

Издается с ноября 2013 года
Выходит один раз в квартал

№ 4 (5)

Декабрь 2014

ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

Главный редактор

д.т.н., профессор **Ю.С. АРХАНГЕЛЬСКИЙ**

Зам. главного редактора

д.т.н., профессор **В.А. ЦАРЕВ**

Ответственный секретарь

к.т.н. **В.С. АЛЕКСЕЕВ**

Редакционный совет

Ю.С. АРХАНГЕЛЬСКИЙ

д.т.н., профессор кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» СГТУ имени Гагарина Ю.А.

Н.А. БУШУЕВ

д.э.н., генеральный директор ОАО НПП «Алмаз», г. Саратов

С.М. ЛИСОВСКИЙ

д.т.н., профессор, министр промышленности и энергетики правительства Саратовской области

А.А. СЫТНИК

д.т.н., профессор, первый проректор СГТУ имени Гагарина Ю.А.

В.А. ЦАРЕВ

д.т.н., профессор кафедры «Электронные приборы и устройства» СГТУ имени Гагарина Ю.А.

Редакционная коллегия

И.Н. АНТОНОВ

д.т.н., профессор кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» СГТУ имени Гагарина Ю.А.

Н.В. БЕКРЕНЕВ

д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Техническая механика и детали машин» СГТУ имени Гагарина Ю.А.

В.Н. ЛЯСНИКОВ

д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Физическое материаловедение и технология новых материалов» СГТУ имени Гагарина Ю.А.

А.Н. ПЛОТНИКОВ

д.э.н., профессор, заведующий кафедрой «Прикладная экономика и управление инновациями» СГТУ имени Гагарина Ю.А.

Н.И. ЛОВЦОВА

д.с.н., профессор, заведующая кафедрой «Социология, социальная антропология и социальная работа» СГТУ имени Гагарина Ю.А.

Ю.Б. ТОМАШЕВСКИЙ

д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Системотехника» СГТУ имени Гагарина Ю.А.

Г.Г. УГАРОВ

д.т.н., профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» СГТУ имени Гагарина Ю.А.

В.А. ЦАРЕВ

д.т.н., профессор кафедры «Электронные приборы и устройства» СГТУ имени Гагарина Ю.А.

Б.К. СИВЯКОВ

д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Электротехника и электроника» СГТУ имени Гагарина Ю.А.

В.С. АЛЕКСЕЕВ

к.т.н., доцент кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» СГТУ имени Гагарина Ю.А.

Since November 2013
Published Quarterly

№ 4 (5)
December 2014

JOURNAL OF ELECTROTECHNICS

Scientific and Technical Publication

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

Chief Editor
Assistant to the Chief Editor
Chief Executive Officer

Dr.Sc., Professor **YU.S. ARKHANGELSKIY**
Dr.Sc., Professor **V.A. TSAREV**
PhD **V.S. ALEKSEEV**

Editorial Advisory Committee

YU.S. ARKHANGELSKIY	Dr. Sc., Professor at Department of Automated Installations and Systems in Electrotechnology, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
N.A. BUSHUEV	Dr.Sc., Director General at JSC <i>Almaz</i>
S.M. LISOVSKIY	Dr.Sc., Professor at Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Minister for Industry and Energy in Saratov Oblast
A.A. SYTNIK	Dr.Sc., Professor, First Vice-Rector, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
V.A. TSAREV	Dr.Sc., Professor at Department of Electronics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Editorial Board Members

I.N. ANTONOV	Dr.Sc., Professor at Department of Automated Installations and Systems in Electrotechnology, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
N.V. BEKRENEV	Dr. Sc., Professor, Head at Department of Engineering Mechanics and Machine Elements, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
V.N. LYASNIKOV	Dr.Sc., Professor, Head at Department of Materials Science and Innovative Materials Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
A.N. PLOTNIKOV	Dr. Sc., Professor, Head at Department of Applied Economics and Innovation Management, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
N.I. LOVTSOVA	Dr. Sc., Professor, Head at Department of Sociology, Social Anthropology and Social Work, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
YU.B. TOMASHEVSKY	Dr. Sc., Professor, Head at Department of System Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
G.G. UGAROV	Dr. Sc., Professor at Department of Power Supply for Industrial Enterprises, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
V.A. TSAREV	Dr.Sc., Professor at Department Electronics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
B.K. SIVYAKOV	Dr.Sc., Professor at Department of Electrical and Electronics Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
V.S. ALEKSEEV	Ph.D, Associate Professor, Department of Automated Installations and Systems in Electrotechnology, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОТЕРМИЯ

