивления с косвенным нагревом снизу; в– печь сопротивления с нагревом тепловым излучением

Устройства для экстренной сушки должны быть расположены как можно ближе к помещению, куда эвакуированы книги (вдоль коридора, в зале) так, чтобы к ним можно было свободно подкатить (подвезти) мокрые книги и забирать высушенные. Разумеется, для электроснабжения устройств, используемых для экстренной сушки, должна быть проложена временная электрическая сеть 220 В 50 Гц.

Так как устройства, показанные на рис. 1, имеют разную производительность, то для сушки заданного количества книг за заданное время потребуется разное количество таких установок. У них разное потребление электроэнергии в единицу времени, разные цены, то есть затраты на тот или иной вариант средств спасения книг будут разные. Если есть возможность выбора между средствами спасения книг, то выбор можно сделать по затратам, которые потребуются для спасения книг в том или другом варианте.

В случае экстренной сушки книг для работы на установках могут быть привлечены волонтеры из числа студентов, для которых необходимо провести разъясняющее занятие со вниманием к правилам техники безопасности при работе с электрическим оборудованием.

Не исключено, что волонтеры могут помочь в сборе необходимого количества, например, бытовых СВЧ печей.

Следует предусмотреть круглосуточ-

ную работу по спасению книг, пострадавших при тушении пожара.

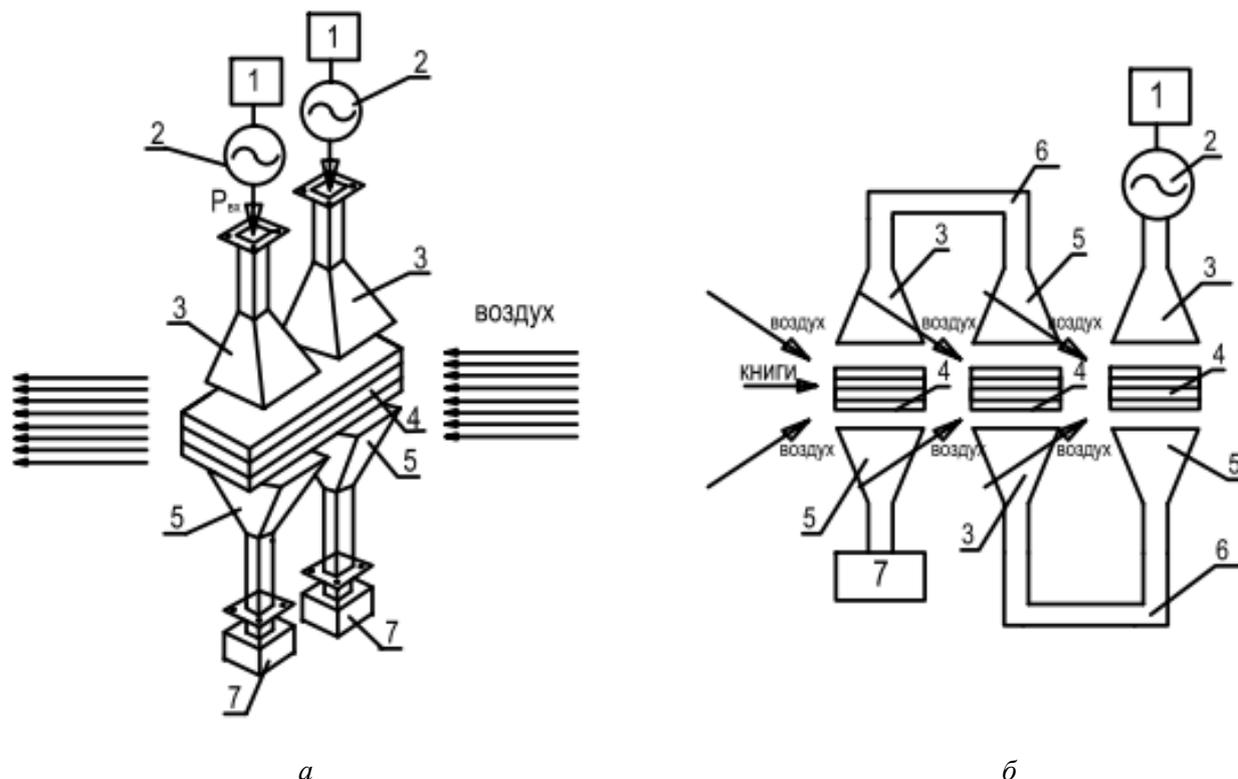
**Замораживание с последующим размораживанием и сушкой.** Если экстренная сушка невозможна, скажем, из – за отсутствия нужного количества технических средств, то для спасения книг от гниения их нужно заморозить, хранить в замороженном состоянии. Это позволит не торопиться с размораживанием и сушкой, но потребует затрат на хранение книг в морозильнике (холодильнике). Нужно иметь ввиду, что, например, в приведенном выше случае объём подлежащих сушке книг превышает 470 м<sup>3</sup>.

Что касается технических средств для сушки, то это могут быть те же устройства, что показаны на рис. 1, с новым технологическим режимом или специальная СВЧ сушилка на камере лучевого типа (КЛТ) (рис. 2 а)

СВЧ электромагнитные колебания, генерируемые СВЧ генератором, с помощью излучающего рупора 3 подводятся к стопке книг 4. Частично энергия тратится на нагрев и сушку, а прошедшая далее СВЧ электромагнитная волна принимается приёмным рупором 5, и переносимая ею СВЧ энергия рассеивается (поглощается) балластной нагрузкой (рис. 2 а). Повысить КПД по использованию СВЧ энергии можно, применив меандровую КЛТ(рис. 2 б). В этом случае в КЛТ есть несколько пар излучающих и принимающих рупоров, между

которыми находятся стопки книг. Максимальный нагрев и сушка происходят под рупором, запитываемом от СВЧ генератора. Под предшествующими рупорами нагрев и сушка проходят за счёт СВЧ энергии,

прошедшей в данный излучающий рупор, пройдя несколько стопок книг. Таким путём за счёт удорожания конструкции можно обеспечить КПД  $\approx 1$ .



**Рис. 2.** СВЧ установка для размораживания и сушки книг: *а* – камера лучевого типа; *б* – меандровая камера лучевого типа (1 – источник питания СВЧ генератора; 2 – СВЧ генератор; 3 – излучающий рупор; 4 – книги; 5 – приёмный рупор; 6 – волновод; 7 – балластная нагрузка)

На частоте 2450 МГц апертура рупора равна 10x10 см, так что для равномерной СВЧ обработки книги требуется не менее двух пар рупоров и двух СВЧ генераторов. Две линии волноводов и рупоров должны быть и в меандровой КЛТ.

Транспортная система меандровой КЛТ должна передвигать стопки книг от рупора к рупору по мере выгрузки из КЛТ очередной высушенной стопки книг.

Приведенная КЛТ поддается весьма строгому расчёту [1,2]. Так, можно рассчитать требуемую мощность СВЧ генератора, толщину стопки книг, число секций меандра, величину СВЧ мощности, поглощаемой балластной нагрузкой, производительность КЛТ. Используя теорию длинных линий, можно рассчитать отражение

СВЧ электромагнитной волны от поверхности стопки книг и, если целесообразно, согласующий трансформатор между излучающим рупором и поверхностью стопки книг [2].

Здесь нужно подчеркнуть, что замораживать мокрые книги нужно по одной, то есть так, чтобы не смерзлось несколько книг, чтобы формировать оптимальную высоту стопки книг, или замораживать книги стопками, заданной высоты.

В расчётах КЛТ для размораживания и сушки книг требуется знание относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon'$  и тангенса угла диэлектрических потерь  $\operatorname{tg} \delta$  обрабатываемого объекта. В нашем случае обрабатываемый объект состоит из бумаги и воды (льда), а потому будем рас-

## ЭЛЕКТРОТЕРМИЯ

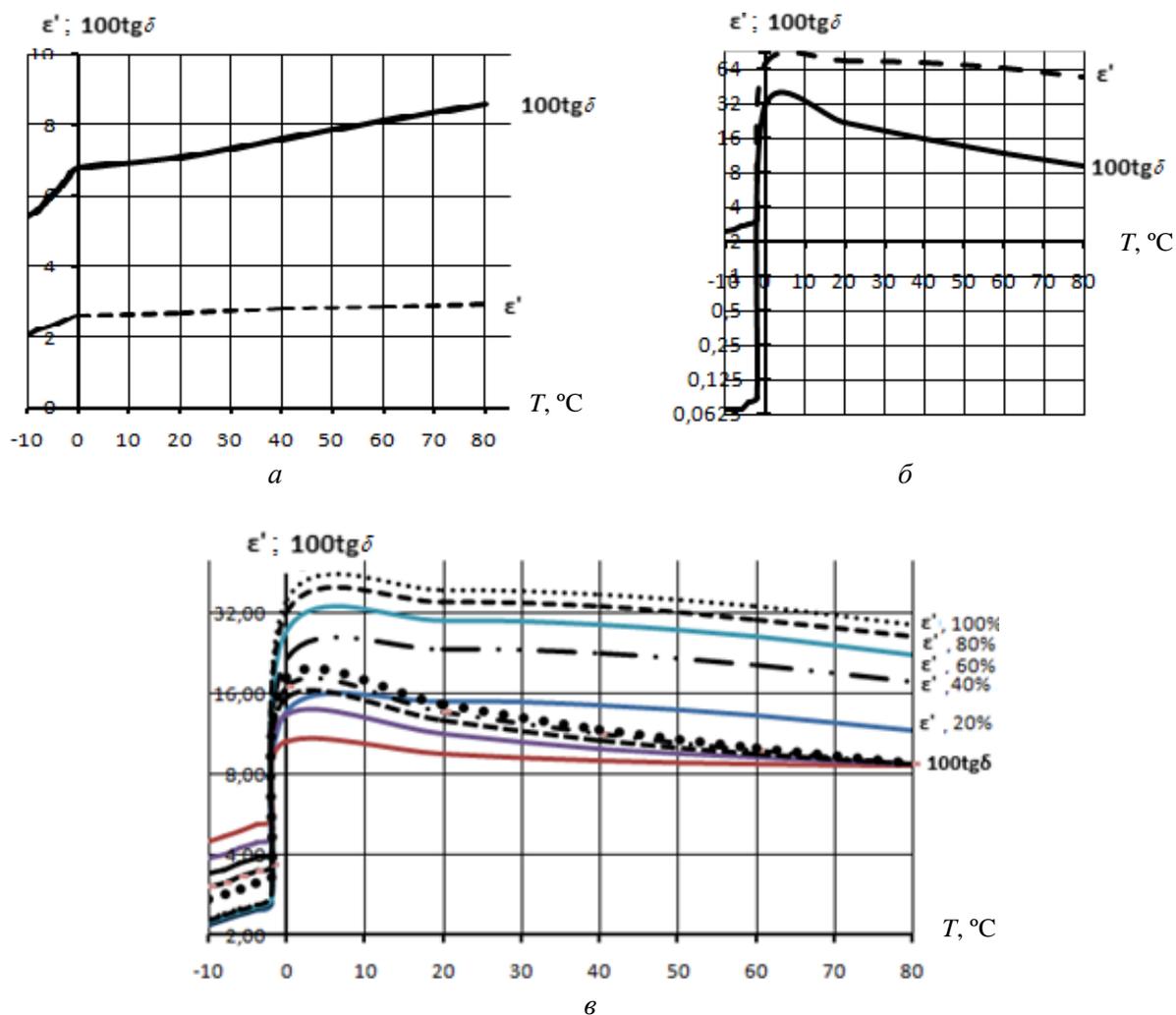
считать диэлектрические параметры по соотношению [3].

$$A = A_1 \cdot \xi_1 + A_2 \cdot \xi_2,$$

где  $A$  – параметр среды (объекта обработ-

ки);  $A_{1,2}$  – параметры компонентов;  $\xi_{1,2}$  – содержание компонента.

На рис. 3 показаны зависимости диэлектрических свойств бумаги, воды и мокрой бумаги при различной степени влажности от температуры.



**Рис. 3.** Зависимости диэлектрических свойств бумаги, воды и мокрой бумаги от температуры: *a* – зависимость диэлектрических свойств бумаги от температуры; *б* – зависимость диэлектрических свойств воды от температуры; *в* – зависимость диэлектрических свойств мокрой бумаги от температуры

**Сублимационная сушка.** Для уменьшения коробления бумаги в процессе сушки можно вести сушку при низких температурах. Но в этом случае при атмосферном давлении сушка идет медленнее. Для увеличения интенсивности сушки ее следует проводить в вакууме [4].

На рис. 4 приведена монограмма, иллюстрирующая возможные переходы воды, пара и льда.

В так называемой тройной точке (ТТ) среда может находиться в каждой из трёх фаз, причём давление в тройной точке  $p_{ТТ} = 4,58$  мм рт.ст., температура ТТ равна  $0,01^\circ\text{C}$ .

Если энергия ко льду, скажем, с помощью СВЧ излучения подходит по линии АВ, то лед будет переходить в пар, минуя жидкую фазу. Такая сушка называется сублимационной (возгонкой).

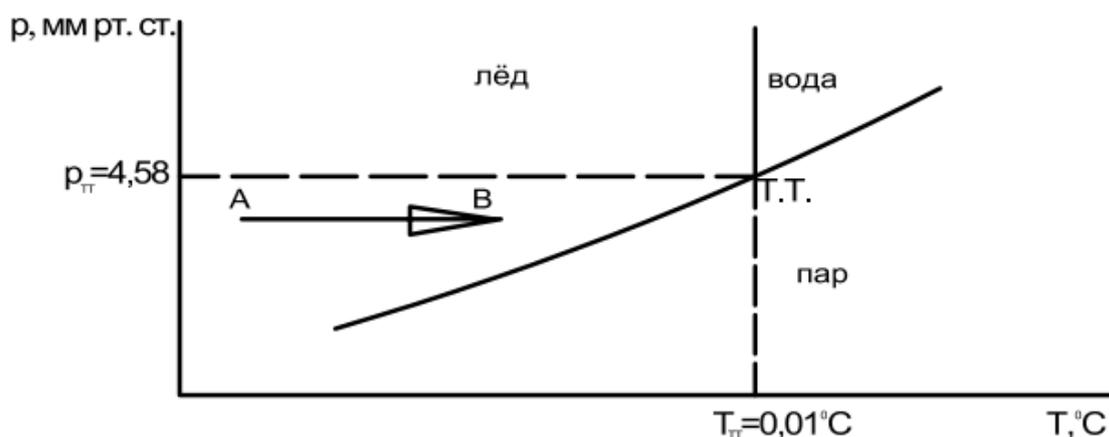


Рис. 4. Тройная точка воды, пара и льда

Следует отметить, что для реализации такой сушки рабочая камера СВЧ сушилки должна быть герметизирована, снабжена вакуумной системой, с помощью которой поддерживается давление в камере  $p < p_{тр}$  и удаляются выделившиеся из книг пары. Разумеется, этот вид сушки весьма дорогой, а потому требуется технико-экономи-

ческое обоснование целесообразности его применения.

Таким образом, способы спасения книг, пострадавших при тушении пожара, требуют экспериментальной отработки технологии, создания опытных образцов СВЧ сушилок замороженных книг и технико-экономического сопоставления способов между собой.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Архангельский Ю.С.** СВЧ электро-термические установки лучевого типа / Ю.С. Архангельский, С. В. Тригорлый. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2000. 122 с.

2. **Архангельский Ю. С.** Камеры лучевого типа СВЧ электротехнологических установок / Ю.С. Архангельский и др. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2010. 229 с.

3. **Колесников Е.В.** СВЧ электротехнологическая установка для обработки трансформаторного масла / Е.В. Колесников, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии, 2014. №3(4). С 30-32

4. **Лыков А.В.** Теория сушки / А.В. Лыков. –М.: Энергия, 1968. 472 с.

**Маркелова Ксения Денисовна** – магистрант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Архангельский Юрий Сергеевич** – заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Ksenia D. Markelova** – Postgraduate, Department of Power Supply for Industrial Facilities, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Yuri S. Arkhangelskiy** – Dr.Sc., Professor, Honored Master of Sciences of the Russian Federation, Department of Power Supply for Industrial Facilities, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 09.02.16, принята к опубликованию 19.02.16

## ОСОБЕННОСТИ БИЗНЕС-ПЛАНИРОВАНИЯ В ЭЛЕКТРОТЕРМИИ

Н.В. Гусева, С.В. Новичков

### CHARACTERISTICS OF BUSINESS PLANNING IN ELECTROTHERM INDUSTRY

N.V. Guseva, S.V. Novichkov

*Рассматриваются особенности бизнес-планирования при внедрении индукционного нагрева в различных отраслях. Приводится пример бизнес-планирования при внедрении индукционного нагрева в металлургии.*

Ключевые слова: бизнес-план, электро-термия, маркетинг, рынок, металлургия, срок окупаемости

В условиях рыночной экономики при проектировании технологического оборудования следует учитывать экономические факторы [1-4]. Это в полной мере относится и к электротермии [5] – области науки и техники, связанной с нагревом и расплавлением материалов теплотой, выделяющейся при протекании по проводникам электрического тока. Термообработка, нагрев или сушка почти всегда входят в состав технологической обработки различных видов продукции. Экономически обоснованный выбор конструкции установок не позволит технически более эффективной конструкции электротермического оборудования выйти на рынок.

Для того чтобы проектирование электротехнологических установок было успешным, необходимо грамотно провести анализ инвестиционного проекта, то есть решить задачи, каждая из которых является неотъемлемой частью планирования:

– маркетинговые исследования с целью выбора для последующего производства продукта или услуги, а также с целью исследования возможностей и путей сбыта на рынке нового продукта или услуги;

– оценка соответствия организационных и технологических возможностей тре-

*The paper deals with the issues of business planning at introduction of induction heating in the various branches of a national economy. The presented examples refer application of business planning in the field induction heating for the purposes of metallurgy.*

Keywords: business plan, electrothermy, marketing, market, metallurgy, rate of return

бованиям производства и сбыта выбранной продукции и услуг;

– определение потенциальных партнеров по кооперации, основных поставщиков сырья, материалов и комплектующих, энергоносителей;

– определение поставщиков технологического оборудования;

– оценка эффективности проекта на основе широко используемых в международной деловой практике критериев эффективности инвестиций.

Оптимальным вариантом решения таких задач является новая прогрессивная форма плана – бизнес-план.

Бизнес-план позволяет показать выгоду предполагаемого проекта и привлечь возможных контрагентов, потенциальных финансовых партнеров. Описывая все основные аспекты проекта, анализируя проблемы, с которыми можно столкнуться при его реализации, и определяя способы решения этих проблем, бизнес-план должен ответить на вопрос: «Стоит ли вообще вкладывать средства в этот проект и принесет ли он доход, который окупит все затраты?»

Ниже приводится описание некоторых разделов бизнес-плана.

*Краткое описание продукта*

Описание содержит доказательства выгоды проекта, его цели. Дается краткое описание изделия, его технико-эксплуатационные показатели, отличие разрабатываемого изделия от аналогов, источники финансирования. Указываются необходимый объём и источники финансирования, источники мобилизации заёмных средств, объём прибыли от реализации, а также время возврата кредитов.

*Описание рынка*

В этом разделе должны быть даны оценка существующей ситуации (конъюнктуры) и прогноз развития рынка. Следует отметить географическое положение, импортную ёмкость, возможную долю предприятия при благоприятных и неблагоприятных условиях, товарную и фирменную структуру рынка, наличие конкурентов.

*Существо проекта*

Необходимо привести сведения о патентах, торговый знак, указать наличие опыта производства данного товара и чем предлагаемый к выпуску товар отличается от импортных и отечественных аналогов. Указываются условия экспорта товаров (цена, маркетинг, создание сети сбыта и т.д.) и необходимость лицензирования.

В этом пункте следует определить, где будут изготавливаться товары на действующем или вновь создаваемом предприятии. Учитывается динамика изменения производственных мощностей в течение планируемого периода. Приводятся аргументы, обеспечивающие возможность налаживания производства данной продукции на предприятии на высоком техническом и качественном уровне.

*Производственный план*

Дается схема производственного процесса, указываются специфические требования к организации производства, состав, материалы, комплектующие и их поставщики с указанием их ориентировочных цен, рассматривается обеспечение экономической и технической безопасности. Особое внимание уделяется вопросу обеспечения высокого качества выпускаемой продукции.

*Стратегия маркетинга*

Должно быть показано, что реализация товара не вызовет серьёзных проблем. Указываются характер спроса (равномерный или сезонный), факторы, от которых зависит спрос на товар, характер воздействия на продукт технологических изменений (законодательство по охране природы, продукто-заменители), основные элементы противодействия на стратегию конкурентов. Даются обоснования цены на продукцию, описание системы сбыта с указанием фирм, привлекаемых к реализации продукта, организация рекламы, целевые показатели, которых надо добиться в ближайшие три года.

*Организационный план*

Указывается форма собственности и правовой статус организации (по товариществам указываются условия создания и партнёрства, по АО – основные пайщики и принадлежащие им доли). Приводятся аргументы, показывающие заинтересованность местной администрации в осуществлении данного проекта. Указываются вопросы и аспекты деятельности, решение которых существенно зависит от отношения к ним местной администрации.

*Риск проекта*

Следует дать оценки того, что цели, поставленные в проекте, могут быть полностью или частично не достигнуты. Необходимо дать характеристику экономических условий, в которых работает предприятие и которые отрицательно сказываются на его финансовом положении. Общий риск проекта определяется как составной по всем стадиям реализации проекта.

*Финансовый план*

Этот раздел бизнес-плана должен дать возможность оценить способность проекта обеспечивать поступление денежных средств в объеме, достаточном для обслуживания долга (или выплаты дивидендов, когда речь идет об инвестициях). При необходимости может быть представлен график погашения кредитов и уплаты процентов, сведения об оборотном капитале с указанием изменений кредитов и уплаты процентов, предполагаемый график уплаты на-

логов. В дополнение к этому прилагаются расчеты основных показателей платежеспособности и ликвидности, а также прогнозируемые показатели эффективности проекта.

Структуры бизнес-плана инвестиционного проекта в электротермии формируются в соответствии с общепринятыми стандартами, производится также расчет наиболее широко используемых в международной деловой практике критериев эффективности инвестиционных проектов. Структура бизнес-планов в большей степени будет зависеть от тех вопросов, которые являются наиболее значимыми для данного проекта, и необходимости привлечения средств иностранных компаний, фондов и других кредиторов (в последнем случае требуется соответствие общепринятым в международной деловой практике требованиям).

Благодаря своим положительным качествам (быстроте, точности, чистоте, низком энергопотреблении, управляемости, экологичности) индукционный нагрев используется в различных отраслях. Ниже приведен пример бизнес-плана по изготовлению оборудования индукционного нагрева в металлургии.

### ***Бизнес-план производства модернизированной индукционной установки для плавки меди и медных сплавов***

#### **Резюме**

##### *Краткое описание продукта*

Металлургия меди, а также других тяжелых цветных металлов является ведущим звеном отечественной цветной металлургии. На долю тяжелых цветных металлов в РФ приходится значительная часть валовой продукции отрасли. Чистая медь применяется в технике в основном в виде проката (проволока, листы, прутки и др.).

Плавку меди, если необходимо получить сразу большое количество металла, производят в пламенных отражательных печах емкостью 50 тонн и выше. При небольшом производстве медь можно плавить в электрических, а также в тигельных печах. Особо чистую бескислородную медь плавят в вакуумных индукционных

печах или в печах с контролируемой атмосферой, исключаяющей контакт с кислородом.

Бизнес-план разработан для организации выпуска модернизированной индукционной канальной печи ИЛК-1,6 для плавки меди и медных сплавов.

#### *Технические характеристики*

Питание установки осуществляется от трехфазной электросети, напряжением 380 В, 50 Гц. Технические характеристики установки представлены в табл. 1.

Таблица 1  
Технические характеристики установки

Установленная мощность, кВт	635
Годовая производительность, т/год	14512,5
Габариты, м	3,25×2,93×5
Срок службы, лет	20

#### *Цель проекта*

Основными целями проекта модернизации индукционной канальной печи ИЛК-1,6 для плавки меди и медных сплавов являются:

- экономия энергоресурсов;
- повышение качества продукции.

#### *Партнеры по бизнесу и источники финансирования проекта*

Осуществление проекта возможно при сотрудничестве с предприятием ОАО «Электротерм-93». Финансирование проектирования и создания установки осуществляется за счет кредита банка или государственной поддержки.

#### **Описание рынка**

В Саратовской области подобных индукционных канальных печей для плавки меди не производят. Наиболее возможными покупателями предлагаемой установки являются государственные и частные металлургические предприятия, специализирующиеся на плавке цветных металлов, в частности меди и медных сплавов. После завоевания устойчивого рынка сбыта внутри страны необходимо провести исследование возможных поставок в страны ближнего и дальнего зарубежья.

## **Существо проекта**

### *Описание товара*

От своих аналогов данная установка отличается применением современных теплоизоляционных материалов для футеровки установки, что позволяет существенно уменьшить тепловые потери и расход электрической энергии. Поскольку отдельные узлы производимого изделия являются оригинальной конструкцией, то права на производство этих узлов и изделия в целом необходимо защитить патентами.

### *Место размещения производства*

Предприятие ОАО «Электротерм-93», на котором будет производиться индукционная канальная печь, расположено в Октябрьском районе города Саратова. Предприятие выбрано ввиду большого опыта производства электротермического оборудования, достаточного количества потенциального контингента, высококвалифицированного персонала, наличия разветвленной транспортной инфраструктуры.

### *Форма организации производства*

Модернизация электротермического оборудования будет производиться на уже существующем предприятии. При производстве модернизированной установки используются имеющиеся на предприятии мощности, оборудование, инструменты. Поставка отдельных элементов установки будет производиться с соответствующих профильных предприятий.

### *Технические возможности предприятия*

Производственные площади ОАО «Электротерм-93» включают в себя необходимые помещения, оборудование, испытательную и метрологическую базы. Для освоения нового производства необходимо дополнительно набрать высококвалифицированный персонал для работы с индукционной канальной печью.

### *Степень реализации проекта*

На данном этапе реализации полностью подготовлено описание основных узлов установки, отработаны все стадии технологического процесса. После заключения договоров с поставщиками будет проведена детальная проработка проекта, определена се-

бестоимость установки, предполагаемая цена реализации, ориентировочная доля рынка.

## **Производственный план**

### *Характеристика технологического процесса*

Процесс производства включает в себя три основных этапа:

- а) подготовка производства;
- б) изготовление электротермического оборудования;
- в) проверка эксплуатационных параметров и контроль качества выпускаемой установки, контроль качества плавки.

Процесс модернизации индукционной канальной печи ИКЛ-1,6 является достаточно трудоемким и включает в себя следующие операции: заготовительная, штамповочная, фрезерная, токарная, сборочная, монтажная, регулировочная, испытательная.

Технологический процесс не содержит принципиально новых и неотработанных операций, что позволяет минимизировать затраты и время на освоение выпускаемой продукции. После сборки печь проходит стадии регулировки, проверки качества и надежности.

## **Организационный план**

### *Форма собственности*

Организация является акционерным обществом открытого типа. Акционерами являются сотрудники фирмы. Контрольный пакет акций принадлежит совету директоров, возглавляемому председателем.

### *Отношение с местной администрацией*

Администрация Саратовской области проявляет заинтересованность в налаживании производства по модернизации установки с целью повышения ресурсосбережения и технико-экономических показателей. В связи с этим можно рассчитывать на поддержку деятельности предприятия администрацией.

## **Стратегия маркетинга**

Данная установка предназначена для плавки меди и медных сплавов. Основными потребителями установки являются металлургические предприятия, специализирующиеся на плавке цветных металлов.

Данные мероприятия имеют своей целью убедить потребителей в преимуще-

стве производимого нами товара. Для повышения конкурентоспособности необходимо улучшать качество и надежность продукции, стремиться снизить цену установки, применять современные ресурсосберегающие технологии.

Для увеличения объема сбыта предлагаемой техники нужно наиболее эффективно организовать сеть представительств в крупных регионах Российской Федерации.

В целях дальнейшего увеличения объема продаж и завоевания рынков сбыта конкурирующих фирм необходимо проводить активную рекламную политику, состоящую из двух основных этапов:

1. Ознакомительная рекламная кампания (создание рекламных буклетов, статьи о продукции в профилирующих печатных изданиях, размещение информации об установке в интернете).

2. Имиджевая реклама (представление торгового знака для поддержания объема продаж).

На рис. 1 представлен товарный знак предприятия на базе ОАО «Электротерм-93» для выпуска модернизированной ин-

дукционной канальной печи для плавки меди и медных сплавов.



**Рис. 1.** Товарный знак предприятия по выпуску модернизированной индукционной канальной печи для плавки меди и медных сплавов

**Риски проекта**

В ходе реализации проекта на различных этапах могут возникнуть ситуации, в результате которых цели, поставленные в проекте, могут быть полностью или частично не достигнуты. В табл. 2 проанализированы возможные виды рисков, влияющих на выполнение задач проекта, и способы уменьшения их последствий.

Таблица 2

Возможные виды рисков

Виды рисков	Способы уменьшения последствий
Остановка производства основными поставщиками	Изучение возможности заключения договоров с другими поставщиками в случае срыва на предприятии
Нехватка кадров необходимой квалификации	Своевременная организация повышения квалификации персонала, работающего на предприятии
Стихийные бедствия	Своевременное страхование зданий и оборудования в страховых компаниях
Неплатежи со стороны потребителей	Включение в договор на поставку пунктов о неустойке, введение полной или частичной предоплаты
Действия конкурентов	Удержание цен на уровне ниже, чем у конкурентов

**Финансовый план**

**Оценка экономической эффективности инвестиций с использованием интегральных показателей**

В табл. 3 приведены исходные данные,

необходимые для расчёта годовых затрат у потребителя при эксплуатации индукционной установки для плавки меди и медных сплавов до модернизации и после неё.

Исходные данные для расчёта

Показатели	Обозначение	Величина	
		Канальная печь до модернизации	Канальная печь после модернизации
1. Емкость, т	V	1,6	
2. Частота, Гц	f	50	
3. Установленная мощность, кВт	P	750	635
4. Расход воды, м <sup>3</sup> /год	G	2902,5	2500
5. Действительный годовой фонд времени работы оборудования (при двухсменной работе), ч/год	t	3870	
6. Годовая производительность, т/год	Π <sub>г</sub>	14512,5	
7. Оптовая цена ЭТО, тыс. руб.	Ц	700	1000
8. Производственная площадь, м <sup>2</sup>	S <sub>о</sub>	80	
9. Срок службы ЭТО, лет	T	15	20
10. Количество обслуживающего персонала, чел.: - электротермист	N	2	

*Затраты на электрическую энергию*

Плата за израсходованную электроэнергию  $Π_э$ , руб/год, производится по одноставочному тарифу и определяется по формуле:

$$Π_э = Ptb, \quad (1)$$

где  $P$  – установленная мощность, кВт;  $t$  – годовой фонд времени работы оборудования, ч/год;  $b$  – ставка одноставочного тарифа, кВт·ч.

*Затраты на заработную плату с начислениями основных производственных рабочих*

$$I_{з/н} = Nn_{дон}n_n tZ_i, \quad (2)$$

где  $n_{дон}$  – коэффициент, учитывающий среднюю дополнительную заработную плату (оплата очередных и дополнительных отпусков, льготных часов подростков и другого непроработанного времени) основных производственных рабочих;  $n_n$  – коэффициент, учитывающий единый социальный налог;  $t$  – полезный (действительный) годовой фонд времени

работы оборудования;  $Z_i$  – часовая тарифная ставка основных производственных рабочих, занятых на этом оборудовании;  $N$  – количество обслуживающего персонала, человек.

*Затраты на охлаждающую воду*

Затраты на охлаждающую воду определяются по формуле:

$$I_э = Gb_э, \quad (3)$$

где  $G$  – годовой расход на охлаждающую воду, м<sup>3</sup>/год;  $b_э = b_1 + b_2$  – тариф на холодное водоснабжение с учетом водоотведения, руб./м<sup>3</sup>;  $b_1$  – тариф на холодное водоснабжение (техническая вода), руб./м<sup>3</sup>;  $b_2$  – тариф на водоотведение, руб./м<sup>3</sup>.

*Затраты на ремонт оборудования*

Затраты на ремонт оборудования  $I_{рем}$ , определяются по выражению:

$$I_{рем} = Цβ, \quad (4)$$

где  $Ц$  – цена установки, тыс. руб;  $β = 5\%$  – норматив отчислений на текущий ремонт.

Результаты расчётов годовых затрат потребителя представлены в табл. 4.

Годовые затраты потребителя

Наименование	Величина, тыс.руб./год	
	Канальная печь до модернизации	Канальная печь после модернизации
1. Затраты на электрическую энергию для технологических целей	8533,35	7224,9
2. Затраты на заработную плату с начислениями	1118,6	
3. Затраты на охлаждающую воду	63,37	59,75
4. Затраты на ремонт оборудования	35	50
Итого	9750,32	8453,25

В результате модернизации индукционной канальной электропечи для плавки меди и медных сплавов наблюдается экономия годовых затрат потребителя в размере 1297,07 тыс. руб/год. Экономия издержек обеспечивается за счет снижения затрат на электрическую энергию и охлаждающую

воду.

График срока окупаемости изображен на рис. 2, технико-экономическое обоснование проекта приводится в табл. 5.

Срок окупаемости инвестиций с учетом времени на создание и проектирование установки составляет 1,4 года.

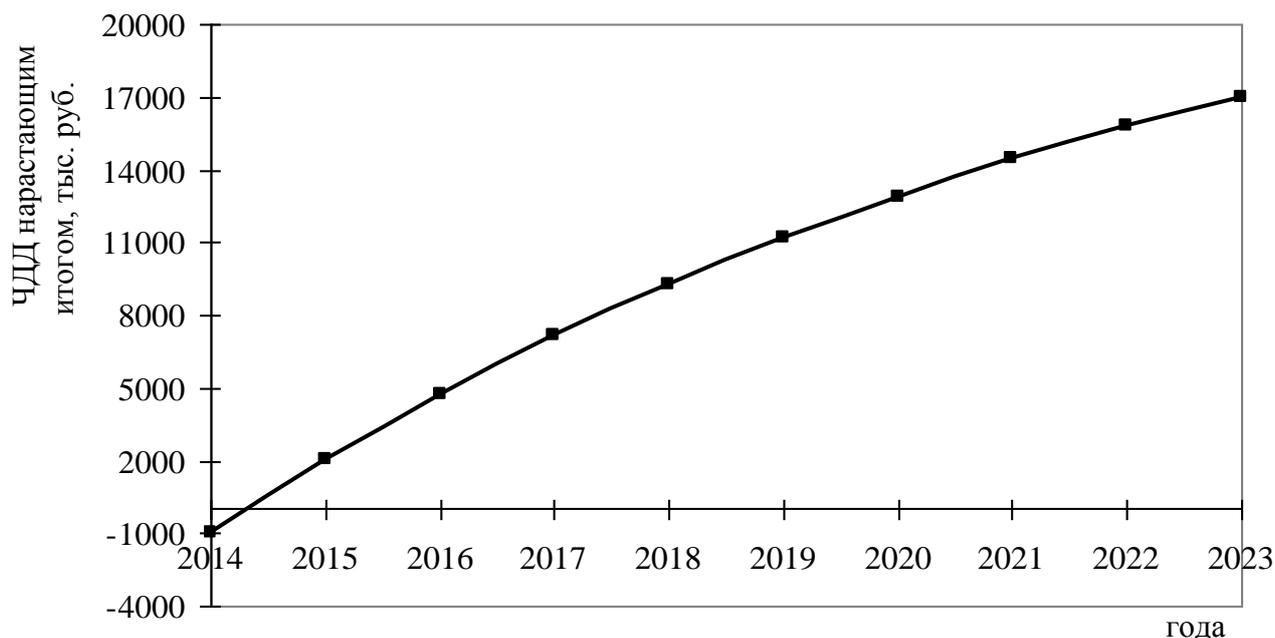


Рис. 2. График срока окупаемости инвестиций

Таблица 5

Технико-экономическое обоснование проекта

Показатели	Обознач.	Величина
Интегральный эффект, тыс. руб.	$E_{инт}$	17016,41
Рентабельность продукции, %	$p^{\%}$	26,66
Срок окупаемости, год	$T_{ок}$	1,4

**Заключение по бизнес-плану производства модернизированной индукционной установки для плавки меди и медных сплавов**

На основании анализа рассмотренных разделов бизнес-плана можно сделать вывод, что проект производства модернизированной индукционной установки для плавки меди и медных сплавов экономически выгоден, так как чистый дисконтированный доход имеет положительное значение и составляет 17016,41 тыс. руб., срок окупаемости инвестиций с учетом времени на создание и проектирование установки составляет 1,4 года, что при сроке службы модернизируемого оборудования 20 лет, является оптимальным.

В финансовом плане проект устойчив, так как рентабельность проекта выше 25 %. Кроме того, в бизнес-плане проанализированы возможные риски, влияющие на выполнение задач проекта, и способы их уменьшения.

Также в бизнес-плане четко рассматриваются основные цели проекта:

- экономия ресурсов;
- повышение качества продукции.

Очень важно, что осуществление проекта возможно при сотрудничестве с крупным предприятием ОАО «Электротерм-93», которое отличается большим опытом по производству электротермического оборудования.

В разделе «Стратегия маркетинга» предложены реальные мероприятия, которые имеет своей целью убедить потребителей в преимуществе производимого товара.

Итак, в статье рассмотрены принципы и особенности разработки структуры бизнес-плана инвестиционного проекта в электротермии. Приведен пример бизнес-плана, составляемого при изготовлении оборудования индукционного нагрева в металлургической отрасли промышленности, который позволяет провести анализ эффективности предложенного проекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Экономика и управление в энергетике / Т.Ф. Басова, Н.Н. Кожевников, Э.Г. Леонова и др. – М.: Издательский центр «Академия», 2003.

2. **Волков О.Н.** Экономика предприятия / О.Н. Волков, В.К. Стегляренко. – М.: ИНФРА, 2005.

3. **Басовский Л.Е.** Маркетинг / Л.Е. Басовский. – М.: ИНФРА, 1999.

4. **Давыдова Л.А.** Экономика и управление предприятием. Основы немецкой теории, адаптированной для применения в России / Л.А. Давыдова, В.К. Фальцман. – М.: Финансы и статистика, 2005.

5. **Гусева Н.В.** Основы бизнес-планирования в электротермии с примерами / Н.В. Гусева, С.В. Новичков, А.Г. Сошинов. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2015. 123 с.

**Гусева Наталия Васильевна** – кандидат экономических наук, доцент кафедры «Тепловые и атомные электрические станции» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Новичков Сергей Владимирович** – кандидат технических наук, доцент, заместитель заведующего кафедрой «Тепловые и атомные электрические станции» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Nataliya V. Guseva**– PhD, Associate Professor, Department of Thermal and Nuclear Power Plants, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Sergey V. Novichkov**– PhD, Associate Professor, Department of Thermal and Nuclear Power Plants, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

*Статья поступила в редакцию 11.02.16, принята к опубликованию 26.02.16*

# ЭЛЕКТРОФИЗИКА

УДК 621.9.047/048

## ПРОМЫШЛЕННЫЕ УСТАНОВКИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ПРОМЫВКИ И ОЧИСТКИ ПРЕЦИЗИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ

Н.В. Бекренев, И.В. Злобина

## INDUSTRIAL ULTRASONIC WASHING AND CLEANING PRECISION MACHINE PARTS

N. V. Bekrenev, I. V. Zlobina

*Изложен механизм действия ультразвуковой кавитации при очистке деталей машино- и приборостроения от технологических и эксплуатационных загрязнений. Показан существенный вклад отраслевых НИИ г. Саратова в совершенствование технологических схем очистки и создание принципиально новых технических решений ультразвукового технологического оборудования для эксплуатации на предприятиях приборостроения, агрегатостроения, технологического, энергетического и транспортного машиностроения.*

Ключевые слова: ультразвук, производительность очистки, кавитация, загрязнение, многопакетный преобразователь, установка, ультразвуковой шприц

В процессе изготовления и эксплуатации наружные и внутренние поверхности деталей различного назначения покрываются отложениями загрязнений органической и неорганической природы, что вызывает отклонение реальных характеристик технической системы от проектных и приводит либо к браку, либо к аварийным ситуациям.

По способу связи с материалом детали поверхностные загрязнения можно разделить на две основные группы.

К первой относятся загрязнения, механически приставшие к поверхности дета-

*The paper presents an ultrasonic cavitation mechanism operating at cleaning machine and instrument making parts from process contamination and operational pollution. The focus is made on considerable contribution of the sectoral research institutes in Saratov into improvement of purification technologies, and development of advanced ultrasonic processing equipment to be used at instrument and machine engineering enterprises, as well as technological, power and transport machine engineering plants.*

Keywords: ultrasonic, cleaning productivity, cavitation, pollution, multipackage converter, installation, ultrasonic syringe

ли. Эти загрязнения находятся на поверхности, но не образуют с материалом детали химических соединений. Загрязнения первой группы обычно представляют собой следы жиров и масел, остатки шлифовальных и полировочных паст, пыль, копоть, частицы абразивных материалов, следы от прикосновения рук и т.д.

Ко второй группе относятся загрязнения, образовавшиеся в результате химического взаимодействия материала поверхности детали с окружающей средой. Эти загрязнения представляют собой оксидные пленки, сернистые соединения на поверх-

ности металла, следы выщелачивания стекла и т.д.

Как известно, очистка деталей от загрязнений может производиться несколькими методами:

- механическими;
- химическими;
- электрофизическими.

Анализ технической литературы [1-3] и производственного опыта показывает, что ультразвуковая промывка и очистка является наиболее универсальным и эффективным методом для удаления загрязнений с поверхности различных изделий машино- и приборостроения, в частности карбюраторов, инжекторов, топливных форсунок и т.п. В основе процесса ультразвуковой очистки лежит явление акустической кавитации.

Под акустической кавитацией понимают образование и активацию газовых или паровых полостей (пузырьков) в среде, подвергаемой ультразвуковому воздействию. По общепринятой терминологии, существуют два типа активности пузырьков: стабильная кавитация и коллапсирующая, или нестационарная кавитация, хотя граница между ними не всегда четко очерчена. Стабильные полости пульсируют под воздействием давления ультразвукового поля. Радиус пузырька колеблется около равновесного значения, полость существует в течение значительного числа периодов звукового поля. С активностью такой стабильной кавитации может быть связано возникновение акустических микропотоков и высоких сдвиговых напряжений. Коллапсирующие или нестационарные полости осциллируют неустойчиво около своих равновесных размеров, вырастают в несколько раз и энергично схлопываются. Схлопыванием таких пузырьков могут быть обусловлены высокие температура и давление, а также преобразование энергии ультразвука в излучение света или химические реакции. На пылинках и примесных частицах, содержащихся в жидкостях, могут существовать микротрещины. Избыточное давление внутри частичек, задаваемое  $\sigma/R$ , где  $R$  - радиус частичек и  $\sigma$  -

коэффициент поверхностного натяжения, мало, но под действием звука достаточно высокой интенсивности газ может накачиваться в них, и полости могут расти [2]. Было показано, что интенсивность звука, необходимая для получения кавитации, заметно повышается при увеличении чистоты жидкости. Малые пузырьки могут расти вследствие процесса, называемого выпрямленной или направленной диффузией. Объяснение этого явления состоит в том, что за период акустического поля газ поочередно диффундирует в пузырек во время фазы разрежения и из пузырька во время фазы сжатия. Так как поверхность пузырька в фазе разрежения максимальна, суммарный поток газа направлен внутрь пузырька, поэтому пузырек растет. Чтобы пузырек рос за счет выпрямленной диффузии, амплитуда акустического давления должна превысить пороговое значение. Порог выпрямленной диффузии и определяет порог кавитации.

В жидкостях при прохождении ультразвуковых волн возникают следующие эффекты [2, 3].

1. Генерирование и передача теплоты, возникающие вследствие потерь энергии, неизбежных при распространении ультразвуковых колебательных процессов.

2. Кавитация, обуславливающая эрозию материалов, диспергирование, гомогенизацию, эмульгирование, ускорение диффузионных процессов.

3. Акустические течения – стационарные вихревые микро- и макропотоки жидкости, возникающие в ультразвуковом поле при колебаниях воздушного пузырька вблизи поверхности твёрдого тела.

4. Химические эффекты – ускорение различных химических реакций, деполимеризации, электрохимических процессов.

5. Диффузионные эффекты – интенсификация процессов проникновения молекул и атомов через стенки клеток, пористые мембраны и фильтры, уменьшение толщины пограничного слоя на поверхности раздела «жидкость – твёрдое тело».

6. Механические эффекты, заключающиеся прежде всего в эрозии поверхности

материалов, помещённых в озвучиваемую жидкость. Эрозия возникает вследствие действия давлений, создаваемых при захлопывании кавитационных микропузырьков. Эти эффекты используются для удаления различных загрязнений, диспергирования и гомогенизации.

7. Эффект вакуума: в фазе разряжения колеблющейся среды снижается температура кипения жидкости, что ускоряет сушку порошкообразных и пористых материалов при пониженной температуре.

8. Капиллярные эффекты: под воздействием ультразвука значительно повышается скорость и уровень подъёма жидкости в капиллярах, облегчается её проникновение в пористые и другие неоднородные материалы.

При низких интенсивностях ультразвукового поля ( $0,3 \text{ Вт/см}^2$ ) образуются мелкие пузырьки диаметром до  $0,1 \text{ мм}$ , скапливающиеся в узлах стоячей волны и сохраняющиеся здесь некоторое время. Первопричиной их являются выделившиеся газы, которые коагулировали в пузырьки. Под действием периодически меняющегося давления пузырьки пульсируют и изменяют свой объём в соответствии с частотой изменения звукового давления. При повышении интенсивности ультразвука часть растворившихся газов начинает выделяться, сливаясь в крупные пузырьки, поднимающиеся к поверхности. Происходит дегазация. Описанный процесс называется газовой или псевдокавитацией. В дегазированной жидкости происходит истинная кавитация.

При распространении ультразвуковых колебаний в различных жидких средах происходят необратимые потери энергии, обусловленные внутренним трением. Для жидких сред (в частности, для воды), характеризующихся в обычных безкавитационных условиях очень низким коэффициентом затухания, следует учитывать, что при распространении УЗ колебаний от излучающей поверхности, в обрабатываемой среде возникает распределённое в пространстве поле звуковых давлений. При этом в структуре поля, создаваемого гармоничес-

ким излучателем различают три области: дальнее ультразвуковое поле; область расстояний, сравнимых с размерами излучающей поверхности и длиной волны; область ближнего поля.

Сравнимость геометрических размеров излучающего рабочего элемента и объема технологического аппарата с длиной волны УЗ колебаний в среде обуславливает ряд интерференционных явлений в среде.

Ультразвуковое поле в области расстояний, сравнимых с длиной волны, характеризуется рядом максимумов и минимумов, расположенных на различных расстояниях от излучающей поверхности. Количество интерференционных максимумов и минимумов уменьшается с уменьшением диаметра излучающей поверхности. Если диаметр излучающей поверхности становится меньше половины длины волны УЗ колебаний, то неоднородность поля исчезает и излучатель ведет себя как сферический излучатель нулевого порядка.

Отражения от стенок и верхнего уровня жидкости могут быть учтены при малых интенсивностях УЗ колебаний при отсутствии развитой кавитации и мощных гидродинамических потоков.

Жидкость с развитой кавитационной областью по своим свойствам (плотности, сжимаемости и др.) существенно отличается от жидкости в обычных условиях. Распределение кавитационных зародышей и пузырьков в жидкости случайно и имеет место их размножение вокруг захлопывающегося пузырька. На границах раздела кавитационная область - жидкость происходит рассеяние и отражение УЗ волн.

Рассеяние и отражение УЗ волн от изменяющейся в пространстве и времени кавитационной области приводит к усреднению акустического поля, интерференционная картина сглаживается и поле приобретает ярко выраженный мелкомасштабный диффузионный характер.

Следует отметить еще одну особенность акустических свойств жидкостей с развитой в них кавитацией. Вследствие несимметричного характера колебаний кавитационного пузырька в УЗ поле волновое

сопротивление жидкости будет характеризоваться существенной нелинейностью [2, 3].

Эффективность ультразвуковой очистки зависит также от частоты ультразвука, его интенсивности, температуры моющей жидкости и времени озвучивания.

