

*Издается с ноября 2013 года  
Выходит один раз в квартал*

**№ 3 (24)**

**Сентябрь 2019**

# **ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ**

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ**

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

Журнал включён в перечень ведущих рецензируемых научных журналов,  
рекомендованных для публикаций Высшей аттестационной комиссией

**Главный редактор  
Зам. главного редактора  
Ответственный секретарь**

**АРХАНГЕЛЬСКИЙ ЮРИЙ СЕРГЕЕВИЧ  
БЕКРЕНЕВ НИКОЛАЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ  
ЮДИНА ВИОЛЕТТА ОЛЕГОВНА**

## **Редакционная коллегия**

|                           |                                                                                |
|---------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| <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>Ю.В. ГУЛЯЕВ</b>        | д.ф.-м.н., профессор, академик РАН, ИРЭ имени В.А. Котельникова<br>РАН, Москва |
| <b>В.Б. ДЕМИДОВИЧ</b>     | д.т.н., профессор, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург                             |
| <b>Л.С. ЗИМИН</b>         | д.т.н., профессор, СамГТУ, Самара                                              |
| <b>С.Г. КАЛГАНОВА</b>     | д.т.н., доцент, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов                              |
| <b>В.А. КОЛОМЕЙЦЕВ</b>    | д.т.н., профессор, НПЦ «Алмаз-Фазотрон», 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, ТвГТУ, Тверь                                                |
| <b>Г.А. МОРОЗОВ</b>       | д.т.н., профессор, КНИТУ-КАИ имени А.Н. Туполева, Казань                       |
| <b>Ю.П. ПЕРЕЛЫГИН</b>     | д.т.н., профессор, ПГУ, Пенза                                                  |
| <b>А.Ф. РЕЗЧИКОВ</b>      | д.т.н., профессор, член-корреспондент РАН, ИПТМУ РАН, Саратов                  |
| <b>И.В. РОДИОНОВ</b>      | д.т.н., доцент, 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>Ю.Б. ТОМАШЕВСКИЙ</b>   | д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов                           |
| <b>Г.Г. УГАРОВ</b>        | д.т.н., профессор, КТИ, Камышин                                                |
| <b>В.Н. ХМЕЛЕВ</b>        | д.т.н., профессор, БТИ, Бийск                                                  |
| <b>В.А. ЦАРЕВ</b>         | д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов                           |
| <b>В.О. ЮДИНА</b>         | ассистент, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов                                   |

Since November 2013  
Published Quarterly

№ 3 (24)

Сентябрь 2019

# JOURNAL OF ELECTROTECHNICS

**Scientific and Technical Publication**

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

**Editor-in-Chief:**  
**Assistant to the Editor-in-Chief:**  
**Chief Executive Officer**

**ARKHANGELSKY YURI SERGEEVICH**  
**BEKRENEV NIKOLAY VALERYEVICH**  
**YUDINA VIOLETTA OLEGOVNA**

## **Editorial Board Members**

**Yu. S. ARKHANGELSKY**  
**N.V. BEKRENEV**  
**Yu.V. GULYAEV**

Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov  
Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov  
Dr.Sc., Professor, Academician of RAS, Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Moscow

**V.B. DEMIDOVICH**

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

**L.S.ZIMIN**

Dr.Sc., Professor, Samara State Technical University, Samara

**S.G. KALGANOVA**

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

**V.A. KOLOMEITSEV**

Dr.Sc., Professor, JSC Scientific-Production Center «Almaz-Phazotron», Saratov

**V.N. LYASNIKOV**

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

**A.N. MAKAROV**

Dr.Sc., Professor, Tver State Technical University, Tver

**G.A. MOROZOV**

Dr.Sc., Professor, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan

**Yu.P. PERELIGIN**

Dr.Sc., Professor, Penza State University, Penza

**A.F. REZCHIKOV**

Dr.Sc., Professor, Corresponding Member of RAS, Institute of Precision Mechanics and Control of RAS, Saratov

**I.V. RODIONOV**

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

**V.P. RUBTSOV**

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

**F.N. SARAPULOV**

Dr.Sc., Professor, Ural Federal University, Ekaterinburg

**Yu.B. TOMASHEVSKY**

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

**S.V. TRIGORLY**

PhD, Associate Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov

**G.G. UGAROV**

Dr.Sc., Professor, Kamishin

**V.N. KHMELEV**

Dr.Sc., Professor, Biysk Technological Institute, Biysk

**V.A. TSAREV**

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

**V.O.YUDINA**

Assistant, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                     |          |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| <b>Приглашение на 5-ю Международную конференцию по актуальным проблемам электротехнологии .....</b> | <b>5</b> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|

### **ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ**

|                                                                                                                                                                           |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Юдина В.О., Захаров В.В., Тригор-<br/>лый С.В., Архангельский Ю.С.</b> СВЧ<br>термообработка диэлектриков с боль-<br>шими поверхностями в методическом<br>режиме ..... | <b>6</b>  |
| <b>Райгородский В.М.</b> Оптимизация<br>процесса электролитического травле-<br>ния стальных изделий.....                                                                  | <b>14</b> |

### **ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА**

|                                                                                                                       |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Николаев Е.В., Полякова М.А.</b><br>Перспективы увеличения ресурса<br>изоляции тяговых электро-<br>двигателей..... | <b>23</b> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|

### **ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ**

|                                                                                                                                                                                                              |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Кошелев П.А., Парамонов С.В.</b><br>Применение символьных математи-<br>ческих методов и программ в иссле-<br>довании импульсных transforma-<br>торов.....                                                 | <b>28</b> |
| <b>Артюхов И.И., Земцов А.И., Бори-<br/>сенко А.И.</b> Переходные процессы<br>в системе электропитания магнетрона<br>с комбинированной магнитной систе-<br>мой при колебаниях сетевого напря-<br>жения ..... | <b>39</b> |
| <b>Сенчило Н.Д.</b> Использование рас-<br>пределенной генерации на предпри-<br>ятиях угледобычи при неравномерном<br>графике нагрузки системы.....                                                           | <b>48</b> |
| <b>Сидоров А.И., Таваров С.Ш., Мад-<br/>жидов Г.Х.</b> Показатели надежности<br>элементов распределительной сети<br>6-10 кВ.....                                                                             | <b>55</b> |

### **ЭЛЕКТРОНИКА**

|                                                                                                                                             |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Калмыков С.А.</b> Виды фиксации за-<br>медляющих систем в лампах бегущей<br>волны .....                                                  | <b>61</b> |
| <b>Кириченко Д.И., Роговин В.И.</b> Ре-<br>зультаты разработки мощной широко-<br>полосной спиральной ЛБВ миллимет-<br>рового диапазона..... | <b>68</b> |

### **ЭЛЕКТРОДИНАМИКА**

|                                                                                                                              |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Скворцов А.А.</b> Об оценке коэффициен-<br>та затухания в металлических стенках<br>коаксиально-секторного волновода ..... | <b>74</b> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|

### **МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

|                                                                                                                                                                                                                            |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Злобина И.В., Луков Д.Ю.</b> Исследо-<br>вание влияния обработки отвержден-<br>ных углепластиков со встроенным<br>молниезащитным покрытием в СВЧ<br>электромагнитном поле на их электри-<br>ческие характеристики ..... | <b>78</b> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|

### **ИЗМЕРЕНИЯ**

|                                                                                                                                                   |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Антонов И.Н., Пименов А.Н., Пиме-<br/>нова О.Н.</b> Цифровой измеритель<br>мощности в диапазоне СВЧ на аппа-<br>ратной платформе ARDUINO ..... | <b>85</b> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|

### **ЛЕТОПИСЬ**

|                                                                                                                                                                                                             |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Архангельский Ю.С.</b> К двадцатипяти-<br>летию книги В.Г. Кинелева «Объектив-<br>ная необходимость. История, проблемы<br>и перспективы реформирования высше-<br>го образования России». Окончание ..... | <b>89</b> |
| <b>Архангельский Ю.С.</b> Мифы и легенды<br>Саратовского автодорожного институ-<br>та – Саратовского политехнического<br>института – Саратовского государ-<br>ственного технического университета .....     | <b>97</b> |
| К сведению авторов .....                                                                                                                                                                                    | <b>99</b> |

## CONTENTS

|                                                                                                          |          |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| <b>Invitation to the 5th International conference on current problems of electrical engineering.....</b> | <b>5</b> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|

### **ELECTROTHERMY**

|                                                                                                                                                                                 |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Yudina V.O., Zakharov V.V., Trigorly S.V., Arkhangelsky Yu.S.</b> A microwave device for heat treatment of dielectrics with large surface areas at the continuous mode ..... | <b>6</b>  |
| <b>Raigorodsky V.M.</b> Optimization of electrolytic etching of steelworks.....                                                                                                 | <b>14</b> |

### **ELECTROMECHANICS**

|                                                                                                                |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Nikolaev E.V., Polyakova M.A.</b> Prospects for increasing the lifetime of traction motors insulation ..... | <b>23</b> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|

### **ELECTRIC POWER SUPPLY**

|                                                                                                                                                                                  |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Koshelev P.A., Paramonov S.V.</b> Application of symbolic mathematical methods and programs in the study of pulse converters .....                                            | <b>28</b> |
| <b>Artyukhov I.I., Zemtsov A.I., Borisenko A.I.</b> Transition processes in the magnetron power supply system with a combined magnetic system at line voltage fluctuations ..... | <b>39</b> |
| <b>Senchilo N.D.</b> Using distributed generation at coal mining enterprises under uneven load curve of the system .....                                                         | <b>48</b> |
| <b>Sidorov A.I., Tavarov S.Sh., Majidov G.H.</b> Reliability indexes of components of the distribution network 6-10 kV .....                                                     | <b>55</b> |

### **ELECTRONICS**

|                                                                                        |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Kalmykov S.A.</b> Types of fixing slow-wave structures in traveling wave tubes .... | <b>61</b> |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|

|                                                                                                                                 |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Kirichenko D.I., Rogovin V.I.</b> Outcome of the development of a powerful wide-band spiral TWT of the millimeter range..... | <b>68</b> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|

### **ELECTRODYNAMICS**

|                                                                                                                         |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Skvortsov A. A.</b> On estimation of attenuation coefficient in the metal walls of the coaxial-sector waveguide..... | <b>74</b> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|

### **MATERIALS SCIENCE**

|                                                                                                                                                                                                                                |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Zlobina I.V., Lukov D.Yu.</b> Effect of the treatment of carbon fiber reinforced plastics with an internal lightning-proof coating research in the microwave electromagnetic field on their electrical specifications ..... | <b>78</b> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|

### **MEASUREMENTS**

|                                                                                                                                    |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Antonov I.N., Pimenov A.N., Pimenova O.N.</b> Digital power meter in the microwave range on the ARDUINO hardware platform ..... | <b>85</b> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|

### **CHRONICLE**

|                                                                                                                                                                                               |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Arkhangelsky Yu.S.</b> 25 years since publication of the work by V. Kinel'ev «Objective Necessity. History, Problems, and Prospects for Russia's Higher Education Reform». Continued ..... | <b>89</b> |
| <b>Arkhangelsky Yu.S.</b> Myths and legends of Saratov Road-Transport Institute – Saratov Polytechnic Institute – Saratov State Technical University .....                                    | <b>97</b> |

|                                      |           |
|--------------------------------------|-----------|
| <b>Information for Authors .....</b> | <b>99</b> |
|--------------------------------------|-----------|

**Приглашаем на 5-ю международную конференцию  
по актуальным проблемам электротехнологий!**

Данная международная конференция станет пятой в серии конференций по актуальным проблемам электротехнологий (АПЭТ), берущих свое начало в 2006 году. С тех пор, это событие проводится каждые 3 года. Мы рады видеть всех, кто работает над проблемами электротехнологий и связанными областями науки. Главная цель конференции — установить новые взаимодействия между учеными в данной области, а также привлечь промышленность к обсуждению данных вопросов. Мы будем рады видеть ученых, аспирантов и студентов.

**Информация для участия**

Избранные статьи будут опубликованы в журнале **“Вопросы электротехнологий”**. Всем остальным авторам будет предложена публикация в сборнике **«IOP Conference Series»** после их очного представления.

Для регистрации на конференции пройдите по ссылке [apet2020.ru/registration-fees](http://apet2020.ru/registration-fees) и загрузите аннотацию, название, имена авторов вашего доклада и дополнительной информации.

**IOP Publishing****Основные темы**

На конференции будут обсуждаться вопросы, связанные с данными и близкими темами:

- **Нагрев и плавка**
- **Прикладная магнитогидродинамика**
- **Управление и оптимизация**
- **Специальные электротехнологические установки**
- **Электромеханика**

**Место проведения конференции**

Екатеринбург — один из крупнейших городов Российской Федерации. Это административная столица Свердловской области и Уральского федерального округа. В настоящее время город является важным центром промышленности, транспорта, финансов, науки и культуры.

**Организатор**

Кафедра электротехники и электротехнологических систем уральского энергетического института Уральского Федерального университета;

Уральский федеральный университет постоянно работает над созданием своей глобальной репутации и в настоящее время входит в число лучших университетов мира - 364-ое место согласно QS World University Ranking 2019.

**Оплата участия:**

15 000 руб. (обычное участие),  
10 000 руб. (для студентов/аспирантов).

Больше информации: <http://apet2020.ru>



# ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ

УДК 621. 365. 5

## СВЧ ТЕРМООБРАБОТКА ДИЭЛЕКТРИКОВ С БОЛЬШИМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ В МЕТОДИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

**В.О. Юдина, В.В. Захаров, С.В. Тригорлый, Ю.С. Архангельский**

### A MICROWAVE DEVICE FOR HEAT TREATMENT OF DIELECTRICS WITH LARGE SURFACE AREAS AT THE CONTINUOUS MODE

**V.O. Yudina, V.V. Zakharov, S.V. Trigorly, Yu.S. Arkhangelsky**

*Рассмотрены конструкция, транспортная система и математическое моделирование СВЧ термообработки диэлектриков с большими поверхностями в методическом режиме.*

*Ключевые слова: методическая и периодическая СВЧ электротермические установки, методический режим, СВЧ термообработка, конструкция, транспортная система, математическое моделирование технологического процесса*

СВЧ электротермические установки, работающие в методическом режиме (методические СВЧ ЭТУ), при прочих равных условиях отличаются от СВЧ электротермических установок, работающих в периодическом режиме (периодические СВЧ ЭТУ), большей производительностью из-за экономии времени на периодические включения и выключения генератора при загрузке и выгрузке обрабатываемого диэлектрика. Правда, из-за наличия в методических СВЧ ЭТУ транспортных систем с электроприводом эти установки конструктивно сложнее, чем периодические СВЧ ЭТУ, и дороже. Целесообразность применения и экономическая эффективность методических СВЧ ЭТУ определяется с помощью технико-экономических расчетов [1-3].

*The article considers the design, transport system, and mathematical modeling of microwave devices for heat treatment of dielectrics with large surface areas at the continuous mode.*

*Keywords: continuous and intermittent microwave electrothermal plants, continuous mode, microwave heat treatment, design, transport system, mathematical modeling of the technological process*

СВЧ ЭТУ строится на базе камеры со стоячей волной (КСВ), камеры с бегущей волной (КБВ) или камеры лучевого типа (КЛТ). Каждая из этих камер имеет свои достоинства и недостатки [4-8], но методические СВЧ ЭТУ на КСВ не строятся, так как входной и выходной шлюзы транспортной системы существенно понижают добротность резонатора КСВ, отчего термообработка в СВЧ ЭТУ с КСВ становится не эффективной.

Если речь идет о термообработке диэлектрика с большой поверхностью, то СВЧ ЭТУ следует строить на КЛТ с неограниченным объемом, используя прямоугольный излучающий рупор (рупоры), и в этом случае у методической СВЧ ЭТУ конкурента нет. Действительно, если, например, проводить термообработку в пе-

риодическом режиме, то для равномерности нагрева на наиболее распространённой в СВЧ электротермии частоте 2450 МГц, то над поверхностью обрабатываемого диэлектрика всего в  $1 \text{ м}^2$  надо разместить не менее 50 рупорных прямоугольных излучателей. Каждый из них должен иметь волновод связи с источником СВЧ энергии. Разумеется, используя волноводные тройники, можно распределить СВЧ энергию, генерируемую СВЧ генератором, поровну между двумя или четырьмя рупорными излучателями, так что в периодической СВЧ ЭТУ для термообработки всего лишь  $1 \text{ м}^2$  требуется в нашем примере 50 рупорных излучателей, 50 или 25 генераторов (источников СВЧ энергии), 32 или 48 волноводных тройников.

В меандровой СВЧ ЭТУ можно нагреть диэлектрик с любой большой поверхностью с помощью одного, двух или четырех рупорных излучателей при наличии одного или двух источников энергии, но для этого необходимо обеспечить перемещение этих рупоров и источников СВЧ энергии над поверхностью обрабатываемого диэлектрика с помощью транспортной системы, снабженной электроприводом. Этим такие методические СВЧ ЭТУ принципиально отличаются от методических СВЧ ЭТУ, в которых транспортные системы обеспечивают перемещение обрабатываемого диэлектрика внутри неподвижной рабочей камеры [9-19].

Только такие методические СВЧ ЭТУ могут быть использованы для СВЧ термообработки, например, грунта, автомобильных дорог, крупногабаритных строительных конструкций и т.п. Системных работ в этой области пока что нет, а эти вопросы представляют научный и практический интерес. Рассмотрим вопросы возможной компоновки таких методических СВЧ ЭТУ, электропривода в их транспортных системах и математического моделирования реализуемых в этих установках технологических процессов.

Компоновки и траектории движения излучающих рупоров над поверхностью об-

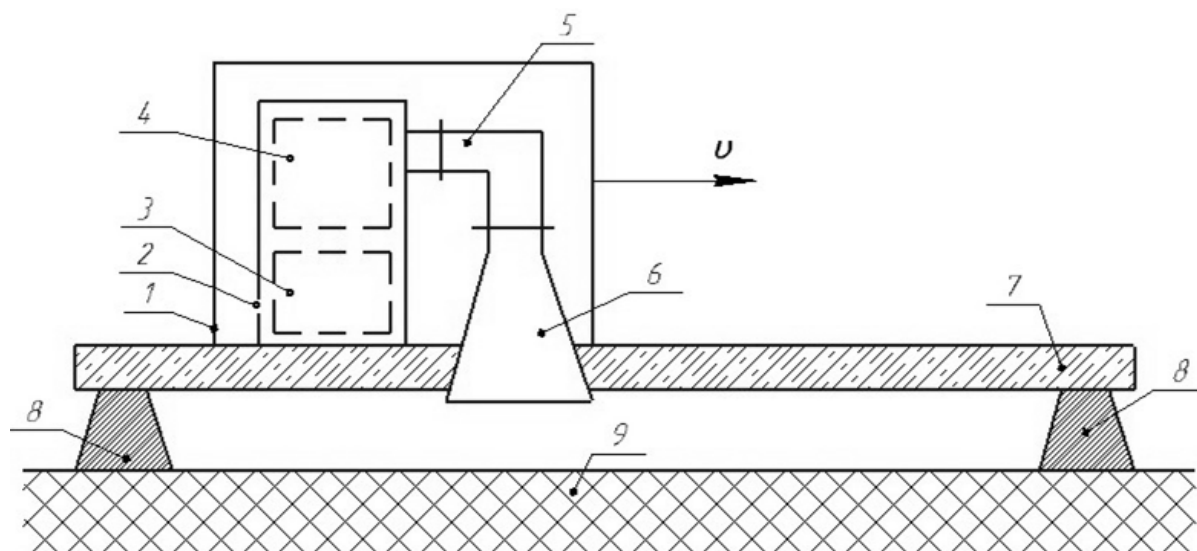
рабатываемого диэлектрика показаны на рис. 1 и 2. Если источник (источники) СВЧ энергии включается, когда рупорный излучатель (излучатели) находится над поверхностью обрабатываемого диэлектрика (рис. 2 а-в), то края обрабатываемой поверхности будут обработаны неравномерно, и эти участки можно назвать браком. Его можно избежать, если в момент включения источника (источников) СВЧ энергии рупорный излучатель (излучатели) находится за краем поверхности обрабатываемого диэлектрика (рис. 2 г). Но в этом случае под излучателем должен быть диэлектрик с  $\text{tg } \delta \neq 0$ .

В обоих случаях, когда рупорный излучатель (излучатели) находится над поверхностью обрабатываемого диэлектрика (рис. 2 а-в) или когда рупорный излучатель (излучатели) находится за краем поверхности обрабатываемого диэлектрика (рис. 2 г), источник СВЧ энергии с рупорными излучателями будет передвигаться вдоль обрабатываемого диэлектрика.

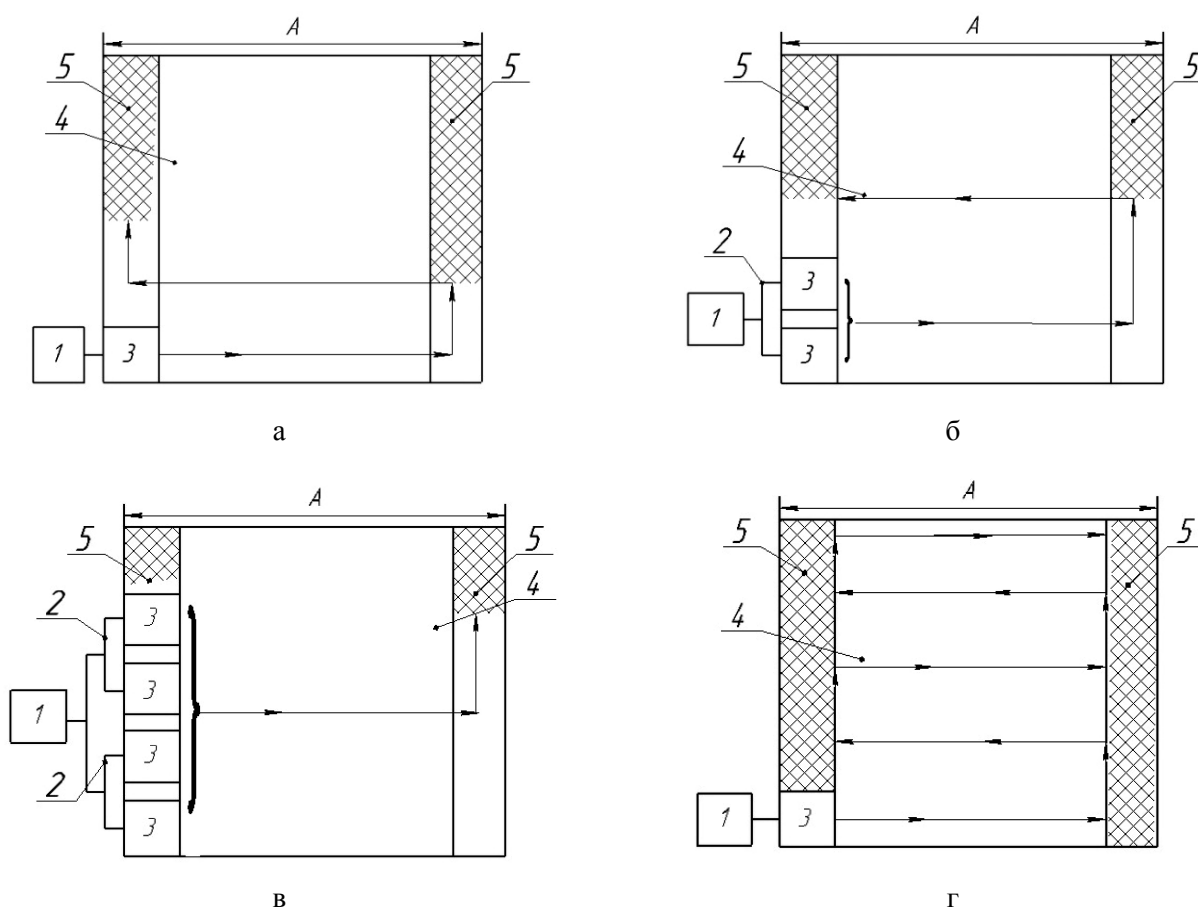
Основу конструкции для перемещения источника СВЧ энергии с рупорными излучателями (рис. 3) составляет мост 1, представляющий собой две параллельные балки с выключателями на концах для ограничения горизонтального хода. По этому мосту источники СВЧ энергии с рупорными излучателями будут перемещаться со скоростью  $v_1$  как влево, так и вправо.

Мост 1 присоединен к опоре, производящей движение по рельсовому пути 3 на ходовых колесах 5 вдоль обрабатываемого диэлектрика со скоростью  $v_2$  вперед и назад.

Электрический привод состоит из электродвигателя, редуктора и ходовой части. Механизм передвижения источника СВЧ энергии с рупорными излучателями может иметь два исполнения – с центральным приводом или отдельным (один привод будет перемещать установку по траектории  $v_1$ , а другой – по траектории  $v_2$ ). Для большей простоты конструкции предлагается использовать мотор-редуктор.

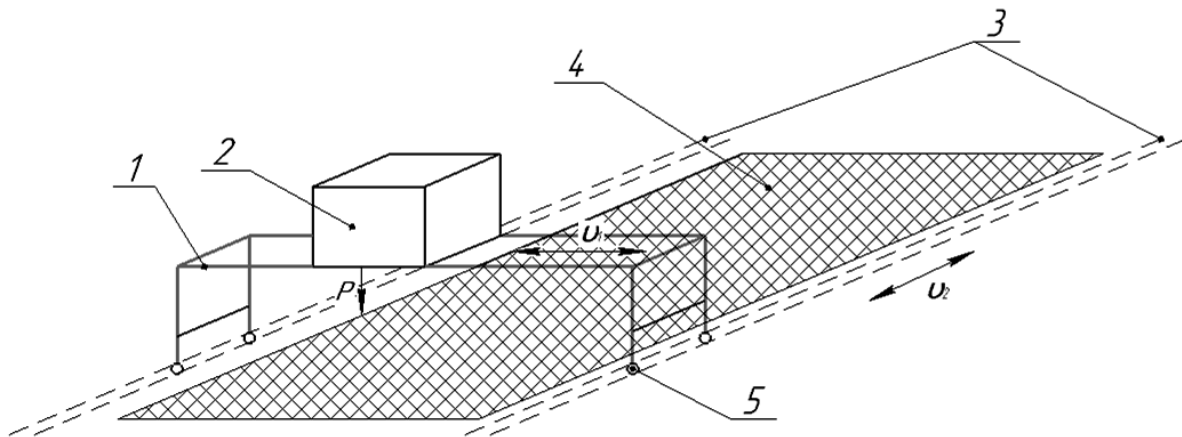


**Рис. 1.** Компоновка методической СВЧ электротермической установки для термообработки диэлектрика с большой поверхностью: 1 – корпус; 2 – источник СВЧ энергии; 3 – источник питания; 4 – СВЧ генератор; 5 – линия связи; 6 – рупорный излучатель; 7 – транспортный канал; 8 – опора; 9 – обрабатываемый диэлектрик



**Рис. 2.** Компоновка и траектория движения методической СВЧ электротермической установки: *а, г* – с одним рупорным излучателем и одним источником СВЧ энергии; *б* – с двумя излучающими рупорами, волноводным тройником и одним источником СВЧ энергии; *в* – с четырьмя излучающими рупорами; двумя волноводными тройниками и одним источником СВЧ энергии





**Рис. 3.** Структурная схема методической СВЧ электротермической установки для термообработки диэлектрика с большой поверхностью: 1 – мост; 2 – источник СВЧ энергии с рупорными излучателями; 3 – рельсовый путь; 4 – обрабатываемый диэлектрик; 5 – ходовые колеса

Помимо этого электрический привод укомплектован различными выключателями, пускотормозными резисторами, тиристорными регуляторами, тормозными электромагнитами. Эти электрические аппараты позволяют управлять движением установки с пульта.

Что касается математического моделирования технологического процесса, реализуемого СВЧ электротермической установкой, то в его основе лежат уравнения, описывающие физические процессы, происходящие при СВЧ термообработке, то есть уравнения Максвелла и теплопроводности (тепломассопереноса) с соответствующими граничными и начальными условиями [20]. Решение этой системы уравнений с учетом изменяющихся в процессе нагрева электрофизических и теплофизических параметров обрабатываемого диэлектрика и фазовых переходов дает возможность расчетным путем выяснить изменение в процессе термообработки контролируемых параметров (температуры – нагрев, пастеризация, стерилизация; температуры и влажности – сушка).

Тема согласованной (самосогласованной) краевой задачи электродинамики, тепло-массопереноса, термомеханики и гидравлики рассматривается в работах [4-8, 21-28]. Такие задачи могут быть решены с помощью теории длинных линий (теории цепей) [4, 7, 8, 23] аналитически [7, 8] и численными методами [21, 25-28].

В качестве примера рассмотрим численное моделирование СВЧ нагрева при движении излучающей рупорной системы вдоль наружной поверхности диэлектрика с учетом взаимосвязи электродинамических и тепловых процессов. На рис. 4 показана геометрическая модель для случая термообработки плоского диэлектрика (грунта) при движении излучателя вдоль его наружной поверхности.

Численное решение взаимосвязанных задач электродинамики и теплопроводности осуществлялось с помощью методики, разработанной на основе программного пакета COMSOL Multiphysics [29, 30]. При моделировании решалась задача оптимизации: определялась минимальная мощность СВЧ излучения и максимальная скорость движения излучающей системы, при которых достигается требуемая равномерность поля температур для заданной толщины грунта.

В расчетах использовались следующие исходные данные: частота СВЧ генератора  $f = 2450$  МГц; свойства грунта –  $\lambda = 1,49$  Вт/(м·К);  $c_p = 1150$  Дж/(кг·К);  $\rho = 2000$  кг/м<sup>3</sup>; относительная диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon_r = 2,6-0,377j$ ; коэффициент теплоотдачи с наружной поверхности грунта  $h_m = 10$  Вт/(м<sup>2</sup>·К); начальная температура грунта  $T_0$  и температура воздуха  $T_{amb}$  равны 20°C; заданная температура нагрева  $T_{set} = 180...450^\circ\text{C}$  ( $\psi = 200^\circ\text{C}$ ).

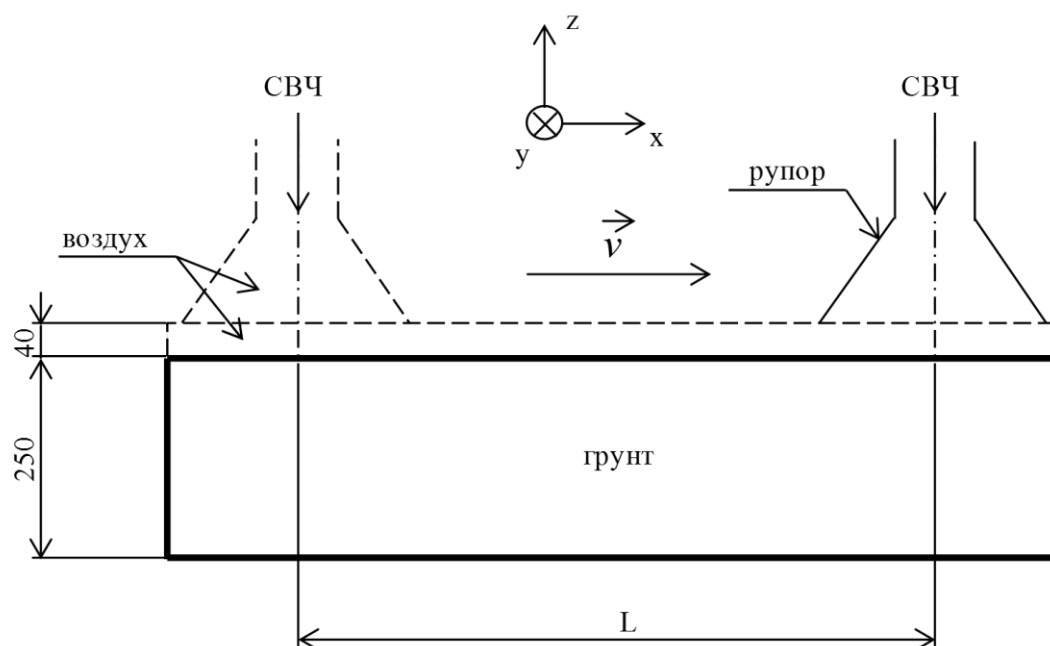


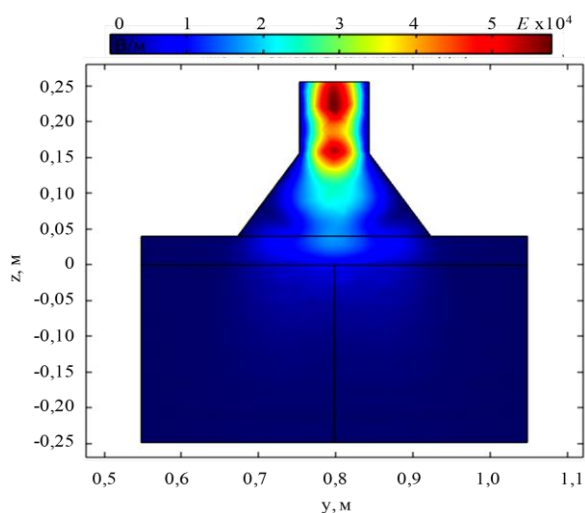
Рис. 4. Геометрическая модель задачи

Результаты численного моделирования напряженности электрического поля и распределения температуры при движении излучателя представлены на рис. 5, 6.

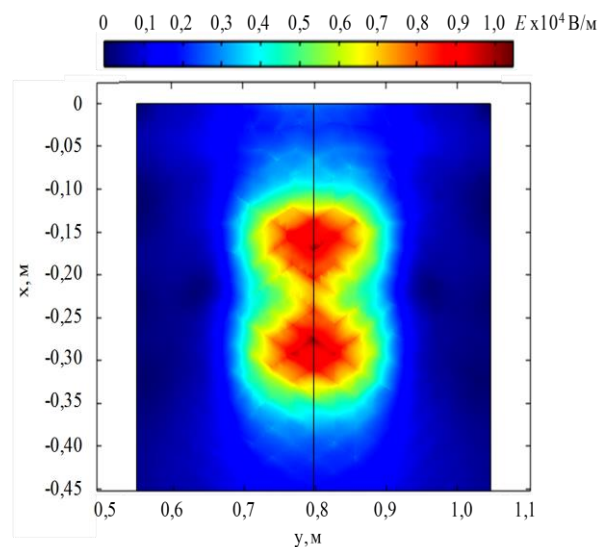
Получены оптимальные параметры СВЧ термообработки грунта: мощность СВЧ излучения равна 5 кВт, скорость движения излучающей системы 1 мм/с. На рис. 6 приведены изотермы в грунте для момен-

тов времени нагрева  $\tau = 600$  с и  $\tau = 1250$  с. Установлено, что со времени нагрева  $\tau = 600$  с слой грунта толщиной до 5 см нагревается до заданной температуры  $307^\circ\text{C}$ .

В дальнейшем при движении нагрев данного слоя грунта возрастает до температуры  $263...457^\circ\text{C}$  (рис. 6).

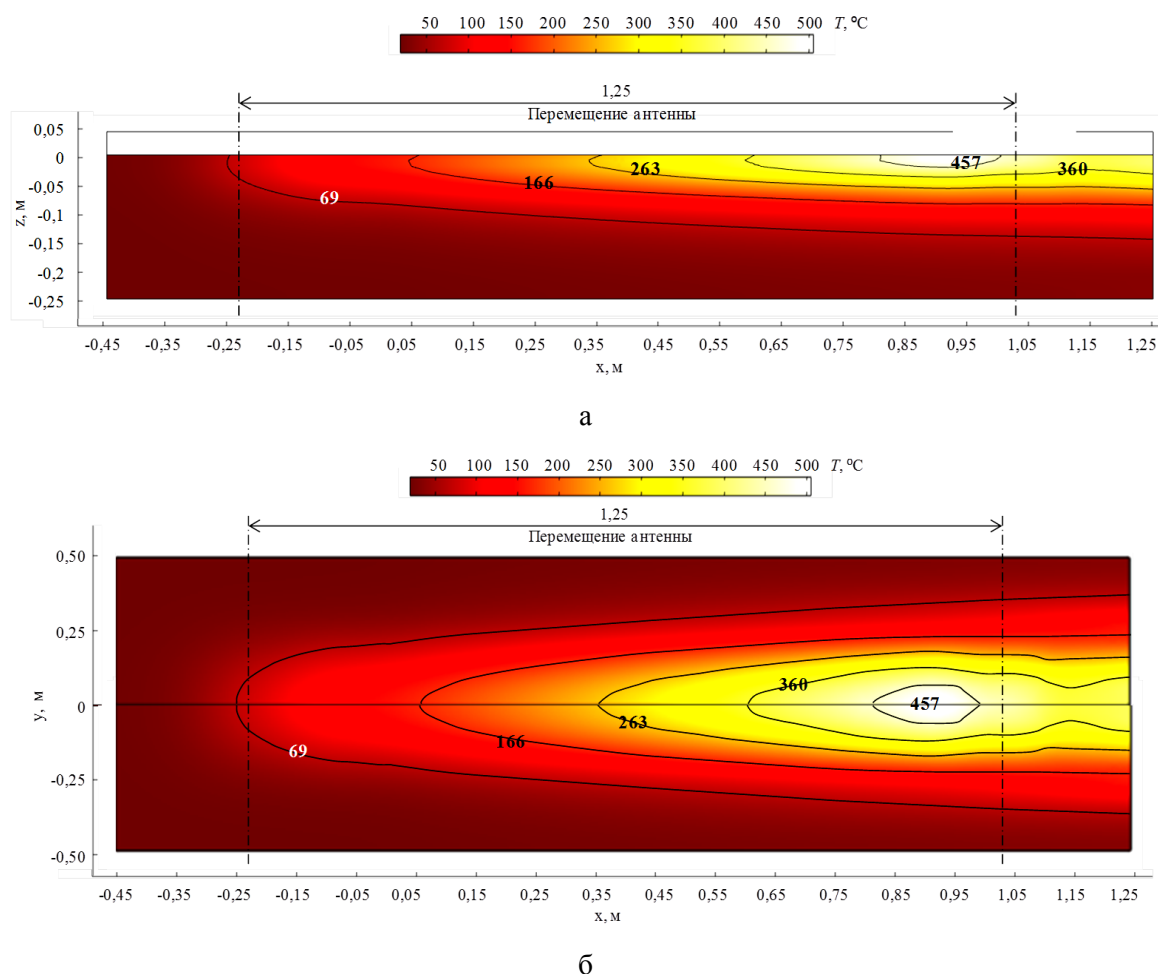


а



б

Рис. 5. Напряженность электрического поля: в плоскости, проходящей через ось симметрии волновода параллельно его широкой стенке (а); на наружной поверхности грунта (б)



**Рис. 6.** Температурное поле через 1250 с нагрева: в плоскости, проходящей через ось симметрии волновода параллельно его широкой стенке (а); на наружной поверхности грунта (б)

Таким образом, с помощью данной модели выбрана оптимальная пространственная ориентация излучателя при его перемещении и получены оптимальные пара-

метры процесса СВЧ нагрева грунта: скорость перемещения излучателя и необходимая мощность СВЧ генератора.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Архангельский Ю.С.** Элементная база СВЧ электротермического оборудования / Ю.С. Архангельский, В.А. Воронкин. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2003. 212 с.
2. **Архангельский Ю.С.** Техно-экономический и социальный аспекты электротехнологии / Ю.С. Архангельский, Е.В. Колесников. Саратов: Амирит, 2017. 197 с.
3. **Юдина В.О.** Конкурентоспособность и целесообразность применения методических СВЧ электротермических установок / В.О. Юдина, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. 2017. № 4 (17). С. 23-27.
4. **Архангельский Ю.С.** Камеры с бегущей и со стоячей волной / Ю.С. Архангельский, Е.В. Колесников. Саратов: Буква, 2015. 232 с.
5. **Архангельский Ю.С.** Камеры лучевого типа / Ю.С. Архангельский, С.В. Тригорный. Саратов: Амирит, 2017. 198 с.
6. **Архангельский Ю.С.** СВЧ электротермические установки лучевого типа / Ю.С. Архангельский, С.В. Тригорный. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2000. 122 с.

7. **Архангельский Ю.С.** СВЧ электро-термия / Ю.С. Архангельский. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 1998. 408 с.

8. **Архангельский Ю.С.** Справочная книга по СВЧ электротермии / Ю.С. Архангельский. Саратов: Научная книга, 2011. 560 с.