Архангельский Ю.С. Интеллектуальные СВЧ электротермические установки	5
Тригорный С.В. Оценка энергоэффективности электротермических установок и работоспособности систем их электропитания на основе тепловизионных обследований	10
Морозов А.О., Морозов О.А., Прокопенко А.В., Требух В.П. Установка для СВЧ обработки зерновых культур	15
Давыдов Д.А., Юсов Е.И. Повышение равномерности нагрева в бытовой СВЧ печи	19
Гончаров В.Д., Калинин С.А., Яшкардин Р.В., Сорокин К.С. Использование спектрального метода для расчёта глубины проникновения импульса электромагнитного поля произвольной формы	23

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

Вырыханов Д.А., Угаров Г.Г. Матричная математическая модель обобщенного электромеханического преобразователя энергии	30
Мошкин В.И., Угаров Г.Г. К сравнению конструктивных схем импульсных линейных электромагнитных двигателей	34

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

Давыдов Д.А., Пименов А.Н. Автоматическое регулирование уровня освещённости искусственным светом при изменении естественного	41
--	----

ЭЛЕКТРОНИКА

Кошелев П.А., Опре В.М., Парамонов С.В. Расчёт элементов транзисторного преобразователя и моделирование электромагнитных процессов с применением современных символьных и численных математических программ	46
Кошелев П.А., Опре В.М., Прилуцкий А.В., Темников А.О. Импульсные системы накачки твердотельных лазеров	56

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Котина Н.М., Жевалёв О.Ю., Куц Л.Е. Влияние диффузионной сварки на свойства магнитных материалов	63
Фомин А.А., Родионов И.В., Захаревич А.М., Фомина М.А., Нахов В.А., Федосеев М.Е. Морфологические изменения поверхности циркония при механической обработке и воздействии токов высокой частоты	66
Фомин А.А., Родионов И.В., Фомина М.А., Тукмаков И.А. Химические, фазово-структурные и морфологические превращения на поверхности титана при обработке токами высокой частоты	73

ИЗМЕРЕНИЯ

Балашов А.А., Кацуба Д.С. Регрессионный анализ термограмм при определении структурного перехода в полимере, используемый в информационно-измерительной системе	81
--	----

СОЦИАЛЬНЫЙ АСПЕКТ

Гришина Е.М., Давыдов Д.А. О востребованности среди абитуриентов электротехнического образования в области электротехнологии	86
--	----

ЛЕТОПИСЬ

Кошелев П.А., Гуревич С.Г., Павлов Н.А. Александр Евгеньевич Слухоцкий	89
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет (ЛЭТИ) Кафедра «Электротехнологическая и преобразовательная техника» Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета (ЛЭТИ)	91
Архангельский Ю.С. История СВЧ электротехнологии	99

К сведению авторов	111
--------------------------	-----

CONTENTS

ELECTROTHERMY

Arkhangelskiy Yu.S. Intellectual Microwave Electrothermal Plants	5
Trigorly S.V. Evaluating Energy Efficiency of Electrothermal Plants and Performance of Power Supply Systems Using Thermal Imaging Monitoring	10
Morozov A.O., Morozov O.A., Prokopenko A.V., Trebukh V.P. A Unit for Microwave Processing of Grain Crops	15
Davydov D.A., Yusov E.I. Increasing Uniformity of Heating in Household Microwaves	19
Goncharov V.D., Kalinin S.A., Yashkardin R.V., Sorokin K.S. Using the Spectral Method to Calculate the Penetration Depth of an Electromagnetic Field Impulse of Arbitrary Shape	23

ELECTROMECHANICS

Vyrykhanov D.A., Ugarov G.G. Matrix Mathematical Model of a Generalized Electromechanical Energy Converter	30
Moshkin V.I., Ugarov G.G. Comparing Constructive Schemes of Pulsed Electromagnetic Linear Motors	34

ELECTRIC POWER SUPPLY

Davydov D.A., Pimenov A.N. Automatic Control of Artificial Light under Changes of the Natural Light	41
--	----