Эффективность очистки выше при использовании меньших частот преобразователя и расположении деталей в пучностях волн. Так, при использовании частот порядка 20 кГц через 60 с в пучности колебаний остается только 0,1% загрязнений, а в узле – 10%. При использовании частот порядка 400 кГц через 180 с в пучности колебаний остается 75% загрязнений, а в узле – 98% [1]. Только в отдельных случаях, когда требования к качеству поверхности высоки, применяются большие частоты колебаний, так как интенсивная кавитация на малых частотах может повредить поверхность деталей. Время очистки и обезжиривания обратно пропорционально интенсивности ультразвука, но с увеличением интенсивности более 1 Вт/см<sup>2</sup> время обработки снижается незначительно. Поэтому в технологии очистки рекомендуют для водных растворов выбирать интенсивность колебаний 1,5 – 2 Вт/см<sup>2</sup>, а для органических растворителей, имеющих более низкий порог кавитации, – 1 – 1,5 Вт/см<sup>2</sup>. Применение высоких интенсивностей помимо неоправданных энергозатрат плохо тем, что вблизи поверхности преобразователя образуется кавитационная подушка, уменьшающая эффективность очистки на расстоянии от него.

Как видно из приведенного обзора и анализа явлений, лежащих в основе ультразвуковой обработки в жидких средах и, в частности, в основе промывки и очистки, этот процесс отличается сложностью и чрезвычайной многофакторностью, что создает определенные трудности при проектировании и эксплуатации реализующего его технологического оборудования. Тем не менее, применение ультразвука для очистки деталей различного назначения как научно-технологическое направление возникло еще в середине XX ве-

ка и является сегодня наиболее широкой областью применения ультразвуковых технологий. Очистка осуществляется в ваннах, представляющих собой емкость (обычно из нержавеющей стали), в которую помещается моющая жидкость и кассеты с деталями. Колебания в моющей жидкости генерируются излучателями, закрепленными на дне или стенках ванны (в этом случае акустическая и моющая системы выполнены в виде отдельного блока) или погружными излучателями (в этом случае очистка может осуществляться в любой емкости подходящего размера). Малые ванны с объемом моечной камеры до 35 литров применяются в приборостроении, медицине (стоматологии, хирургии), оптике, лабораториях. Ванны объемом от 50 литров и более могут оборудоваться системами электрического или водного нагрева, водного охлаждения рабочего раствора и применяются в основном в различных отраслях машиностроения.

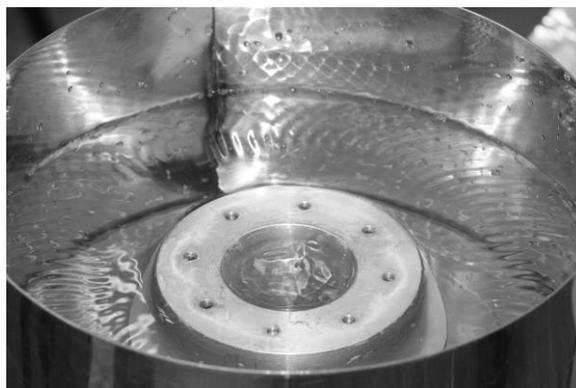
Отмеченная сложность процессов ультразвуковой обработки в жидких средах и необходимость решения различных задач, определяемых особенностями обрабатываемых объектов, привели к формированию в различных отраслях промышленности на базе существовавших НИИ научно-технических коллективов, занятых разработкой ультразвукового оборудования для очистки в интересах конкретной отрасли. В частности, в Саратове в связи с наличием большого количества предприятий электронного приборостроения, а также агрегатостроения и точной механики сложилось два направления разработки ультразвукового оборудования для обработки в жидких средах: приборостроительного и медицинского назначения, а также изделий точной механики и агрегатов. Ниже рассмотрены некоторые разработки лаборатории электрофизических технологий, относящиеся ко второму направлению.

Основной объем исследований и разработок, относящихся к воздействию ультразвука на жидкие среды, был выполнен в 70-80-х годах XX века ведущими инженерами лаборатории В.А. кривегой, В.Г. Мо-

исеевым и И.Д. Степановым. Разработанное ими оборудование внедрено и успешно эксплуатировалось на предприятиях авиационного приборо- и агрегатостроения. Существенным вкладом этого коллектива в развитие технических систем ультразвуковой очистки явилась разработка методики расчета и проектирования, а также технологии сборки и регулировки многопакетных ультразвуковых преобразователей сначала магнитострикционных, а в последнее время пьезокерамических. Их особенностью является общая активная накладная волновод, к которой присоединено требуемое количество излучателей. Такая конструкция нивелирует неизбежные расхождения в частоте и амплитуде колебаний, генерируемых каждым излучателем, и позволяет создать равномерно распределенные в объеме жидкости акустические поля высокой интенсивности.

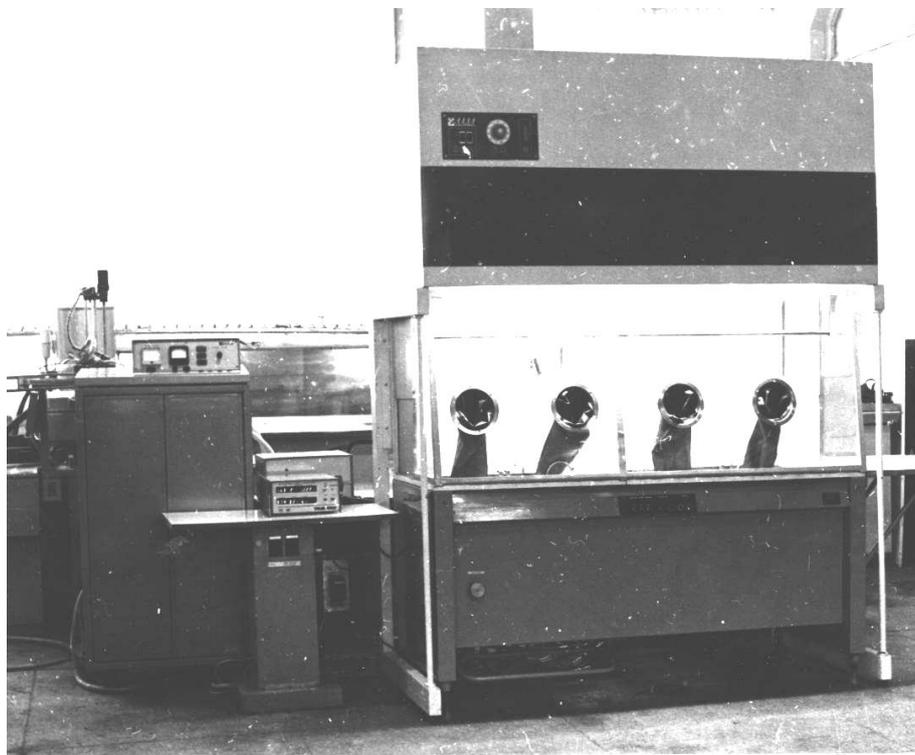
На рис. 1 показаны волны на поверхности воды в ультразвуковой ванне со стерж-

невым волноводом, соединенным с пятью пьезокерамическими излучателями.



**Рис. 1.** Ультразвуковые волны на поверхности моющей жидкости при работающем пятипакетном излучателе

*Комплекс сверхтонкой очистки (рис. 2) предназначен для промывки и очистки деталей и узлов точных навигационных приборов от остатков технологических загрязнений, сопутствующих сборочным операциям.*



**Рис. 2.** Комплекс сверхтонкой очистки деталей приборов

На комплексе выполняются следующие операции:

– предварительная промывка вручную с

использованием различных приспособлений (ерш, щетка и т.п.);

– промывка каналов и отверстий, в том

числе резьбовых, диаметром 1-8 мм и глубиной до 130 мм с помощью шприца ШУ-901 с наложением ультразвуковых колебаний или без них;

- чистовая промывка погружением в ультразвуковую ванну;

- чистовая струйная промывка;

- обработка в парах моющей жидкости.

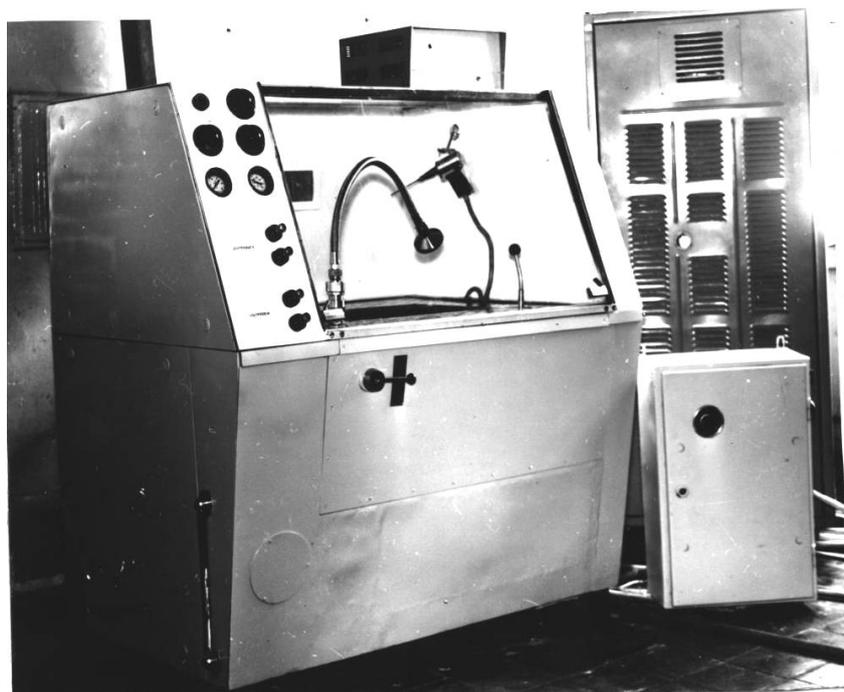
В качестве моющей жидкости используется хладон-113, а также пожаробезопасные смеси на его основе с этиловым спиртом или пропанолом-2.

В зоне обработки обеспечивается чистота на уровне не более 4 частиц размером 0,5 мкм в 1 л воздуха.

Комплекс укомплектован ультразвуковым шприцем с питанием от генератора УЗУ-025М с регулировкой частоты. Магнитострикционный многопакетный преобразователь, смонтированный на дне ультразвуковой ванны, запитывается от генератора УЗГ-2-4М. Очистка моющей жидко-

сти от жировых загрязнений осуществляется путем перегонки на установке для регенерации жидкостей УРЖ-903, а очистка от механических загрязнений – при помощи каскада последовательно расположенных фильтров с различной тонкостью фильтрации. Контроль запыленности воздуха в камере осуществляется прибором ПКЗВ-901. Камера в целом аналогична стандартному вытяжному шкафу типа 2Ш-НЖ. Данный комплекс имеет широкие возможности по очистке изделий сложной формы, в частности систему прокачки моющей жидкости, систему фильтрации, автоматическое управление циклом.

*Установка ультразвуковой прецизионной мойки* (рис. 3) предназначена для очистки поверхности и отверстий деталей топливной и пневмоаппаратуры от технологических загрязнений, а также тонкой очистки гидросмесей АМГ-10, ГМ50И, керосина, топлив Т1, ТС1 от механических примесей.



**Рис. 3.** Установка ультразвуковой прецизионной мойки

Установка состоит из корпуса, камеры, ультразвукового шприца, ультразвуковой ванны с шестью преобразователями, центробежного очистителя, панели управления, ультразвукового генератора УЗУ-025М.

Работает установка следующим образом. Очиститель забирает керосин из бака, очищает его от механических загрязнений и непрерывно подает в ультразвуковую щелевую ванну, слив из которой производится в ванну для замочки деталей. После

заполнения ванны оператор загружает детали сначала в ванну для замочки, а затем – в ультразвуковую ванну.

При наличии в деталях отверстий диаметром 1-10 мм очистка их производится ультразвуковым шприцем во время замочки. Ультразвуковой генератор включается ножной педалью. Установка комплектуется промывочными иглами диаметром 0,8; 1,5; 2,0; 4,0; 6,0 мм из стали 12Х18Н10Т. При использовании установки для очистки жидкостей тонкость очистки составляет 2 мкм при расходе 40 л/мин.

*Установка для ультразвуковой промывки отверстий* (рис. 4) предназначена для промывки сквозных, глухих, гладких, резьбовых отверстий в деталях и узлах приборов и агрегатов от технологических загрязнений.

Установка комплектуется ультразвуковым шприцем, гидроочистителем, ультра-



**Рис. 4.** Установка ультразвуковой промывки отверстий УУПО-901

*Ультразвуковой шприц* (рис. 6) предназначен для промывки и очистки глубоких отверстий и каналов диаметром от 1 до 8 мм от механических и жировых загрязнений. Ультразвуковые изгибные колебания передаются промывочным трубкам от пьезокерамического преобразователя с элементами ЦТС-19 размерами 30 x 12 x

звуковым генератором УЗУ-025. Рабочая частота установки 18 кГц, мощность ультразвукового генератора 500 Вт. Установка позволяет в течение 3-5 с промывать отверстия диаметром 1-8 мм и длиной до 180 мм.

*Стенд для ультразвуковой очистки деталей* (рис. 5) предназначен для очистки деталей и узлов прецизионных агрегатов и приборов от технологических загрязнений.

Стенд оснащен щелевой ультразвуковой ванной и улучшенной системой непрерывной циркуляции и очистки моющих сред. Стенд оснащен ультразвуковым генератором УЗГ-2-10 с потребляемой мощностью 19,5 кВт, работающим на колебательную систему из трех магнитострикционных преобразователей, работающих на общую активную накладку прямоугольной в плане формы. Тонкость очистки моющей среды центробежным очистителем составляет 1,5 мкм.



**Рис. 5.** Стенд ультразвуковой очистки деталей

10 мм. Моющая жидкость под давлением подается через канал в преобразователе в промывочную трубку. Питание преобразователя осуществляется от генератора УЗГ-01 или УЗУ-025 мощностью соответственно 100 и 250 Вт. Рабочая частота 18 кГц. Изгибные колебания трубке сообщаются за счет местного ослабления сече-

ния активной накладки при помощи выреза, делящего объемы тела накладки в равных долях. Данная методика расчета эффективного излучателя изгибных колебаний также была разработана в лаборатории электрофизических технологий.

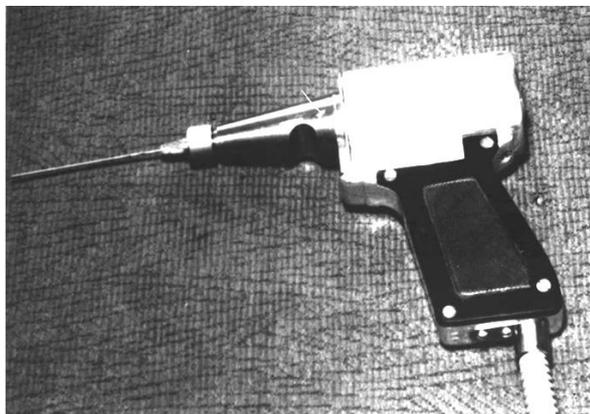


Рис. 6. Ультразвуковой шприц

Преимуществом шприца является чрезвычайно высокая интенсивность изгибных ультразвуковых колебаний иглы, обеспечиваемая специальной конструкцией волновода с вырезом, что гарантирует промывку и очистку глубоких каналов малого диаметра. Данное устройство может применяться только в составе описанных выше установок, так как нуждается в насосе прокачки моющей жидкости через промылочные трубки.

В последнее время на основе опыта по созданию описанных выше установок с многопакетными ультразвуковыми преобразователями по заказу ООО «Газпром трансгаз Саратов» СГТУ имени Гагарина Ю.А. и ОАО «НИТИ-Тесар» разработан экспериментальный образец установки ультразвуковой очистки нового поколения (рис. 7).



Рис. 7. Полуавтоматическая установка ультразвуковой очистки второго поколения.

Особенностью установки является шумоизолирующий шкаф для размещения ультразвуковой ванны, прокачка моющей жидкости через очищаемые полости с двумя ступенями фильтрации и автоматический цикл управления по расходу моющей жидкости на основе непрерывного его контроля ультразвуковыми датчиками, выво-

дящими данные на процессор, где они сравниваются с эталонными значениями. Также в установке реализовано автоматическое поддержание температуры моющей жидкости на заданном уровне. Конструктивное отличие установки заключается также в легкой рамной конструкции, на которой смонтированы основные крупнога-

баритные блоки, сваренные из листового полипропилена. Эффективная шумоизоляция ультразвуковой ванны обеспечивается панелями из базальтовых нитей, размещенными между двойными стенками шкафа ванны.

В установке реализован новый принцип ультразвуковой очистки, позволяющий повысить ее эффективность в труднодоступных местах типа каналов и полостей более, чем в 10 раз.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Бржозовский Б.М.** Ультразвуковые технологические процессы и оборудование в машино- и приборостроении / Б.М. Бржозовский, Н.В. Бекренев. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2009. 348 с.

2. **Маргулис М.А.** Основы звукохимии /

М.А. Маргулис. – М. Высш. шк., 1984. 272 с.

3. **Приходько В.М.** Физические основы ультразвуковой технологии при ремонте автотракторной техники / В.М. Приходько. – М.: Брандес, 1996. 127 с.

---

**Бекренев Николай Валерьевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Техническая механика и детали машин» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Злобина Ирина Владимировна** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техническая механика и детали машин» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Nikolay V. Bekrenev** – Dr. Sc., Professor, Head: Department of Engineering Mechanics and Machine Elements, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Irina V. Zlobina** - Ph.D., Associate Professor, Department of Engineering Mechanics and Machine Elements, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

*Статья поступила в редакцию 12.02.16, принята к опубликованию 26.02.16*



**ИССЛЕДОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОЧИСТКИ  
ВНУТРЕННИХ ПОЛОСТЕЙ И КАНАЛОВ В ИЗДЕЛИЯХ  
ТРАНСПОРТНОГО И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ  
КОНТАКТНЫМ МЕТОДОМ**

**А.М. Сарсенгалиев, И.В. Злобина, В.Ю. Карачаровский, Н.В. Бекренев**

**RESEARCH INTO ULTRASONIC CLEANING OF INTERNAL CAVITIES  
AND CHANNELS OF TRANSPORT AND POWER  
ENGINEERING MACHINES BY THE CONTACT METHOD**

**A.M. Sarsengaliyev, I.V. Zlobina, V.Yu. Karacharovsky, N.V. Bekrenev**

*Проанализирована техническая проблема обеспечения ресурса деталей топливной аппаратуры и систем транспортировки природного газа с учетом их загрязнения в процессе изготовления и эксплуатации. Показана перспективность удаления загрязнений методом ультразвуковой очистки. Констатируется, что данный метод в классическом применении имеет ограничения по качеству удаления загрязнений из внутренних полостей и каналов, в которых интенсивность кавитационных процессов снижается. Предложен и экспериментально подтвержден метод повышения эффективности ультразвуковой очистки указанных поверхностей до 10 раз путем сообщения изделию ультразвуковых колебаний непосредственно в зоне локализации загрязнений.*

*Ключевые слова: ультразвук, производительность очистки, кавитация, полости и каналы, загрязнения, контакт, циклическое нагружение, компьютерная модель*

Современное транспортное и энергетическое машиностроение характеризуется применением в перспективных двигателях, топливно-распределительных системах и устройствах транспортировки энергоносителей (например, природного газа) изделий сложной конструкции. Например, распыли-

*The given analysis refers the technical issues with fatigue life of the fuel equipment and systems of natural gas transportation in terms of their contamination in the course of fabrication and operation. The focus is made on the probability of decontamination using the method of ultrasonic cleaning. This method has certain disadvantages connected with the quality of removing internal contaminants from the passages, where cavitation intensity decreases. The authors propose a method for upgrading the efficiency of ultrasonic cleaning of specified surfaces which is about as ten times higher than the existing methods, by means of ultrasonic fluctuations straight in the localized contamination zone.*

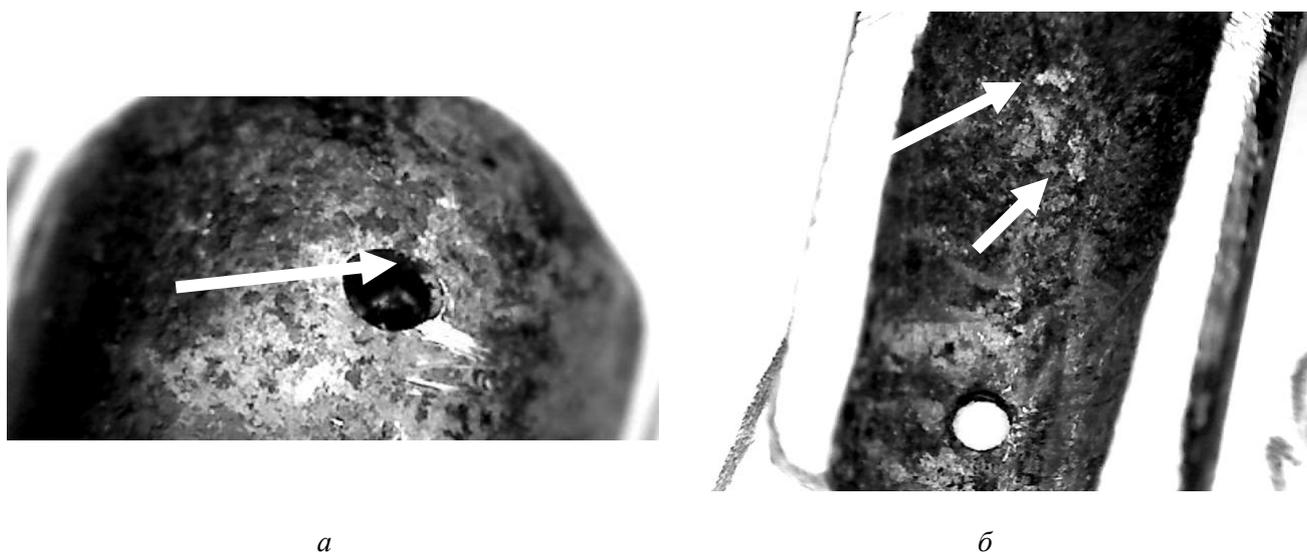
*Keywords: ultrasound, cleaning productivity, cavitation, cavities and channels, pollution, contact, cyclic loading, computer model*

тели топлива содержат отверстия диаметром 0,3 - 0,5 мм, который не должен изменяться в течение срока службы в тяжелых условиях температурных градиентов и наличия продуктов сгорания топлива. Сопряжения «игла-корпус распылителя» имеют зазоры не более нескольких микрометров, изменение

которых приводит к нарушению нормальной работы по впрыску топлива. В процессе функционирования по ряду причин в указанных отверстиях и зазорах скапливается нагар, что приводит к разрегулировке системы. Вследствие высокой трудоемкости изготовления подобных изделий замена загрязненных распылителей новыми сопряжена с большими затратами труда и денежных средств.

Транспортировка природного газа обеспечивается газоперекачивающими агрегатами (ГПА). В настоящее время используется два типа ГПА: с насосами с электроприводом и с насосами, в качестве привода которых используются конверсионные газотурбинные двигатели. Одними из основных элементов газотурбинных установок ГПА являются камеры сгорания. Паспорт-

ными данными регламентируются определенная мощность, частота вращения ротора турбин высокого и низкого давления, а также выбросы в окружающую среду соединений классов СОх и NOх. Опыт эксплуатации горелочных устройств на компрессорных станциях выявил некоторые особенности применения данных систем. Горелочные устройства имеют до 137 рабочих отверстий малого диаметра (0,8-1,0 мм), расположенных радиально в центральном корпусе и в осевом направлении в радиально расположенных газоотводящих трубках. В процессе эксплуатации выявляется нарушение требуемых параметров горения газовой смеси, что связано с отложением соединений сопутствующих горючему газу элементов на стенках каналов и отверстий (рис. 1).



**Рис. 1.** Отложения загрязнений на стенках каналов и выходных отверстий газоотводящих трубок

Это вызывает повышенное газодинамическое сопротивление, что приводит к снижению фактической мощности ГПА, а также повышенному содержанию соединений СОх и NOх, что сказывается отрицательно на экологических показателях агрегата. В конечном итоге отмеченные нарушения в работе горелочных устройств нарушают нормальную работу газоперекачивающих агрегатов, вызывают необходимость увеличения отбора газа из основной магистрали для сохранения мощности агрегата. Отмеченные нарушения проявляются задолго

до выработки горелочным устройством паспортного ресурса, что вызывает необходимость замены комплекта этих устройств на новый и дополнительные финансовые расходы для компрессорной станции, что в конечном итоге вызывает рост оплаты услуг по транспортировке газа для потребителей.

Решить указанные проблемы можно путем восстановления загрязненных изделий методами очистки. Среди известных методов очистки наиболее эффективным является ультразвуковой, основанный на эф-

фекте акустической кавитации. Количество загрязнений, остающихся на поверхности материала после очистки, зависит от метода очистки следующим образом [1]:

- струйная очистка, промывка, ополаскивание – 85%;
- очистка в бензине – 70%;
- очистка в парах хлорированных растворителей – 65%;
- вибрационная очистка – 56%;
- кипячение в воде – 45%;
- ручная очистка металлическими щетками – 10%;
- ультразвуковая очистка – менее 2%.

Принцип ультразвуковой очистки основан на механическом действии ультразвуковых волн на загрязнения, находящиеся на поверхности деталей. При распространении ультразвуковых волн в полупериод растяжения колеблющегося тела в водном растворе происходит возникновение пузырьков, заполненных парами жидкости и растворенными в ней воздухом и другими газами, а в последующий полупериод сжатия колеблющегося тела – их захлопывание. Явление образования и захлопывания пузырьков в жидкости, сопровождающееся сильными гидравлическими ударами в местах захлопывания пузырьков, называется кавитацией. Ударная волна придает жидкости (на микроучастке захлопывания пузырька) огромное ускорение. Чем больше ускорение приобретает жидкость, тем большей силой, способной совершать работу, обладает масса этой жидкости. При захлопывании кавитационного пузырька возникают локальное кратковременное повышение температуры до нескольких тысяч градусов, а также местное повышение давления. Поскольку таких пузырьков образуется до нескольких миллионов в секунду, образуется кавитационная область, где действие указанных факторов весьма значительно. Захлопывание кавитационных разрывов вызывает образование ударных волн, которые создают в ближайшей зоне давления, в 100 раз превышающие первичное давление акустического поля.

Под действием этой силы связь загрязнения с поверхностью детали, опущенной

в жидкость, нарушается почти мгновенно, и загрязнение удаляется с поверхности. Механические усилия, развивающиеся при возникновении кавитации, не только удаляют с поверхности жировые загрязнения, но могут разрушать также пленки окислов, например удалять окалину со стальных изделий [1].

Загрязнения полностью удаляются с детали, когда захлопывание пузырьков происходит на поверхности детали или вблизи ее. В процессе кавитации интенсивно колеблющиеся пузырьки стремятся преимущественно скапливаться на участках поверхности детали, где сплошная пленка загрязнений уже частично разрушена и раздроблена при захлопывании предыдущих пузырьков. Они проникают под край остатков пленки загрязнения, при этом загрязнения подвергаются давлению изнутри и растяжению снаружи, разность между которыми достигает очень больших значений. Это еще больше способствует отслоению загрязнений и отрыву их от очищаемой поверхности.

С учетом сложности конструкций распылителей топлива и горелочного устройства, имеющих «теневые» зоны для распространения волн, изложенные особенности ультразвуковой кавитации позволяют предположить, что обычная схема очистки даже при высокой интенсивности ультразвукового поля обеспечит удаление загрязнений только с внешних поверхностей деталей.

В авиационном приборо- и агрегатостроении для очистки отверстий используются специальные системы в виде трубчатых (игольчатых) излучателей изгибных колебаний с прокачкой жидкости через канал [1]. Однако их применение отличается высокой трудоемкостью раздельной очистки большого количества отверстий, их труднодоступностью, а также малостью диаметров распылителей, что практически делает невозможным применение таких трубчатых инструментов.

Целью исследований является повышение эффективности ультразвуковой очистки закрытых полостей и каналов малого

диаметра в деталях машиностроения типа распылителей топлива и горелочных устройств на основе обоснования технологии, включающей сочетание общего кавитационного и местного контактного вибровоздействия с учетом собственных резонансных частот изделия. При контакте ультразвукового излучателя на изделие будет действовать нагрузка, складывающаяся из переменной и постоянной составляющих.

Динамическая сила согласно [1] при

ультразвуковом нагружении определяется следующим образом:

$$P_d = 16,6 A_{np}^{0,56} \quad , \quad (1)$$

где  $A_{np}$  – амплитуда продольных колебаний излучателя, мкм.

Схема воздействия статической и динамической нагрузок на деталь представлена на рис. 2.

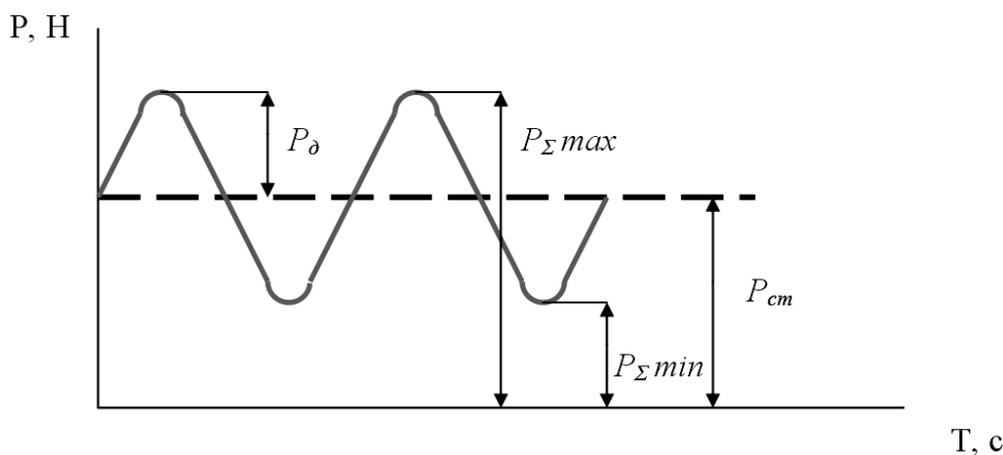


Рис. 2. Нагрузки, действующие на деталь при контакте с ультразвуковым излучателем

Приведенная схема учитывает одновременное действие постоянной нагрузки  $P_{cm}$  и знакопеременной (динамическая сила вследствие колебаний излучателя)  $P_d$ . Соответственно суммарная нагрузка за цикл колебаний (один период) будет изменяться от максимальной  $P_{\Sigma max} = P_{cm} + P_d$  до минимальной  $P_{\Sigma min} = P_{cm} - P_d$ .

Качественно механизм разрушения загрязнений в этом случае может быть представлен следующим образом. Действующая на поверхность детали в месте контакта с излучателем динамическая сила генерирует в детали ультразвуковые колебания, распространяющиеся в виде поверхностной волны. В отложениях загрязнений в местах пучностей колебаний возникают внутренние напряжения, превышающие значения адгезии загрязнений к поверхности канала (полости) и когезии структурных составляющих. В результате в слое загрязнения возникают трещины, и оно отслаивается от поверхности канала и распадается на фрагменты, которые выносятся

акустическими течениями. Вследствие малой интенсивности кавитации в «затененных» корпусом детали зонах ее влияние может быть малосущественным.

Однако многоцикловые знакопеременные напряжения, возникающие в детали при ее контакте с излучателем, могут привести к усталостному разрушению. Для оценки отрицательного влияния предлагаемого метода очистки выполнено компьютерное моделирование в модуле *Structure 3D* программного комплекса *APM Winmashine* ультразвукового нагружения единичного элемента очищаемой детали, содержащего центральный канал и радиальные отверстия. Для упрощения задачи моделирования была разработана 3D модель единичного элемента конструкции (рис. 3). Моделирование напряженно-деформированного состояния обрабатываемого элемента детали в зависимости от условий обработки выполняли методом конечных элементов.

Разработанная конечно-элементная модель единичного элемента конструкции с

радиальными отверстиями представлена на рис. 4.

При моделировании на элемент конструкции прикладывалась статическая нагрузка, равная 8-12 Н, и противодействующая ей со стороны опоры высокочастотная знакопеременная нагрузка гармоничес-

ких ультразвуковых колебаний величиной 16-50 Н в зависимости от амплитуды колебаний. В ходе моделирования изменяли частоту от 18 до 25 кГц и амплитуду от 1 до 10 мкм колебаний опоры конструктивного элемента, что изменяло значение приложенной динамической нагрузки.

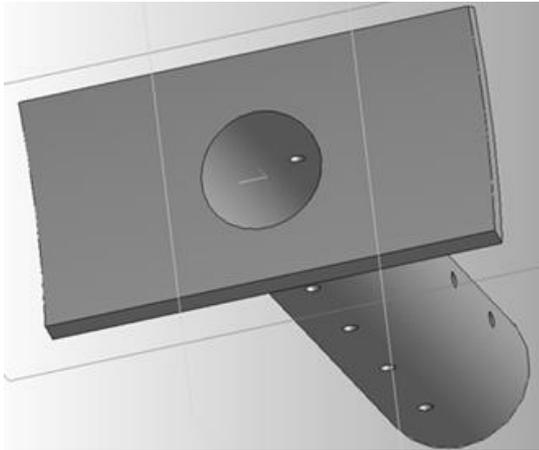


Рис. 3. Твёрдотельная 3D модель единичного элемента конструкции

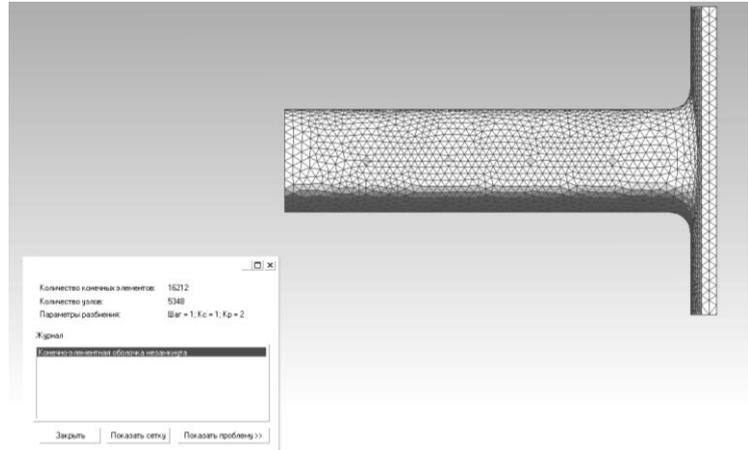


Рис. 4. Конечно-элементная модель единичного элемента конструкции

Полученные поля деформаций и напряжений (рис. 5-6) сравнивали с допустимым пределом выносливости для сталей 12Х18Н10Т и ХВГ. В принятом диапазоне нагрузок максимальные деформации не превышают 1,7-2,0 мкм, а напряжения – 23 Н/мм<sup>2</sup>. Поскольку предел длительной прочности для указанных марок сталей составляет 108 Н/мм<sup>2</sup>, а предел усталости  $\sigma_{-1} = 279$  Н/мм<sup>2</sup> (ГОСТ 5632-72), то с уче-

том 90% прочности сварных швов соединения элементов и корпуса изделия относительно основного материала будем иметь соответственно 97,2 Н/мм<sup>2</sup> и 251,1 Н/мм<sup>2</sup>. Таким образом, по данным компьютерного моделирования обеспечивается запас прочности сварных соединений не менее  $n = 97,2/23 = 4,23$  по пределу длительной прочности и  $n = 251,1/23=10,9$  по пределу усталости.

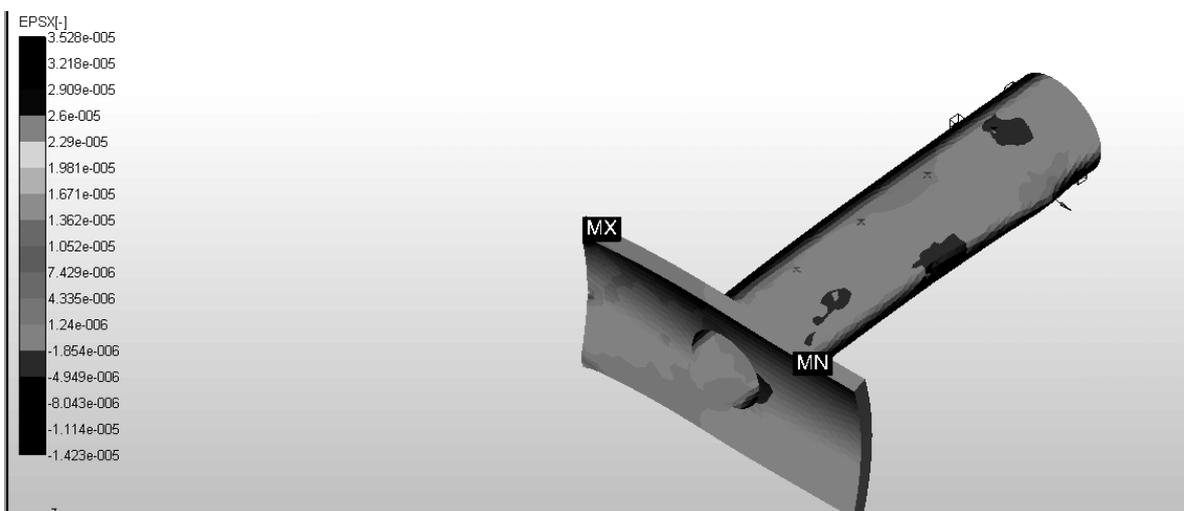


Рис. 5. Карта деформаций в единичном элементе конструкции

Экспериментальные исследования выполнялись на специально разработанной установке с излучателем стержневого типа и механизмом дозированного нагружения с питанием от генератора УЗГИ-1,5 мощностью 1,0 кВт и частотой 22 кГц и с использованием ультразвуковой ванны с

семью пьезокерамическими излучателями, питаемыми тиристорным генератором УГТ-901 мощностью 0,25 кВт. Внешний вид поверхностей каналов и полостей оценивали при помощи компьютерного анализатора изображений микроструктур АГПМ-6М.

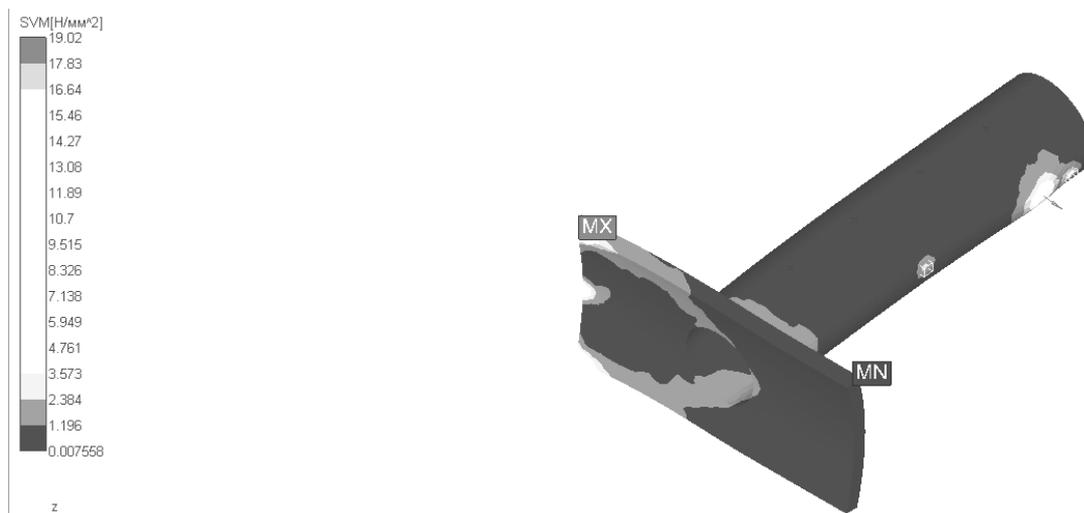


Рис. 6. Карта внутренних напряжений в элементе конструкции

В ходе экспериментов были получены следующие результаты.

При общей очистке в ультразвуковой ванне наблюдалось видимое разрушение отложений вблизи отверстий и уменьшение темных углеродных отложений на корпусе детали. При этом после первого цикла очистки вода в ванне приобретала ржавый оттенок, на дне скапливался черный шлам. После замены воды и второго цикла вода становилась более светлой, количество шлама уменьшалось. После третьего цикла шлам не наблюдался, но вода сохраняла светло ржавый оттенок. Применение данной классической схемы ультразвуковой очистки позволило удалить до 70% загрязнений. Оценка проводилась путем определения расхода воды через каналы и отверстия до и после очистки при помощи ультразвукового расходомера-счетчика «Днепр-7».

При применении контактной схемы ультразвукового воздействия при определенных условиях на изделии возникали фонтаны распыляемой ультразвуком жидкости, что свидетельствовало о резком росте интенсивности воздействия. Примене-

ние очистки контактным методом позволило удалить не менее 97% [2].

С целью выявления механизма данного факта исследовали кинетику удаления загрязнений из скрытых полостей и каналов при использовании объемной кавитационной очистки и контактного воздействия ультразвукового преобразователя.

Полученные в результате обработки экспериментальных данных аппроксимирующие функции процессов имеют следующий вид:

$$\Delta Q_o = 0,0012A^{0,731}t^{0,165}, \quad (2)$$

$$\Delta Q_k = 0,015A^{1,19}t^{0,238}, \quad (3)$$

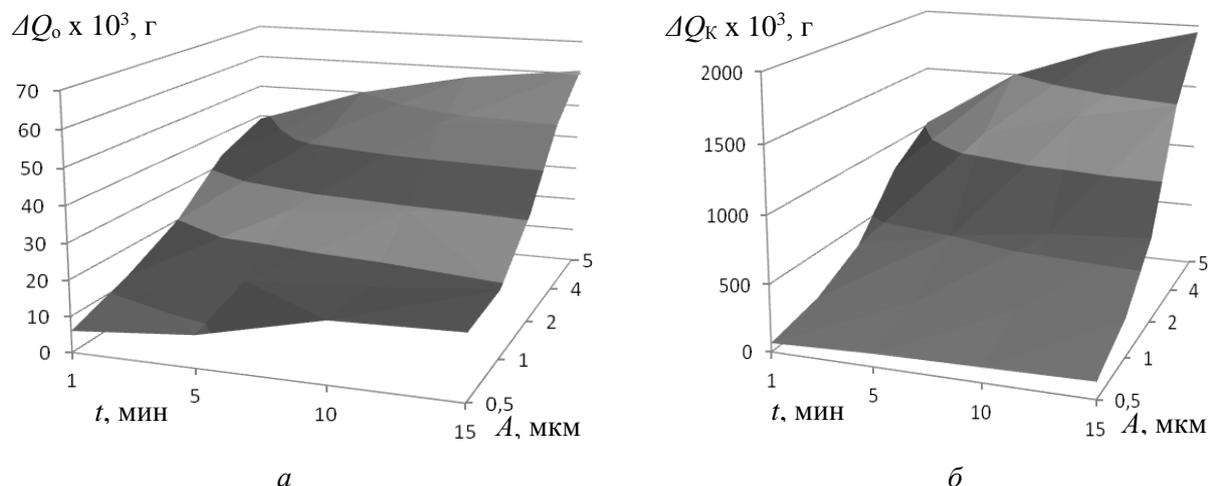
где  $\Delta Q_o$  и  $\Delta Q_k$  – соответственно изменение веса образцов-имитаторов после очистки по известной схеме объемной очистки и по предлагаемой схеме;  $A$  – амплитуда колебаний торца ультразвукового преобразователя;  $t$  – время очистки.

Результаты расчетов по (2) и (3) представлены на рис. 7.

Видно, что при изменении схемы

очистки сохраняется общий характер зависимостей, но при этом влияние амплитуды колебаний излучателя существенно (на 62%) выше. Время очистки также оказывает большее влияние примерно на 44%. При

этом на малых (менее 1 мкм) амплитудах влияние времени обработки практически не проявляется. Объяснить данный эффект можно изменением механизма разрушения загрязнений.



**Рис. 7.** Зависимость изменения веса образца от схемы и режимов ультразвуковой очистки: *a* – объемная кавитация, *б* – контактное воздействие

При объемной очистке «работает» кавитационный механизм воздействия на загрязнения ударных волн и мгновенных температур схлопывающихся микропузырьков, что приводит к скалыванию микрочастиц загрязнений, проникновению жидкости в трещины и поры согласно эффекту Ребиндера и отслоению фрагментов. В скрытых зонах, несмотря на интенсивность ультразвука, кавитация малоинтенсивна, энергия пузырьков и их количество резко падают по мере удаления от входных кромок отверстий и каналов. Это приводит к снижению эффективности разрушения агломератов и слоев загрязнений. При контактной схеме непосредственно поверхность изделия, покрытая загрязнениями, испытывает высокочастотные волновые деформации, что способствует возникновению внутренних напряжений и усталостных трещин в агломерате и слоях загрязнений. В результате происходит резкое снижение адгезионно-когезионной прочности загрязнений и разрушение достаточно крупных их фрагментов, сопровождающееся уже упомянутым выше эффектом Ребиндера. Таким образом, в единицу времени происходит удаление больших

масс материала. В то же время внутренняя поверхность каналов является при такой схеме источником ультразвуковых колебаний, вызывающих кавитацию во внутреннем объеме, что дополнительно разрушает и вымывает загрязнения. При малых амплитудах величина деформаций и динамические нагрузки резко снижаются, что уменьшает напряжения в слоях загрязнений и затрудняет их механическое разрушение.

Таким образом, на основе компьютерного моделирования установлена возможность силового контактного воздействия ультразвукового излучателя на конструктивные элементы очищаемого изделия. Экспериментально получены результаты, свидетельствующие о почти 30-кратном повышении эффективности удаления загрязнений из внутренних полостей и каналов за счет контактного воздействия излучателя. Изложенное позволяет рекомендовать метод контактной ультразвуковой очистки для обработки изделий сложной формы с многочисленными внутренними каналами и полостями при отсутствии жестких требований к качеству наружной поверхности.

1. **Бржозовский Б.М.** Ультразвуковые технологические процессы и оборудование в машино- и приборостроении / Б.М. Бржозовский, Н.В. Бекренев. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2009. 348 с.

2. **Бекренев Н.В.** Новая ультразвуковая

технология восстановления работоспособности горелочных устройств газоперекачивающих агрегатов / Н.В. Бекренев, М.В. Аврамов, А.М. Сарсенгалиев и др. // Научно-технические технологии в машиностроении, 2016, № 2. С. 39-43.

**Сарсенгалиев Айдос Миргенгалиевич** – аспирант кафедры «Техническая механика и детали машин» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Злобина Ирина Владимировна** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техническая механика и детали машин» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Карачаровский Владимир Юрьевич** - кандидат технических наук, доцент кафедры «Техническая механика и детали машин» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Бекренев Николай Валерьевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Техническая механика и детали машин» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Aydos M. Sarsengaliyev** – Postgraduate Department of Engineering Mechanics and Machine Elements, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Irina V. Zlobina** - Ph.D., Associate Professor, Department of Engineering Mechanics and Machine Elements, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Vladimir. Yu. Karacharovsky** – PhD, associate Professor, Department Engineering Mechanics and Machine Elements, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Nikolay V. Bekrenev** – Dr. Sc., Professor, Head: Department of Engineering Mechanics and Machine Elements, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

*Статья поступила в редакцию 05.02.16, принята к опубликованию 19.02.16*

### УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Редакция готова опубликовать сведения о ваших вузах и предприятиях, об их истории, научных и производственных успехах, планах на будущее. Объем публикации – одна страница текста с фотографиями.

# ЭЛЕКТРОХИМИЯ

УДК 343.983

## ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗМЕНЕННЫХ ИЛИ УНИЧТОЖЕННЫХ МАРКИРОВОЧНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ НА БЛОКАХ ДВИГАТЕЛЕЙ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ СЕРОГО ЧУГУНА

В.М. Райгородский

## ELECTROCHEMICAL METHODS FOR RESTORATION OF SWAPPED OR DESTROYED IDENTIFICATION NUMBERS ON THE ENGINE BLOCKS OF VEHICLES MANUFACTURED FROM GRAY CAST IRON

V.M. Raigorodskiy

*Статья посвящена оптимизации метода электролитического травления для восстановления измененных или уничтоженных маркировочных обозначений на блоках двигателей транспортных средств, изготовленных из серого чугуна.*

Ключевые слова: электролит, электролитическое травление, маркировочные обозначения, блок двигателя, серый чугун, восстановление маркировочных обозначений

Повышенный интерес к автомобилю как к объекту преступного посягательства обусловлен его достаточно высокой стоимостью, относительной простотой и универсальностью реализации. Этим обусловлен высокий уровень хищений легковых автомобилей отечественного и зарубежного производства с целью перепродажи, разукрупнения и т.д.