9. **Архангельский Ю.С.** Толкательная СВЧ электротермическая установка на базе камеры с бегущей волной / Ю.С. Архангельский, В.О. Юдина // Вопросы электро-технологии. 2015. № 4 (9). С. 14-19.

10. **Юдина В.О.** Протяжные СВЧ электротехнологические установки / В.О. Юдина, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. 2016. № 1 (10). С. 9-12.

11. **Юдина В.О.** Конвейерная СВЧ электротермическая установка на базе камеры лучевого типа / В.О. Юдина, Ю.С. Архангельский // Вопросы электро-технологии. 2016. № 2 (11). С. 5-7.

12. **Архангельский Ю.С.** СВЧ электротермические установки для термообработки жидкости в потоке / Ю.С. Архангельский, В.О. Юдина // Вопросы электротехнологии. 2016. № 2 (11). С. 8-13.

13. **Юдина В.О.** Транспортные системы СВЧ электротехнологической установки, работающей в методическом режиме / В.О. Юдина, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. 2016. № 3 (12). С. 10-12.

14. **Юдина В.О.** Особенности термообработки диэлектрика в толкательной СВЧ электротехнологической установке на базе камеры с бегущей волной / В.О. Юдина, Ю.С. Архангельский // Вопросы электро-технологии. 2016. № 3 (12). С. 13-15.

15. **Юдина В.О.** Барабанные СВЧ электротехнологические установки / В.О. Юдина, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. 2017. № 2 (15). С. 25-29.

16. **Юдина В.О.** Электропривод методических СВЧ электротермических установок / В.О. Юдина, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. 2018. № 1 (18). С. 27-29.

17. **Архангельский Ю.С.** Особенности конструкции и расчета методической СВЧ электротермической установки для нагрева

вязкой жидкости в потоке / Ю.С. Архангельский, В.О. Юдина, // Вопросы электро-технологии. 2018. № 2 (19). С. 39-42.

18. **Юдина В.О.** К расчету мощности электропривода методической СВЧ электротермической установки / В.О. Юдина, Ю.С. Архангельский // Вопросы электро-технологии. 2018. № 3 (20). С. 8-13.

19. **Юдина В.О.** Применение СВЧ энергии для нагрева жидкости в потоке / В.О. Юдина, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. 2019. № 1 (22). С. 22-34.

20. **Архангельский Ю.С.** Сверхвысокочастотные нагревательные установки для интенсификации технологических процессов / Ю.С. Архангельский, И.И. Девяткин. Саратов: Из-во Саратов. ун-та, 1983. 140 с.

21. **Архангельский Ю.С.** Компьютерное моделирование СВЧ электротехнологических установок / Ю.С. Архангельский, С.В. Тригорлый. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2006. 212 с.

22. **Гришина Е.М.** Математическое моделирование термообработки в камерах лучевого типа СВЧ электротермических установок / Е.М. Гришина, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. 2015. № 1 (6). С. 5-9.

23. **Архангельский Ю.С.** Применение теории цепей при синтезе рабочих камер СВЧ электротермических установок и математическом моделировании термообработки в СВЧ электромагнитном поле / Ю.С. Архангельский // Вопросы электро-технологии. 2015. № 3 (8). С. 9-15.

24. **Архангельский Ю.С.** Согласованные задачи в проектировании методических СВЧ электротермических установках / Ю.С. Архангельский, В.О. Юдина // Вопросы электротехнологии. 2016. № 4 (13). С. 10-12.

25. Моделирование процессов СВЧ термообработки диэлектриков с применением пакета COMSOL Multiphysics / С.Г. Калганова, Ю.С. Архангельский, С.В. Тригорлый, В.В. Захаров // Вопросы электротехнологии. 2017. № 3 (16). С. 6-10.

26. **Захаров В.В.** Электротехнологические процессы СВЧ термообработки диэлектриков и методы их моделирования с учетом изменения физических свойств ма-

териалов, фазовых переходов и тепломассо-  
сопереноса / В.В. Захаров // Вопросы элек-  
тротехнологии. 2017. № 7 (16). С. 23-32.

27. **Тригорлый С.В.** Численное модели-  
рование процессов плавления диэлектриков /  
С.В. Тригорлый, В.В. Захаров // Вопросы  
электротехнологии. 2018. № 1 (18). С. 5-10.

28. **Захаров В.В.** Численное моделиро-  
вание процессов СВЧ термообработки ди-  
электриков большой площади с примене-  
нием СВЧ установок методического  
действия / В.В. Захаров, С.С. Янкин,

С.В. Тригорлый // Вопросы электротехно-  
логии. 2018. № 3 (20). С. 36-42.

29. Введение в COMSOL Multiphysics  
[Электронный ресурс]. Режим доступа:  
[https://www.COMSOL.ru/shared/  
downloads/IntroductionToCOMSOL  
Multiphysics\\_RU52a.pdf](https://www.COMSOL.ru/shared/downloads/IntroductionToCOMSOL_Multiphysics_RU52a.pdf). 23.05.2017.

30. Моделирование СВЧ электротехно-  
логических процессов и установок с помо-  
щью программного пакета COMSOL  
Multiphysics / С.В. Тригорлый, В.С. Алек-  
сеев, С.Г. Калганова, В.В. Захаров. Сара-  
тов: Амирит, 2019. 105 с.

**Юдина Виолетта Олеговна** – ассистент  
кафедры «Электроэнергетика и электротех-  
ника» Саратовского государственного тех-  
нического университета имени Гагарина  
Ю.А.

**Захаров Вадим Валерьевич** – аспирант  
кафедры «Электроэнергетика и электротех-  
ника» Саратовского государственного тех-  
нического университета имени Гагари-  
на Ю.А.

**Тригорлый Сергей Викторович** – канди-  
дат технических наук, доцент кафедры  
«Электроэнергетика и электротехника»  
Саратовского государственного техниче-  
ского университета имени Гагарина Ю.А.

**Архангельский Юрий Сергеевич** – за-  
служенный деятель науки РФ, доктор тех-  
нических наук, профессор кафедры «Элек-  
троэнергетика и электротехника»  
Саратовского государственного техниче-  
ского университета имени Гагарина Ю.А.

**Violetta O. Yudina** – Postgraduate, Depart-  
ment of Power and Electrical Engineering,  
Yuri Gagarin State Technical University of  
Saratov

**Vadim V. Zakharov** – Postgraduate, Depart-  
ment of Power Engineering and Electrical En-  
gineering, Yuri Gagarin State Technical Uni-  
versity of Saratov

**Sergey V. Trigorly** – Ph.D., Associate Profes-  
sor, Department of Power Engineering and  
Electrical Engineering, Yuri Gagarin State  
Technical University of Saratov

**Yuri S. Arkhangelsky** – Honoured Worker of  
Science of the Russian Federation, Dr.Sc., Pro-  
fessor, Department of Power Engineering and  
Electrical Engineering, Yuri Gagarin State  
Technical University of Saratov

*Статья поступила в редакцию 20.07.19, принята к опубликованию 15.09.19*

### УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

В разделе «Летопись» можно опубликовать воспоминания, рассказ, ин-  
формацию об ученых, преподавателях, представителях промышленности,  
бизнеса, работающих в области электротехнологии.

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

В.М. Райгородский

### OPTIMIZATION OF ELECTROLYTIC ETCHING OF STEELWORKS

V.M. Raigorodsky

*Статья посвящена оптимизации электролитического травления сталей марок 20X13, 12X18N10T, 09Г2С, 60С2А, 70С2ХА, У8А, Ст3сп, Ст10, Ст45, 15ГС. Проведено сравнение электролитического и химического травления, приведены рецепты электролитов и химических травителей указанных марок стали.*

**Ключевые слова:** электролит, электролитическое травление, химическое травление, марка стали, легирующие компоненты

Электролитическое травление представляет собой процесс растворения металлов под действием электрического тока в присутствии электролитов, в качестве которых выступают растворы солей или кислот. Обычно процесс растворения протекает на аноде, в качестве которого используют металл, подвергаемый травлению. Катодом при этом служит проводящая пластина, изготовленная из материала, нейтрального к действию электролита, например из свинца или графита. Катодное травление используется гораздо реже и в основном для снятия окалины с углеродистых сталей, прошедших горячую прокатку или закалку в масле. Анодом при этом служит нейтральный металл, а катодом – обрабатываемое изделие. Процесс сопровождается выделением большого количества водорода, который, взаимодействуя с металлом, отрывает окалину с его поверхности. В то же время происходит внедрение водорода в приповерхностный слой металла, значительно увеличивая хрупкость последнего. По этой причине метод используется в основном для толстых изделий.

*The article is devoted to optimization of electrolytic etching technique applied for the steel types, including 20X13, 12X18N10T, 09G2S, 60C2A, 70C2XA, U8A, St3sp, St10, St45, and 15GC. Comparison of electrolytic and chemical methods of etching, and compounding of electrolytes and chemical etchants for the given steel types are provided.*

**Keywords:** electrolyte, electrolytic etching, chemical etching, steel type, alloying components

Процесс электролитического травления широко применяется в самых различных областях промышленности. В полиграфии таким образом изготавливают полиметаллические печатные формы для офсетной печати. В полупроводниковой промышленности эта технология используется в процессе изготовления интегральных схем, полупроводниковых лазеров. Данным методом наносят сложные рисунки и гравировки на металлические изделия. Очень широко этот метод используется для подготовки образцов к различным видам исследований, в частности, электролитическое травление и полирование может являться финишной операцией в процессе подготовки шлифов для проведения металлографических исследований, особо тонких образцов (фольги) для просвечивающей электронной микроскопии и др.

Ранее нами было показано, что указанный процесс нашел широкое применение в криминалистических исследованиях и судебной экспертизе, в частности, в экспертизе восстановления измененных и уничтоженных маркировочных обозначений [1-4].

В этом случае процесс электролитического травления может быть реализован в трех вариантах.

1. Изделие погружают в ванну с электролитом. Анодом при этом служит само изделие. В качестве катода используют пластину из нейтрального к действию электролита металла, например, свинца. Пластины располагают параллельно изделию на расстоянии 3-5 мм от него.

2. Изготавливают ванночку из нейтральных пластичных материалов (воска, стеарина, пластилина) непосредственно на изделии, которое служит анодом. Катод в виде проволоочки располагается параллельно восстанавливаемой поверхности на расстоянии 3-5 мм от нее.

3. Обеспечивают контакт участка, на котором проводится восстановление, с ватным тампоном, смоченным электролитом. Анодом при этом служит само изделие, а катодом - металлический пинцет, зажимающий тампон и равномернодвигаемый вдоль поверхности. К пинцету при этом прикладывается отрицательный потенциал, а к изделию - положительный.

Зачастую изделие, подвергаемое криминалистическому исследованию, может иметь большие габариты, значительно превышающие размеры ванны для электролитического травления. Для таких изделий может оказаться, что исследования необходимо проводить на вертикальных поверхностях. В таких случаях, по-видимому, единственным вариантом осуществления электролитического травления является использование пинцета с ватным тампоном. Следует отметить еще одно несомненное преимущество данного способа, а именно возможность контролировать результат электролитического травления непосредственно в процессе его проведения, предотвращая «перетрав» либо «недотрав» изделия, при необходимости увеличивая, либо уменьшая скорость растворения металла вариацией тока, при котором происходит процесс [2, 4, 5]. Указанные обстоятельства позволяют выделить третий вариант электролитического травления как наиболее предпочтительный.

Одними из наиболее распространенных материалов в технике и машиностроении являются различные виды сталей. На данный момент существует огромное количество марок сталей, различающихся по содержанию углерода (высокоуглеродистые, средне- и низкоуглеродистые), легированные различными примесями, придающими стали особые свойства (стойкость к коррозии, морозостойкости, ударопрочности). В зависимости от содержания легирующих компонентов сталь бывает низко-, средне-, высоколегированной (содержание легирующих компонентов соответственно колеблется от 4 до 11%).

В настоящей работе предпринята попытка оптимизации технологии электролитического травления различных марок сталей с целью выбора наилучшего состава электролита, условий проведения процесса для каждой из них.

Для исследования были отобраны образцы различных марок стали, различающиеся как содержанием углерода, так и составом и содержанием легирующих компонентов. Наименование и химический состав исследуемых марок сталей представлен в табл. 1-10.

Для всех исследуемых марок сталей использовали как электролитический, так и химический методы травления, что позволило провести их сравнение. В обоих случаях травление осуществляли с помощью ватного тампона, смоченного электролитом или травителем.

Источником постоянного напряжения в процессе электролитического травления служил лабораторный блок питания НУ-1500, позволяющий стабилизировать напряжение до 15 В и ток до 2 А.

Процесс в большинстве случаев осуществляли при максимальных напряжениях и токе. Для улучшения электрического контакта на исследуемых образцах было изготовлено винтовое соединение. При отсутствии такого соединения, то есть когда контакт осуществлялся вручную прижимом электрического провода к образцу, электролитического травления не наблюдалось. Аналогичное винтовое соединение с той же целью было изготовлено на пинцете.

Таблица 1

20X13 - Сталь коррозионностойкая (нержавеющая) жаропрочная  
Химический состав в процентах марки стали 20X13 (в соответствии с ГОСТ 5632-72)

| C         | Si     | Mn     | Ni     | S        | P       | Cr        |
|-----------|--------|--------|--------|----------|---------|-----------|
| 0.09-0.15 | до 0.8 | до 0.8 | до 0.6 | до 0.025 | до 0.03 | 12.0-14.0 |

Таблица 2

12X18H10T – Сталь конструкционная криогенная  
Химический состав в процентах марки стали 12X18H10T (в соответствии с ГОСТ 5632-72)

| C       | Si     | Mn     | Ni       | S       | P        | Cr        | Cu     | Ti      | Fe             |
|---------|--------|--------|----------|---------|----------|-----------|--------|---------|----------------|
| до 0.12 | до 0.8 | до 2,0 | 9.0-11.0 | до 0.02 | до 0.035 | 17.0-19.0 | до 0.3 | 5 С-0.8 | Осталь-<br>ное |

Таблица 3

09Г2С – Сталь конструкционная низколегированная для сварных конструкций  
Химический состав в процентах марки стали 09Г2С (в соответствии с ГОСТ 19281-89)

| C       | Si      | Mn      | Ni     | S       | P        | Cr     | N        | Cu     | As      |
|---------|---------|---------|--------|---------|----------|--------|----------|--------|---------|
| до 0.12 | 0.5-0.8 | 1.3-1.7 | до 0.3 | до 0.04 | до 0.035 | до 0.3 | до 0.008 | до 0.3 | до 0.08 |

Таблица 4

60С2А – Сталь конструкционная рессорно-пружинная  
Химический состав в % марки стали 60С2А (в соответствии с ГОСТ 14959-79)

| C         | Si    | Mn      | Ni      | S        | P        | Cr     | Cu     |
|-----------|-------|---------|---------|----------|----------|--------|--------|
| 0.58-0.63 | 1.6-2 | 0.6-0.9 | до 0.25 | до 0.025 | до 0.025 | до 0.3 | до 0.2 |

Таблица 5

70С2ХА – Сталь конструкционная рессорно-пружинная  
Химический состав в процентах марки стали 70С2ХА (в соответствии с ГОСТ 14959-79)

| C         | Si      | Mn      | Ni      | S        | P        | Cr      | Cu     |
|-----------|---------|---------|---------|----------|----------|---------|--------|
| 0.65-0.75 | 1.4-1.7 | 0.4-0.6 | до 0.25 | до 0.025 | до 0.025 | 0.2-0.4 | до 0.2 |

Таблица 6

У8А – Сталь инструментальная углеродистая  
Химический состав в процентах марки стали У8А (в соответствии с ГОСТ 1435-90)

| C         | Si        | Mn        | Ni     | S        | P        | Cr     | Cu     |
|-----------|-----------|-----------|--------|----------|----------|--------|--------|
| 0.76-0.83 | 0.17-0.33 | 0.17-0.28 | до 0.2 | до 0.018 | до 0.025 | до 0.2 | до 0.2 |



Таблица 7

Ст3сп – Сталь конструкционная углеродистая обыкновенного качества  
Химический состав в процентах марки стали Ст3сп (в соответствии с ГОСТ 380-94)

| C         | Si       | Mn       | Ni     | S       | P       | Cr     | N        | Cu     | As      |
|-----------|----------|----------|--------|---------|---------|--------|----------|--------|---------|
| 0.14-0.22 | 0.15-0.3 | 0.4-0.65 | до 0.3 | до 0.05 | до 0.04 | до 0.3 | до 0.008 | до 0.3 | до 0.08 |

Таблица 8

Ст10 – Сталь конструкционная углеродистая качественная  
Химический состав в процентах марки стали 10 (в соответствии с ГОСТ 1050-88)

| C         | Si        | Mn        | Ni      | S       | P        | Cr      | Cu      | As      |
|-----------|-----------|-----------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|
| 0.07-0.14 | 0.17-0.37 | 0.35-0.65 | до 0.25 | до 0.04 | до 0.035 | до 0.15 | до 0.25 | до 0.08 |

Таблица 9

Ст45 – Сталь конструкционная углеродистая качественная  
Химический состав в процентах марки стали 45 (в соответствии с ГОСТ 1050-88)

| C        | Si        | Mn      | Ni      | S       | P        | Cr      | Cu      | As      |
|----------|-----------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|
| 0.42-0.5 | 0.17-0.37 | 0.5-0.8 | до 0.25 | до 0.04 | до 0.035 | до 0.25 | до 0.25 | до 0.08 |

Таблица 10

15ГС – Сталь конструкционная низколегированная для сварных конструкций  
Химический состав в процентах марки стали 15ГС (в соответствии с ГОСТ 19282-73)

| C         | Si      | Mn      | Ni     | S       | P       | Cr     | Cu     |
|-----------|---------|---------|--------|---------|---------|--------|--------|
| 0.12-0.18 | 0.7-1.0 | 0.9-1.3 | до 0.3 | до 0.03 | до 0.04 | до 0.3 | до 0.3 |

В качестве электролитов и химических травителей были опробованы практически все известные из литературы растворы, применяемые в криминалистических исследованиях для восстановления измененных и уничтоженных маркировочных обозначений на черных металлах и сплавах [2, 5-7], а также используемые в металлографии для приготовления металлографических шлифов [8-10].

В итоге были отобраны электролиты и травители на основе водных растворов двуххромовокислого калия; водных растворов смеси соляной и серной кислот; водных растворов серной и азотной кислот; водных растворов хлорного железа ( $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ );

водных растворов желатина, сернокислой меди и серной кислоты; водных растворов молибденовокислого аммония; водных растворов смеси двуххромовокислого калия и серной кислоты; водных растворов смеси хлорной меди, соляной кислоты и этилового спирта; водных растворов смеси двуххромовокислого калия и сульфата натрия.

Для всех выбранных электролитов и травителей по результатам предварительных испытаний проводили варьирование исходного состава, позволившее найти наилучшее сочетание компонентов. Всего было опробовано более 30 различных составов электролитов, которые использовали также для химического травления.

Оптимизацию процессов электролитического и химического травления проводили одновременно с отработкой методики восстановления измененных или уничтоженных маркировочных обозначений на данных материалах. Для этого на исследуемых образцах вручную ударом молотка по клейму наносили трех и четырехзначные буквенно-цифровые обозначения, которые затем удаляли с помощью наждачного круга. Толщина удаляемого слоя металла выбиралась, исходя из условий полного исчезновения всех штрихов первоначального обозначения.

Подобные исследования, помимо прочего, позволяют оценить селективные свойства электролитов и травителей, заключающиеся в различии скоростей травления в деформированных и недеформированных областях материала.

Проведенные исследования показали, что для электролитического и химического травления результаты в целом идентичны. Это ожидаемый результат, поскольку в обоих случаях процесс состоит из двух этапов: окисления образца с образованием солей или оснований; растворение последних с их переходом в раствор. Различие заключается лишь в том, что в процессе электролитического травления подвод диссоциированных ионов к образцу осуществляется под действием электрического напряжения, а в химическом травлении - вследствие диффузии. Различие в механизме передвижения ионов оказало влияние на особенности проведения процессов и их результаты, а именно, процесс электролитического травления, как и следовало ожидать, оказался более управляемым, позволяющим регулировать скорость травления изменением величины подаваемого электрического напряжения, что особенно важно в процессе восстановления удаленных штрихов маркировочных обозначений. В целом при необходимости процесс электролитического травления можно осуществить быстрее, чем химическое травление.

Результаты проведенных исследований можно условно разделить на следующие группы.

1. Процессы электролитического и химического травления протекали крайне медленно либо не происходили вовсе. В этом случае вопреки литературным данным электролит и травитель никак не действовали на исследуемые образцы. Иллюстрацией данных результатов служит рис. 1.

2. Травление сопровождалось образованием на поверхности образцов пленок, цвет которых различался в зависимости от состава электролита и марки стали. В отдельных случаях эти пленки удавалось смыть ватным тампоном, смоченным дистиллированной водой или этиловым спиртом, в других случаях смыть налет было невозможно. В первом случае после смыывания контраст выявленных маркировочных обозначений восстанавливался, и обозначения были пригодны для идентификации (рис. 2, 3). Во втором случае при невозможности смыть темные пленки контраст почти или полностью отсутствовал, травитель или электролит считали непригодными для травления данных образцов с целью восстановления маркировочных обозначений. Иллюстрация данных результатов приведена на рис. 4.

3. Травление приводило к удалению поверхностного слоя образца без значительного изменения цвета поверхности. Вследствие заметного съема материала происходило качественное выявление штрихов маркировочного обозначения. Поверхность образцов при этом оставалась светлой или чуть сероватого цвета, что не мешало наблюдению штрихов. Данные результаты считали оптимальными, их иллюстрация приведена на рис. 5-8.

Образование темного налета может быть связано с наличием тех или иных легирующих элементов в определенных марках стали. При взаимодействии с электролитом или травителем данные элементы могут окисляться с образованием малорастворимых или совсем нерастворимых окислов темного цвета, мешающих процессу фиксации восстановленных обозначений.

Ниже приведены рецепты электролитов и травителей оптимального состава для различных марок сталей.



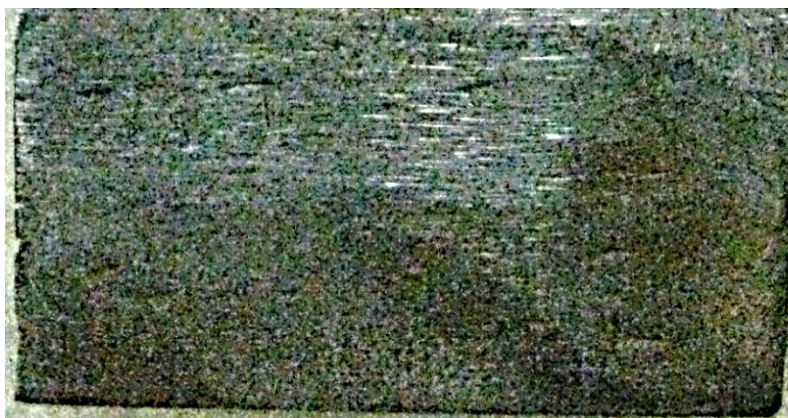
**Рис. 1.** Иллюстрация отсутствия электролитического травления на стали марки 12Х18Н10Т при использовании в качестве электролита 30%-го водного раствора молибденовокислого аммония



**Рис. 2.** Результат электролитического травления на стали марки 60С2А с использованием в качестве электролита 1%-го водного раствора серной кислоты с последующей обработкой поверхности ватным тампоном, смоченным дистиллированной водой



**Рис. 3.** Результат электролитического травления на стали марки 20Х13 при использовании в качестве электролита раствора следующего состава: концентрированная соляная кислота – 38 мл, концентрированная серная кислота – 12 мл, вода дистиллированная – 15 мл с последующей обработкой поверхности ватным тампоном, смоченным этиловым спиртом



**Рис. 4.** Образование пленок окислов темного цвета в процессе электролитического травления стали марки 15ГС при использовании в качестве электролита 4 %-го раствора двуххромовокислого калия в 60%-м водном растворе серной кислоты





**Рис. 5.** Результат электролитического травления на стали марки 70C2XA при использовании в качестве электролита 15%-го водного раствора двуххромовокислого калия



**Рис. 6.** Результат электролитического травления на стали марки 20X13 при использовании в качестве электролита раствора следующего состава: сернокислая медь – 1 г, желатин – 1 г, концентрированная серная кислота – 10 мл, вода дистиллированная – 500 мл



**Рис. 7.** Результат электролитического травления на стали марки 09Г2С при использовании в качестве электролита 1%-го водного раствора азотной кислоты



**Рис. 8.** Результат электролитического травления на стали марки Ст10 при использовании в качестве электролита 1%-го водного раствора серной кислоты

1. Для коррозионностойкой стали марок 20Х13 и 12Х18Н10Т:

- 15%-й водный раствор двухромово-кислого калия;
- концентрированная соляная кислота – 38 мл, концентрированная серная кислота – 12 мл, вода дистиллированная – 15 мл;
- 6%-й водный раствор хлорного железа;
- 1%-й водный раствор серной кислоты;
- 1%-й водный раствор азотной кислоты;
- сернокислая медь – 1 г, желатин – 1 г, концентрированная серная кислота – 10 мл, вода дистиллированная – 500 мл.

2. Для инструментальной углеродистой стали марки У8А:

- 6%-й водный раствор хлорного железа;
- 15%-й водный раствор двухромово-кислого калия;
- 30%-й водный раствор двухромово-кислого аммония.

3. Для сплавов рессорно-пружинной стали марок 60С2А и 70С2ХА:

- 15%-й водный раствор двухромово-кислого калия;
- концентрированная соляная кислота – 38 мл, концентрированная серная кислота – 12 мл, вода дистиллированная 15 мл;
- 1%-й водный раствор серной кислоты;
- 1%-й водный раствор азотной кислоты;
- сернокислая медь – 1 г, желатин – 1 г, концентрированная серная кислота – 10 мл, вода дистиллированная – 500 мл;
- 30%-й водный раствор молибденово-кислого аммония.

4. Для стали конструкционной углеродистой марки Ст3сп:

- 15%-й водный раствор двухромово-кислого калия;
- 1%-й водный раствор азотной кислоты;
- 30%-й водный раствор молибденово-кислого аммония.

5. Для конструкционных низколегированных сталей для сварных конструкций марок 09Г2С и 15ГС:

- 1%-й водный раствор серной кислоты;
- 1%-й водный раствор азотной кислоты;
- 15%-й водный раствор двухромово-кислого калия;
- соляная кислота – 4 мл, медь хлорная – 0,5 мл, этиловый спирт – 20 мл, вода дистиллированная – 15 мл.

6. Для конструкционных углеродистых качественных сталей марок Ст10 и Ст45:

- концентрированная соляная кислота – 38 мл, концентрированная серная кислота – 12 мл, вода дистиллированная – 15 мл;
- 1%-й водный раствор серной кислоты;
- 15%-й водный раствор двухромово-кислого калия;
- 30%-й водный раствор молибденово-кислого аммония.

Для указанных рецептов электролитов и травителей темные пленки окислов на поверхности образцов отсутствовали вовсе, либо легко смывались дистиллированной водой.

Сравнивая результаты травления, полученные химическим и электрохимическим методами, можно сделать вывод, что использование одних и тех же веществ вначале в качестве электролита, а затем в качестве травителя приводило в большинстве случаев к одинаковым результатам. Однако время растворения материала при использовании электрохимического метода существенно сокращалось, а возможность вариации напряжения и тока позволяла сделать процесс электрохимического травления регулируемым. Такой же вывод может быть сделан по результатам восстановления маркировочных обозначений на исследуемых марках стали.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Поль К.Д.** Естественнаучная криминалистика. (Опыт применения научно-технических средств при расследовании отдельных видов преступлений) / К.Д. Поль. М.: Спарк, 1985. 368 с.

2. **Райгородский В.М.** Экспертиза восстановления измененных и уничтоженных маркировочных обозначений / В.М. Райгородский, В.Н. Хрусталева, С.А. Ермолаев. Саратов: СЮИ МВД РФ, 1999. 72 с.

3. **Райгородский В.М.** Экспертиза по восстановлению измененных и уничтоженных маркировочных обозначений на различных материалах / В.М. Райгородский, А.Г. Филиппов // Вестник криминалистики. 2010. Вып. 3 (35). С. 57-62.

4. **Райгородский В.М.** Использование электрохимических методов для восстановления измененных или уничтоженных маркировочных обозначений / В.М. Райгородский // Вопросы электротехнологии. 2014. № 1 (2). С. 52-57.

5. **Кочубей А.В.** Восстановление удаленных маркировочных обозначений на металлах и сплавах / А.В. Кочубей // Криминалистическое исследование веществ, материалов и изделий. Волгоград: ВЮА МВД РФ, 2002. 325 с.

6. **Устинов С.Н.** Восстановление уничтоженных рельефных изображений на ме-

талле, полимере и дереве / С.Н. Устинов, В.М. Струков // Экспертная практика. 1989. № 27. С. 55-61.

7. Экспертное исследование изделий из железоуглеродистых сплавов по элементному составу / под ред. А. В. Аграфенина, Т.Ф. Одиноккина, В.З. Худякова. М., 1983. Ч. 1. 244 с.

8. **Барина Л.В.** Металлографическое травление металлов и сплавов / Л.В. Барина, Э.Л. Демина. М.: Металлургия, 1986. 256 с.

9. **Беккерт М.** Способы металлографического травления / М. Беккерт, Х. Клемм. М.: Металлургия, 1988. 400 с.

10. **Коваленко В.С.** Металлографические реактивы: справочник / В.С. Коваленко. М.: Металлургия, 1981. 120 с.

**Райгородский Владимир Михайлович** – кандидат технических наук, доцент Саратовского государственного аграрного университета им. Н.И. Вавилова

**Vladimir M. Raigorodsky** – PhD, Associate Professor, Saratov State Vavilov Agrarian University

*Статья поступила в редакцию 21.07.19, принята к опубликованию 15.09.19*



# ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 681.171.5

## ПЕРСПЕКТИВЫ УВЕЛИЧЕНИЯ РЕСУРСА ИЗОЛЯЦИИ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

**Е.В. Николаев, М.А. Полякова**

## PROSPECTS FOR INCREASING THE LIFETIME OF TRACTION MOTORS INSULATION

**E.V. Nikolaev, M.A. Polyakova**

*Рассматриваются вопросы, связанные с расчетом ресурса изоляционных конструкций тяговых электродвигателей и его продлением в условиях эксплуатации.*

**Ключевые слова:** тяговый электродвигатель, ресурс изоляции, система охлаждения, электрическая ёмкость изоляции, релейный эффект, защита от короткого замыкания

Ресурс любой технической системы определяется временем безотказной работы наименее надежного узла. В силовой цепи локомотивов узлом, лимитирующим ее ресурс, является тяговый двигатель (ТЭД). В самом ТЭД таким узлом необходимо считать корпусную изоляцию их якорных обмоток. Как показывают анализы технического состояния [1-3], выходы из строя ТЭД стабильно занимают второе место по общему количеству отказов узлов локомотивов после электроаппаратуры. При этом на долю отказов якорных обмоток по причинам пробоев их корпусной и витковой изоляции приходится от 29 до 33% от всех видов неисправностей. Основными причинами отказов корпусной и витковой изоляции ТЭД являются температурные, вибрационные и циклические знакопеременные нагрузки, обусловленные непостоянством их рабочих режимов, в совокупности с действием

*The article deals with the issues of estimating the lifetime of insulation systems for traction motors, and extending the lifetime in the course of their operation.*

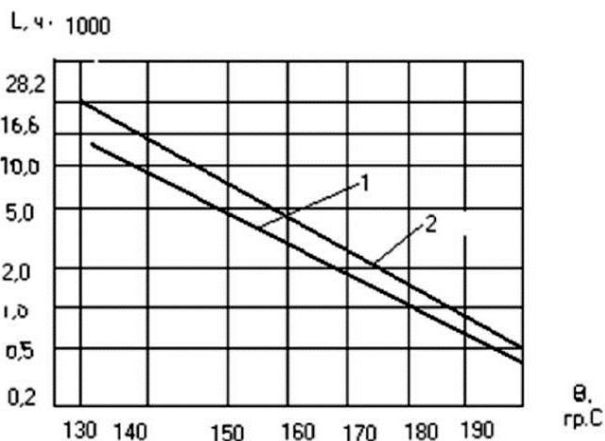
**Keywords:** traction motor, lifetime of insulation, cooling system, electrical insulation capacity, relay effect, short circuit protection

атмосферных метеоусловий и запыленности охлаждающего воздуха.

В соответствии с исследованиями, проведенными В.П. Немухиным и В.Н. Яковлевым [4], ресурс модернизированной корпусной изоляции якорей ТЭД в условиях, приближенных к эксплуатационным, достаточно резко зависит от температуры. Так, ресурс стеклослюдинитовой ленты ЛС-ЭП-934-ТП, на основе которой модернизирована корпусная изоляция ТЭД тепловозов, при температуре 138-140°C составляет  $16,6 \cdot 10^3$  часов, а при температуре 150°C только  $7 \cdot 10^3$  часов. Всю картину изменения ресурса модернизированной и немодernизированной изоляции под действием температур, воздействующих на обмотки ТЭД тепловозов в эксплуатации, можно увидеть на рис. 1 [4].

Вышеприведенные данные характеризуют ресурс изоляционных конструкций тепловозных ТЭД. Учитывая, что корпус-

ная изоляция электровозных ТЭД незначительно отличается от тепловозных как по классу, так и по конструкции, эти данные с некоторым запасом можно применить и к расчету ресурса электровозных ТЭД. Запас обусловлен, в частности, тем, что наряду с изоляционными материалами на основе стеклослюдинитовой ленты ЛС-ЭП-934-ТП в электровозных ТЭД применяется лента ЛСЭК-5-СПл, имеющая несколько лучшие диэлектрические свойства за счет применения в ней кремнийорганического лака.



**Рис. 1.** Зависимость ресурса изоляции от температуры: 1 – микалента ЛФЧ-ББ; 2 – стеклослюдинитовая лента ЛС-ЭП-934-ТП

В реальных условиях эксплуатации, как показывают тепловые испытания [5-7], температура обмоток электровозных ТЭД может достигать 150÷180°C. В частности, исследования [5] показывают, что при часовых режимах, когда ТЭД НБ-412 М начинают работать с холодного состояния, изоляция их обмоток может нагреваться до 177°C. Данные подтверждаются при имитации трогания поезда с места на тяжелом профиле пути и движении его по перегону с поездом массой 1900 т при норме 2800 т. Они показывают, что перегрев изоляции обмоток в этом состоянии длится не менее 20 минут (0,33 часа).

Рассчитаем, сколько таких режимов выдержат обмотки ТЭД с изоляцией класса F, используя результаты испытаний [4]:

$$N = \frac{R}{\tau} = \frac{2 \cdot 10^3}{0,33} = 6,06 \cdot 10^3, \quad (1)$$

где  $N$  – число предполагаемых режимов;  $R = 2,0 \cdot 10^3$  – ресурс изоляции кл. F при 177°C, ч [4];  $\tau = 0,33$  – число часов работы изоляции в режиме.

Предположим, что участковая скорость локомотива  $V_{уч}$  в этих режимах составляет 100 км/ч. Тогда за указанные 0,33 часа пробег локомотива  $L_u$ , соответственно, ТЭД составит

$$L = V_{уч} \cdot \tau = 100 \cdot 0,33 = 33 \text{ км}. \quad (2)$$

Общий пробег ТЭД  $L_{общ}$  на данном участке не может быть больше, чем

$$L_{общ} = L \cdot N = 6,06 \cdot 10^3 \cdot 33 = 199,98 \cdot 10^3 \text{ км}. \quad (3)$$

Таким образом, из приведенного расчета видно, что пробег  $L_1$  модернизированных ТЭД грузового локомотива по указанному перегону без их смены по причине электротеплового пробоя изоляции составит не более 200 000 км, то есть менее гарантийного.

В общем виде формулу для расчета ресурса изоляции ТЭД при наличии сведений о ее температуре в эксплуатации на том или ином участке можно представить в виде

$$L_{общ} = R_t \cdot V_{уч}, \quad (4)$$

где  $R_t$  – ресурс изоляции при известной температуре.

Так как участковая скорость локомотива контролируется в пути следования непрерывно, зависимость (4) может быть использована и для непрерывного контроля ресурса ТЭД в эксплуатации при наличии информации о текущей температуре изоляции его обмоток. Возможность получения такой информации появилась после исследований. Задача этих исследований заключалась в том, чтобы выбрать с датчика температуры изоляции обмоток ТЭД. Как показали проведенные исследования [8], таким датчиком может служить конструктивная электрическая емкость изоляции обмоток якоре ТЭД. В частности, были исследованы электри-



ческие емкости изоляции обмоток якорей ТЭД типа ЭД 118А в зависимости от температуры и напряжения. Результаты исследований показали достаточно резкую зависимость от температуры и меньшую от действующего напряжения. При этом в диапазоне температур от 20 до 140°C эти зависимости носят характер, близкий к линейному.

Определение полного ресурса изоляции ТЭД в эксплуатации достаточно трудоемко. Имеющиеся экспериментальные данные свидетельствуют, что полный ресурс определен только для тепловозных ТЭД типа ЭД-107А [9] и для электровозных типа ДПЭ-400 [10]. В указанной литературе показано, что распределение отказов изоляции этих ТЭД подчиняется нормальному закону распределения с параметрами, соответственно, для ТЭД ЭД-107А: математическое ожидание  $\bar{L} = 649,316 \cdot 10^3$  км; дисперсия  $\sigma_L = 0,258 \cdot 10^6$  км, для ТЭД ДПЭ-400: математическое ожидание  $\bar{L} = 1360 \cdot 10^3$  км; дисперсия  $\sigma_L = 0,247 \cdot 10^6$  км. Однако, используя зависимость на рис. 1, и соотношение (4), зная средние температуры изоляции и скорости на эксплуатируемом полигоне, можно ресурс изоляции обмоток рассчитать ориентировочно по следующей схеме. Предположим, что средние температуры изоляции новых ТЭД ДПЭ-400, только что выпущенных с завода-изготовителя, и скорости локомотива, на котором они установлены, на эксплуатируемом полигоне, соответственно, равны 130°C и 45 км/ч. Тогда ориентировочный средний полный ресурс изоляции обмоток ТЭД составит:

$$\begin{aligned} L_{\text{общ}} &= R \cdot V_{\text{уч}} = 28,2 \cdot 10^3 \cdot 45 = \\ &= 1269 \cdot 10^3 \text{ км,} \end{aligned} \quad (5)$$

где согласно рис. 1  $28,2 \cdot 10^3$  – ресурс изоляции кл.В при температуре 130°C. То есть согласно соотношению (5) мы получили средний пробег ТЭД типа ДПЭ-400 примерно совпадающий с вышеприведенными данными [10].

Безусловно, исследования, подобные [9, 10], для знания реального полного ре-

сурса изоляции обмоток ТЭД, необходимо проводить для всех типов ТЭД, эксплуатируемых в заданных регионах обращения конкретных локомотивов. Однако, как показывают вышеизложенные расчёты, их можно проводить параллельно с эксплуатацией локомотивов, накапливая статистические данные по реальным пробегам ТЭД до отказа в данном регионе и уточняя значения полного ресурса для использования его при организации ремонта узлов и деталей локомотивов по их техническому состоянию.

К наиболее крупным недостаткам независимых систем вентиляции ТЭД локомотивов относятся: недостаточная автоматизированность, вызванная отсутствием обратной связи между производительностью вентиляторов и температурой изоляции их обмоток, слабая защищённость от метеоусловий окружающей среды и зависимость интенсивности охлаждения изоляции обмоток ТЭД от человеческого фактора. Первый недостаток приводит в одних случаях к перегревам или переохлаждениям, но в любом случае к повышенным знакопеременным нагрузкам на изоляцию. Наиболее ярко этот недостаток выражен на тепловозах типа ТЭ10, где обороты вентиляторных колёс зависят от числа оборотов коленвала дизеля, и номинальное количество воздуха системой вентиляции выдаётся только на 15 позиции контроллера машиниста. Это приводит к тому, что на разгонных позициях или на затяжных подъёмах при пониженных позициях контроллера машиниста, когда токи через ТЭД повышены и близки к номинальным, а обороты коленвала дизеля ниже номинальных, количество теплоты, выделяемой в обмотках ТЭД, может превышать количество теплоты, отводимой охлаждающим воздухом. В этом случае температуры изоляции их обмоток будут резко расти, что, как показано выше, приводит к резкому снижению ресурса ТЭД. Аналогичные проблемы присутствуют и у других видов тепловозов, но, например, на тепловозах типа 2ТЭ116, где приводы вентиляторов автономны и не связаны механически с дизелем, они могут быть решены схемно, за счёт включения

приводных электродвигателей на повышенное число оборотов.