ELECTRONICS

Koshelev P.A., Opre V.M., Paramonov S.V. Calculation of the Transistor Converter Elements and Simulation of Electromagnetic Processes Using Advanced Character and Numeric Mathematical Programs	46
Koshelev P.A., Opre V.M., Prilutskiy A.V., Temnikov A.O. Impulse Systems for Pumping Solid-State Lasers	56

MATERIALS SCIENCE

Kotina N.M., Zhevaley O.Yu., Kuts L.E. Impact of Diffusion Welding on Magnetic Materials Properties	63
Fomin A.A., Rodionov I.V., Zakharevich A.M., Fomina M.A., Nakhov V.A., Fedoseev M.E. Morphological Transformations on Zirconium Surface During Machining and Electrotechnological Treatment with High-Frequency Currents	66
Fomin A.A., Rodionov I.V., Fomina M.A., Tukmakov I.A. Chemical, Phase-Structural, and Morphological Transformations on Titanium Surfaces During Treatment with High-Frequency Currents	73

MEASUREMENTS

Balashov A.A., Katsuba D.S. Regression Analysis of Thermograms when Determining the Structural Transition in Polymers Used in the Information-Measurement System	81
---	----

SOCIAL ASPECT

Grishina E.M., Davydov D.A. Demand for Qualification in Electrotechnical Area Among the Applicants to Universities	86
---	----

CHRONICLE

Koshelev P.A., Gurevuch S.G., Pavlov N.A. Aleksandr Evgenievich Slukhotskiy	89
Saint Petersburg State Electrotechnical University LETI	91
Department of Electrotechnical and Conversional Equipment, Saint Petersburg State Electrotechnical University LETI	96
Arkhangelskiy Yu.S. History of Microwave Electrotechnology	99
Information for Authors	111

ЭЛЕКТРОТЕРМИЯ

УДК 621.365.5

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СВЧ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

Ю.С. Архангельский

INTELLECTUAL MICROWAVE ELECTROTHERMAL PLANTS

Yu.S. Arkhangelskiy

Обосновывается целесообразность построения нового класса СВЧ ЭТУ – интеллектуальных СВЧ электротермических установок.

Ключевые слова: СВЧ электротермия, нагрев диэлектриков, нетепловая СВЧ модификация полимеров, многочастотный режим, экономическая эффективность, интеллектуальные СВЧ установки

При проектировании СВЧ электротермических установок (СВЧ ЭТУ) для их удешевления всегда стремились свести к минимуму роль системы управления [1]. Ведь если для повышения экономической эффективности СВЧ ЭТУ [2] отказываются от сглаживающего фильтра и даже от выпрямителя в источнике питания СВЧ генератора, то понятно, почему во многих случаях при проектировании СВЧ ЭТУ сводят элементы системы управления к минимуму или, по сути дела, отказываются от системы полностью. Так, если СВЧ ЭТУ рассчитана на ту СВЧ мощность, которую генерирует СВЧ генератор, рабочая камера и СВЧ генератор хорошо согласованы, и не нужна автоматическая защита СВЧ генератора от больших отражений от рабочей камеры, установка работает в методическом режиме и нет надобности в автоматической блокировке СВЧ генератора из-за неплотно закрытой дверки, не требуется регулировать во время обработки скорость транспортировки или систему удаления паров и так далее, то в СВЧ ЭТУ, кроме тумблеров включения и выключе-

Economic efficiency of the new type of microwave electrotechnological plants as intelligent microwave electrothermal plants is estimated.

Keywords: electrothermal microwaves, heating of dielectrics, nonthermal microwave modification of polymers, multi-frequency mode, economic efficiency, intelligent microwave plants

ния источника СВЧ энергии, электродвигателей систем загрузки-выгрузки и удаления паров, остается разве что автоматическая защита СВЧ генератора от недостаточного охлаждения.

Стоимостная составляющая системы управления в расчете экономической эффективности СВЧ ЭТУ в этом случае минимальна.