По статистике ГИБДД на всей территории России в 2015 году было угнано 36323 автомобиля, в 2014 году - 39253. В денежном эквиваленте это составляет около 10 миллиардов рублей.

Для легализации криминальных авто-

*The article is devoted to the optimization of the electrolytic etching method used to restore the swapped or destroyed identification numbers on the engine blocks of vehicles manufactured from gray cast iron.*

Keywords: electrolyte, electrolytic etching, identification number, engine block, gray cast iron, restoration of identification marks

мобилей необходимо привести все номерные агрегаты, в том числе номер двигателя похищенного транспортного средства, в соответствие указанному в паспорте транспортного средства (ПТС), с помощью которого предполагается его легализация.

В соответствии с приказом МВД РФ № 28 от 20.01.2011 г. "О внесении изменений в нормативные правовые акты МВД России" [1] при постановке на учет и при техосмотре номер двигателя проверяться не будет. Это может быть неправильно истолковано в том смысле, что с апреля 2011 года (время вступления в силу данного приказа) номер двигателя не является

идентифицирующим признаком транспортного средства. На самом деле номер силовой установки действительно не указывается в свидетельстве о регистрации транспортного средства, но в ПТС и в системе автоматического учета ГИБДД эти данные фигурируют наравне с нумерацией кузова или шасси, цветом автомобиля, типом и объемом силовой установки.

При любом подозрении на криминальный характер представленного автомобиля, проводится его криминалистическое исследование с целью установления соответствия данным, приведенным в ПТС, в том числе исследование маркировочных обозначений двигателя, установление его возможного уничтожения или изменения, первоначального значения маркировки.

Исследование маркировочных обозначений начинается с изучения площадки, на которую они наносятся. Если площадка получена фрезерованием, то изучается ее параллельность остальным фрезеруемым плоскостям, наличие отклонения от плоскостности вдоль поверхности площадки. Особое внимание необходимо обратить на следы абразивной обработки как на самой площадке, так и вокруг нее. Полученная на этом этапе информация поможет сделать вывод о возможном удалении или изменении первоначальных маркировочных обозначений.

В случае установления факта, указывающего на удаление металла с целью уничтожения или изменения номера двигателя дальнейшее исследование направлено на детальное изучение маркировочных обозначений. Целью данного исследования является установление соответствия штрихов маркировочных обозначений способу, используемому для их нанесения.

В настоящее время маркирование блоков двигателей производится одним из следующих способов:

- клеймение (набором клейм) вручную без использования или с использованием кондуктора. В обоих случаях оттиски клейм наносят ударным способом поочередно. Использование кондуктора (оправки) уменьшает отклонение знаков от линии строки;

- клеймение (набором клейм) механизированным способом с использованием автоматических и полуавтоматических маркираторов. Указанные механизированные способы можно условно разделить на ударный способ и накатку. Ударный способ - это механизированный вариант клеймения вручную. При использовании накатки элементы клейма располагаются в обойме на боковой поверхности цилиндра и переносятся на деталь при движении этого цилиндра с усилием по поверхности;

- кернение точками, при котором ударное воздействие на поверхность маркировочной площадки производится иглами, оттиски конических рабочих частей которых образуют рельефные элементы начертания требуемых маркировочных знаков;

- микрогравирование;

- маркирование с помощью лазеров;

- электроискровой способ.

Каждый из перечисленных способов имеет свои особенности, которые отражаются в штрихах (трассах) маркировочных обозначений. Особенности маркировочных обозначений, позволяющие идентифицировать способ их нанесения, освещены в литературе [2 - 6]. Эти данные позволяют получить дополнительную информацию о возможном изменении маркировки.

При наличии сомнений в подлинности маркировочных обозначений, дальнейшее исследование направлено на их восстановление. Начинается этот процесс с подготовки маркировочной площадки к процессу восстановления, который включает очистку площадки от загрязнений, шлифовку поверхности наждачной бумагой различной зернистости. Целью шлифовки является удаление трасс на площадке, которые могут затруднить зрительную, а также фотофиксацию выявленных штрихов.

Восстановление обозначений может производиться различными способами [2, 7], среди которых наиболее распространены химический и электрохимический методы. Ранее нами было показано преимущество электрохимического метода по сравнению с химическим [8], который в данной работе был выбран как основной.

Блоки двигателей ТС изготавливают методом литья под давлением или литьем в кокиль. Материалы, используемые для

изготовления блоков двигателей различными заводами-изготовителями приведены в табл. 1 [2].

Таблица 1

Материалы, используемые для изготовления блоков двигателей транспортных средств

Наименование, марка сплава	Наименование завода-изготовителя. Марки двигателей, автомобилей
Серый чугун СН 190В (ГОСТ 4832-95) <sup>1</sup>	Волжский автомобильный завод. Все автомобили ВАЗ. Мелитопольский завод "Мотордеталь", двигатель МеМЗ-1102 для автомобиля ЗАЗ-1102 "Таврия".
Серый чугун СЧ 24-44 (ГОСТ 1412-85)	Завод им. Ленинского комсомола. Двигатели автомобилей "Москвич".
Магниевый сплав МЛ-5 (ГОСТ 2856-79)	Мелитопольский завод "Мотордеталь", все модели двигателей МеМЗ для автомобилей ЗАЗ (кроме ЗАЗ-1102) и двигатель МеМЗ-969А (для автомобилей ЛуАЗ).
Алюминиевый сплав АЛ-4 (ГОСТ 2685-75) <sup>2</sup>	Уфимский моторостроительный завод, двигатели моделей 412Э <sup>3</sup> , 412Ю <sup>4</sup> , 412 ДЭ <sup>5</sup> , 412ДЮ <sup>6</sup> для автомобилей "Москвич" ПО "Ижмаш". Заволжский моторный завод, все модели двигателей для автомобилей ГАЗ "Волга" (М-21, ГАЗ-21, ГАЗ-24, ГАЗ-2401, ГАЗ-2402, ГАЗ-2410, ГАЗ-3102, ГАЗ-3110)

<sup>1</sup> В настоящее время указанный ГОСТ отменен. Марке чугуна СН 190В в соответствии с результатами исследования химического состава представленных образцов соответствует чугун марки СЧ-15 (ГОСТ 1412-85), химический состав которого приведен в табл. 2.

<sup>2</sup> В настоящее время указанный ГОСТ заменен на ГОСТ 1583-93. Сплавы алюминиевые литейные. Технические условия.

<sup>3</sup> Экспортное исполнение двигателя.

<sup>4</sup> Тропическое исполнение двигателя.

<sup>5</sup> Дефорсированный двигатель в экспортном исполнении.

<sup>6</sup> Дефорсированный двигатель в тропическом исполнении

Как следует из табл. 1, блоки двигателей транспортных средств могут быть изготовлены из серого чугуна, алюминиевых и магниевых сплавов. Ранее нами были представлены результаты восстановления маркировочных обозначений на блоках двигателей транспортных средств, изготовленных из магниевых сплавов [9]. В данной работе в качестве объектов исследования выбраны маркировочные обозначения, нанесенные на блоки двигателей транспортных средств, изготовленных из серого чугуна.

Для исследования были вырезаны образцы блоков двигателей автомобилей ВАЗ-2103 и ВАЗ 2106.

Определение элементного состава экспериментальных образцов проводили спек-

троскопическими методами. Марку сплавов определяли сравнением полученных результатов с элементным составом, известным из соответствующих ГОСТ (табл.2).

На исследуемых образцах вручную ударом молотка по клейму наносили трех или четырехзначные обозначения, которые затем удаляли с помощью наждачного круга. Толщина удаляемого слоя металла выбиралась, исходя из условия полного исчезновения всех штрихов обозначений.

Подготовка к процессу восстановления заключалась в шлифовании поверхности наждачной бумагой средней зернистости (50 – 100 мкм), а затем мелкозернистой (20 – 40 мкм). Шлифование проводили попеременно трасс, оставленных наждачным кру-

гом, до тех пор, пока на образце не оставались единичные наиболее глубокие трассы,

расстояние между которыми намного превышало толщину выявляемых штрихов.

Таблица 2

Химический состав сплавов из серого чугуна, полученных литьем под давлением и используемых для изготовления блоков двигателей транспортных средств (в соответствии с ГОСТ 1412-85. Чугун с пластинчатым графитом для отливок. Марки)

Марка чугуна	Массовая доля элементов, %				
	Углерод	Кремний	Марганец	Фосфор	Сера
				Не более	
СЧ 10	3,5-3,7	2,2-2,6	0,5-0,8	0,3	0,15
СЧ 15	3,5-3,7	2,0-2,4	0,5-0,8	0,2	0,15
СЧ 20	3,3-3,5	1,4-2,4	0,7-1,0	0,2	0,15
СЧ 25	3,2-3,4	1,4-2,2	0,7-1,0	0,2	0,15
СЧ 30	3,0-3,2	1,3-1,9	0,7-1,0	0,2	0,12
СЧ 35	2,9-3,0	1,2-1,5	0,7-1,1	0,2	0,12

Электрохимический метод восстановления осуществляли путем контакта участка, на котором проводили восстановление, с ватным тампоном, смоченным в электролите. Анодом в этом случае служил образец блока двигателя, а катодом – пинцет, зажимающий ватный тампон и равномернодвигаемый вдоль поверхности. Источником постоянного напряжения служил лабораторный блок питания НУ-1500, позволяющий стабилизировать напряжение до 15 В и ток до 2 А. Электрохимическое травление в большинстве случаев осуществляли при максимальном напряжении и токе.

Для восстановления маркировочных обозначений на образцах из серого чугуна были опробованы электролиты на основе:

- смеси водных растворов азотной кислоты, уксусной кислоты, этилового спирта;
- смеси водных растворов серноокислой меди, желатина, серной кислоты;
- водных растворов соляной кислоты;
- смеси водных растворов соляной кислоты, меди хлорной, этилового спирта;
- смеси водных растворов азотной кислоты в ацетонгидриде, метилового и этилового спиртов;
- смеси водных растворов соляной кислоты, меди двуххлористой, этилового спирта;
- водных растворов молибденовокисло-

го аммония;

- спиртовых растворов пикриновой кислоты;
- водных растворов хлорного железа;
- водных растворов персульфата аммония;
- смеси водных растворов сульфата натрия, бихромата калия, сульфата натрия;
- водных растворов хлористого натрия;
- растворов азотной кислоты в этиловом спирте;
- водных растворов бихромата калия;
- растворов бихромата калия в серной кислоте;
- водных растворов азотной кислоты;
- смеси глицерина, уксусной кислоты, азотной кислоты;
- водных растворов серной кислоты;
- смеси соляной и серной кислот;
- смеси водных растворов соляной кислоты, меди хлорной, хлорного железа;
- смеси водных растворов азотной кислоты и хлорного железа.

В литературе приведен крайне незначительный набор травителей и электролитов, используемых для восстановления маркировочных обозначений на чугуне и стали [2, 6, 7]. Большинство рецептов электролитов, приведенных выше, были взяты из литературы по металлографическому травлению черных металлов [10, 11]. Были опробованы также электролиты, рецепты кото-

рых ранее не публиковались в печати. К ним, в частности, относятся водные растворы бихромата калия. Для большинства электролитов проводили варьирование компонентов, входящих в их состав.

Наилучшие результаты получены при использовании электролитов на основе сернокислой меди, желатина и серной кислоты (рис. 1), водных растворов персульфата аммония (рис. 2), водных растворов бихромата калия (рис. 3) и растворов бихромата калия в серной кислоте. В первом случае на поверхности образовывался незначительный налет красного цвета, причиной которого являлось электролитическое осаждение меди. Данный налет не ухудшал наблюдение обозначений, а несколько увеличивал их контраст. Неплохие результаты, но гораздо менее воспроизводимые, были получены при использовании

в качестве электролитов водных растворов азотной и серной кислот. В частности, на рис. 4 и 5 показаны положительный и отрицательный результаты восстановления, полученные при использовании одного и того же электролита. Для многих электролитов характерно образование на поверхности маркировочных площадок пленок темного цвета, которые не смывались водой и органическими растворителями, и мешали наблюдению восстановленных маркировочных обозначений (рис. 6). Для некоторых электролитов, например, водных растворов хлористого натрия, а также смеси водных растворов азотной кислоты в ацетонгидриде, метилового и этилового спиртов отсутствовало растворение поверхности и, соответственно, восстановления маркировочных обозначений не происходило (рис. 7).



**Рис. 1.** Результат восстановления маркировочных обозначений с использованием электролита следующего состава: сернокислая медь – 1г., желатин – 1г., концентрированная серная кислота – 10мл., вода дистиллированная – 500мл



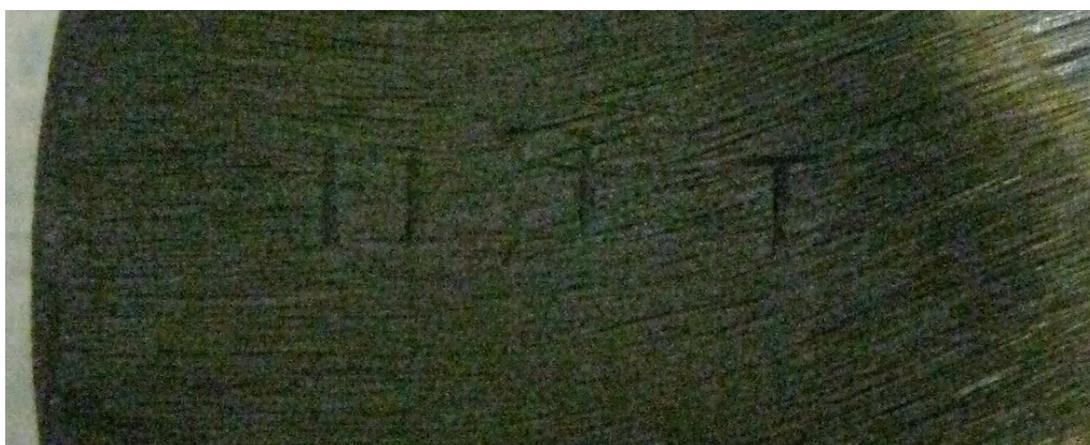
**Рис. 2.** Результат восстановления маркировочных обозначений с использованием электролита на основе 10 %-ого водного раствора персульфата аммония



**Рис. 3.** Результат восстановления маркировочных обозначений с использованием электролита на основе 15 %-ого водного раствора бихромата калия



**Рис. 4.** Результат восстановления маркировочных обозначений с использованием электролита на основе 1 %-ого раствора серной кислоты



**Рис. 5.** Потемнение площадки в процессе восстановления маркировочных обозначений с использованием 1 %-ого раствора серной кислоты



**Рис. 6.** Образование темного налета при проведении электролитического травления с использованием 30 %-ого водного раствора молибденовокислого аммония



**Рис. 7.** Отсутствие растворения поверхности при проведении электролитического травления с использованием электролита следующего состава:

- 4 %-ный раствор азотной кислоты в ацетонгидриде - 30 мл.;
- метиловый спирт - 10 мл.;
- этиловый спирт - 10 мл

Одновременно с электрохимическим методом и с использованием этих же растворов проводили химическое травление тех же образцов. Сравнение обоих методов показало примерно одинаковое качество восстановления. Однако электролитическое травление более воспроизводимый и регулируемый процесс по сравнению с хи-

мическим травлением. Практически для всех используемых растворов время проведения электрохимического процесса было существенно меньше химического. В некоторых случаях процесс электролитического травления приходилось искусственно замедлять, уменьшая напряжение источника питания.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Приказ Министерства внутренних дел Российской Федерации от 20 января 2011 г. № 28 г. Москва "О внесении изменений в нормативные правовые акты МВД России". Зарегистрирован в Минюсте РФ 17 марта 2011 г. Регистрационный № 20152. / "Российская Газета" от 23 марта 2011 г.

№ 5436.

2. **Митричев Л.С.** Исследование маркировочных данных автотранспортных средств / Л.С. Митричев и др. – М., 1995. 78 с.

3. **Нагайцев А.А.** Исследование маркировочных обозначений легковых автомоби-

лей зарубежного производства / А.А. Нагайцев – М., 1999. 108 с.

4. **Прохоров-Лукин Г.В.** Установление фактических данных об автомобилях методами криминалистических экспертиз / Г.В. Прохоров-Лукин – Киев, 2000. 98 с.

5. **Родионов П.А.** Криминалистическое исследование маркировочных обозначений грузовых автомобилей и автобусов иностранного производства / П.А. Родионов – М., 2002. 152 с.

6. **Чубченко А.А.** Идентификационные особенности отечественных автомобилей, выпущенных после 1990 г. / А.А. Чубченко, И.В. Власов – М., 1998. 198 с.

7. **Райгородский В.М.** Экспертиза восстановления измененных и уничтоженных маркировочных обозначений / В.М. Райгородский, В.Н. Хрусталева, С.А. Ермолаев – Саратов, 1999. 72 с.

8. **Райгородский В.М.** Использование электрохимических методов для восстановления измененных или уничтоженных маркировочных обозначений. / В.М. Райгородский // Вопросы электротехнологии. 2014. № 1 (2). С. 52-58.

9. **Райгородский В.М.** Использование электрохимических методов для восстановления измененных или уничтоженных маркировочных обозначений на блоках двигателей транспортных средств, изготовленных из магниевых сплавов. / В.М. Райгородский // Вопросы электротехнологии. 2014. № 2 (3). С. 47-53.

10. **Беккерт М.** Способы металлографического травления / М. Беккерт, Х. Клемм – М., 1988. 468 с.

11. Металлографические реактивы / Под ред. В.С. Коваленко – М., 1981. 320 с.

---

**Райгородский Владимир Михайлович** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Инженерная физика» Саратовского государственного аграрного университета имени Н.И. Вавилова

**Vladimir M. Raigorodskiy** – Ph.D., Associate Professor, Department of Engineering Physics, N.I. Vavilov Saratov State Agrarian University

*Статья поступила в редакцию 21.02.16, принята к опубликованию 26.02.16*



---

# ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 621.318.3

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭНЕРГИИ В РЕЖИМЕ СОГЛАСНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ ОБМОТОК В ЕДИНЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ КОНТУР

**Д.А. Вырыханов**

### SIMULATION OF ELECTRODYNAMIC ENERGY CONVERTER WORKFLOWS INTO A SINGLE ELECTRIC CIRCUIT UNDER A SERIES CONNECTION MODE

**D.A. Vyrykhanov**

*Представлены результаты сравнения расчетных и экспериментальных динамических зависимостей тока и координаты якоря электромеханического преобразователя энергии электродинамического типа. Описывается экспериментальная установка и ее расчетная модель, построенная на основании оригинального алгоритма вычислений.*

Ключевые слова: *электромеханический преобразователь энергии, электродинамическая машина, моделирование, эксперимент, алгоритм расчета, электрический ток, пространственная координата*

Технические характеристики электрических машин зависят не только от их конструкции, но и от режима управления. При проектировании систем управления электрическими машинами важной задачей является расчет их динамических характеристик, основными из которых являются динамические зависимости токов и пространственных координат подвижных частей машины. Управление электрической машиной в реальном времени с по-

*The paper presents the results of comparison between the calculated and experimental dynamic current dependencies, and the coordinate of the anchor to electromechanical energy converter of electrodynamic type. The author describes the experimental unit and the calculation model developed on the basis of unique calculation algorithm.*

Keywords: *electromechanical energy converter, electrodynamic machine, simulation, experiment, calculation algorithm, the electric current, the spatial coordinat*

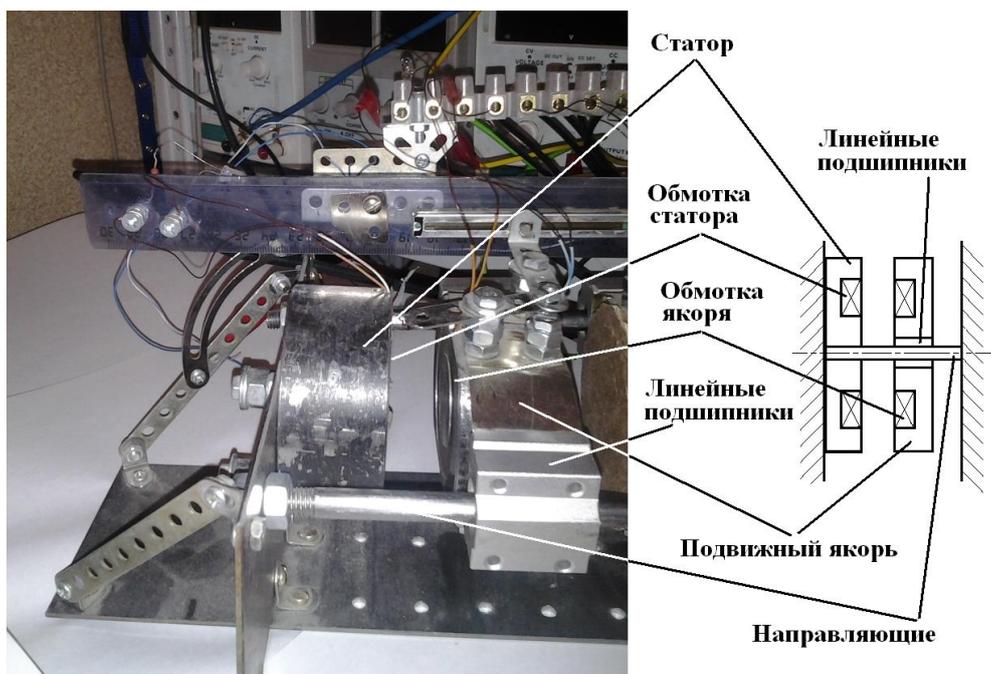
мощью информационно-вычислительных систем требует также сопровождения рабочего процесса машины результатами расчетов его режимных характеристик, в том числе с опережением на некоторую перспективу во времени. При этом простота реализации алгоритма расчетов определяет требования к аппаратной составляющей системы управления в части ее быстродействия, которое, в свою очередь, определяет стоимость системы управле-

ния. Таким образом, создание и апробирование алгоритмов расчета динамических характеристик электрических машин, отличающихся меньшим количеством вычислительных операций, меньшей погрешностью, является актуальной задачей.

В настоящей статье представлены материалы апробирования алгоритма расчета динамических зависимостей тока и координаты якоря электромеханического преобразователя энергии электродинамического типа с прямолинейным движением якоря. Выбор электродинамического типа электромеханического преобразователя энергии обусловлен наибольшей общностью рабочих процессов в нем с рабочими процессами в большинстве типов электрических двигателей: асинхронных, синхронных, машин постоянного тока. Рассмотрение реактивных двигателей, согласно предлагаемому алгоритму расчета динамических зависимостей тока и пространственной координат якоря, представлено в работе [1]. В качестве режима работы экспериментальной установки выбран режим, при котором обмотки электродинамического преобразователя включены согласно и все формируемые электромагнитные усилия (за счет изменения собствен-

ных индуктивностей, а также за счет изменения взаимоиндуктивности между обмотками) направлены в одну сторону (притягивая якорь к статору). Обмотки включены последовательно в единый электрический контур, то есть ток, протекающий в них, имеет одно и то же значение. Данный режим наиболее прост для экспериментальной реализации и расчетов, что позволяет наилучшим образом оценить погрешность апробируемой методики расчетов.

Конструкция электродинамического преобразователя энергии представлена на рис. 1. Она представляет собой два горшкообразных магнитопровода из стали марки Ст10. Один является статором и неподвижно закреплен на основании. Второй образует подвижный ротор. В пазах магнитопроводов уложены обмотки, состоящие из 240 витков медного провода диаметром 0,2 мм уложенных в навал. Сечение окна обмотки равно  $1,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ . Коэффициент заполнения окна обмотки медью составляет 0,26. Масса подвижно якоря составляет 1,5 кг. Якорь крепится на двух направляющих, установленных симметрично с двух сторон от него, вдоль которых скользит на линейных подшипниках. Сила сопротивления движению якоря составляет 0,1 Н.



**Рис. 1.** Экспериментальный образец электродинамического преобразователя энергии

Принципиальная электрическая схема экспериментальной установки представлена на рис. 2. Индуктивности статора  $L_{ст.}$  и якоря  $L_{як.}$  включены последовательно на напряжение питания  $E_{пит.}$ . Данный контур содержит активные сопротивления обмоток статора и якоря  $R_{пр.1} = 33$  Ом, источника питания  $R_{ист.1}$  (автоматически компенсируется за счет поддержания напряжения на выходе источника питания АТН-1535 марки АКТАКОМ при потребляемом токе до 5 А), измерительного сопротивления  $R_{изм.1} = 1$  Ом.

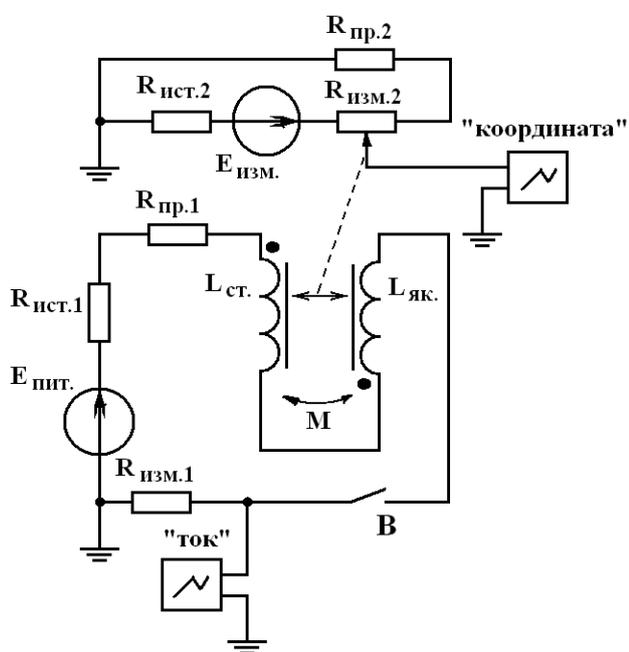


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема экспериментальной установки

Напряжение на измерительном сопротивлении  $R_{изм.1}$  регистрируется первым каналом осциллографа АСК-4106 марки АКТАКОМ. Численно данное напряжение будет пропорционально величине тока, протекающего в обмотках электродинамического преобразователя. Координата якоря регистрируется с помощью резистивного датчика местоположения – переменного резистора  $R_{изм.2} = 10$  Ом, подвижный контакт которого жестко соединен с якорем. Зависимость сопротивления от координаты

линейная. На данный резистор подано напряжение  $E_{изм.} = 5$  В, источник напряжения обладает внутренним сопротивлением  $R_{ист.2}$ . Соединительные проводники обладают сопротивлением  $R_{пр.2}$ . Исходя из условия  $R_{изм.2} \gg R_{пр.1} + R_{ист.2}$ , величины сопротивлений  $R_{ист.2}$ ,  $R_{пр.2}$  игнорируются. С подвижного контакта сопротивления  $R_{изм.2}$  вторым каналом осциллографа регистрируется напряжение, пропорциональное координате якоря.

Величины индуктивностей  $L_{ст.}$ ,  $L_{як.}$  и взаимной индуктивности между ними  $M$ , измеренные с помощью прибора «СТ-micro v1.0» в зависимости от расстояния между статором и якорем, представлены в таблице. Влияние насыщения стали магнитопровода на величины индуктивностей не учитывается. Взаимоиндуктивность между обмотками определялась разностью между измеренной индуктивностью отдельной обмотки и индуктивностью включенных последовательно обмоток.

Значения собственных и взаимной индуктивностей обмоток электродинамического преобразователя

Рабочий зазор, мм	0	5	1	15	20
$L_{ст.}$ , Гн	1.111	0.039	0.03	0.027	0.026
$L_{як.}$ , Гн	1.112	0.037	0.027	0.025	0.024
$M$ , Гн	1.103	0.025	0.012	0.007	0.004

В ходе эксперимента был сформирован режим притяжения статора и якоря, при котором они изначально разводились на расстояние 20 мм, и обмотки включались согласно друг с другом. При подаче питания в цепь за счет замыкания ключа «В» (рис. 2) магнитное поле формировало электромагнитное усилие, притягивающее якорь к статору.

На основании обозначенных конструктивных параметров электродинамического

преобразователя в соответствии с теоретическими построениями [2 – 6] разработан алгоритм расчетов динамических зависимостей тока и координаты якоря. Сопоставление данных зависимостей, получен-

ных из эксперимента, с расчетными данными представлено на рис. 3. Алгоритм расчетов реализован в программе Simulink [7]. Структурная модель представлена на рис. 4.

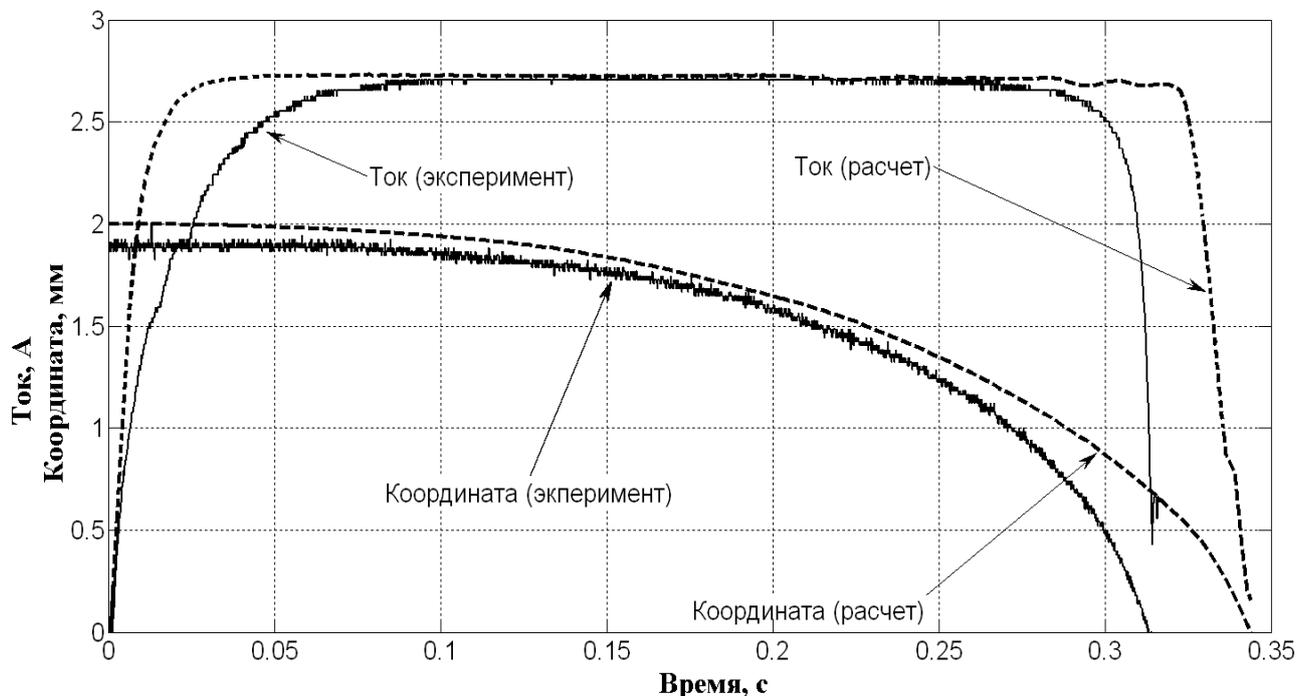


Рис. 3. Сравнение экспериментальных и расчетных динамических зависимостей тока и координаты якоря электродинамического преобразователя энергии

Присутствующие в модели блоки выполняют следующие вычисления.

1. «Расчет координаты якоря» - вычисляет динамическую зависимость координаты якоря согласно выражению:

$$x = \int_0^t P dt,$$

где  $x$  - координата подвижного якоря;

$$P = \begin{cases} 0 & \text{при } x < x_{\min}, \\ -\frac{1}{m_0} \int_0^t (F_{ст.} + F_{як.} + F_{сопр.}) dt & \text{при } x_{\min.} \leq x \leq x_{\max}, \\ 0 & \text{при } x_{\max.} < x; \end{cases}$$

$m$  - масса подвижного якоря;  $x_{\min.}$ ,  $x_{\max.}$  - максимальное и минимальное возможные значения координаты якоря, ограниченного в своем движении конструкцией двигателя;  $F_{сопр.}$  - величина силы сопротивления движению, определяемая:

$$F_{сопр.} = \begin{cases} -F_{сопр.} & \text{при } dx/dt > 0, \\ F_{сопр.} & \text{при } dx/dt < 0; \end{cases}$$

$F_{ст.}$ ,  $F_{як.}$  - усилия электромагнитной природы, развиваемые при электромеханическом преобразовании энергии в статоре и якоре.

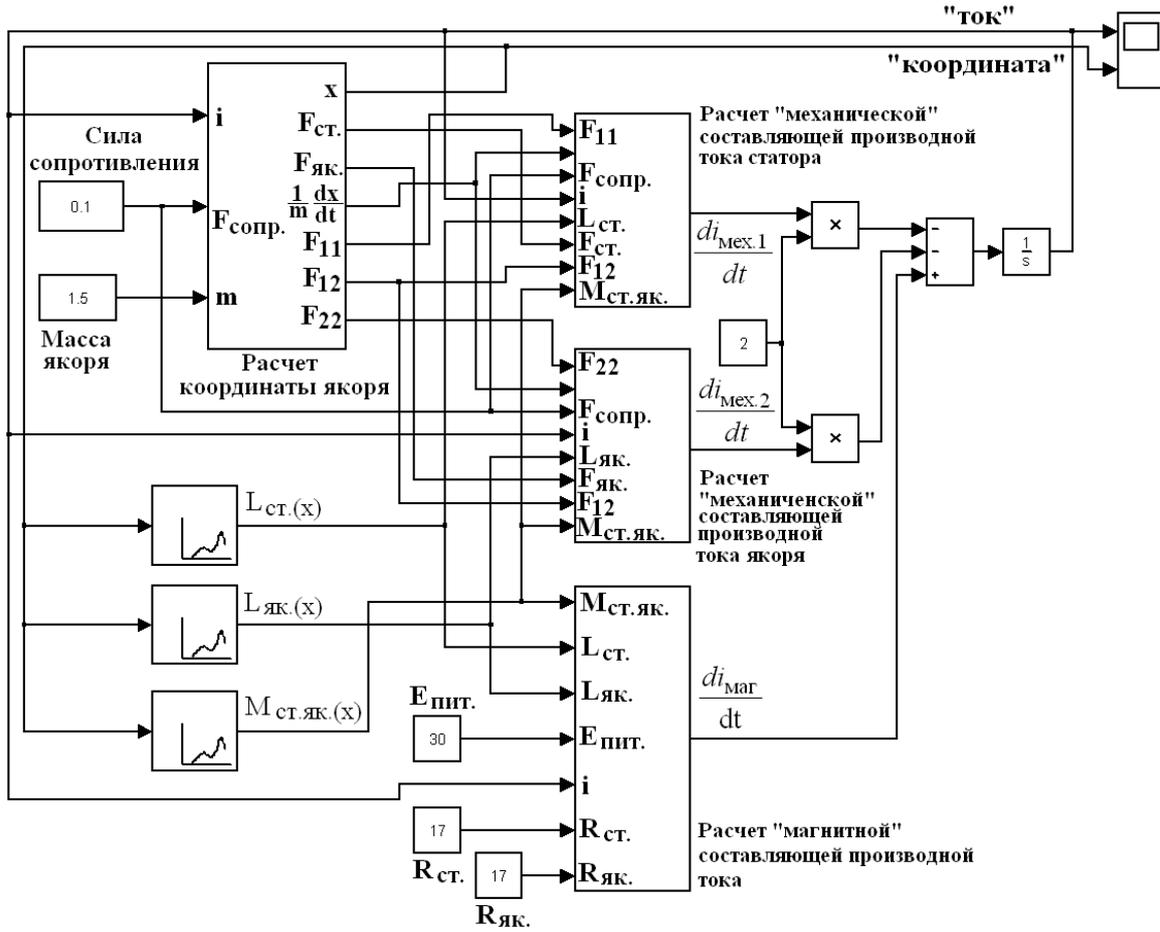


Рис. 4. Структурная модель расчета динамических характеристик электродинамического преобразователя

Данные усилия определяются согласно следующим соотношениям:

$$F_{ст.} = F_{11} + F_{12} = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L_{ст.}}{\partial x} + \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial M_{ст.як.}}{\partial x},$$

$$F_{як.} = F_{22} + F_{12} = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L_{як.}}{\partial x} + \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial M_{ст.як.}}{\partial x},$$

где  $i$  - электрический ток протекающий в последовательно соединенных обмотках статора и якоря;  $L_{ст.}$  - индуктивность обмотки статора;  $L_{як.}$  - индуктивность обмотки якоря;  $M_{ст.як.}$  - взаимоиנדуктивность между обмотками статора и якоря;  $F_{11} = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L_{ст.}}{\partial x}$ ,

$F_{22} = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L_{як.}}{\partial x}$  - электромагнитные усилия, формируемые изменением собственной индуктивности обмоток, соответствен-

но, статора и якоря;  $F_{12} = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial M_{ст.як.}}{\partial x}$  - половина электромагнитного усилия, формируемого изменением взаимоиנדуктивности между обмотками статора и якоря.

Входными данными расчета блока «Расчет координаты якоря» являются  $i$ ,  $F_{сопр.}$ ,  $m$ ; выходными данными являются  $x$ ,  $F_{ст.}$ ,  $F_{як.}$ ,  $\frac{1}{m} \frac{dx}{dt}$ ,  $F_{11}$ ,  $F_{22}$ ,  $F_{12}$ .

2. «Расчет «механической» составляющей производной тока статора» - производит расчет приращения «механической» [1 - 6] составляющей скорости изменения тока, формируемой механической мощностью, преобразуемой в обмотке статора, согласно выражениям:

$$\frac{di_{мех.1}}{dt} = \frac{di_{мех.11}}{dt} + \frac{di_{мех.12}}{dt},$$

где  $\frac{di_{\text{мех.11}}}{dt}$ ,  $\frac{di_{\text{мех.12}}}{dt}$  - составляющие, определяемые механической мощностью, формиру-

емой, соответственно, усилиями  $F_{11}$  и  $F_{12}$ , рассчитываемыми согласно выражениям:

$$\frac{di_{\text{мех.11}}}{dt} = \begin{cases} 0 & \text{при } |i| < i_{\text{мин}} ; \\ (F_{11} - \frac{F_{11}F_{\text{сопр}}}{F_{\text{ст.}}}) & \\ \frac{dx}{iL_{\text{ст.}}m} \frac{dx}{dt} & \text{при } |i| < i_{\text{мин}} ; \end{cases} ,$$

$$\frac{di_{\text{мех.12}}}{dt} = \begin{cases} 0 & \text{при } |i| < i_{\text{мин}} ; \\ (F_{12} - \frac{F_{12}F_{\text{сопр}}}{F_{\text{ст.}}}) & \\ \frac{dx}{iM_{\text{ст.як.}}m} \frac{dx}{dt} & \text{при } |i| < i_{\text{мин}} ; \end{cases} ,$$

где  $i_{\text{мин.}}$  - минимальное значение тока, при достижении которого механическая мощность двигателем не производится (из-за отсутствия электромагнитного усилия).  $i_{\text{мин.}}$  определяет точность расчетов.

Входными сигналами данного блока являются  $F_{\text{ст.}}$ ,  $\frac{1}{m} \frac{dx}{dt}$ ,  $F_{\text{сопр}}$ ,  $i$ ,  $L_{\text{ст.}}$ ,  $M_{\text{ст.як.}}$ ,  $F_{11}$ ,  $F_{12}$ . Значения  $L_{\text{ст.}}$  и  $M_{\text{ст.як.}}$  определяются как зависимости от координаты якоря согласно Таблице блоками « $L_{\text{ст.}}(x)$ » и

« $M_{\text{ст.як.}}(x)$ » соответственно; выходными данными является выражение  $\frac{di_{\text{мех.1}}}{dt}$ .

3. «Расчет «механической» составляющей производной тока якоря» - производит расчет приращения «механической» [1 - 7] составляющей скорости изменения тока формируемой механической мощностью, преобразуемой в обмотке якоря:

$$\frac{di_{\text{мех.2}}}{dt} = \frac{di_{\text{мех.22}}}{dt} + \frac{di_{\text{мех.12}}}{dt} ,$$

$$\frac{di_{\text{мех.22}}}{dt} = \begin{cases} 0 & \text{при } |i| < i_{\text{мин}} , \\ (F_{22} - \frac{F_{22}F_{\text{сопр}}}{F_{\text{як.}}}) & \\ \frac{dx}{iL_{\text{як.}}m} \frac{dx}{dt} & \text{при } |i| < i_{\text{мин}} . \end{cases}$$

Входными сигналами данного блока являются  $F_{\text{як.}}$ ,  $\frac{1}{m} \frac{dx}{dt}$ ,  $F_{\text{сопр}}$ ,  $i$ ,  $L_{\text{як.}}$ ,  $M_{\text{ст.як.}}$ ,  $F_{22}$ ,  $F_{12}$ . Значение  $L_{\text{як.}}$  определяется как зависимость от координаты якоря согласно таблице блоком « $L_{\text{як.}}(x)$ ». Выходными данными является выражение  $\frac{di_{\text{мех.2}}}{dt}$ .

руемой изменением магнитной энергии, преобразуемой в магнитосвязанных обмотках статора и якоря, согласно выражению:

$$\frac{di_{\text{маг}}}{dt} = \frac{E_{\text{пит.}} - i(R_{\text{ст.}} + R_{\text{як.}})}{L_{\text{ст.}} + L_{\text{як.}} + 2M_{\text{ст.як.}}} , \quad (1)$$

4. «Расчет «магнитной» составляющей производной тока» - производится расчет приращения «магнитной» [1 - 7] составляющей скорости изменения тока, форми-

руемой изменением магнитной энергии, преобразуемой в магнитосвязанных обмотках статора и якоря двигателя, включая сопротивление питающих проводов. Выражение (1) соответствует электрической

схеме включения обмоток преобразователя (рис. 2) и отображает возможность наиболее просто рассчитать «магнитную» составляющую приращения тока. Если бы обмотки были включены встречно, приращение тока в каждой из них приводило бы к некоторой компенсации магнитного поля друг друга пропорционально величине взаимоиндуктивности данных магнитосвязанных обмоток. В свою очередь, магнитные системы обмоток характеризовались бы при этом иными значениями собственных индуктивностей (равных отношению фактического магнитного потока сцепленного с рассматриваемой обмоткой к электрическому току, протекающему в ней), отличными от значений указанных в таблице. В связи с этим, расчеты иных режимов преобразования, отличных от рассматриваемых в данной работе, требуют учета для каждой обмотки собственной величины «магнитного» приращения в зависимости от электрического напряжения на каждой обмотке отдельно.

Входными сигналами данного блока являются  $E_{\text{пит.}}$ ,  $R_{\text{ст.}}$ ,  $R_{\text{як.}}$ ,  $L_{\text{ст.}}$ ,  $L_{\text{як.}}$ ,  $M_{\text{ст.як.}}$ ,  $i$ . Выходным сигналом является мгновенная величина  $\frac{di_{\text{маг.}}}{dt}$ .

Окончательно динамическая функция тока определяется соотношением:

$$i = \frac{di_{\text{маг.}}}{dt} - 2\left(\frac{di_{\text{мех.1}}}{dt} + \frac{di_{\text{мех.2}}}{dt}\right).$$

Результаты сравнения экспериментальных и расчетных зависимостей позволяют положительно оценить адекватность предлагаемого алгоритма расчетов. Погрешность времени срабатывания составляет 6 %. Следует отметить, что в начале цикла срабатывания преобразователя расчетный ток возрастает значительно быстрее экспериментальных значений. Это можно объяснить погрешностью измерения индуктивностей обмоток преобразователя, представленных в таблице.

Экспериментально апробирован алгоритм расчета динамических характеристик электродинамического преобразователя энергии тока и пространственной координаты якоря. Точность расчетов составила по времени срабатывания 6 %, что позволяет рекомендовать данный алгоритм расчета к применению при разработке электромеханических преобразователей энергии с электродинамического типа.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Вырыханов Д.А.** Оптимизация режима конденсаторного питания линейного электромагнитного двигателя в приводе ударных машин / Д.А. Вырыханов, А.А. Егоров, Г.Г. Угаров, К.М. Усанов // Вестник СГТУ. 2006. № 3. С. 78 - 83.

2. **Вырыханов Д.А.** Анализ взаимосвязей электрических контуров в обобщенном электромеханическом преобразователе энергии / Д.А. Вырыханов, Г.Г. Угаров // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2015. № 3. С.33 – 37.

3. **Вырыханов Д.А.** Анализ мощностных и энергетических структур линейного электромагнитного двигателя / Д.А. Вырыханов, Г.Г. Угаров // Проблемы электроэнергетики. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2004. С. 192 – 198.

4. **Вырыханов Д.** Математическая модель процесса электромеханического преобразования энергии / Д.А. Вырыханов, Г.Г. Угаров // Вопросы электротехнологии. 2013. №1. С. 61 – 64.

5. **Вырыханов Д.А.** Матричная математическая модель обобщенного электромеханического преобразователя энергии / Д.А. Вырыханов, Г.Г. Угаров // Вопросы электротехнологии. 2014. №4(5). С. 30 – 33.

6. **Вырыханов Д.А.** Алгоритм расчета динамических зависимостей токов и пространственных координат обобщенного электромеханического преобразователя энергии / Д.А. Вырыханов, Г.Г. Угаров // Вопросы электротехнологии. 2014. №1(2). С. 90 – 95.

7. Герман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем

на ПК / С.Г. Герман-Галкин – СПб.: КОРОНА-Век, 2008. 368 с.

---

**Вырыханов Денис Александрович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Denis A. Vyrykhanov** – Ph.D., Associate Professor, Department of Power Supply for Industrial Enterprises, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

*Статья поступила в редакцию 22.02.16, принята к опубликованию 26.02.16*

УДК 681.171.5

## ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА ПО ФОРМЕ И УРОВНЮ ИМПУЛЬСНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ТОКА ЦЕПИ ЯКОРЯ

**И.А. Менщиков**

### TECHNICAL EVALUATION OF ELECTRIC DC MACHINES BY SHAPE AND LEVEL OF PULSE CURRENT RATIO IN THE ARMATURE CIRCUIT

**I.A. Menshikov**

*Представлены результаты исследования в области оценки качества изоляции обмоток якоря электрических машин постоянного тока. Существующие задачи предлагается решать совершенствованием известных методов технической диагностики электрических машин и разработкой бесконтактной автоматизированной системы контроля работоспособности электрических машин постоянного тока.*

Ключевые слова: электрическая машина постоянного тока, автоматизированный контроль, импульсные значения тока цепи якоря

*The paper presents the results of research into quality assessment of the winding insulation armature to electrical DC machines. Advanced methods are proposed to resolve the present-day issues relating technical diagnostics of electric machines and development of a non-contact automated system to monitor the performance characteristics of electric DC machines.*

Keywords: DC electric machine, automated control, the pulse current value of the armature circuit

В условиях эксплуатации и массового производства электрических машин постоянного тока (ЭМ) оценку технического состояния якорных обмоток наиболее целесообразно осуществлять по форме и уровню импульсных значений тока разрыва цепи якоря. Преимуществами этого способа оценки являются отсутствие каких-либо первичных преобразователей и возможность оценки практически всех технических состояний ЭМ.

Для оценки технического состояния ЭМ измеряется ток разрыва цепи якоря (ток коммутации), снимаемый с измерительного шунта, содержащий постоянную и переменную составляющие. Причинами появления на осциллограмме тока высоко-

частотных импульсных пульсаций (помех) являются колебания магнитного потока и переходного сопротивления скользящего контакта, а также коммутационные переходные процессы.

При нарушении технического состояния якорных обмоток (отклонение сопротивления изоляции ниже установленных норм, расстройство коммутации и искрение щеток) в спектре тока появляются высокочастотные составляющие (импульсы искрения), частота которых выше коллекторной частоты  $f_k = pnk/60$  (рис. 1), где  $k$  – число коллекторных пластин,  $n$  – частотой вращения якоря,  $P$  – число пар полюсов.