Недостатки, указанные выше для систем вентиляции, взаимосвязаны и устраняются внедрением автоматической системы вентиляции ТЭД с обратной связью по температуре изоляции их обмоток. В частности, предусматривается система для регулирования охлаждения тяговых электродвигателей электровоза, состоящая из мотор-вентилятора, блока выделения сигнала управления, уровень выходного сигнала которого зависит от величины конструктивной емкости силовой цепи, аналогового преобразователя (АЦП), датчика параметров атмосферы, цифроаналогового преобразователя (ЦАП), системы автоведения поезда (УСАВП, УСАВП-Т) и регулятора напряжения.

Система работает следующим образом. При работе локомотива в режиме тяги токи, проходящие через обмотки тяговых электродвигателей, будут разогревать его изоляционные конструкции, вследствие чего электрическая емкость будет расти. Поскольку общая конструкционная емкость силовой цепи складывается из емкостей тяговых электродвигателей и емкости монтажных кабелей, то суммарная мощность силовой цепи будет возрастать. Эти изменения фиксирует блок выделения сигнала управления по температуре (емкостного преобразователя), далее аналоговый сигнал оцифровывается АЦП и передается в микропроцессорную систему УСАВП-Т. Данная система, исходя из таких параметров, как температура и влажность охлаждающего воздуха, температура нагрева изоляционных конструкций и токовых нагрузок на ТЭД, рассчитывает необходимое количество оборотов центробежного вентилятора системы охлаждения таким образом, чтобы количество охлаждающего воздуха обеспечивало теплосъем, соответствующий тепловыделению с изоляционных конструкций ТЭД, то есть температура нагрева изоляционных конструкций была постоянной с минимальной амплитудой колебаний. Количество оборотов вентилятора

регулируется за счет изменения напряжения питания мотор-вентилятора с помощью регулятора напряжения на основе транзисторов, выполненных по технологии IGBT.

Данная система охлаждения позволит повысить экономичность работы локомотивов, прогнозировать ресурс изоляционных конструкций ТЭД и контролировать их состояние и остаточный ресурс.

Предлагаемая система является универсальной и может применяться как на электровозах, так и на тепловозах. Так, при незначительной модернизации, система может быть внедрена на тепловозах типа 2ТЭ116. Привод вентиляторов системы охлаждения ТЭД на этих локомотивах выполнен автономным с применением двигателей переменного тока. Наличие переменного тока на локомотиве значительно упрощает исполнительные схемы систем контроля температуры изоляции обмоток ТЭД и их защиты от перегревов. Упрощаются и схемы систем питания вспомогательных цепей.

Что касается недостатков систем защиты силовых цепей локомотивов от коротких замыканий, то основными необходимо отметить их сложность, низкую чувствительность, громоздкость, а также то, что, по сути, они являются не защищающими, а регистрирующими. Наиболее сложная и наименее чувствительная система защиты от коротких замыканий на корпус применяется на электровозах, особенно в режиме рекуперации. Сложность и громоздкость системы защиты обусловлены тем, что минимальный ток срабатывания дифференциальных реле, на которых она построена, равен  $100\div 120$  А в зависимости от серии локомотива.

Таким образом, основными путями увеличения ресурса изоляции обмоток ТЭД необходимо считать те, которые ведут к определению их фактического полного ресурса, внедрению систем контроля температуры изоляции обмоток и расходования этого ресурса, систем охлаждения и защиты ТЭД от короткого замыкания и перегревов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анализ состояния и сменяемости основных узлов и деталей электрических машин тепловозов за 1985 год. Проектно-конструкторско-технологическое бюро по локомотивам. № 105.8500.97486. Полтава. 1986. 52 с.
2. Анализ технического состояния электровагонного парка по сети железных дорог России за 2000 год. МПС РФ. Департ. лок. хоз-ва. № ЦТЭ-Р-17 от 20.04.2001. М., 2001. 88 с.
3. Анализ технического состояния электровагонного парка по сети железных дорог России за 2003 год. ОАО «РЖД». Департ. лок. хоз-ва. № ЦТЭР-5 от 05.07.2004. М., 2004. 65 с.
4. **Немухин В.П.** Эффективность применения нагревостойкой изоляции в тяговых электрических машинах тепловозов / В.П. Немухин, В.Н. Яковлев. М.: Транспорт, 1977. 47 с.
5. **Богаенко И. Н.** Экспериментальное исследование температурного поля тягового двигателя / И.Н. Богаенко, И.Х. Мусатов, В.Б. Попов // Электровагоностроение: сб. науч. трудов Всесоюз. науч.-исслед. и пр.-констр. ин-та электровагоностроения (ВЭЛНИИ). Новочеркасск, 1964. 121 с.
6. Исследования условий теплового пробоя тяговых электродвигателей тепловозов и разработка мероприятий по повышению их надёжности. Отчёт о НИР по х/д с ЦТ МПС. Тема Т-120. Ташк. ин-т инж. ж.-д. трансп., (ТашИИТ); Руководитель В.Н. Жидков. Ташкент, 1976. 146 с.
7. **Гордеев И.П.** Ресурс изоляции обмоток, система вентиляции и тепловое состояние ТЭД в эксплуатации / И.П. Гордеев // Исследования и разработки ресурсосберегающих технологий на железнодорожном транспорте: межвуз. сб. науч. тр. с международным участием. Самара: СамГУПС. 1999. С. 146-150.
8. **Гордеев И.П.** Повышение надёжности изоляции тяговых силовых цепей локомотивов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / И.П. Гордеев. Самара: СамГУПС, 2006. 35 с.
9. **Гордеев И.П.** Моделирование отказов изоляции обмоток тяговых электродвигателей локомотивов в эксплуатации: монография / И.П. Гордеев. Самара: СамГУПС, 2004. 172 с.
10. Повышение надёжности тяговых двигателей электровагонных в эксплуатации / Ю.Н. Виноградов // Труды ВНИИЖТ. М.: Транспорт, 1965. Вып. 305. 124 с.

**Николаев Евгений Владимирович** – доцент кафедры «Тяговый подвижной состав» ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ)

**Полякова Марина Александровна** – инженер по охране окружающей среды сервисного локомотивного депо «Смоленск» филиала «Московский» ООО «ЛокТех-Сервис»

**Evgeni V. Nikolaev** – Associate Professor, Traction Rolling Stock Department, Russian University of Transport (RUT MIIT)

**Marina A. Polyakova** – Environmental Protection Engineer. Locomotive Service Depot *Smolensk* of the Moscow branch of LokTech-Service LLC

*Статья поступила в редакцию 30.07.19, принята к опубликованию 15.09.19*

# ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

УДК 621.3.011.71: 621.3.011.73

## ПРИМЕНЕНИЕ СИМВОЛЬНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ И ПРОГРАММ В ИССЛЕДОВАНИИ ИМПУЛЬСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

П.А. Кошелев, С.В. Парамонов

## APPLICATION OF SYMBOLIC MATHEMATICAL METHODS AND PROGRAMS IN THE STUDY OF PULSE CONVERTERS

P.A. Koshelev, S.V. Paramonov

*Представлены методы анализа параметров дискретных и импульсных элементов электротехнических устройств и комплексов.*

*Методы и алгоритмы реализованы в современных пакетах программ компьютерных информационных технологий символьных вычислений.*

*Описаны способы вывода аналитического выражения сигнала и восстановления его формы по совокупности дискретных значений (отсчётов), полученных в результате натурного эксперимента или численного моделирования.*

*Приведены примеры вычислений, результаты, тексты программ.*

*Ключевые слова: импульсные преобразователи, математическое моделирование, символьные вычисления*

*The authors present the methods used to analyze the parameters of discrete and pulse elements of electrotechnical devices and complexes.*

*The methods and algorithms are implemented in modern software packages of computer IT programs of symbolic calculations.*

*The methods of deducing analytical expression of a signal and restoring its form based on a set of discrete values received as a result of a full-scale experiment or numerical modeling operation are described.*

*Keywords: pulse converters, mathematical modeling operation, symbolic calculations*

В природе и в технике все процессы аналоговые, цифровая техника [1], несмотря на некоторые недостатки, которые будут пояснены далее, имеет неоспоримые достоинства, а именно:

- высокая устойчивость к электромагнитным помехам, возникающим в процессе эксплуатации промышленных объектов;

- благодаря современным схемотехническим решениям и элементной базе до-

ступна сравнительно простая аппаратная реализация устройств;

- возможность изменения функций устройства путём перепрограммирования без вмешательства в аппаратную часть;

- низкая зависимость от температуры внешней среды.

К недостаткам ЦУ можно отнести:

- в некоторых случаях может возникнуть сбой в работе устройства из-за импульсной помехи большой мощности;

– в особых случаях установке ЦУ требуются специальные меры по радиационной защите;

– затруднения в процессе ремонта ЦУ, которое обычно имеет довольно сложную структуру, а ремонт заключается в замене блока.

Интерес представляют выражения основных сигналов, которые позволили бы разработать систему управления, скорректировать схему преобразователя.

Совместное применение компьютерных технологий символьных и численных алгоритмов и современное программное обеспечение способны решить эту задачу.

Исследования и практическая работа показали, что положительные результаты достижимы, если использовать сочетание программных продуктов символьных и численных преобразований (MAPLE) и матричных операций (MATLAB) [2, 3]. Эти программы легко совмещаются и взаимно дополняются.

**Пример 1.** В данном примере рассматривается 3-фазный управляемый тиристорный выпрямитель (рис. 1). Питание от бортовой 3-фазной сети с частотой 400 Гц, напряжение 220 В.

Его анализ и моделирование производится в пакете SIMULINK POWER SYSTEMS (SPS) системы MATLAB.

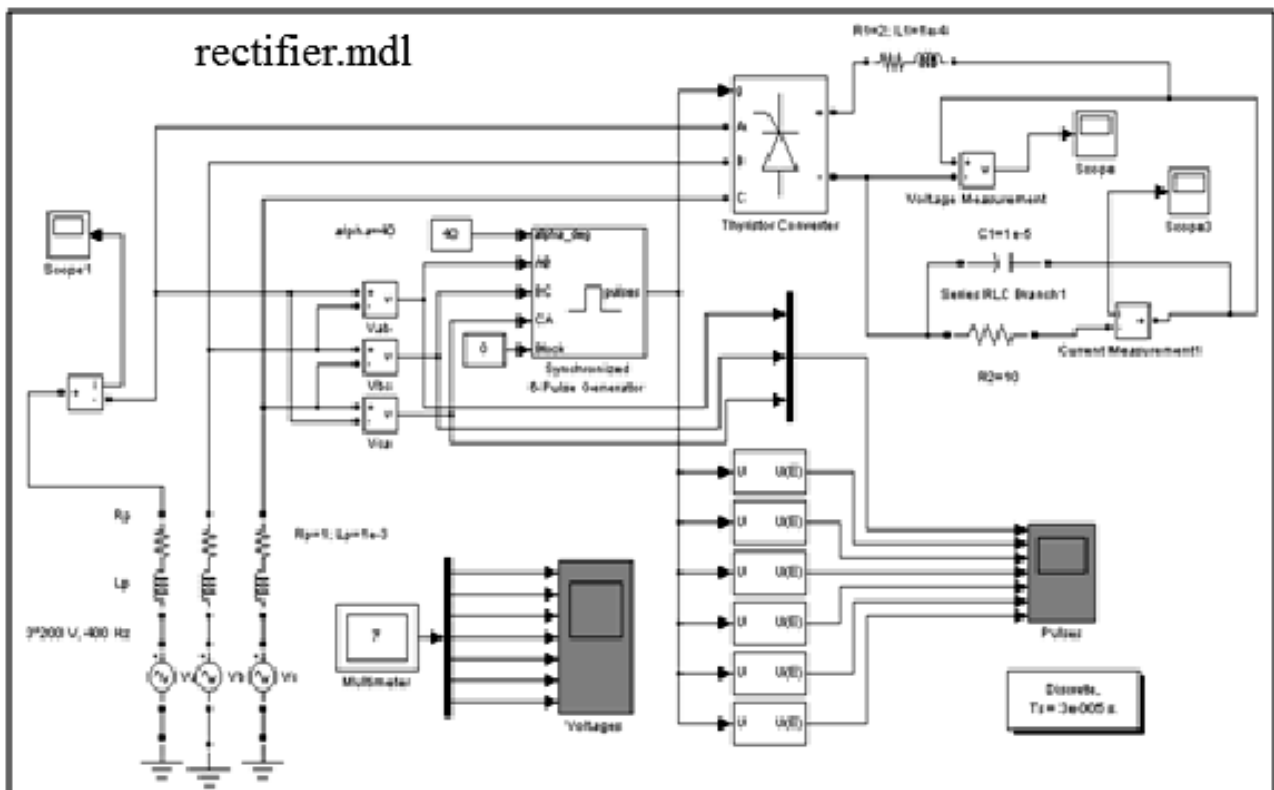


Рис. 1. Структурная модель и ее характеристики

Теоретически в соответствии с теоремой Котельникова [4] для получения необходимой информации достаточно  $n = 2 \cdot f_{\max}$  дискрет, где  $f_{\max}$  (Гц) – максимальная частота в спектре сигнала  $x(t)$ .

Это относится к периодическому сигналу и требует априорного знания его гармонического состава.

Однако на практике, если во время проведения технологического процесса, подверженного возмущениям, зачастую случайным, выборки фиксируются цифровыми измерительными датчиками, определение частот, тем более,  $f_{\max}$ , вряд ли даёт достоверный результат, а существенная часть информации утрачивается.

Выход из этого положения – многократный съём данных, измерение спектра сигнала, пробные расчёты, сравнения с экспериментами.

Идентификация выражения сигнала по координатам отсчётов (дискрет), полученным в результате моделирования или эксперимента, предполагает следующие этапы работы.

1. Определение гармонического состава исследуемого сигнала во временном интервале, в котором существует периодичность процесса.

2. Выбор частот спектра с существенными амплитудами гармоник.

Этапы 1 и 2 реализуются в пакете MATLAB программами Fourier.m, agr.m, SPS модель (должны присутствовать в одном каталоге). Тексты этих и других про-

грамм снабжены комментариями (Приложения 1-3).

При запуске Fourier инициализируется программа agr, которая, в свою очередь, запускает SPS модель (оператор sim('имя модели'), формирует набор данных (data1) для дальнейшей обработки в других вычислительных средах, вычисляются основные энергетические параметры:

Частота сети (Гц) 400

Постоянная составляющая сигнала (A) 0.0062835

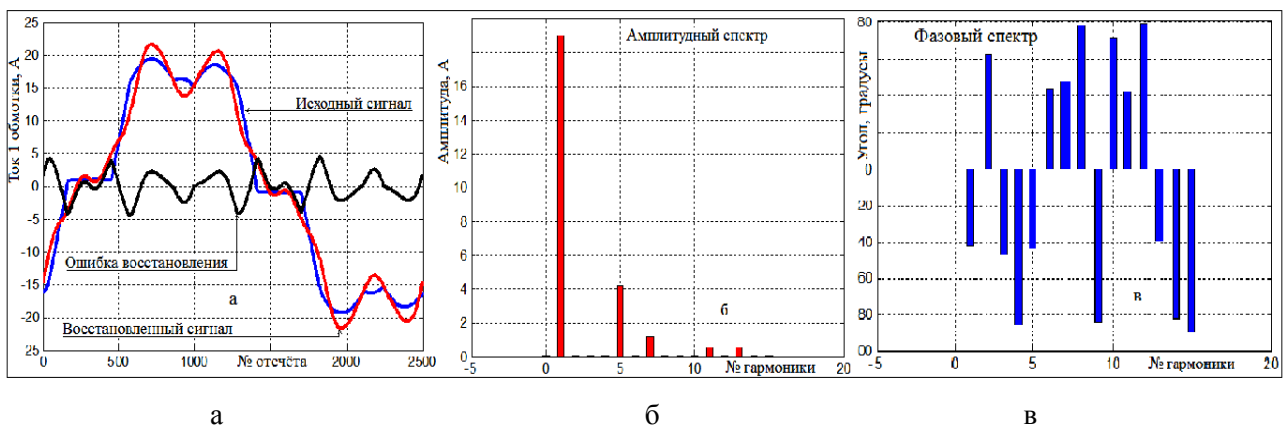
Амплитуда 1-й гармоники (A) 19.007

Косинус фи 0.74551

Коэффициент искажений 0.97417

Коэффициент мощности 0.72625.

На рис. 2 а, б, в соответственно – исходный и восстановленный сигналы, амплитудный спектр тока фазы, фазовый спектр тока.



**Рис. 2.** Исходный и восстановленный сигналы (а), амплитудный спектр тока фазы (б), фазовый спектр тока (в)

Анализ и графики показывают, что следует учитывать 1, 5, 7, 11, 13 гармоники.

3. Выбор метода аппроксимации и составление аппроксимирующего выражения в символьном виде.

4. Синтез выражения непрерывного сигнала.

5. Проверка адекватности восстановления, оценка точности и чувствительности решения к возможным флуктуациям.

На этапах 3-5 данные передаются в программы MAPLE для аппроксимации методом наименьших квадратов [5]. Файл Fit\_rect.mw (Приложение 3).

Этап 3 осуществляет пользователь на основе физики процессов в системе и выбранного математического аппарата.

Работа по этапу 4 проводится в программе системы MAPLE Fit\_rect.mw. Результат: выражение 'poly':

poly := -19.017809677039\*sin(800\*Pi\*t-16.437026967364)-  
4.1708314608229\*sin(4000\*Pi\*t-  
3.9013963995361)-  
1.1979548191514\*sin(5600\*Pi\*t+.84798285147176)-  
.58712405280074\*sin(8800\*Pi\*t+.75970976741576)-

$.57003007715199 \cdot \sin(10400 \cdot \pi \cdot t + 5.6387753036092) - 0.27121555368750e-3$

Этапы 4, 5 включают расчет коэффициентов однофакторной регрессионной поли-

номиальной модели. Реализуются в той же программе.

Графики тока фазы на рис. 3.

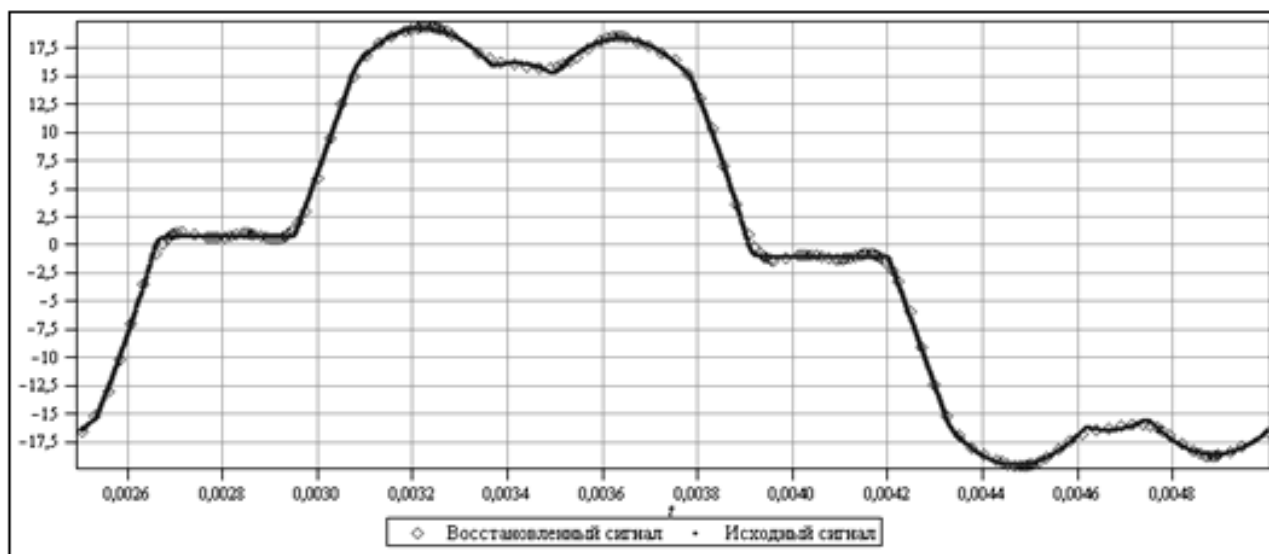


Рис. 3. Ток фазы

Результат расчёта в системе MAPLE подтверждает точность восстановления аналитического выражения исследуемого сигнала.

**Пример 2.** Исследуются параметры, находится выражение, строятся графики исходного и восстановленного тока первичных обмоток трансформатора.

Предмет: преобразователь инверторно-выпрямительного типа для дуговой технологии (рис. 4).

Использован автономный инвертор с широтно-импульсной модуляцией на MOSFET транзисторах.

Питание преобразователя выпрямленным напряжением сети ~220 В, 50 Гц. Базовая частота инвертора 50000 Гц (рис. 4-6).

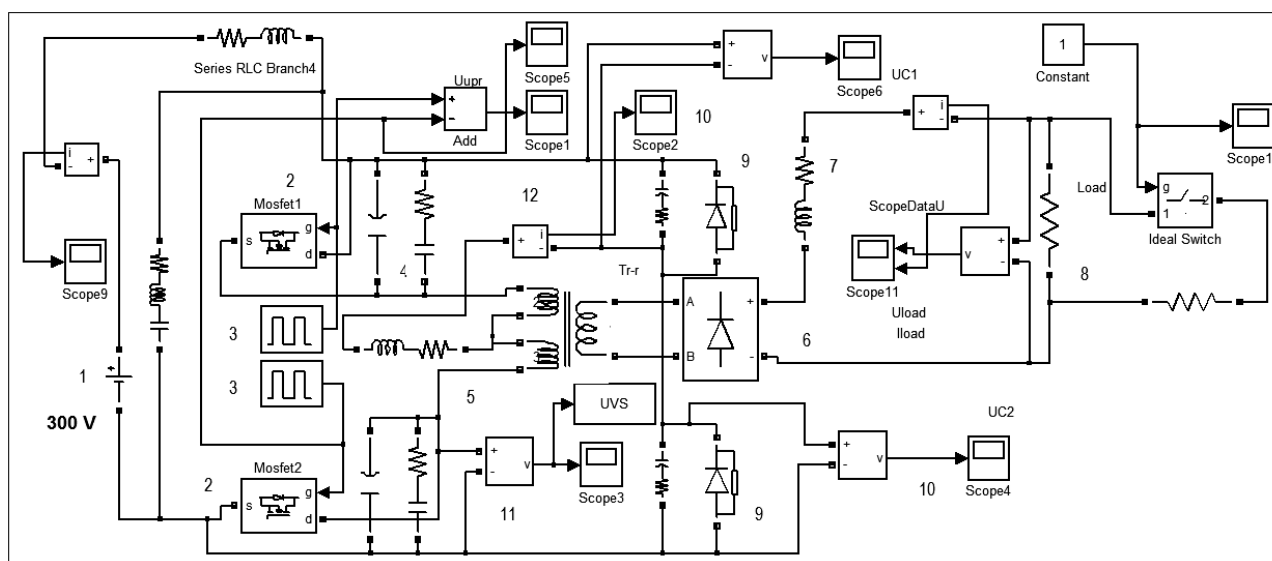


Рис. 4. Структура модели преобразователя



Расшифровка структуры по рис. 4. Основные элементы.

- 1 – источник питания постоянного тока (выход сетевого выпрямителя).
- 2 – транзистор MOSFET.
- 3 – генераторы управляющих импульсов.
- 4 – защитные RC цепи.
- 5 – силовой высокочастотный трансформатор.

- 6 – выходной выпрямитель.
- 7 – выходной фильтр.
- 8 – цепь нагрузки.
- 9 – диоды «обратного» выпрямителя (рекуперации).
- 10, 11 – измерители напряжения.
- 12 – измеритель тока первичных обмоток трансформатора 5.

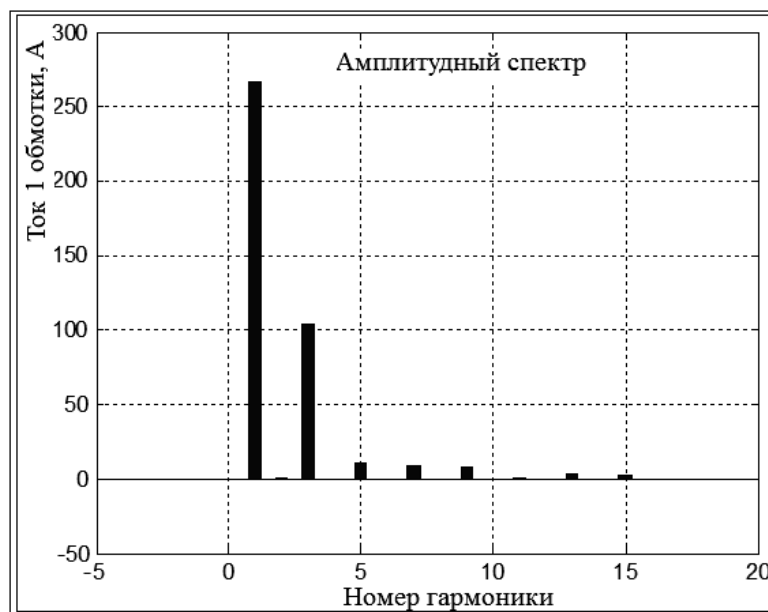


Рис. 5. Амплитудный спектр тока к примеру 2

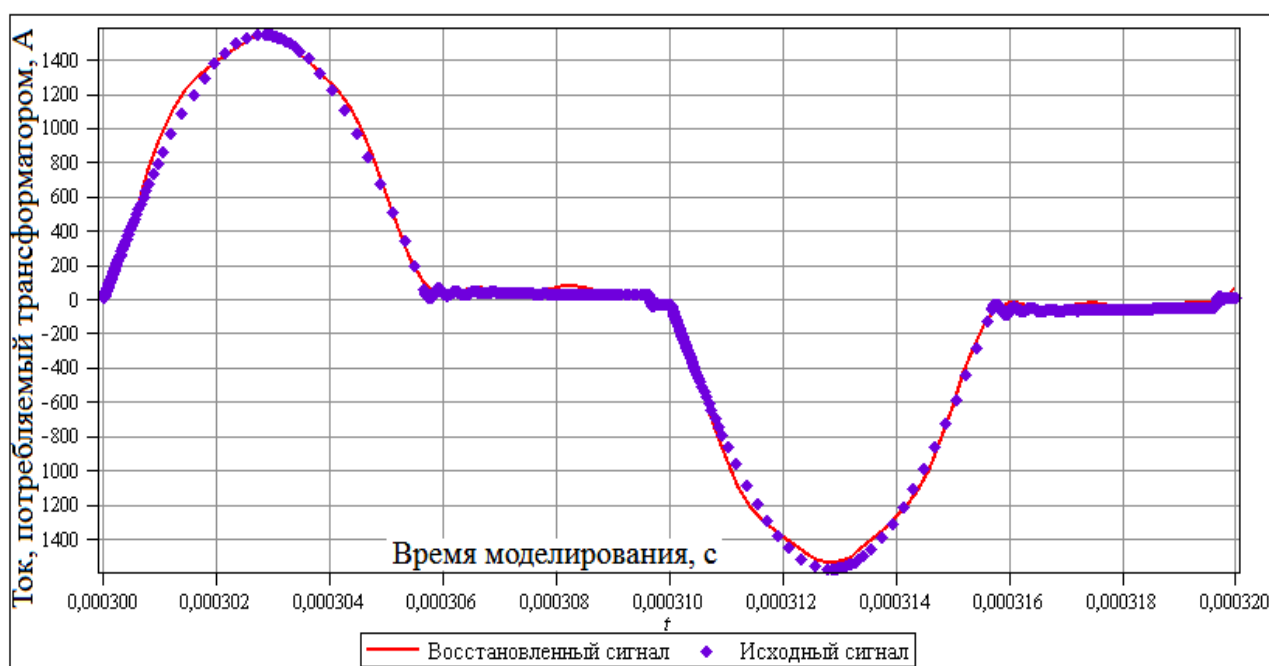


Рис. 6. Исходный и восстановленный сигналы

Временная зависимость (poly) восстановленного сигнала:

```
poly :=
1077.27705492436*sin(100000*Pi*t-
49.6183595691286)-
512.359402915285*sin(300000*Pi*t-
60.7578301731765)+95.4711928504727*sin(70
0000*Pi*t-
1.53013578514741)+.379774194682960*sin(90
0000*Pi*t+1.89950486389378)-
48.4665111230846*sin(1100000*Pi*t+1.06845
383415304)
```

При анализе пройдены аналогичные этапы, использованы упомянутые выше программы после незначительного редактирования.

Функция программы Fit\_rect.mw позволяет рассчитать коэффициенты  $p$  полиномиальной регрессионной модели  $n$ -й степени для выборки значений  $x$ ,  $y$  методом наименьших квадратов.

Зависимая  $x$  и независимая  $y$  переменные задаются как векторы с одинаковым числом элементов.

Если отклонения значений зависимой переменной  $x$  от регрессионной модели распределены по нормальному закону с постоянной дисперсией, границы доверительного интервала включают как минимум 50% значений.

**Пример 3.** Импульсная система с непериодическими сигналами.

Часто представляют интерес параметры переходного процесса в системе, так как от них зависят требования к перегрузочной способности применяемых элементов.

Рассматривается высоковольтный источник питания (ИП) анодной цепи мощной генераторной лампы. Исследуется ток  $I$  обмотки силового высокочастотного трансформатора ИП, а именно переходный процесс подключения нагрузки 8 (рис. 7).

Процесс установления тока показан на рис. 8. Выделим начало процесса на интересующем отрезке времени (отмечено значком ■ на рис. 9).

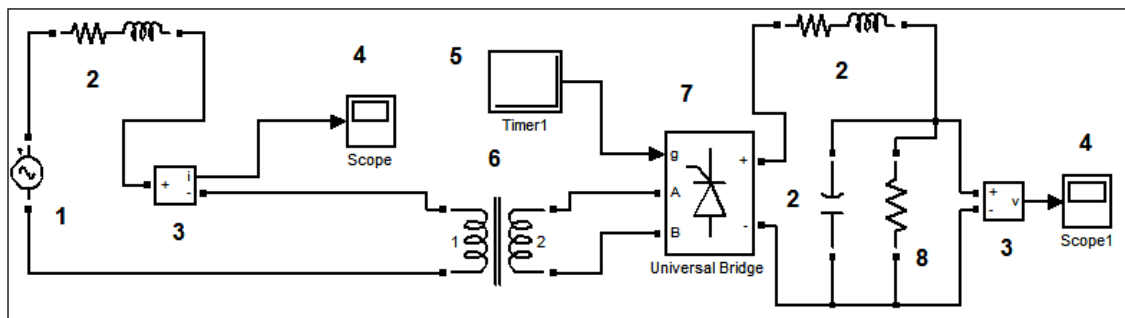


Рис. 7. Упрощённая структурная схема SPS модели ИП

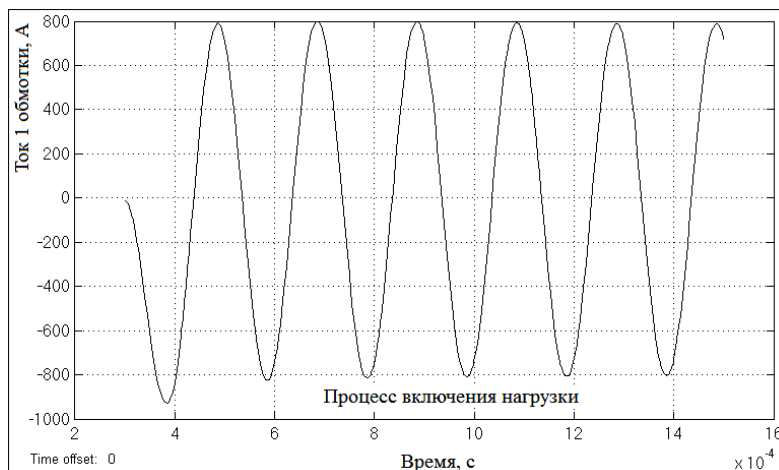


Рис. 8. Процесс установления тока

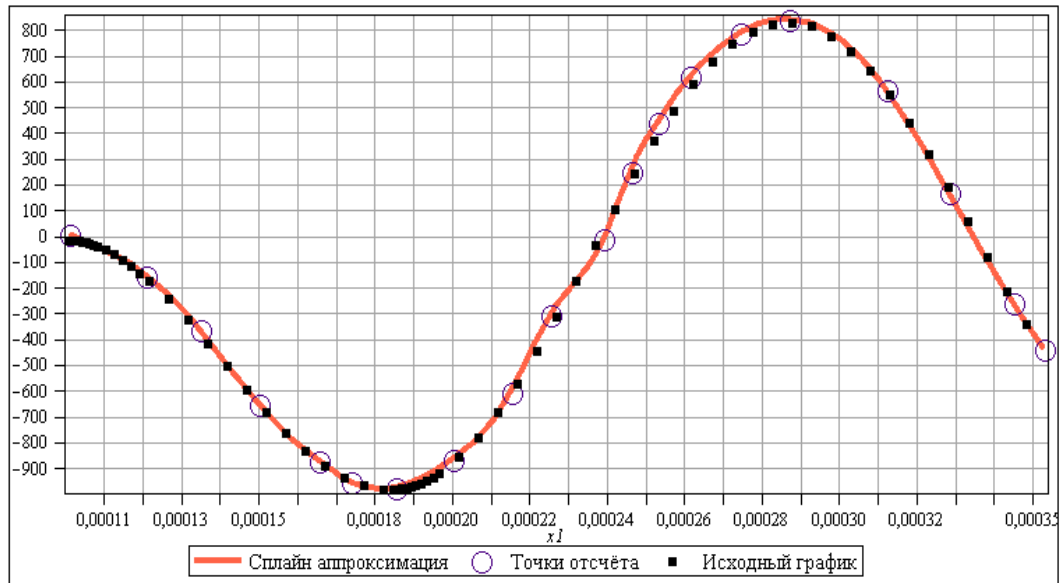


Рис. 9. Аппроксимация

Используем аппроксимацию сигнала с помощью кубических сплайнов.

Стандартные программы сплайн-интерполяции действуют, если значения независимой переменной по шагам возрастают, что не всегда выполняется при численных расчётах с переменным шагом.

Воспользуемся методом снятия координат точек графика вручную, который удобно реализуется в пакетах MATLAB оператором `ginput`.

Координаты переносятся в рабочую область файла `sub_spline` пакета MAPLE. Фрагмент файла и часть результата на рис. 10, графики на рис. 9.

```
restart:
with(LinearAlgebra):
with(plots):
Digits:=5:
x := array([0.00010096, 0.00012092, 0.00013474, 0.0001501, 0.00016545, 0.0001739, 0.00018541, 0.0002, 0.00021536, 0.00022534, 0.00023916, 0.00024607, 0.00025298, 0.00026142, 0.00027447, 0.00028676, 0.00031209, 0.00032821, 0.00034511, 0.00035278]):
y := array([9.7324, -150.85, -360.1, -652.07, -871.05, -953.77, -973.24, -866.18, -603.41, -301.7, -9.7324, 253.04, 442.82, 622.87, 788.32, 841.85, 569.34, 170.32, -257.91, -437.96]):
spl:=evalf(spline(x,y,x1,3)):

```

$$\begin{aligned}
 &637.84 - 6.2214 \cdot 10^6 x_1 - 4.5777 \cdot 10^{15} (x_1 - 0.00010096)^3 & x_1 < 0.00012092 \\
 &1263.0 - 1.1692 \cdot 10^7 x_1 - 2.7411 \cdot 10^{11} (x_1 - 0.00012092)^2 + 1.7783 \cdot 10^{15} (x_1 - 0.00012092)^3 & x_1 < 0.00013474 \\
 &2098.9 - 1.8250 \cdot 10^7 x_1 - 2.0038 \cdot 10^{11} (x_1 - 0.00013474)^2 + 9.8323 \cdot 10^{15} (x_1 - 0.00013474)^3 & x_1 < 0.0001501 \\
 &1966.5 - 1.7446 \cdot 10^7 x_1 + 2.5270 \cdot 10^{11} (x_1 - 0.0001501)^2 - 2.9653 \cdot 10^{15} (x_1 - 0.0001501)^3 & x_1 < 0.00016545
 \end{aligned}$$

Рис. 10. Фрагмент файла

Выражения представлены в виде частей, действующих в интервалах значений независимой переменной между отсчётами.

При необходимости можно выделить нужный фрагмент для дальнейшей обработки.

Итак, предложен, описан метод синтеза аналитического выражения сигнала и восстановления его формы по совокупности дискретных значений (отсчётов), получен-

ных в результате натурального эксперимента или численного моделирования.

Разработано и реализовано программное обеспечение, удобное для редактирования, проведения аналитических и численных преобразований, необходимых при исследовании и проектировании динамических систем.

Приведены примеры исследования процессов в некоторых электродинамических системах.

- Приложение 1
- % Файл agr.m
- % Программа преобразования результата моделирования
- % для анализа спектра сигнала. Вызывается из
- % программы анализа Fourier.m
- clear % очистка памяти
- sim('rectifier') % запуск модели (xx.mdl)
- global nmax
  - $f_0=400$ ; % Базовая частота, Гц
- $T=1/f_0$ ; % Период основной частоты, с
- nmax=380; % Требуемое количество отсчётов.
- % Ввод вектора времени: Id1.time;
- % Ввод вектора сигнала: y=Id1.signals.values;
- 
- x=I1.time; % Редактируется
- y=I1.signals.values; % Редактируется
- Tmod=max(x); % Время моделирования, с
- N=Tmod/T; % Количество периодов моделирования
- lx=length(x); % Общее количество отсчётов на сетке
- llx=floor(T\*lx/Tmod); % Количество отсчётов на периоде
  - % Выделение последнего периода
- y1=y(lx-llx+1:lx,1);
- x1=x(lx-llx+1:lx,1);
- Y11=[[x1],[y1]];
- plot(y1) % Изображение сигнала на последнем периоде
- pause
- ly1=length(y1); % Фактическое кол-во отсчётов на периоде
- if ly1>nmax; n=floor(ly1/nmax); else n=ly1; end
- Y=[]; s=1;
- while s<=ly1-n;
  - s=s+n;
  - Y=[Y,y1(s-1,1)];
- end
- close all
  - % Вычисление и запись результатов
- dts=datestr(now);
- fid2 = fopen('rectus','W+');
- fprintf(fid2,'%s',dts);
- fprintf(fid2,'\n');
- fprintf(fid2,'I');
- ik=1;
- while ik<=llx;
  - fprintf(fid2,[' %6.5g',x1(ik)]);
  - if ik<llx
    - fprintf(fid2,', %6.5g ],',y1(ik));
  - else
    - fprintf(fid2,', %6.5g ]]',y1(ik));
  - end

- $ik=ik+1;$
- *end*
- *fclose(fid2);*
- *type rectus*

## Приложение 2

- *% Файл Fourier.m*
- *% Спектральный анализ сигнала и его восстановление по спектрам*
- *% Расчёт основных энергетических параметров*
- *% Ввод данных из agr.m*
- *% В программе agr.m при необходимости отредактировать:*
- *% f0,x,y,nmax*
- *global nmax*
- *agr;*
- *format short e*
- *F=Y;*
- *dim = length(F);*
- *T=1/f0; % Период базовой частоты, с*
- *dt=T/dim; % Временной шаг, с*
- *t=0:dt:T; % Исследуемый временной интервал, с*
- *nhar = 15; % Максимальный № гармоники*
  - *% График исходного сигнала*
- *plot(F,'or','LineWidth',3),grid,title('input signal')*
- *clf*
- *lt=length(t);*
- *for k=1:nhar;*
- *d=1;*
- *while d<=dim-1;*
- *y(d)=2\*pi\*d/dim;*
- *Fb1(d)=F(d)\*sin(k\*y(d));*
- *Fa1(d)=F(d)\*cos(k\*y(d));*
- *d=d+1;*
- *end*
- *F0=mean(F);*
- *Fa(k)=1/pi\*sum(Fa1)\*y(1);*
- *Fb(k)=1/pi\*sum(Fb1)\*y(1);*
- *G(k)=sqrt(Fb(k)^2+Fa(k)^2);*
- *Fc(k)=atan(Fa(k)/Fb(k));*
- *end*
- *Fi0=0;*
- *As=[F0 G]; % Амплитудный спектр*
- *Fi=[Fi0 Fc]; % Фазовый спектр*

*axis normal*

*bar(0:nhar,As,0.45),colormap('hsv'),grid,title('Magnitude')*

*%Fi*

```

pause
hold off
VeFi=[[0:nhar]',Fi'];
bar(VeFi(:,1),180/pi*VeFi(:,2),0.45),colormap('winter'),grid,title('phase, degree')
pause
hold off
% Восстановление сигнала по спектрам
lFi=length(Fi);
yy=zeros(1,lt);
la1=1;
while la1<=lFi-1; yy1=G(la1)*sin(2*la1*pi*f0*t+Fc(la1));
yy=yy+yy1;
la1=la1+1;
end
plot(F,'b','LineWidth',3),grid
pause
hold on
pause(0.2)
plot(yy+F0*ones(1,dim+1),'r','LineWidth',3),title('initial(blue) & restored(red) signals')
pause
plot(yy(1:dim)-F,'k','LineWidth',3)
pause
hold off
% Энергетические параметры
сφ=cos(Fi(2));
Kdistor=As(2)/sqrt(sum(As(2:nhar).^2));
Kpower=сφ*Kdistor;
close allφφ
% Запись результатов анализа
dts=datestr(now);
fid3 = fopen('result_Fourier','W+');
fprintf(fid3,'\n Результаты гармонического анализа %s',dts);
fprintf(fid3,'\n-----');
fprintf(fid3,'%9X\n');
fprintf(fid3,'\n Частота сети (Гц) = %6.5g',f0);
fprintf(fid3,'\n Постоянная составляющая сигнала = %6.5g',As(1));
fprintf(fid3,'\n Амплитуда 1-й гармоники = %6.5g',As(2));
fprintf(fid3,'\n Косинус φи =
fprintf(fid3,'\n Коэффициент искажений = %6.5g',Kdistor);
fprintf(fid3,'\n Коэффициент мощности = %6.5g',Kpower);
fprintf(fid3,'\n-----\n');
fclose(fid3);
type result_Fourier

```

### Приложение 3

> # Файл Fit\_rect.mw.