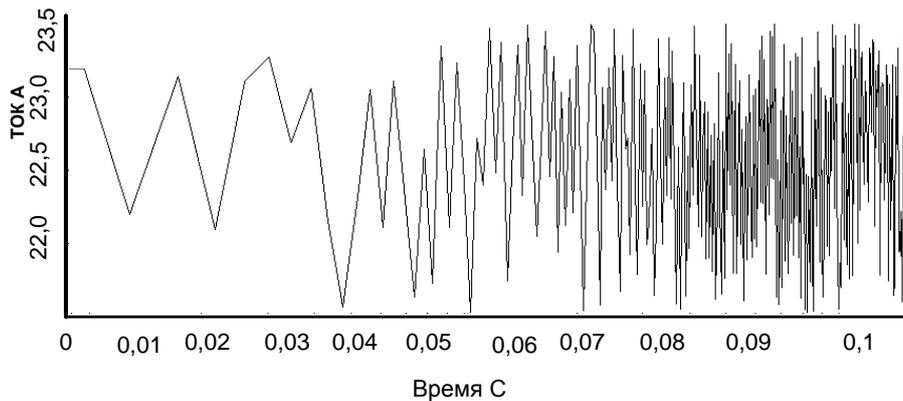


Рис. 1. Высокочастотные импульсы пульсации тока якоря

Амплитуда импульсов искрения определяется по соотношению [1]:

$$U_k = \frac{An_0}{2a \left(1 + \frac{Z_a}{2aZ_H}\right)} \frac{di_p}{dt}, \quad (1)$$

где:  $A$  – коэффициент, учитывающий индуктивные связи коммутируемой секции;  $n_0$  – число ламелей, под которыми одновременно разрываются секции;  $2a$  – число параллельных ветвей обмотки якоря;  $Z_a$  – полное сопротивление параллельной ветви обмоток якоря;  $Z_H$  – полное сопротивление нагрузочной цепи.

Значение импульсов тока разрыва (ис-

крения) при нарушении технического состояния обмотки возбуждения может быть определено из соотношения (1):

$$i_p = \int_0^t \frac{U_k \left[2a \left(1 + \frac{Z_a}{2aZ_H}\right)\right]}{An_0} dt. \quad (2)$$

Следовательно, амплитуда импульсов тока искрения зависит от соотношения сопротивления параллельной ветви обмотки якоря и нагрузки, а также от количества одновременно искрящих ламелей. Значение коэффициента  $A$  зависит от параметров обмотки якоря.

Для решения задачи автоматизации контроля оценки технического состояния

якорных обмоток требуется осуществить измерение тока разрыва цепи якоря, характеризующего исследуемый процесс, и сравнить его с эталонным значением. Износ контактной пары зависит от количества электричества, прошедшего через дугу [2]:

$$Q_{\text{д}} = \int_0^{\tau_{\text{д}}} i_p dt. \quad (3)$$

$$i_p = \frac{1}{L} \int_0^{\tau_{\text{д}}} U_{\text{д}} dt. \quad (4)$$

В соответствии с соотношением (3), при оценке технического состояния якорных обмоток достаточно измерить величины, пропорциональные количеству электричества дуговых разрядов, и сравнить их с допустимыми значениями.

В ЭМ величина индуктивности при коммутации практически остается постоянной, следовательно, длительность разряда определяет величину тока разрыва:

$$i_p = \frac{U_{\text{д}} \tau_{\text{д}}}{L}, \quad (5)$$

где  $\tau_{\text{д}}$  - длительность горения дуги в коллекторно - щеточном узле,  $L$  - индуктивность обмотки якоря,  $U_{\text{д}}$  - величина напряжения дуги.

При этом количество электричества и энергия дуги определяется из соотношения:

$$Q_{\text{д}} = \frac{U_{\text{д}} \tau_{\text{д}}^2}{2L} = k \tau_{\text{д}}^2. \quad (6)$$

Для определения технического состояния якорных обмоток ЭМ наряду с абсолютным уровнем анализируемого тока разрыва  $i_p$  целесообразно использовать другие признаки, отражающие характер изменения тока во времени.

Определение режимов работы ЭМ по совокупности значений нескольких признаков позволит повысить безопасность ди-

агностического процесса и надежность ЭМ за счет сведения до минимума влияния факторов, носящих нерегулярный характер.

Признаки распознавания технического состояния якорных обмоток ЭМ являются результатом математической обработки тока разрыва, представленного совокупностью  $n$  дискретных значений [2].

Определим основные признаки, несущие диагностическую информацию как об абсолютной величине анализируемого тока  $i_p = 1, n$ , так и о характере его изменения во времени:

- максимальная амплитуда тока разрыва

$$Y_1 = \max i_p; \quad (7)$$

- отношение минимальной амплитуды тока разрыва к максимальной

$$Y_2 = \frac{\min i_p}{\max i_p}; \quad (8)$$

- дисперсия амплитуды тока разрыва

$$Y_3 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (i_p - \bar{i}_p)^2, \quad (9)$$

где  $\bar{i}_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n i_p$  - средняя амплитуды тока разрыва;

- средняя скорость изменения амплитуды тока разрыва, отнесенная к средней амплитуде тока разрыва,

$$Y_4 = \frac{1}{\Delta t i (n-1)} \sum_{i=1}^n |i_p - i_{p+1}|, \quad (10)$$

где  $\Delta t$  - интервал дискретизации анализируемого тока;

- максимальная разность соседних амплитуд тока разрыва, отнесенная к средней амплитуде тока разрыва

$$Y_5 = \frac{1}{i} \max |i_p - i_{p+1}|; \quad (11)$$

- средняя амплитуда тока разрыва

$$Y_6 = \bar{i}_p; \quad (12)$$

- среднее отношение соседних амплитуд тока разрыва

$$Y_7 = \frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n \frac{\min(i_p, i_{p+1})}{\max(i_p, i_{p+1})}; \quad (13)$$

- максимальное отношение соседних амплитуд тока разрыва

$$Y_8 = \min \left[ \frac{\min(i_p, i_{p+1})}{\max(i_p, i_{p+1})} \right]; \quad (14)$$

- средний модуль разности текущей и средней амплитуд тока разрыва, отнесенных к средней амплитуде тока разрыва

$$Y_9 = \frac{1}{i \cdot n} \sum_{i=1}^n |i_p - \bar{i}_p|; \quad (15)$$

- максимальный модуль разности текущей и средней амплитуды отнесенный к средней амплитуде

$$Y_{10} = \frac{1}{i} \max |i_p - \bar{i}_p|. \quad (16)$$

Для количественного анализа информативности признаков, а также построения разделяющей функции необходимо располагать статистическими характеристиками признаков, к которым относятся непрерывные законы распределения. Эти данные можно получить в процессе моделирования случайных

процессов изменения тока с устойчивым (исправным) и неустойчивым (не исправным) состоянием якорных обмоток ЭМ.

Генерирование случайных процессов изменения тока выполнялось с использованием основной схемы замещения ЭМ. Моделирование переходного сопротивления коллекторно - щеточного узла (КЩУ), обмоток якоря и возбуждения, сопротивления изоляции относительно корпуса ЭМ выполнялось на ПЭВМ в виде дискретной последовательности этих значений размером  $N = 2,4 \cdot 10^4$  с шагом дискретизации  $\Delta t = 0,1$  с.

Информативность признаков, отражающих качество распознавания технического состояния якорных обмоток ЭМ, определялась выражением:

$$K_{ji} = \frac{|m_{y_{ju}} - m_{y_{jn}}|}{\sqrt{\sigma_{y_{ju}}^2 - \sigma_{y_{jn}}^2}}, \quad (17)$$

где  $m_{y_{ju}}$ ,  $\sigma_{y_{ju}}^2$  - соответственно математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение  $j$  признака при устойчивом (работоспособном) состоянии ЭМ;  $m_{y_{jn}}$ ,  $\sigma_{y_{jn}}^2$  - то же при неустойчивом (не работоспособном) состоянии ЭМ.

Большее значение  $K_{ji}$  свидетельствует о лучшей информативности признака (табл.1).

Таблица 1

Оценка информативности признаков распознавания

Признаки	Информативность признаков				
	$m_{y_{ju}}$	$\sigma_{y_{ju}}$	$m_{y_{jn}}$	$\sigma_{y_{jn}}$	$K_{ji}$
$Y_1$	1,66	2,76	1,95	3,55	0,33
$Y_2$	0,8	0,01	0,93	$1,72 \cdot 10^{-3}$	2,32
$Y_3$	$2,07 \cdot 10^{-3}$	$3,41 \cdot 10^{-6}$	$2,59 \cdot 10^{-4}$	$5,41 \cdot 10^{-8}$	0,99
$Y_4$	-7,93	2,17	-2,80	0,27	-3,72
$Y_5$	-0,01	$2,58 \cdot 10^{-3}$	$-12,48 \cdot 10^{-3}$	$2,28 \cdot 10^{-4}$	-0,12
$Y_6$	1,66	0,06	1,95	$7,52 \cdot 10^{-3}$	1,27
$Y_7$	0,03	$2,21 \cdot 10^{-5}$	0,03	$6,41 \cdot 10^{-6}$	1,12
$Y_8$	0,95	$3,11 \cdot 10^{-2}$	1,0	$2,11 \cdot 10^{-4}$	0,27
$Y_9$	$2,11 \cdot 10^{-4}$	$2,18 \cdot 10^{-2}$	$-2,56 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$	-0,02
$Y_{10}$	$2,11 \cdot 10^{-4}$	$2,18 \cdot 10^{-2}$	$-2,56 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$	-0,02

Из табл. 1 видно, что наилучшими по информативности являются признаки, отображающие абсолютный уровень анализируемого сигнала (максимальная амплитуда тока  $Y_1$ , отношение минимальной амплитуды тока к максимальной  $Y_2$ , дисперсия амплитуды  $Y_3$ , среднее отношение соседних амплитуд  $Y_7$ , максимальное отношение соседних амплитуд  $Y_8$  и средняя амплитуда  $Y_6$ ). Это свидетельствует о том, что один из признаков должен быть использован в качестве основного, причем средняя амплитуда  $Y_6$  более предпочтительнее, так как имеет до 20% больший критерий.

Совместное использование признаков, приведенных в табл. 1, обеспечивает высокую достоверность распознавания технического состояния якорных обмоток ЭМ.

Для оценки достоверности распознава-

ния по каждому из выбранных признаков выполнен расчет вероятности «ложной тревоги» и «пропуска цели». Под «ложной тревогой» в диагностическом процессе понимается ошибочное отнесение устойчивого состояния ЭМ к неустойчивому, а «пропуск цели» подразумевает ошибочный пропуск неустойчивого состояния ЭМ. Ошибка при распознавании по каждому признаку теоретически неизбежны вследствие пересечения распределений классов каждого признака.

Ошибка при распознавании по каждому признаку теоретически неизбежны вследствие пересечения распределений классов каждого признака.

В этом случае величины указанных вероятностей будут определять пороговое значение признака:

$$P_{ЛТ} = \int_{-\infty}^{Y_{i0}} f_u(Y_i) dY, P_{ПЦ} = \int_{Y_{i0}}^{\infty} f_n(Y_i) dY, \text{ если } m_{Y_i}^u > m_{Y_i}^n;$$

$$P_{ЛТ} = \int_{Y_{i0}}^{\infty} f_u(Y_i) dY, P_{ПЦ} = \int_{-\infty}^{Y_{i0}} f_n(Y_i) dY, \text{ если } m_{Y_i}^u < m_{Y_i}^n, \quad (18)$$

где  $f_u(Y_i)$  и  $f_n(Y_i)$  - плотности распределения  $i$  – го признака в устойчивым и неустойчивым техническим состоянием якорных обмоток ЭМ;  $Y_{i0}$  – пороговое значение

признака.

Результаты расчетов  $P_{ЛТ}$  и  $P_{ПЦ}$  для шести признаков при различных величинах порогов сведены в табл. 2.

Таблица 2

Оценка распознавания диагностического процесса

Признаки	Вероятность «Ложной тревоги»	Вероятность «Пропуска цели»
$Y_1$	0,96	0,79
$Y_2$	0,7	0,5
$Y_3$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1,06 \cdot 10^{-4}$
$Y_6$	1,0	1,0
$Y_7$	0,02	0,018
$Y_8$	0,78	0,62

Совместное использование вероятностей признаков, приведенных в табл. 2, обеспечивает высокую вероятность распознавания технического состояния обмоток ЭМ. Чем больше величина вероятностей, тем точнее распознавание объекта контроля.

Для диагностирования якорных обмоток необходимо анализировать электромагнитные явления и учитывать активное сопротивление цепей и индуктивность. При автоматизированном контроле активного сопротивления якорных обмоток не-

обходимо учитывать увеличение эквивалентного сопротивления за счет коммута-

ционных явлений, а также падения напряжения в щеточном контакте.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Авилов В.Д.** Методы анализа и настройка коммутации машин постоянного тока / В.Д. Авилов – М.: Энергоиздат, 1995. 237 с.

2. **Патрик Э.** Основы теории распознавания образов / Э. Патрик – М: Сов.радио. 1980. 408 с.

**Меншиков Игорь Александрович** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электроснабжения промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю. А.

**Igor A. Menshikov** – Ph.D., Head: Department of Power Supply for Industrial Facilities, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

*Статья поступила в редакцию 03.02.16, принята к опубликованию 19.02.16*

УДК 621.318.3

**ЭЛЕКТРОМАГНИТОГИДРАВЛИЧЕСКИЕ МАШИНЫ  
УДАРНОГО И ВИБРАЦИОННОГО ДЕЙСТВИЯ**

**Г.Г. Угаров, В.И. Мошкин**

**ELECTROMAGNETIC HYDRAULIC MACHINES DELIVERING IMPACT  
AND VIBRATION POWER**

**G.G. Ugarov, V.I. Moshkin**

*Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения удельных силовых и энергетических показателей линейных электромагнитных двигателей за счет интеграции с гидравлическими трансформаторами.*

*Ключевые слова: электромагнитный пресс, тяговые усилия, радиус якоря, ход штока*

*The topic of the given research is of current interest due to the need to increase the specific power and energy parameters of linear electromagnetic motors by means of integration with hydraulic transformers.*

*Keywords: electromagnetic press, traction force, armature radius, valve rod travel*

Силовые электромагнитные импульсные системы (СЭМИС) нашли эффективные применения в оборудовании, генерирующем силовое воздействие на различные среды для погружения свай, дробления негабаритов, при сборочных операциях [1].

Дальнейшее развитие и расширение области применения силовых электромагнитных импульсных систем связано с повышением удельных силовых и энергетических показателей импульсных линейных электромагнитных двигателей (ЛЭМД).

Одним из путей решения этих задач является способ интеграции ЛЭМД с гидравлическими преобразователями в электромагнитогидравлических машинах. Включение гидротрансформаторов в структуру СЭМИС позволяет редуцировать силу, ход, скорость, применять экономичные короткоходовые магнитные системы для реализации больших перемещений исполнительного звена машины, получать большие усилия от длинноходовых магнитных систем при малом перемещении рабочих органов. Данный способ позволяет рекуперировать реактивную энергию подвижных масс в кинетическую энергию инструмента машины, использовать гидравлическую среду для охлаждения магнитных систем ЛЭМД, что повышает тем самым их удельную мощность. В таких машинах передача механической энергии от подвижных элементов ЛЭМД исполнительному органу осуществляется через гидравлическую среду, что повышает их надежность. Импульсная машина, выполненная по указанной конструктивной схеме, получается более компактной и экономичной, чем классическая виброударная машина с гидроприводом, в которой напорный орган (насос) вместе с приводом отделен от ударного механизма. Изложенный принцип открывает возможности создания машин для импульсных технологий в широком диапазоне усилий, энергий и частот воздействий на обрабатываемую среду. На его основе разработаны принципиальные и конструктивные схемы молотков, перфораторов, прессов, молотов, вибраторов, насосов высокого давления, установок для

извлечения из грунта труб, шпунта и т.д. [1-3].

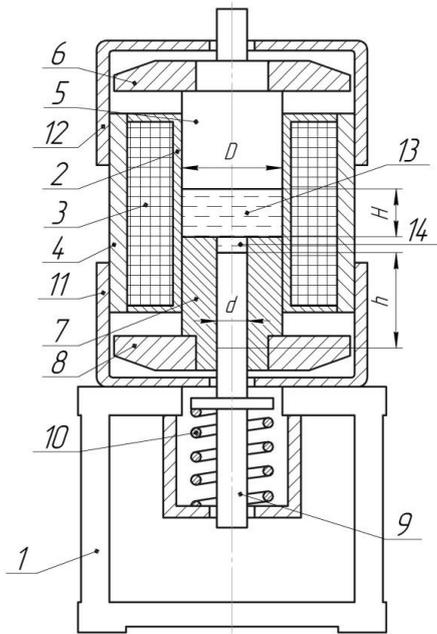
В настоящей статье представлена конструктивная схема прессы на основе интеграции ЛЭМД и гидравлического преобразователя и выявлена эффективность такого объединения.

Электромагнитный пресс (рис.) содержит станину 1 и установленный на ней цилиндрический электромагнит, включающий немагнитную втулку 2 и обмотку 3 с внешним магнитопроводом 4. В направляющей втулке с возможностью аксиального перемещения расположены основной якорь, состоящий из цилиндрического сердечника 5 и плоского диска 6 и дополнительный якорь, состоящий из цилиндрического сердечника 7 и плоского диска 8. Дополнительный якорь имеет сквозную аксиальную полость, в которой размещен подвижный шток 9, поджатый возвратной пружиной 10. По торцам электромагнит закрыт крышками 11 и 12 из немагнитного материала. Между торцами цилиндрических сердечников 5 и 7 основного и дополнительного якорей расположена полость 13, а в сердечнике 7 дополнительного якоря предусмотрена полость 14 меньшего сечения по сравнению с сечением полости 13. Полости 13 и 14 образуют гидравлическую камеру прессы. Площадь торца штока 9, примыкающего к гидравлической камере, выполнена меньше площади торца цилиндрического сердечника 7 дополнительного якоря.

Пресс работает следующим образом.

При подаче импульса напряжения на обмотку 3 возникает тяговое усилие как за счет магнитных потоков в рабочих зазорах между торцами сердечников 5 и 7 якорей, между торцами внешнего магнитопровода 4 и дисков 6 и 8 якорей, а также за счет взаимодействия тока обмотки с потоками рассеяния между магнитопроводом 4 и цилиндрическими сердечниками 5 и 7. Под действием этой силы основной и дополнительный якоря втягиваются в обмотку 3 и сжимают рабочую жидкость в гидравлической камере. При этом жидкость из полости 13 большего сечения перетекает в по-

лость 14 меньшего сечения и заставляет перемещаться шток 9. Шток 9, сжимая возвратную пружину 10, осуществляет непосредственное воздействие на обрабатываемую среду. После прекращения подачи напряжения в обмотку 3 пружина 10 возвращает шток 9 в исходное положение, вслед за ним возвращаются и якоря, после чего цикл повторяется.



Электромагнитный пресс

При разработке конструкции данной машины была поставлена задача повышения экономичности пресса за счет повышения удельной силы тяги электромагнита. В используемой конструкции электромагнита тяговая характеристика имеет крутопадающий характер, то есть сила тяги увеличивается значительно быстрее, чем уменьшается рабочий зазор.

Анализ тяговых характеристик таких электромагнитов показал, что уменьшение рабочего зазора, например, в два раза, ведет к увеличению силы тяги в 4 и более раз. Если выбрать сечение штока в два раза меньше, чем сечение дополнительного якоря, то его ход будет в три раза больше суммарного хода якорей, а сила, действующая на шток – в три раза меньше силы тяги электромагнита. Чтобы ход штока остался прежним, суммарных ход якорей, то есть

зазор между их торцами, нужно уменьшить в три раза, при этом тяговое усилие (с учетом особенностей тяговой характеристики электромагнита) увеличивается приблизительно в четыре раза. Тогда во столько же раз увеличивается сила, действующая на шток, и будет составлять 4/2 от исходной силы, то есть увеличивается в среднем в два раза. Таким образом, при том же ходе штока увеличится в среднем в два раза. Таким образом, при том же ходе штока действующая на него сила увеличивается. Наряду с этим, гидравлическая камера позволяет выполнить электромагнит с двумя якорями и тремя рабочими воздушными зазорами, преобразовать встречное движение якорей в поступательное перемещение штока.

Наличие двух якорей комбинированной формы значительно увеличивает амплитуду и крутизну тяговой характеристики электромагнита. Это объясняется тем, что якорь можно рассматривать как подвижный стоп. Потoki рассеяния между цилиндрическим сердечником дополнительного якоря и внешним магнитопроводом статора, которые являлись нерабочими в двухзазорном электромагните с комбинированным якорем, взаимодействуя с током обмотки, создают дополнительную тяговую силу. Наряду с этим уменьшаются нерабочие потоки рассеяния между торцами магнитопровода статора и цилиндрическими сердечниками якорей, которые не пересекают витки обмотки. Указанные потоки теперь вынуждены дважды преодолевать расстояние между торцом магнитопровода статора и цилиндрической частью якоря. Наличие трех рабочих воздушных зазоров сдвигает предел насыщения магнитопровода в сторону больших значений тока обмотки и, следовательно, является дополнительным фактором увеличения тягового усилия. Обозначив силу, действующую на якоря  $F_3$ , определим силу, действующую на шток:

$$F_{III} = \frac{2F_3H}{h_{III}} = \frac{2F_3d^2}{2D-d^2},$$

где  $H$  - ход основного и дополнительного якоря;  $h_{ш}$  - ход штока.

Выполнив основной якорь так же как и дополнительный, то есть со сквозной аксиальной полостью, штоком и т.д. (рис.), можно увеличить производительность машины за счет удвоения частоты ходов в единицу времени.

Обозначив площади штока и якорей

$$S = S_{я_1} = S_{я_2}$$

$$S_{ш} = \pi \frac{d^2}{4},$$

$$S = S_{я_1} = S_{я_2} = \pi \frac{D^2 - d^2}{4},$$

определим ход штоков при ходе якоря  $H$ :

$$h_{ш} = \frac{HS_{я}}{S_{ш}} = H \left( \frac{D^2}{d^2} - 1 \right).$$

Таким образом, ход каждого из штоков уменьшился по сравнению с одноштоковой машиной более чем в два раза.

Если сила электромагнита  $F_{\mathcal{E}}$ , то сила, действующая на каждый из якорей, равна

$$F_{я} = F_{\mathcal{E}} / 2.$$

Тогда сила, действующая на каждый шток, равна

$$F_{ш} = \frac{F_{я}H}{h_{ш}} = \frac{F_{\mathcal{E}}}{2} \left( \frac{d^2}{D^2 - d^2} \right).$$

При  $D = 2d$  для систем с одним штоком  $h_{ш} = 7H$ ,  $F_{ш} = 0,285F_{\mathcal{E}}$ .

Для системы с двумя штоками, сила и ход, приходящиеся на один шток, равны  $h_{ш} = 3H$ ,  $F_{ш} = 0,167F_{\mathcal{E}}$ .

Таким образом, использование в электромагнитном прессе гидротрансформатора позволяет редуцировать рабочий ход и силу исполнительного органа.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Шемякин Е.Н.** Горные и строительные вибрационные машины и процессы / Е.Н. Шемякин, А.Д. Костылев, Н.П. Ряшенцев, А.Я. Тишков // Изв. СО АН СССР. Сер. Техн. науки, 1987. №1.

2. А.С. 1558545 (СССР) Электромаг-

нитный пресс / Г.Г. Угаров, М.А. Теребенин – Оpubл. в БИ, 1990, №15.

3. А.С. 1681071 (СССР) Инерционный пульсатор / А.И. Прокопенко, Г.Г. Угаров, М.А. Теребенин. – Оpubл. в БИ, 1991, №36.

**Угаров Геннадий Григорьевич** – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Мошкин Владимир Иванович** – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Энергетика и технология металлов» Курганского государственного университета

**Gennadiy G. Ugarov** – Dr.Sc., Professor, Department of Power Supply for Industrial Facilities, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Vladimir I. Moshkin** – Ph.D., Head: Department of Power Engineering and Metal Technologies, Kurgan State University

*Статья поступила в редакцию 08.02.16, принята к опубликованию 19.02.16*

## ВАРИАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ

Д.А. Вырыханов

### A VARIATIONAL MODEL FOR THE ELECTROMECHANICAL ENERGY CONVERSION PROCESS

D.A. Vyrykhanov

*Разработана математическая модель, описывающая процесс электромеханического преобразования энергии на основе принципа наименьшего действия Гамильтона. Модель сопоставляет величинам мощностей преобразования магнитной и механической энергий соответствующие противо-ЭДС. Данное сопоставление, формируя оригинальную форму закона Кирхгофа для электрического контура электромеханического преобразователя, позволяет корректно применить метод наложения при расчете динамических характеристик преобразователя учитывая нелинейность свойств магнитной системы преобразователя.*

Ключевые слова: электромеханическое преобразование энергии, магнитная мощность, механическая мощность, электродвижущая сила, вариационная модель, метод наложения

Современные системы электропривода характеризуются оптимальным режимом электромеханического преобразования энергии с максимальной величиной развиваемой механической мощности, наибольшей глубиной управления по скорости, усилию или моменту. Основой анализа и синтеза процессов преобразования энергии в электрической машине являются математические построения, выражающие механическую мощность через электрические токи и напряжения, на основании которых становится возможным сформулировать критерии оптимальности режима преобразования.

*A mathematical model is developed to describe the process of electromechanical energy conversion on the basis of Hamilton's principle of least action. The model compares the conversion capacity of magnetic and mechanical energies to the corresponding back electromotive force. The given data comparison forming a unique pattern of Kirchhoff's law for electrical circuits of electromechanical transducers, which allows to correctly apply the method of superposition to estimate the dynamic characteristics of the converter taking into account the nonlinear properties of the converter magnetic system.*

Keywords: electromechanical energy conversion, magnetic power, mechanical power, electromotive force, variational model, the superposition method

Известные в настоящее время математические модели электромеханических преобразователей энергии (ЭМП) построены при допущениях, ограничивающих области их применения [1 - 5]. Основное допущение, принимаемое при описании ЭМП, – использование метода наложения при расчете токов, протекающих в контурах схемы замещения ЭМП, замещающих цепи намагничивания ЭМП и характеризующих механическую нагрузку ЭМП.

При этом контурные токи, соответствующие различным потокам мощности (электрической, потребляемой двигателем,

механической, развиваемой двигателем на выходном валу/якоре, магнитной, мощностью изменения величины магнитной энергии), протекая по общим ветвям схемы с сопротивлениями, в общем случае нелинейно зависящими от протекающих по ним токов, оказываются взаимозависимыми более чем это обусловлено процессом энергопреобразования, что вносит погрешность в расчет.

Например, известная Т-образная схема замещения асинхронного двигателя, строго говоря, неадекватна при учете нелинейности свойств магнитной системы, так как сопротивления ветви намагничивания в общем случае являются нелинейными зависимостями от амплитуды протекающего через них тока. Поэтому данная схема описывает только периодический процесс работы машины при учете только первой, основной гармоники токов в обмотках машины. Наличие запаздывания токов в контуре ротора вследствие явления скольжения также вносит погрешность в расчет режимных показателей асинхронной машины. Использование при анализе рабочих процессов интегральных показателей, например действующих значений токов или мощностей, по своей сути является допущением и не позволяет исследовать рабочие процессы в машинах в общем виде. Анализ переходных процессов в ЭМП еще более усложняется. Исходя из этого, вопрос анализа рабочих процессов ЭМП является актуальным.

В этой статье приводится математическая модель процессов преобразования энергии в ЭМП, основанная на принципе наименьшего действия Гамильтона и позволяющая разделить процессы преобразования магнитной и механической энергий таким образом, что становится корректным использование методов наложения при расчете динамических характеристик преобразователя.

Запишем закон сохранения энергии для электромеханического преобразователя энергии:

$$W_{эл.} + W_{маг.} + W_{мех.} + W_{п.} = \text{const}, \quad (1)$$

где  $W_{эл.}$  - электрическая энергия;  $W_{маг.}$  - магнитная энергия;  $W_{мех.}$  - механическая энергия;  $W_{п.}$  - энергия потерь в активном сопротивлении обмотки возбуждения магнитного поля ЭМП.

В дальнейшем в качестве допущения игнорируются потери на гистерезис и вихревые токи в магнитопроводе ЭМП.

Дифференцируя обе части выражения (1), найдем соотношения между мощностями изменения присутствующих в ЭМП видов энергии:

$$\frac{dW_{эл.}}{dt} + \frac{dW_{маг.}}{dt} + \frac{dW_{мех.}}{dt} + \frac{dW_{п.}}{dt} = 0. \quad (2)$$

Выделим в выражении (2) мощность энергопреобразования:

$$\frac{dW_{эл.}}{dt} + P_{пр.} = 0,$$

где

$$P_{пр.} = \frac{dW_{маг.}}{dt} + \frac{dW_{мех.}}{dt} + \frac{dW_{п.}}{dt} \quad (3)$$

– мощность электромеханического преобразования энергии, с учетом потерь энергии (в общем случае в активном сопротивлении обмоток преобразователя, при протекании вихревых токов в магнитопроводе, а также потерь перемагничивания).

На основании выражения (3) запишем уравнение Эйлера-Лагранжа в отношении процесса преобразования магнитной энергии. Для этого представим магнитную энергию в кинетической форме согласно выражения [6]

$$W_{маг.}^{кин.} = \int p dx, \quad (4)$$

где  $p$  - импульс кинетической энергии, в обобщенной координате  $x$ ;  $\dot{x} = \frac{dx}{dt}$  - скорость изменения координаты  $x$  во времени.

Величине магнитной энергии можно сопоставить движение заряженных частиц, обладающих электрическим зарядом  $q$ , в связи с чем в качестве координаты, описывающей величину магнитной энергии, возьмем значение заряда, при движении которого формируется электрический ток в обмотке возбуждения магнитного поля ЭМП. Под скоростью  $\dot{x}$  будет пониматься величина электрического тока. В выбранной системе координат в качестве импульса должна выступать величина потокосцепления, характеризующая значение магнитной мощности при изменении тока. Представим величину магнитной мощности как произведение тока, протекающего в обмотке возбуждения магнитного поля ЭМП, на некоторую «магнитную» составляющую противо-ЭДС, наблюдаемую на данной обмотке [7 - 10]:

$$\frac{dW_{\text{маг.}}}{dt} = i \frac{d\psi_{\text{маг.}}}{dt}, \quad (5)$$

где  $i$  - полный (наблюдаемый экспериментально) ток в обмотке возбуждения магнитного поля ЭМП;  $\psi_{\text{маг.}}$  - величина потокосцепления, характеризующая мощность изменения магнитной энергии.

Интегрируя по времени обе части выражения (5), величину магнитной энергии запишем в виде

$$W_{\text{маг.}}^{\text{кин.}} = \int_0^{\psi_{\text{маг.}}} i d\psi_{\text{маг.}}. \quad (6)$$

В общем случае, при насыщении магнитопровода ЭМП выражение дифференциального приращения потокосцепления, обозначенного в (5), (6) индексом «маг», определяется дифференциальной индуктивностью

$$L_{\text{диф.}} = \frac{d\psi_{\text{маг.}}}{di_{\text{маг.}}}, \quad (7)$$

где  $di_{\text{маг.}}$  - приращение тока в обмотке ЭМП, соответствующее приращению ма-

гнитной энергии в ЭМП и формирующее совместно с «механическим» приращением тока (соответствующим механической мощности, развиваемой на валу/якоре ЭМП) полное приращение тока [7 - 10]

$$di = di_{\text{маг.}} - di_{\text{мех.}}. \quad (8)$$

Выражая из (7) величину дифференциального приращения потокосцепления  $d\psi_{\text{маг.}} = L_{\text{диф.}} di_{\text{маг.}}$  и подставляя ее в выражение магнитной энергии (6), получим

$$W_{\text{маг.}}^{\text{кин.}} = \int_0^{i_{\text{маг.}}} i L_{\text{диф.}} di_{\text{маг.}}. \quad (9)$$

Учитывая, что «магнитное» дифференциальное приращение тока согласно (8) определится как разность  $di_{\text{маг.}} = di - di_{\text{мех.}}$ , выражение магнитной энергии (9) примет вид:

$$W_{\text{маг.}}^{\text{кин.}} = \int_0^i i L_{\text{диф.}} di - \int_0^{i_{\text{мех.}}} i L_{\text{диф.}} di_{\text{мех.}}. \quad (10)$$

Таким образом, в качестве координат, описывающих кинетическую форму энергии магнитного поля, принимаем

$$x = q; \quad \dot{x} = \frac{dq}{dt} = i.$$

При этом импульс магнитной энергии определится величиной потокосцепления:

$$p = i L_{\text{диф.}}$$

Усилиями, формирующими динамику процесса электромеханического преобразования энергии являются [6]:

1. Неконсервативное усилие, независимое от выбранных координат, и формируемое приложением к выводам обмотки ЭМП внешнего электрического напряжения питания  $u_{\text{пит.}}$

2. Неконсервативное усилие  $F_{\text{п.}}$ , связанное с рассеянием энергии в активном

сопротивлении электрического контура ЭМП

$$F_{\text{п.}} = \frac{1}{2} Ri^2,$$

где  $R$  - активное сопротивление электрического контура ЭМП.

3. Неконсервативное усилие, связанное с преобразованием энергии магнитного поля в механическую форму:

$$F_{\text{мех.}} = \frac{1}{2} R_{\text{мех.}} i^2, \quad (11)$$

где  $R_{\text{мех.}}$  - величина активного сопротивления, при протекании тока по которому выделяется мощность, равная величине механической мощности, развиваемой преобразователем:

$$\frac{dW_{\text{мех.}}}{dt} = R_{\text{мех.}} i^2.$$

Силовую функцию Лагранжа  $A$  определит только величина кинетической энергии, так как преобразование электрической энергии учитывается неконсервативным усилием  $u_{\text{пит.}}$ , а преобразование механической формы энергии в ЭМП учитывается неконсервативным усилием (11). Таким образом,

$$A = W_{\text{маг.}}^{\text{кин.}} = \int_0^i i L_{\text{диф.}} di - \int_0^{i_{\text{мех.}}} L_{\text{диф.}} di_{\text{мех.}}$$

Уравнение Эйлера-Лагранжа, описывающее динамику процесса электромеханического преобразования энергии, запишется в виде [6]:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial A}{\partial \dot{x}} - \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial \dot{x}} (F_{\text{п.}} + F_{\text{мех.}}) = u_{\text{пит.}} \quad (12)$$

После вычисления производных в (12) получим выражение закона Кирхгофа для электрического контура обмотки возбуждения магнитного поля ЭМП:

$$\frac{diL_{\text{диф.}}}{dt} + iR + iR_{\text{мех.}} = u_{\text{пит.}} \quad (13)$$

Из уравнения (13) можно сделать следующие выводы.

1. В условиях процесса электромеханического преобразования энергии величину магнитной энергии можно найти двумя способами:

- согласно выражению, приведенному в [6],

$$W_{\text{маг.}} = \int_0^i \psi(i, \delta) di,$$

где  $\psi(i, \delta)$  - полное (определяемое экспериментально) потокоцепление обмотки возбуждения магнитного поля ЭМП, являющееся зависимостью тока  $i$  и пространственной координаты местоположения подвижного элемента преобразователя  $\delta$ ;

- согласно выражению (9), в котором интегрирование производится по величине «магнитного» тока. Определение данного «магнитного» тока обосновывается в работах [8 - 10].

2. На основании выражения (13) становится возможным расчет динамических характеристик ЭМП (токов, пространственных координат подвижных частей преобразователя) с помощью метода наложения, когда полный ток в обмотках является суммой токов, протекающих по активному сопротивлению электрического контура ЭМП  $R$  и сопротивлению механической нагрузки  $R_{\text{мех.}}$  и формируемых

- напряжением питания  $u_{\text{пит.}}$ ;

- противо-ЭДС  $\frac{diL_{\text{диф.}}}{dt}$ .

При этом, будет корректно учтена нелинейная зависимость потокоцепления от величины тока  $\psi(i, \delta)$ . Систему уравнений, описывающих динамику процесса электромеханического преобразования энергии, можно будет записать в матричной форме с возможностью решения алгебраическими методами, с минимумом дифференцирующих операций [9, 10].

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бельман М.Х.** Переходные процессы в микродвигателях постоянного тока при импульсном питании. / М.Х. Бельман – Л.: Энергия, 1975. 184 с.
2. Энергосберегающая технология электроснабжения народного хозяйства. Кн. 2. Энергосбережение в электроприводе / Н.Ф. Ильинский, Ю.В. Рожанковский, А.О. Горнов – М.: Высшая школа, 1989. 130 с.
3. **Каган В.Г.** Электроприводы с предельным быстродействием для систем воспроизведения движений. / В.Г. Каган – М.: Энергия, 1975. 240 с.
4. **Ряшенцев Н.П.** Динамика электромагнитных импульсных систем. / Н.П. Ряшенцев, Ю.З. Ковалев – Новосибирск: Наука, 1974. 190 с.
5. **Чабан-Львов В.И.** Основы теории переходных процессов в электромашинных системах. / В.И. Чабан-Львов: Высшая школа. Изд-во Львов. ун-та, 1980. 200 с.
6. **Уайт Д.** Электромеханическое преобразование энергии. / Д. Уайт, Г. Вудсон – М.: Энергия, 1964. 312 с.
7. **Вырыханов Д.А.** Анализ мощностных и энергетических структур линейного электромагнитного двигателя / Д.А. Вырыханов, Г.Г. Угаров // Проблемы электроэнергетики. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2004. С. 192 – 198.
8. **Вырыханов Д.** Математическая модель процесса электромеханического преобразования энергии / Д.А. Вырыханов, Г.Г. Угаров // Вопросы электротехнологии, 2013. №1. С. 61 – 64.
9. **Вырыханов Д.А.** Матричная математическая модель обобщенного электромеханического преобразователя энергии / Д.А. Вырыханов, Г.Г. Угаров // Вопросы электротехнологии, 2014. №4(5). С. 30 – 33.
10. **Вырыханов Д.А.** Алгоритм расчета динамических зависимостей токов и пространственных координат обобщенного электромеханического преобразователя энергии / Д.А. Вырыханов, Г.Г. Угаров // Вопросы электротехнологии, 2014. №1(2). С. 90 – 95.

**Вырыханов Денис Александрович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Denis A. Vyrykhanov** – Ph.D., Associate Professor, Department of Power Supply for Industrial Enterprises, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

*Статья поступила в редакцию 11.02.16, принята к опубликованию 19.02.16*

**К СВЕДЕНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!**

Экземпляры номеров журнала «Вопросы электротехнологии» можно приобрести в редакции журнала 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77 (СГТУ им. Гагарина Ю.А., кафедра ЭПП, корпус 1, первый этаж, ком. 133 а, тел.: 8 (8452) 99-87-63).

# ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

УДК 621.311

## ПАРОГАЗОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ. ПЕРСПЕКТИВЫ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ И ИССЛЕДОВАНИЙ

Е.А. Ларин

### COMBINED-CYCLE TECHNOLOGIES FOR GENERATION ELECTRIC AND THERMAL ENERGY: PROSPECTS AND TRENDS IN RESEARCH AND DEVELOPMENT

Е.А. Larin

*Изложены основные направления развития и совершенствования парогазовых теплофикационных установок в системах теплоэнергоснабжения. Приведены особенности системного термодинамического анализа теплофикационных ПГУ, реализованных по сложным схемам. Показаны преимущества создания теплофикационных ПГУ с трехконтурными котлами – утилизаторами.*

Ключевые слова: парогазовые установки, термодинамический анализ, надежность, эффективность

*The paper deals with the main trends in the development and improvement of steam-gas cogeneration installations in the systems of heating and energy supply. The given peculiarities of the system-oriented approach to the thermodynamic analysis of cogeneration CCGT implemented for complex systems. The focus is made on the advantages of establishing a cogeneration CCGT with a three-loop waste heat boiler.*

Keywords: combined-cycle plants, thermodynamic analysis, reliability, efficiency

При реформировании электроэнергетики были утрачены основополагающие методы управления электроэнергетикой вследствие образования отдельных генерирующих, сетевых и сбытовых компаний. Объекты региональных энергосистем принадлежат различным собственникам с различными целями функционирования. Это привело к ликвидации единого центра компетенций, в результате чего Правительство России утверждает нормативные акты и схемы развития генерирующих мощностей и электрических сетей.

Основной объем электроэнергии реализуется на рынке «на сутки вперед». При этом цена устанавливается по цене самой

дорогой станции, замыкающей баланс электроэнергии (мощности). На оптовый рынок выведены теплоэлектроцентрали (ТЭЦ), хотя по своему назначению они должны работать в теплофикационном режиме. Поэтому ТЭЦ не могут конкурировать на оптовом рынке электроэнергии с современными конденсационными станциями (КЭС), в особенности с конденсационными парогазовыми установками (ПГУ). Все это приводит к тому, что региональные паротурбинные ТЭЦ оказались убыточными. Так, например, анализ производственной деятельности Саратовского филиала ПАО «Т Плюс», показал, что производство тепловой энергии на региональных ТЭЦ уже в течение 2-3 лет генерирует

убытки. Результатом этого явилось снижение в стране комбинированной выработки электрической и тепловой энергии, обеспечивающей существенную экономию топлива. По сути, единственным механизмом регулирования ввода генерирующих мощностей в стране является система договоров о предоставлении мощности, в которой заложено обязательство Правительства РФ обеспечить возврат инвестиций. При этом все риски (финансовые, размещения, технических решений, резервирования) перенесены на потребителей. Кроме того, реформирование электроэнергетики привело к потере единого центра ответственности за надежное электроснабжения и перспективное развитие региональных генерирующих и сетевых компаний. Технологическое регулирование частоты и напряжения, резервирование генерирующих мощностей, предотвращение и ликвидация аварий должны осуществляться независимо от принятой модели экономических отношений. Поэтому необходимо установить соответствующие требования по участию в этом процессе для всех генерирующих и сетевых компаний и требования к эффективности и надежности энергетического оборудования. Эти вопросы не решены. Обеспечение системной надежности электроснабжения приводит к тому, что экономические показатели генерации объективно ухудшаются. Это значит, что субъекты, обеспечивающие системную надежность электроснабжения должны получить соответствующую компенсацию. Установленное Энергетической стратегии РФ до 2030 года (ЭС-2030) повышение индекса надежности электроснабжения с 0,996 до 0,9991, в частности, за счет ввода энергоблоков высокой надежности и соответствующего системного резерва мощности позволяет обеспечить предотвращенный ущерб от недоотпуска электрической энергии к 2020 году в объеме 864 млрд. руб. В среднем повышение индекса надежности электроснабжения относительно достигнутого уровня на 0,0006 позволяет ежегодно экономить до 58 млрд. руб. Удельное значение величины ущерба от недоотпуска электроэнергии принято равным 90 руб/кВт ч при средней себестоимости производства электроэнергии порядка 1,5 руб/кВт ч [1].

Мониторинг реализации ЭС-2020 показал, что главной проблемой в сфере повышения энергоэффективности экономики является нереализованный потенциал организационного и технологического энергосбережения, в том числе в сфере производства электрической и тепловой энергии. В проекте Энергетической стратегии России до 2035 года (ЭС-2035) [2,3] некоторые стратегические инициативы получили новое содержание. Главный внешний вызов для энергетики России заключается в кардинальном ужесточении конкуренции на внешних энергетических рынках, что сказывается на внутреннем потреблении ТЭР. В этих условиях основные целевые ориентиры взаимодействия экономики и энергетики на среднесрочный период должны быть направлены на снижение зависимости российской экономики от ТЭК за счет опережающего развития инновационных малоэнергоёмких секторов и реализации технологического потенциала энергосбережения. Главный внутренний вызов состоит в необходимости модернизации ТЭК России, преодолении высокого износа значительной части инфраструктуры и производственных фондов, технологического отставания от уровня развитых стран, повышении эффективности производства, распределения и потребления электрической и тепловой энергии. Переосмысление роли ТЭК приводит к необходимости создания инновационного и эффективного энергетического сектора страны для устойчивого роста экономики.

В сфере электроэнергетики необходимо обеспечить:

– снижение среднего износа основных производственных фондов к 2035 г. приблизительно на 25% от уровня 2010 года;

– ликвидацию дефицита и поддержание устойчивого резерва электро- и теплогенерирующих мощностей, включающих поддержание резерва мощности электростанций на уровне 17% от общей установленной мощности электростанций;

– снижение удельных расходов топлива на выработку электроэнергии к 2035 г. приблизительно на 48% от уровня 2010 года;

– развитие теплоснабжения регионов преимущественно на базе теплофикации с

использованием современных экономически и экологически эффективных когенерационных установок широкого диапазона мощности, при этом доля тепловых электростанций в централизованном отпуске необходимо повысить с 46 до 50%, долю котельных сократить с 47 до 42%.

Достижение указанных показателей ЭС-2035 в электроэнергетике возможно только в условиях освоения новейших технологий производства электрической и тепловой энергии. Научное обоснование решения этой проблемы требует разработки системы иерархически связанных задач, методов их решения с решением координирующей задачи рациональной структуры генерирующих мощностей. При этом в качестве основного критерия следует принимать максимизацию общеэкономического эффекта от функционирования энергетического сектора экономики страны. В рамках указанной проблемы необходимо, в частности, решить следующие задачи: обеспечение высокого КПД энергоблоков в широком диапазоне изменения нагрузки, высокой надежности и длительного ресурса оборудования, высоких маневренных свойств; оптимизация технологических схем и характеристик оборудования с учетом реальных условий функционирования (включая климатические и экономические условия, прогнозные графики электрических нагрузок, перспективную структуру установленных мощностей в электроэнергетической системе и системах теплоснабжения); достижение полной локализации производства критических элементов оборудования и материалов; применение отечественных систем управления, построенных на отечественной элементной базе.

Среди приоритетных технологий отечественных разработок для крупномасштабного применения в электроэнергетике выделим только создание:

- высокоэффективных газовых турбин большой мощности (110–180 МВт) и ПГУ на их основе электрической мощностью 300 – 500 МВт на природном газе с КПД более 57 %;

- теплофикационных ПГУ на природ-

ном газе электрической мощностью свыше 100 МВт на базе ГТУ мощностью от 50 МВт с высоким электрическим КПД во всем диапазоне рабочих нагрузок;

- когенерационных установок малой мощности на природном газе на базе ГТУ электрической мощностью 6–9 МВт.

Анализ данных ЭС-2035 показывает, что емкость внутреннего рынка для мощных ПГУ составляет 15 – 18 ГВт до 2035 года или 50 – 60 блоков ПГУ мощностью 300–500 МВт. Это потребует развития энергомашиностроительной базы создания 100 – 120 мощных газовых турбин. Указанная емкость внутреннего рынка вполне достаточна для возврата затрат на разработку мощных газовых турбин с учетом имеющегося опыта изготовления и эксплуатации лицензионных ГТУ мощностью 110 и 160 МВт. Кроме того, необходимо определить оптимальные параметры цикла ГТУ и рациональную степень усложнения технологической схемы как для конденсационных, так и для теплофикационных ПГУ. Особую важность приобретают вопросы разработки новых отечественных конструкционных материалов и покрытий для «горячей части» ГТУ и технологии их применения для изготовления турбинных лопаток – критических элементов данной технологии.

Разработка в стране сверхмощных газовых турбин (300 – 350 МВт и более) и ПГУ 800 – 1000 МВт на их основе возможна только после соответствующего научно-методологического, технологического и экономического обоснования. До 2035 года емкость внутреннего рынка для них незначительна, а выход на внешние рынки затруднен из-за высокой конкуренции и также относительно небольшой емкости. На внутреннем рынке их легко заменят ПГУ 300 – 500 МВт на базе ГТУ 110 – 180 МВт.

Применению высокоэффективных ПГУ с высокими маневренными характеристиками на ТЭЦ благоприятствует сложившаяся в стране тенденция к росту соотношения спроса на электрическую энергию и централизованное теплоснабжение. Емкость отечественного рынка для указанных

ПГУ составляет около 17 – 24 ГВт (эл.) или 400–600 энергоблоков, в том числе 600 – 800 газовых турбин мощностью 16 – 25 МВт. На базе имеющихся мощных авиационных двигателей могут быть созданы

газовые турбины энергетического назначения с высокой надежностью и достаточным ресурсом. Типовая конфигурация ПГУ на основе ГТУ различной мощности приведена в табл. 1.

Таблица 1

Конфигурация ПГУ на базе имеющихся машин ГТУ

Типоразмер ГТУ	ГТЭ-65 (60...80)		ГТЭ-110 (100...130)		ГТЭ-160 (150...180)	
Типоразмер ПГУ	ПГУ-90	ПГУ-180	ПГУ-325	ПГУ-170Т*	ПГУ-230	ПГУ-450**
Мощность ГТУ, МВт	60,0	120,0	110,0	110,0	150,0	150,0
Мощность ПТУ, МВт	32,0	64,0	112,0	45	77,0	154,0
Мощность ПГУ, МВт	92,0	184,0	332,0	155,0	227,0	454,0

\* теплофикационный режим

\*\* возможен вариант с турбиной ГТЭ-250/350

К настоящему времени, несмотря на достаточно большое количество исследований [4-16], вопросы обоснования технологических схем и выбор оптимальных параметров рабочих тел ПГУ различных типов в достаточной степени не решены.