> # Curve Fitting with Least Squares (метод наименьших квадратов)

```
# Очистка оперативной памяти
> restart: # Загрузка библиотек

> with(Statistics):

> with(plots):

> Digits := 15:

> with(Optimization):

> # Ввод данных (координат дискрет - выборка решётчатой функции по данным программы MATLAB)
> data1:=
> [[ 0.00252, -15.025 ],[ 0.00255, -14.042 ],[ 0.00258, -12.822 ],[ 0.00261, -11.402 0.00492, -
15.395 ],[ 0.00495, -15.605 ],[ 0.00498, -15.464 ]]:
> cd := convert(<(data1)>, list);
tmax := 0.32e-3; dt := cd[6, 1]-cd[5, 1]; dim := round(tmax/dt); 32000
# Базовая частота и аргумент
> f1 := 50000; Omega := 2*Pi*f1*t; 50000; 100000 Pi t;
> # Предполагаемое выражение аппроксимирующего полинома
p:=A*sin(Omega+phi1)+B*sin(3*Omega+phi3)+C*sin(7*Omega+phi7)+D*sin(9*Omega+phi9)+F*sin(
11*Omega+phi11);
# Редактируется исходя из свойств и структуры системы
residues := map((d2) -> eval(p, t=d2[1])-d2[2], data1): # Аппроксимация, метод наимень-
ших квадратов
sol := evalf(LSSolve(residues)); # Результат. Значения коэффициентов и фазовых углов
sol := [4.82580030898874*10^5, [A = 1077.27705492436, B = -512.359402915285, C =
95.4711928504727, D = .379774194682960, F = -48.4665111230846, phi1 = -49.6183595691286,
phi11 = 1.06845383415304, phi3 = -60.7578301731765, phi7 = -1.53013578514741, phi9 =
1.89950486389378]]:
> poly := eval(p, sol[2]); # Результат. Выражение восстановленного сигнала
poly := 1077.27705492436*sin(100000*Pi*t-49.6183595691286)-
512.359402915285*sin(300000*Pi*t-60.7578301731765)+95.4711928504727*sin(700000*Pi*t-
1.53013578514741)+.379774194682960*sin(900000*Pi*t+1.89950486389378)-
48.4665111230846*sin(1100000*Pi*t+1.06845383415304):
# Графики
F1 := plot(poly, t = 0.3e-3 .. tmax, style = line, thickness = 2, axes = boxed, axis = [gridlines =
15], legend = ["Восстановленный сигнал"]);
F2 := plot(data1, color = "BlueViolet", style = point, symbol = soliddiamond, symbolsize = 10,
thickness = 35, axes = boxed, axis = [gridlines = 15], legend = ["Исходный сигнал"]);
display(F1, F2);
```

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Цыпкин Я.З. Теория линейных импульсных систем / Я.З. Цыпкин. М.: Физматгиз, 1953. 968 с.
2. Худяков В.Ф. Моделирование источников вторичного электропитания в среде MATLAB / В.Ф. Худяков, В.А. Хабuzов. СПб.: Ред.-изд. центр ГУАП, 2008.
3. Матросов А.В. MAPLE 6. Решение задач высшей математики и механики / А.В. Матросов. СПб.: БХВ-Петербург, 2001. 528 с.
4. [https://ru.wikipedia/wiki/Теорема Котельникова](https://ru.wikipedia/wiki/Теорема_Котельникова).

**Кошелев Пётр Александрович** – доктор технических наук, профессор Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета

**Pyotr A. Koshelev** – Dr. Sc., Professor, St. Petersburg State Electrotechnical University

**Парамонов Сергей Владимирович** – кандидат технических наук, доцент Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета

**Sergey V. Paramonov** – PhD, Associate Professor, St. Petersburg State Electrotechnical University

*Статья поступила в редакцию 10.08.19, принята к опубликованию 15.09.19*

УДК 621.314

## ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ МАГНЕТРОНА С КОМБИНИРОВАННОЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМОЙ ПРИ КОЛЕБАНИЯХ СЕТЕВОГО НАПРЯЖЕНИЯ

**И.И. Артюхов, А.И. Земцов, А.И. Борисенко**

## TRANSITION PROCESSES IN THE MAGNETRON POWER SUPPLY SYSTEM WITH A COMBINED MAGNETIC SYSTEM AT LINE VOLTAGE FLUCTUATIONS

**I.I. Artyukhov, A.I. Zemtsov, A.I. Borisenko**

*Для создания мощных генераторов СВЧ электромагнитных колебаний перспективным является применение магнетронов с комбинированной магнитной системой. Эти приборы имеют кроме постоянных магнитов дополнительные электромагниты. Благодаря этому магнетроны приобретают эксплуатационные характеристики, которые позволяют существенно упростить систему электропитания промышленной установки СВЧ нагрева. Однако исследования источников питания магнетронов с комбинированной магнитной системой практически отсутствуют. В статье рассматриваются особенности построения источников питания таких магнетронов. Для исследования динамиче-*

*To create powerful microwave oscillation generators, the use of magnetrons with a combined magnetic system is a long-range objective. Apart from permanent magnets, these devices have additional electromagnets. As a result, the magnetrons acquire unique operational characteristics that can significantly simplify the power supply system of an industrial microwave heating installation. However, there are few investigations into magnetron power supplies having a combined magnetic system. The article discusses particular issues associated with designing power sources for such magnetrons. To study the dynamic power supply modes, a simulation model has been developed in the Matlab environment with the Simulink extension package. The simulation*



*ских режимов источника питания разработана имитационная модель в среде Matlab с пакетом расширения Simulink. Результаты моделирования приведены для источника питания магнетрона мощностью 6 кВт.*

*Ключевые слова: магнетрон, дополнительный электромагнит, система электропитания, переходные процессы, имитационное моделирование*

СВЧ диэлектрический нагрев позволяет эффективно реализовывать широкий спектр технологий. Основные преимущества использования СВЧ энергии в термических процессах обусловлены особенностями ее поглощения. Энергия СВЧ электромагнитных колебаний преобразуется в теплоту внутри вещества, что приводит к значительной экономии энергии и сокращению времени процессов [1]. Прогресс в разработке СВЧ генераторов и хорошее поглощение СВЧ энергий многими материалами привели к созданию промышленных установок для различных технологических процессов [2-4].

СВЧ электротехнологическая установка представляет собой сложную систему, в процессе работы которой необходимо распределить СВЧ энергию, вырабатываемую одним или несколькими СВЧ генераторами согласно заданным требованиям [5, 6]. Выбор способа распределения зависит от целого ряда параметров, которые определяются технологическим процессом обработки исходного материала.

Для построения источников СВЧ энергии в настоящее время имеется широкая гамма электронных приборов. В установках небольшой мощности наиболее часто применяют пакетированные магнетроны (со встроенными магнитами). Для мощных установок (десятки и даже сотни киловатт) больше подходят магнетроны с электромагнитами. Известны также магнетроны с комбинированной магнитной системой, например [7], в которых постоянные магниты дополняются электромагнитами.

В настоящее время наиболее хорошо разработана теория источников питания

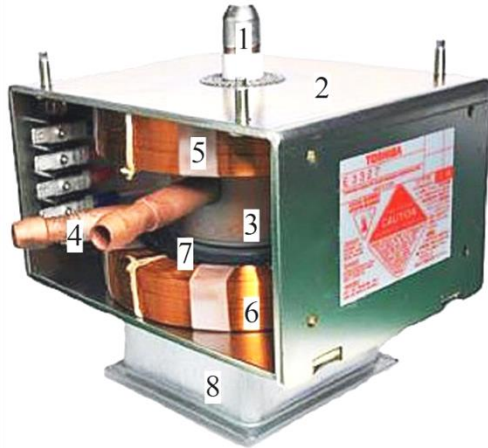
*results are provided for the 6 kW magnetron power source.*

*Keywords: magnetron, sub-electromagnet, power supply system, dynamic modes, simulation*

для пакетированных магнетронов, особенно для магнетронов малой мощности [8-10]. Этот факт объясняется широким применением таких магнетронов в бытовых СВЧ печах. Особенности построения источников питания для пакетированных магнетронов промышленного назначения рассмотрены в работах [11, 12]. Существенно меньше работ по источникам питания магнетронов средней и большой мощности, в которых изменение режима работы производится за счет изменения индукции магнитного поля. Вопросы построения источников питания для магнетронов с электромагнитами рассмотрены в работе [13]. Исследования источников питания магнетронов с комбинированной магнитной системой практически отсутствуют. Возможно, это объясняется тем, что такие магнетроны относительно недавно появились на рынке электровакуумных приборов и пока не нашли широкого применения. Однако эти приборы имеют уникальные эксплуатационные характеристики, которые позволяют существенно упростить систему электропитания. Так что изучение особенностей электропитания магнетронов с комбинированной магнитной системой и управления режимами их работы имеет научный и практический интерес. Отдельный интерес представляет рассмотрение переходных процессов в системе электропитания магнетрона при колебаниях напряжения сети.

Магнетрон с комбинированной магнитной системой имеет в своей основе конструкцию пакетированного магнетрона, в котором для управления выходной мощностью установлен дополнительный электромагнит. На рис. 1 показан магнетрон

Е3327 фирмы Toshiba [7]. Генерируемая СВЧ энергия подается в прямоугольный волновод или непосредственно в печь. Фильтр нижних частот для подавления побочных утечек из катодного стержня установлен в корпусе фильтра.



**Рис. 1.** Магнетрон Е3327: 1 – антенна; 2 – монтажная пластина; 3 – анод; 4 – штуцеры водяного охлаждения; 5, 6 – электромагнит; 7 – постоянный магнит; 8 – коробка с фильтром радиопомех и выводами для подключения катода

Выходные характеристики магнетрона представлены на рис. 2. Максимальная выходная мощность магнетрона Е3327 на частоте 2450 МГц достигает 6 кВт. Изменение тока электромагнита в пределах от 4 до 3 А позволяет изменять индукцию магнитного поля и соответствующим образом режим работы магнетрона.

Перед подачей анодного напряжения на магнетрон Е3327 необходимо в течение 10 секунд осуществить предварительный нагрев катода. Напряжение накала в процессе предварительного нагрева составляет 4,5 В. Затем при выводе на максимальную мощность это напряжение должно снижаться до нуля в соответствии с графиком на рис. 3.

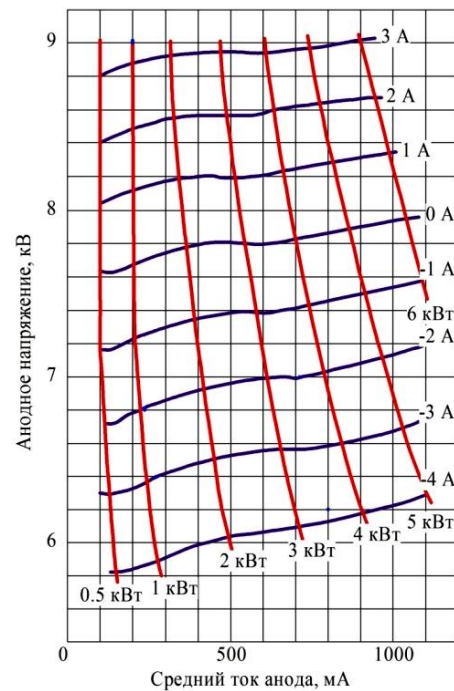
Эксплуатация магнетрона Е3327 требует двух систем охлаждения. Водяное охлаждение применяется для анода, принудительное воздушное – для блока, где размещается фильтр для защиты от радиопомех.

Режим работы магнетрона по анодной цепи определяется точкой пересечения

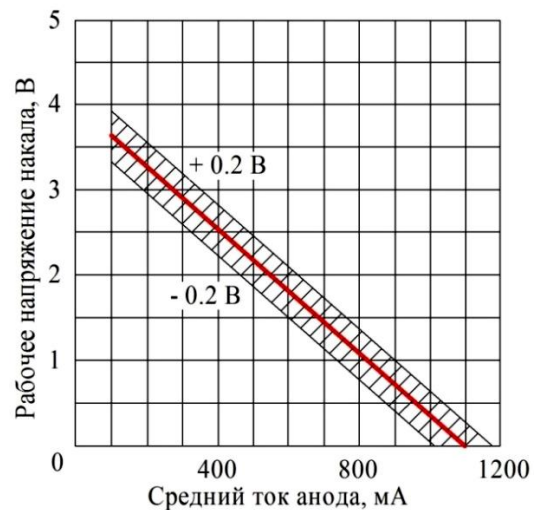
вольт-амперной характеристики (ВАХ) магнетрона и внешней характеристики источника анодного питания [11]. ВАХ магнетрона при кусочно-линейной аппроксимации имеет вид:

$$U_a = R_{dyn} \cdot I_a + U_0, \quad (1)$$

где  $U_a$ ,  $I_a$  – анодное напряжение и ток магнетрона;  $R_{dyn}$ ,  $U_0$  – динамическое сопротивление и пороговое напряжение соответственно.



**Рис. 2.** Выходные характеристики магнетрона Е3327



**Рис. 3.** Зависимость напряжения накала от среднего значения анодного тока

Внешняя характеристика источника анодного питания может быть представлена следующим образом:

$$U_a = E - R_s I_a \quad (2)$$

где  $E$ ,  $R_s$  – соответственно ЭДС и внутреннее сопротивление источника анодного питания.

Из (1) и (2) получаем выражение для определения анодного тока

$$I_a = \frac{E - U_0}{R_s + R_{dyn}} \quad (3)$$

В магнетронах пакетированного типа величина порогового напряжения  $U_0$  является фиксированной величиной, поэтому величину анодного тока в соответствии с соотношением (3) можно регулировать за счет изменения ЭДС источника питания или его внутреннего сопротивления [12].

В магнетронах с комбинированной магнитной системой имеется возможность изменять величину порогового напряжения  $U_0$  изменением тока электромагнита  $I_{эм}$ , вследствие чего изменяется магнитная индукция и происходит вертикальное перемещение ВАХ магнетрона. Выходная мощность магнетрона для заданных значений напряжения и тока  $U_a$ ,  $I_a$  анодной цепи, а также тока  $I_{эм}$  электромагнита определяется диаграммой на рис. 2.

Структурная схема системы электропитания магнетрона с комбинированной магнитной системой показана на рис. 4. Источником анодного напряжения является высоковольтный выпрямитель, который подключен к вторичной обмотке повышающего трансформатора ТА. Первичная обмотка этого трансформатора через фильтр электромагнитной совместимости соединена с питающей сетью.

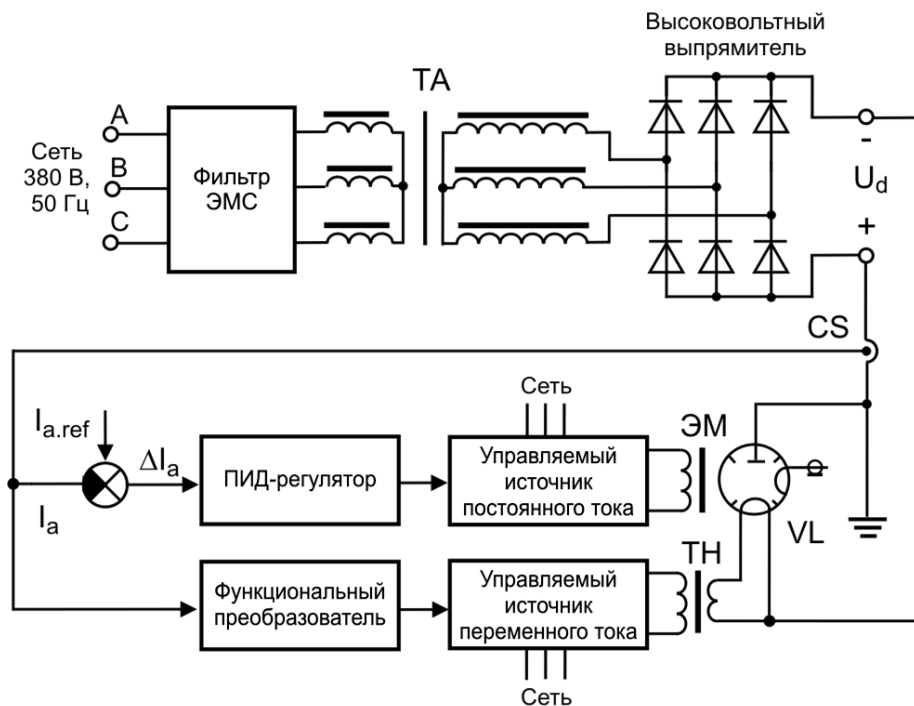


Рис. 4. Система электропитания магнетрона с комбинированной магнитной системой

Электромагнит ЭМ подключен к выходу управляемого источника постоянного тока. Значение тока электромагнита  $I_{эм}$  задается ПИД-регулятором, на вход которого с выхода элемента сравнения подается сигнал ошибки

$$\Delta I_a = I_a - I_{a.ref} \quad (4)$$

где  $I_a$ ,  $I_{a.ref}$  – измеренное и заданное значения анодного тока.

Управляемый источник постоянного тока может быть выполнен в виде выпрямителя, к выходу которого подключен биполярный широтно-импульсный преобразователь постоянного тока.

Нагрев катода осуществляется с помощью трансформатора ТН с первичной обмоткой, подключенной к управляемому источнику переменного тока.

Информация о токе анода  $I_a$  подается на вход функционального преобразователя, который формирует управляющий сигнал для источника питания накаливания в соответствии с графиком на рис. 3.

Система электропитания магнетрона должна обеспечивать заданный режим его работы при всех возможных отклонениях напряжения в сети от номинального значения. Действующий стандарт на качество электрической энергии допускает отклонения напряжения в сети в пределах  $\pm 10\%$  от номинального значения [14], поэтому возможны соответствующие отклонения расчетной величины ЭДС источника анодного напряжения, так как для трехфазного мостового выпрямителя с входным трансформатором

$$E = \frac{3\sqrt{2}}{\pi \cdot k} \cdot U, \quad (5)$$

где  $U$  – действующее значение напряжения в сети;  $k$  – коэффициент трансформации.

При этом внутреннее сопротивление источника в виде диодного выпрямителя при углах коммутации, не превышающих  $\pi/3$ , определяется по соотношению

$$R_s = \frac{3}{\pi} \omega L_0 + 2 \cdot R_0, \quad (6)$$

где  $\omega L_0$ ,  $R_0$  – соответственно индуктивное и активное сопротивление на входе выпрямителя.

Отклонения сетевого напряжения стремятся изменить заданное значение анодного тока. Однако за счет действия замкнутого контура регулирования происходит восстановление заданного режима. Резкие колебания сетевого напряжения могут приводить к развитию переходных процессов, во время которых наблюдаются существенные отклонения анодного тока от заданного значения.

Из (3) с учетом (5) и (6) можно получить выражение, характеризующее чувствитель-

ность анодного тока к колебаниям сетевого напряжения

$$\frac{\partial I_a}{\partial U} = \frac{3\sqrt{2}}{k(3\omega L_0 + 2\pi R_0 + \pi R_{dyn})}. \quad (7)$$

Из соотношения (7) следует, что чувствительность анодного тока к колебаниям сетевого напряжения для заданного значения динамического сопротивления  $R_{dyn}$  определяется величиной внутреннего сопротивления  $R_s$  источника анодного напряжения.

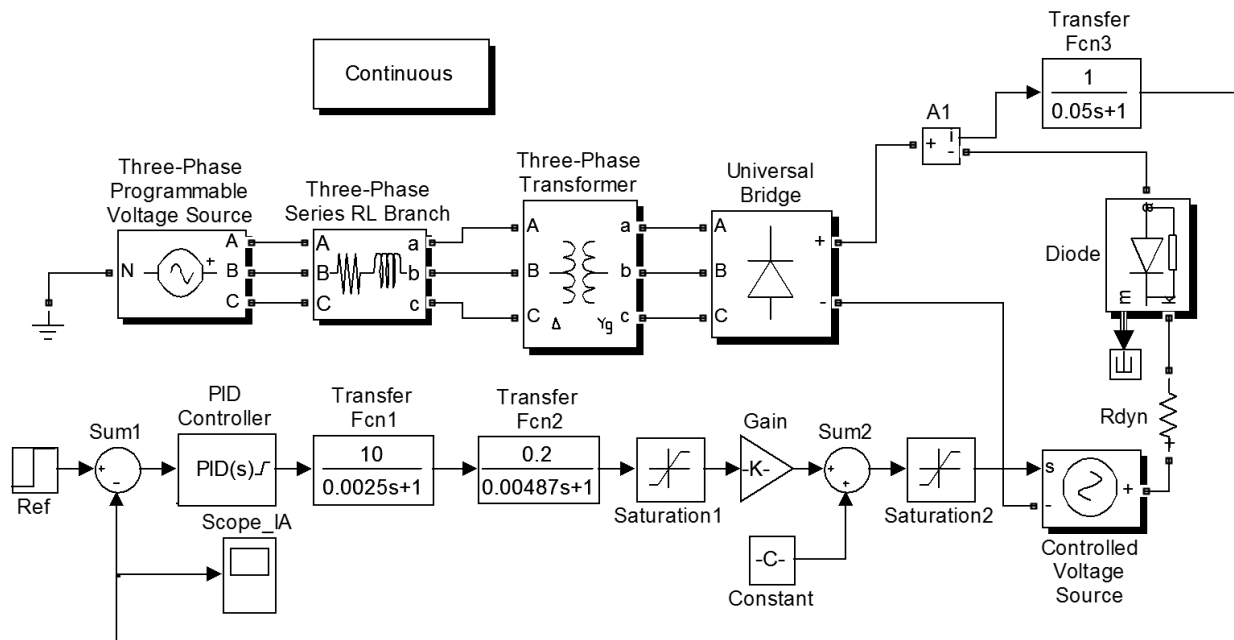
Детальное исследование переходных процессов в системе электропитания магнетрона представляет собой довольно сложную задачу, так как математическая модель данного электротехнического комплекса представляет собой систему нелинейных дифференциальных уравнений высокого порядка, поэтому в рассматриваемом случае целесообразно применить имитационное моделирование в среде MATLAB с пакетом расширения Simulink [15].

Схема модели показана на рис. 5 и включает следующие основные элементы. Питающая сеть смоделирована блоками *Three-Phase Programmable Voltage Source* и *Three-Phase Series RL Branch*. Источник анодного напряжения представляют блоки *Three-Phase Transformer u Universal Bridge*. Параметры блоков, моделирующих силовую часть системы электропитания, приведены в таблице.

Модель магнетрона с комбинированной магнитной системой должна иметь компоненты, позволяющие учитывать влияние тока электромагнита  $I_{эм}$  на характеристики магнетрона. При моделировании магнетрона это обстоятельство может быть учтено введением зависимости порогового напряжения  $U_0$  от тока электромагнита  $I_{эм}$ . В первом приближении такая зависимость имеет вид:

$$U_0 = U(0) + K \cdot I_{эм}, \quad (8)$$

где  $U(0)$  – константа, представляющая собой пороговое напряжение при нулевом токе электромагнита;  $K$  – эмпирический коэффициент.



**Рис. 5.** Имитационная модель системы электропитания магнетрона с комбинированной магнитной системой

#### Параметры блоков имитационной модели

| Название блока                                 | Параметры блоков                |                   |                   |
|------------------------------------------------|---------------------------------|-------------------|-------------------|
|                                                | Параметр                        | Значение          | Единица измерения |
| <i>Three-Phase Programmable Voltage Source</i> | Номинальное линейное напряжение | 380               | В                 |
|                                                | Частота                         | 50                | Гц                |
| <i>Three-Phase Series RL Branch</i>            | Активное сопротивление          | 0,02              | Ом                |
|                                                | Индуктивность                   | $10^{-4}$         | Гн                |
| <i>Three-Phase Transformer</i>                 | Номинальная мощность            | 10                | кВА               |
|                                                | Параметры обмотки 1             |                   |                   |
|                                                | Номинальное линейное напряжение | 380               | В                 |
|                                                | Активное сопротивление обмотки  | 0.2               | Ом                |
|                                                | Индуктивность рассеяния         | $6 \cdot 10^{-4}$ | Гн                |
|                                                | Параметры обмотки 2             |                   |                   |
|                                                | Номинальное линейное напряжение | 6000              | В                 |
|                                                | Активное сопротивление обмотки  | 30                | Ом                |
|                                                | Индуктивность рассеяния         | 0,75              | Гн                |
|                                                | Параметры цепи намагничивания   |                   |                   |
|                                                | Активное сопротивление          | 1600              | Ом                |
|                                                | Индуктивность                   | 2                 | Гн                |

Объединение формул (3) и (8) позволяет получить зависимость анодного тока магнетрона от тока электромагнита.

В схеме на рис. 5 модель магнетрона состоит из последовательно соединенных блоков *Diode*, *Rdyn* и *Controlled Voltage*

Source. Для моделирования зависимости порогового напряжения  $U_0$  от тока электромагнита  $I_{эм}$  в схему модели введены блоки *Gain*, *Constant*, *Sum2* и *Saturation2*.

Для магнетрона Е3327 на основании анализа его характеристик получены следующие значения параметров:  $U(0) = 7414$  В;  $K = 428,5$  В/А. Эти значения параметров записывают в окна настройки блоков *Gain* и *Constant* соответственно. Блок *Saturation2* устанавливает нижнее и верхнее значения порогового напряжения  $U_0$ . В соответствии с графиками на рис. 2 эти значения имеют величины 5400 В и 8700 В.

Для измерения анодного тока служит блок *A1*, выходной сигнал которого через блок *Transfer Fcn3*, имитирующий фильтр низких частот, подается на один из входов элемента сравнения (блок *Sum1*). На другой вход этого элемента поступает сигнал с блока *Ref*, задающий требуемое значение анодного тока. В результате формируется сигнал ошибки, который обрабатывается ПИД-регулятором.

Передаточная функция ПИД-регулятора имеет вид:

$$W(p) = KP + \frac{KI}{p} + KD \cdot p, \quad (9)$$

где  $KI$ ,  $KP$  и  $KD$  – коэффициенты, которые задаются в окне настройки блока.

Управляемый источник постоянного тока представлен апериодическим звеном первого порядка (блок *Transfer Fcn1*). Электромагнит моделируется блоками *Transfer Fcn2* и *Saturation1*, который ограничивает значения тока электромагнита в соответствии с графиками на рис. 2. Постоянная времени блока *Transfer Fcn2* определяется по формуле

$$T_2 = L_{эм} / R_{эм}, \quad (10)$$

где  $L_{эм}$ ,  $R_{эм}$  – индуктивность и активное сопротивление электромагнита.

В технических характеристиках магнетрона Е3327 указано, что  $L_{эм} = 20$  мН,  $R_{эм} = 4,1$  Ом, поэтому в соответствии с (10) постоянная времени  $T_2 = 4,87 \cdot 10^{-3}$  с.

На рис. 6 и 7 представлены графики изменения анодного тока в переходных режимах, возникающих при резком изменении сетевого напряжения. Предполагалось, что начальное значение сетевого напряжения равно номинальному значению 380 В, при этом магнетрон выведен на режим, при котором анодный ток составляет 0,8 А. Затем на 1-й секунде происходило ступенчатое увеличение (уменьшение) сетевого напряжения на 10% относительно номинального значения. Через 3 секунды сетевое напряжение возвращалось до номинального значения. Коэффициенты ПИД-регулятора  $KI = 4$ ;  $KD = 0$ .

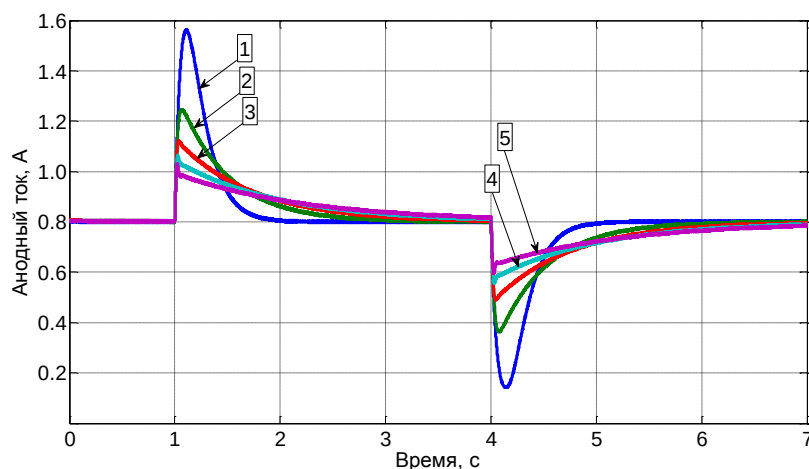
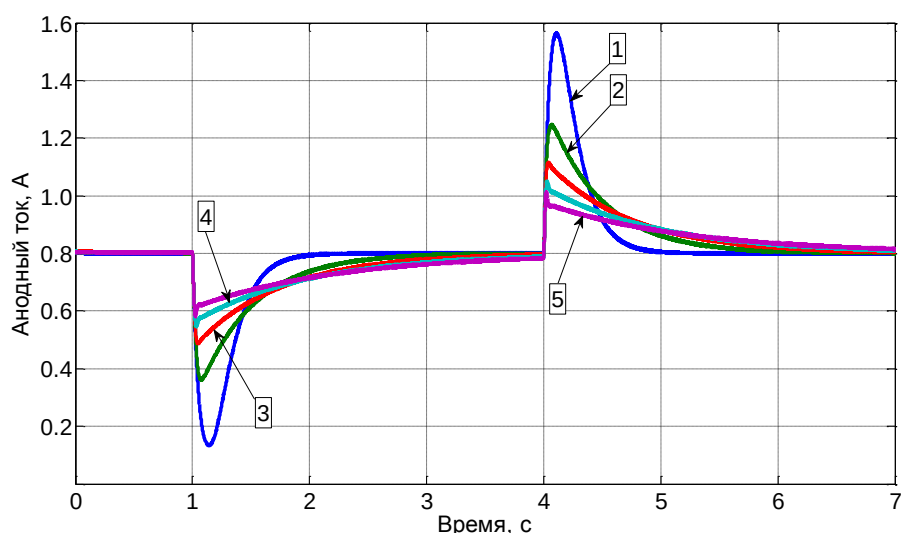


Рис. 6. Переходный процесс при кратковременном увеличении сетевого напряжения на 10%  $KI = 4$ .  $KP = 0$ (1), 1(2), 2(3), 3(4), 4(5)



**Рис. 7.** Переходный процесс при кратковременном уменьшении сетевого напряжения на 10%  $KI = 4$ .  $KP = 0(1), 1(2), 2(3), 3(4), 4(5)$

Из графиков на рис. 6 и 7 видно, что в результате возмущающего воздействия происходит кратковременное отклонение анодного тока от заданного значения. Однако за счет изменения тока электромагнита и соответствующего изменения индукции магнитного поля в системе восстанавливается заданное значение тока.

При этом на качество переходных процессов существенное влияние оказывает величина коэффициента  $KP$ . При  $KP = 0$  перерегулирование при ступенчатом изменении сетевого напряжения приближается к 100%. Увеличение коэффициента  $KP$  приводит к уменьшению перерегулирования. При  $KP = 4$  перерегулирование составляет 25%.

Исследования системы электропитания магнетрона с комбинированной магнитной системой, проведенные с помощью имита-

ционной модели, показали также, что стремление улучшить качество переходных процессов при колебаниях напряжения питающей сети за счет подбора коэффициента  $KD$  не приводит к желаемому результату. Более того, при определенном значении этого коэффициента возникают автоколебания, которые нарушают работу системы. Поэтому целесообразным представляется решение, в соответствии с которым будет осуществляться стабилизация источника анодного напряжения при отклонениях сетевого напряжения. Таким решением является построение источника анодного напряжения по схеме с промежуточным звеном повышенной частоты. Это, с одной стороны, позволит осуществить стабилизацию анодного напряжения, с другой стороны, существенно улучшить массогабаритные показатели системы электропитания.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Okress E.** Microwave Power Engineering / E. Okress. Vol. 1. New York: Acad. Press, 1968.
2. **Архангельский Ю.С.** Справочная книга по СВЧ электротермии: справочник / Ю.С. Архангельский. Саратов: Научная книга, 2011. 560 с.
3. Massalfa Microwave. <http://www.massalfa.org/factory-22110-microwave-dryer>.
4. **Puangsuwan K.** Design of microwave heating continuous belt system for palm fruit / K. Puangsuwan, C. Tongurai, M. Chongcheawchamnan // 2015 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC). P. 1-3. DOI: 10.1109/APMC.2015.7413502.
5. **Methlouthi A.** Microwave Applicator with Conveyor Belt System / A. Methlouthi, O. Rouaud, L. Boillereaux // Proceedings of

the COMSOL Conference. Paris, 2010. [https://www.comsol.fi/paper/download/63600/methlouthi\\_paper.pdf](https://www.comsol.fi/paper/download/63600/methlouthi_paper.pdf)

6. **Артюхов И.И.** Направления совершенствования мультигенераторных СВЧ электротехнологических установок / И.И. Артюхов, А.И. Земцов // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. № 3 (34). С. 149-154.

7. TOSHIBA Industrial Magnetron E3327. [http://www.hokuto.co.jp/eng/products/ind\\_magnetron/pdf/E3327\\_E.pdf](http://www.hokuto.co.jp/eng/products/ind_magnetron/pdf/E3327_E.pdf).

8. **Surducu V.** Variable power, short microwave pulses generation using a CW magnetron / V. Surducu, E. Surducu, R. Ciupa // Advances in Electrical and Computer Engineering. 2011. Vol. 11. Iss. 2. P. 49-54. DOI: 10.4316/AECE.2011.02008.

9. **Артюхов И.И.** О подходе к моделированию магнетронного генератора малой мощности / И.И. Артюхов, А.И. Земцов, А.Г. Сошинов // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2012. № 2 (66). С. 20-27.

10. Modeling and Simulation of a Low Power Magnetron as an Element of Electrical System / A.I. Zemtsov, I.I. Artyukhov, S.F. Stepanov et al. // 28th International Conference Radioelektronika 2018. DOI: 10.1109/RADIOELEK.2018.8376358.

11. **Артюхов И.И.** Имитационная модель регулируемого источника анодного

напряжения для пакетированного магнетрона промышленного назначения / И.И. Артюхов, А.И. Земцов, Е.С. Гордеев // Вопросы электротехнологии. 2016. № 4 (13). С. 33-38.

12. **Zemtsov A.I.** Power supply system for industrial packaged magnetrons group / A.I. Zemtsov, I.I. Artyukhov // 29th International Conference Radioelektronika 2019 – Microwave and Radio Electronics Week, MAREW 2019. DOI: 10.1109/RADIOELEK.2019.8733579.

13. Development and optimization of high-voltage power supply system for industrial magnetron / S.R. Jang, H.J. Ryoo, S.H. Ahn et al. // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2012. Vol. 59. Iss. 3. P. 1453-1461. DOI: 10.1109/TIE.2011.2163915.

14. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014. 16 с.

15. **Артюхов И.И.** Моделирование источника питания магнетрона с комбинированной магнитной системой / И.И. Артюхов, А.И. Борисенко, А.И. Земцов // Проблемы управления, обработки и передачи информации (УОПИ-2018): сб. тр. VI Междунар. науч. конф. Саратов, 2019. С. 372-375.

**Артюхов Иван Иванович** – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Земцов Артем Иванович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» филиала Самарского государственного технического университета в г. Сызрани, докторант кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Ivan I. Artyukhov** – Dr.Sc., Professor, Department of Power Engineering and Electrical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Artem I. Zemtsov** – Ph.D., Associate Professor, Department of Power Supply for Industrial Enterprises, Part of Samara State Technical University in Syzran, Doctoral Candidate of the Department of Power Engineering and Electrical Engineering at Yuri Gagarin State Technical University of Saratov



**Борисенко Александр Игоревич** – студент магистратуры кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Alexander I. Borisenko** – Master Student, Department of Power Engineering and Electrical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

*Статья поступила в редакцию 21.07.19, принята к опубликованию 15.09.19*

УДК 621.311, 621.315

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ УГЛЕДОБЫЧИ ПРИ НЕРАВНОМЕРНОМ ГРАФИКЕ НАГРУЗКИ СИСТЕМЫ**

**Н.Д. Сенчило**

### **USING DISTRIBUTED GENERATION AT COAL MINING ENTERPRISES UNDER UNEVEN LOAD CURVE OF THE SYSTEM**

**N.D. Senchilo**

*Исследование мировых тенденций развития электроэнергетики показывает, что в ближайшее время энергетика Российской Федерации столкнется с проблемами морального и физического устаревания оборудования передачи и распределения электроэнергии, а также с необходимостью интеграции альтернативной энергетики в существующую электроэнергетическую систему с сохранением надежности электроснабжения потребителей и упрощением процесса технологического присоединения новых потребителей. Учитывая вышесказанное, весьма актуален вопрос интеграции в существующую энергосистему новых решений, таких как источники распределенной генерации на предприятия – крупные потребители электроэнергии. Немаловажен в данном вопросе опыт зарубежных энергосистем, Китая, опыт которого в использовании альтернативных источников генерации может помочь решить множество вызовов, которые бросает нам сегодня электроэнергетическая отрасль, основными из которых*

*A study of global trends in the development of the electric power industry shows that in the near future the power industry of the Russian Federation will face such problems as moral and physical obsolescence of power transmission and distribution equipment, including the need to integrate alternative energy sources into the existing electric power system while maintaining reliability of power supply and simplifying the process of incorporation new consumers.*

*Taking into account aforesaid, there is a challenging issue related with integration of advanced decisions, such as sources of distributed generation to enterprises as large consumers of electric power. Experience of using the grids outside Russia is significant, in particular, the China experience where application of alternative sources of generation can be effective in solving an array of*

являются: решение актуальной проблемы снижения углеродоёмкости ВВП (декарбонизация), увеличение доли распределенной генерации в общей генерируемой мощности (децентрализация) и глубокая трансформация производства, подразумевающая использование цифровых технологий для оптимизации бизнес-процессов и технологии производства (диджитализация). Перед развитыми и развивающимися странами остро стоит вопрос модернизации электроэнергетической системы и внедрения новых источников генерации, в первую очередь возобновляемых, таких как ветрогенерация и солнечная генерация, которые могут стать решением указанных выше для электроэнергетической отрасли страны. В статье проанализирован процесс внедрения источников распределенной генерации на промышленном предприятии угледобычи, что способствует повышению экономической эффективности производства за счет снижения стоимости потребляемой электроэнергии, а также повышению надежности электроснабжения путем снижения влияния внешних системных факторов на процесс электроснабжения предприятия. Актуальность статьи обусловлена тем, что процесс постепенного внедрения альтернативной генерации влечёт за собой определенные вызовы для электроэнергетики, которые требуют современных и эффективных решений.

*Ключевые слова:* альтернативные источники энергии, распределенная энергетика, угледобыча, ветрогенерация, солнечная генерация, энергетическая эффективность, децентрализация, декарбонизация, диджитализация, активноадаптивные сети, энергосистема Китая

В последние годы отмечается существенный рост внешнеторгового оборота между Россией и Китаем, обусловленный прежде всего увеличением поставок энергоресурсов («Положение об организации оперативно-диспетчерского управления совместной работы энергосистем ЕЭС России и ЭС Китая по межгосударственной ВЛ 500 кВ Амурская – Хэйхэ» от 09.11.2011 между Северо-Восточным ЦДС КНР и Филиалом ОАО «СО ЕЭС» ОДУ Востока).

problems in electric energy industry, including the following: decarbonization, decentralization and digitalization.

Currently, the developed and developing countries require modernization of their power systems and introduction of new sources of generation, primarily renewable sources, such as wind and solar power that can help in resolving the problems faced by the power industry of a country.

This article analyzes the process of introducing distributed generation sources to an industrial coal mining enterprise, which contributes to an increase in economic efficiency of an industry due to reduction of costs for electricity consumption, as well as improves reliability of power supply by reducing the influence of external system factors on an enterprise's power supply process. The relevance of the article is also due to the fact that the process of gradual introduction of alternative generation entails certain challenges for the power industry, which requires modern and efficient solutions.

*Keywords:* alternative power sources, distributed generation, coal mining, wind energy, solar energy, energy efficiency, decentralization, decarbonization, digitalization, Smart grid, Chinese power energy

Развивается также сотрудничество с КНР в сфере атомной энергетики: В соответствии с подписанными контрактами от 08.06.2018 российская сторона будет проектировать так называемый «ядерный остров» станции, а также поставит ключевое оборудование «ядерного острова» для новых блоков как Тяньваньской АЭС, так и АЭС «Сюйдапу». Пуск блока № 7 Тяньваньской АЭС запланирован на 2026 год, блока № 8 – на 2027 год. Пуск блоков № 3 и

№ 4 АЭС «Сюйдапу» запланирован на 2028 год [1].

Немаловажным фактом также остается то, что Китай на сегодняшний день является одним из мировых лидеров по объемам вводимых в работу мощностей возобновляемой энергетики (солнечные и ветрогенераторы).

По состоянию на 2018 год [2] в КНР существует следующее разделение по типам мощности, передаваемой через сети государственной электросетевой компании КНР «State Grid Corporation of China» (табл. 1-3).

Таблица 1

Распределение мощностей в КНР

| Тип энергоносителя | Мощность, ГВт | Процент, % |
|--------------------|---------------|------------|
| Уголь              | 791           | 57.3       |
| Вода               | 224           | 16.3       |
| Газ                | 98            | 12.6       |
| Ядерное топливо    | 22            | 1.6        |
| Солнце             | 11            | 8.3        |
| Ветер              | 129           | 9.3        |

Таблица 2

Северная часть Китая

| Тип энергоносителя | Мощность, ГВт | Процент, % |
|--------------------|---------------|------------|
| Уголь              | 130           | 53.8       |
| Вода               | 31            | 12.9       |
| Газ                | 0             | 0          |
| Ядерное топливо    | 0             | 0          |
| Солнце             | 45            | 14.65      |
| Ветер              | 35            | 18.54      |

Таблица 3

Восточная часть Китая

| Тип энергоносителя | Мощность, ГВт | Процент, % |
|--------------------|---------------|------------|
| Уголь              | 259           | 67.4       |
| Вода               | 30            | 8.74       |
| Газ                | 25            | 7.2        |
| Ядерное топливо    | 17            | 4.9        |
| Солнце             | 28            | 7.92       |
| Ветер              | 13            | 3.82       |

К 2020 году страна планирует довести мощность ГЭС до 340 ГВт, ГАЭС до 40 ГВт, ВЭС до 240 ГВт, СЭС до 110 ГВт, АЭС до 58 ГВт [2].

Учитывая такие темпы роста вводимых мощностей и тесное сотрудничество Российской Федерации и Китайской Народной Республики, обмен опытом эксплуатации объектов электроэнергетики имеет огромное значение для развития электроэнергетики нашей страны.

Основная проблема, с которой сталкивается электросетевая компания Китая при использовании значительных мощностей

солнечной и ветряной генерации, это обеспечение устойчивости электроэнергетической системы, так как основной проблемой альтернативной энергетики является отсутствие стабильной генерации в течение суток. Пик выработки солнечной энергии приходится на полдень, когда использование электроэнергии мало, а пик выработки электроэнергии ветрогенераторами приходится на позднюю ночь. Накопителей электрической энергии для обеспечения запаса в таких объемах энергии на сегодняшний день в Китае не существует (табл. 4) [2].

Таблица 4

Данные о накопителях электрической энергии в Восточной части КНР

| Вид накопителей ЭЭ                                                | Мощность, МВт |
|-------------------------------------------------------------------|---------------|
| Гравитационные накопители (потенциальная энергия в электричество) | 9800          |
| Твердотельные накопители (конденсаторные батареи)                 | 150           |

На основании данных программы перспективного развития китайской энергосистемы [2] получено графическое изображение

суточного графика нагрузки и потребления для провинции Сучжоу в Юго-Восточной части Китая (рис. 1).

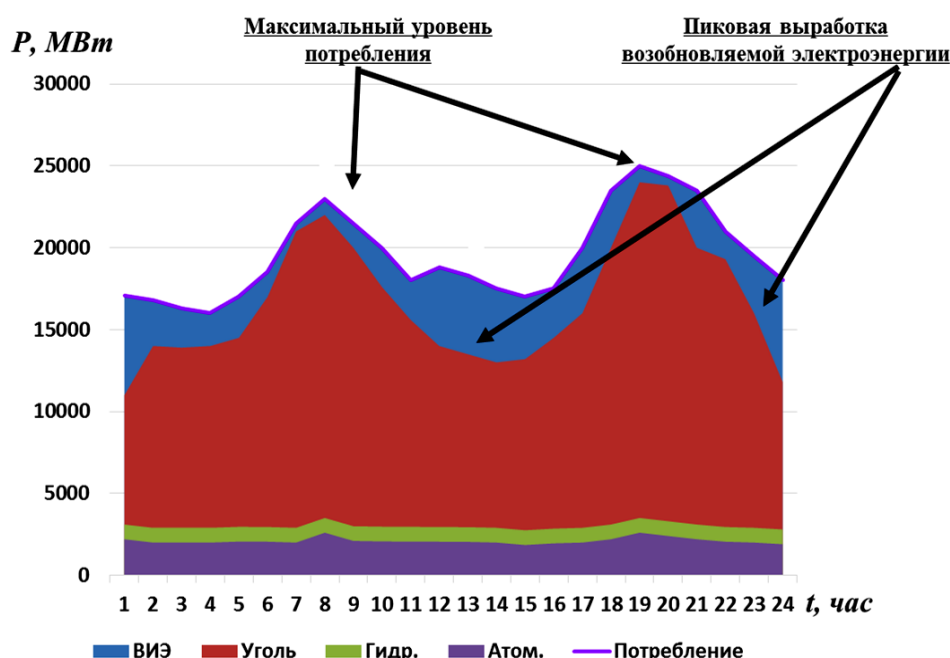


Рис. 1. Среднесуточная кривая нагрузки

Проанализировав график, представленный на рис. 1, можно сделать вывод о том, что в часы пикового потребления электро-

энергии (с 6 до 9 часов и с 17 до 21 часа) неравномерность графика наиболее явная, так как в эти часы снижается выработка

электроэнергии источниками альтернативной генерации по естественным причинам, и нагрузка переносится на источники традиционной генерации, что увеличивает стоимость производимой энергии.

Город Суджоу провинции Цзянсу является хорошим примером для анализа режима потребления и проблем, связанных с увеличением процента альтернативной энергии в общей доле потребляемой мощности, так как сам город расположен в восточной части Китая, в то время как массовая генерация ветряной электроэнергии ввиду климатических особенностей Китая находится в Северо-Западной части страны. Ввиду удаленности генерации от потребления пики вырабатываемой и потребляемой мощности не совпадают, так как КНР занимает 4 часовых пояса и во время наибольшего потребления электроэнергии, когда нагрузка коммунально-бытового сектора растет в вечернее время, в северо-западной части Китая падает выработка солнечной и ветряной электроэнергии.

В связи с несовпадением пиков генерации и потребления электрической энергии система становится неустойчивой.

Однако в отличие от крупных промышленных предприятий суточный график нагрузок коммунально-бытового сектора зачастую оказывается неравномерным, а в условиях высокой доли применения источников альтернативной генерации суточный график нагрузки энергосистемы также становится неравномерным. Следовательно, одним из возможных решений по выравниванию графика нагрузки энергосистемы является разделение потребителей и генерации по типу нагрузки и графика потребления электроэнергии. Учитывая неравномерность электропотребления частного сектора, существует множество технологий для выравнивания графика потребления за счет соответствия потребления электроэнергии потребителями жилого сектора в часы максимальной выработки энергии альтернативной генерации, что является самым эффективным способом использования данного вида энергии [3, 4]. Однако часть промышленных потребителей

работает по заранее утвержденному графику электропотребления и требует стабильной выработки электроэнергии для поддержания непрерывного технологического процесса.

Очень важно отметить, что с 1979 года в КНР началась реформа хозяйственной системы, и всё внимание было направлено на развитие экономики страны. В частности, горная промышленность Китая развивалась быстрыми темпами и добилась значительных успехов:

- освоены неметаллические полезные ископаемые;

- стабильно развивается добыча нефти и природного газа в Восточных районах страны;

- освоен ряд угольных месторождений с балансовыми запасами в несколько сот млрд т. К настоящему моменту в стране насчитывается 16 шахт и карьеров мощностью по 10 млн и более тонн в год, в том числе шахта в Сучжоу (провинция Цзянсу), которая рассмотрена в данном исследовании.

Следствием этого является высокая нагрузка локальных угольных электростанций в моменты пикового потребления электроэнергии в регионе, с чем связаны высокие потери электроэнергии, так как на пиковых мощностях падает КПД угольной теплоэлектростанции.

Согласно официальным данным States grid Corporation of China [2], пиковая нагрузка в Сучжоу составляет 22-25 ГВт, причем 60-70% от этого значение приходится на промышленных потребителей, в том числе и на угольную промышленность, так что на промышленность приходится 13,2-17,5 ГВт установленной мощности.

Методы тарифного регулирования в Китае имеют схожие свойства с перекрестным субсидированием, применяемым в России, поэтому тарифы на электроэнергию на территории Китая для предприятий угольной промышленности одни из самых высоких – 0,94 ¥ за кВт/ч электроэнергии [2].

Помимо высоких тарифов на электроэнергию для промышленных предприятий, существует значительный экономический ущерб от

перерывов в электроснабжении, связанных с повреждением оборудования в сети внешнего электроснабжения предприятий, а также с отключениями при системных авариях.

Метод определения экономических потерь (ущерба) от кратковременных нарушений электроснабжения потребителей базируется на общих принципах технико-экономических расчетов и на необходимости выполнения предприятиями контрактных обязательств по объемам и срокам производства и поставки продукции независимо от наличия и продолжительности ограничения их электроснабжения (за исключением длительных дефицитов электроэнергии). При этом за основу целесообразно принять достаточно простую и удобную для практического использования трехкомпонентную структуру ущерба, наносимого национальной (региональной) экономике:

- ущерб потребителю электроэнергии из-за расстройства технологического процесса, повреждения основного оборудования, поломки инструментов, брака и порчи сырья и готовой продукции, простоя или недоиспользования основных фондов и рабочей силы;

- ущерб смежным отраслям экономики из-за недовыработки или несвоевременной выработки продукции на данном предприятии.

Помимо вышеуказанных факторов, предприятия угольной промышленности

для снижения уровня загрязнения сооружаются вдали от крупных населенных пунктов, где сосредотачивается генерация централизованной системы, что приводит к увеличению стоимости технологического присоединения и влияет на потери при передаче электроэнергии, а также на ухудшение её качества.

Режимы электропотребления потребителей промышленного сектора изменяются в зависимости от сезона, месяца, а также дня недели [5, 6]. Анализ графиков нагрузки различных видов потребителей, а также влияние графика нагрузки на потери в электрической сети предприятия приведены в работах [7, 8]. В свою очередь, изменяются параметры всех элементов системы по генерации, передаче и распределению электроэнергии. Различают графики активных и реактивных нагрузок. По продолжительности графики нагрузки делятся на сменные, суточные и годовые. В условиях эксплуатации изменения нагрузки по активной и реактивной мощности во времени представляют в виде ступенчатой кривой по показаниям счетчиков активной и реактивной электроэнергии, снятыми через одинаковые определенные интервалы времени (30 или 60 мин).

Характерный суточный график электрических нагрузок предприятия угледобычи представлен на рис. 2.

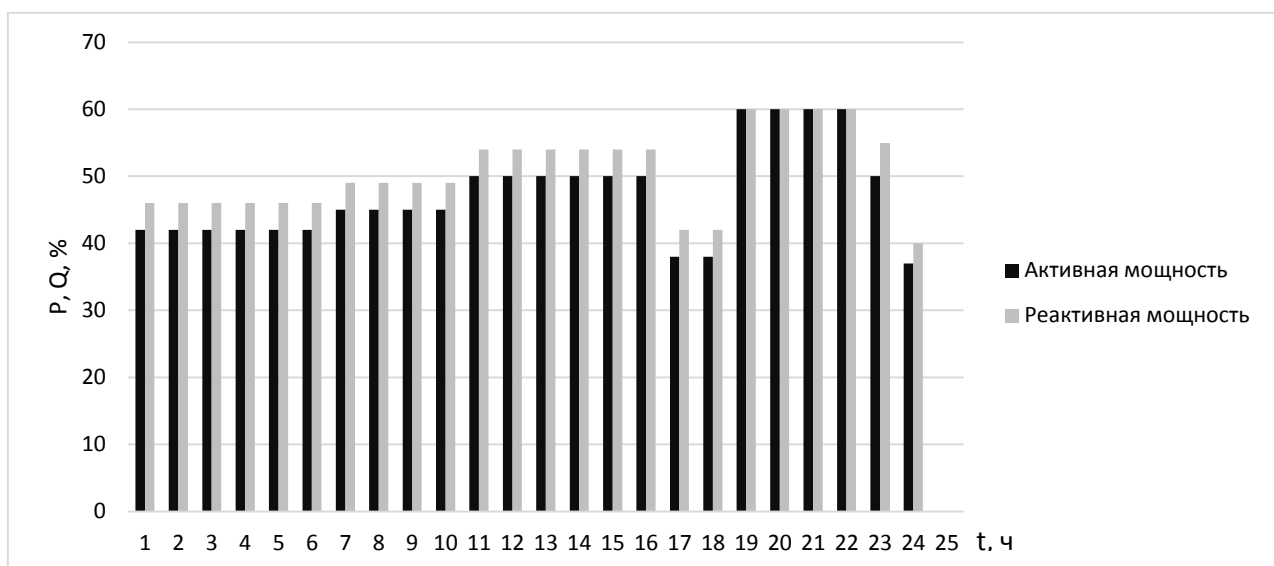


Рис. 2. Характерный суточный график предприятия угледобычи

Проанализировав график на рис. 2, можно сделать вывод, что потребление электроэнергии на угольном предприятии практически равномерно. Информация о суточном потреблении электроэнергии позволяет решать такие вопросы технико-экономического характера, как оценка нагрева проводников, определение потерь напряжения, а также расчет мощности собственной электростанции при необходимости её установки.

Эффективным решением для установки источника распределенной генерации на угольном предприятии могут быть энергоустановки, основанные на процессе сжигания твердого топлива, например угля, что в частном случае предприятия угледобычи снизит также и расходы на закупку энергоносителей и позволит использовать отходы производства.

Учитывая равномерность суточного графика нагрузки предприятия угледобычи, можно также спрогнозировать режимы работы источника собственной генерации.

Базовые принципы оценки экономической эффективности внедрения собственной энергоустановки, а также экономическая оценка эффективности работы распределенной генерации параллельно с централизованной системой энергоснабжения основаны на анализе чистого дисконтированного дохода от внедрения собственной генерации в различных условиях работы [9].

Наиболее надежным и экономичным режимом работы источника распределенной генерации является режим работы параллельно с централизованной системой электроснабжения, так как данный режим имеет следующие преимущества:

- промышленный потребитель имеет резервный источник питания со стороны централизованной энергосистемы, что увеличивает надежность электроснабжения и позволяет отказаться от избыточного резервирования на производстве;

- промышленный потребитель с собственной генерацией имеет возможность активного участия в оптовом и розничном рынке электроэнергии путём продажи избытка мощности в сеть;

- распределенная организация является катализатором перехода существующей электроэнергетической системы к активно-адаптивной сети электроснабжения “Smart Grid”, в которой может быть реализована структура Blockchain для создания рынка электроэнергии, при котором потребители могут свободно продавать и покупать электроэнергию, а централизованная энергосистема служит посредником для передачи мощностей;

- на договорных условиях потребитель может участвовать в регулировке баланса мощности, что является значимым фактором в условиях системы с высокой долей источников альтернативной генерации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. РИА Новости <https://ria.ru/atomtec/20180608/1522378326.html/>

2. PJSC “State Grid Corporation of China”. Официальный сайт <http://www.sgcc.com.cn/ywlm/index.shtml>.

3. **Дзюба А.П.** Исследование инструментов управления спросом на электропотребление в рамках оптового и розничного рынков электроэнергии России / А.П. Дзюба, И.А. Соловьева // ЭПП. 2016. № 2.

4. **Волкова И.О.** Активный потребитель: задача оптимизации потребления электроэнергии и собственной генерации /

И.О. Волкова, М.В. Губко, Е.А. Сальникова // Проблемы управления. 2013. № 6.

5. **Кабышев А.В.** Расчет и проектирование систем электроснабжения: справ. материалы по электрооборудованию / А.В. Кабышев, С.Г. Обухов. Томск: Том. политехн. ун-т, 2005. 177 с.

6. **Abu-Mouti F.S.** An enhanced power flow solution algorithm for radial distribution feeder systems / F.S. Abu-Mouti, M.E. ElHawary // Electrical and Computer Engineering 23rd Canadian Conference. Vancouver, 2010. P. 1-6.

7. Шклярский Я.Е. Влияние графика нагрузки на потери в электрической сети предприятия / Я.Е. Шклярский, С. Пирог // Записки Горного института. 2016. Т. 222. С. 859-863. DOI 10.18454/PMI.2016.6.859.

8. Figueiredo V. An electric energy consumer characterization framework based on data mining techniques / V. Figueiredo, F. Rodrigues, Z. Vale, J.B. Gouveia // IEEE Trans-

actions on Power Systems. 2005. № 2. Vol. 20. P. 596-602.

9. Климовец О.В. Оценка экономической эффективности электроснабжения промышленного предприятия с использованием распределенной генерации / О.В. Климовец // Вестник РЭА им. Г.В. Плеханова. 2016. № 2 (86).

**Сенчило Никита Дмитриевич** – кандидат технических наук, доцент Санкт-Петербургского горного университета

**Senchilo Nikita D.** – Ph.D., Associate Professor St. Petersburg Mining University

*Статья поступила в редакцию 13.05.19, принята к опубликованию 15.09.19*

УДК 621.316.1

## ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ 6-10 кВ

**А.И. Сидоров, С.Ш. Таваров, Г.Х. Маджидов**

## RELIABILITY INDEXES OF COMPONENTS OF THE DISTRIBUTION NETWORK 6-10 KV

**A.I. Sidorov, S.Sh. Tavarov, G.H. Majidov**

*Приводится оценка показателей надежности элементов распределительной сети 6-10 кВ. По данным от ОАО «Городская электрическая сеть г. Душанбе» (количество трансформаторных подстанций, протяжённость воздушных и кабельных линий напряжением 6-10 кВ, количество аварий трансформаторных подстанций и повреждений воздушных и кабельных линий за период 2012-2016 гг.) произведен расчет показателей надежности элементов распределительной сети 6-10 кВ. Оценка надежности произведена по следующим показателям: поток отказа, время восстановления поврежденных элементов и недоотпуск электроэнергии, свя-*

*The research is devoted to estimating reliability indexes of components of the distribution network 6-10 kV. According to the data from ОАО Dushanbe City Power Grid (the number of transformer substations, spread of air and cable lines with the voltage at 6-10 kV, the number of accidents at transformer substations and damages of air and cable lines within the period of 2012-2016), the calculation of reliability indexes was made for the components of the distribution network 6.10 kV. The reliability assessment is made regarding the following parameters: the fault stream ( $\omega$ ), restoration time of the faulty components ( $t_{\text{восст.}}$ ), and undersupply of electric power ( $\Delta W$ ) are connected with the*



заны с перерывом электроснабжения потребителей. Установлено, что все показатели надежности рассматриваемых элементов находятся выше допустимых значений. На долю недоотпуска электроэнергии в рассматриваемых сетях приходится более 10% от всей потребленной бытовыми электроприемниками.

Ключевые слова: электроснабжение, распределительные сети 6-10 кВ, показатели надежности

Эффективность распределительной сети, как правило, оценивают по критериям надежности, разнице отпускаемой и получаемой электроэнергии, режимам работы и схемам исполнения, а надежность элементов электрических сетей, в том числе распределительных, оценивают по показателям надежности. Согласно [1] все элементы электрических сетей делятся на невосстанавливаемые и восстанавливаемые после повреждений. К невосстанавливаемым элементам электрических сетей относится ряд элементов, приведенных в [1-3], мы же остановимся на показателях надежности восстанавливаемых элементов, к которым относится большая часть элементов распределительной сети [3-6], в том числе трансформаторы (ТП), воздушные (ВЛ) и кабельные (КЛ) линии.

Количественная оценка показателей надежности восстанавливаемых элементов распределительной сети определяется по следующим показателям [1, 2]: поток отказов  $\omega$ , время восстановления поврежденных элементов  $t_{восст.}$  и недоотпуск электроэнергии  $\Delta W$ , связанный с перерывом в электроснабжении потребителей. Данные показате-

breaks in the power supply to consumers. It has been established that all reliability indexes of the considered components exceed the permissible values. More than 10% of the power consuming units constitute the share of undersupply of electric power in the considered networks.

Keywords: power supply, distribution networks 6-10 kV, reliability indexes

тели позволяют количественно оценить степень надежности элементов распределительной сети и предложить, основываясь на определенной математической модели, мероприятия для их уменьшения [2].

Для оценки показателей надежности рассматриваемых элементов необходимо знать общее количество ТП и протяженность рассматриваемых элементов, а именно ВЛ и КЛ, количество аварий на ТП и повреждений ВЛ и КЛ за рассматриваемый период и время их восстановления.

Необходимо отметить, что анализ причин аварий на ТП и повреждаемость ВЛ и КЛ рассматриваемых элементов распределительной сети были рассмотрены в предыдущих работах [7, 8].

Объектом исследования в данной работе являются распределительные сети 6-10 кВ, находящиеся на балансе ОАО «Городская электрическая сеть г. Душанбе». На основании данных, полученных от ОАО «Городская электрическая сеть г. Душанбе» составлена таблица, в которой приведена информация о распределении интересующих элементов (табл. 1).

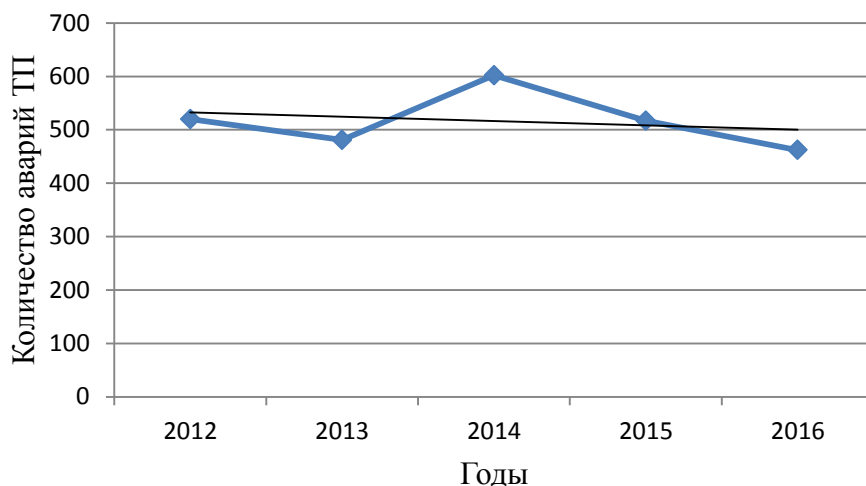
Таблица 1

Количество ТП, ВЛ и КЛ напряжением 6,10 кВ

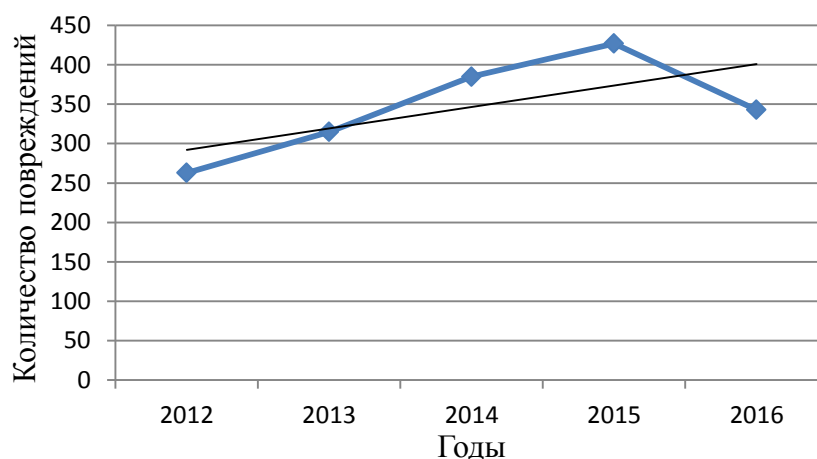
| Наименование элементов электрической сети | 2012   | 2013   | 2014   | 2015   | 2016   |
|-------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Количество ТП-6-10/0,4 кВ, шт.            | 1457   | 1283   | 1581   | 1628   | 1507   |
| Протяженность ВЛ-6,10 кВ, км              | 241,93 | 242,03 | 274,14 | 274,84 | 281,37 |
| Протяженность КЛ-6-10кВ, км               | 764,63 | 816,49 | 880,53 | 898,19 | 935,09 |

Из журналов оперативно-диспетчерской службы ОАО «Городская электрическая сеть г. Душанбе» были получены данные о количестве аварий на

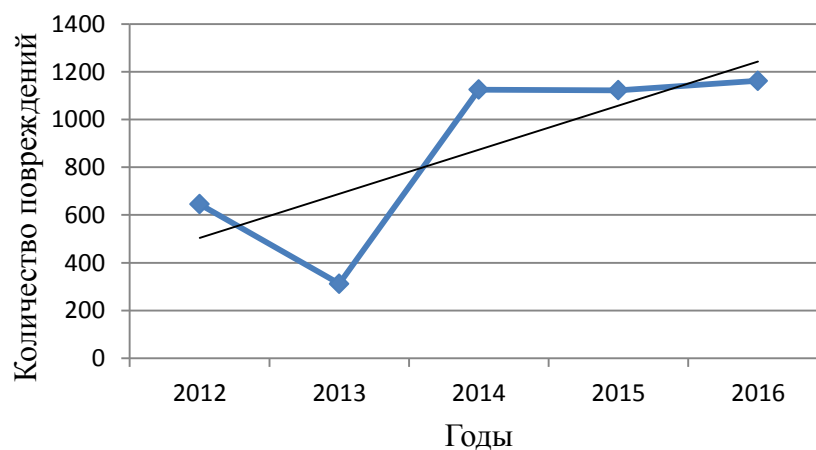
ТП-6-10 кВ и повреждений ВЛ и КЛ напряжением 6-10 кВ за 2012-2016 годы, динамика приведена на рис. 1-3.



**Рис. 1.** Динамика аварий на ТП 6-10/0,4 кВ за 2012-2016 гг.



**Рис. 2.** Динамика повреждений ВЛ-6,10 кВ за 2012-2016 гг.



**Рис. 3.** Динамика повреждений КЛ-6,10 кВ за 2012-2016 гг.

Как было отмечено выше, оценка показателей надежности восстанавливаемых элементов производится по потоку отказа, времени восстановления и недоотпуску электроэнергии. Согласно [1] поток отказов по данным эксплуатации из статистических данных определяется по формуле

$$\omega^* = \frac{n \cdot (\Delta t)}{N_0 \cdot t} \quad (1)$$

где  $n_1(\Delta t)$  – количество элементов, отказавших за интервал времени  $\Delta t$ ;  $N_0$  – число эксплуатируемых элементов;  $t = 8760$  – число часов в году.

Подставляя данные, приведенные в табл. 1 и на рис. 1-3, в формулу (1), определим общий поток отказа по всем элементам за рассматриваемый период. Результаты расчетов представлены на рис. 4.

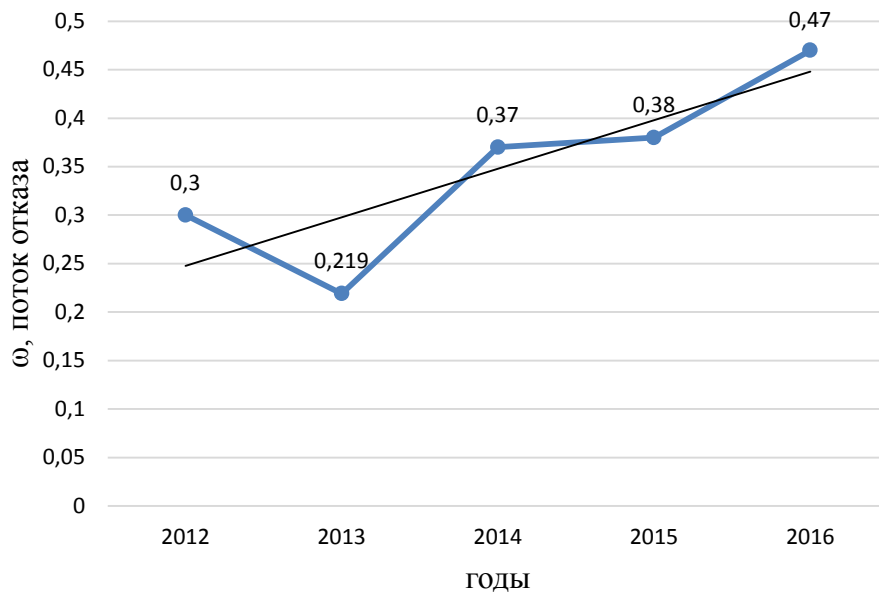


Рис. 4. Распределение потока отказа по годам

Для расчета следующего показателя надежности восстанавливаемых элементов распределительной сети – недоотпуска электроэнергии – необходимо знать время восстановления поврежденных элементов. Показатели надежности (время восстановления) были получены на осно-

ве статистической обработки данных, полученных из оперативно-диспетчерской службы ОАО «Городская электрическая сеть г. Душанбе» [9].

Время восстановления за рассматриваемый период для всех поврежденных элементов приведено в табл. 2.

Таблица 2

Время восстановления элементов электрической сети после аварий и повреждений

| Наименование                                                       | 2012   | 2013   | 2014   | 2015   | 2016   |
|--------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Время восстановления элементов электрической сети, $t_{восс.}$ , ч | 4159,4 | 4689,4 | 4552,7 | 4299,7 | 3047,5 |

Недоотпуск электроэнергии определим по формуле

$$\Delta W = W_{nom.} \cdot \omega^* \cdot \left( \frac{t_{босс.}}{T_{год}} \right), \text{ млн кВт}\cdot\text{ч}, \quad (2)$$

где  $W_{nom}$  – потребление электроэнергии за год, млн кВт·ч;  $T_{год} = 8760$  – время в году.

Следует отметить, что недоотпуск электроэнергии будет рассчитан для бытовых потребителей. Обосновывается это тем, что в последние 5-7 лет в г. Душанбе, как и в других странах, наблюдается тенденция резкого увеличения электроприемников в быту.

Таблица 3

Электропотребление бытовыми потребителями за рассматриваемый период и недоотпуск электроэнергии

| Наименование                                      | Ед. изм.  | 2012   | 2013  | 2014  | 2015   | 2016  |
|---------------------------------------------------|-----------|--------|-------|-------|--------|-------|
| Потребление электроэнергии бытовыми потребителями | млн кВт·ч | 1344,5 | 1489  | 1443  | 1673   | 1554  |
| Недоотпуск электроэнергии                         | млн кВт·ч | 191,52 | 174,6 | 277,5 | 312,04 | 254,1 |
| Относительная разница                             | %         | 14,24  | 11,7  | 19,23 | 18,7   | 16,35 |

Результаты расчетов недоотпуска электроэнергии за рассматриваемый период приведены в табл. 3.

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что для повышения

показателей надежности необходимо предлагать комплексные мероприятия, направленные на уменьшения потока отказа и времени восстановления при авариях и повреждениях в распределительных сетях.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Савоськин Н.Е.** Надежность электрических систем / Н.Е. Савоськин. Пенза. Пенз. ун-т, 2004. 101 с.
2. **Шеметов А.Н.** Надежность электрооборудования / А.Н. Шеметов. Магнитогорск: ГОУ ВПО МГТУ имени Г.И. Носова, 2006. 149 с.
3. **Папков Б.В.** Вероятностные и статистические методы оценки надежности элементов и систем электроэнергетики / Б.В. Папков. Княгинино: НГИЭУ, 2015. 356 с.
4. **Сидоров А.И.** Исследование причин нарушений в работе сельских электрических сетей 6-35 кВ / А.И. Сидоров, С.Н. Трофимова // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2009. № 4. С. 29-31.
5. **Трофимова С.Н.** Анализ повреждаемости электрооборудования в городских электрических сетях 6-35 кВ / С.Н. Трофимова. Электробезопасность. 2007. № 4. С. 33-41.
6. **Трофимова С.Н.** Повышение надежности электроснабжения в условиях современного города / С.Н. Трофимова, С.П. Максимов // Электро. Сер. Надежность электроустановок. 2014. № 4. С. 40-42.
7. **Таваров С.Ш.** Состояние электрического оборудования в городских электрических сетях г. Душанбе ОАХХ «Барки Тоҷик» / С.Ш. Таваров, Г.Х. Маджидов, Э.А. Фирдавс // Электробезопасность. 2016. № 2. С. 4-12.

8. **Таваров С.Ш.** Анализ причин нарушений в городских электрических сетях г. Душанбе / С.Ш. Таваров, Г.Х. Маджидов. Электробезопасность. 2016. № 1. С. 25-30.

9. Технический годовой отчет ОАО «Горэлектросеть г. Душанбе» с 2012 по 2016 гг.

---

**Сидоров Александр Иванович** – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Безопасность жизнедеятельности» Южно-Уральского государственного университета

**Sidorov Alexander I.** – Dr. Sc., head of the Department «Life Safety» of South Ural State University

**Таваров Саиджон Ширалиевич** – докторант, кандидат технических наук, доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности» Южно-Уральского государственного университета

**Tavarov Saijon Sh.** – PhD in technical Sciences, associate Professor of the Department «Life Safety» of the South Ural State University

**Маджидов Гафуржон Хушбахтович** – ассистент кафедры «Электроснабжение» Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими

**Majidov Gafurjon Kh.** – assistant of the Department of «Power Supply» of Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi

*Статья поступила в редакцию 19.05.19, принята к опубликованию 15.09.19*



# ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.385.632.1

## ВИДЫ ФИКСАЦИИ ЗАМЕДЛЯЮЩИХ СИСТЕМ В ЛАМПАХ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ

С.А. Калмыков

## TYPES OF FIXING SLOW-WAVE STRUCTURES IN TRAVELING WAVE TUBES

S.A. Kalmykov

*Рассмотрены основные способы крепления замедляющих систем спирального типа в лампах бегущей волны. Проведен их сравнительный анализ с учетом особенностей каждого способа фиксации замедляющей системы в корпусе оболочки. Определены перспективные направления крепления замедляющих систем, подходящие для использования в широкополосных лампах миллиметрового диапазона.*

**Ключевые слова:** лампа бегущей волны, замедляющая система, триангуляция, термообжатие, опорный стержень, спираль

Замедляющая система – одна из основных частей ламп бегущей волны (ЛБВ). Именно от размеров замедляющей системы зависят массогабаритные характеристики готового прибора. Широко используемая конструкция замедляющей системы – спираль, закрепленная диэлектрическими опорными стержнями, находящимися в корпусе оболочки (пакета замедляющей системы). ЛБВ спирального типа является наилучшим широкополосным усилителем и для работы в диапазоне от 3 до 65 ГГц [1].

Во многом стабильность и надежность ЛБВ зависит от замедляющей системы. Она должна иметь плотный контакт с внутренней частью корпуса оболочки для отведения при работе прибора теплоты от спирали. Также замедляющая система должна

*The paper covers the main methods of fastening spiral-type slow-wave structures in traveling-wave tubes (TWT). A comparative analysis was carried out taking into account the characteristics of each type of fixation of slow-wave structures in the shell casing. The advanced trends in fixing the slow-wave structures to be used in wideband millimeter-wide TWT have been identified.*

**Keywords:** traveling-wave tube, slow-wave structure, triangulation, thermal shrinkage, support rod, spiral

обладать эксплуатационной надежностью, её конструкция должна иметь высокую механическую прочность [2].

Размеры, конструкция и материалы, из которых изготавливается замедляющая система, подбираются в зависимости от назначения и характеристик ЛБВ. Для лучшего отведения теплоты от спирали на оболочку опорные стержни изготавливают из диэлектрических материалов, имеющих наибольшую теплопроводность, таких как нитрид бора, оксид бериллия и нитрид алюминия. Значения теплопроводности приведены в табл. 1 [3-4].

ЛБВ миллиметрового диапазона (рис. 1) имеет малые размеры. Внешний диаметр спирали 1 не превышает 0,9 мм. Сохранение работоспособности прибора при таких

размерах зависит от эффективности передачи теплоты от спирали 1 к опорным

стержням 2 и от опорных стержней 2 к оболочке 3.

Таблица 1

Теплопроводность диэлектрических материалов, используемых в ЛБВ

| Физические свойства      | AlN       | BN       | BeO       |
|--------------------------|-----------|----------|-----------|
| Теплопроводность, Вт/м·К | 160...240 | 75...120 | 220...240 |

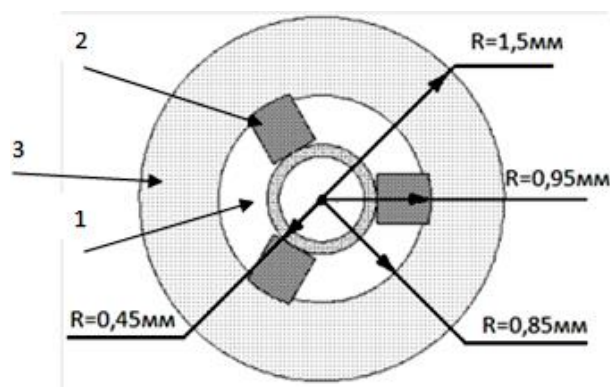


Рис. 1. ЛБВ миллиметрового диапазона:

1 – спираль; 2 – опорный стержень; 3 – оболочка

Основные виды фиксации замедляющей системы: пружинная фиксация, триангуляция, термообжатие, паяный пакет.

**Пружинная фиксация.** Пружинный способ крепления замедляющей системы основан на механическом фиксировании пакета жесткой ленточной пружиной (рис. 2, 3). Внутренняя часть оболочки 3 (рис. 2 б) сделана в виде треугольника с закругленными углами под опорный стержень 2, при этом один из углов углублен и имеет прямоугольный вырез под фиксирующую пружину 6. Пакет замедляющей си-

стемы, состоящий из спирали 1 и трех опорных стержней 2, устанавливается во внутреннюю часть оболочки 3. Со стороны прямоугольного паза на протяжении всей длины замедляющей системы (рис. 2 а) устанавливается фиксирующая пружина 6, механически воздействующая на один из опорных стержней 3, который, в свою очередь, зажимает спираль 1 и тем самым фиксирует всю систему. Для улучшения теплообмена и увеличения площади контакта пружины 6 с поверхностью опорного стержня 3 между этими деталями устанавливают дополнительную металлическую пластину 5. В конструкции предусмотрены направляющие стержни 4, предназначенные для равномерного распределения нагрузки и центрирования опорного стержня 3 относительно прямоугольного паза (рис. 2 б). Натяжение пружины 6 подбирается таким образом, чтобы пакет замедляющей системы фиксировал спираль 1 путем механического воздействия, не превышающего величины предельной упругой деформации материала из которого изготовлена спираль 1.