Теоретические основы создания ПГУ различных типов разработаны еще в 60 - 70 -х годах прошлого века и развиты научными коллективами РАН под руководством акад. Л.А. Мелентьева, О.Н. Фаворского, чл.-корр. С.П. Филиппова, Л.А. Попырина [4, 5, 8], Саратовского политехнического института под руководством проф. А.И. Андрущенко [6], Ленинградского политехнического института под руководством проф. А.Н. Ложкина, В.А. Зысина, В.А. Иванова и др., Московского энергетического института под руководством проф. А.Д. Трухня, С.В. Цанева, В.Д. Бурова [7, 9], Ивановского энергетического университета под руководством А.В. Мошкарина, Ю.В. Мельникова, ЦКТИ им. И.И. Ползунова под руководством проф. А.А. Канаева, Е.П. Прутковского, ВТИ им. Дзержинского Ф.Э. под руководством чл.-корр. РАН Г.Г. Ольховского, Ю.А. Радина [10] и др.

Изначально ПГУ, как наиболее эффективные, проектировались для эксплуатации в базовой части графика нагрузок и могли применяться для частичного замещения теплогенерирующих мощностей существующих блоков ТЭЦ в базовой части графика нагрузок. Однако в условиях повышения режимных требований к работе

энергетических установок более высокие характеристики маневренности блоков ПГУ позволили использовать их в режимах регулирования нагрузки в энергосистеме. В результате ПГУ стали эксплуатироваться по переменному графику работы, что привело к увеличению числа пусков-остановов. Это явилось одной из причин снижения надежности энергоблоков.

Совершенствование конденсационных и теплофикационных ПГУ связано с повышением температуры газа перед газовой турбиной (до 1600 – 1700 °С), начальных параметров пара (вплоть до суперсверхкритических с одним или двумя промежуточными перегревами пара), приближением изобары отвода теплоты в газотурбинном цикле к изобаре подвода теплоты в паротурбинном цикле, что обеспечивается применением котлов-утилизаторов (КУ) с двумя и тремя уровнями докритического давления генерируемого пара, реализацией их конкурентных преимуществ (в частности, термодинамической эффективности и маневренных характеристик) в системах теплоэнергоснабжения. Применение известных показателей термодинамического совершенства комбинированных установок и их тепловой экономичности в отдельности не позволяет однозначно определить их топливную и общую эффективность в энергосистемах. Поэтому выбор рациональных схем теплофикационных ПГУ должен проводиться на основе методологии системных исследований в

энергетике с учетом климатических факторов, структуры тепловых нагрузок, режимов потребления тепловой и электрической энергии, надежности работы ПГУ в системах теплоэнергоснабжения, а также неопределенности информации о расчетных показателях надежности ПГУ и устойчивости полученных решений при изменении технико-экономических факторов.

Термодинамическое совершенство циклов теплофикационных ПГУ и их тепловая

экономичность определяются комплексом показателей: абсолютным электрическим КПД ПГУ  $\eta_e$ , удельной выработкой электроэнергии на тепловом потреблении  $y_e$  и коэффициентом использования теплоты топлива  $K_{um}$ . Особенности термодинамического анализа и расчета системной топливной эффективности рассмотрены на примере наиболее сложной схемы теплофикационной ПГУ с трёхконтурным КУ и теплообменником (ВВТО), представленной на рис. 1 а.

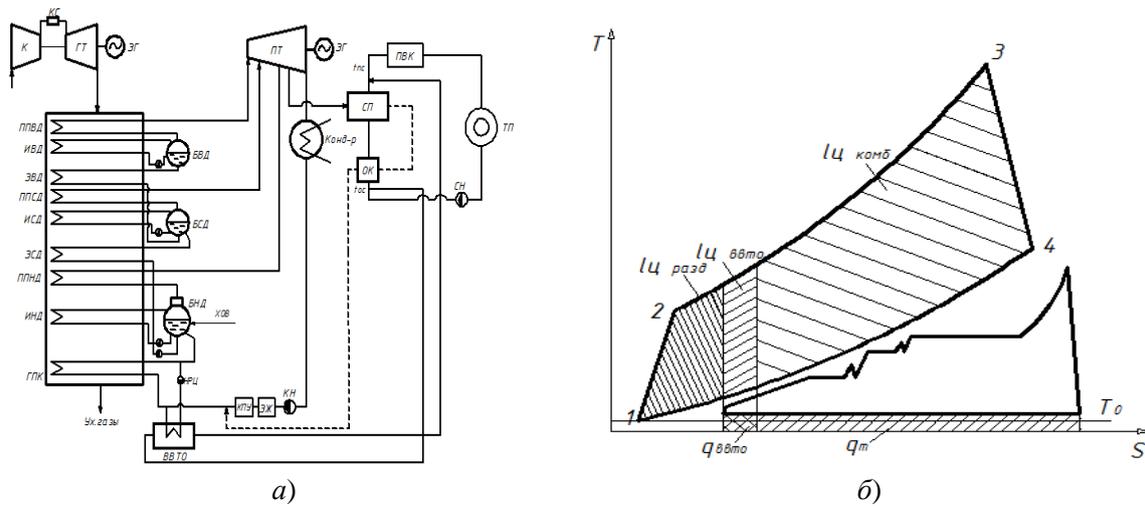


Рис. 1. Схема теплофикационной ПГУ с трехконтурным КУ

а) принципиальная тепловая схема; б) условный термодинамический цикл ППВД, ППСД, ППНД – пароперегреватель высокого, среднего и низкого давления; ИВД, ИСД, ИНД – испаритель высокого, среднего и низкого давления; ЭВД, ЭСД – экономайзер высокого и среднего давления котла-утилизатора, соответственно; ГПК – газовый подогреватель конденсата; ВВТО – водо-водяной теплообменник; БВД, БСД, БНД – барабаны высокого, среднего и низкого давления; КПУ – конденсатор пара уплотнений; ЭЖ – эжектор уплотнений; ОК – охладитель конденсата; СП – сетевой подогреватель

На рис. 1 б показан условный термодинамический цикл, реализующий приведенную схему теплофикационной ПГУ. Из рисунка следует, что полезную работу газотурбинной установки (ГТУ) можно представить в виде суммы трех составляющих. Первая составляющая  $l_{ц комб}$  характеризует высокоэффективную работу газотурбинного цикла в комбинированном цикле на тепловом потреблении паротурбинного цикла за счет полезного использования теплоты уходящих газов в КУ. Вторая составляющая  $l_{ц ввто}$  характеризует эффективную работу газотурбинного цикла на тепловом потреблении за счет утилизации теплоты уходящих газов в ВВТО. Третья составляю-

щая  $l_{ц разд}$  соответствует низкоэффективной выработке полезной работы, которая может приводить к перерасходу топлива в системе. Тогда справедливо соотношение

$$N_{ГТУ} = \Delta N_{ГТУ}^{КОМБ} + \Delta N_{ГТУ}^{ВВТО} + \Delta N_{ГТУ}^{РАЗД}, \quad (1)$$

где  $\Delta N_{ГТУ}^{КОМБ} = \varphi_{ку} N_{ГТУ}$ ,  $\varphi_{ку}$  – доля располагаемой теплоты утилизации ГТУ, переданная в КУ для генерации пара;  $\Delta N_{ГТУ}^{ВВТО} = \varphi_{ВВТО} N_{ГТУ}$ ,  $\varphi_{ВВТО}$  – доля располагаемой теплоты утилизации ГТУ, переданная в ВВТО;  $\Delta N_{ГТУ}^{РАЗД} = \varphi_2 N_{ГТУ}$ ,  $\varphi_2$  – доля располагаемой теплоты утилизации ГТУ, отведенная в окружающую среду, на базе кото-

рой осуществляется раздельная выработка электроэнергии;  $N_{ГТУ}$  – мощность ГТУ.

Утилизируемая теплота газотурбинного цикла, полезно используемая в КУ, относится на выработку электроэнергии и теплоты в паротурбинном цикле. Поэтому справедливо равенство

$$\Delta N_{ГТУ}^{КОМБ} = \Delta N_{ГТУ}^{ТФ} + \Delta N_{ГТУ}^P, \quad (2)$$

где  $\Delta N_{ГТУ}^{ТФ} = \Delta N_{ГТУ}^{КОМБ} \cdot \frac{\Delta N_{ПГУ}^{ТФ}}{N_{ПГУ}}$  – часть мощности, выработанной в газотурбинном цикле и относимой на теплофикационную выработку в паротурбинном цикле;  $\Delta N_{ГТУ}^P$  – часть мощности, выработанной в газотурбинном цикле раздельным способом в паротурбинном цикле;  $N_{ПГУ}$  – мощность, выработанная в паротурбинном цикле за счет теплоты КУ.

Исходя из этого, расчетная формула для определения  $y_3$  имеет вид

$$y_3 = \frac{\Delta N_{ГТУ}^{ВВТО} + \Delta N_{ГТУ}^{ТФ} + \Delta N_{ПГУ}^{ТФ}}{Q_{ВВТО} + Q_{ОТП}}, \quad (3)$$

где  $Q_{ВВТО}$  – теплота, отданная в ВВТО;  $Q_{ОТП}$  – теплота, отданная из теплофикационного отбора паровой турбины.

Величины абсолютной и относительной экономии топлива в системе от комбинированной выработки тепловой и электрической энергии теплофикационной ПГУ по сравнению с раздельной выработкой при одинаковом потреблении электрической и тепловой энергии определяются из соотношений

$$\Delta B_{ЭК} = (B_{КЭС} + B_{КОТ}) - B_{ПГУ\ ТЭЦ} - \Delta B_{РЕЗ}^{сис},$$

$$\beta_T = \Delta B_{ЭК}^{сис} / B_{ПГУ\ ТЭЦ}$$

где  $B_{КЭС}$  – расход топлива на КЭС;  $B_{КОТ}$  – расход топлива на отопительных котельных;  $B_{ПГУ\ ТЭЦ}$  – расход топлива на ПГУ ТЭЦ;  $\Delta B_{РЕЗ}^{сис}$  – величина расхода топлива резервными установками для обеспечения заданного уровня надежности систем те-

плоэнергоснабжения.

Определение основных термодинамических и энергетических показателей различных схем ПГУ проведено на примере теплофикационной ПГУ мощностью 110 МВт на базе ГТУ PG6111FA фирмы GE мощностью 77 МВт со следующими характеристиками: степень повышения давления в компрессоре 15,8; расход воздуха через компрессор 203,3 кг/с; температура продуктов сгорания после турбины 600 °С. Паровая турбина типа Т-25/33-7,6/0,12 ОАО «КТЗ» с параметрами свежего пара высокого давления 7,62 МПа и 531 °С. КУ горизонтального типа с параметрами свежего пара высокого давления 8,6 МПа и 535 °С. В основу расчета конструктивных характеристик КУ положен разработанный и зарегистрированный программный комплекс, позволяющий рассчитывать паропроизводительность КУ на различных режимах работы ПГУ. В табл. 2 представлены результаты расчета энергетических показателей эффективности различных схем теплофикационных ПГУ при изменении температуры наружного воздуха.

В результате расчетно-теоретических исследований установлено, что схема ПГУ с трехконтурным КУ обеспечивает наиболее высокие значения  $\eta_3^{ПГУ}$  и  $y_3$ . Кроме того, установлено, что в схемах ПГУ с трехконтурным КУ удельная поверхность нагрева составляет 1,21 м<sup>2</sup>/кВт, для схем с двухконтурным КУ удельная поверхность нагрева составляет 1,19 м<sup>2</sup>/кВт тепловой мощности. Кроме того установлено, что максимальные расчетные значения удельных расходов топлива на отпуск электроэнергии и теплоты в случае применения ПГУ ТЭЦ с трехконтурным КУ составили 206,83 г у.т./кВт ч и 100,13 кг у.т./Гкал [13]. По сравнению с раздельной схемой производства электрической и тепловой энергии применение теплофикационных ПГУ обеспечивает системную экономию топлива до 29-41% в зависимости от схем, режимов работы ПГУ, показателей надежности и системных факторов. Теплофикационные ПГУ с трехконтурным КУ обеспечивают повышение удельной системной

## ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

экономии топлива на 5,5 % и на 12,1% по сравнению со схемой с двухконтурным и с одноконтурным КУ соответственно. В табл. 3

приведены результаты расчета удельной системной экономии топлива различных схем теплофикационных ПГУ.

Таблица 2

Результаты расчета энергетических показателей работы ПГУ при различных температурах наружного воздуха

Наимен.	Режим	$N_{emu}$	$N_{ntu}$	$N_{пу}$	$Q_{вто}$	$Q_{отб}$	$y_{э}$	$\eta_{э}^{ПГУ}$
Ед.изм.	°С	МВт	МВт	МВт	МВт	Гкал/ч	-	-
Одноконтурный КУ	+30	66,70	27,08	93,78	5,97	21,58	1,8688	0,4121
	+15	77,42	25,59	103,02	6,45	21,59	1,9149	0,4711
	-1,8	85,97	22,03	108,00	6,88	70,50	0,8973	0,4961
	-26	89,18	19,33	108,52	7,83	70,80	0,8425	0,5160
Двухконтурный КУ	+30	66,70	31,24	97,94	5,97	21,58	2,2938	0,4304
	+15	77,42	31,42	108,84	6,45	21,59	2,4591	0,4977
	-1,8	85,97	22,90	108,87	6,88	70,50	1,0461	0,5001
	-26	89,18	19,79	108,97	7,83	70,80	0,9823	0,5182
Трехконтурный КУ	+30	66,70	31,29	97,99	5,97	21,58	2,0154	0,4307
	+15	77,42	33,55	110,96	6,45	21,59	2,1962	0,5074
	-1,8	85,97	25,28	111,25	6,88	70,50	1,0473	0,5110
	-26	89,18	22,11	111,28	7,83	70,80	0,9613	0,5291

Таблица 3

Сравнительная системная удельная экономия топлива

Схема ПГУ	Период			Среднегодовая (без учета надежности ПГУ)	Среднегодовая (с учетом надежности ПГУ)
	Летний	Осенне-весенний	Зимний		
Одноконтурная	0,060	0,400	0,461	0,306	0,273
Двухконтурная	0,109	0,408	0,465	0,327	0,291
Трехконтурная	0,127	0,428	0,486	0,347	0,304

В табл. 4 приведены показатели экономической эффективности теплофикационной ПГУ-110, вводимой в систему ОЭС

Северо-Запада с учетом дополнительных системных затрат на обеспечение надежности теплоэнергоснабжения.

Таблица 4

Основные экономические показатели проектов создания ПГУ ТЭЦ

Показатель	Ед. изм.	Схема КУ ПГУ		
		Одноконтурная	Двухконтурная	Трехконтурная
Капиталовложения	млн руб.	5281,4	5436,1	5442,3
Чистый дисконтированный доход*	млн руб.	1694,3	1791,3	2063,9
Внутренняя норма доходности	-	0,1526	0,1534	0,1582
Индекс доходности	-	1,2547	1,2615	1,3010
Дисконтированный срок окупаемости	лет	14,5	14,0	13,0

\* - с учетом дополнительных системных затрат на обеспечение надежности электро- и теплоснабжения потребителей

Таким образом, теплофикационные ПГУ обеспечивают достаточно высокую термодинамическую, топливную и общую системную эффективность и в определен-

ной степени удовлетворяют целевым показателям, предъявляемым программными документами. Выбор же рациональной технологической схемы ПГУ, обоснование

оптимальных параметров и технических решений должно проводиться для конкрет-

ных условий размещения и режимов работы в системах теплоэнергоснабжения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года: утв. распоряжением Правительства РФ от 13 ноября 2009 г. № 1715-р. – Режим доступа: <http://mine-nergo.gov.ru/aboutminen/energostrategy/>

2. Энергетическая стратегия России на период до 2035 года: Проект. – Режим доступа: <http://minenergo.gov.ru/docs/>

3. **Мелентьев Л.А.** Системные исследования в энергетике / Л.А. Мелентьев. – М.: Наука, 1983, 455 с.

4. Прогноз развития энергетики мира и России до 2040 года / А.А. Макаров, Т.А. Митрова, Л.М. Григорьев, С.П. Филиппов и др. – М.: ИНЭИ РАН, АЦ, 2014, 173 с.

5. **Попырин Л.С.** Повышение эффективности работы парогазовых ТЭЦ в зимнее время / Л.С. Попырин, И.А. Смирнов, А.Г. Щеглов, и др. // Теплоэнергетика. – 2000. – №12, С.22-29.

6. **Андрющенко А.И.** Парогазовые установки электростанций / А.И. Андрющенко, В.Н. Лапшов. – М.–Л.: Энергия, 1965, 248с.

7. **Костюк А.Г.** Турбины тепловых и атомных электростанций: учеб. для вузов. – 2 –е изд., перераб. и доп. / А.Г. Костюк, В.В. Фролов, А.Е. Булкин, А.Д. Трухний. – М.: Изд-во МЭИ, 2001, 488с.

8. **Фаворский О.Н.** Состояние и перспективы развития парогазовых установок в энергетике России / О.Н. Фаворский, В.И. Длугосельский, Ю.К. Пестренин // Теплоэнергетика.-2003, №2, С.5-12.

9. **Цанев С.В.** Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций: учеб. пособие для вузов / С.В. Цанев,

В.Д. Буров, А.Н. Ремезов. – М.: Изд-во МЭИ, 2002, 584 с.

10. **Ольховский Г.Г.** Применение ГТУ и ПГУ на электростанциях / Г.Г. Ольховский // Профессиональный журнал (Энерго-рынок), 2004, №5(6), С.52-56.

11. **Alus M.** Optimization of the triple-pressure combined cycle power plant / M. Alus, M. Petrovic // Thermal Science, 2012, Vol.16, No.3, pp. 901-914.

12. **Murad A.** Analysis of HRSG in Combined Cycle Power Plants / A. Murad, E. Amirabedin, M. Yilmazoglu, A. Durmaz // The second international conference of nuclear and renewable energy resources 4-7 July, Ankara, Turkey, 2010, pp.788-798.

13. **Anrudinova M.S.** Calculation methods and models for reliability measures of CCGT power plants in energy supply systems / M.S. Anrudinova, E.A. Larin, K.E. Obozov, L.A. Sandalova // Fundamental and applied sciences today. – USA, 2013, pp.82-87.

14. Comparison of the combined cycle efficiencies with different heat recovery steam generators / Institute of Fluid-Flow Machinery PAS, Fiszerka 14, 80-952 Gdansk, Poland // Transactions of the Institute of Fluid-Flow Machinery, 2005, Nom. 111, pp. 5-16.

15. **Farzaliev Y.** Method and algorithm of ranging of reliability objects of the Power Supply System / Y. Farzaliev // Reliability Theory and Application, №1 (36), Vol.10, 2015, pp. 78-83.

16. **Bojici L.** Technical optimization of a two-pressure level HRSG / L. Bojici, C. Neaga // U.P.B. Sci. Bull., Series D, Vol.74, Iss.2, 2012, pp.209-216.

**Ларин Евгений Александрович** – кандидат технических наук, профессор, член-корреспондент Российской экологической академии, член международной энергетической академии

**Evgeniy A. Larin** – PhD, Professor, Associate Fellow of the Russian Ecological Academy, Member of the International Energy Academy

*Статья поступила в редакцию 15.02.16, принята к опубликованию 26.02.16*

## ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА НА ПИТАЮЩУЮ СЕТЬ ПРИ НЕСИММЕТРИИ НАПРЯЖЕНИЙ

И.И. Артюхов, С.В. Молот, Е.Ю. Матвеева

### EFFECTS OF THE VARIABLE-FREQUENCY ELECTRIC DRIVE UNDER UNBALANCED MAINS VOLTAGE

I.I. Artyukhov, S.V. Molot, E.Yu. Matveeva

*С помощью имитационной модели, построенной в среде Matlab с пакетом расширения Simulink, исследуется работа частотно-регулируемого электропривода при несимметрии напряжений питающей сети. Получены зависимости показателей, характеризующих несинусоидальность токов и напряжений, от несимметрии фазных напряжений.*

Ключевые слова: преобразователь частоты, электромагнитная совместимость, качество электроэнергии, несимметрия напряжений, высшие гармоники

Современные системы частотно-регулируемого электропривода строят на основе преобразователей частоты (ПЧ), схема которых включает в себя неуправляемый входной выпрямитель, сглаживающий фильтр и автономный инвертор напряжения (АИН) на модулях типа IGBT с широтно-импульсной модуляцией [1]. Известно, что входной ток ПЧ имеет несинусоидальную форму, причем гармонический состав этого тока зависит от схемы выпрямителя, параметров сглаживающего фильтра, нагрузки электропривода и параметров сети [2, 3].

Исследованию электромагнитных процессов в системах электроснабжения частотно-регулируемых электроприводов посвящено достаточное количество работ. Однако изложенные в них результаты в большинстве случаев получены при допущении о симметрии напряжений питающей сети. На практике же всегда из-за не-

*A simulation model built in MATLAB/SIMULINK is used to analyze the effect of the variable-frequency electric drive on the power line during under unbalanced voltage conditions. The simulation results characterize the current and voltage unbalance factor versus unbalance of phase voltages.*

Keywords: frequency converter, electromagnetic compatibility, electric power quality, voltage asymmetry, higher-order harmonic

симметричных нагрузок потребителей электрической энергии или несимметрии элементов питающей сети имеет место несимметрия напряжений, для характеристики которой в соответствии с действующим стандартом [4] на качество электроэнергии в системах электроснабжения общего назначения используются следующие показатели:

– коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности

$$K_{2U} = \frac{U_{2(1)}}{U_{1(1)}} 100 \% ; \quad (1)$$

– коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности

$$K_{0U} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{0(1)}}{U_{1(1)}} 100\% , \quad (2)$$

где  $U_{2(1)}$  и  $U_{0(1)}$  – соответственно действующие значения напряжений обратной и нулевой последовательности по основной частоте;  $U_{1(1)}$  – действующее значение напряжения прямой последовательности по основной частоте.

Значения коэффициентов (1), (2) в точке передачи электрической энергии, усредненные в интервале времени 10 мин, не должны превышать 2 % в течение 95 % времени интервала в одну неделю и 4 % в течение 100 % времени интервала в одну неделю.

Для получения зависимостей гармонического состава входных токов частотно-регулируемого электропривода от несимметрии напряжений питающей сети можно использовать коэффициент, рассчитываемый по формуле (1). Однако эти зависимости будут иметь неоднозначный характер, так как коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности может принимать одни и те же значения при различных сочетаниях напряжений трехфазной системы.

Более наглядный и однозначный характер будут иметь искомые зависимости, при получении которых в качестве аргумента используется отклонение одного из фазных напряжений трехфазной системы от напряжений двух других фаз, которые принимаются равными между собой [5]. Например, при изменении действующего значения фазного напряжения  $U_A$  при условии, что действующие значения напряжений  $U_B$  и  $U_C$  равны между собой, можно получить зависимости гармонического состава фазных токов частотно-регулируемого электропривода от параметра

$$\Delta U = \frac{U_A - U_{B,C}}{U_{B,C}} 100 \%, \quad (3)$$

где  $U_A$  – действующее значение изменяемого фазного напряжения питающей сети;  $U_{B,C}$  – действующие значения неизменных и равных между собой фазных напряжений.

Для получения зависимостей, характеризующих электромагнитную совместимость частотно-регулируемого электропривода с питающей сетью при несимметрии напряжений, воспользуемся имитационной моделью (рис. 1), которая реализована в среде Matlab (версия R2012a) с пакетом расширения Simulink [6]. При построении этой модели за основу была взята модель, описанная в работе [7] и дополненная блоками для вычисления третьей и кратных ей гармоник тока и напряжения. Кроме того, несимметрия напряжений питающей сети моделируется тремя блоками AC VoltageSource. Трехфазный выпрямитель и сетевые дроссели на входе выпрямителя моделируют блоки Three-PhaseSource, UniversalBridge и LS, RS соответственно. Сглаживающий фильтр представлен блоками LD, RD и СФ. Инвертор с двигателем представлен эквивалентным активным сопротивлением, которое моделирует блок RI. Активно-индуктивная нагрузка сети моделируется блоком Three-PhaseParallel RL Load.

Моделирование производилось при следующих параметрах: номинальное напряжение сети 380 В, частота 50 Гц; индуктивность и внутреннее сопротивление сети 240 мкГн и 0,068 Ом; индуктивность и активное сопротивление сетевых дросселей 10 мкГн и 0,003 Ом; индуктивность и емкость сглаживающего фильтра 12 мкГн и 5000 мкФ соответственно. Эквивалентное сопротивление инвертора RI, рассчитанное по методике, изложенной в [2], составило 5 Ом, что соответствует номинальной мощности электропривода 55 кВт.

По результатам моделирования построены кривые потребляемых токов и фазных напряжений, рассчитаны показатели, характеризующие их несинусоидальность:

– коэффициент  $n$ -ой гармонической составляющей тока

$$K_{I(n)} = \frac{I_n}{I_1} 100 \%; \quad (4)$$

– суммарный коэффициент гармоничес-

КИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ТОКА

$$K_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N I_n^2}}{I_1} 100 \% ; \quad (5)$$

– коэффициент  $n$ -ой гармонической составляющей напряжения

$$K_{U(n)} = \frac{U_n}{U_1} 100 \% ; \quad (6)$$

– суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N U_n^2}}{U_1} 100 \% , \quad (7)$$

где  $I_1, U_1$  – действующие значения основных гармоник тока и напряжения;  $I_n, U_n$  – действующие значения гармоник тока и напряжения с номерами  $n$ ;  $N$  – порядок (номер) последней из учитываемых высших гармоник.

Согласно ГОСТ 32144-2013 необходимо учитывать высшие гармоники с номерами от 2 до 40.

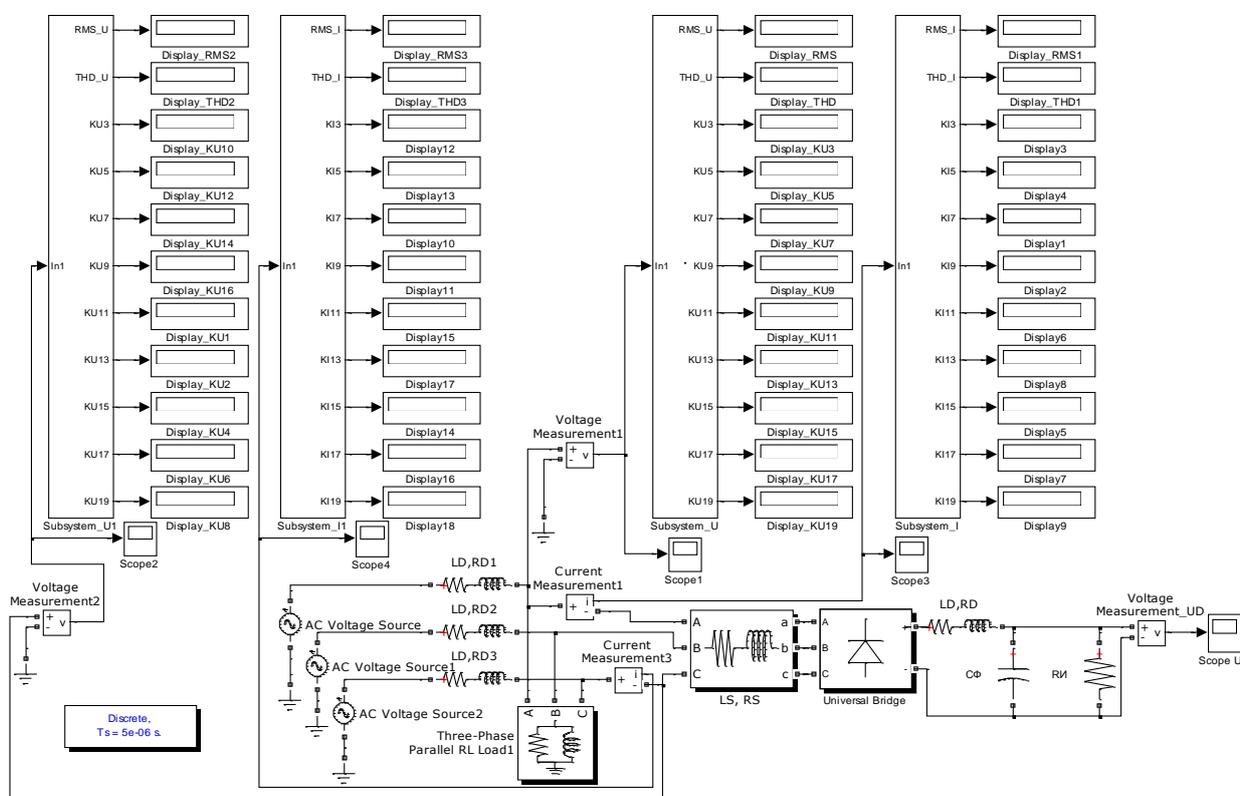


Рис. 1. Имитационная модель частотно-регулируемого электропривода

На рис. 2 показаны графики зависимости коэффициентов (4) и (5), которые получены при изменении напряжения на фазе А в пределах от -5 до +5 % от номинального напряжения на фазах В и С.

Из анализа этих графиков следует, что при несимметрии напряжений питающей сети в кривой входного тока частотно-регулируемого электропривода появляются гармоники, номера которых кратны трем.

Коэффициент третьей гармоники в одной из фаз достигает значения 25 %. Наблюдается также рост пятой гармоники. В итоге суммарный коэффициент гармонических составляющих потребляемого из сети тока увеличивается от 43 % (при симметрии фазных напряжений) до 55 % при уменьшении напряжения на соответствующей фазе на 5 % относительно напряжений двух других фаз.

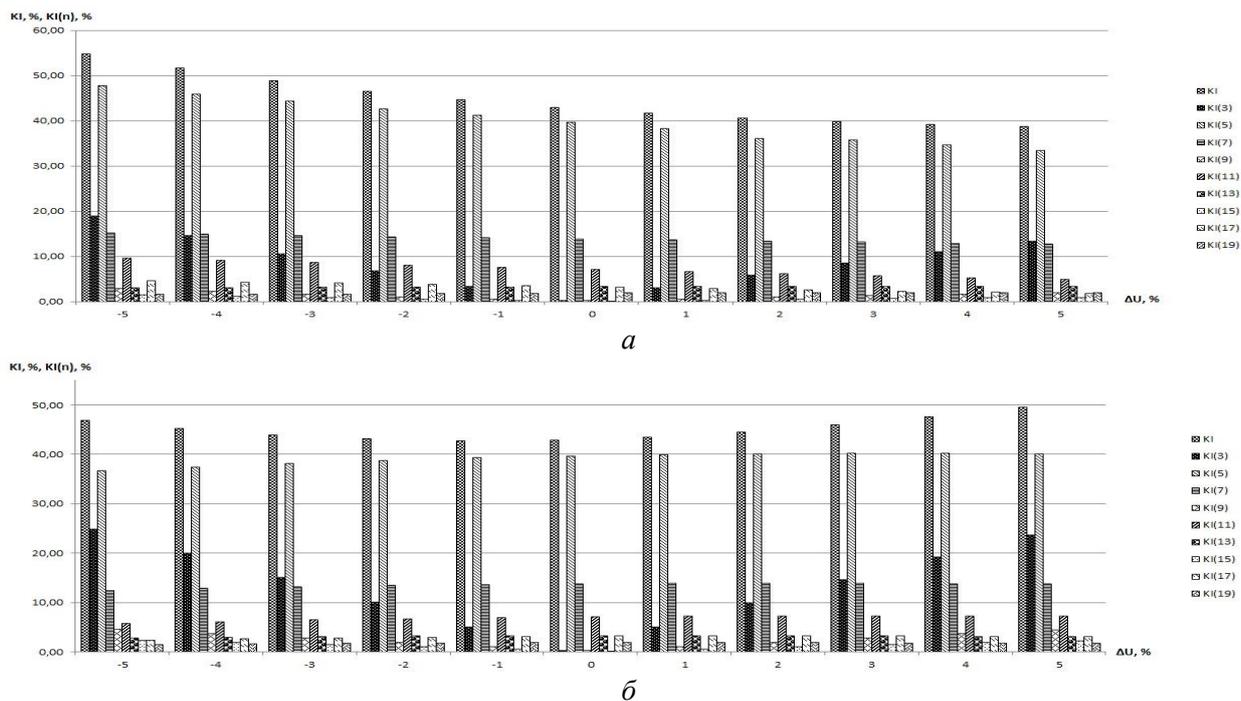


Рис. 2. Зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих  $K_I$  и коэффициентов гармоник  $K_{I(n)}$  потребляемого тока от отклонения напряжения: *а* – на фазе А; *б* – на фазах В и С

Графики коэффициентов (6) и (7), представленные на рис. 3, показывают, что вследствие появления третьей и кратных ей гармоник в кривых потребляемых токов происходит соответствующее ухудшение

формы напряжений. При определенной ситуации суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения может превысить регламентированное стандартом [4] для сетей 0,4 кВ значение 8 %.

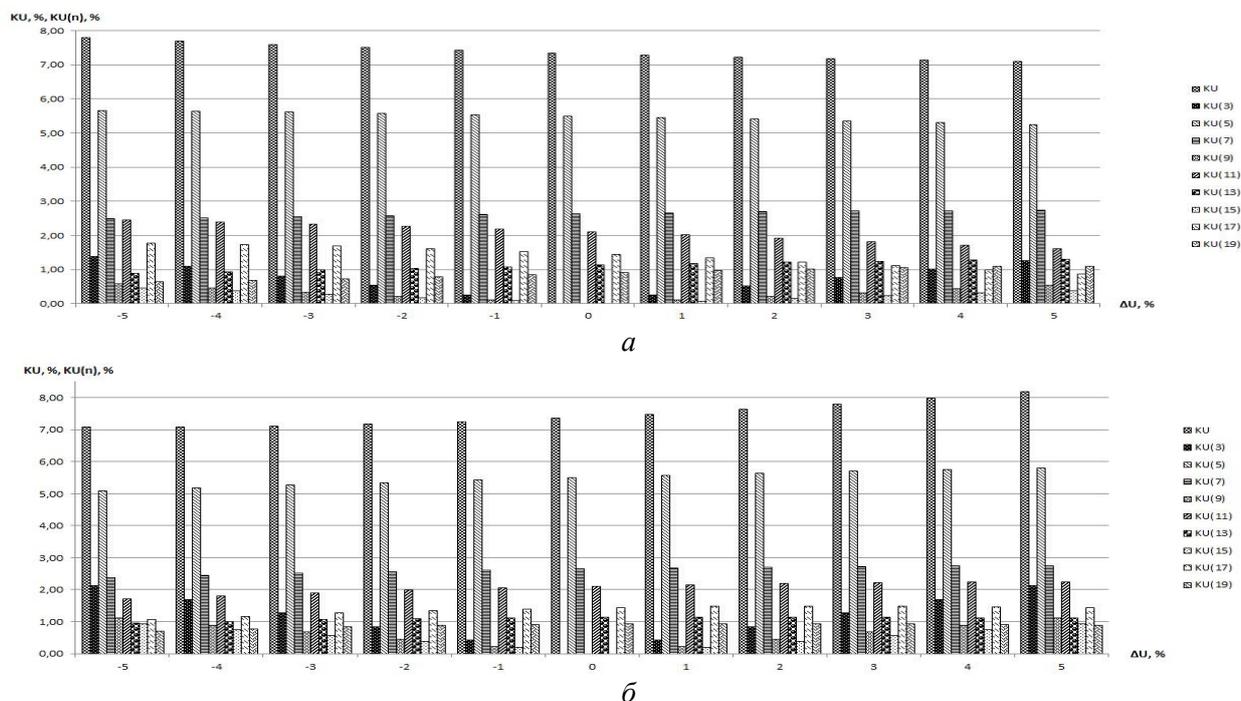
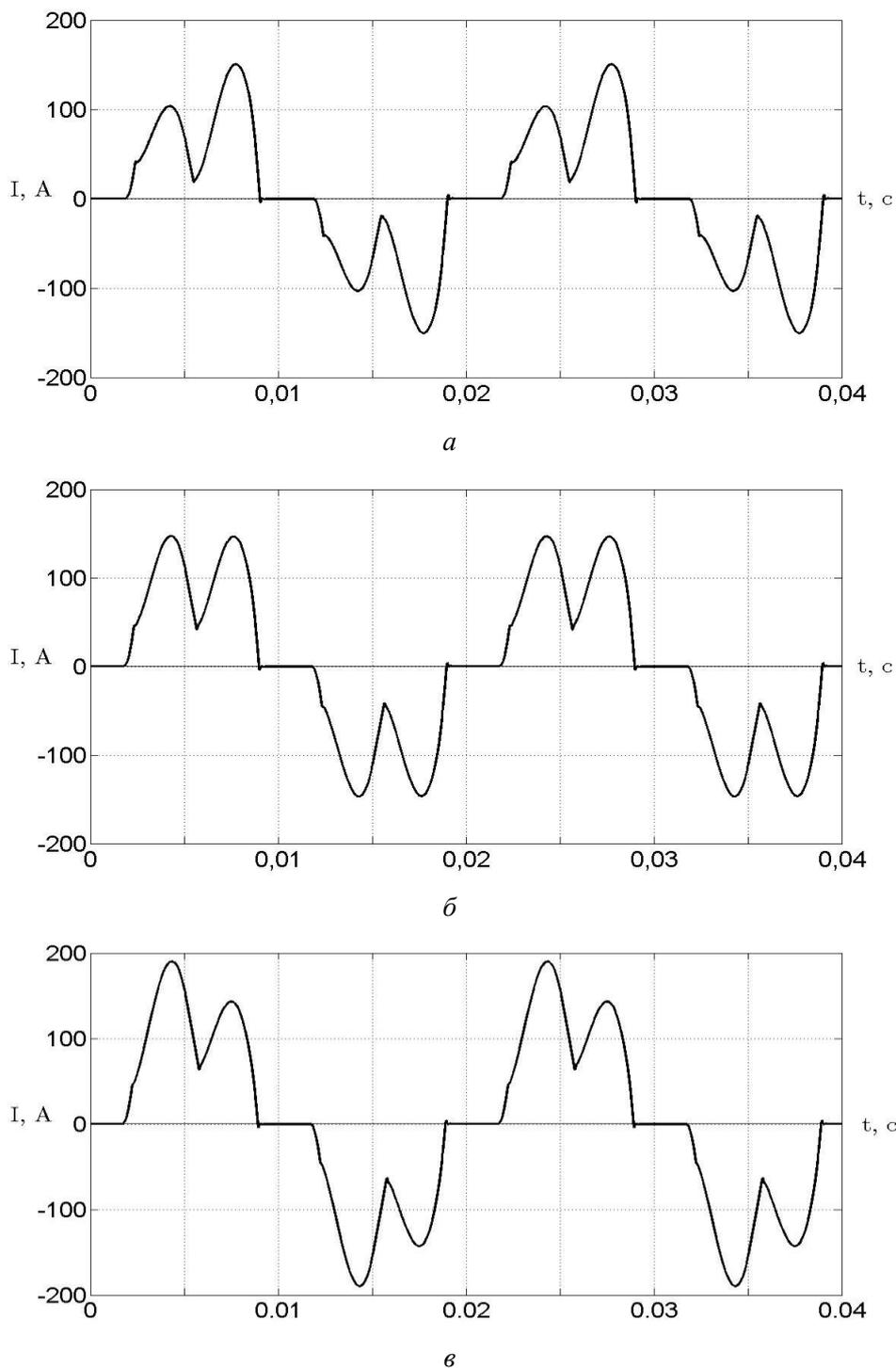


Рис. 3. Зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих  $K_U$  и коэффициентов гармоник  $K_{U(n)}$  от отклонения напряжения: *а* – на фазе А; *б* – на фазах В и С

Представление о форме потребляемого тока для различных ситуаций позволяют

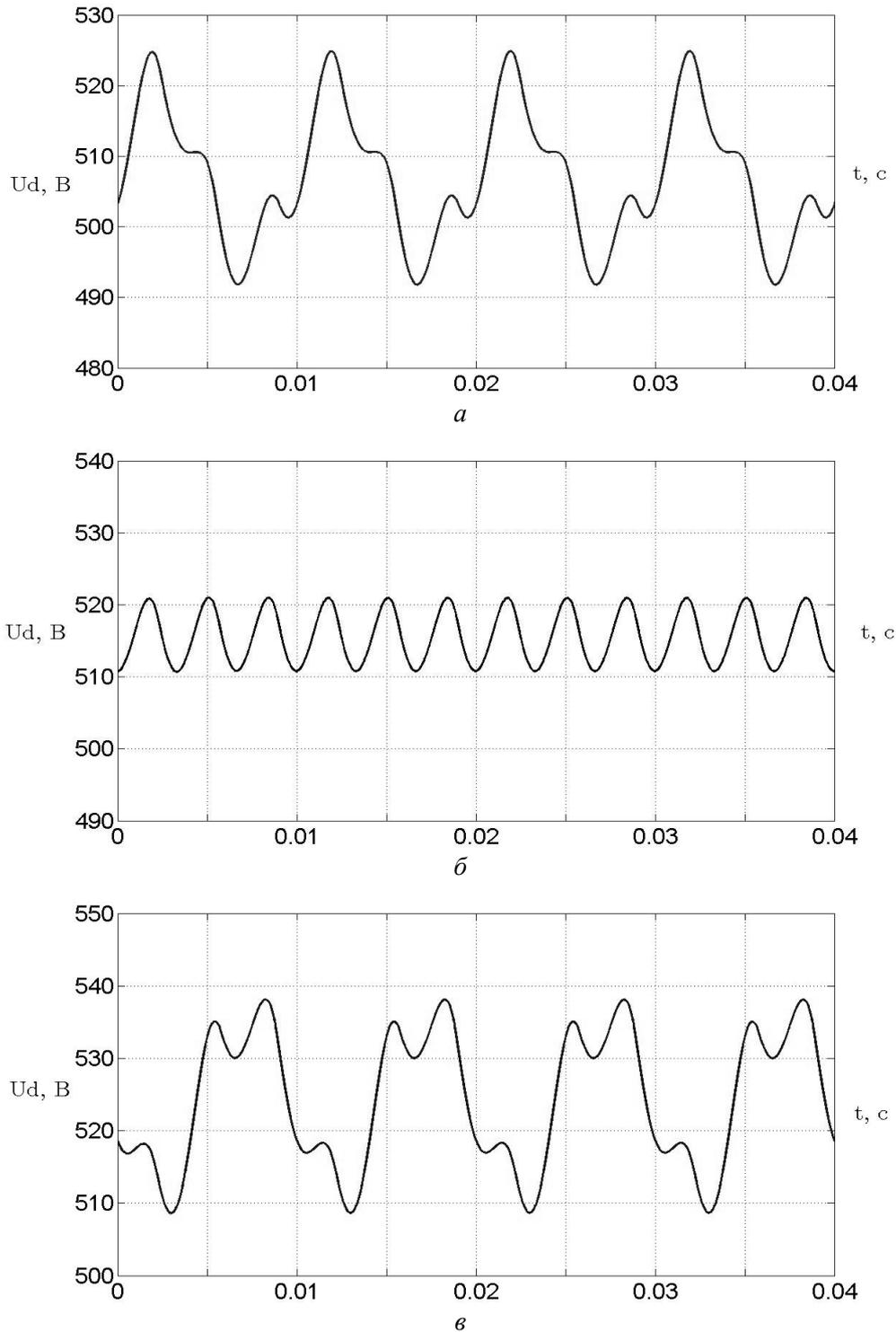
получить графики, которые показаны на рис. 4.



**Рис. 4.** Виртуальные осциллограммы потребляемого из сети тока: *а* - при отклонении напряжения на -5 %; *б* - при симметрии напряжений; *в* - при отклонении напряжения на +5 %

Необходимо отдельно отметить негативное влияние несимметрии напряжений питающей сети на качество напряжения  $U_d$ , подаваемого на вход АИН. Представ-

ление об этом дает рис. 5, на котором показаны кривые напряжений в звене постоянного тока ПЧ при симметрии сетевых напряжений и ее нарушениях.



**Рис. 5.** Виртуальные осциллограммы напряжения в звене постоянного тока: *a* - при отклонении напряжения одной из фаз на -5 %; *б* - при симметрии напряжений сети; *в* - при отклонении напряжения на одной из фаз на + 5 %

Для заданных параметров модели на рис. 1 коэффициент пульсаций напряжения  $U_d$  при симметрии напряжений питающей сети не превышал 1 %. При увеличении на-

пряжения на одной фазе на 5 % по сравнению с напряжениями на двух других фазах коэффициент пульсаций возрастает до 2,78 %. Уменьшение же напряжения на одной из фаз приводит к росту коэффициента

пульсаций до значения 3,24 %. Заметим, что вариация параметра, определенного формулой (3), в указанном диапазоне не приводит к выходу коэффициента несимметрии напряжений по обратной последо-

вательности за регламентированное стандартом [4] значение 2 %. Однако при этом коэффициент пульсаций напряжения  $U_d$  в звене постоянного тока увеличивается более чем в 3 раза.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Артюхов И.И.** Качество электроэнергии в системе электроснабжения газотурбинной компрессорной станции в условиях оснащения установок охлаждения газа частотно-регулируемым электроприводом вентиляторов / И.И. Артюхов, И.И. Бочкарева, А.А. Тримбач // Вестник Саратовского государственного технического университета, 2011. № 4 (60). Вып. 2. С. 165 – 170.

2. **Артюхов И.И.** Влияние частотно-регулируемого электропривода на питающую сеть / И.И. Артюхов, И.И. Бочкарева, С.В. Молот // Научное обозрение. 2015. № 4. С. 29 – 34.

3. **Артюхов И.И.** Обеспечение электромагнитной совместимости группы частотно-регулируемых электроприводов с источниками электропитания / И.И. Артюхов, И.И. Бочкарева, С.В. Молот // Вопросы электротехнологии. 2014. № 3(4). С. 64 – 69.

4. **ГОСТ 32144-2013.** Электрическая энергия. Совместимость технических средств

электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014. 16 с.

5. **Фираго Б.И.** Оценка влияния несимметрии напряжения питающей сети на гармонический состав прерывистого входного тока системы «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» / Б.И. Фираго, К.М. Медведев // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого, 2005. № 3(22). С. 47 – 54.

6. **Черных И.В.** Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И.В. Черных. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. 288 с.

7. **Артюхов И.И.** Имитационная модель для анализа электромагнитной совместимости многодвигательного частотно-регулируемого асинхронного электропривода с питающей сетью / И.И. Артюхов, И.И. Бочкарева, С.В. Молот // Вопросы электротехнологии, 2015. № 4(9). С. 34 – 40.

---

**Артюхов Иван Иванович** – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Молот Светлана Викторовна** – аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Матвеева Екатерина Юрьевна** – магистрант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

---

**Ivan I. Artyukhov** – Dr. Sc., Professor, Department of Power Supply for Industrial Facilities, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Svetlana V. Molot** – Postgraduate, Department of Power Supply for Industrial Facilities, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Ekaterina Yu. Matveeva** – Master Student, Department of Power Supply for Industrial Facilities, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

*Статья поступила в редакцию 05.02.16, принята к опубликованию 19.02.16*

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Е.С. Барышникова, Д.А. Васильев, В.А. Иващенко, Ю.Б. Томашевский

### A COMBINED MODEL WITH FUZZY INFERENCE ELEMENTS TO PREDICT ELECTRICAL LOADS AT INDUSTRIAL ENTERPRISES

E.S. Baryshnikova, D.A. Vasiliev, V.A. Ivaschenko, Yu.B. Tomashevskiy

*Предложен подход к построению комбинированной модели прогнозирования электрических нагрузок промышленных предприятий, базирующийся на комбинации статистической модели прогнозирования с моделями, основанными на принципах искусственного интеллекта. Формирование результата прогноза производится по средствам определения балансовых коэффициентов долевого участия частных прогнозных моделей в общем результате прогноза.*

Ключевые слова: прогнозирование, электропотребление, гибридная модель, нечеткий вывод

Эффективность процессов электроснабжения промышленных предприятий требует разработки и внедрения новых современных моделей, методов и алгоритмов управления режимом их электропотребления.

На разработку новых решений в области электроэнергетики побуждает бурно развивающаяся сегодня концепция «умных» сетей электроснабжения – «Smart-Grid», которая направлена на повышение эффективности функционирования энергосистем за счет проведения совокупности организационных мероприятий, введения новых моделей принятия решений и управления, новых решений в области информационных технологий и автоматизированных систем управления процессами производства и потребления электроэнергии, организации диспетчерского управления [1].