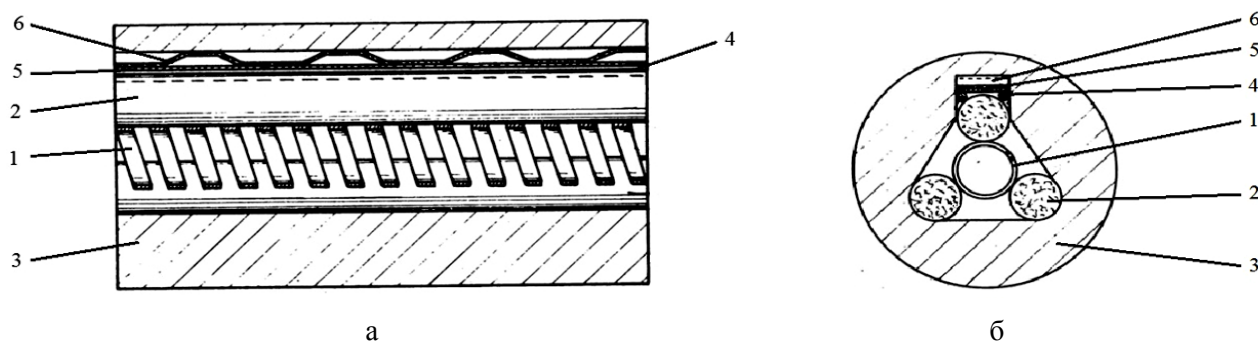


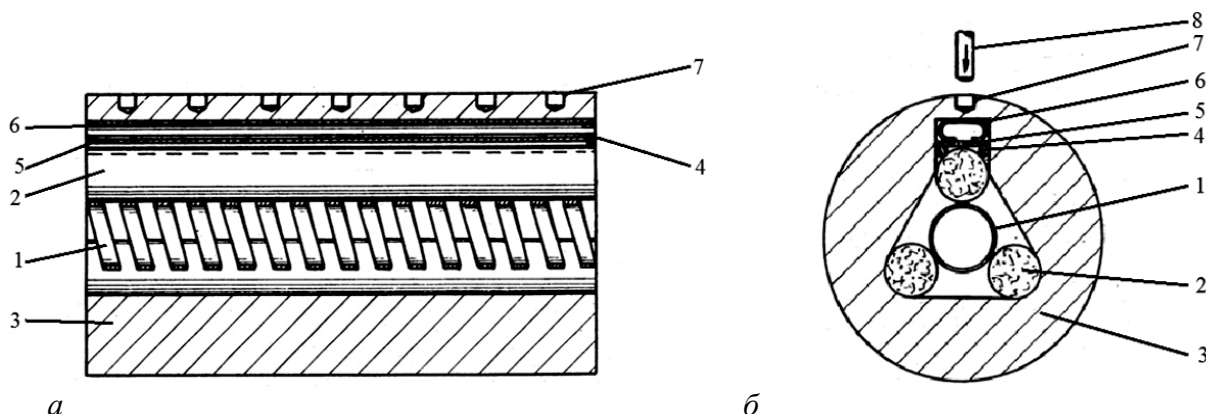
Рис. 2. Пружинная фиксация замедляющей системы: а – продольное сечение; б – поперечное сечение:

1 – спираль; 2 – опорный стержень; 3 – оболочка; 4 – направляющий стержень;

5 – металлическая пластина; 6 – фиксирующая пружина

Другой вариант исполнения пружинного способа крепления изображен на рис. 3. Фиксация пакета в таком варианте происходит путем точечного механического воздействия на пружину 6 с внешней стороны оболочки 3. Пружина 6 (рис. 3 б), имеет вид продольной скобы, при этом все остальные элементы остаются без изменения. Существенное отличие от рассмотрен-

ного выше варианта заключается в том, что сборочный пакет устанавливается во внутреннюю часть оболочки с минимальным натяжением пружины 6 или вовсе без него. Окончательная фиксация пакета происходит после его установки в оболочку 3 путем механического воздействия оснастки 8 (рис. 3 б) на пазы 7 (рис. 3 а и б).



**Рис. 3.** Пружинная фиксация замедляющей системы:

*а* – продольное сечение; *б* – поперечное сечение:

- 1 – спираль; 2 – опорный стержень, 3 – оболочка; 4 – направляющий стержень;  
5 – металлическая пластина; 6 – фиксирующая пружина; 7 – паз; 8 – оснастка

Описанные способы крепления замедляющей системы имеют преимущество в том, что благодаря фиксирующей пружине возможна частичная компенсация деформации спирали при ее расширении в процессе работы ЛБВ [5].

К недостаткам можно отнести то, что описанный способ не подходит к спиральям, изготовленным из материалов имеющих малую упругую деформацию и спиральям малых размеров. Изготовление такого пакета технически сложно и трудоемко. Замедляющая система, изготовленная по такой технологии, обладает плохой устойчивостью к вибрационным воздействиям и плохим теплоотводом.

**Триангуляция.** Способ крепления пакета замедляющей системы путем триангуляции основан на упругой деформации материала. К баллону, имеющему форму трубки 3 (рис. 4) с круглым сечением, подбирают пакет замедляющей системы, состоящий из спирали 1 и трех опорных стержней 2. Пакет подбирается таким обра-

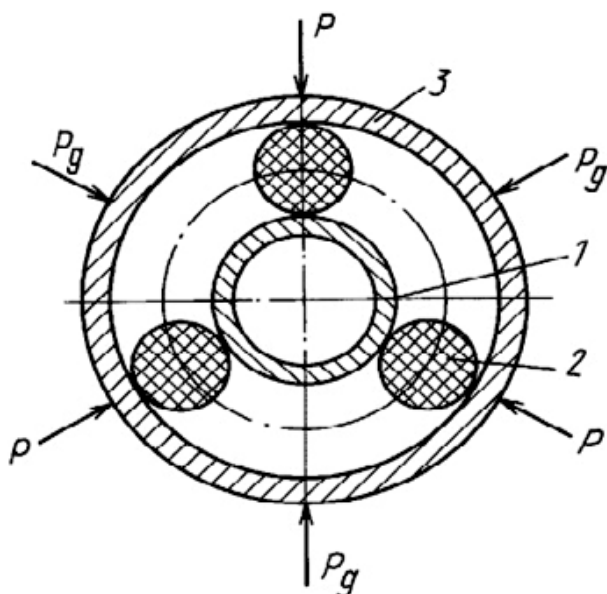
зом, чтобы его внешний диаметр был больше внутреннего диаметра баллона. С внешней стороны баллона прикладывают равномерное усилие  $P_g$  в трех точках с отставанием на 120 градусов. Усилие прикладывается до тех пор, пока баллон не примет треугольную форму, но материал баллона при этом не должен пройти точку перехода из упругой деформации в пластическую. В деформированный баллон 3 заводят заранее подготовленный пакет, после чего с него снимают внешние усилия. Баллон 3, восстанавливая предыдущую форму, зажимает опорные стержни 2, которые, фиксируют спираль 1. Предельно допустимое воздействие на спираль ограничено, превышение давления может привести к её необратимому разрушению.

Такой способ крепления замедляющей системы возможен только при изготовлении баллона из материала, обладающего высокой упругой деформацией, иначе он не будет гарантировать надежного крепления замедляющей системы. К тому же при



креплении спирали методом триангуляции последние витки могут хуже прилегать к поверхности стержня и отведение теплоты в этих местах будет затруднено [6].

Триангуляция имеет преимущество перед пружинным креплением в том, что способ проще в технологическом исполнении, и такая конструкция имеет лучшую вибропрочность [7].



**Рис. 4.** Крепление с помощью триангуляции:  
1 – спираль; 2 – опорный стержень; 3 – баллон

Наряду с преимуществами в простоте исполнения способ триангуляции имеет и недостатки. Одним из недостатков является наличие на внешней части баллона огранки, что затрудняет установку магнитной системы. В некоторых случаях в процессе обжатия корпус баллона становится овальным, что не обеспечивало плотное соприкосновение с наконечниками. Для устранения овальности обычно используются дополнительные технологические стержни, располагающиеся на пакете замедляющей системы в промежутках между опорными стержнями и имеющие меньший, по сравнению с основными стержнями, размер. Перед триангуляцией баллон, для большей его пластичности, необходимо отжигать [8]. Ещё одним недостатком такого метода фиксации является плохая площадь прилегания в местах «спираль и опорный стержень»,

«опорный стержень и баллон». Кроме того, триангуляция невозможна при использовании малых размеров спирали.

**Термообжатие.** Способ термообжатия противоположен триангуляции, так как он основан на пластической деформации материалов и разнице коэффициентов температурного расширения (КТР). Пакет замедляющей системы подбирается таким образом, чтобы его внешний диаметр был немного меньше диаметра пазов в оболочке. Чаще всего для изготовления оболочки используют медь. В оболочку 3 (рис. 5 а) с заранее заготовленными пазами с внутренней и ответными внешними пазами заводят пакет замедляющей системы, состоящий из спирали 1, опорных стержней 2 и экрана 4 с продольным пазом. После этого во внешние пазы оболочки 3 устанавливают стальные клинья и фиксируют их молибденовыми кольцами. Затем собранную конструкцию отправляют в печь. Поскольку у стали КТР значительно больше, чем у молибдена, то клинья начинают расширяться и, упираясь в кольца, начинают сдавливать оболочку, фиксируя пакет замедляющей системы. Допускается использование конструкции без применения экрана 4. Операция соединения стержня 2 с экраном 4 (рис. 5 б) предназначена для улучшения теплоотвода от опорного стержня на оболочку замедляющей системы. Стержень 2 плотно фиксируется в пазах экрана 4 с помощью механического обжатия. Экран имеет большую площадь прилегания к стержням, что обеспечивает лучший теплоотвод. Кроме того, при использовании экрана появляется возможность не изготавливать один длинный опорный стержень, а составлять его из нескольких коротких стержней [9, 10].

Такой вид крепления можно использовать для спиралей, чей внешний диаметр не превышает 1 мм. Соответственно, он может использоваться для широкополосных ЛБВ миллиметрового диапазона. Однако при столь малых размерах спирали остро встает вопрос о своевременном снятии с нее теплоты [11]. Ещё одним недостатком этого

способа является сложность подбора допусков, которые непосредственно влияют на зазор  $q$  (рис. 5 а), определяющий рассто-

яние от края экрана 4 до спирали 1. Это, в свою очередь, может повлиять на дисперсию и на выходные параметры прибора.

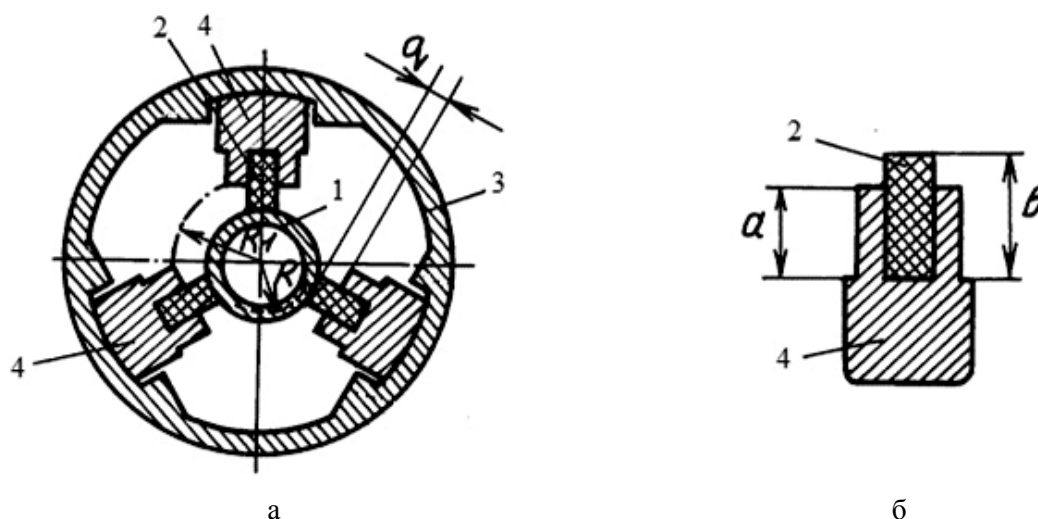


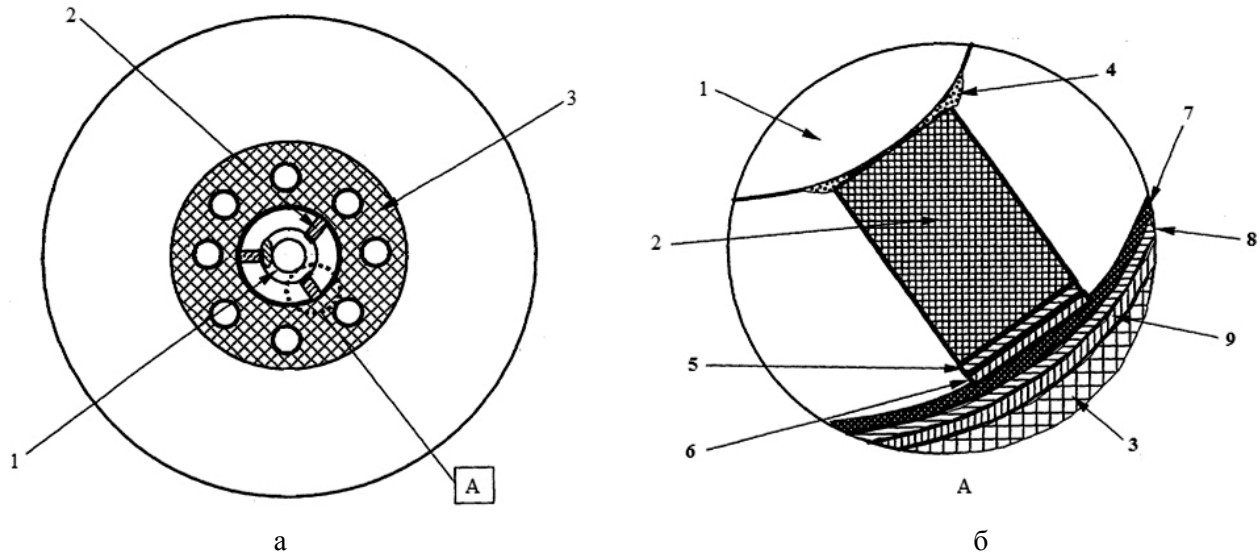
Рис. 5. Крепление замедляющей системы термообжатием:

а – реечное сечение; б – экран: 1 – стержень; 2 – опорный стержень; 3 – оболочка; 4 – экран

**Паяный пакет.** Способ изготовления паяного пакета заключается в следующем. На спираль последовательно наносят медь, потом покрывают её слоем припоя и завершает этот процесс операция нанесения слоя металла из подгруппы титана. Сборка проводится на оснастке. Спираль с опорными стержнями фиксируют стальными клиньями в молибденовых кольцах. Готовый узел отправляется на пайку. По завершению пайки и охлаждения узла со спирали удаляют остатки припоя с помощью химического травления. После этого паяный пакет устанавливают в оболочку и фиксируют пружинным поджатием [12].

Недостатками такого метода являются наличие остатков припоя, который может закоротить витки замедляющей системы, ненадежность фиксации пружинным поджатием, а также необходимость использования химического травления. Устранения этих недостатков можно добиться последовательной пайкой с использованием диэлектрического припоя (рис. 6) для крепления спирали к опорным стержням, а также путем использования низкотемпературного припоя для последующей пайки пакета замедляющей системы с оболочкой. Спираль 1 (рис. 6 а) замедля-

ющей системы паяется диэлектрическим припоем к керамическим опорным стержням 2, которые, при последующей пайке низкотемпературным припоем, паяются к керамическим втулкам 3, расположенным между полюсными наконечниками. При ближайшем рассмотрении на участке А (рис. 6 б) видно, что в месте пайки спирали 1 к опорному стержню 2 образуется галтель из диэлектрического припоя 4. Так как в удалении диэлектрического припоя 4 нет необходимости, такая конструкция существенно упрощает изготовление замедляющей системы. Для надежной пайки пакета замедляющей системы в оболочке на внутреннюю часть втулок 3 из немагнитного материала вначале наносят слой вжигаемой металлизированной пасты 9. Поверх пасты далее наносят никелевое покрытие 8, которое покрывают низкотемпературным металлическим припоем 7. Для верхних граней опорных стержней 2, аналогично вначале наносят металлизированный слой 5 и, поверх него, делают покрытие никелевым слоем 6. [13]. Такой способ крепления пакета замедляющей системы позволяет создавать более мощные приборы за счет эффективного отведения теплоты от спирали.

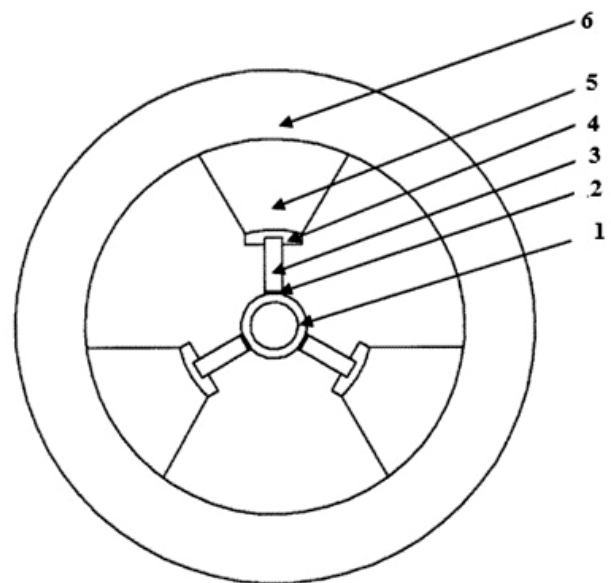


**Рис. 6.** Крепление замедляющей системы паяльным пакетом: а – поперечное сечение; б – участок А: 1 – стержень; 2 – опорный стержень; 3 – керамическая втулка; 4 – припой; 5 – металлический слой; 6 – никелевый слой; 7 – металлический припой; 8 – никелевое покрытие; 9 – металлизированная паста

Надежным соединением спирали с опорными стержнями без применения диэлектрического припоя является способ, в котором соединение происходит в твердой фазе (рис. 7). На спираль 1 наносят припой 2 и слой металла подгруппы титана, с помощью оснастки устанавливают опорные стержни 3, поверх которых ставят вкладыш 4. Собранный узел фиксируют в оснастке, состоящей из стержней 5, выполненных из нержавеющей стали, и молибденовых колец 6. Сборный узел нагревают до температуры, составляющей 0,89-0,93 от температуры плавления припоя, которым покрыта спираль. За счет температуры и давления, создаваемого из-за разности КТР материалов молибдена и нержавеющей стали, происходит диффузия материала скрепляющего спираль 1 и опорные стержни 3 [14, 15].

В результате эффективность отведения теплоты путем твердофазного соединения высокочастотного пакета возросла в 3 раза по сравнению с термообжатом. Такие показатели обеспечиваются тем, что в зоне контакта на участке медного покрытия 2, находящемся на спирали 1 и прилегающему опорному стержню 3 (рис. 7), образуется новая фаза соединения толщиной около 10-20 нм. Скорость образования новой фазы и скорость развития соединения зависят от

времени выдержки и температуры, при которой протекает реакция. Значения степени перехода в новую форму представлены в табл. 2 [16].



**Рис. 7.** Крепление замедляющей системы в твердой фазе: 1 – спираль; 2 – припой; 3 – опорный стержень; 4 – вкладыш; 5 – стержень; 6 – молибденовое кольцо

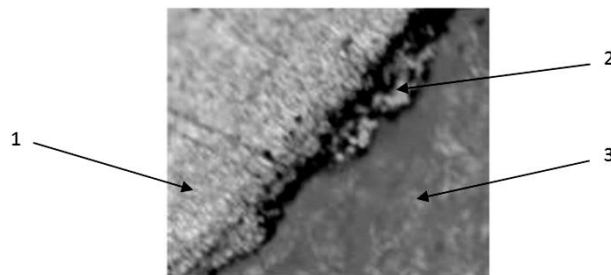
Анализ покрытия после проведения отжига подслоя  $970 \pm 10^\circ\text{C}$  подтверждает равномерность нанесения меди по всей длине спирали (рис. 8).

Параметры перехода

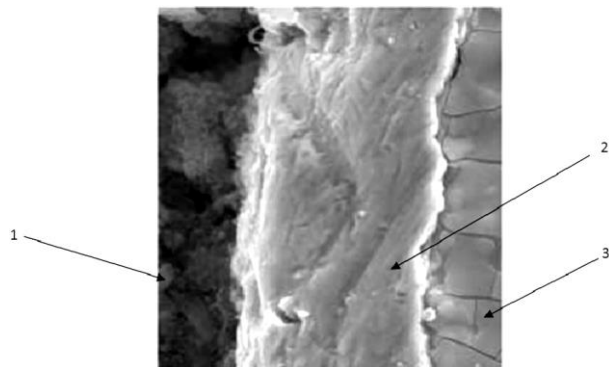
| Время выдержки, с | Степень перехода при $T = 1223$ К | Степень перехода при $T = 1273$ К |
|-------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 400               | 0,21                              | 0,41                              |
| 600               | 0,32                              | 0,72                              |
| 800               | 0,39                              | 0,84                              |
| 1000              | 0,52                              | 0,91                              |

На месте контакта спирали 1 и опорного стержня 3 отсутствует галтель припоя, а степень перехода можно оценить по величине наплыва 2 (рис. 9).

Соединение выдерживает усилия на отрыв не меньше 6-7 МПа [16].



**Рис. 9.** Результат отжига: 1 – спираль; 2 – наплыв; 3 – опорный стержень



**Рис. 8.** Распределение меди по длине спирали

Итак, при разработке широкополосных ЛБВ миллиметрового диапазона конструктивно и технологически следует закладывать закрепление спирали замедляющей системы с помощью технологии паяного пакета. Только при применении такой технологии будет гарантирован плотный контакт между рабочими элементами замедляющей системы, что приведет к получению лучших результатов на готовых ЛБВ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Бушуев Н.А.** Проблемы разработки широкополосных ЛБВ миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов / Н.А. Бушуев // Радиоэлектроника. 2016. № 11.

2. Результаты разработки технологии замедляющих систем ЛБВ миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн / Н.А. Бушуев, П.Д. Шалаев, Д.И. Кириченко, А.Ж. Бабанов // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2016. Т. 1.

3. <http://tehceramica.ru/keramika-iz-nitrida-bora>.

4. **Непочатов Ю.** Разработка керамики на основе нитрида алюминия для изделий электронной техники / Ю. Непочатов,

А. Земская, П. Муль // Современная электроника. 2011. № 9.

5. Pat. Franz Gross Dipl-Ing DR; Kahl Paul; Wiehler Wolf; Bibracher Wilhelm; Traveling wave tube with a spiral delay line; DE 19691937704; 1969.

6. **Гилмор А.С.** Лампа бегущей волны / А.С. Гилмор. // Техносфера. 2013.

7. А. с. SU 1029259. Способ сборки спиральной замедляющей системы / А.М. Губский, Н.В. Домашенко, В.Н. Эбинец, Н.Г. Твердохлеб. 1981.

8. Патент. Способ изготовления замедляющих систем спирального типа; RU 2066499. 1995 г. / Ю.И. Зотов, А.А. Горская.

9. А. с. SU 1646441. Лампа бегущей волны и способ её изготовления / Д.Г. Щелканов, Ю.И. Зотов, А.Г. Гехтерис, С.М. Бондаренко, В.Я. Явчуновский, Н.Н. Игнатъева, И.Е. Сычева, А.В. Уполовнев, А.И. Кудрявцев, Г.А. Рехен, Н.Р. Бурнашова. 1996.

10. Пат. RU 2024099. Способ изготовления замедляющих систем / С.М. Орлов, Р.Н. Бабкина, Ф.М. Ибрагимова, Ф.П. Кузьмин. 1994.

11. Пат. RU 2338293. Замедляющая система для электронных приборов СВЧ / А.К. Балыко, А.Н. Королев, В.А. Мальцев, И.В. Самсонова. 2008.

12. Пат. RU 2340036. Способ изготовления замедляющей системы лампы бегущей волны / А.В. Москвичева, Т.В. Плохих. 2008.

13. Пат. RU 2285310. Мощная спиральная лампа бегущей волны / А.И. Греков. 2006.

14. Пат. RU 2578212. Способ изготовления высокочастотного пакета замедляющей системы. / Н.И. Бабкова, М.Д. Орлова, А.Я. Зоркин. 2016

15. **Орлова М.Д.** Твердофазное соединение узлов металлокерамических спиральных замедляющих систем / М.Д. Орлова, А.Я. Зоркин, Н.И. Бабкова // Вестник СГТУ. 2014. № 2.

16. **Орлова М.Д.** Твердофазное соединение элементов металлокерамических узлов спиральных замедляющих систем ламп бегущей волны: автореф. дис. ... канд. техн. наук / М.Д. Орлова. Саратов, 2014.

**Калмыков Сергей Александрович** – аспирант кафедры «Электронные приборы и устройства» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Sergey A. Kalmykov** – Postgraduate, Department of Electronic Instruments and Devices, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

*Статья поступила в редакцию 25.05.19, принята к опубликованию 15.06.19*

УДК 621.385.632.1

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ МОЩНОЙ ШИРОКОПОЛОСНОЙ СПИРАЛЬНОЙ ЛБВ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

**Д.И. Кириченко, В.И. Роговин**

## OUTCOME OF THE DEVELOPMENT OF A POWERFUL WIDE-BAND SPIRAL TWT OF THE MILLIMETER RANGE

**D.I. Kirichenko, V.I. Rogovin**

*Разработана конструкция малошумящей широкополосной лампы бегущей волны миллиметрового диапазона с выходной непрерывной мощностью от 70 до 100 Вт.*

Ключевые слова: ЛБВ, МПФС, ММ ЛБВ, миллиметровый диапазон длин волн

*A low-noise, wide-band millimeter-wave traveling-wave lamp with an output continuous power of 70 to 100 W, to be used in advanced electronic countermeasure, has been developed.*

Keywords: TWT, MPFS, MM TWT, millimeter wavelength range

Сейчас весьма актуальной задачей электроники является переход в миллиметровый диапазон длин волн. СВЧ усилители мощности миллиметрового диапазона длин волн должны обладать следующей совокупностью основных параметров.

1. Рабочий диапазон частот 18-40 ГГц, или 26÷40 ГГц.

2. Выходная непрерывная мощность не менее 40 Вт в диапазоне 18-40 ГГц и не менее 70 Вт в диапазоне 26-40 ГГц.

3. Коэффициент усиления не менее 30 дБ.

4. Масса не более 2 кг.

В обозримой перспективе возможность разработки и создания твердотельных СВЧ усилителей с подобными характеристиками не просматривается. Это связано с тем, что транзисторы обладают гораздо меньшим КПД по сравнению с электровакуумными приборами и для достижения высоких уровней выходной мощности требуется параллельное подключение целого ряда полупроводниковых приборов, что вносит дополнительные потери, уменьшает КПД и значительно увеличивает тепловыделение СВЧ усилителя [1]. Задача разработки широкополосного, мощного электровакуумного СВЧ усилителя миллиметрового диапазона достаточно сложна и для вакуумной электроники.

Разработка отечественных ЛБВ миллиметрового диапазона (ММ ЛБВ) началась в восьмидесятых годах двадцатого века. Разработкой широкополосных спиральных ММ ЛБВ занимались многие отечественные предприятия. В результате разработок были получены различные типы конструкций ЛБВ со спиральной замедляющей системой и це-

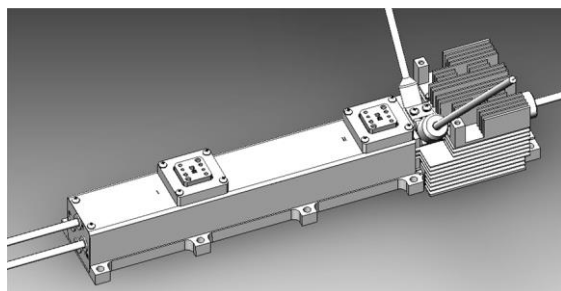
почкой связанных резонаторов (ЦСР). Однако разработанные ЛБВ либо имели малую выходную мощность, около 5-10 Вт в диапазоне 18-37 ГГц, либо узкую полосу рабочих частот, не превышающую 10-15%.

Имели место попытки закрыть диапазон двумя ЛБВ в диапазоне частот 18-26 ГГц и 26-40 ГГц, на которых удалось получить мощность порядка 10-20 Вт.

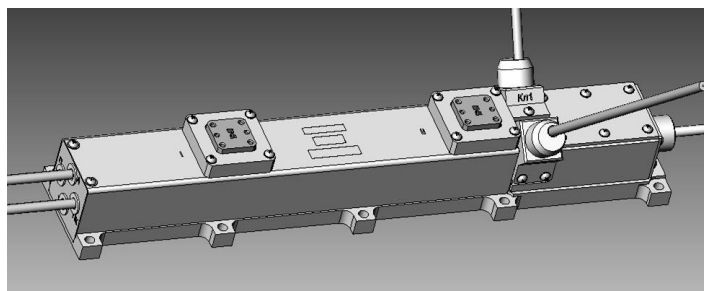
Наконец, была завершена разработка базовой конструкции широкополосной ЛБВ средней мощности ММ-диапазона нового типа [2]. В дальнейшем, основываясь на полученных результатах, была разработана ЛБВ в диапазоне частот 18-40 ГГц с выходной мощностью не менее 40 Вт, конструкция и технология изготовления которой постоянно дорабатывались и улучшались (рис. 1, 2) [3-5].

На сегодняшний день освоено производство ряда широкополосных ММ ЛБВ. Основные параметры этих приборов приведены в табл. 1.

Основываясь на достигнутых результатах, начата разработка ЛБВ с выходной непрерывной мощностью до 100 Вт. Попытки увеличить выходную мощность сорокаваттной конструкции за счет увеличения тока электронного пучка приводили к отказу ЛБВ при работе в диапазоне 36÷40 ГГц. Анализ вскрытых отказавших приборов показал, что происходит расплавление припоя, соединявшего спираль с центральным проводником коаксиального вывода СВЧ энергии (рис. 3). Температура нагрева спирали в этом месте превышает 980°C, а при этой температуре плавится припой.

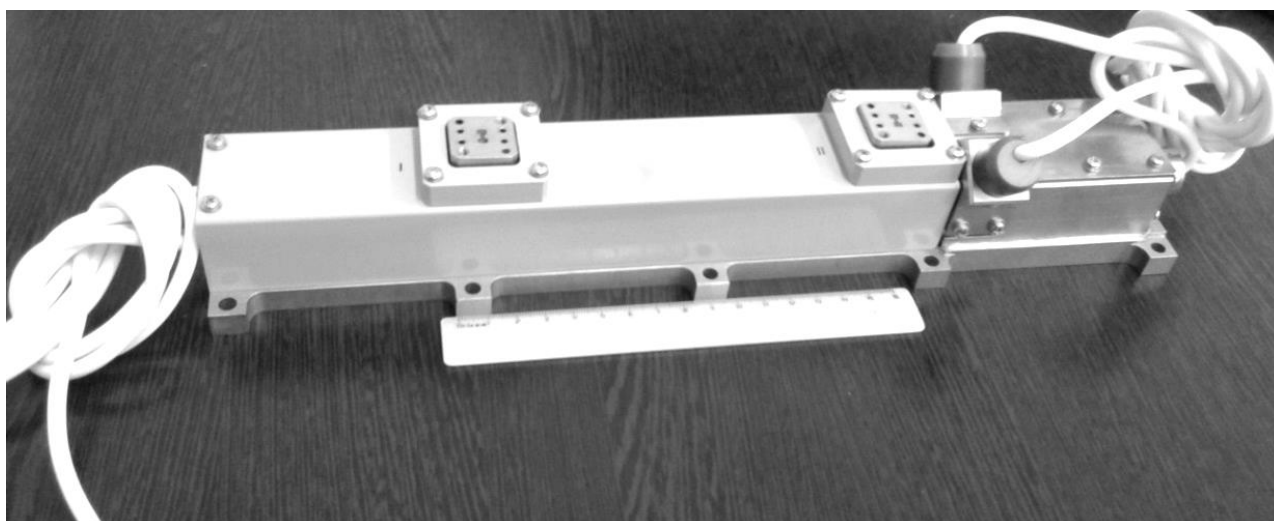


а



б

Рис. 1. 3D модели ММ ЛБВ с воздушным (а) и кондуктивным (б) охлаждением

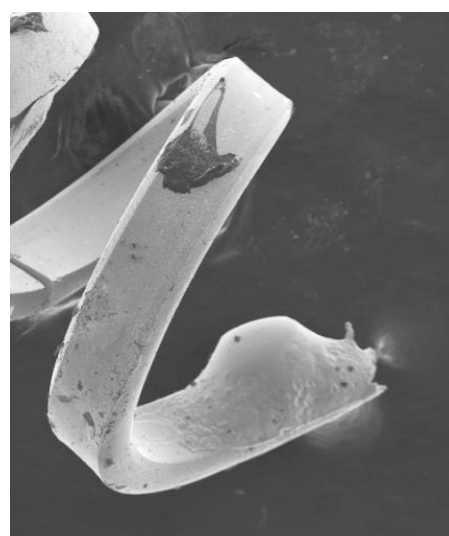
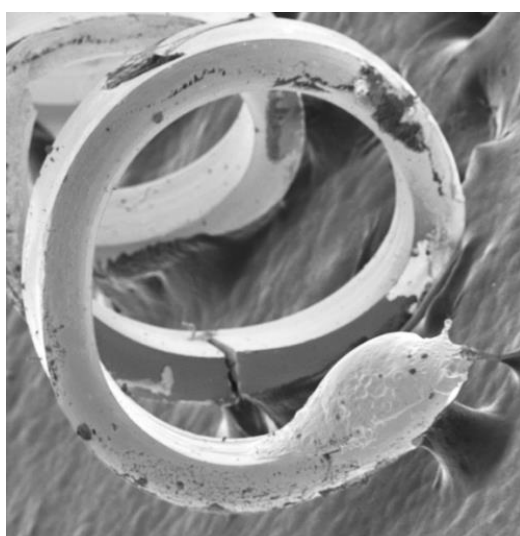


**Рис. 2.** ЛБВ миллиметрового диапазона частот. Длина линейки – 160 мм

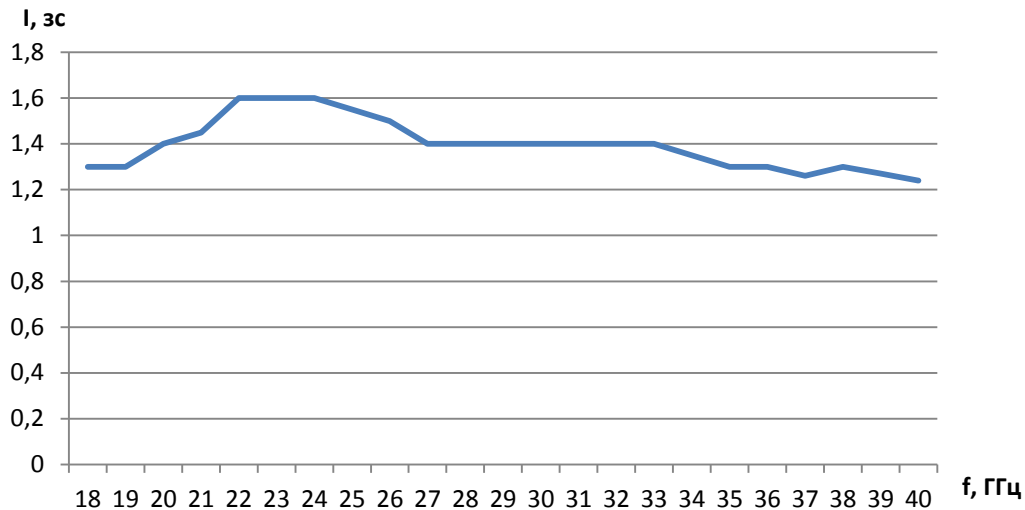
Таблица 1

Основные параметры изделий миллиметрового диапазона

| Изделие                 | Диапазон частот, ГГц | Выходная непрерывная мощность, Вт | Коэффициент усиления, дБ | Интегральный уровень собственных шумов, мВт | Охлаждение   |
|-------------------------|----------------------|-----------------------------------|--------------------------|---------------------------------------------|--------------|
| Комплектация КА (ЛБВ)   | 18÷40                | 40                                | 30                       | 10                                          | воздушное    |
| Комплектация КА-1 (ЛБВ) | 18÷40                | 25                                | 32                       | 5                                           | кондуктивное |
| Комплектация КА-2 (ЛБВ) | 26÷40                | 40                                | 35                       | 5                                           | воздушное    |
| Комплектация КА-3 (ЛБВ) | 18÷26                | 70                                | 35                       | 5                                           | воздушное    |



**Рис. 3.** Спирали в отказавшей ЛБВ

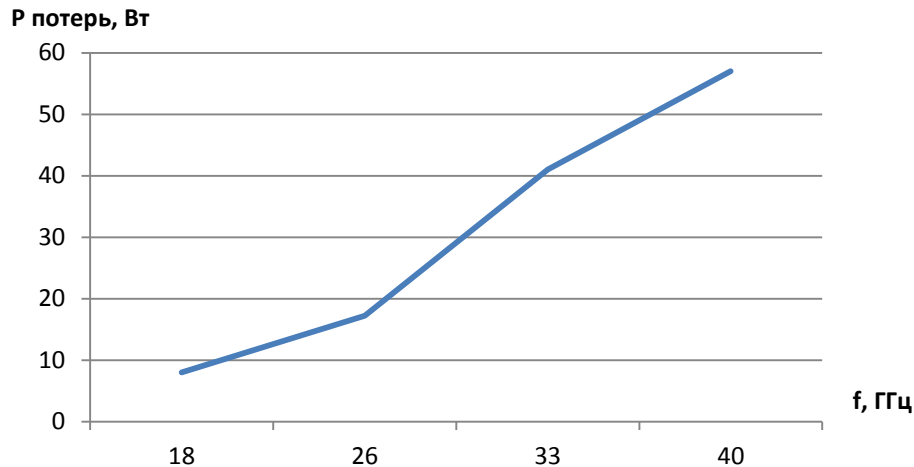


**Рис. 4.** Зависимость тока замедляющей системы от частоты

Доля тепловой энергии, полученной от оседающих на спираль электронов электронного потока, относительно невелика, меняется по всему рабочему диапазону незначительно и не превышает 13÷17 Вт (рис. 4).

Учитывая, что основная масса отказов ЛБВ случались при работе в диапазоне

36÷40 ГГц, были проведены расчёты СВЧ потерь, показавшие, что с ростом частоты в спирали значительно возрастают потери СВЧ мощности, которые могут превышать 60 Вт в коротковолновом диапазоне частот (рис. 5), что и является причиной разогрева спирали и, как следствие, отказов ЛБВ.



**Рис. 5.** Зависимость мощности ВЧ потерь в спирали от частоты (расчетное значение)

Для решения проблемы была полностью пересмотрена конструкция места соединения спирали замедляющей системы с центральным проводником коаксиальной линии произведена замена припоя на более тугоплавкий и развита поверхность радиатора охлаждения вывода энергии (рис. 6), обеспечивающая более эффективное тепло-рассеивание и охлаждение ЛБВ. Был изме-

нён материал и разработана технология полировки поверхности спирали замедляющей системы. Благодаря этому удалось снизить СВЧ потери почти в 3 раза и повысить выходную непрерывную мощность ЛБВ до 100 Вт.

На рис. 7 представлена амплитудно-частотная характеристика разработанной ЛБВ в диапазоне 23-40 ГГц.



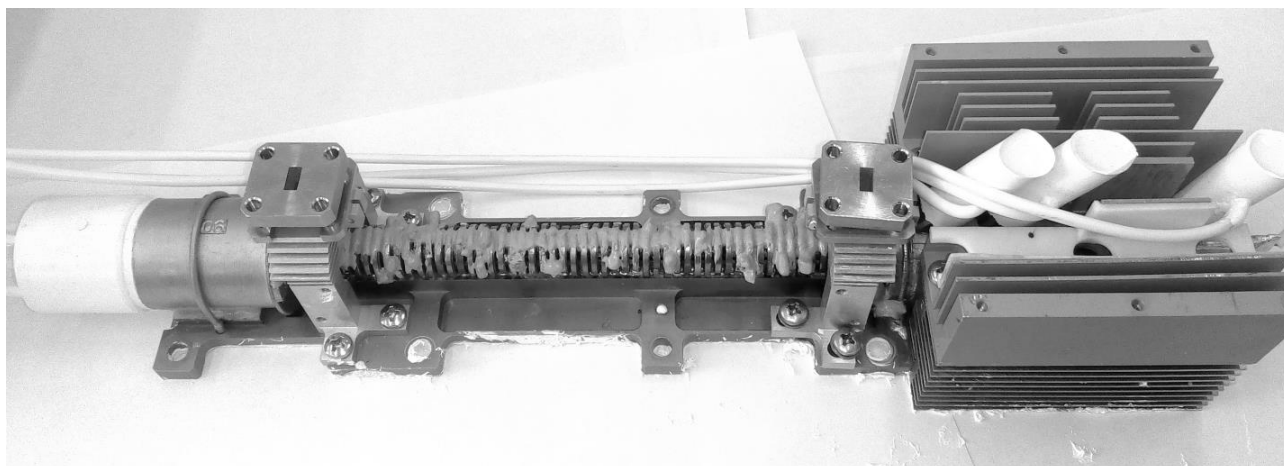


Рис. 6. Внешний вид ЛБВ Ка-диапазона с выходной непрерывной мощностью до 100 Вт

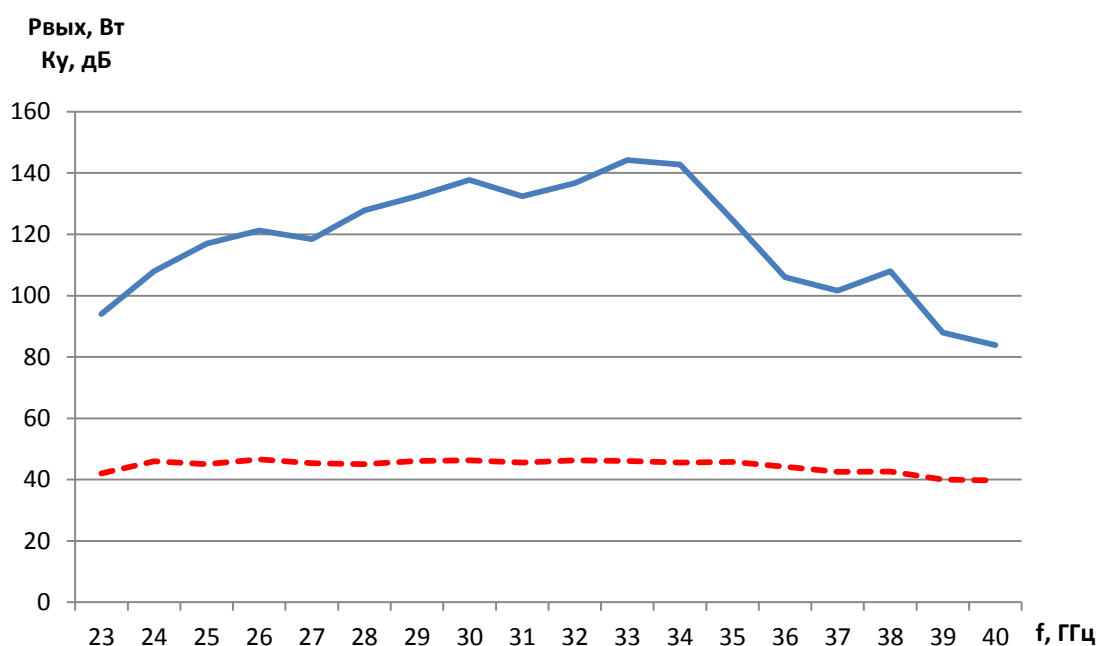


Рис. 7. Амплитудно-частотные характеристики ЛБВ:

— выходная мощность ( $P_{вых}$ ); — коэффициент усиления ( $K_y$ )

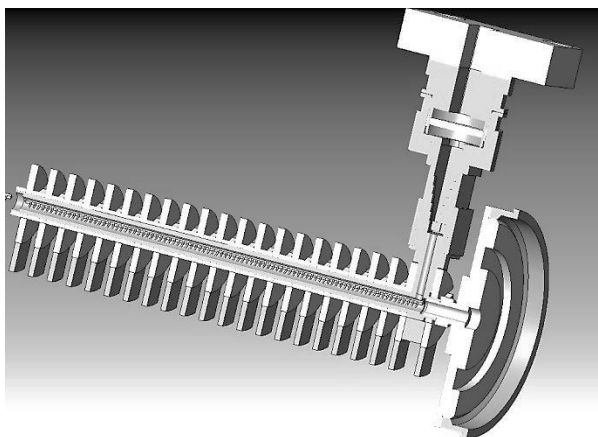
В ЛБВ используется трехсекционная замедляющая система, заимствованная из базовой конструкции [2] и имеющая следующие особенности:

- оболочки секций замедляющей системы состоят из медных вакуумноплотных трубок, стальных полюсных наконечников и колец из монели, расположенных на медных трубках между полюсными наконечниками. Монелевые кольца в выходной секции замедляющей системы имеют проточку по внутреннему диаметру для припоя, благодаря чему происходит более полное заполнение зазора кольцо-трубка, тем

самым увеличивая теплопроводность конструкции;

- детали оболочек спаяны между собой припоем типа ПСр и образуют механически прочную конструкцию;

- внешняя цилиндрическая поверхность полюсных наконечников является базовой поверхностью, относительно которой методом электроискровой обработки изготавливают заданный профиль внутри оболочки. К полюсным наконечникам оболочки припаяны медные пластины для обеспечения теплоотвода от замедляющей системы.



**Рис. 8.** 3D модель разреза выходной секции замедляющей системы

Спираль входной и средней секции замедляющей системы изготовлена из мате-

риала МАГТ 0.2, а спираль выходной секции замедляющей системы – из вольфрама с нанесённым медным покрытием толщиной  $0,005 \pm 0,008$  мм. Спирали всех трёх секций замедляющей системы изготовлены из микроленты сечением  $0,1 \times 0,2$  мм с внутренним диаметром 0,8 мм, крепятся внутри медных трубок замедляющей системы прямоугольными диэлектрическими стержнями методом термообжатия (рис. 8).

В настоящее время продолжаются работы по уменьшению уровня СВЧ потерь и улучшению электрических параметров ЛБВ.

Авторы выражают благодарность д.т.н., профессору Царёву В.А. за помощь при планировании исследований и рекомендации по оформлению статьи.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Сечи Ф.** Мощные твердотельные СВЧ усилители / Ф. Сечи, М. Буджати. М.: Техносфера, 2016.

2. **Афонин И.Н.** Настройка магнитных периодических фокусирующих систем по уровню поперечной составляющей магнитной индукции / И.Н. Афонин // АПЭП-2018: материалы Междунар. науч.-техн. конф. 27-28 сентября 2018 г. Саратов, 2018.

3. Материалы научно-технической конференции, посвященной 55-летию открытого акционерного общества «Научно-производственное предприятие «Алмаз». 5-7 сентября 2012 г. Саратов, 2012. С. 43-45.

4. Результаты разработки широкополосной ЛБВ миллиметрового диапазона и технологии ее производства / Н.А. Бушуев, Д.И. Кириченко, П.Д. Шалаев, В.И. Роговин, С.А. Калмыков, М.А. Манжосин // Радиотехника. 2018. № 8. С. 101.

5. **Алексеева Н.А.** Уменьшение шумов в широкополосных ЛБВ миллиметрового диапазона за счет использования электронных пушек с полем на катоде / Н.А. Алексеева // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП-2016): материалы 12-й Междунар. науч.-техн. конф. Саратов, 2016.

**Кириченко Денис Иванович** – начальник отдела АО «НПП «Алмаз», Саратов

**Роговин Владимир Игоревич** – заместитель директора по развитию и внедрению результатов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ АО «НПП «Алмаз», Саратов

**Denis I. Kirichenko** – Head of Department 112, NPP Almaz, Saratov

**Vladimir I. Rogovin** – Deputy Director for R&D, NPP Almaz, Saratov

*Статья поступила в редакцию 01.06.19, принята к опубликованию 15.09.19*

# ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

УДК 621.372.8

## ОБ ОЦЕНКЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАТУХАНИЯ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТЕНКАХ КОАКСИАЛЬНО-СЕКТОРНОГО ВОЛНОВОДА

А.А. Скворцов

### ON ESTIMATION OF ATTENUATION COEFFICIENT IN THE METAL WALLS OF THE COAXIAL-SECTOR WAVEGUIDE

A.A. Skvortsov

*Получено квазианалитическое выражение для расчета коэффициента затухания, обусловленного потерями в металлических стенках коаксиально-секторного волновода с однородным диэлектрическим заполнением. Приводятся результаты квазианалитического расчета коэффициента затухания в металлических стенках полого коаксиально-секторного волновода при различных значениях его геометрических размеров и рабочей длины волны, которые могут быть использованы при построении СВЧ устройств различного назначения, выполненных на основе рассматриваемой линии передачи.*

**Ключевые слова:** коэффициент затухания, металлические стенки, коаксиально-секторный волновод, прямоугольный волновод, критическая длина, основная волна, квазианалитическая методика

Коаксиально-секторный волновод (КСВ) (рис. 1), обладающий рядом преимуществ по сравнению с линиями передачи (ЛП) простых поперечных сечений, находит применение в качестве базового элемента таких систем, как СВЧ устройства для термообработки диэлектрических материалов, отражательные двумерно-периодические решетки, антенны и др. [1-3]. Важной электродинамической задачей, связанной с оценкой практической пригод-

*A quasi-analytical expression for calculation the attenuation coefficient caused by the losses in the metal walls of the coaxial-sector waveguide with a homogeneous dielectric filling is obtained. The results of the quasi-analytical calculation of attenuation coefficient in the metal walls of the hollow coaxial-sector waveguide for different values of its geometrical sizes and the operating wavelength which can be used in designing microwave devices on the basis of the considered transmission line are presented.*

**Keywords:** attenuation coefficient, metal walls, coaxial-sector waveguide, rectangular waveguide, cut-off wavelength, dominant mode, quasi-analytical technique

ности применения КСВ для построения тех или иных СВЧ устройств, является определение коэффициента затухания в нем основной волны.

Задача определения коэффициента затухания основной волны в рассматриваемой направляющей системе (НС) на основе точного аналитического решения внутренней краевой задачи электродинамики затруднена из-за сложной формы поперечного сечения КСВ. В этом случае для решения волнового

уравнения необходимо применять численные или квазианалитические (приближенно-аналитические) методы. Расчет коэффициента затухания основной волны в КСВ на основе различных численных методов [1, 4] несмотря на их универсальность, связан с использованием громоздкого математического аппарата, затрудняющего применение полученных результатов для практических целей. В отличие от численных подходов квазианалитические методики (КМ) обладают наглядностью, возможностью выявить общие закономерности распространения электромагнитных волн в КСВ и сравнительной простотой вычислений [1, 5-7].

Анализ структуры поля основной волны, распространяющейся в КСВ, показал, что данную НС можно рассматривать как прямоугольный волновод (ПрВ), свернутый в поперечной плоскости по дуге окружности [5-7]. Используя эту модель, квазианалитический расчет коэффициента затухания основной волны в КСВ с однородным диэлектрическим заполнением можно провести, исходя из его замены на эквивалентный ПрВ, у которого размер широкой стенки равен  $(\pi - \alpha/2)(R + r)$ , а узкой –  $R - r$ .

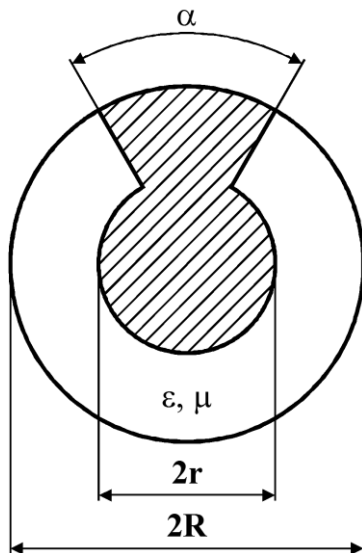


Рис. 1. Поперечное сечение КСВ

Если анализируемая НС заполнена диэлектрическим материалом с пренебрежимо малыми потерями, то рассеивание электромагнитной энергии при распространении основной волны в КСВ определя-

ется только коэффициентом затухания в его металлических стенках, который можно рассчитать с учетом данных работы [8] по формуле

$$\alpha_m = \frac{R_s}{Z_c(R-r)\sqrt{1-(\lambda/\lambda_{c1})^2}} \times \left[ 1 + \frac{2(R-r)}{(\pi - \alpha/2)(R+r)} \left( \frac{\lambda}{\lambda_{c1}} \right)^2 \right], \quad (1)$$

где

$$\lambda_{c1} = (2\pi - \alpha)(R+r)\sqrt{\epsilon\mu}; \quad (2)$$

– критическая длина основной волны КСВ с однородным диэлектрическим заполнением [5];

$$R_s = \sqrt{\frac{\pi f \mu_m \mu_0}{\sigma_m}}; \quad (3)$$

– поверхностное активное сопротивление металлических стенок КСВ;

$$Z_c = \sqrt{\frac{\mu\mu_0}{\epsilon\epsilon_0}} = Z_0 \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}; \quad (4)$$

– характеристическое сопротивление диэлектрического материала, заполняющего КСВ;

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}; \quad (5)$$

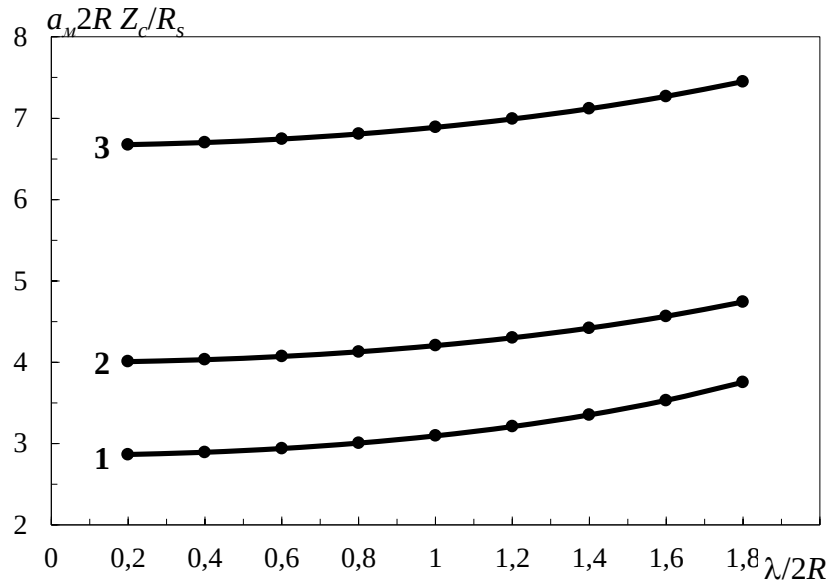
– характеристическое сопротивление воздушного заполнения;  $\mu_m$  и  $\sigma_m$  – относительная магнитная проницаемость и проводимость металлических стенок КСВ;  $\epsilon$  и  $\mu$  – относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости материала, заполняющего КСВ.

Как следует из выражений (1)-(5), коэффициент затухания в металлических стенках КСВ зависит не только от размеров поперечного сечения и электрофизических свойств диэлектрического заполнения и проводящих поверхностей рассматриваемой ЛП, но и от рабочей длины волны.

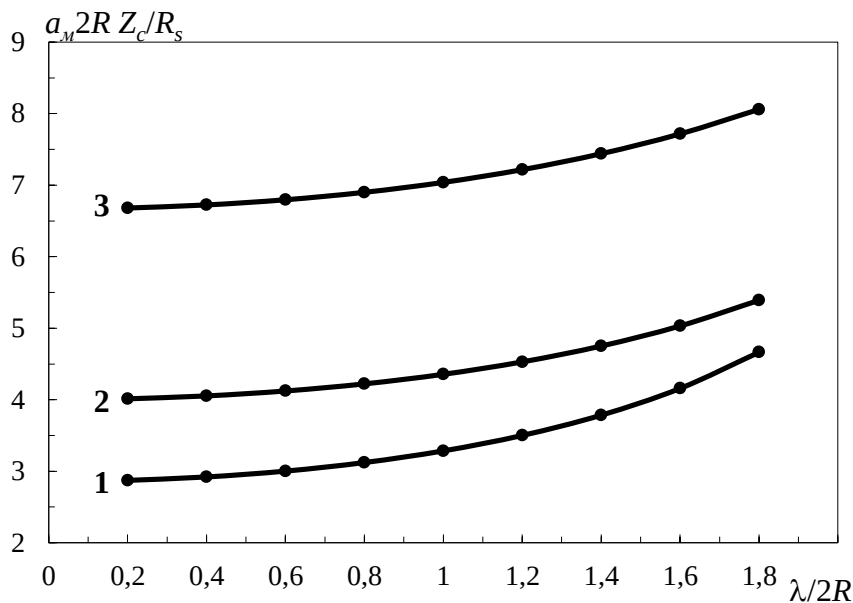
На основе рассмотренной выше КМ проведен расчет коэффициента затухания в металлических стенках КСВ при различ-

ных значениях его геометрических размеров, электрофизических параметров однородного диэлектрического заполнения и рабочей длины волны. В качестве примера, дающего наглядное представление о характере изменения затухания основной волны в проводящих поверхностях КСВ

( $\epsilon = \mu = 1$ ), на рис. 2 представлены результаты квазианалитического расчета нормированного коэффициента затухания в металлических стенках рассматриваемой ЛП, полученные по формулам (1)-(5) при различных значениях  $\alpha$ ,  $r/R$  и  $\lambda/2R$ .



а



б

**Рис. 2.** Зависимость нормированного коэффициента затухания в металлических стенках КСВ от  $\lambda/2R$  при  $\alpha = 60^\circ$  (а) и  $\alpha = 120^\circ$  (б) и различных  $r/R$ : 1 –  $r/R = 0,3$ ; 2 –  $r/R = 0,5$ ; 3 –  $r/R = 0,7$

Из рис. 2 видно, что при  $\alpha = \text{const}$  с увеличением отношений  $r/R$  и  $\lambda/2R$  возрастают

потери электромагнитной энергии основной волны в проводящих поверхностях КСВ.

Таким образом, рассмотренная в настоящей работе КМ, позволившая установить в явном виде зависимость коэффициента затухания в металлических стенках КСВ от его геометрических размеров, электрофи-

зических параметров однородного диэлектрического заполнения и рабочей длины волны, может быть использована при проектировании СВЧ устройств на основе анализируемой НС.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Коломейцев В.А.** Микроволновые системы с равномерным объемным нагревом / В.А. Коломейцев, В.В. Комаров. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 1997. Ч. 1. 160 с.

2. **Антоненко Ю.В.** Преобразование поляризации электромагнитных волн на отражательной решетке из закороченных коаксиально-секторных волноводов / Ю.В. Антоненко, А.В. Грибовский // Радиофизика и радиоастрономия. 2011. Т. 16. № 1. С. 82-89.

3. **Сомов В.А.** Коаксиально-секторная антенна для генератора с магнитной изоляцией / В.А. Сомов, Ю.В. Ткач, А.Ф. Ляховский // Электромагнитные явления. 1998. Т. 1. № 4. С. 474-482.

4. **Захарченко М.Ю.** Анализ численно-аналитических методов решения электродинамической задачи для продольно-регулярных волноводов со сложным криволинейным поперечным контуром / М.Ю. Захарченко, Ю.Ф. Захарченко // Известия вузов. Поволжский регион. Физико-математические науки. 2015. № 3. С. 28-49.

5. **Скворцов А.А.** Квазианалитический расчет критической длины основной волны коаксиально-секторного волновода / А.А. Скворцов // Проблемы управления, обработки и передачи информации: сб. тр. V Междунар. юбилейн. науч. конф. Саратов: ООО СОП «Юди», 2017. С. 259-261.

6. **Скворцов А.А.** О расчете критических длин основной и первой высшей мод коаксиально-секторного волновода / А.А. Скворцов // Энергосбережение и эффективность в технических системах: материалы V Междунар. науч.-техн. конф. студентов, молодых ученых и специалистов. Тамбов: Изд-во Першина Р.В., 2018. С. 204-205.

7. **Скворцов А.А.** Квазианалитические выражения для расчета волнового сопротивления коаксиально-секторного волновода / А.А. Скворцов // Антенны. 2017. Вып. 8. С. 26-29.

8. **Ефимов И.Е.** Волноводные линии передачи / И.Е. Ефимов, Г.А. Шермина. М.: Связь, 1979. 232 с.

**Скворцов Алексей Анатольевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.»

**Aleksei A. Skvortsov** – PhD, Associate Professor, Department of Radioelectronics and Telecommunications Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

*Статья поступила в редакцию 05.09.19, принята к опубликованию 15.09.19*

## К СВЕДЕНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

В журнале можно опубликовать материалы научно-технических конференций, круглых столов, выставок по тематическим направлениям журнала.

# МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621-039-419; 620.22-419; 537.868

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОБРАБОТКИ ОТВЕРЖДЕННЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВ СО ВСТРОЕННЫМ МОЛНИЕЗАЩИТНЫМ ПОКРЫТИЕМ В СВЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ НА ИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

И.В. Злобина, Д.Ю. Луков

## EFFECT OF THE TREATMENT OF CARBON FIBER REINFORCED PLASTICS WITH AN INTERNAL LIGHTNING-PROOF COATING RESEARCH IN THE MICROWAVE ELECTROMAGNETIC FIELD ON THEIR ELECTRICAL SPECIFICATIONS

I.V. Zlobina, D.Yu. Lukov

*С целью повышения стойкости широко применяющихся в конструкциях современных летательных аппаратов полимерных композиционных материалов (ПКМ) к статическому электричеству и разрядам молний при прохождении летательным аппаратом грозовых фронтов в их структуру включаются различные молниезащитные покрытия (МЗП). Выполнены исследования некоторых электрических характеристик углепластиков со встроенным в поверхностный слой МЗП в виде медной сетки после их кратковременной обработки в отвержденном состоянии в СВЧ электромагнитном поле с плотностью потока энергии  $(17-18) \times 10^4$  мкВт/см<sup>2</sup>. Установлено увеличение напряжения пробоя от 5 до 7 раз соответственно при переменном и постоянном токе. Показано, что при этом электрическая емкость обработанных образцов снижена относительно контрольных в 7,5 раза. Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологий финишной обработки изделий из ПКМ для повышения устойчивости последних к воздействию атмосферного электричества.*

*Ключевые слова:* молниезащитное по-

*In order to increase the resistance of polymer composite materials (PCM) widely used in the designs of modern aircraft to static electricity and lightning discharges during the passage of thunderstorm fronts by the aircraft, various lightning-proof coatings of the MFP are included in their structure. Studies of some electrical characteristics of carbon plastics with embedded in the surface layer of the MSP in the form of a copper grid after their short-term treatment in the cured state in a microwave electromagnetic field with an energy flux density  $(17-18) \times 10^4$  mW/cm<sup>2</sup>. The breakdown voltage was increased from 5 to 7 times, respectively, at alternating and direct current. It is shown that the electrical capacity of the treated samples is reduced relative to the control 7.5 times. The obtained results can be used in the development of finishing technologies of PCM products to improve the stability of the latter to the effects of atmospheric electricity.*

*крытие, СВЧ электромагнитное поле, полимерные композиционные материалы, электрические свойства, напряжение пробоя, ток утечки*

*Keywords: lightning-proof coating, microwave electromagnetic field, polymer composite materials, electrical properties, breakdown voltage, leakage current*

В авиационной технике и ветроэнергетике широко применяется изготовление некоторых несущих элементов конструкции и обшивки из полимерных композиционных материалов (ПКМ), среди которых наибольшее распространение получили угле-, стекло- и органопластики [1-3]. Большинство ПКМ являются диэлектриками или, как в случае с углепластиковыми, — полупроводниками. При движении летательного аппарата или вращении крупногабаритного ветроколеса это приводит к накоплению атмосферного электричества, которое не стекает к оконечностям конструкции, и к повышенной опасности поражения разрядами молний.

В настоящее время установлено, что прямое воздействие удара молнии в конструкцию из ПКМ приводит не только к механическому разрушению элементов конструкции, но и возгоранию горючих материалов, в частности топлива, что неизбежно приведет к катастрофе [4, 5]. Поэтому молниезащита конструктивных элементов современных летательных аппаратов и объектов ветроэнергетики, выполненных из полимерных композиционных материалов, представляет собой одну из важнейших задач обеспечения надежности этого вида техники при эксплуатации в сложных метеоусловиях грозовых фронтов и активной циклонической деятельности. В настоящее время основным средством молниезащиты элементов конструкций из ПКМ являются молниезащитные покрытия (МЗП) на основе медных сеток различной схемы плетения [5-7].

Установлено [5], что для элементов конструкции из углепластика основными физическими механизмами повреждения от прямого воздействия молнии являются омический нагрев и прожиг, а также деформация и разрушение элементов от действия ударной волны. Также в [5] отмечает-

ся, что для элементов летательного аппарата, где низка вероятность прямого контакта с каналом молнии, не требуется обеспечение защиты от ее прожигающего действия, а при большой площади сечения материала не требуется защита от омического нагрева. При этом сохраняется необходимость увеличения экранирующих свойств углепластиковых элементов конструкции для обеспечения защиты радиоэлектронного оборудования от электромагнитных полей, инициированных разрядом молнии, и других внешних источников.

Одним из перспективных методов повышения физико-механических характеристик изделий из ПКМ можно считать финишную модификацию структуры отвержденных материалов в процессе кратковременного воздействия СВЧ электромагнитного поля. В то же время влияние СВЧ обработки ПКМ с сетчатыми МЗП на реализацию их основной функции — предотвращение пробоя разрядами атмосферного электричества и защиты от электромагнитных полей к настоящему времени не исследовано.

Целью исследований явилось изучение влияния СВЧ электромагнитного поля на электрические характеристики образцов из отвержденного армированного углеродными волокнами ПКМ с МЗП в виде встроенной в поверхностный слой металлической медной сетки для оценки улучшения экранирующих свойств и защиты подповерхностных слоев ПКМ.

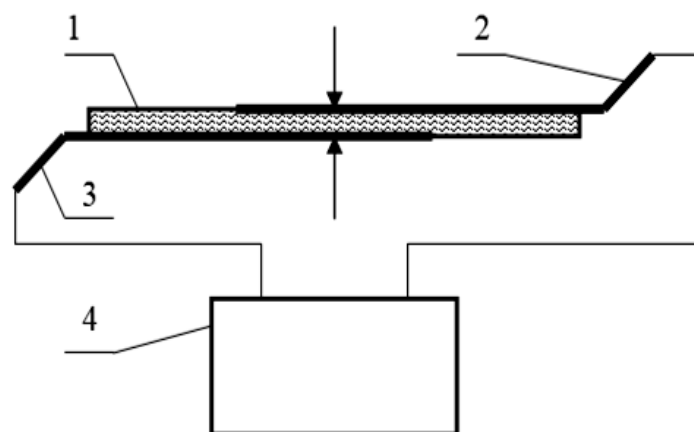
В экспериментах использовали образцы в виде пластин длиной 70 мм, толщиной 1,8 мм, шириной 10 мм. Материал образцов — углепластик типа ВКУ с молниезащитным покрытием из медной луженой сетки производства завода «Текстильмаш» с предварительной термообработкой. Ис-



пользовали по 5 контрольных образцов и подвергнутых воздействию в течение 1 минуты СВЧ электромагнитного поля частотой 2450 МГц на дистанции 200 мм, что соответствовало плотности потока энергии (ППЭ)  $17 \cdot 10^4$  мкВт/см<sup>2</sup>. При данных режимах согласно выполненным нами ранее исследованиям [8-10] обеспечивается максимальное повышение прочности ПКМ при действии статических нагрузок. Для моделирования технологии обработки крупногабаритных изделий обшивки фюзеляжа, плоскостей летательных аппаратов, а также лопастей ветроколес для СВЧ обработки применяли установку «Жук-2-02» (ООО НПП «АгроЭкоТех», г. Обнинск Калужской обл.) с излучателем рупорного типа. Для исключения экранирующего влияния

встроенной сетки МЗП воздействие СВЧ электромагнитного поля осуществляли с противоположной стороны образцов.

Определяли величину напряжения пробоя образцов, ток утечки и электрическую емкость образцов. Для электрического нагружения использовали установку проверки сопротивления изоляции GW Instek GPI-835A. Схема проведения испытаний представлена на рис. 1. В процессе испытаний ступенчато нагружали образцы напряжением от 100 до 500 В с шагом 100 В с выдержкой 30 с до наступления пробоя, который фиксировался по росту тока утечки. Использовали переменный и постоянный ток. Дополнительно определяли напряжение пробоя и ток утечки образцов из углепластика типа ВКУ без МЗП.



**Рис. 1.** Схема измерений: 1 – образец; 2 и 3 электроды, прижатые к образцу; 4 – установка проверки сопротивления изоляции

Результаты исследований представлены в табл. 1 и 2. Видно существенное отличие в емкостных характеристиках контрольного и обработанного образцов: электрическая емкость, определенная при частоте 1000 Гц, обработанных в СВЧ электромагнитном поле образцов в 7,5 раза меньше, чем у контрольных. При частоте 120 Гц емкость обработанных образцов меньше, чем контрольных, на несколько порядков.

Для всех образцов напряжение нагружения, при котором наступает пробой, не превышает 500 В. При этом переменный ток характеризуется большими значениями напряжения. При использовании переменного тока как контрольные, так и обрабо-

танные образцы испытывают пробой при напряжении нагружения 500 В. При этом ток утечки в обработанных образцах фиксируется при напряжении, как минимум, в 5 раз превышающем напряжение для контрольных образцов. Ток утечки практически не отличается по величине.

При нагружении образцов постоянным током наблюдаются некоторые отличия от приведенных выше результатов. Ток утечки появляется при меньшем примерно в 2 раза напряжении пробоя, при этом и величина напряжения нагружения также имеет меньшее значение. Однако пробой контрольных образцов наступает уже при первой ступени в 100 В, в то время как обрабо-

танных – при 400 В. Разница в значениях напряжения пробоя еще значительнее, чем при использовании переменного напряжения и составляет 7 раз. Ток утечки для обработанных образцов значимо (более чем на 35%) выше. Контрольные и обработан-

ные в СВЧ электромагнитном поле образцы углепластика без МЗП имеют практически равные значения напряжения пробоя и тока утечки. При этом пробой обработанных образцов происходит при трехкратно большем значении нагружающего напряжения.

Таблица 1

Результаты испытаний образцов из углепластика ВКУ с МЗП

| Образцы                     | Контрольный |            | Обработанный |            |
|-----------------------------|-------------|------------|--------------|------------|
|                             | Переменный  | Постоянный | Переменный   | Постоянный |
| Напряжение пробоя, В        | 50-85       | 40         | 435          | 295        |
| Напряжение нагружения, В    | 500         | 100        | 500          | 400        |
| Ток утечки, мА              | 4,82        | 4,45       | 1,54-4,8     | 6,04       |
| Емкость при частоте 1000 Гц | 1500 мкФ    |            | 200 мкФ      |            |
| Емкость при частоте 120 Гц  | 237 мкФ     |            | 0,1 мкФ      |            |

Таблица 2

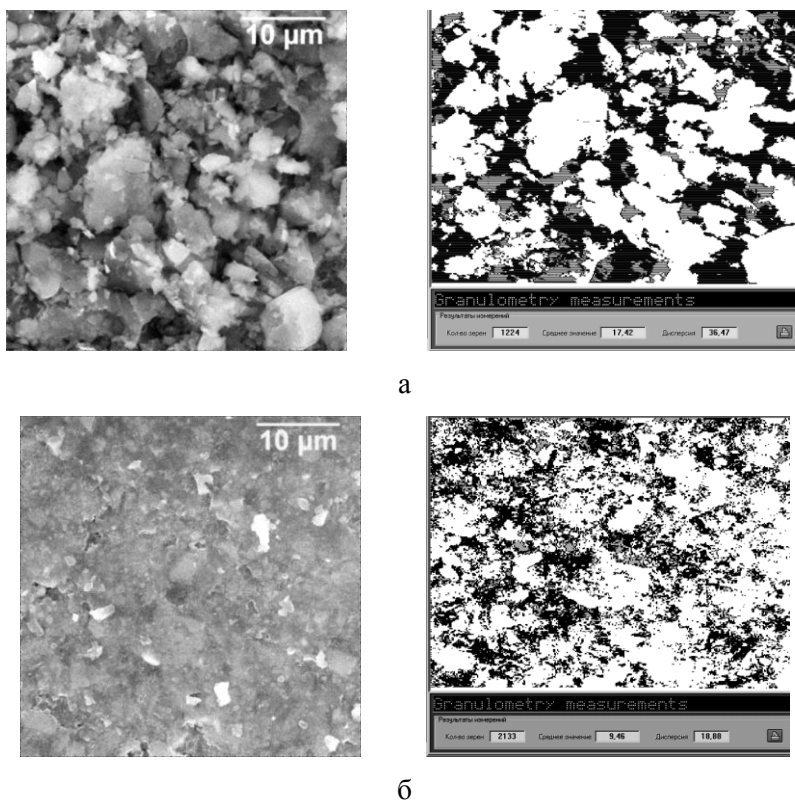
Результаты испытаний образцов из углепластика ВКУ без МЗП

| Образцы                  | Контрольный |  | Обработанный |  |
|--------------------------|-------------|--|--------------|--|
|                          | Постоянный  |  | Постоянный   |  |
| Напряжение пробоя, В     | 35-40       |  | 45           |  |
| Напряжение нагружения, В | 100         |  | 300          |  |
| Ток утечки, мА           | 2,33-4,63   |  | 4,65-5,71    |  |

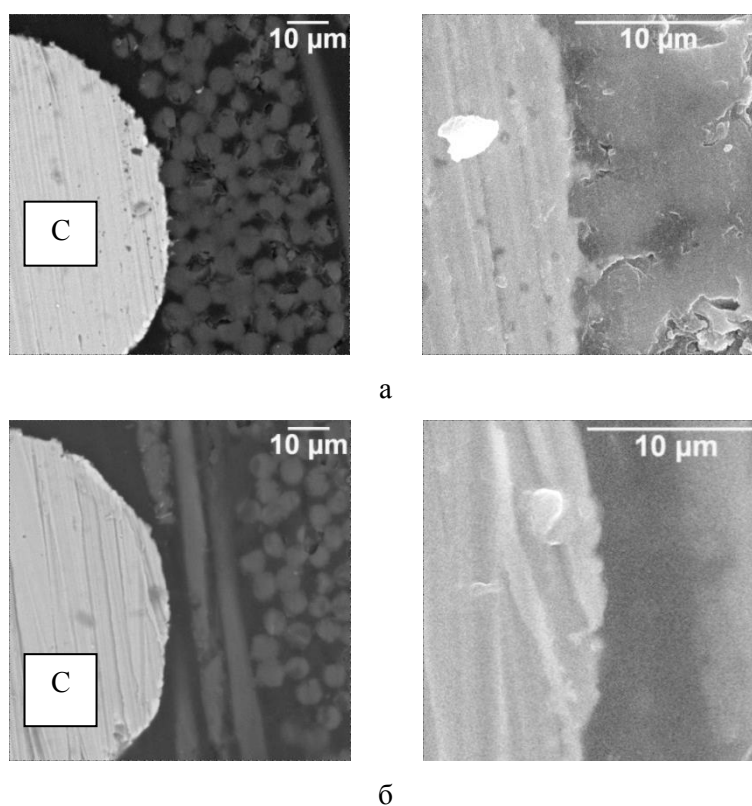
Полученные результаты могут быть объяснены следующим образом. Электрическая емкость углепластика определяется диэлектрическими свойствами матрицы, связывающей слои углеродных волокон, и внешнего покрывающего сетку МЗП слоя стеклопластика. Также на величину емкости оказывает влияние наличие пор в структуре внешнего слоя и в объеме ПКМ. Исследования микроструктуры угле- и стеклопластиков после их обработки в СВЧ электромагнитном поле, выполненные нами, выявили уменьшение размеров пор более чем на 80% (рис. 2) и снижение общей пористости на 47%.

Такое значительное снижение объема пор в структуре ПКМ способствует понижению емкости исследованного объема материала. При этом следовало бы ожидать повышение проводимости или,

по крайней мере, сохранение ее на близком к контрольным образцам уровне. Это наблюдается у образцов без МЗП в виде металлической сетки (табл. 2). У образцов с МЗП снижение электрической емкости обработанных образцов сопровождается отмеченным выше ростом напряжения пробоя. Анализ электронных микрофотографий (рис. 3) с увеличением  $\times 10000$  показывает, что контактная зона «элемент МЗП-углепластик» в контрольных образцах характеризуется агломерированной неоднородной структурой, видны отдельные элементы матрицы и пустоты (поры) сложной формы. В обработанных в СВЧ электромагнитном поле образцах образуется однородная мелкоагломерированная структура. Практически не выделяются агломераты, структура выглядит однородно аморфной.



**Рис. 2.** Микроструктура контрольного (а) и обработанного (б) образцов углепластика ВКУ при увеличении  $\times 10000$ , количество агломератов матрицы в поле зрения и размеры пор [8]



**Рис. 3.** Контактная зона «элемент сетки МЗП (С) – углепластик» контрольного (а) и обработанного (б) образцов при увеличении  $\times 5000$  и  $\times 10000$ . Видно появление зазора между элементом сетки и композитом после СВЧ воздействия

В то же время в непосредственной близости от элемента МЗП возможен равномерный зазор протяженностью до 10 мкм. Данный факт может создавать повышенное сопротивление в зоне контакта и обеспечить стекание электрического заряда, в том числе наведенного внешними электромагнитными полями, по МЗП без контакта с основным объемом композита. В результате проникновения тока через структуру ПКМ не происходит. Соответственно увеличиваются экранирующие свойства углепластиковых элементов конструкции, что предохраняет радиоэлектронные системы летательного аппарата.

Установлено повышение до 5-7 раз напряжения пробоя образцов углепластика со встроенным молниезащитным покрытием в виде медной сетки после обработки в СВЧ электромагнитном поле с плотностью потока энергии  $(17-18) \times 10^4$  мкВт/см<sup>2</sup> в течение 1 минуты. При этом наибольшая эффективность констатирована при использовании постоянного тока. Одновременно снижается в 7,5 раз электрическая емкость образца.

Механизм указанных изменений может заключаться в снижении размеров пор и общей пористости обработанных в СВЧ электромагнитном поле образцов и

образовании зазоров между элементами МЗП и основным объемом композита. В этом направлении целесообразно проведение дополнительных исследований.

Полученные результаты показывают возможность повышения защитных характеристик углепластиковых конструкций с МЗП по экранированию электронных систем летательных аппаратов от электромагнитных полей, наведенных разрядами атмосферного электричества. В связи с изложенным представляет интерес исследование на физической модели воздействия высоковольтных электрических разрядов – имитаторов разряда молнии на модифицированные в СВЧ электромагнитном поле углепластики со встроенным МЗП.

Исследования выполнены при поддержке гранта РНФ № 18-79-00240 «Раскрытие механизма взаимодействия микроволнового излучения с отвержденными полимерными композиционными материалами на основе углеродных волокон в сочетании с внедренными в поверхностный слой связанными металлическими элементами, периодически распределенными в плоскости армирования наполнителем, применительно к конструкционным элементам авиационных робототехнических комплексов».

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Кошкин Р.П.** Основные направления развития и совершенствования беспилотных авиационных систем: <http://spmagazine.ru/420> (дата последнего обращения 03.03.2019 г.).

2. <http://compositeonline.ru/technology/3989/> (дата последнего обращения 03.03.2019 г.).

3. **Каблов Е.Н.** Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» / Е.Н. Каблов // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3-33.

4. Композитные самолеты и проблемы молниезащиты (<https://aviator.guru/blog/>

43849253450/Kompozitnyie-samoletyi-i-problemyi-molniezaschityi#42761336632, дата последнего обращения 02.04.2019 г.).

5. **Острик А.В.** Молниезащита углепластиковых элементов конструкции самолета при тепловом и механическом действиях прямого удара молнии / А.В. Острик, А.А. Филипенко // Конструкции из композиционных материалов. 2010. № 1. С. 34-44.