Важнейшим фактором функционирования любого промышленного предприятия

*The approach to the construction of a combined forecasting model referring electrical loads at industrial enterprises is based on the combination of statistical forecasting models and the models based on the principles of artificial intelligence. Formation of the forecast results is produced using the balance coefficients of individual participation forecasting models against the overall results of the forecast.*

Keywords: forecasting, power consumption, a hybrid model, fuzzy inference

является его своевременное обеспечение электроэнергией, процесс потребления которой не может рассматриваться отдельно от процесса ее собственного производства. В связи с этим и потребитель, и производитель электроэнергии заинтересованы в качественном прогнозе требуемой электрической нагрузки [2, 3].

В настоящее время для построения новых моделей прогнозирования электрических нагрузок и принятия управленческих решений достаточно эффективен комбинированный или гибридный подход, организуемый с целью формирования суммирующего (синергетического) эффекта, получаемого от совместной реализации двух и более моделей и (или) алгоритмов.

С целью получения синергетического эффекта создаются различные гибридные модели прогноза. Так, в работе [4] предложен подход к построению адаптивной про-

цедуры прогнозирования электрических нагрузок, основанный на комбинации классического прогнозного фильтра экспоненциального сглаживания с адаптационной процедурой, базирующейся на расчете статистического параметра Хёрста [5, 6] для корректировки параметра сглаживания фильтра.

В работе [7] предложен подход к построению гибридной модели прогнозирования электрических нагрузок промышленных предприятий, в основу построения которой положена комбинация модели экспоненциального сглаживания и искусственной нейронной сети (ИНС) типа «трехслойный персептрон».

Следует отметить, что все отмеченные модели делают выводы о результатах прогнозов лишь по имеющимся ретроспективным наборам данных, мощность которых достаточно ограничена. Модели не позволяют учитывать знания экспертов-специалистов, имеющих значительный опыт работ в области управления режимами электропотребления промышленных предприятий.

В статье предлагается гибридная модель прогноза электрических нагрузок промышленного предприятия, включающая в себя три прогнозных модели: модифицированный прогнозный фильтр экспоненциального сглаживания, ИНС и нечеткую модель прогнозирования, оперирующую экспертной базой знаний (БЗ).

Две первые модели прогноза подробно представлены в работе [7].

Развитие гибридной модели [7] с целью повышения синергетического эффекта по точности реализации прогнозных значений предлагается достичь за счет введения в нее дополнительных экспертных знаний о характере изменений в тенденциях графиков электрических нагрузок и их экстраполяции, а также и организации связей между признаками особенностей поведения рядов электрических нагрузок и их прогнозными значениями.

На рис. 1 представлена структурная схема предлагаемой модели прогнозирования, состоящей из трех прогнозных моделей.

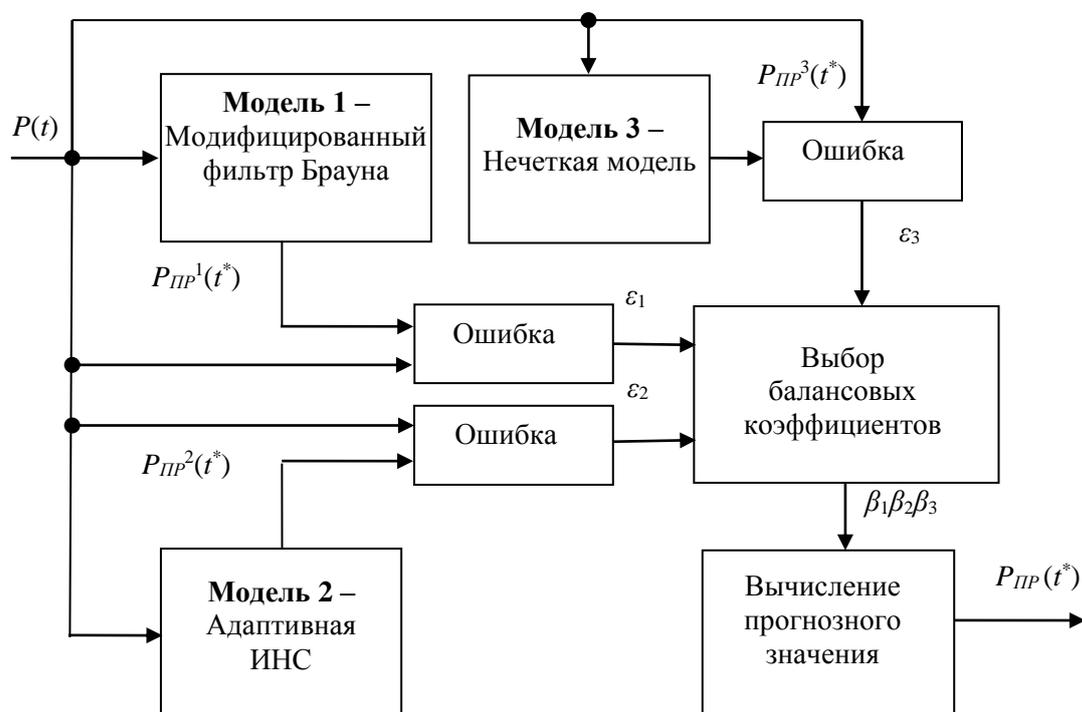


Рис. 1. Структурная схема интеллектуальной модели прогнозирования графиков электрических нагрузок

Рассмотрим нечеткую модель прогнозирования (НМП) электрических нагрузок. Данная модель представляет собой ор-

ганизационную процедуру логического вывода, оперирующую интегральными признаками временного ряда изменения

электрических нагрузок (темпоральными признаками), заданных в нечетком виде. Модель устанавливает связь между нечетко-темпоральными признаками, отражающими особенности поведения рядов нагрузок и прогнозным (экстраполяционным) значением нагрузки.

Связь между нечетко-темпоральными значениями и прогнозными устанавливается в виде системы продукционных правил, образующих БЗ нечеткой модели прогнозирования.

Правила БЗ представляются по средствам организации продукций вида:

*Если на ретроспективном интервале прогнозирования  $[t - k \Delta t; t]$  наблюдается признак  $Q_1 = q_1$ , И признак  $Q_2 = q_2$ , И, ..., И признак  $Q_z = q_z$ , ТО в момент времени  $(t+t^*)$  корректирующий прогнозный параметр будет  $O_k = o_k$ ,*

где  $Q_i$  – интегральные нечеткие признаки, характеризующие поведения графиков нагрузок на ретроспективном интервале  $[t - k \Delta t; t]$ ;  $q_i$  – значения интегральных нечетких признаков;  $(t+t^*)$  – момент времени прогнозирования;  $O_k$  – корректирующий прогнозный параметр;  $o_k$  – значение корректирующего прогнозного параметра;  $k$  – длина интервала предыстории.

В качестве интегральных признаков установлены следующие показатели:

– показатель  $H$ , учитывающий степень доверия ретроспективной тенденции изменения ряда электрической нагрузки и возможность переноса данной тенденции на прогнозное значение [6];

– интегральный показатель скорости  $V$  изменения графика электрической нагрузки на ретроспективном интервале  $[t - k \Delta t; t]$ ;

– показатель ускорения  $A$  графика электрической нагрузки на последней трети ретроспективного интервала  $[t - k \Delta t; t]$ .

Таким образом, для НМП электрических нагрузок определены следующие входные лингвистические переменные (ЛП): «Доверие тенденции –  $H$ », «Скорость –  $V$ », «Ускорение –  $A$ », термы которых определены следующим образом:

– для ЛП «Доверие тенденции –  $H$ »: «Малое», «Среднее», «Большое»;

– для ЛП «Скорость –  $V$ »: «Большое отрицательное», «Малое отрицательное», «Малое положительное», «Большое положительное»;

– для ЛП «Ускорение –  $A$ »: «Отрицательное», «Положительное».

В качестве выходной ЛП НМП выступает корректирующий прогнозный показатель  $O_k$ , определяющий величину отклонения от последнего значения нагрузки  $P(t)$  ретроспективной выборки для определения прогнозного значения  $P_{ПП}(t^*)$ .

Выходная ЛП «Отклонение –  $O$ » определяется множеством термов: «Сильное отрицательное», «Среднее отрицательное», «Малое отрицательное», «Малое», «Малое положительное», «Среднее положительное», «Сильное положительное». Значение показателя «Отклонение –  $O$ » устанавливается в пределах интервального показателя размаха ряда электрической нагрузки, что достигается путем проведения процедуры нормирования данного показателя.

Термы всех ЛП реализуются в виде нечетких чисел  $L-R$  типа.

Для реализации прогнозной модели построена база продукционных правил, определяющая логику соотношений входных ЛП с выходной ЛП.

Значение выходной ЛП определяется по средствам реализации алгоритма нечеткого вывода, а прогнозное значение формируется исходя из выражения

$$P_{ПП}^3(t^*) = P(t) + O(t),$$

где  $P(t)$  – значение нагрузки на конце интервала предыстории;  $O(t)$  – отклонение, определяемое в результате реализации алгоритма нечеткого вывода.

Для прогнозирования на два интервала упреждения  $t + 2\Delta t$  прогнозное значение определяется выражением

$$P_{ПП}^3(t^*) = \bar{P}(t-k;t) + O(t),$$

где  $\bar{P}(t-k;t)$  – среднее значение электрической нагрузки по предыстории.

Прогнозное значение гибридной модели, представленной на рис. 1, определяется исходя из выражения

$$P_{ПП}(t^*) = \sum_{i=1}^3 \beta_i P_{ПП}^i(t^*),$$

где  $\beta_i$  – балансовые коэффициенты, определяющие долевое участие результатов прогнозов моделей, составляющих гибрид, в общем результате прогноза;  $P_{ПП}^i(t^*)$  – результат прогноза  $i$ -й прогнозной модели на установленное время упреждения  $t^*$ .

Формирование значений балансовых коэффициентов производится из нормированной точности работы частных моделей на предшествующих интервалах прогнози-

рования и определяется в виде:

$$\forall i \in [1, n] \quad \beta_i = (1 - \varepsilon_i / \sum_{i=1}^n \varepsilon_i) / \sum_{i=1}^n (1 - (\varepsilon_i / \sum_{i=1}^n \varepsilon_i)),$$

где  $n$  – количество моделей в гибриде ( $n = 3$ );  $\varepsilon_i$  – ошибка работы  $i$ -й прогнозной модели на предыдущем интервале прогнозирования.

Разработана программная модель прогнозирования на различные интервалы упреждения, позволяющая адаптировать процесс реализации прогноза к различным условиям функционирования предприятий.

На рис. 2, 3 показаны результаты прогнозирования графиков электрических нагрузок для  $t^* = 1$  и  $t^* = 2$  соответственно.

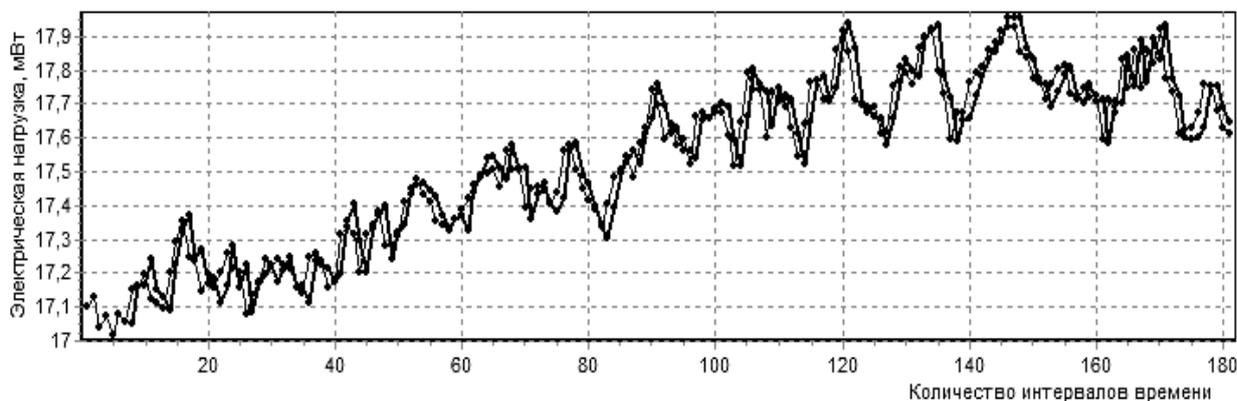


Рис. 2. Результаты прогнозирования нагрузок для  $t^* = 1$

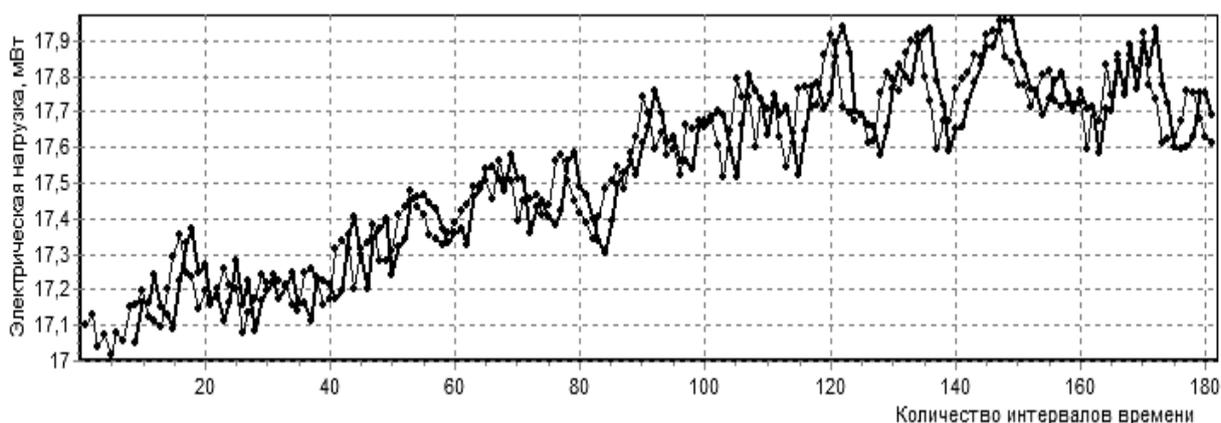


Рис. 3. Результаты прогнозирования нагрузок для  $t^* = 2$

Исследования работы гибридной модели прогнозирования для ансамблей графиков электрических нагрузок, типичных для промышленных предприятий с присоеди-

ненной мощностью 750 кВА и выше, показали, что модель позволила существенно улучшить качество прогноза, устранив главный недостаток прогнозного филь-

ра – запаздывание формирования прогнозных значений и классических перцептронов – не всегда адекватное реагирование на особенности прогнозируемых процессов на интервалах между обучениями.

При прогнозировании на один интервал упреждения, равный 5 минутам, максималь-

ная относительная ошибка гибридной модели не превышала 0,68 %, что на 0,026 % меньше, чем у гибридной модели, состоящей из прогнозного фильтра и ИНС, а при прогнозировании на два интервала – 0,79 %, что на 0,12 % меньше, чем у гибрида, состоящего из двух моделей прогнозирования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Новые сетевые технологии. Что такое SmartGrid [Электронный ресурс] URL: [http://solovyanov.com/chto\\_takoe\\_smart\\_grid](http://solovyanov.com/chto_takoe_smart_grid) (дата обращения 09.02.2015).

2. **Большов Л.А.** Прогнозирование электропотребления: современные подходы и пример исследования / Л.А. Большов, М.Ф. Каневский, Е.А. Савельева и др. // Известия Академии наук. Энергетика, 2004. - № 6. С. 74-93.

3. **Раевский Н.В.** Выбор оптимальной методики прогнозирования временных рядов электропотребления при краткосрочном периоде упреждения / Н.В. Раевский, В.Г. Дурнов // Транспорт Урала. 2012. № 1. С. 143-147.

4. **Васильев Д.А.** Прогнозирование

электрических нагрузок промышленных предприятий на основе модифицированного фильтра Брауна / Д.А. Васильев // Системы управления и информационные технологии, 2011, 3 (45), С. 56-59.

5. **Большев Л.Н.** Таблицы математической статистики // Л.Н. Большев, Н.В. Смирнов, – М.: Изд-во вычислит. центра АН СССР, 1986, 462 с.

6. Показатель Херста [Электронный ресурс] URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Показатель\\_Хёрста](https://ru.wikipedia.org/wiki/Показатель_Хёрста) (дата обращения 09.02.2015).

7. **Васильев Д.А.** Гибридная модель прогнозирования электрических нагрузок промышленных предприятий / Д.А. Васильев // Мехатроника, Автоматизация, Управление №9, 2011, С. 37-40.

**Барышникова Елена Сергеевна** – ассистент кафедры «Системотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Васильев Дмитрий Анатольевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Системотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Иващенко Владимир Андреевич** - доктор технических наук, профессор кафедры «Системотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Томашевский Юрий Болеславович** – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Системотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Elena S. Baryshnikova** – Assistant Lecturer, Department of Systems Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Dmitry A. Vasiliev** – Ph.D., Associate Professor, Department of Systems Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Vladimir A. Ivashchenko** – Dr. Sc., Professor, Department of Systems Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Yuri B. Tomashevskiy** – D.Sc., Head: Department of Systems Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

*Статья поступила в редакцию 10.02.16, принята к опубликованию 19.02.16*

## РАСЧЕТ ВЕТРОВЫХ НАГРУЗОК НА МУЛЬТИМОДУЛЬНУЮ ВЕТРОЭЛЕКТРОУСТАНОВКУ В САРАТОВСКОЙ ОБЛАСТИ

М.М. Балакин, С.Ф. Степанов

### EVALUATION OF WIND LOADS ON A WIND-DRIVEN MULTI-MODULE PLANT IN SARATOV REGION

M.M. Balakin, S.F. Stepanov

*Рассмотрен вариант расчета ветровых нагрузок для городской мультимодульной ветроэлектроустановки для Саратовской области, ее несущих конструкций и опоры.*

Ключевые слова: ветровая нагрузка; ветропанель; мультимодульная ветроэлектроустановка, момент силы

В связи с истощением ископаемых энергоресурсов все большую популярность набирают альтернативные источники энергии, в частности, ветер. Для масштабного применения ветроэлектроустановок (ВЭУ) в городской среде требуется решить несколько важных задач, что позволит устанавливать ВЭУ на крышах городских зданий. В СГТУ имени Гагарина Ю.А. ведется работа по созданию мультимодульных ветроэлектроустановок (МВЭУ) городского типа для установки на крышах многоэтажных домов. Применение инновационных конструктивных решений позволило эффективно использовать малые скорости ветра, сильно снизить уровни шума и вибраций, что привело к увеличению парусности конструкции, появилась необходимость произвести расчет несущих конструкций на воздействие ветровых нагрузок. МВЭУ планируется размещать на плоских крышах многоэтажных домов (рис. 1). Ниже приводится расчет ветровых нагрузок для МВЭУ, расположенной на крыше 9-ти этажного дома.

Расчет ведется в соответствии со СНиП 2.01.07-85 «Нагрузки и воздействия», п.6 [1].

*The article describes the analysis of wind loads for urban multi-modular wind-driven generators in Saratov region, including its load-bearing structures and supports.*

Keywords: wind load, wind panel, multi-modular wind-driven, force moment

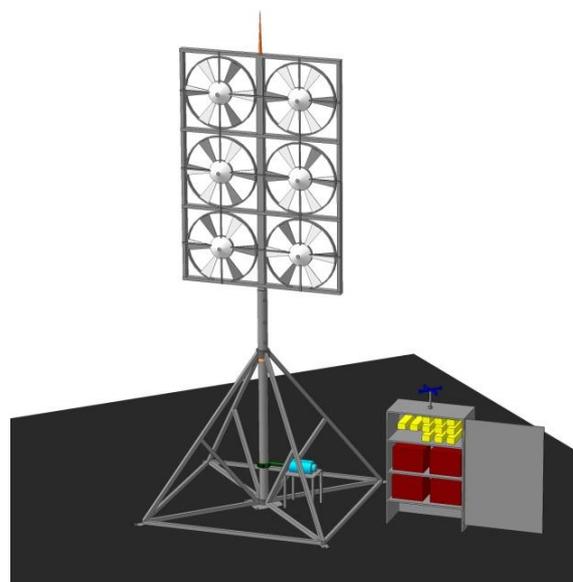


Рис. 1. Вариант размещения МВЭУ на плоской крыше

В табл. 1 приведены параметры МВЭУ для дальнейшего расчета.

В соответствии с табл. 1, вычислена площадь отдельных элементов конструкции с учетом поправочных коэффициентов на решетчатые и вращающиеся элементы (табл. 2).

Таблица 1

Параметры МВЭУ

Параметр	Обозначение	Величина
Высота панели, м	$h$	3
Наибольшая ширина (габарит) ветропанели, м	$b$	2
Размер панели в перпендикулярном направлении, м	$b_1$	0,15
Высота стойки до нижней точки панели, м	$L$	2,5
Расстояние от центра панели до оси стойки, м	$e$	0
Масса опоры ветропанели, кг	$m$	150
Масса ветропанели, кг	$M$	120
Полная масса, кг	$G$	270

Таблица 2

Расчетные площади элементов конструкции МВЭУ

Лопастей, см <sup>2</sup>	Обтекатели, см <sup>2</sup>	Трубки, см <sup>2</sup>	Рама, см <sup>2</sup>	Суммарная площадь, см <sup>2</sup>
4105,4	2714	1800	12000	20619,4

По указанному выше СНиП выбраны условия расчета ветровых нагрузок (табл. 3) для Саратовской области. Район ветровых нагрузок **5В**, где **5** – г. Саратов, **В** – городские территории, лесные массивы и другие местности, равномерно покрытые препятствиями высотой более 10 м.

Ветровая нагрузка складывается из постоянной  $W_m$  и пульсирующей  $W_p$  составляющих, расчет которых производится по п.6 СНиП2.01.07-85. В табл. 3 представлены исходные данные для расчета ветровых нагрузок в г. Саратове.

Таблица 3

Исходные данные для расчета ветровых нагрузок в г. Саратове

Параметр	Обозначение	Величина
Начальный уровень высоты сооружения, м	$Z_0$	20
Аэродинамический коэффициент (по СНиП "Нагрузки и воздействия" приложение 4, п. 15)	$c$	0,481
Нормативное значение ветрового давления, кПа (кгс/м <sup>2</sup> )(табл.5 СНиП)	$W_0$	0,6
Район ветровых нагрузок (Прил.5 СНиП)		5В

В табл. 4 представлены выражения и расчетные значения ветровых нагрузок в соответствии с п.6 СНиП2.01.07-85.

По табл. 7 и 10 используемого СНиП найдена частота собственных колебаний  $f_1 = 1,269$  Гц, для нее найдены значения коэффициентов пространственной корреляции пульсаций давления ветра  $\nu = 0,88$  и пульсации давления ветра на уровне точки

воздействия  $z = 0,92$ .

Удерживающий момент при этом должен быть не менее  $1,5M_0$ , где  $M_0$  – опрокидывающий момент. Исходя из этого условия рассчитано допустимое ребро основания опоры МВЭУ.

Полученное основание будет сложно монтировать на крыше, однако его массо-

## ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

габаритные показатели можно уменьшить двумя способами: применить дополнительные утяжелители по углам опоры каждый массой по 60 кг; использовать анкерные болты М12, которые забиваются непосред-

ственно в бетон крыши. Произведен расчет обоих вариантов.

Результаты расчетов конструкции ветропанели и ветровых нагрузок сведены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты расчета конструктивных параметров ветропанели и ветровых нагрузок

Обозначение	Величина	Расчетное значение	Расчетные выражения
$W_m$	Нормативное значение средней составляющей ветровой нагрузки, кг/м <sup>2</sup>	24,537	$W_m = W_{окс}$
$I$	Момент инерции всей конструкции, кг·м <sup>2</sup>	2072,9	рассчитан в программе MofI
$f_1$	Частота собственных колебаний конструкции, Гц	1.61	$f_1^2 = \frac{1}{U_m}$
$U$	Коэффициент предельного изгиба	$2,298 \cdot 10^{-3}$	$U = \frac{L^3}{3EI}$
$W_p$	Пульсирующая составляющая нагрузки, кг/м <sup>2</sup> .	19,865	$W_p = W_m \nu z$
$W_s$	Суммарная нормативная ветровая нагрузка, кг/м <sup>2</sup>	44.402	$W_s = W_p + W_m$
$P$	Расчетное усилие на ветропанель, кг	128,177	$P = A k_H W_s$
$M_o$	Опрокидывающий момент, кг	512,707	$M_o = P h_x$
$B_{он}$	Допустимое ребро основания без дополнительных держателей, м	5,69	$B_{он} = \frac{M_o l_2}{m}$
$B_{онум}$	Длина ребра основания с утяжелителями, м	3	$B_{онум} = \frac{512.707 \times 2 \times 2}{510}$
$N$	Усилие на анкерный болт, кг	683,6	$N = \frac{M_o H_x}{nl}$
$Q$	Давление на крышу МВЭУ с утяжелителями, кг/м <sup>2</sup>	56	$Q = \frac{m + m_{ум}}{B_{онум}^2}$
$I_y$	Момент инерции спаренной профтрубы, см <sup>3</sup>	32	$I_y = \frac{sH^3}{6} \left( 3 \frac{B}{H} + 1 \right)$
$\sigma$	Максимальное напряжение в материале профтрубы, кг/м <sup>2</sup>	400.55	$\sigma = \frac{P \times 2 \times 100}{2 \times I_y}$

Анкерный болт М12 имеет усилие на вырывание 3700 кг, вычисленное усилие, производимое на него конструкцией, составляет 683,6 кг, что значительно меньше допустимой величины.

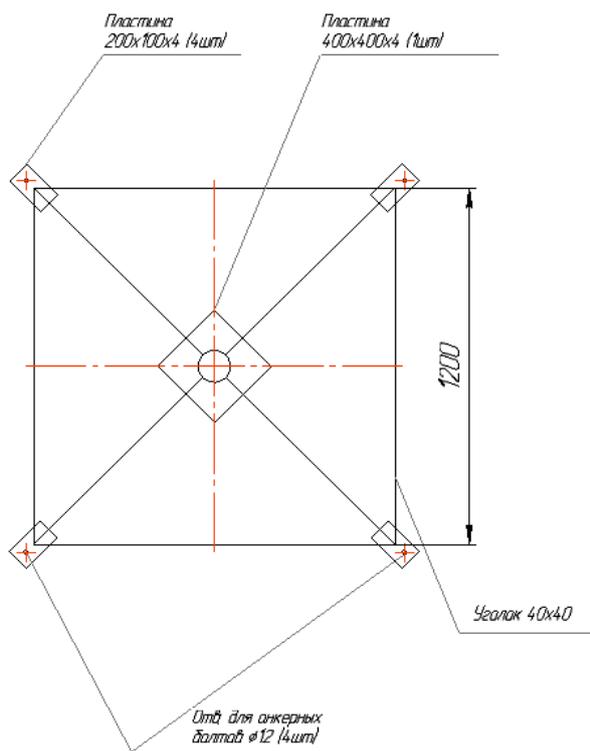
Расчетное давление на крышу МВЭУ с утяжелителями составляет 56 кг/м<sup>2</sup>, что меньше допустимой нагрузки на перекрытия  $Q_{дон}=200$  кг/м<sup>2</sup>.

Следует также проверить на изгиб несущую балку, выполненную спаренной

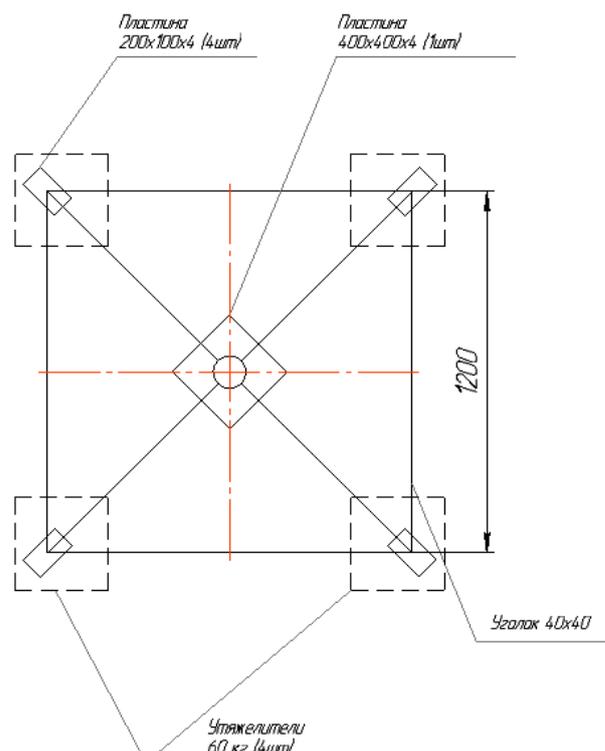
профтрубой 80x40 мм с толщиной стенки 1,5 мм.

Максимальные напряжения в трубе возникают на высоте  $h=2$  м, то есть на 2 метра ниже точки приложения силы  $P$ . Расчетное значение  $\sigma = 400,55$  кг/м<sup>2</sup>, что меньше допустимого для стали марки Ст3,  $\sigma_{дон} = 1100$  кг/м<sup>2</sup>.

На рис. 2 и 3 приведены варианты размещения анкерных болтов и утяжелителей на основании МВЭУ.



**Рис. 2.** Эскиз размещения 4-х анкерных болтов М12



**Рис. 3.** Эскиз размещения 4-х утяжелителей по 60 кг

В результате расчета были проверены основные узлы несущей конструкции МВЭУ. Выбраны и проверены способы крепления МВЭУ на плоских крышах вы-

сотных домов, рассчитаны ветровые нагрузки на ветропанель для Саратовской области, выполнены эскизы расположения крепежных элементов на основании МВЭУ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. СНиП 2.01.07-85\* Нагрузки и воздействия. 01.07.2003. – М.: Госстрой Рос-

сии от 29 мая 2003 г. № 45; Поправка 2004 г.

**Балакин Михаил Михайлович** – магистрант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Mikhail M. Balakin** – Master student, Department of Power Supply for Industrial facilities, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Степанов Сергей Федорович** – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Sergey F. Stepanov** – Dr. Sc., Professor, Department of Power Supply for Industrial Facilities, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 24.02.16, принята к опубликованию 26.02.16

## ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА СИСТЕМ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА БАЗЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИРОДНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА

М.Н. Тимофеев, Ю.Б. Томашевский

### SELECTING RENEWABLE POWER GENERATION SYSTEMS BASED ON SIMULATION OF NATURAL ENERGY POTENTIAL

M.N. Timofeev, Yu.B. Tomashevskiy

*Рассмотрены вопросы построения моделей природного энергетического источника Александрово-Гайского района Саратовской области и расчёта производительности оборудования. Приведены результаты моделирования ветряных и солнечных ресурсов в зависимости от времени суток, по месяцам. Изучено потребление электроэнергии Александрово-Гаеи и построены модели потребления электроэнергии.*

Ключевые слова: возобновляемая энергетика, моделирование, потребление

*The paper considers the issues related with simulation of the natural energy resources in Alexandrovo-Gai locality of Saratov oblast, including estimation of equipment performance. The research results refer the wind and solar resources simulation provided on a monthly basis depending on the time of day. We analyzed the rate of energy consumption in Alexandrovo-Gai locality, and designed the consumption model.*

Keywords: renewable energy, modeling, consumption

В Саратовской области энергетические мощности в основном сконцентрированы в Саратове, Энгельсе и Балаково. На конец 2014 года установленная электрическая мощность составляет 6863 МВт [1].

В последние годы в Саратовской области наблюдается рост энергопотребления, в том числе за счёт увеличения обеспеченности населения энергопотребляющими устройствами.

Возникающий дефицит электроэнергии покрывается за счёт избыточных генерируемых мощностей Балаковского района, передаваемых по ВЛ-500 кВ и ВЛ-220 кВ, а также за счёт транзита мощностей ОЭС Юга и ОЭС Центра.

Одним из решений по стабилизации энергосистемы Саратовской области является возможное расположение в Алексан-

дрово-Гайском районе солнечно-ветряной электростанции. Выбор места обусловлен следующими критериями:

- 1) значительные ресурсы солнечной энергии, среднегодовая продолжительность инсоляции порядка 2100-2400 часов;
- 2) малая изменчивость скорости ветра;
- 3) малая длительность «энергетических затиший».

На основании данных многолетних метеорологических наблюдений были выявлены следующие показатели: среднемесячная скорость ветра, на высоте 50 и 100 м над поверхностью земли находится в интервале 4,94 – 6,24 м/с, что достаточно для запуска и работы большинства ветротурбин (табл. 1). Большая часть времени суток (61 %) ветер дует со скоростями 3-6 м/с, а ветер со скоростью 7-10 м/с наблюдается в 29 % времени.

Таблица 1

Сводные показатели по энергетическому потенциалу Саратовской области от возобновляемых источников

Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
Среднемесячная продолжительность светлого времени суток (в часах)											
8,56	10,1	11,8	13,7	15,4	16,3	15,9	14,5	12,6	10,8	9,08	8,11
Среднемесячная выработка электроэнергии солнечным коллектором (кВт ч /м <sup>2</sup> )											
20,1	33,2	62,3	85,4	115,8	116,9	116,7	98,7	70,6	42,2	21,9	15,9
Среднемесячная выработка электроэнергии фотопанелью (кВт ч /м <sup>2</sup> )											
4,1	6,6	12,5	17,1	23,2	23,4	23,3	19,7	14,1	8,4	4,4	3,2
Среднемесячная скорость ветра на высоте 50-100 метров над поверхностью земли (м/с)											
5,34	5,56	5,48	5,63	5,32	5,09	4,94	5,07	5,45	5,61	5,26	5,18
5,92	6,16	6,08	6,24	5,9	5,65	5,48	5,62	6,04	6,22	5,87	5,74

Были обследованы шесть ветротурбин компании Vestas, способных работать в данных ветровых диапазонах, мощностью от 850 кВт до 3 МВт с различным диаметром лопастей. По соотношению (1) был рассчитан годовой выход электроэнергии для ветротурбин

$$\overline{\Delta A} = \overline{A}_l p_l + \overline{A}_h p_h, \quad (1)$$

где  $\overline{\Delta A}$  – средняя производительность ветротурбины;  $\overline{A}_l$  – производительность ветро-

турбины, работающей на скорости 3-6 м/с;  $\overline{A}_h$  – производительность ветротурбины, работающей на скорости 7-10 м/с;  $p_l$  – среднемесячная вероятность времени скорости ветра 3-6 м/с на высоте 50 метров над поверхностью земли в заданном диапазоне (%);  $p_h$  – среднемесячная вероятность времени скорости ветра 7-10 м/с на высоте 50 метров над поверхностью земли в заданном диапазоне (%). Результаты расчета показаны в табл. 2.

Таблица 2

Выработка электроэнергии турбиной в зависимости от вероятности скорости ветра

Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Год
V52-850kW												
221,25	249,75	247,25	258,25	238,75	215	204	224,75	243	263,75	211,75	211,5	2799
V100-1,8MW												
815,3	885,7	873,9	907,5	852,1	785,8	752,2	813,5	863	924,3	808,5	787,6	10069,4
V90-2MW												
571,1	642,7	636,1	664,1	614,7	554,6	526,6	579,3	625,4	678,1	571,9	546,4	7211
V80-2MW												
460,8	525,6	520,8	544,8	501,6	448,8	424,8	470,4	511,2	556,8	463,2	439,2	5868
V90-3MW												
825,2	906,4	895,2	931,2	870,4	797,2	761,2	827,6	882,8	949,2	820,8	794,8	10262
V112-3MW												
1000,2	1130,4	1119,2	1169,2	1080,4	972,2	922,2	1016,6	1099,8	1194,2	1002,8	922,8	12663

При этом стоит отметить, что скорость ветра  $y$  изменяется в зависимости от времени суток  $x$ , которая приблизительно опи-

сывается системой полиномиальных уравнений (рис. 1)

$$\bar{y} = \hat{A}_{12 \times 6} \cdot \bar{x} \quad (2)$$

где

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_{12} \end{bmatrix}; x = \begin{bmatrix} 0,0018 & -0,0342 & 0,1763 & 0,2381 & -3,9608 & 8,4567 & 0,8887 \\ -0,0105 & 0,2968 & -3,3282 & 18,577 & -52,961 & 69,874 & -26,268 \\ -0,0102 & 0,2774 & -2,9761 & 15,795 & -42,582 & 52,926 & -17,36 \\ -0,0057 & 0,1503 & -1,5117 & 7,2713 & -16,795 & 16,32 & 0,4362 \\ -0,0014 & 0,0266 & -0,01273 & -0,4261 & 5,2043 & -13,462 & 14,407 \\ 0,002 & -0,0701 & 0,09502 & -6,3899 & 22,083 & -35,832 & 24,556 \\ 0,0033 & 0,1046 & 1,3065 & -8,2075 & 26,872 & -41,926 & 27,184 \\ 0,0009 & -0,036 & 0,5446 & -4,007 & 15,003 & -26,125 & 19,97 \\ -0,0072 & 0,1913 & -1,9533 & 9,6305 & -23,287 & 24,901 & -3,8775 \\ -0,0093 & 0,2572 & -2,7914 & 14,931 & -40,392 & 50,466 & -16,713 \\ -0,0005 & 0,0253 & -0,4083 & 3,0262 & -10,62 & 15,877 & -2,2888 \\ 0,0027 & -0,0589 & 0,443 & -1,182 & -0,1252 & 3,6113 & 2,8937 \end{bmatrix}$$

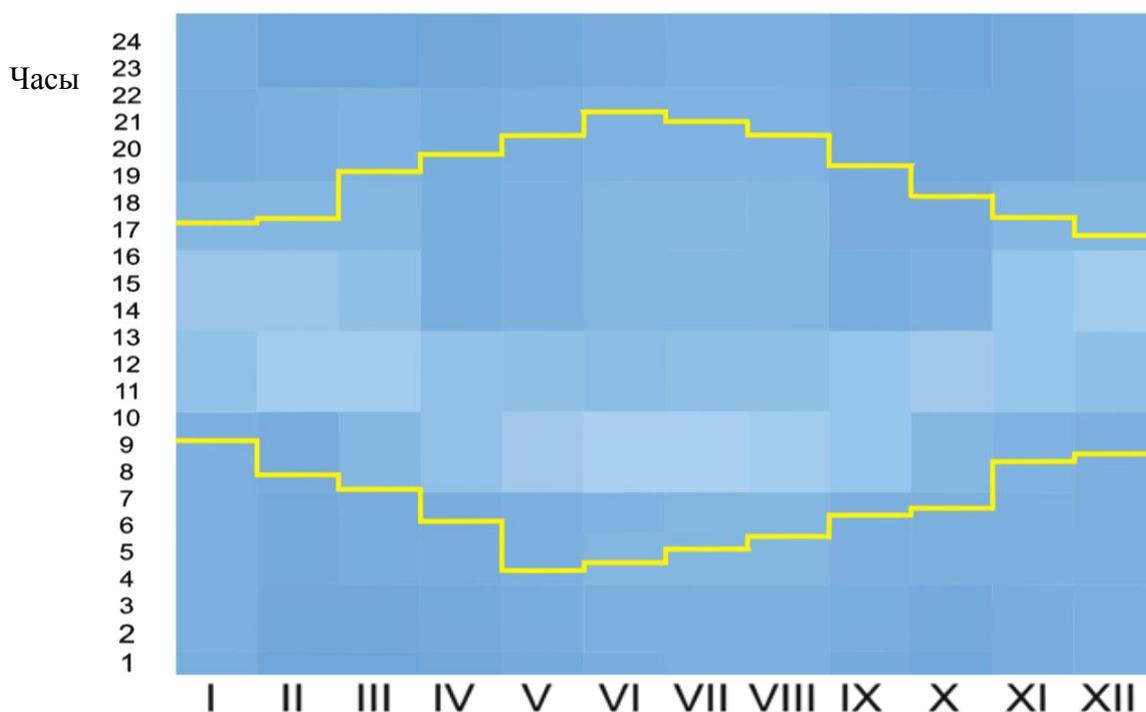


Рис. 1. Изменение скорости ветра в течение суток, среднее время восхода и заката, по месяцам (Александрово-Гайский район Саратовской области)

Изменение насыщенности голубого оттенка, от светлого к тёмному показывает увеличение скорости ветра. По рис. 1 вид-

но, что более высокие скорости ветер имеет во второй половине дня и ночью. Утром и в первую половину дня скорость ветра

заметно снижается. Это может создать проблему, так как в это время происходит увеличение электропотребления.

Для решения этой проблемы необходимо использование солнечной энергии [3, 4]. Были обработаны данные по продолжительности солнечного дня (рис.1) и рассчитан потенциал возможного выхода электроэнергии.

Недостатком солнечного источника энергии является ограниченный энергоактивный диапазон, малое количество электричества, которое можно вырабатывать в течении 4-6 месяцев, невозможность обеспечить круглосуточный цикл электроснабжения промышленных и добывающих предприятий. Но за счёт комбинации солнечного и ветрового источников электроэнергии возможно сокращение и сдвиг периода пониженного производства электричества на раннее утро.

Следующей задачей, которую необходимо решить, это определение количества электроэнергии, которую потребляет город

в период энергетических затиший, а также необходимой мощности ветряной и солнечной электростанций для снабжения электроэнергией населённого пункта. Объектом исследований выбран Александров Гай, среднее дневное потребление которого составляет 4550 кВт. День был разделён на интервалы с шагом 30 минут и сгруппирован на 6 зон с различными коэффициентами энергопотребления, генератором случайных чисел определялось энергопотребление в данный интервал времени (соотношение (3), рис. 2)

$$\Delta \bar{A}_p = K_p p_s w_i, \quad (3)$$

где  $\Delta \bar{A}_p$  – потребление электроэнергии в данный интервал времени;  $K_p$  – коэффициент потребления;  $p_s$  – вероятность;  $w_i$  – мощность, вырабатываемая в идеальных условиях солнечно-ветряной электростанцией.

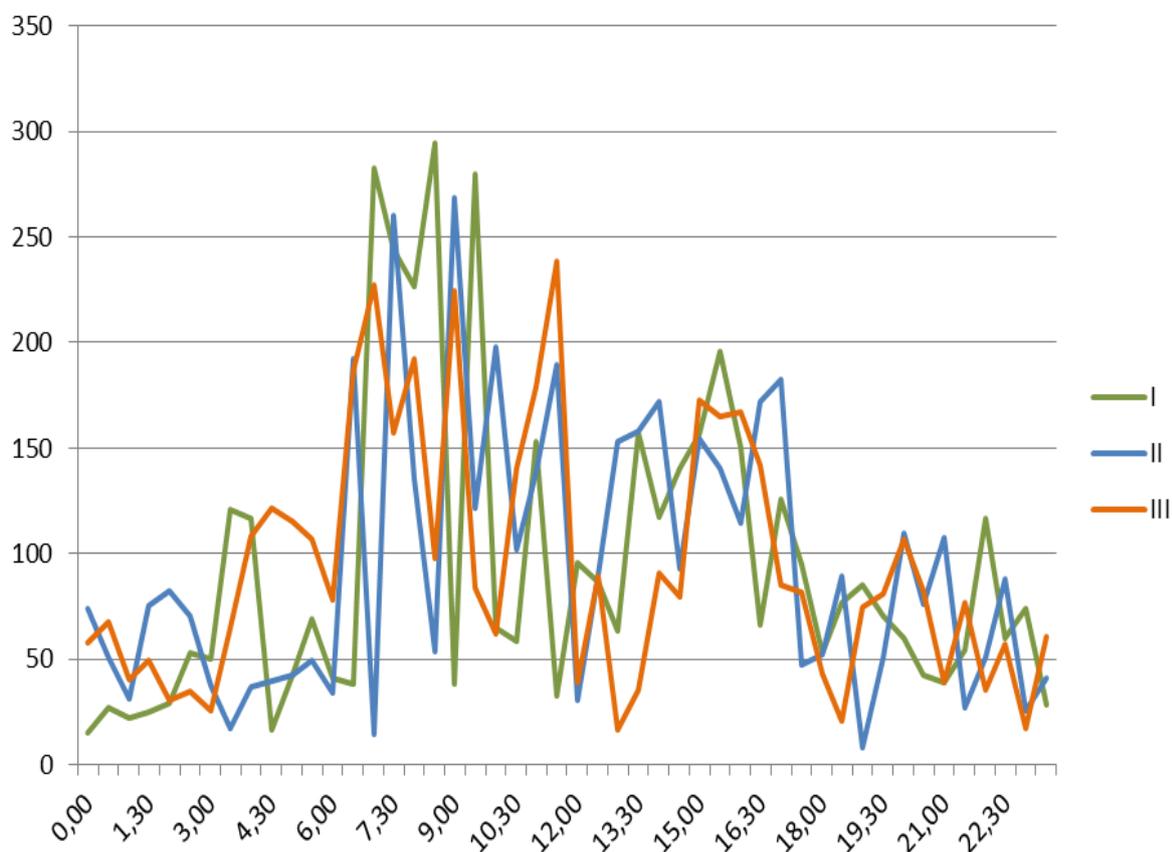


Рис. 2. Три варианта моделирования нагрузки в посёлке Александр-Гай

Для расчёта потребностей зимой и летом использовались даты летнего и зимнего солнцестояний из-за того, что длительность светового дня достигает максимального и минимального значений [5]. Потребляемая мощность при этом описывается выражением

$$\Delta W = W_w + W_s + W_n, \quad (4)$$

где  $\Delta W$  – среднеедневное потребление электроэнергии населённого пункта;  $W_w$  – электроэнергия, производимая ветроэнергостанцией;  $W_s$  – электроэнергия, производимая солнечной электростанцией;  $W_n$  – электроэнергия, получаемая во время энергетических затиший и рассчитываемая по соотношению

$$W_n = u_w - u_{s_1}, \quad (5)$$

где  $u_w$  – электроэнергия, потребляемая нагрузкой во время ветрового энергетического затишья;  $u_{s_1}$  – электроэнергия, производимая солнечной электростанцией во время ветрового энергетического затишья.

Большое значение имеет общее количество оборудования, необходимого для покрытия потребности в электроэнергии. Эту величину можно рассчитать по соотношениям

$$\begin{cases} a_{лд} x c_{лд} + b_{лд} y c_{влд} \leq d_l, \\ a_{лн} x c_{лн} + b_{лн} y c_{влн} \leq d_l, & d_l \rightarrow 0, \\ a_{зд} x c_{зд} + b_{зд} y c_{взд} \leq d_z, & d_z \rightarrow 0, \\ a_{зн} x c_{зн} + b_{зн} y c_{взн} \leq d_z \end{cases} \quad (6)$$

где  $a_{лд}$  – производительность одного м<sup>2</sup> фотоэлементов в день летнего солнцестояния, днём, кВт/ч.;  $b_{лд}$  – производительность одной ветроэнергетической установки в день летнего солнцестояния, днём, кВт/ч.;  $c_{лд}$  – продолжительность летнего дня, ч.;  $c_{влд}$  – время работы ветроэнергетических установок днём, летом, ч.;  $a_{лн}$  –

производительность одного м<sup>2</sup> фотоэлементов, в день летнего солнцестояния, ночью, кВт/ч.;  $b_{лн}$  – производительность одной ветроэнергетической установки в день летнего солнцестояния, ночью, кВт/ч.;  $c_{лн}$  – продолжительность летней ночи, ч.;  $c_{влн}$  – время работы ветроэнергетических установок летней ночью, ч.;  $d_l$  – излишек производства электроэнергии летом, кВт.;  $a_{зд}$  – производительность одного м<sup>2</sup> фотоэлементов, в день зимнего солнцестояния, в светлое время суток, кВт/ч.;  $b_{зд}$  – производительность одной ветроэнергетической установки, в день зимнего солнцестояния, днём, кВт/ч.;  $c_{зд}$  – продолжительность зимнего дня, ч.;  $c_{взд}$  – время работы ветроэнергетических установок днём, зимой, ч.;  $a_{зн}$  – производительность одного м<sup>2</sup> фотоэлементов, в день зимнего солнцестояния, ночью, кВт/ч.;  $b_{зн}$  – производительность одной ветроэнергетической установки, в день зимнего солнцестояния, ночью, кВт/ч.;  $c_{зн}$  – продолжительность зимней ночи, ч.;  $c_{взн}$  – время работы ветроэнергетических установок ночью, зимой, ч.;  $d_z$  – недостаток производства электроэнергии зимой, кВт.;  $x$  – общая площадь установленных фотоэлементов, м<sup>2</sup>.;  $y$  – количество установленных ветроэнергетических установок, ед.

Таким образом, решив систему неравенств (6), получим оптимальное количество оборудования, необходимого для бесперебойного электроснабжения Александра Гая.

Итак, получены алгоритмы расчёта потребностей электроэнергии по часам, спрогнозировано изменение периода энергетических затиший в течение года и предложена методика, уменьшающая длительность данного периода. Авторы не ставили цель рассчитать оптимальное количество ветротурбин и солнечных батарей, необходимых для снабжения электроэнергией населённого пункта. Был произведён анализ и собран массив данных, необходимый для

дальнейших исследований.

Предложенный вариант позволяет разгрузить и уменьшить количество узких

мест областной энергетической системы, стабилизировать увеличивающиеся потребности в электроэнергии.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Постановление Правительства Саратовской области от 29 декабря 2014 г. N 725-П «О схеме и программе перспективного развития электроэнергетики Саратовской области на 2015-2019 годы» // Собрании законодательства Саратовской области. 2014.

2. Руководящий документ. Методические указания. Проведение изыскательских работ по оценке ветроэнергетических ресурсов для обоснования схем размещения и проектирования ВЭУ. РД 52.04.275-89. – М.: Гидрометеиздат.-1991.

3. **Томашевский Ю.Б.** От ветра солнца

и воды / Ю.Б. Томашевский, М.Н. Тимофеев, О.В. Голикова // Инновации + Паблицити. 2012. №2. С. 28-29.

4. **Тимофеев М.Н.** Построение модели природной среды для проектирования электроэнергетических систем с возобновляемыми источниками электроэнергии / М.Н. Тимофеев // Электротехнические комплексы и системы управления. 2015. №4. С.29-33

5. Солнечный калькулятор /TimeZone- часовые пояса России, – Электрон. Текстовые дан. – М.:2015. – Режим доступа: <http://timezone.ru/suncalc.php>, свободный.

**Тимофеев Максим Николаевич** аспирант кафедры «Системотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Томашевский Юрий Болеславович** – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Системотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Maksim N. Timofeev** – Postgraduate, Department of Systems Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Yuri B. Tomashevskiy** – D.Sc., Professor, Head: Department of Systems Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

*Статья поступила в редакцию 02.02.16, принята к опубликованию 19.02.16*

#### К СВЕДЕНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

В журнале можно опубликовать материалы научно-технических конференций, круглых столов, выставок по тематическим направлениям журнала.

УДК 517.9 534.231

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
СОЛИТОННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ  
ОДНОМЕРНОГО ДЕФЕКТА КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ

С.Г. Гестрин, Е.В. Щукина

MATHEMATICAL MODELING OF SOLITON ENHANCEMENT IN  
LINEAR CRYSTAL DEFECTS

S.G. Gestrin, E.V. Schukina

*Построена и исследована математическая модель, описывающая распространение солитона вдоль линейного дефекта кристаллической структуры. Модель основана на совместном решении уравнения колебаний нелинейной струны (уравнение Буссинеска) и уравнения, описывающего колебания кристаллической решетки с линейным дефектом структуры. Найденные решения позволяют рассчитать потери энергии солитоном на черенковское излучение звуковых волн.*

Ключевые слова: уравнение Буссинеска, солитон, дислокация

Ранее в ряде работ [1-5] были изучены в линейном приближении различные эффекты, связанные с колебаниями, локализованными на дефектах кристаллической структуры, а также взаимодействием между этими колебаниями в системе, состоящей из двух дислокаций [4] и дислокационной цепочке [5]. Учет кубического ангармонизма и дисперсии при рассмотрении возмущений в линейной цепочке периодически расположенных атомов приводит к уравнению колебаний нелинейной струны, известному как уравнение Буссинеска [6]. Пространственно-локализованное решение этого уравнения представляет собой одно-

*The new mathematical model describes soliton propagation along the linear defect of crystal structure. The model is based on the solution to the equation of nonlinear string oscillations (the Boussinesq equation) and the equation describing oscillations in the crystal lattice with a linear defect pattern. The given solutions allow us to estimate the energy loss of the solitons for the Cherenkov radiation of sound waves.*

Keywords: the Boussinesq equation, soliton, dislocation

параметрический солитон, который характеризуется единственным параметром – скоростью, ограниченной снизу скоростью звука в цепочке. Локализованное возбуждение, распространяющееся вдоль цепочки атомов, образующих ядро дислокации, излучает звуковые волны, что является акустическим аналогом эффекта Вавилова-Черенкова. Ниже получено выражение для потерь энергии солитоном, движущимся вдоль дислокации, а также проанализирован спектральный состав звукового излучения.

Известно, что простейшей моделью, сохраняющей большинство свойств реально-

го кристалла, является кристаллическая решетка, в которой все атомы смещаются как бы вдоль одного направления [7]. В подобной решетке смещение атома от равновесного положения описывается не вектором смещения, а скалярной величиной  $u(\vec{n})$ , где целочисленный вектор  $\vec{n} = (n_1, n_2, n_3)$  нумерует узлы кристаллической решетки. Радиус-вектор произвольного узла решетки

$$\vec{r}(\vec{n}) = \sum_{\alpha=1}^3 n_{\alpha} \vec{a}_{\alpha}, \quad (1)$$

где  $\vec{a}_{\alpha}$  – основные трансляционные вектора.

Уравнение движения атома в кристалле

$$m\ddot{u}(\vec{n}) = -\sum_{\vec{n}'} \alpha(\vec{n} - \vec{n}') u(\vec{n}'). \quad (2)$$

Здесь  $m$  – масса атома,  $\alpha(\vec{n} - \vec{n}')$  – силовая матрица.

В простейшей решетке, для которой каждый атом является центром инверсии  $\alpha(\vec{n}) = \alpha(-\vec{n})$ , квадрат частоты колебаний определяется как:

$$\omega_0^2(\vec{k}) = \frac{1}{m} \sum_{\vec{n}} \alpha(\vec{n}) [\cos(\vec{k}\vec{r}(\vec{n})) - 1]. \quad (3)$$

Закон дисперсии для простой кубичес-

$$s_2^2 \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + s_1^2 \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) = \ddot{u} + \gamma a^2 \delta(x) \delta(y) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} (0, 0, z; t). \quad (7)$$

Слагаемое в правой части (7), содержащее дельта - функцию  $\gamma \delta(x) \delta(y)$ , описывает возмущение, создаваемое в кристалле дислокацией, расположенной вдоль оси  $C_4$ , совпадающей с осью  $z$ ,  $|a_1| = |a_2| = a$ ,  $|a_3| = b$ .

Будем предполагать, что ядро дислокации представляет собой линейную цепочку периодически расположенных атомов, которые взаимодействуют друг с другом намного сильнее, чем с остальными атомами

кой решетки с взаимодействием ближайших соседей, как известно [7], имеет вид:

$$\omega^2(\vec{k}) = \frac{2\alpha_0}{3m} \left( \sin^2 \frac{ak_x}{2} + \sin^2 \frac{ak_y}{2} + \sin^2 \frac{ak_z}{2} \right), \quad (4)$$

где  $\alpha_0 \equiv \alpha(0)$ .

Для длинноволновых колебаний закон дисперсии (4) сводится к соотношению

$$\omega^2(\vec{k}) = s^2 (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2), \quad s^2 = \frac{\alpha_0 a^2}{6m}, \quad (5)$$

где  $s$  – скорость звука в кубической решетке.

Для тетрагональной решетки с различным взаимодействием ближайших атомов в базисной плоскости  $xOy$  и вдоль оси четвертого порядка (ось  $z$ ) вместо (5) имеем

$$\omega^2(\vec{k}) = s_1^2 (k_x^2 + k_y^2) + s_2^2 k_z^2. \quad (6)$$

Здесь  $s_1$  – скорость звука в базисной плоскости,  $s_2$  – скорость звука вдоль оси  $z$ .

Дифференциальное уравнение, описывающее волны в кристалле с законом дисперсии (6) имеет вид:

в кристалле. Взаимодействие между атомами цепочки определяется их относительными смещениями  $\xi_n = u_{n+1} - u_n$ , а потенциальная энергия в нулевом приближении

$$U = \sum_n \phi(\xi_n). \quad (8)$$

Динамику цепочки будем описывать с помощью нелинейного эволюционного уравнения Буссинеска, называемого уравнением нелинейной струны

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = s_0^2 \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + b^2 B^2 \frac{\partial^4 u}{\partial z^4} + \Lambda \frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}. \quad (9)$$

Здесь  $s_0^2 = b^2 \phi''(0)/m$  ( $s_0$  – скорость

звука в цепочке),  $B^2 \equiv s_0^2/12$ , постоянная  $\Lambda \equiv -b^3 \phi'''(0)/m$ .

Известное солитонное решение уравнения (9) имеет вид:

$$u(0, 0, z; t) = 6 \frac{bBs_0^2}{\Lambda} \sqrt{\frac{v^2}{s_0^2} - 1} \left\{ th \left[ \frac{\sqrt{v^2/s_0^2 - 1}}{2} \frac{s_0}{bB} (z - vt) \right] + 1 \right\}. \quad (10)$$

Данное решение описывает волну стационарного профиля, движущуюся со скоростью  $v$ . Из (10) находим

$$\frac{\partial^2 u(0, 0, z, t)}{\partial t^2} = -3 \left( \frac{v^2}{s_0^2} - 1 \right)^{3/2} \frac{s_0^3 v^2}{\Lambda b B} \frac{th \left[ \frac{\sqrt{v^2/s_0^2 - 1}}{2} \frac{s_0}{bB} (z - vt) \right]}{ch^2 \left[ \frac{\sqrt{v^2/s_0^2 - 1}}{2} \frac{s_0}{bB} (z - vt) \right]} \equiv f(z - vt). \quad (11)$$

С учетом (11) уравнение (7) может

быть представлено в виде

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{s_1^2}{s_2^2} \left( \frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} \right) = \frac{1}{s_2^2} \ddot{u}_z + \frac{\gamma a^2}{s_2^2} \delta(x) \delta(y) f(z - vt). \quad (12)$$

Перейдем в (12) к новым переменным:

В новых переменных (13) принимает вид:

$$\tilde{x} \equiv x s_2 / s_1, \quad \tilde{y} \equiv y s_2 / s_1, \quad \tilde{z} \equiv z. \quad (13)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial \tilde{z}^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial \tilde{x}^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial \tilde{y}^2} - \frac{1}{s_2^2} \ddot{u} = \frac{\gamma a^2}{s_2^2} \delta \left( \frac{s_1}{s_2} \tilde{x} \right) \delta \left( \frac{s_1}{s_2} \tilde{y} \right) f(\tilde{z} - vt) = \frac{\gamma a^2}{s_1^2} \delta(\tilde{x}) \delta(\tilde{y}) f(\tilde{z} - vt). \quad (14)$$

Для решения (14) воспользуемся методом функций Грина. Функция Грина

$G(t - t', \tilde{\mathbf{r}} - \tilde{\mathbf{r}}')$  оператора Даламбера, как известно, удовлетворяет уравнению

$$\frac{\partial^2 G}{\partial \tilde{z}^2} + \frac{\partial^2 G}{\partial \tilde{x}^2} + \frac{\partial^2 G}{\partial \tilde{y}^2} - \frac{1}{s_2^2} \ddot{G} = -\delta(t - t') \delta(\tilde{\mathbf{r}} - \tilde{\mathbf{r}}'). \quad (15)$$

Знание функции Грина позволяет получить решение уравнения (14) простым интегрированием

тегрированием

$$u(t, \tilde{\mathbf{r}}) = -\frac{\gamma a^2}{s_1^2} \int_{-\infty}^{+\infty} dt' \int_{V'} G(t - t', \tilde{x} - \tilde{x}', \tilde{y} - \tilde{y}', \tilde{z} - \tilde{z}') \delta(\tilde{x}') \delta(\tilde{y}') f(\tilde{z}' - vt') dV' + u_0, \quad (16)$$

где  $u_0$  – некоторое решение уравнения Даламбера.

Применяя преобразование Фурье, можно показать, что функция Грина имеет вид

$$G(t-t', \tilde{\mathbf{r}} - \tilde{\mathbf{r}}') = \frac{1}{(2\pi)^4} \int_C \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\exp[i\vec{k}(\tilde{\mathbf{r}} - \tilde{\mathbf{r}}') - i\omega(t-t')]}{k^2 - \omega^2/s_2^2} d\omega d^3k, \quad (17)$$

где  $C$  – контур в комплексной  $\omega$ – плоскости [8].

Представим (17) в виде

$$G(t-t', \tilde{\mathbf{r}} - \tilde{\mathbf{r}}') = -\frac{s_2^2}{(2\pi)^4} \int_C \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\exp[i\vec{k}(\tilde{\mathbf{r}} - \tilde{\mathbf{r}}') - i\omega(t-t')]}{\omega^2 - s_2^2 k^2 + i\delta \cdot \text{sign}(\omega)} d\omega d^3k, \quad (18)$$

В подынтегральном выражении явно выделена малая мнимая добавка, знак которой изменяется вместе со знаком частоты  $\omega$ ,  $\text{sign}(\omega) = 1$  при  $\omega > 0$  и  $\text{sign}(\omega) = -1$  при  $\omega < 0$ ,  $\delta > 0$ . Контур интегрирования  $C$ , который в комплексной  $\omega$ – плоскости асимптотически при  $\omega \rightarrow \pm\infty$  совпадает с вещественной осью, для  $t-t' > 0$  необходимо замкнуть снизу действительной оси

дугой полуокружности. При этом исчезновение интеграла по бесконечной полуокружности обеспечивается экспоненциальным множителем. Интеграл по  $\omega$  в (18) может быть вычислен с помощью метода вычетов. Как известно, при  $\delta > 0$  (18) определяет запаздывающую функцию Грина.

Из (16)

$$u(t, \tilde{\mathbf{r}}) = -\frac{\gamma a^2}{s_1^2} \int_{-\infty}^{+\infty} dt' \int_{-\infty}^{+\infty} G(t-t', \tilde{\mathbf{x}}, \tilde{\mathbf{y}}, \tilde{\mathbf{z}} - \tilde{\mathbf{z}}') f(\tilde{\mathbf{z}}' - vt') dz' + u_0, \quad (19)$$

где  $u_0$  – произвольное решение уравнения

Даламбера, причем

$$u_0 = \int \left[ D_0(t, R) g(\tilde{\mathbf{r}}') + \frac{\partial}{\partial t} D_0(t, R) h(\tilde{\mathbf{r}}') \right] dV', \quad D_0(t, R) = \delta(R - s_0 t) / 4\pi R s_0, \quad R = |\tilde{\mathbf{r}} - \tilde{\mathbf{r}}'| \quad (20)$$

отвечает начальным условиям  $u(0, \tilde{\mathbf{r}}) = h(\tilde{\mathbf{r}})$ ,  $\dot{u}(0, \tilde{\mathbf{r}}) = g(\tilde{\mathbf{r}})$  [8]. Решение  $D_0(t, R)$  описывает сферическую волну, расходящуюся

от источника.

Используем далее свойство свертки двух функций

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{+\infty} dt' \int_{-\infty}^{+\infty} dz' \exp i(\omega t' - k_z z') f(\tilde{\mathbf{z}}' - vt') &= - \int_{-\infty}^{+\infty} dt' \int_{-\infty}^{+\infty} dz' \exp i(\omega t' - k_z z') f(vt' - \tilde{\mathbf{z}}') = \\ &= - \int_{-\infty}^{+\infty} dt' \int_{-\infty}^{+\infty} dz' \exp i(\omega t' - k_z (vt' - \tilde{\mathbf{z}}')) f(\tilde{\mathbf{z}}) = - \int_{-\infty}^{+\infty} dt' \exp[-i(k_z v - \omega)t'] \times \\ &\quad \times \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} dz' \exp(ik_z z') f(\tilde{\mathbf{z}}) = -(2\pi)^2 \delta(k_z v - \omega) f_{k_z}. \end{aligned} \quad (21)$$

Подставляя (18) и (21) в (19), находим

$$u(t, \tilde{\mathbf{r}}) = \frac{\gamma a^2}{s_1^2} \frac{1}{(2\pi)^2} \int_C \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\exp[i(k_z \tilde{\mathbf{z}} - \omega t)] \exp[i(k_x \tilde{\mathbf{x}} + k_y \tilde{\mathbf{y}})] f_{k_z}}{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 - \omega^2/s_2^2} \delta(k_z v - \omega) d\omega d^3k. \quad (22)$$

Выполним в (22) интегрирование по  $k_z$

$$u(\tilde{t}, \tilde{r}) = \frac{\gamma a^2}{s_1^2} \frac{1}{(2\pi)^2 v} \int_C \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\exp[i(k_x \tilde{x} + k_y \tilde{y}) + i(\tilde{z} - vt)\omega/v] f_{\omega/v}}{k_x^2 + k_y^2 + (1 - v^2/s_2^2)\omega^2/v^2} d\omega dk_x dk_y. \quad (23)$$

Перейдем в (23) от интегрирования по  $k_x, k_y$  к интегрированию в полярных коор-

динатах  $\kappa \equiv (k_x^2 + k_y^2)^{1/2}$ ,  $\alpha$ :

$$u(t, \tilde{\rho}, \tilde{z}) = \frac{\gamma a^2}{s_1^2} \frac{1}{(2\pi)^2 v} \int_C \int_0^{2\pi} \int_0^{+\infty} \frac{\exp[i\kappa \tilde{\rho} \cos \alpha + i(\tilde{z} - vt)\omega/v] f_{\omega/v}}{\kappa^2 + (1 - v^2/s_2^2)\omega^2/v^2} \kappa d\omega d\kappa d\alpha, \quad (24)$$

где  $\tilde{\rho} \equiv (\tilde{x}^2 + \tilde{y}^2)^{1/2}$ .

Воспользуемся далее интегральным представлением функции Бесселя

$$J_0(\kappa \tilde{\rho}) = (2\pi)^{-1} \int_0^{2\pi} \exp(i\kappa \tilde{\rho} \cos \alpha) d\alpha. \quad (25)$$

Из (24) и (25) находим

$$u(t, \tilde{\rho}, \tilde{z}) = \frac{\gamma a^2}{s_1^2} \frac{1}{(2\pi)v} \int_C \int_0^{+\infty} \frac{J_0(\kappa \tilde{\rho}) \exp[i(\tilde{z} - vt)\omega/v] f_{\omega/v}}{\kappa^2 + (1 - v^2/s_2^2)\omega^2/v^2} \kappa d\omega d\kappa. \quad (26)$$

Используем далее преобразование Фурье-Бесселя для функции Макдональда

$$K_0(\chi \tilde{\rho}) = \int_0^{+\infty} \frac{J_0(\kappa \tilde{\rho})}{\kappa^2 + \chi^2} \kappa d\kappa. \quad (27)$$

Подставляя (27) в (26), находим

$$u(t, \tilde{\rho}, \tilde{z}) = \frac{\gamma a^2}{s_1^2} \frac{1}{(2\pi)v} \int_C K_0\left(\sqrt{1 - v^2/s_2^2} \frac{\omega}{v} \tilde{\rho}\right) \exp\left[i(\tilde{z} - vt)\frac{\omega}{v}\right] f_{\omega/v} d\omega. \quad (28)$$

На больших расстояниях от дислокации  $K_0(\chi \tilde{\rho}) \approx \exp(-\chi \tilde{\rho}) [\pi/2 \chi \tilde{\rho}]^{1/2}$ , где  $\chi = \pm (1 - v^2/s_2^2)^{1/2} \omega/v$ , а знак  $\chi$  выбирается из условия  $\text{Re } \chi > 0$ . При  $v > s_2$  вид решения существенно изменяется. Воспользуемся известной связью между цилиндри-

ческими функциями

$$K_0(ix) = \frac{1}{2} \pi i H_0^{(1)}(x), \quad (29)$$

где  $H_0^{(1)}(x)$  - функция Ганкеля первого рода. При больших значениях аргумента функция Ганкеля

$$H_0^{(1)}(x) \approx \sqrt{\frac{2}{\pi x}} e^{i(x-\pi/4)}, \quad H_0^{(1)}\left(\sqrt{\frac{v^2}{s_2^2} - 1} \frac{\omega}{v} \tilde{\rho}\right) \approx \sqrt{\frac{2}{\pi \sqrt{\frac{v^2}{s_2^2} - 1} \frac{\omega}{v} \tilde{\rho}}} \exp i\left(\sqrt{\frac{v^2}{s_2^2} - 1} \frac{\omega}{v} \tilde{\rho} - \frac{\pi}{4}\right). \quad (30)$$

Подставим далее (30) в (28)

$$u(t, \tilde{\rho}, \tilde{z}) = \frac{\gamma a^2}{s_1^2} \frac{i}{4v} \int_C \sqrt{\frac{2}{\pi \sqrt{\frac{v^2}{s_2^2} - 1} \frac{\omega}{v} \tilde{\rho}}} \exp i\left[\sqrt{\frac{v^2}{s_2^2} - 1} \frac{\omega}{v} \tilde{\rho} + (\tilde{z} - vt)\frac{\omega}{v} - \frac{\pi}{4}\right] f_{\omega/v} d\omega. \quad (31)$$

Перейдем в (31) к переменным  $x, y, z$

$$u(t, \rho, z) = \frac{\gamma a^2}{s_1^2} \frac{i}{4v} \int_C \sqrt{\frac{2}{\pi \frac{\sqrt{v^2 - s_2^2}}{s_1} \frac{\omega}{v} \rho}} \exp i \left[ \frac{\sqrt{v^2 - s_2^2}}{s_1} \frac{\omega}{v} \rho + (z - vt) \frac{\omega}{v} - \frac{\pi}{4} \right] f_{\omega/v} d\omega. \quad (32)$$

Из структуры фазы в (32) находим

$$k_\rho = \frac{\sqrt{v^2 - s_2^2}}{s_1} \frac{\omega}{v}, \quad k_z = \frac{\omega}{v}, \quad \cos \theta = k_z (k_\rho^2 + k_z^2)^{-1/2} = \frac{s_1}{\sqrt{v^2 - s_2^2 + s_1^2}}. \quad (33)$$

Таким образом, солитон, движущийся в среде со скоростью  $v > s_2$ , излучает звуковые волны (аналог эффекта Вавилова-Черенкова), причем угол  $\theta$ , образуемый вол-

новым вектором  $\vec{k}$  и скоростью солитона  $\vec{v}$ , определяется соотношением (33). В случае простой кубической решетки  $s_2 = s_1 \equiv s$  из (32) и (33) получим

$$u(t, \rho, z) = \frac{\gamma a^2}{s^2} \frac{i}{4v} \int_C \sqrt{\frac{2}{\pi \sqrt{v^2/s^2 - 1} \frac{\omega}{v} \rho}} \exp i \left[ \sqrt{v^2/s^2 - 1} \frac{\omega}{v} \rho + (z - vt) \frac{\omega}{v} - \frac{\pi}{4} \right] f_{\omega/v} d\omega,$$

$$\cos \theta = s/v. \quad (34)$$

Плотность потока энергии в звуковой волне

$$\vec{q} = s \rho_0 \dot{u}^2 \vec{n}, \quad (35)$$

где  $\vec{n}$  – единичный вектор в направлении распространения волны.

Подсчитаем потери энергии солитоном на единице длины пути, пройденного им вдоль дислокации  $dW/dz = v^{-1} dW/dt$ . Эта

величина равна потоку вектора  $\vec{q}$  через боковую поверхность цилиндра радиусом  $\rho$ . Пусть  $\vec{n}_0$  – единичный вектор, перпендикулярный к боковой поверхности цилиндра, тогда проекция  $\vec{q}$  на  $\vec{n}_0$

$$q_{n_0} = s \rho_0 u^2 \sin \theta = s \rho_0 u^2 s/v \sqrt{v^2/s^2 - 1}. \quad (36)$$

Используя (36), находим

$$\begin{aligned} \left( \frac{dW}{dz} \right)_\rho &= \frac{1}{v} \frac{dW}{dt} = -2\pi\rho \left( \frac{s}{v} \right)^2 \rho_0 \sqrt{\frac{v^2}{s^2} - 1} \int_{-\infty}^{+\infty} \dot{u}^2 dz \approx \\ &\approx i \left( \frac{s}{v} \right)^2 \rho_0 \frac{\gamma^2 a^4}{4vs^4} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_C \int_C f_{\omega/v} f_{\omega'/v} \sqrt{\omega\omega'} \exp i \left[ \sqrt{\frac{v^2}{s^2} - 1} \rho - vt \right] \left( \frac{\omega + \omega'}{v} \right) \cdot \exp i \left[ (\omega + \omega') \frac{z}{v} \right] dz d\omega d\omega' = \\ &= i \frac{\rho_0 \gamma^2 a^4}{v^3 s^2} \int_C \int_C f_{\omega/v} f_{\omega'/v} \sqrt{\omega\omega'} \exp i \left[ \sqrt{\frac{v^2}{s_0^2} - 1} \frac{\omega + \omega'}{v} \tilde{\rho} - vt \frac{\omega + \omega'}{v} \right] \cdot 2\pi \delta \left( \frac{\omega + \omega'}{v} \right) d\omega d\omega' = \\ &= -2\pi \frac{\rho_0 \gamma^2 a^4}{v^2 s^2} \int_{-\infty}^{+\infty} f_{\omega/v} f_{-\omega/v} |\omega| d\omega = -4\pi \frac{\rho_0 \gamma^2 a^4}{v^2 s^2} \int_0^{+\infty} |f_{\omega/v}|^2 \omega d\omega. \end{aligned} \quad (37)$$

Используя (11), а также учитывая нечетность функции  $f(z)$ , представим далее

Фурье-компоненту в виде

$$f_{k_z} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp(ik_z z) f(z) dz = -\frac{3}{2\pi} \left( \frac{v^2}{s_0^2} - 1 \right)^{3/2} \frac{s_0^3 v^2}{\Lambda a B} i I(k_z), \quad (38)$$

где

$$I(k_z) = \int_{-\infty}^{+\infty} \sin(k_z z) \operatorname{th} \left[ \frac{\sqrt{v^2/s_0^2 - 1}}{2} \frac{s_0}{aB} z \right] \operatorname{ch}^{-2} \left[ \frac{\sqrt{v^2/s_0^2 - 1}}{2} \frac{s_0}{aB} z \right] dz. \quad (39)$$

График функции  $I(k_z)$ , построенный в Mathcad, приведен на рис.1. Здесь  $I(k_z)$  в м, а  $k$  в  $m^{-1}$ .

Подставляя далее (38) в (37), окончательно находим

$$\left( \frac{dW}{dz} \right)_\rho = \frac{1}{v} \frac{dW}{dt} \approx -\frac{9}{\pi} \frac{\rho_0 \gamma^2 a^2 v^2 (v^2 - s_0^2)^3}{\Lambda^2 B^2 s^2} \int_0^{+\infty} I^2(\omega/v) \omega d\omega. \quad (40)$$

Верхний бесконечный предел интегрирования в (40) следует заменить на  $\omega_{\max} \approx 2\pi v / \lambda_{\min}$ , где  $\lambda_{\min} \approx 2a$ .

Потери энергии, приходящиеся на единственный интервал частот

$$r(\omega) = \frac{d}{d\omega} \left( \frac{dW}{dz} \right)_\rho = \frac{1}{v} \frac{dW}{dt} \approx -\frac{9}{\pi} \frac{\rho_0 \gamma^2 a^2 v^2 (v^2 - s_0^2)^3}{\Lambda^2 B^2 s^2} I^2(\omega/v) \omega. \quad (41)$$

Подставляя в (40) следующие значения параметров кристалла, дислокации и солитона:  $\rho_0 = 5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ,  $a = 5 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ ,  $\gamma = 0.1$ ,  $s_0 = 4000 \text{ м/с}$ ,  $s = 3500 \text{ м/с}$ ,  $v = 4500 \text{ м/с}$ ,  $B = 300 \text{ м/с}$ ,  $\Lambda = 10000 \text{ м}^2/\text{с}^2$ , находим  $(dW/dz)_\rho \approx 10^{-3} \text{ Дж/м}$ . График зависимости  $(dW/dz)_\rho$  (Дж/м) от скорости солитона  $v$  (м/с) представлен на рис. 2. На рис. 3. изображена зависимость  $r1(\omega)$  для  $v_1 = 6500 \text{ м/с}$  и  $r2(\omega)$  для  $v_2 = 7500 \text{ м/с}$ . Видно, что с увеличением скорости солитона максимум спектрального распределения смещается в сторону более высоких частот. Так, максимум  $r1(\omega)$  приходится на  $\omega_{1\max} \approx 7.1 \cdot 10^{13} \text{ Гц}$ , а максимум  $r2(\omega)$  - на  $\omega_{2\max} \approx 8.2 \cdot 10^{13} \text{ Гц}$ .

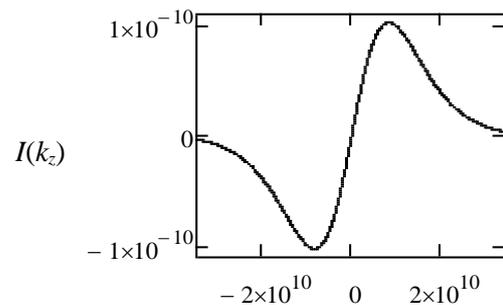


Рис. 1. k

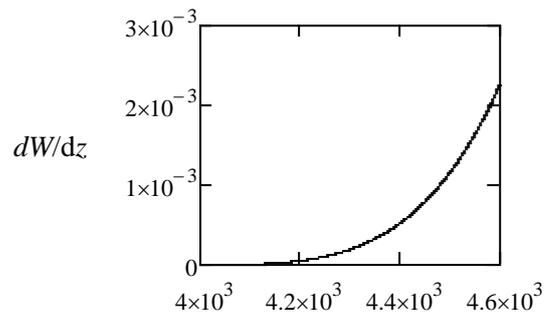


Рис. 2. v

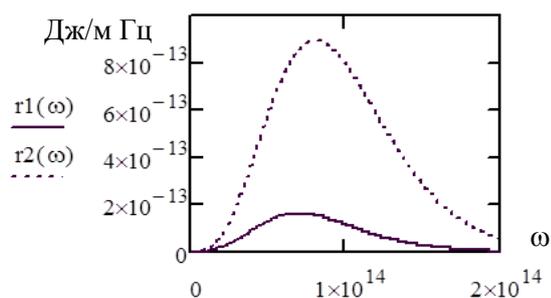


Рис. 3.

Таким образом, в работе исследован акустический аналог эффекта Вавилова-Черенкова, возникающий при распространении солитона по ангармонической цепочке атомов в ядре дислокации. Для рас-

смотрения использовалось солитонное решение уравнения нелинейной струны, называемого уравнением Буссинеска. Показано, что в случае, когда скорость локализованного возбуждения превосходит скорость звука в кристалле, возникает узкий конус звукового излучения, ось которого совпадает с дислокацией, а угол при вершине определяется отношением скорости звука к скорости солитона. Излучение имеет сплошной спектр, причем его максимум с ростом скорости уединенной волны смещается в сторону больших частот. Подсчитаны потери энергии солитоном на 1 м пути, пройденного им вдоль дислокации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Гестрин С.Г.** Локализация поляритонов вблизи дислокаций в ионных кристаллах. / С.Г. Гестрин // Изв. Вузов. Физика, 1996. №10. С.45-50.

2. **Гестрин С.Г.** Спиновые волны, локализованные на дислокациях в ферродиеlectricaх / С.Г. Гестрин, Е.А. Сальникова // Изв. ВУЗов. Физика. 2011. №11. С.3-9.

3. **Гестрин С.Г.** Локализация колебаний на дислокациях в пьезоэлектрических кристаллах. / С.Г. Гестрин, Е.В. Щукина // Изв. ВУЗов. Физика. 2014. №1. С.73-78.

4. **Гестрин С.Г.** Внутренний резонанс между локализованными колебаниями в пьезоэлектрике. / С.Г. Гестрин, Е.В. Щукина // Изв. ВУЗов. Физика. 2013 №12. С.9-14.

5. **Гестрин С.Г.** Взаимодействие звуковых волн с дислокационной цепочкой в пьезоэлектрическом кристалле. / С.Г. Гестрин, Е.В. Щукина // Изв. ВУЗов. Физика. 2014. №12. С.74-79.

6. **Косевич А.М.** Введение в нелинейную физическую механику. / А.М. Косевич, А.С. Ковалев // Киев: Наукова Думка, 1989. 301с.

7. **Косевич А.М.** Основы механики кристаллической решетки. / А.М. Косевич – М.: Наука, 1972. 280с.

8. **Терлецкий Я.П.** Электродинамика. / Я.П. Терлецкий, Ю.П. Рыбаков – М.: Высшая школа, 1990. 352 с.

**Гестрин Сергей Геннадьевич** – доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой «Инженерная физика» Саратовского государственного аграрного университета имени Н.И. Вавилова; профессор кафедры «Физика» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Щукина Елена Вячеславовна** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Физика» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Sergey G. Gestrin** – Dr. Sc., Head: Department of Engineering Physics, N.I. Vavilov Saratov State Agrarian University; Professor, Department of Physics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Elena V. Scshukina** – PhD, Associate Professor, Department of Physics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

## ВОЗДЕЙСТВИЕ СВЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ОБЪЕКТЫ 3D ПЕЧАТИ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

И.В. Злобина, Н.В. Бекренев

### IMPACT OF HIGH FREQUENCY ELECTROMAGNETIC FIELD ON 3D PRINTING MATERIALS FROM COMPOSITE POWDER

I.V. Zlobina, N.V. Bekrenev

*Исследовано влияние СВЧ электромагнитного поля различной удельной мощности на прочностные характеристики объектов из порошковых материалов, сформированных путем 3D печати. Установлено, что СВЧ электромагнитное поле удельной мощностью до 30 Вт/см<sup>3</sup> частотой 2450 МГц вызывает увеличение в 1,77 раз изгибной прочности пластин из порошка Zp130, пропитанных цианокрилатом Z-Bond™90. При этом наблюдается уменьшение размеров пор на 24% и снижение их дисперсии почти на 30%.*

Ключевые слова: аддитивные технологии, порошковые композиционные материалы, предел прочности, изгиб, СВЧ электромагнитное поле, удельная мощность, структура

Разработка и внедрение перспективной техники требуют опережающего создания новых материалов, обладающих заданным комплексом свойств, и высокоэффективных технологий их обработки. В настоящее время основным направлением совершенствования конструкций машин и приборов различного назначения является расширенное применение материалов, представляющих собой композиции неметаллических компонентов, позволяющих, благодаря широкому варьированию состава и внутреннего строения, обеспечить требуемое сочетание эксплуатационных и техно-

*The research considers the influence the electromagnetic field at microwave frequencies on the strength characteristics of objects made of powder materials by means of 3D printing. It was found that the microwave frequency electromagnetic field with specific power rating at 30 W/cm<sup>3</sup> and frequency at 2450 MHz results in the increase of the bending strength of the plates fabricated from the Zp130 powder and impregnated with the Z-Bond™90 cyanoacrylate up to 1,77 times. In these conditions the pore volume reduces by 24%, and pore dispersion decreases by almost 30%.*

Keywords: additive technologies, composite powder materials, strength, bend, microwave frequency electromagnetic field, specific power rating, structure

логических характеристик. В большинстве случаев к финишным операциям изготовления изделий из композиционных материалов относятся сушка и термостабилизация.

Наиболее эффективным с точки зрения сокращения времени и повышения равномерности термической обработки указанных материалов является СВЧ диэлектрический нагрев. Применение СВЧ электромагнитного поля для тепловой и нетепловой обработки диэлектрических, в том числе композиционных, материалов позволяет интенсифицировать процесс и повысить

степень равномерности обработки вследствие объемного характера воздействия. В настоящее время благодаря работам отечественных и зарубежных ученых в основном создана теория СВЧ нагрева диэлектрических материалов и разработаны научные основы расчета СВЧ камер различного типа и технологических магнетронов, реализованные в установках промышленного и бытового назначения [1].

Интенсивно развиваются аддитивные технологии создания изделий практически любой сложности. В основном пока они применяются для изготовления прототипов и моделей в архитектурном и промышленном дизайне. Однако известны успешные опыты по изготовлению промышленных изделий на основе 3D технологий, начиная от деталей механических передач и завершая корпусами автомобилей и строительными конструкциями. Их использование может оказаться весьма целесообразным для формирования материалов с распределенными по объему в соответствии с требуемым законом свойствами, что важно для изделий перспективных радиотехнических средств и систем телекоммуникации и защиты информации.

Однако получаемые на основе аддитивных технологий конструкции имеют недостаточные прочностные характеристики особенно при малых габаритах и сложной форме изделий. С учетом известных эффектов СВЧ электромагнитного поля по тепловому и нетепловому модифицированию свойств композитов и синтетических волокон применение СВЧ модификации для повышения прочностных характеристик изделий, полученных путем 3D печати, может оказаться перспективным направлением. Механизмы взаимодействия СВЧ электромагнитного поля с материалами, образованными с применением аддитивных технологий, мало изучены. Ранее авторами были получены положительные результаты по повышению равномерности параметров структуры композиций из органических материалов в СВЧ электромагнитном поле [2-4], что позволяет предположить получение сходных эффектов и

применительно к указанным выше объектам, что может обеспечить управление прочностными характеристиками изделий и расширение сферы применения аддитивных технологий.

Целью исследований явилось изучение влияния СВЧ электромагнитного поля на изгибную прочность конструкций из порошковых материалов, полученных при помощи технологии 3DP, сущность которой заключается в послойном формировании изделия из диэлектрического порошка, соединении слоев связующим с последующей окончательной пропиткой и упрочняющей термостабилизацией.

В экспериментах использовали 3D принтер модели ZPrinter450 и СВЧ установку с магнетроном OM75S(31) с частотой 2450 МГц. Применяли три режима СВЧ мощности: низкий, средний и высокий. Обработку осуществляли в течение 10 и 60 с. Одновременно обрабатывали по 3 образца. Образцы помещали на расстоянии 15 мм от нижней поверхности камеры установки. Для обеспечения нормальной работы магнетрона и недопущения перегрева образцов в СВЧ камеру помещали балластную емкость с водой объемом 50 мл. В результате обеспечивалась удельная мощность СВЧ 4-5, 15-16 и 30-32 Вт/см<sup>3</sup>.

В соответствии с технологией 3DP из диэлектрического порошка марки Zp130 формировали образцы в виде пластин длиной 80 мм, шириной 8 мм и толщиной 1,4 мм. Применяли дополнительную пропитку для повышения прочности на основе цианокрилата Z-Bond<sup>TM</sup>90.

Были получены следующие образцы:

- I – образец без дополнительной пропитки;
- II – образец без дополнительной пропитки с СВЧ обработкой после формирования;
- III – образец с дополнительной пропиткой;
- IV – образец с СВЧ обработкой после формирования и последующей дополнительной пропиткой;
- V – образец с СВЧ обработкой после дополнительной пропитки;
- VI – образец с СВЧ обработкой до и

после дополнительной пропитки.

Затем исследовали прочность полученных образцов, которую оценивали по силе излома образца, определяемой цифровым динамометром FMI-S10C1 фирмы ALLURIS GmbH & Co. KG с пределами измерений 0-100 Н. При испытаниях вылет образца устанавливали равным 20 мм. На основе полученных результатов расчетным путем определяли предельные напряжения изгиба [5]. Поверхность образцов до испытаний и поверхность зоны излома изучали при помощи цифрового микроскопа Digital Microscope 2.0 MP 1000X при увеличении соответственно  $\times 17$  и  $\times 400$  с выводом на

экран ноутбука.

На основе математической обработки экспериментальных данных [6] для образцов с СВЧ обработкой после формирования без пропитки получена аппроксимирующая функция:

$$F = 41P_{уд}^{0,04}\tau^{0,086},$$

где  $F$  – внешняя сила, приводящая к разрушению образца, Н;  $P_{уд}$  – подведенная удельная СВЧ мощность, Вт/см<sup>3</sup>;  $\tau$  – время воздействия, с.

Результаты расчета по полученной зависимости представлены на рис. 1.

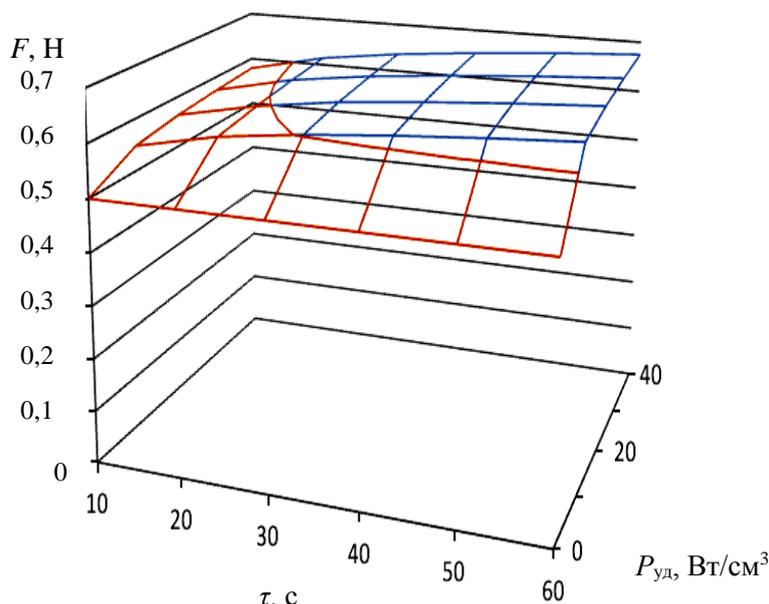
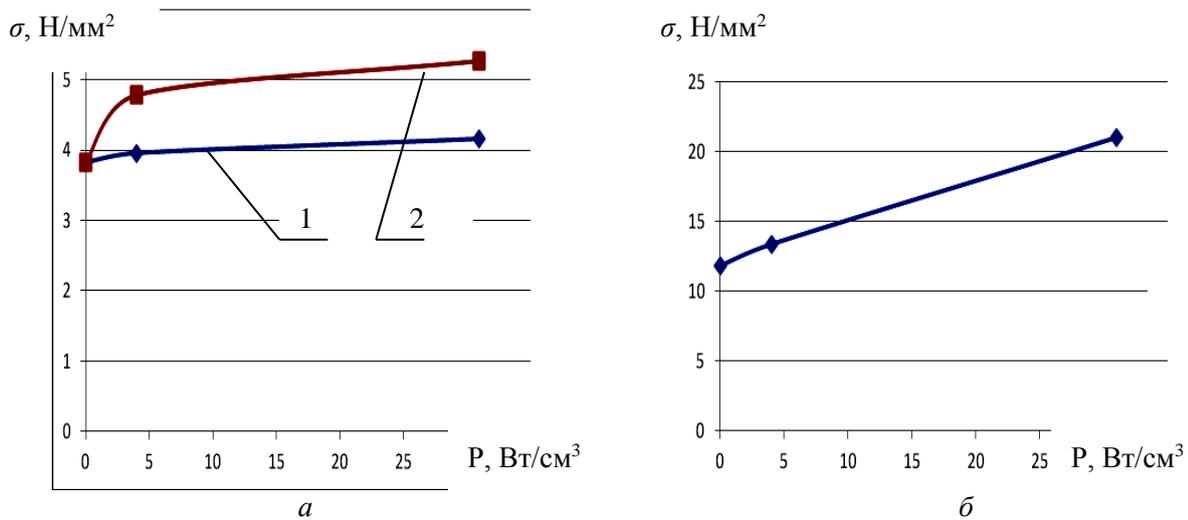


Рис. 1. Влияние удельной СВЧ мощности и времени воздействия на силу разрушения образцов

На основе известной площади поперечного сечения образцов и определенной силы излома вычисляли максимальное изгибное напряжение, действующее в момент разрушения образца. На рис. 2 представлены полученные зависимости изгибных напряжений в образцах от режимов и технологической схемы обработки.

Наибольший эффект по упрочнению достигается при максимальной удельной мощности из исследуемого диапазона и максимальном времени. При этом время оказывает существенно большее влияние, чем СВЧ мощность. К максимальному эффекту приводит сам факт помещения об-

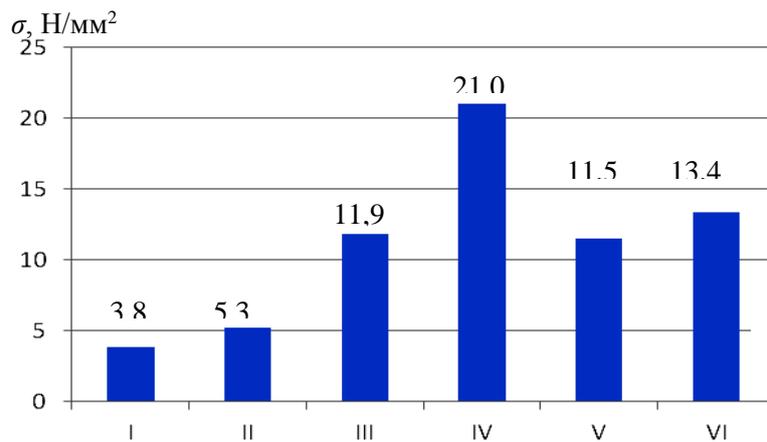
разца в СВЧ электромагнитное поле, то есть здесь имеет значение перестройка связующего и наполнителя на молекулярном уровне и появление новых связей между компонентами. В исследованном диапазоне режимов максимальная температура нагрева образцов составила 39<sup>0</sup>С. Увеличение времени воздействия более 60 с нецелесообразно по причине роста длительности технологического цикла. В соответствии с изложенным для дальнейших исследований образцов с последующей пропиткой была выбрана максимальная удельная мощность 30-32 Вт/см<sup>3</sup> и время воздействия 60 с.



**Рис. 2.** Влияние удельной мощности СВЧ электромагнитного поля на изгибные напряжения в образцах II до стабилизирующей пропитки (а) и IV после стабилизирующей пропитки (б) (1 – время обработки 10 с, 2 – время обработки 60 с, на рис. (б) время обработки 60 с)

На рис. 3 представлена гистограмма максимальных изгибных напряжений  $\sigma F_{max}$ , возникающих при разрушении

внешней нагрузкой в образцах I-VI, изготовленных в соответствии с описанной выше методикой.