6. <https://elibrary.ru/item.asp?id=15568774>

7. Вязано-паяные проволоочные сетки для молниезащиты лопастей ветрогенераторов / Л.Р. Вишняков, О.В. Зубков, В.А. Коханый, И.Н. Коханая // Технологические системы. 2014. № 1. С. 58-63

8. Молниезащитные покрытия для конструкционных углепластиков, содер-

жащие наночастицы / Г.М. Гуняев, Л.В. Чурсова, А.Е. Раскутин и др. // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2012. № 3.

9. **Злобина И.В.** Новые конструкторско-технологические методы повышения прочности конструкционных элементов из неметаллических композиционных материалов: монография / И.В. Злобина, Н.В. Бекренев. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2017. 164 с.

10. **Zlobina I.V.** The Influence of Microwave Electromagnetic Field on Mechanical Properties of Composite Materials / I.V. Zlobina, N.V. Bekrennev // Научные технологии. 2016. Т. 17. № 2. С. 25-30.

11. **Злобина И.В.** Исследование микроструктуры конструкционных слоистых углепластиков, модифицированных путем электрофизических воздействий / И.В. Злобина, Н.В. Бекренев // Вестник РГТУ. 2017. № 1 (40). С. 236-242.

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

**Луков Дмитрий Юрьевич** – соискатель ученой степени кандидата технических наук кафедры «Электроника и системотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Zlobina Irina V.** – Ph.D., Associate Professor, Department «Technical Mechanics and Machine Parts» of Yuri Gagarin Saratov State Technical University

**Lukov Dmitry Yu.** – applicant for academic degree of Ph.D., Department «Electronics and engineering» of Yuri Gagarin Saratov State Technical University

*Статья поступила в редакцию 05.09.19, принята к опубликованию 15.09.19*



# ИЗМЕРЕНИЯ

УДК 621.365

## ЦИФРОВОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ МОЩНОСТИ В ДИАПАЗОНЕ СВЧ НА АППАРАТНОЙ ПЛАТФОРМЕ ARDUINO

И.Н. Антонов, А.Н. Пименов, О.Н. Пименова

## DIGITAL POWER METER IN THE MICROWAVE RANGE ON THE ARDUINO HARDWARE PLATFORM

I.N. Antonov, A.N. Pimenov, O.N. Pimenova

*Представлена конструкция калориметрического измерителя мощности с диапазоне СВЧ с применением современных программных и технических средств.*

**Ключевые слова:** калориметрический ваттметр, NTC термистор, аппаратная платформа Arduino, электронный расходомер жидкости

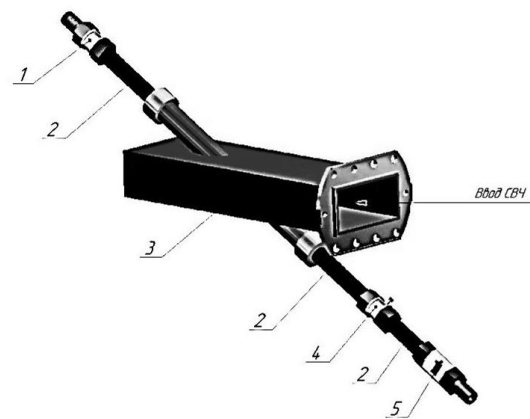
Существует немало методов измерения мощности в СВЧ диапазоне. Большинство методов основано на преобразовании энергии СВЧ электромагнитного поля в другие виды энергии (свет, теплота).

Наиболее распространенными являются тепловые методы измерения СВЧ мощности, где количество выделяемой теплоты в поглощающей среде измеряется теплофизическими и электрофизическими методами.

Калориметрические ваттметры проточного типа (рис. 1) позволяют измерять большие мощности. Основными элементами этих ваттметров являются: СВЧ нагрузка, в которой поглощается и преобразуется в теплоту высокочастотная мощность; система циркуляции жидкости; средства для измерения разности температур входящей и выходящей из нагрузки жидкости (очень часто в качестве охлаждающей жидкости используется вода) [1].

*The article presents a calorimetric power meter with a microwave range using advanced software and hardware.*

**Keywords:** calorimetric wattmeter, NTC thermistor, Arduino hardware platform, electronic liquid flow meter



**Рис. 1.** Конструкция калориметрического ваттметра проточного типа для измерения мощности в диапазоне СВЧ: 1 – NTC термистор для определения начальной температуры жидкости; 2 – соединительные патрубки; 3 – согласованная нагрузка; 4 – NTC термистор для определения температуры жидкости на выходе нагрузки; 5 – расходомер жидкости

Среднюю мощность  $P$ , рассеиваемую в нагрузке в установившемся режиме, при

известной разности температур  $\Delta T$ , можно определить по формуле [2]:

$$P = \nu \rho c \Delta T, \quad (1)$$

где  $\nu$  – расход охлаждающей жидкости,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $\rho$  – плотность жидкости,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $c$  – удельная теплоемкость жидкости,  $\text{Дж}/\text{кг}\cdot\text{К}$ ;  $\Delta T$  – разность температур на входе и выходе ваттметра,  $\text{К}$ .

Приведенная формула имеет ограниченное применение, поскольку в ней не учитываются потери теплоты в нагрузке за счет конвекции и теплопроводности. Определение коэффициента теплового рассеяния в реальных конструкциях нагрузок является весьма сложным ввиду смешанного механизма теплопередачи [3].

Обычно в калориметрических ваттметрах разность температур измеряется при помощи термопар и термометров, а расход жидкости, протекающий через нагрузку, определяется секундомером и мерной емкостью. При этом конструкция ваттметра становится довольно громоздкой и неудобной [1].

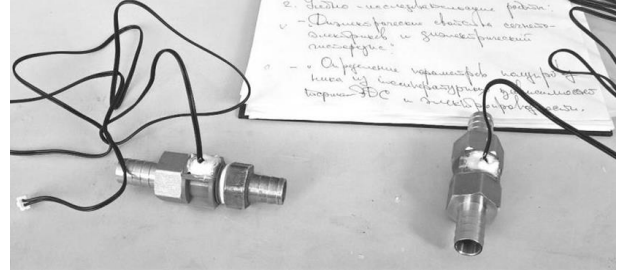
Применение современных аппаратных платформ и программных продуктов позволит создать наиболее простой, информативный ваттметр СВЧ мощности, для проведения поисковых исследований.

Целью работы является создание калориметрического ваттметра проточного типа в диапазоне температур от 0 до  $100^\circ\text{C}$ , выполненный на аппаратной платформе Arduino Uno.

Использование Arduino обусловлено тем, что платформа удобна для быстрой разработки электронных устройств, благодаря открытой архитектуре и программному коду. Язык программирования устройств Arduino прост в освоении и основан на C и C++. Устройство программируется через USB без использования программаторов [4]. Код программы разрабатывается в собственной среде разработки продукта Arduino.

При разработке схемы определения разности температур необходимо выбрать оптимальные датчики температуры, которые

минимизируют стоимость без ущерба для производительности, точности и надежности. Такими качествами обладают термисторы NTC (рис. 2) с отрицательным температурным коэффициентом.



**Рис. 2.** Вспомогательные элементы конструкции NTC термисторов для определения температуры жидких сред

Термисторы NTC также обеспечивают превосходную чувствительность. К тому времени, когда другие датчики температуры зарегистрировали изменение температуры, схема на основе термистора NTC уже позволит системе предпринять корректирующие действия.

Благодаря быстрой реакции и широкому динамическому диапазону выходного сопротивления термисторы NTC могут быть очень точными даже в небольшом диапазоне температур. Это делает их чрезвычайно универсальными в широком спектре встроенных приложений.

Калибровка термисторов производится программно, используя формулу Стейнхарта – Харта:

$$\frac{1}{T} = A + B \times \ln(R) + C (\ln(R))^3, \quad (2)$$

где  $A$ ,  $B$  и  $C$  – коэффициенты Стейнхарта – Харта определяются экспериментально либо взяты из техпаспорта конкретного термистора;  $T$  – искомая температура,  $\text{К}$ ;  $R$  – измеренное сопротивление термистора,  $\text{Ом}$ .

Определение расхода жидкости в единицу времени производится с помощью электронного расходомера (рис. 3). Датчик работает по принципу эффекта Холла. В конструкции расходомера установлен вентилятор с несколькими лопатками, который расположен на пути потока жидкости. Жид-

кость, толкая лопадки вентилятора, создает вращательный момент на роторе расходомера, индуцируя импульс на токоведущих кон-

цах устройства. Тем самым определение расхода жидкости сводится к подсчету количества импульсов в единицу времени.



Рис. 3. Расходомер жидкости

В ходе испытаний СВЧ электротехнологических установок, полученные результаты измерения (в нашем случае температуры и расхода жидкости), подлежат обработке для определения средней мощности рассеиваемой в нагрузку. Целесообразна совместная работа ЭВМ с калориметрическим ваттметром, что значительно ускорит обработку результатов исследования, сделает процесс более информативным, а также наиболее безопасным.

Графический интерфейс программы показан на рис. 4. Подготовка работы программы начинается с выбора табличных значений плотности и удельной теплоемкости рабочей

жидкости. Данные вносятся в указанные поля области «исходные данные». После чего подается питание на периферийное оборудование (датчики и плату управления). В разделе «расчетные данные» появятся значения интересующих нас величин. По мере подачи СВЧ мощности в согласованную нагрузку, значения искомых величин начнут изменяться согласно формуле (1). При этом важно обратить внимание на физическую размерность температур на входе и выходе нагрузки. Программа работает с размерностью градус Кельвина, а для простоты и удобства пользователя значения температур выводятся на экран в градусах Цельсия.

### Калориметрический ваттметр

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><u>Расчетные данные:</u></p> <p>Температура жидкости на входе:</p> <p><math>T_1 = \text{---}^{\circ}\text{C}</math></p> <p>Температура жидкости на выходе:</p> <p><math>T_2 = \text{---}^{\circ}\text{C}</math></p> <p>Скорость потока жидкости:</p> <p><math>V = \text{---} \text{ м/с}</math></p> <p>Поглощаемая мощность:</p> <p><math>P = \text{---} \text{ Вт}</math></p> | <p><u>Исходные данные:</u></p> <p>Удельная теплоемкость жидкости:</p> <p><math>c = \text{---} \text{ Дж/кг}\cdot\text{K}</math></p> <p>Плотность жидкости:</p> <p><math>\rho = \text{---} \text{ кг/м}^3</math></p> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Рис. 4. Графический интерфейс пользователя



Как указывалось ранее, в качестве поглощающей среды используется проточная вода. Поскольку не все лаборатории имеют доступ к центральному водоснабжению, возможно применение замкнутого контура, при этом конструкция ваттметра дополнится расширительным бачком, насосом для циркуляции жидкости и радиатором для ее охлаждения.

Подобное техническое решение возможно при мощностях источников СВЧ более 10 Вт. Как и подавляющее большинство устройств, конструкция ваттметра имеет ряд недостатков, однако простота и дешевизна наряду с относительно высокой точностью и надежностью устройства привлекают интерес к калориметрическим ваттметрам проточного типа.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Архангельский Ю.С.** Измерения в СВЧ электротехнологических установках / Ю.С. Архангельский, С.Г. Калганова, Р.К. Яфаров. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2008. 263 с.

2. **Билько М.И.** Измерение мощности на СВЧ / М. И. Билько, А. К. Томашевский. М.: Радио и связь, 1986. 167 с.

3. **Тишер Ф.** Техника измерений на СВЧ / Ф. Тишер. М.-Л.: Физматиздат, 1963. 367 с.

4. **Arduino.ru:** [Электронный ресурс]. URL: <http://arduino.ru> (Дата обращения: 10.08.2019 г.).

**Антонов Игорь Николаевич** – доктор технических наук, профессор кафедры «Химия и химическая технология материалов» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Пименов Арсений Николаевич** – аспирант кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Пименова Ольга Николаевна** – аспирант кафедры «Электронные приборы и системотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Igor N. Antonov** – Dr. Sc., Professor, Department of Chemistry and Chemical Technology of Materials, Yuri Gagarin State Technical University

**Arsenii N. Pimenov** – Postgraduate, Department of Power Engineering and Electrical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Olga N. Pimenova** – Postgraduate, Department of Power Engineering and Electrical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

*Статья поступила в редакцию 10.09.19, принята к опубликованию 15.09.19*

# ЛЕТОПИСЬ

## К ДВАДЦАТИ ПЯТИЛЕТИЮ КНИГИ В.Г. КИНЕЛЕВА «ОБЪЕКТИВНАЯ НЕОБХОДИМОСТЬ. ИСТОРИЯ, ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РЕФОРМИРОВАНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИИ»

Ю.С. Архангельский

*Окончание*

## MYTHS AND LEGENDS OF SARATOV AUTOMOBILE AND ROAD INSTITUTE – SARATOV POLYTECHNIC INSTITUTE – SARATOV STATE TECHNICAL UNIVERSITY

Yu.S. Arkhangelsky

*Continued*

**Глава 4. Гуманитаризация высшего образования.** Это проблема в 90-е годы была одной из самых обсуждаемых среди преподавателей вузов России. Не надо удивляться тому, с чего начинается четвертая глава книги В.Г. Кинелева [1].

*«В реформе, проводимой высшей школой, исключительная роль принадлежит пересмотру основ и принципов социально-гуманитарного образования... Общество обеспокоено падением морального уровня некоторой части молодого поколения и его духовной опустошенностью, которые в последнее время становятся все более значимыми»<sup>1</sup>.*

И автор книги тут же ссылается на постановление Правительства РФ «О развитии гуманитарного образования в Российской Федерации» (1992 г.):

*«В плане выполнения этого важного документа развернута большая работа по подготовке и переподготовке преподава-*

*телей гуманитарных наук, издание новой учебной и научной литературы по вопросам философии, истории, экономики, социологии, политологии, права, культурологии, литературоведения... Речь идет о ликвидации последствий длительной монополии идеологического догматизма в гуманитарном образовании, о ... приобщении студентов ко всему богатству мировой и отечественной мысли»<sup>2</sup>.*

Беспокойство о всего лишь части молодежи вызвало переподготовку всего профессорско-преподавательского состава, участвующего в гуманитарном образовании? Нет, надо было перейти на принципиально иную идеологическую подготовку молодежи. На дворе-то было начало 90-х годов.

И в четвертой главе приведен интересный пример неосведомленности людей, имеющих высшее образование. Оказывается, 83% опрошенных не знали, в каком веке отменили крепостное право, 27% не знали, когда произошла Куликовская битва, 10% не знали, когда вышли на площадь декабристы...

<sup>1</sup> Кинелев В.Г. Объективная необходимость. История, проблемы и перспективы реформирования высшего образования России. М.: Республика, 1995. С. 154.

<sup>2</sup> Кинелев В.Г. Указ. соч. С. 152.

Большинство не знали имена Леонтьева, Флоренского, Лосева, Струве, Соловьева...

В те годы молча собрали свои книги и ушли профессора гуманитарных кафедр, молодые и средних лет преподаватели прошли переподготовку.

И вот прошло 24 года. Вот бы проверить, сколько из оканчивающих вузы знают имена тех, кто назван в книге В.Г. Кинелева! И еще. А если бы спросили выпускников технических кафедр, как звали Джоуля, Ленца, Ома, Кирхгофа, Яблочкова, Королева? И если бы были плохие результаты, не пришлось ли бы увольнять и переподготавливать преподавателей технических наук?

Но как строить гуманитарное образование студентов, чтобы они в своей жизни и профессиональной работе соответствовали идеологии новой России?

*«Действенным инструментом изменения методов и содержания обучения являются государственные образовательные стандарты, которые вводятся в действие впервые в истории российской высшей школы»<sup>1</sup>.*

И все гуманитарии писали новые рабочие программы. Это была работа! И с кого брали пример при разработке государственных образовательных стандартов?

*«Изучали опыт гуманитаризации образования в университетах США, Франции...»<sup>2</sup>.* И сколько же денег потребовалось на это ознакомление? Но:

*«... работа по подготовке государственных общеобразовательных стандартов вносит существенный вклад не только в российскую школу экономики, но и в образовательную систему сообщества»<sup>3</sup>.*

И, конечно, признание дипломов об образовании, что ускорит интеграцию России в мировое сообщество стран с рыночной экономикой. Кто же ожидал в 90-е годы санкций США к России, к ее гражданам, запрета въезда в США тому, другому...

Большое внимание в четвертой главе уделено ознакомлению читателей со специ-

альными научными программами, работа в рамках которых давала возможность преподавателю высказать свое мнение о гуманитаризации высшего образования и зарабатывать дополнительные деньги. И это правильно. В те годы задерживали зарплату и в вузах.

И вот через 24 года с момента выхода в свет книги В.Г. Кинелева оглядимся. Что, все проблемы с молодым поколением, о которых сказано, решены? Теперь поведение, взгляды молодежи всех во всем устраивают?

90-е годы, полные криминальными происшествиями, в которых участвовали молодые люди... А происшествия в политехническом колледже Керчи? Студент убивает студентов и кончает жизнь самоубийством. А вызывающее поведение молодых людей за рулем автомобиля? А драки богатых спортсменов? Почему же не помогают многочисленные учебные программы, разработанные в 90-е годы и позднее?

Трудно признать успешной реформу гуманитарного образования в России.

**Глава 5. К истокам духовности.** Пятая глава в книге В.Г. Кинелева самая маленькая. Она о духовности...

В «Советском энциклопедическом словаре» (1983 г.) слова «духовность» нет. Нет его и в «Словаре русского языка» С.Н. Ожегова (1953 г.). Так что, в советское время этого слова не знали? Но и в пятой главе оно используется только в заголовке этой главы. Но о чем глава, ясно с первых строк:

*«... нельзя не коснуться такой важной темы, как отношение общества к религии»<sup>4</sup>.*

Тема действительно важная, а тон, позиция автора книги определены сразу:

*«... нельзя не сказать... с убеждением о благотворном влиянии на формирование духовного мира человека познания им общечеловеческих ценностей, заложенных в религиозных учениях»<sup>5</sup>.*

<sup>1</sup> Кинелев В.Г. Указ. соч. С. 156.

<sup>2</sup> Там же. С. 156-157.

<sup>3</sup> Там же. С. 157.

<sup>4</sup> Кинелев В.Г. Указ. соч. С. 179.

<sup>5</sup> Там же. С. 180.

Отношение автора к религии, как минимум, доброжелательное. Но почему «нельзя не согласиться»? Конституция РФ разрешает разное отношение к вере, религии... Ведь если «согласиться», то получается, что большинство граждан России, родившихся в советские времена, сейчас уже в возрасте, бывшие вне церковного влияния, а это было в те годы, чем-то обделены, чем-то недостаточны? А Конституция РФ? Ее нельзя нарушать, и даже намеки на преимущественства верующих разве допустимы?

*«До 1917 г. христианская религия служила фундаментом, на котором строилась просветительская работа. Она во многом определила организацию народного просвещения. Во всех уголках необъятной страны действовали церковные учебные заведения»<sup>1</sup>.*

И это ничего? А после 1917 г. в системе образования базой был марксизм-ленинизм. И это плохо? Но ведь в пятой главе находим:

*«Сколько чернил изведено историками, философами, социологами, экономистами и политологами, чтобы доказать безнравственность религии! Известные авторы называли ее «опиумом» для народа. Вся история церкви представлялась как непрерывная цепь преступных деяний против человечества, а сама она объявлялась не иначе как оплотом мракобесия»<sup>2</sup>.*

Да, так было, и такую оценку церкви в стране знают все. Но, положительно оценивая роль церкви, автор книги спрашивает:

*«...чем объяснить непреходящий интерес всех поколений к религии на протяжении тысячелетий?»<sup>3</sup>.*

Чем объяснить? Так это не секрет: люди живут трудно, нередко очень и очень трудно, бедно и не могут улучшить свое положение. Обращаться к власти? В отчаянии люди обращаются к Богу, неведомому существу, явлению, который справедлив, непременно поможет, морально поддержит. После 1917 г. появилась вера в принципиальное изменение

жизни с изменением идеологии, лежащей в основе построения государства. И народ в определенной мере потерял тягу к религии. Но вот появились рыночные отношения, прошла уверенность в завтрашнем дне, и люди вновь потянулись в церковь.

Но в конце главы автор совершенно справедливо заключает:

*«Много вопросов. На них надо найти ответы»<sup>4</sup>.*

**Глава 6. Региональные аспекты развития высшей школы.** Уже на первой странице шестой главы говорится, что Россия как государство складывалась из отдельных территорий, во многом весьма своеобразных, но развивалась, существовала как централизованное государство, и именно это дало России возможность пройти через такие испытания, выжить и сохраниться.

Но сейчас-то Россия по Конституции состоит из регионов, наделенных широкими правами, позволяющими им проводить демократическую самореализацию. Но как же в этих условиях, спрашивает В.Г. Кинелев, сохранить общероссийское образовательное пространство? Интересный вопрос. С одной стороны, регионы, самостоятельность, а с другой – образовательная политика, ее реализация общие?

И главная проблема здесь в том, что разные регионы развивались по-разному. Произошло неравномерное распределение вузов, научных организаций по территории страны. Вузы концентрировались в крупных городах. В условиях плановой экономики, централизованного управления вузы финансировались и управлялись по жесткой вертикали власти.

И вот, по В.Г. Кинелеву, это положение надо изменить, привлечь местные средства для фиксирования вузов по месту их размещения. А вузы должны активно участвовать в реализации региональной политики, которая *«... должна выражаться в сохранении единого образовательного пространства стран при учете своеобразия экономиче-*

<sup>1</sup> Кинелев В.Г. Указ. соч. С. 188.

<sup>2</sup> Там же. С. 183.

<sup>3</sup> Там же. С. 180.

<sup>4</sup> Кинелев В.Г. Указ. соч. С. 175.

ских, национальных, демографических, социально-культурных и научно-технических элементов»<sup>1</sup>.

Что это значит? Раз в первую очередь в проблеме региональной политики высшего образования названо финансирование, затем – учет ситуации в регионе, то значит ли это, что если есть в регионе деньги, то работают и вузы. А нет денег, нет и вузов? А где региону брать специалистов? Заказывать в московских вузах? А где брать жилье для молодых специалистов? Во всех ли регионах есть деньги строить жилье для приезжих?

И В.Г. Кинелев подчеркивает, что принципиальное отличие нынешней политики организации высшего образования от прежней в том, что деятельность вузов должна определяться интересами регионов, тогда как раньше она «... определялась преимущественно не региональными, а ведомственными интересами»<sup>2</sup>.

Далее в главе приводится подробная картина того, как будет выглядеть высшая школа в дальнейшем. Сейчас запланированные изменения, судя по всему, реализованы. Да, одни вузы преобразованы в университеты Минобрнауки, другие – в управлении региональных министерств образования, появились советы ректоров, государственные образовательные стандарты, которые не дают вузам возможности вести учебный процесс, как им хочется. Да, да, ограничения остались. Это дает гарантии получения достаточно глубокого образования и в том вузе, и в другом.

Но вот на что обращаешь внимание: никто не несет ответственности за судьбу выпускников вузов. Удастся ли им найти работу? Рынок! Рынок труда... И что предлагается? Читаем:

*«... было бы ошибкой отказываться от системы государственного заказа и распределения»<sup>3</sup>.*

Все-таки по плану? И распределение выпускников? Как в прошлые годы?

Стоит согласиться с предложением внести изменения в масштабы и номенклатуру подготовки специалистов по регионам. Да, в крупных городах подготовку по той или иной специальности (профилю) ведут одновременно несколько вузов, средних учебных заведений. Устранить этот недостаток предлагается путем интеграции вузов и бывших техникумов в единую систему на базе университета. Эта процедура сейчас реализована полностью. Каковы результаты?

В объединенных учебных заведениях остаются директор, ректор, но вся полнота власти у главы объединенного вуза. Им это нравится? Помогает? И главное, как эта интеграция устраняет дублирование специальностей? Кто за этим следит? Ведь до сих пор в городе одновременно готовят тех же экономистов и в экономическом, и в техническом университетах.

От этой главы остается главное впечатление: регионы должны платить за нахождение вузов на их территории.

**Глава 7. Международные связи российской высшей школы.** Интересная тема. В 90-е годы было интересно прочитать, что думает на этот счет руководитель отечественной высшей школы. Читаем:

*«К началу XX в. российские специалисты, широко и функционально подготовленные, обладающие высокой общей культурой европейского уровня, ... начали динамично выходить на мировой рынок»<sup>4</sup>.*

Что же, в царской России все было хорошо, а тут революция, гражданская война. Международные связи СССР в области высшего образования оборвались<sup>5</sup>. Раньше молодые люди уезжали за границу учиться в лучших вузах мира, а из СССР уезжали немногие и, как правило, в европейские вузы<sup>6</sup>.

Но с началом перестройки в 80-е годы ситуация с международными связями стала улучшаться:

*«Сегодня высшее... образование России переживает качественно новый этап со-*

<sup>1</sup> Кинелев В.Г. Указ. соч. С. 196.

<sup>2</sup> Там же. С. 197.

<sup>3</sup> Там же. С. 205.

<sup>4</sup> Кинелев В.Г. Указ. соч. С. 215.

<sup>5</sup> Там же. С. 215.

<sup>6</sup> Там же. С. 216.

*трудничества с мировым сообществом. Решается задача войти в него не только для того, чтобы позаимствовать новое, но и поделиться лучшим»<sup>1</sup>.*

Что же, родившиеся в СССР люди, ставшие специалистами в той или иной отрасли, не мирового уровня? А наши успехи тех лет? В той же атомной физике, космонавтике? Как же все это было сделано недоучками? Нетрудно догадаться, что бы думали, говорили об обсуждаемой книге, если бы с ней ознакомились большинство инженеров и ученых советских времен и те их них, кто продолжает работать на пользу Отечества.

Дальше, само собой, говорится о задаче российской высшей школы развивать коммерческую систему подготовки специалистов по заказам зарубежных стран. Эта тема рассмотрена весьма подробно, приводятся цифры, перечисляются проблемы, с которыми встречаются в вузах студенты-иностранцы... Оказывается, на пути подготовки в России специалистов для других стран у вузов нет достаточной рекламы. Срочно надо писать специальные учебники для студентов-иностранцев... И, конечно, о быте...

*«Согласно мнению самих иностранных студентов, свои потребности за счет стипендии они могут удовлетворить на 18 процентов... потребности в питании – на 20 процентов, в одежде и обуви – на 16 процентов, в учебниках и книгах – на 22 процента, в досуге и развлечении – на 14 процентов. Это серьезная проблема, если учесть, что 80 процентов иностранных студентов из семей среднего достатка, а 10 процентов – из семей низкого»<sup>2</sup>.*

Какая точность! Правда? До процента! А вот такие же данные о российских студентах, обучающихся в российских вузах, в книге найти не удалось.

И опять об адекватности документов о высшем образовании, о взаимном доверии, создании совместных университетов и, конечно, о дистанционном обучении.

Сиди себе где-то, зачем тебе общаться с живым преподавателем, когда такие возможности при современной информационной технологии?

И вот он, адекватный диплом! Очень интересная глава! Очень! Теперь, через 24 года, она производит совсем другое впечатление.

**Глава 8. Наука в высшей школе.** О научной работе в вузе знают все: от студента, лаборанта до профессора, ректора.

Начало восьмой главы книги В.Г. Кинелева – отчет о состоянии научной работы в вузах России.

А вот и главное:

*«В настоящее время высшие учебные заведения реализуют концепцию развития вузовского сектора науки в условиях перехода к рыночной экономике.*

*Концепция определила стратегическую цель реформы – превращение вузовского сектора науки в крупную самоуправляемую подсистему вневедомственного, интегрированного национального научно-технического комплекса, органически сочетающего масштабное проведение авангардных фундаментальных исследований с конкурентоспособными разработками коммерческого характера, позволяющими также на уровне мировых квалификационных требований вести подготовку специалистов»<sup>3</sup>.*

И что, есть уверенность, что каждый читатель поймет, прочтя это, замысел реформы?

Приводятся сведения о технопарках:

*«Технопарки призваны обеспечивать население рабочими местами, ... где существует опасность безработицы»<sup>4</sup>.*

Что, вузы должны конкурировать с промышленными предприятиями в борьбе с безработицей? Удалось ли этого добиться через 24 года? Научные центры, интеграция... Примеры работы в этом направлении в том вузе, в другом... А хотелось бы увидеть прогнозные цифры, сколько такие технопарки принесут средств государству, вузу, одному среднему сотруднику технопарка. При плановой экономике эти цифры потребовали

<sup>1</sup> Кинелев В.Г. Указ. соч. С. 217.

<sup>2</sup> Там же. С. 222.

<sup>3</sup> Кинелев В.Г. Указ. соч. С. 215.

<sup>4</sup> Там же. С. 239.

бы от авторов проекта экономического сопровождения. А при рыночной экономике? Были бы такие цифры, можно было бы сейчас сопоставить ожидаемое с достигнутым.

**Глава 9. Вузы и рынок.** Спросите у рядовых преподавателей, у ассистента, доцента, профессора, что такое рыночная экономика. Они скажут. А в первых же строчках девятой главы книги В.Г. Кинелева это понятие расшифровывается так:

*«Под рыночными отношениями принято понимать определённое устройство экономики, наиболее полно теоретически и практически реализованное в Северной Америке, Западной Европе, Японии...»*

*Старую либеральную экономическую философию сводного предпринимательства рыночная экономика соединила с косвенными методами регулирования развития хозяйства со стороны государства...*

*Одна из наиболее характерных черт системы рыночных отношений – глубокая, всепроникающая коммерциализация не только сферы товарообмена..., но и всей общественной жизни»<sup>1</sup>.*

Вот так. И всем все понятно. Коммерциализация всего и вся. В общем мешке и высшая школа.

*«Высшая школа тоже стала признаваться индустрией, выпускающей товар. Начался своего рода естественный процесс коммерциализации науки и высшей школы»<sup>2</sup>.*

В 90-е и даже в нулевые годы XXI в. не раз приходилось слышать от руководителей разных уровней вузов неуверенные, путанные утверждения, что коммерция коммерцией, но это где-то там, в стороне от высшей школы и науки.

И В.Г. Кинелев разъясняет далее, что в рыночных условиях, то есть сейчас, *«... функция денег колоссально расширилась, они стали чуть ли не всеобщим инструментом социального управления... Отсюда укрепление в странах с рыночной экономикой демократических основ, кон-*

*центрация внимания на правах и свободе личности, праве и свободе выбора.*

*Человек здесь выступает как покупатель и продавец, свободно выбирающий и свободно предлагающий то, чем он может распоряжаться»<sup>3</sup>.*

И с кого брать России пример на развалинах СССР?

*«... именно западную модель рыночной экономики... избрала Россия в качестве примера для переустройства экономических отношений. И именно с позиций данной модели необходимо рассматривать как происходящее, так и желаемые сдвиги в способе функционирования нашего высшего образования»<sup>4</sup>.*

Чем дальше, тем интереснее. Читаем...

*«... Основное направление коммерциализации высшего образования – это создание рынка образовательных услуг»<sup>5</sup>.*

В 90-е годы эту главу читали, как говорится, вытаращив глаза. Вузы оказывают услуги? Как банки, парикмахерские? Так там за услуги люди платят. Теперь высшее образование будет платным? А за учебу в школе теперь будем платить? Нет? Не будем? А кто же будет оплачивать расходы вузов?

*«Работодатели в рыночной экономике... никогда и нигде не финансируют высшее образование... Функция финансирования услуг высшего образования должна являться прерогативой владельцев и продавцов рабочей силы»<sup>6</sup>.*

Туманно. Сейчас не рабовладельческий строй, владельцем рабочей силы, своей силы, является человек, гражданин. Он же и продавец рабочей силы. Так что же, обучаться студент будет все же за счет средств из своего кармана?

Но нет:

*«... источником платежных средств должно оставаться... государство, которое могло бы обеспечивать студентов*

<sup>3</sup> Кинелев В.Г. Указ. соч. С. 256.

<sup>4</sup> Там же. С. 256-257.

<sup>5</sup> Там же. С. 260.

<sup>6</sup> Там же. С. 261.

<sup>1</sup> Кинелев В.Г. Указ. соч. С. 255.

<sup>2</sup> Там же. С. 256.

средствами через систему кредитов, стипендий, грантов и т.п.»<sup>1</sup>.

Опять туманно. Платит государство? А что значит «могло бы»? Кредиты... Их же надо возвращать?

*«Коммерциализация ... не означает автоматически повальную приватизацию высших учебных заведений... коммерциализируются ... отношения вуз – студент»*<sup>2</sup>.

Туманно, туманно! Где коммерциализация, там деньги, это В.Г. Кинелев уже объяснил. И вот коммерциализация отношений вуз – студент... Так все же деньги? О чем все-таки речь? Хотелось бы поясняющих примеров. И В.Г. Кинелев такой пример приводит.

Все, и преподаватели, и родители, помнят, как в 90-е годы взлетел спрос на специалистов-гуманитариев (экономистов, юристов, переводчиков). Их стали готовить частные заведения за деньги. Но почему, раз уже вузы приносят прибыль, их не приватизировать? Ведь в стране рыночные отношения! Пояснений на этот счет в книге нет. Да, вузы имеют кое-что еще, кроме образовательных услуг, что можно вынести на рынок. Это научно-технические достижения преподавателей, сотрудников и студентов.

Вузы должны так или иначе доводить свои научные результаты до товарного вида, до реальной продукции.

В.Г. Кинелев предупреждает, что переход на рыночные рельсы в первую очередь вузовской науки потребует придать вузам больше так называемых академических свобод.

И это сейчас хорошо чувствуется. Высший руководитель вуза может без помех и чьих-либо возражений диктовать коллективу свою волю, тогда как подчеркивается демократический характер нашей жизни во всех отношениях.

Надо отдать должное В.Г. Кинелеву, традиционно сложная проблема взаимоотношений начальник – подчиненный в его

книге затронута. «На место коллектива, живущего ... общими интересами, становится корпорация, включающая три основные группы: администрация, преподаватели и студенты»<sup>3</sup>.

Но, к сожалению, дальше определений, фиксации ситуации и беглого уведомления о взаимодействии, взаимосвязи этих составляющих частей корпорации автор не пошел. А тут ох как много следовало бы сказать!

Весьма бегло, весьма-весьма, в девятой главе говорится о опасностях, ждущих высшую школу с завершением реформирования.

Например, как разрешить ту или иную спорную ситуацию все в тех же отношениях начальник – подчиненный? Неужели только в судебном порядке?

Или, стремясь к международному сотрудничеству, предупреждает В.Г. Кинелев, в условиях рыночных отношений будет развиваться конкуренция, не станет взаимопомощи. В мировое сообщество мы хотим, а помочь, подсказать соседнему вузу мы больше не согласимся?

**Заключение.** Автор завершает книгу коротким заключением. Отмечено, что успех реформирования высшей школы обязан самоотверженному труду вузовских коллективов, которые работают в сложных условиях.

Нужно динамичное превращение вузов в академически-индустриальные комплексы. Нужно инвестирование средств предприятий регионов, местного бюджета в высшую школу.

С 1993 г. стал увеличиваться конкурс при поступлении в вузы. Важным стало внедрение в вузах государственных образовательных стандартов, переход высшей школы к многоуровневому образованию. *«Определить дальнейшие перспективы реформ, направления развития высшей школы на ближайшие годы можно только с учетом внимательной и объективной оценки пройденного пути, анализа совершенных ошибок и опыта других стран»*<sup>4</sup>.

<sup>1</sup> Кинелев В.Г. Указ. соч. С. 261.

<sup>2</sup> Там же. С. 261.

<sup>3</sup> Кинелев В.Г. Указ. соч. С. 261.

<sup>4</sup> Кинелев В.Г. Там же. С. 286.



Все согласятся с этими заключительными строками книги В.Г. Кинелева. Что же, и сторонники реформы высшей школы, начатой в 90-е годы, и поддерживающие реформу, но имеющие критические замечания, и противники реформы скажут, что книга В.Г. Кинелева «Объективная необходимость. История, проблемы и перспективы реформирования высшего образования России» сейчас актуальна, как и в 90-е го-

ды. Но если в 90-е годы мы, ее читатели, впервые в полной мере представили, что ждет нашу высшую школу, то сейчас, через 24 года, каждый может сделать свой вывод о результатах реформы. На наш взгляд, предстоящее двадцатипятилетие этой книги – отличный повод для серьезного, аргументированного, профессионального обсуждения результатов реформы высшей школы России.

#### ЛИТЕРАТУРА

Кинелев В.Г. Объективная необходимость. История, проблемы и перспективы реформирования высшего образования

России / В.Г. Кинелев. М.: Республика, 1995. 328 с.



**МИФЫ И ЛЕГЕНДЫ  
САРАТОВСКОГО АВТОДОРОЖНОГО ИНСТИТУТА –  
САРАТОВСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА –  
САРАТОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

**Ю.С. Архангельский**

**MYTHS AND LEGENDS OF SARATOV ROAD-TRANSPORT  
INSTITUTE – SARATOV POLYTECHNIC INSTITUTE –  
SARATOV STATE TECHNICAL UNIVERSITY**

**Ю.С. Архангельский**

Говорят, еще не начали строить здание САДИ, а уже приехала с проверкой комиссия. Но все обошлось: ей показали чужой котлован.

◇ ◇ ◇

Говорят, однажды в клубе СПИ на партийном собрании секретарь обкома партии критиковал работу строителей. Сидевший в президиуме ректор А.И. Андрющенко возмутился:

- Да где же они учились?
- В вашем вузе, Анатолий Иванович. Хохотали все.

◇ ◇ ◇

Говорят, однажды в клубе СПИ на общем собрании преподавателей проректор по учебной работе с трибуны рассказывал об итогах зимней сессии и среди недостатков назвал срыв экзамена доцентом Архангельским.

Доцент Ю.С. Архангельский послал докладчику записку. Ее в президиуме прочитал ректор А.И. Андрющенко и спрашивает проректора по учебной работе:

- Какой Архангельский сорвал экзамен?
- Как какой... этот...
- У нас их трое.
- Трое?!

◇ ◇ ◇

Говорят, однажды зав. кафедрой Ю.С. Архангельский был вызван в райотдел милиции:

- Вы работаете в СПИ?
- Да, но СПИ сейчас называется СГТУ.
- На вас жалуются хозяева соседних с вашим гаражей.
- У меня машины и гаража сроду не было. Вам какой Архангельский нужен? В СПИ нас было трое. Сейчас в СГТУ – двое.
- Двое?!

◇ ◇ ◇

Говорят, однажды при обсуждении на ректорате системы тестирования при поступлении в СГТУ ректор Ю.В. Чеботарский спросил:

- Так что, за взятку в наш вуз поступить не удастся?
- Все зависит от суммы, Юрий Викторович, – ответили разработчики.

◇ ◇ ◇

Говорят, однажды проректор по воспитательной работе услышал во дворе СГТУ требовательный голос:

- Зеленым вверх! Я сказал, зеленым вверх!

Проректор высунул голову в окно и увидел студентов, под руководством куратора сажавших на газоне молодые елочки.

◇ ◇ ◇

Говорят, однажды проректор по учебной работе приказал проверить присутствие на работе преподавателей. На одной из кафедр отсутствовал доцент.

– Был я, – оправдывался потом доцент, – вышел на минуточку.

На другой день у проректора зазвонил телефон:

– Если что, я в туалете.

◇ ◇ ◇

Говорят, на энергофаке знают, но не говорят, сколько энергии в СГТУ удалось сберечь за годы компании по энергосбережению.

◇ ◇ ◇

Говорят, мечта каждого студента-электротехнолога засунуть в холодиль-

ник электронагреватель и проверить, кто кого.

◇ ◇ ◇

Говорят, студенты-электрики на экзамене на вопрос, как работает трансформатор, по-прежнему отвечают:

– У-у-у...

◇ ◇ ◇

Говорят, на стройфаке куратор спрашивает студента:

– Почему вас вчера не было на занятиях?

– Так ведь вчера был день энергетика.

– Какое отношение вы имеете к энергетике?

– Ну как же! Моя фамилия Гоэлро.



## 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 (951) 880-19-13 – Юдина Виолетта Олеговна (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** и иметь нумерацию.

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 О.В. Пачина  
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 27.09.2019  
Формат 60×84 1/8 Бум. офсет.  
Усл. печ. л. 12,5      Уч. изд. л. 5,4  
Тираж 500 экз. Заказ 76 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 2020 г.)  
Свидетельство о регистрации СМИ *ПИ № ФС77-54621 от 01.07.2013*

---

Editor L.A. Skvortsova  
Computer-assisted layout by O.V. Pachina  
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: 27.09.2019  
Paper size: 60×84 1/8 Offset-Print  
Conventional printed sheet 12,5 Publication base sheet 5,4  
Circulation: 500 printed copies Order 76 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*

---