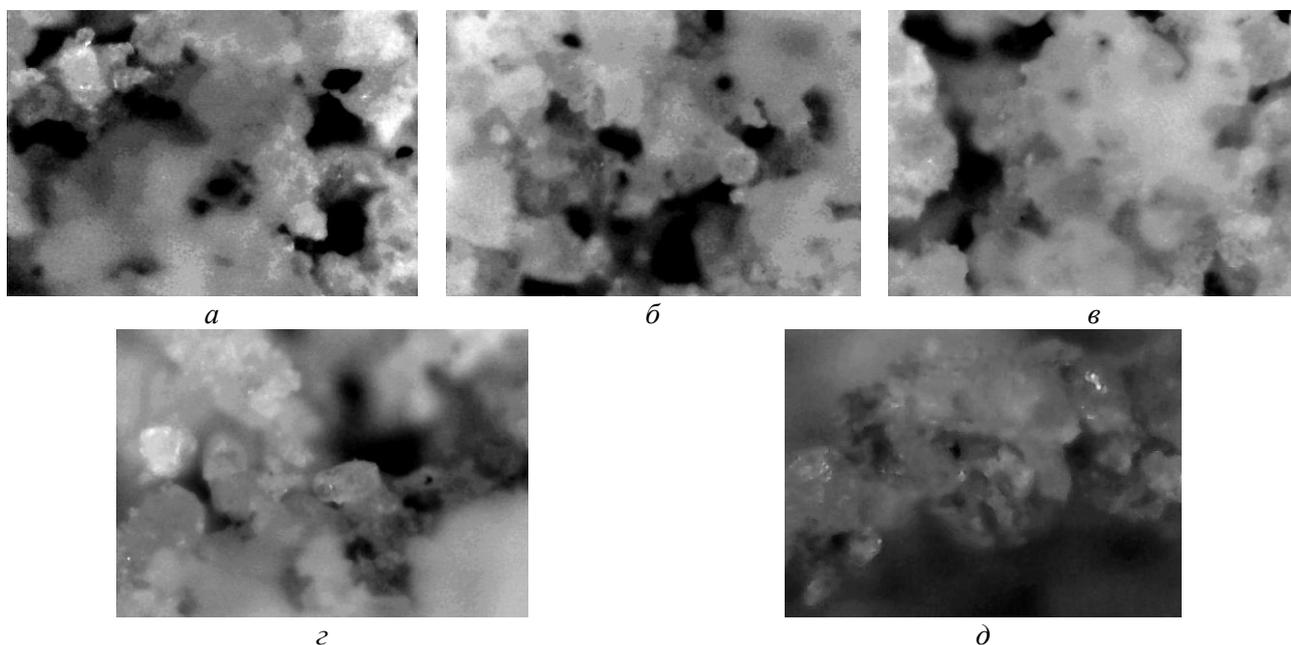
**Рис. 3.** Влияние места СВЧ обработки в технологическом цикле на изгибные напряжения в образцах в сравнении с обработкой без СВЧ воздействия (цифры означают последовательность операций, указанную выше)

Из гистограммы видно, что место СВЧ обработки в технологическом цикле существенно влияет на прочность сформированного образца, характеризующуюся предельными изгибными напряжениями. После СВЧ обработки непосредственно после формирования в 3D принтере изгибная прочность повышается в среднем в 1,37 раза (II). Стабилизирующая пропитка после формирования образца (III) способствует повышению прочности более чем в 2 раза. Обработка сформированных образцов в СВЧ электромагнитном поле частотой 2450 МГц с

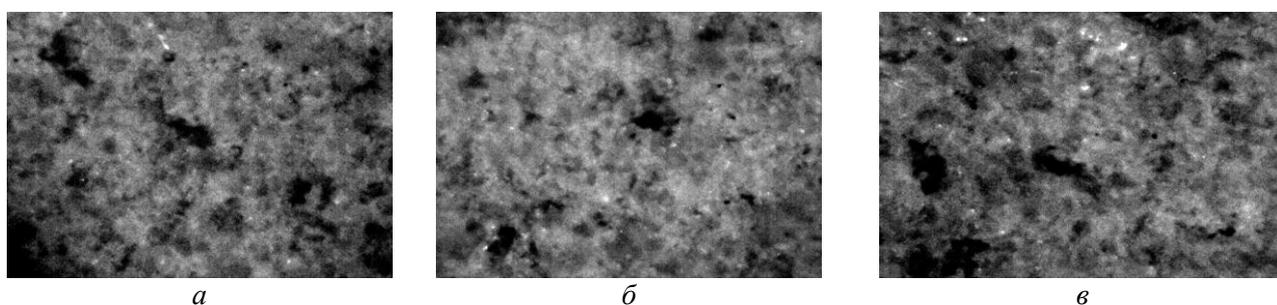
удельной мощностью 30,5 Вт/см<sup>3</sup> с последующей их пропиткой (IV) обеспечивает по сравнению с существующими технологиями 3DP (III) увеличение изгибной прочности в 1,77 раза. Использование СВЧ обработки после пропитки практически не влияет на изгибную прочность (V) или несколько ее снижает за счет возникновения в связующем, имеющем отличающиеся от основного материала (порошка) диэлектрические характеристики, остаточных напряжений, приводящих к микрорастрескиванию. Двухстадийная СВЧ обработка (до и после дополни-

тельной пропитки) дает увеличение изгибной прочности порядка 13% (VI), что можно считать в практическом плане несущественным.

По микрофотографиям (рис. 4 и 5) оценивали внешний вид, размеры агломератов и пор, разброс размеров указанных элементов структуры.



**Рис. 4.** Влияние СВЧ электромагнитного поля и времени обработки на микроструктуру образцов (x400): время 60 с (б, в), время 10 с (г, д) контрольный образец  $\sigma_F = 3,827 \text{ Н/мм}^2$  (а); после СВЧ обработки при  $P_{уд} = 4-5 \text{ Вт/см}^3$   $\sigma_F = 4,8 \text{ Н/мм}^2$  (б),  $\sigma_F = 4,0 \text{ Н/мм}^2$  (г); при  $P_{уд} = 30-32 \text{ Вт/см}^3$   $\sigma_F = 5,3 \text{ Н/мм}^2$  (в),  $\sigma_F = 4,2 \text{ Н/мм}^2$  (д)



**Рис. 5.** Влияние СВЧ электромагнитного поля на микрорельеф поверхности образцов (x17): контрольный (а), после СВЧ обработки в течение 60 с при  $P_{уд} = 4-5 \text{ Вт/см}^3$  (б) и при  $P_{уд} = 30-32 \text{ Вт/см}^3$  (в)

Изучение структуры образцов на их изломе показало, что применение СВЧ обработки после дополнительной пропитки сформированных образцов (схемы V и VI) вызывает образование микротрещин в связующем, что, очевидно, является причиной снижения предельных изгибных напряжений. Образование микротрещин может быть связано с различными тепло- и электрофизическими характеристиками порошкообразного материала и связующего, при-

водящими к различному взаимодействию с СВЧ электромагнитным полем и возможному изменению размеров и деформаций отдельных компонентов сформированного композиционного материала.

У образца II (с СВЧ обработкой после формирования) размеры промежутков между частицами (поры) снижаются на 9,2 – 24 %, а у образца III (пропитка без СВЧ) практически не изменяются. При обработке с последовательностью операций для

образца IV (пропитка после СВЧ обработки) дополнительно повышается однородность структуры – дисперсия размеров пор снижается на 25-32 %. Повышение однородности структуры и уменьшение размеров пор после СВЧ обработки по-видимому способствует увеличению количества связей между частицами и увеличению предельных изгибных напряжений.

Пропитка такой модифицированной структуры очевидно происходит более равномерно, связующее проникает по всему объему в приблизительно равной концентрации «частицы-связующее», что дополнительно увеличивает вероятность равномер-

ного сцепления частиц и формирования однородно прочной (изотропной) композиции.

Таким образом, обработка образцов из порошковых материалов в СВЧ электромагнитном поле непосредственно после их формирования путем 3D печати оказывает заметное положительное влияние на их прочность, характеризующуюся изгибными напряжениями. Механизм воздействия скорее всего состоит в изменении характера и количества связей в структуре на микро- и наноуровне. В данном направлении целесообразно проведение дальнейших теоретических и экспериментальных исследований.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Архангельский Ю.С.** Справочная книга по СВЧ-электротермии / Ю.С. Архангельский. – Саратов: Научная книга, 2011. 560 с.

2. **Бекренев Н.В.** Особенности воздействия СВЧ излучения на органические материалы и их композиции при термической обработке / Н.В. Бекренев, И.В. Злобина, В.А. Коломейцев // Вестник Саратов. гос. техн. ун-та. 2014. №4 (77). С. 117-121.

3. **Злобина И.В.** Повышение равномерности термической обработки композиций органических материалов СВЧ излучением / И.В. Злобина, В.А. Коломейцев, Н.В. Бекренев // Научное обозрение, 2014. № 12(1). С. 80-83.

4. **Злобина И.В.** Применение СВЧ из-

лучения для термической обработки диэлектрических органических материалов с неоднородной структурой и составом / И.В. Злобина, В.А. Коломейцев // Материалы 11-й Междунар. науч.-техн. конф. Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2014. (Саратов, 2014). С. 235-241.

5. **Богомаз И.В.** Сопротивление материалов / И.В. Богомаз, Т.П. Мартынова, В.В. Москвичев. - М. : Изд-во АСВ, 2008. Ч. 1, 2008. 176 с.

6. **Новик Ф.С.** Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. / Ф.С. Новик, Я.Б. Арсов – М.: Машиностроение. – София: Техника, 1980. 386 с.

**Злобина Ирина Владимировна** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техническая механика и детали машин» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Бекренев Николай Валерьевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Техническая механика и детали машин» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Irina V. Zlobina** - Ph.D., Associate Professor, Department of Engineering Mechanics and Machine Elements, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Nikolay V. Bekrenev** – Dr. Sc., Professor, Head: Department of Engineering Mechanics and Machine Elements, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

*Статья поступила в редакцию 15.02.16, принята к опубликованию 26.02.16*

# ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.3.032

## ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИМПРЕГНИРОВАННЫХ КАТОДОВ ДЛЯ УСИЛИТЕЛЕЙ ПРЯМОЙ ВОЛНЫ М-ТИПА С ПОНИЖЕННОЙ ВХОДНОЙ МОЩНОСТЬЮ

О.Д. Тищенко, А.Я. Зоркин, И.В. Родионов, А.А. Тищенко

## A FABRICATION TECHNOLOGY FOR IMPREGNATED CATHODES OF THE M-TYPE DIRECT WAVE AMPLIFIER WITH LOW INPUT CAPACITY

O.D. Tishchenko, A.J. Zorkin, V.I. Rodionov, A.A. Tishchenko

*Приведены экспериментальные данные по изменению режимов изготовления импрегнированных катодов для усилителей прямой волны М-типа с пониженной входной мощностью.*

*Показано, что увеличение температуры отжига гидроксида алюминия до 1200°C и времени отжига алюминатных штабиков позволяет повысить процент годных приборов с 50% до 70%.*

*Ключевые слова: катод, алюминат, гидроксид алюминия, прессование, спекание*

Одним из достоинств современных мощных радиолокационных станций на основе электровакуумных приборов сверхвысоких частот (СВЧ) М-типа является мгновенная готовность и применение новых принципов управления СВЧ сигналом. Мгновенная готовность требует разработки приборов с пониженным уровнем мощности входного сигнала.

Из известных типов катодов, выпускаемых современной промышленностью, пропитанный алюминатный катод обладает наилучшими эксплуатационными свойствами для маломощных приборов. Однако применение таких катодов в приборах М-типа с мгновенной готовностью при

*The experiments provide the data demonstrating changes in the fabrication modes of impregnated cathodes for the M-type direct wave amplifiers with low input capacity.*

*It is shown that the increase in annealing temperature for aluminum hydroxide up to 1200°C, and the increase in annealing period for aluminate rods, results in upgrading the yield products ratio from 50% to 70%.*

*Keywords: cathode, aluminate, aluminum hydroxide, pressing, sintering*

входной мощности 40-60 Вт оказалось затруднительным. Выход годных таких приборов, работающих в С-диапазоне, составляет  $\approx 50\%$ , в то время как приборы такого же типа с входной мощностью в сотни ватт имеет выход годных приборов 80%. Такой низкий процент выхода годных приборов с пониженным уровнем мощности объясняется несовершенством технологии изготовления алюминатного катода.

Эмиссионные характеристики катода имеют непосредственную связь с выходными параметрами прибора и в значительной степени определяют его устойчивую работу. В свою очередь известно, что качество импрегнированного катода в значи-

тельной мере зависит от технологии изготовления эмиссионного вещества. Поэтому задачей данной работы является изменение режимов изготовления алюмината с целью увеличения процента выхода годных приборов с пониженным уровнем мощности входного сигнала [1].

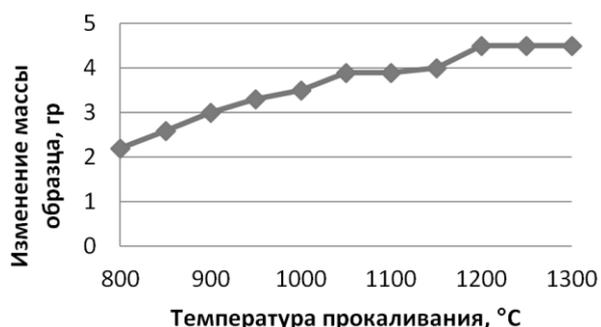
Эмиссионное вещество (алюминат) производится из порошков гидроксида алюминия, карбонатов бария и кальция. Вначале карбонаты бария и кальция просушивают в сушильном шкафу при температуре от 120 до 150 °С в течении 5 часов, затем выдерживают при температуре от 150 до 200 °С в течении 2 ч.

По имеющейся технологии изготовления гидроксид алюминия прокаливают в муфельной печи при температуре от 800 до 900 °С в течение часа для получения оксида алюминия по реакции [2]:



Экспериментальные данные по влиянию температуры отжига гидроксида алюминия на выходные характеристики приборов с пониженной входной мощностью показали, что температура отжига гидроксида алюминия должна быть более 1200°С.

Для определения оптимальной температуры прокали порции порошка гидроксида алюминия поочередно прокаливались при температурах от 800 до 1300°С в течении часа с последующим взвешиванием. Результаты эксперимента приведены на рисунке.



Зависимость изменения массы образцов после прокаливании штабика, от температуры.

Из рисунка видно, что полное обезвоживание гидроксида алюминия происходит при температуре более 1200°С, а не как предполагалось ранее, при 800-900°С.

Далее, температура 1200°С достаточна для проведения данной операции, так как при последующем увеличении температуры не происходит дальнейшего изменения массы штабика. Таким образом, получение оксида алюминия из гидроксида алюминия необходимо проводить при температуре 1200°С.

По существующей технологии порошки карбонатов бария, кальция и оксида алюминия смешивают в соотношении, необходимом для получения алюмината состава  $3\text{BaO} \cdot \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ . Затем смесь порошков размешивают в шаровой мельнице не менее 8 часов.

Последующее прессование порошков в штабики проводят в двухсторонней пресс-форме при удельном давлении 0,5 – 1,5 Т/см<sup>2</sup>.

Использование двухсторонней пресс-формы приводит к неодинаковой по глубине изделия плотности, уменьшающейся в направлении к крышке пресс-формы, что отрицательно сказывается на прочности, твердости и эмиссионных характеристиках катода.[2] Таким образом, выбранный интервал давлений при использовании двухсторонней пресс-формы недостаточен при изготовлении штабиков.

Нами был использован гидростатический метод изготовления штабиков. При гидростатическом прессовании давление составляло 1,7; 2; 2,3 Т/см<sup>2</sup> для различных образцов. Полученные штабики спекались в водородной печи.

По известной технологии отжиг штабиков проводят вначале при температуре 800-880°С в течение 20-30 минут, затем штабики спекают при температуре 1350±50°С в течение 120 минут. При спекании карбонаты интенсивно разлагаются с выделением углекислого газа, по реакции [3]:



При резком подъеме температуры интенсивное выделение  $\text{CO}_2$  приводит к разрывам в спекаемой массе, поэтому качество алюмината резко снижается. Для устранения этого недостатка необходимо увеличить время выдержки при температуре  $800^\circ\text{C}$  до 50 минут.

Таким образом, проведенные исследования показали, что для повышения выхо-

да годных изделий необходимо повысить температуру отжига гидроксида алюминия с  $800$  до  $1200^\circ\text{C}$ ; ввести гидростатическое прессование штабиков при давлении  $2 \text{ Т/см}^2$  вместо прессования в пресс-формах, а также увеличить время предварительного отжига штабиков при  $800^\circ\text{C}$  с 20 минут до 50 минут.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Добрецов Л.Н.** Эмиссионная электроника. / Л.Н. Добрецов, М.В. Гомаюнова – М.: Наука, 1966. 564 с.

2. Патент 2348641, Российская Федерация, МПК С 07 F 7/02, С 07 F 7/44, В82В 3/00. Порошковый материал из оксида алюминия (варианты) и способы его получения / Бауэр Ральф; заявитель и патентообладатель

Сэнт-гобэн керамикс энд пластикс, инк. – № 2007120885/15; заявл. 18.11.05; опубл. 08.06.06, Бюл. № 23 (II ч.). – 6 с.

3. **Ирисова К.Н.** Носители катализаторов гидроочистки на основе активной окиси алюминия / К.Н. Ирисова, Т.С. Костромина, Б.К. Нефедов – М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1983. 49с.

---

**Тищенко Ольга Дмитриевна** – аспирант кафедры "Сварка и металлургия" Саратовского Государственного Технического Университета имени Гагарина Ю.А.

**Зоркин Александр Яковлевич** – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры "Сварка и металлургия" Саратовского Государственного Технического Университета имени Гагарина Ю.А.

**Родионов Игорь Владимирович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Тищенко Артем Александрович** – аспирант кафедры "Сварка и металлургия" Саратовского Государственного Технического Университета имени Гагарина Ю.А.

**Olga D. Tishchenko** – Postgraduate, Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Alexander Ya. Zorkin** – Dr. Sc., Professor Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Igor V. Rodionov.** – D.Sc., Professor, Head: Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Artem A. Tishchenko** – Postgraduate, Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin Saratov State Technical University of Saratov

*Статья поступила в редакцию 22.02.16, принята к опубликованию 26.02.16*

# ЛЕТОПИСЬ

## ГРАВИТАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ – ТЕОРИЯ ИЛИ РЕАЛЬНОСТЬ?

А.Н. Сальников

20 марта 1916 года в редакцию журнала «Annalen Physics» поступила статья А. Эйнштейна «Die Grandlage der allgemeinen Relativitätstheorie», которая была опубликована в 49 томе на страницах 769-832. В этой статье наиболее подробно изложена общая теория относительности, которая предсказала существование гравитационных волн.

Уравнения гравитационного поля получаются из принципа наименьшего действия, который в данном случае утверждает, что вариация суммарного действия  $S_g$  гравитационного поля и материи  $S_m$  равна нулю, то есть  $\delta(S_g + S_m) = 0$ . После подстановки соответствующих величин и выполнения необходимых достаточно замысловатых вычислений можно показать, что уравнения гравитационного поля имеют вид:

$$\mathfrak{R}_{ik} - \frac{1}{2} g_{ik} \mathfrak{R} = -\frac{8\pi G}{c^4} T_{ik}, \quad (1)$$

где  $G$  – гравитационная постоянная, величина  $\mathfrak{R}$  называется скалярной кривизной пространства, причем  $\mathfrak{R} = g^{ik} \mathfrak{R}_{ik} = g^{il} g^{km} \mathfrak{R}_{iklm}$ ,  $g_{ik}$  – метрический тензор,  $\mathfrak{R}_{ik}$  – тензор Риччи,  $T_{ik}$  – тензор энергии-импульса,  $\mathfrak{R}_{iklm}$  – тензор Римана.

Уравнения (1) называются уравнениями Эйнштейна. Входящие в уравнения (1) четыре координаты  $x^i$  могут быть подвергнуты произвольному преобразованию, посредством которого можно выбрать четыре из десяти компонент тензора  $g_{ik}$ . Поэтому неизвестными независимыми функциями являются только шесть величин  $g_{ik}$ . Четыре компоненты входящей в тензор

энергии-импульса  $T_{ik}$  четырёх-скорости  $u^i$  связаны друг с другом соотношением  $u_i u^i = 1$ , так что независимы только три из них. Таким образом, система (1) состоит в общем случае из 10-ти уравнений поля для десяти неизвестных величин: шести компонент метрического тензора  $g_{ik}$ , трёх компонент скорости  $u^i$  и плотности материи  $\mu = \varepsilon/c^2$  или её давления  $P$ .

Для гравитационного поля в пустоте остаётся всего шесть неизвестных величин компонент метрического тензора  $g_{ik}$  и, соответственно, шесть уравнений поля

$$\mathfrak{R}_{ik} = 0. \quad (2)$$

Условие  $\mathfrak{R}_{ik} = 0$ , получается из уравнения (1) при  $T_{ik} = 0$ . Но это не означает, что пустое пространство-время является плоским, так как для этого требуется более сильное ограничение – равенство нулю тензора Римана  $\mathfrak{R}_{iklm} = 0$ .

Уравнения Эйнштейна нелинейны. Поэтому для гравитационного поля принцип суперпозиции не выполняется. Этот принцип справедлив лишь для слабых полей, допускающих линеаризацию уравнений Эйнштейна. К слабому полю, в частности, относится классическое гравитационное ньютоновское поле, получающееся в пределе уравнений Эйнштейна. В этом случае формула для интервала в галилеевых координатах  $ds^2 = (dx^0)^2 - (dx^1)^2 - (dx^2)^2 - (dx^3)^2$  лишь незначительно отличается от ковариантной формулы теории относительности  $ds^2 = g_{ik} dx^i dx^k$ . Поэтому компоненты метрического тензора  $g_{ik} \approx 0$  для  $i \neq k$ , а остальные величины  $g_{00} = c^2$  и  $g_{11} \approx g_{22} \approx$

$\approx g_{33} = g_{\alpha\alpha} = -1$  не зависят от времени  $\frac{\partial g_{ik}}{\partial x^0} = 0$ . Кроме того, можно приближённо определить компоненты обобщённой скорости частицы, положив  $\frac{dx^0}{ds} \approx 1$ ,  $\frac{dx^1}{ds} \approx \frac{dx^2}{ds} \approx \frac{dx^3}{ds} \approx 0$ . Таким образом, при наличии слабого гравитационного поля пространство имеет малую кривизну, и её метрика мало отличается от метрики Минковского.

Для слабого гравитационного поля в пустоте, где  $T_{ik} = 0$  обычно вводится тензор  $h_{ik}$ , описывающий слабое возмущение галилеевой метрики:

$$g_{ik} = g_{ik}^{(0)} + h_{ik}, \quad |h_{ik}| \ll 1. \quad (3)$$

В таком слабом гравитационном поле могут распространяться слабые гравитационные волны. Без конкретизации деталей далее мы рассмотрим только такие слабые гравитационные волны и их излучение, для которых поправки  $h_{ik}$  являются осциллирующими функциями координат и времени, в которых записана метрика  $h_{ik}$ . В этом случае говорят о слабых гравитационных волнах на плоском фоне.

Приближение слабых гравитационных волн на плоском фоне может быть реализовано, например, в Солнечной системе, в которой гравитационный мир можно считать плоским. Волны, приходящие на Землю из космоса, также являются слабыми, хотя приближение слабого поля вполне может оказаться непригодным вблизи источников этих волн.

Используя некоторые дополнительные условия, аналогичные условиям калибровки электромагнитного поля, можно доказать, что тензор Риччи для данного случая имеет вид [3]:

$$\mathfrak{R}_{ik} = -\frac{1}{2} g^{lm(0)} \frac{\partial^2 h_{ik}}{\partial x^l \partial x^m} = 0. \quad (4)$$

Уравнение (4) – это обычное волновое уравнение. Для его конкретизации рассмотрим плоскую гравитационную волну, в которой поле изменяется только вдоль одного направления  $x^1 = x$  в пространстве. Уравнение (4) для этого случая переписывается в виде:

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) h_{ik} = 0. \quad (5)$$

Решение уравнения (5) можно представить в виде:  $h_{ik} = h_{ik}(k) = h_{ik}^{(0)} e^{i(\omega t - kx)}$ ,  $\omega = ck$ . Таким образом,  $h_{ik} = h_{ik}^{(0)} e^{i\omega \left( t - \frac{x}{c} \right)}$ , то есть величины  $h_{ik} = f \left( t - \frac{x}{c} \right)$ . Уравнение

волнового фронта плоской гравитационной волны  $\omega t - kx = \text{const}$  совпадает с уравнением волнового фронта плоской электромагнитной волны. Поэтому точно её надо называть слабой плоской гравитационной волной на плоском фоне.

Анализ координатных условий, которые обращают уравнения Эйнштейна в уравнение (4), показывает, что плоская гравитационная волна определяется двумя величинами  $h_{23}$  и  $h_{22} = -h_{33}$ , то есть гравитационная волна является поперечной, и её поляризация определяется симметричным тензором второго ранга в плоскости  $yoz$ , перпендикулярной направлению распространения  $ox$ . Сумма диагональных элементов этого тензора равна нулю, то есть  $h_{22} + h_{33} = 0$ . В качестве двух независимых поляризаций можно выбрать ситуацию, когда отлична от нуля одна из двух величин  $h_{23}$  или  $(h_{22} - h_{33})/2$ . Угол между направлениями таких поляризаций в плоскости  $yoz$  равен  $\pi/4$ .

В следующем порядке теории возмущений, квадратичном по  $h_{ik}$ , можно по тензору энергии-импульса гравитационных волн определить плотность энергии  $\varepsilon$  и плотность потока импульса. При этом поток энергии в направлении оси  $ox$ , равный

$$c^3 t^{01} = \frac{c^5}{16\pi G} \left[ \dot{h}_{23}^2 + \frac{1}{4} (\dot{h}_{22} - \dot{h}_{33})^2 \right], \quad \text{вполне}$$

аналогичен вектору Пойнтинга в электродинамике и имеет размерность эрг/с. Поэтому чрезвычайно большая величина  $\Phi_0 = \frac{c^5}{G} = 3,6 \cdot 10^{59} \text{ эрг/с} \cong 2 \cdot 10^5 c^2 M_c (1/c)$  – является естественной единицей мощности в теории тяготения,  $M_c$  – масса Солнца.

Излучение гравитационных волн осуществляется движущимися телами. При наличии материи в уравнениях гравитационного поля в пустоте в правой части уравнения (5) появляются слагаемые, возникающие от тензора энергии-импульса, то есть уравнения становятся неоднородными. Их обычно записывают в виде:

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) \psi_i^k = -\frac{16\pi G}{c^4} \tau_i^k, \quad (6)$$

где  $\psi_i^k = h_i^k - \frac{1}{2} \delta_i^k h$ , а  $\tau_i^k$  обозначают выражения, появляющиеся при переходе в точных уравнениях тяготения к слабым полям.

Опуская все вычисления, связанные с излучением гравитационных волн, приводим только конечный результат для слабого гравитационного поля, в котором потеря энергии системой тел в единицу времени равна:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{G}{45c^5} \ddot{D}_{\alpha\beta}^2 = \frac{1}{45\Phi_0} \ddot{D}_{\alpha\beta}^2, \quad (7)$$

где  $D_{\alpha\beta} = \int \mu (3x^\alpha x^\beta - r^2 \delta_{\alpha\beta}) dV$  – тензор квадрупольного момента масс, полная масса системы тел равна  $m = \int \mu dV$ , а тензор квадрупольного момента связан с тензором моментов инерции  $J_{\alpha\beta}$  соотношением  $D_{\alpha\beta} = J_{\gamma\gamma} \delta_{\alpha\beta} - 3J_{\alpha\beta}$ , где  $\alpha, \beta, \gamma$  – декартовы координаты.

Из всего написанного следуют основные свойства гравитационных волн.

Из формулы (7) видно, что потеря гравитационной энергии системой масс определяется её квадрупольным моментом, которой изменяется со временем. Такая система всегда излучает гравитационные волны. Поэтому, в частности, гравитационные волны излучают любые два космических объекта, обращающиеся вокруг общего центра масс.

В пустом пространстве гравитационные волны распространяются со скоростью света, которая всегда сохраняется при встрече с различными объектами, так что гравитационные волны не претерпевают преломления. Так как гравитационное взаимодействие дальнедействующее, то оно распространяется в течение всего времени жизни Вселенной. В частности, Вселенная должна быть пронизана, наряду с микроволновым фоном, реликтовыми волнами тяготения, унаследованными от её инфляционной стадии.\*

Как было показано выше, гравитационные волны поперечны. Это означает, что такая волна искажает структуру пространства в плоскости, перпендикулярной вектору ее распространения – оно периодически растягивается и сжимается вдоль двух взаимно перпендикулярных направлений, лежащих в этой плоскости. Твердое тело, попавшее в область волнового гравитационного фронта, будет испытывать деформации именно в этой плоскости.

По результатам теоретических и экспериментальных исследований установлено, что источниками гравитационных волн могут быть объекты и космического, и земного происхождения. Наиболее мощными из них являются взрывы в квазарах и ядрах галактик, процессы слияния нейтронных звёзд и чёрных дыр в двойных системах и некоторые другие источники.

Из соотношения (7) следует, что интенсивность излучения гравитационных волн

\* Вопросы реликтового гравитационного излучения, его формирования и возможности регистрации здесь не рассматриваются, так как по величине оно ещё меньше гравитационных волн от массивных источников.

обратно пропорциональна величине  $\Phi_0$ , что свидетельствует о чрезвычайной малости эффекта. Но, тем не менее, гравитационные волны уносят энергию, которую они отбирают у излучающей материи, масса которой после излучения уменьшается. Этот эффект был обнаружен еще в начале 1990-х годов в излучении от двойных пульсаров – двух нейтронных звезд с массами около 1,5 массы Солнца каждая, одна из звезд наблюдалась как радиопульсар. Из-за излучения гравитационных волн компоненты таких двойных пульсаров приближаются друг к другу и сливаются.

Источниками гравитационных волн могут также быть двойные черные дыры. Они могут образоваться из очень массивных звезд, когда в результате гравитационного коллапса ядра звезды в конце ее эволюции образуется не нейтронная звезда, а черная дыра. Такие двойные черные дыры тоже могут оказаться на тесной орбите, за счет излучения гравитационных волн приближаться друг к другу, и, в конце концов, слиться. Так как амплитуда волны пропорциональна произведению масс объектов, то для более массивных объектов интенсивность гравитационного излучения выше.

Описанные события происходят достаточно редко. Но физики научились приблизительно рассчитывать вероятность таких событий и, соответственно, вероятность их обнаружения при заданной чувствительности земной антенны. Еще в 1992 году были получены оценки, что для надежной регистрации нескольких событий излучения гравитационных волн в год требуется чувствительность, которую гравитационные антенны достигли только сейчас. Допустим, что при данной чувствительности в среднем может наблюдаться одно событие в сто лет. Если увеличить чувствительность измерительной аппаратуры в десять раз, то в среднем станет возможным наблюдать 10 событий в год, то есть вероятность обнаружить что-то повышается в 1000 раз, так как при этом в 10 раз увеличиваем расстояние, на котором можно засечь событие, а, значит, в

1000 раз увеличиваем объем «прослушиваемого» пространства. Таким образом, короткое наблюдение с более чувствительной установкой дает больше данных, чем десятилетия других наблюдений.

Трудности прямого детектирования гравитационных волн связаны с малостью их амплитуды  $h \cong 10^{-21}$  см от реалистичных астрономических источников и ещё меньше от лабораторных источников. При амплитуде  $h$  гравитационная волна вызывает изменение расстояния  $l$  между двумя массами  $\Delta l = hl$ , что, например, на расстоянии  $l = 1$  км даёт смещение  $\Delta l = 10^{-16}$  см. Эту чрезвычайно малую величину ядерных масштабов трудно зарегистрировать. Однако с середины 20-го века предпринимаются непрерывные попытки экспериментальной регистрации гравитационных волн.

Первый эксперимент с резонансными детекторами был осуществлен Д. Вебером (США) в 1969 году. Его гравитационный детектор состоял из двух разнесенных на 1000 километров алюминиевых цилиндров длиной около 2-х метров, и массой около тонны, подвешенных на нитях в вакуумной камере. Пьезоэлектрические датчики фиксировали колебания цилиндров на частоте собственной моды примерно в 1660 Гц. Эти колебания первоначально были идентифицированы с действием космических гравитационных волн, возникающих в ядре Галактики. Но очень скоро результаты экспериментов Вебера были поставлены под сомнение, так как противоречили различным астрофизическим данным.

После этого было предложено довольно много методов обнаружения гравитационных волн и схем гравитационных детекторов: с использованием ротационных антенн – вращающихся «гантелей», сверхпроводящих магнитометров и других. Но наиболее перспективными оказались эксперименты с лазерами и спутниками.

Современный метод детектирования волн тяготения предполагает использование аналога интерферометра А. Майкельсона, с помощью которого более века на-

зад было доказано, что скорость света строго одинакова по всем направлениям. В 1962 году его предложили для регистрации гравитационных волн советские физики М.Е. Герценштейн и В.И. Пустовойт.

В 1968 году Р. Вайс начал практически реализовывать эксперимент с гравитационно-волновым интерферометром. В нём лазерный луч отражается от трех зеркал, установленных в форме буквы «Г» и формирует два луча. Интервал пиков и прова-

лов световых волн точно указывает длину колен интерферометра, то есть осей  $ox$  и  $oy$  (см. рис.). Когда длина плеч интерферометра постоянна, две волны гасят друг друга, и сигнал в детекторе получается нулевым. Но если через интерферометр проходит гравитационная волна, она растягивает длину одного плеча и сжимает длину другого. Это создает сигнал в детекторе, показывая колебания пространства-времени, создаваемого гравитационной волной.

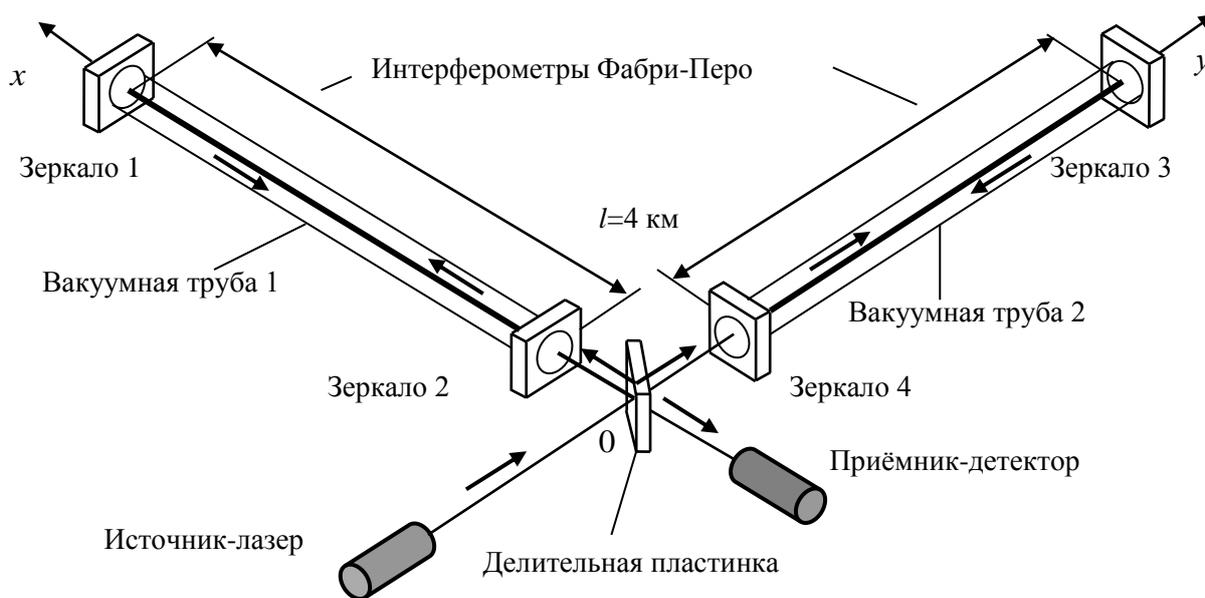


Схема интерферометра Майкельсона в эксперименте LIGO

Проект «LIGO (*Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*)» был предложен в 1980-е годы К. Торном, Р. Древером и упомянутым выше Р. Вайсом. В начале 1990-х они получили от Национального научного фонда США средства на финансирование проекта. Были составлены чертежи для строительства пары гигантских гравитационных детекторов Г-образной формы, что и было реализовано – один детектор LIGO находится в Ханфорде в штате Вашингтон, а другой – в Ливингстоне в штате Луизиана.

Наряду с указанными, в Токио реализован проект TAMA, в Ганновере в Германии построен интерферометр GEO 600, началась также реализация франко-итальянского проекта – интерферометра VIGRO в Италии под Пизой. Все эти на-

земные интерферометры позволяют регистрировать гравитационную волну амплитудой порядка  $h \cong 10^{-21}$  см в частотном диапазоне от 10 Гц до нескольких килогерц.

В установках LIGO параллельный луч света лазера попадает на полупрозрачную пластинку и разделяется на два взаимно перпендикулярных луча, которые отражаются от зеркал, расположенных на одинаковом расстоянии от пластинки. Гравитационная волна деформирует пространство и тем изменяет длину каждого плеча интерферометра, растягивая одно и сжимая другое. В результате интерференционная картинка изменяется, и это изменение регистрируется детектором (см. рис.).

Лазерные пучки находятся в вакууме, благодаря которому все элементы установки изолированы от постоянных колебаний

планеты. Чтобы еще больше застраховаться, ученые LIGO следят за своими детекторами во время их работы при помощи множества приборов, измеряя сейсмическую активность, атмосферное давление, молнии, появление космических лучей, вибрацию оборудования, звуки в районе лазерного луча и тому подобное. Затем они отфильтровывают данные от этих посторонних фоновых шумов.

Обработка сигналов интерферометра основана на том, что гравитационное излучение имеет характерный спектр Фурье, который определяется соответствующими моделями излучения этого спектра. В процессе регистрации происходит сравнение модельного сигнала с интерференционной картиной на детекторе. Как только обнаруживается совпадение, то можно утверждать, что модельный сигнал виден интерферометром. Таким образом, все время происходит коррелирование реального отклика детектора с модельным сигналом. Однако всегда существует вероятность того, что в детекторе шум случайно подстроился под сигнал по своим спектральным характеристикам. Поэтому эксперимент необходимо одновременно проводить на двух, а лучше на нескольких детекторах, разнесенных достаточно далеко. Если в таких детекторах наблюдается одинаковая форма сигнала, то это увеличивает вероятность того, что сигнал не случаен, а вызван действием гравитационной волны.

Детекторы LIGO проходили «обкатку» в период с 2002 по 2010 годы и не обнаружили каких-либо сигналов. Затем была проведена модернизация, длившаяся пять лет. Детекторы оснастили новыми зеркальными подвесками для шумоподавления и системой активной обратной связи для подавления посторонних колебаний в режиме реального времени. Модернизация дала усовершенствованной обсерватории более высокий уровень чувствительности по сравнению со старой LIGO. Усовершенствованные детекторы стали называться «advanced LIGO» – aLIGO.

Первая гравитационная волна была зарегистрирована детекторами модернизированной

ванной LIGO – сначала в Ливингстоне, а позже в Ханфорде – во время имитационного прогона рано утром 14 сентября 2015 года, за два дня до официального начала сбора данных. Это открытие сделали члены международной коллаборации LIGO, объединяющей более тысячи ученых из пятнадцати стран.

События были интерпретированы как всплеск гравитационного излучения, рожденный слиянием двух черных дыр массами в 29 и 36 масс Солнца, удаленных от Земли на расстояние около 1,3 миллиарда световых лет. В результате этого катаклизма образовалась быстро вращающаяся черная дыра в 62 солнечных массы. Энергетический эквивалент трех солнечных масс унесло гравитационное излучение. Его начальная частота равнялась 35 Гц, а максимальная – 250 Гц. Разница во времени между приходом сигнала на детекторы в Ливингстоне и Ханфорде составила 7 миллисекунд. Примерно такое время получается от деления расстояния между детекторами на скорость света распространения гравитационные волны.

Участники коллаборации LIGO получили и другие важные результаты. Они заново оценили комптоновскую длину волны гравитона, кванта гравитационного поля, она превышает  $10^{13}$  км, то есть верхняя граница массы гравитона составляет  $1,2 \cdot 10^{-22}$  эВ. Этот результат уточняет аналогичные оценки, сделанные на основе изучения двойных пульсаров. Кроме того, факт регистрации доказал существование черных дыр с массами больше 25 солнечных масс. Подсчитано, что за год в области пространства объемом в один кубический гигапарсек происходит от двух до четырехсот слияний черных дыр.

11 февраля 2016 года на пресс-конференциях в США и Европе было одновременно объявлено о крупнейшем научном достижении – первой прямой регистрации волн тяготения.

Чтобы гравитационные волны стали реальностью, необходимо еще сделать различные вещи. Во-первых, повторить полученные результаты, так как источников

гравитационных волн во Вселенной много, а их экспериментальное наблюдение пока одно. Во-вторых, попытаться исследовать какие-либо сопутствующие процессы излучения в других диапазонах шкалы электромагнитных волн, так как некоторые теоретические модели предполагают наличие таких излучений. Наконец, необходимо повышать чувствительность измерительной аппаратуры, что планируется в дальнейшем, так что на полную проектную мощность детекторы aLIGO выйдут к 2018 – 2019 годам.

Во второй половине 2016-го года предполагается запуск модифицированной версии детектора VIRGO, который действовал с 2007 по 2011 годы, после чего был остановлен для модернизации. В 2018 году в Японии может приступить к работе интерферометр KAGRA (Kamioka Gravitational Wave Detector) для регистрации гравитационных волн, возникающих при слиянии нейтронных звезд. Предполагается также создание еще одного детектора проекта LIGO в Индии.

Наконец, ещё одним направлением исследования гравитационных волн является строительство космических интерферометров с большой базой в миллионы километров. Базирующийся в космосе интерферометр сможет изучать гораздо более крупные космические объекты, в том числе огромные черные дыры с массой в миллионы раз больше Солнца, а также существенно повысит вероятность обнаружения этих объектов. Но возможно, что орбитальная станция сможет фиксировать и менее масштабные события на различных стадиях их развития.

Европейское космическое агентство рассматривает проект космической обсерватории для поиска гравитационных волн eLISA (Evolved Laser Interferometer Space Antenna). Интерферометр eLISA будет состоять из трех аппаратов, которые составят равносторонний треугольник с плечом длиной в миллион километров – в 250000 раз больше aLIGO. Это существенно повысит чувствительность интерферометра и его разрешающую способность и позволит регистрировать низкочастотные гравитационным волнам в диапазоне от  $10^{-4}$  до  $10^{-1}$  Гц, то есть гораздо меньших частот, чем aLIGO. Таким образом, период наблюдаемых eLISA волн будет составлять около сотни секунд. Такие сигналы могут быть порождены бинарными звездными системами в нашей Галактике, а также слияниями сверхмассивных черных дыр в других звездных системах. Однако запуск обсерватории может состояться не ранее середины 2030-х годов.

Для отработки деталей этого проекта 3 декабря 2015 года был запущен спутник LISA Pathfinder. Проект LISA Pathfinder, ранее известный как SMART-2 (Small Missions for Advanced Research in Technology-2) – тестовый спутник, на котором будут отрабатываться технические решения, необходимые для реализации полномасштабного эксперимента eLISA.

Таким образом, уже ближайшее будущее покажет, что же такое гравитационные волны – чисто теоретические решения системы уравнений общей теории относительности или реализующиеся во Вселенной процессы.

### УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

В разделе «Летопись» можно опубликовать воспоминания, рассказ, информацию об ученых, преподавателях, представителях промышленности, бизнеса, работающих в области электротехнологии.

## К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

Приглашаем к сотрудничеству ученых, преподавателей, сотрудников научных коллективов кафедр и лабораторий вузов, научно-исследовательских институтов, аспирантов, студентов, руководителей промышленных предприятий, разработчиков новой продукции, инвесторов, представителей органов власти.

По вопросам публикации статей в научно-техническом журнале «Вопросы электротехнологии» обращаться по телефонам:

8 (8452) 99-87-63 — Архангельский Юрий Сергеевич (главный редактор),

8 (937) 224-08-05 — Вырыханов Денис Александрович (ответственный секретарь).

Просьба направлять публикации по адресу:

Россия, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, ком. 1/133а, гл. редактору журнала «Вопросы электротехнологии» Архангельскому Ю.С. и по электронной почте [eltech@sstu.ru](mailto:eltech@sstu.ru).

### Требования к оформлению публикаций

Печатный вариант публикации предоставляется объемом до 10 стр. формата А4; поля: сверху и снизу по 25 мм, справа и слева по 20 мм, через одинарный интервал, шрифт Times New Roman 12, абзацный отступ 0,63 см, формат файла \*.doc, редактор Microsoft Word 2003.

Иллюстрации (рисунки, графики) выполняются в формате .jpg, располагаются в тексте статьи и должны иметь номер и подпись. Рисунки и фотографии должны иметь контрастное изображение.

Таблицы располагаются непосредственно в тексте статьи. Каждая таблица должна иметь номер и заголовок.

Формулы и буквенные обозначения величин должны быть набраны в редакторе формул **Microsoft Equation 3.0**.

Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ). Не следует употреблять сокращенных слов, кроме общепринятых (т.е., и т.д., и т.п.). Допускается введение предварительно расшифрованных сокращений.

**ОБЯЗАТЕЛЬНО** наличие индекса УДК и списка использованных источников, оформленного по ГОСТ 7.1-2003 и включающего: фамилию и инициалы автора, название статьи, название журнала, том, год, номер или выпуск, страницы, а для книг – фамилии и инициалы авторов, точное название книги, место издания (город), издательство, год издания, количество страниц.

Также предоставляется информация об авторах (**ФИО полностью, почетные звания, ученая степень, ученое звание, должность, место работы, телефон, e-mail**), название статьи, аннотация и ключевые слова. Данная информация дублируется на **английском языке**.

Специалисты в технических и естественнонаучных отраслях к публикации **ОБЯЗАТЕЛЬНО** прилагают экспертное заключение.

Публикации принимаются в течение всего года.

Публикации, не отвечающие перечисленным требованиям, к рассмотрению не принимаются. Рукописи и электронные носители авторам не возвращаются.

Редакция оставляет за собой право производить редакционные изменения, не искажающие основное содержание статьи.

За дополнительной информацией обращайтесь на сайт журнала «Вопросы электротехнологии» [www.sstu.ru/nauka/nauchnye-izdaniya/voprosy-elektrotekhnologii](http://www.sstu.ru/nauka/nauchnye-izdaniya/voprosy-elektrotekhnologii)

Редактор Л.А. Скворцова  
Компьютерная верстка – В.И. Ермолаев  
Перевод на английский язык – А.Х. Аскарова

---

Почтовый адрес: 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77  
Телефон: (8452) 99-87-63  
E-mail: eltech@sstu.ru

---

Подписано в печать \_\_.\_\_.2016  
Формат 60×84 1/8 Бум. офсет.  
Усл. печ. л. 11,5 Уч. изд. л. 5,1  
Тираж 500 экз. Заказ 121 Цена свободная  
Отпечатано в Издательстве СГТУ, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77.  
E-mail: izdat@sstu.ru  
Полная электронная версия журнала размещена в системе РИНЦ  
в открытом доступе на платформе eLIBRARY.RU  
**Подписной индекс 70841** (каталог «Газеты. Журналы» на 1-е полугодие 2016 г.)  
Свидетельство о регистрации СМИ *ПИ № ФС77-54621 от 01.07.2013*

---

Editor L.A. Skvortsova  
Computer-assisted layout by V.I. Ermolaev  
Translation into English by A.H. Askarova

---

Address: 77 Politekhnikeskaya Str., 410054, Saratov, Russia  
Tel.: (8452) 99-87-63  
E-mail: eltech@sstu.ru

---

Print date: \_\_.\_\_.2016  
Paper size: 60×84 1/8 Offset-Print  
Conventional printed sheet 11,5 Publication base sheet 5,1  
Circulation: 500 printed copies Order 121 Subscription and individual copies: open rates  
Published by SSTU Publishing, 410054 Saratov, 77 Politekhnikeskaya Str.  
Online at [www.eLIBRARY.RU](http://www.eLIBRARY.RU)  
The certificate of media source registration: *PI No. FS77-54621 dated 1 July 2013*

## Донбасский государственный технический университет



В октябре 1957 г., в период послевоенного промышленного развития Донбасса, в г. Ворошиловск Луганской области (ныне г. Алчевск) был образован горно-металлургический институт.

У истоков создания и становления университета стояли директор Ворошиловского металлургического завода, депутат ВР Украины П.А. Гмыря и первые руководители института И.Ф. Коваль (1957-1959 гг.), Ю.М. Воеводин (1959-1980 гг.).

В 1964 году в связи с переименованием города ВУЗ был переименован в Коммунарский горно-металлургический институт, а в 1992 г. – в Донбасский горно-металлургический институт (ДГМИ). В 2004 г. на базе ДГМИ был создан Донбасский государственный технический университет (ДонГТУ).

В состав ДонГТУ входят горный, строительный, металлургического и машиностроительного производства, экономики и финансов, механики, менеджмента, автоматизации и электротехнических систем факультеты, факультет по работе с иностранными студентами, институт повышения квалификации, переподготовки и усовершенствования руководящих работников и специалистов, индустриальный и горный техникум, колледж, научная библиотека. ДонГТУ одним из первых вузов Украины внедрил в практику учебного процесса требование Болонской декларации.

За более чем полувековую историю своего существования Донбасский государственный технический университет стал одним из центров науки, образования и культуры индустриального Донбасса. На всем пространстве СНГ и в странах дальнего зарубежья работают свыше 70 тысяч его выпускников.

В настоящее время ДонГТУ – развитая материально-техническая и научная база, в которую входят Алчевский филиал Института физики горных процессов НАН Украины и Министерства образования и науки, научный центр мониторинга окружающей природной среды, Донбасское отделение Восточно украинского филиала Института археологии НАН Украины, Государственный межвузовский центр лазерно-локационных наблюдений за искусственными спутниками Земли «Орион», где на базе уникального научного комплекса проводятся исследования по астрономии, геофизике, спутниковой геодезии, космической навигации, квантовой электронике, радиофизике; научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт «Параметр», в структуру которого входит отдел электрогидромеханики и 6 научных лабораторий (электротехнологических и электромеханических систем, гидродинамики, технических средств охраны окружающей среды, прикладной химии, электрохимии, преобразовательной и контактной электротехники), где значительная часть работ направлена на развитие теории и создание оборудования для преобразования электрической энергии. Выполняются работы в области индукционного нагрева металлов. Разработаны мощные тирсторные установки индукционного нагрева под штамповку, для поверхностного нагрева под закалку, напайку твердосплавного инструмента и для других спецтехнологий. Ведутся работы по созданию высокочастотных транзисторных установок индукционного нагрева.

В перспективе ДонГТУ – поиск новых направлений науки, постоянное совершенствование учебного процесса путем внедрения новейших образовательных технологий, расширение международных связей.