Основное внимание при проектировании СВЧ ЭТУ обычно уделяют рабочей камере и реализуемому в ней технологическому процессу [3-5], в первую очередь вопросам равномерности и интенсивности термообработки диэлектрическойсадки [6-8]. Выбором геометрии нагреваемого диэлектрика и профиля рабочей камеры в камерах с бегущей волной (КБВ) можно обеспечить достойную равномерность нагрева, если расчет геометрии КБВ провести на средние в рабочем диапазоне температуры обработки значения относительной диэлектрической проницаемости ϵ' и тангенса угла диэлектрических потерь $\tan \delta$ обрабатываемого диэлектрика. То же самое можно сказать и о камерах лучевого типа (КЛТ):

для обеспечения максимальной энергетической эффективности следует с помощью четвертьволнового трансформатора обеспечить согласование слоя диэлектрика с рупорной излучающей антенной, причем четвертьволновый согласующий трансформатор должен быть рассчитан на средние значения ϵ' и $\operatorname{tg} \delta$ обрабатываемого диэлектрика в рабочем диапазоне температуры [8]. К

тому же, увеличивая число излучающих устройств, можно в КЛТ обрабатывать объекты с большой поверхностью.

Система управления существенно усложняется, если в процессе обработки приходится проводить те или иные манипуляции. Типичный пример такой установки – пастеризатор молока с комбинированным энергоподводом (рис. 1) [1, 9].

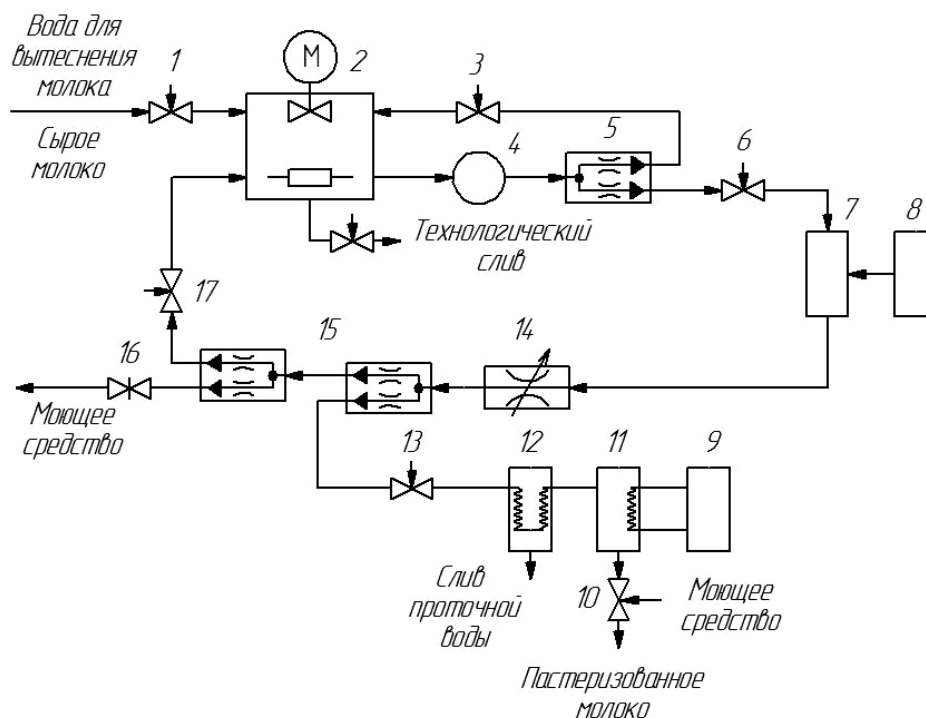


Рис. 1. Структурная схема пастеризатора молока с комбинированным энергоподводом: 1, 3, 6, 10, 13, 17 – вентили; 2 – бак для сырого молока с электронагревом и мешалкой; 4 – насос; 5, 15 – разветвители потока; 7 – СВЧ рабочая камера; 8 – источник СВЧ энергии; 9 – холодильная камера; 11 – бак холодильной машины с испарителем; 12 – камера предварительного охлаждения молока проточной водой; 14 – регулятор расхода; 16 – задвижка

Сначала молоко нагревается в баке 2, перемешивается там мешалкой, а когда температура молока достигает заданной системой управления, вентиль 3 автоматически закрывается, вентиль 6 открывается, выключается электронагрев в баке 2, и молоко поступает в СВЧ рабочую камеру 7, после чего включается источник СВЧ энергии 8. Если температура молока на выходе рабочей камеры 7 соответствует заданной системой управления, то открывается вентиль 13, и молоко поступает в холодильник 12, 11, 9, а если нет, то вентиль 13 закрывается и открывается вентиль 17, и молоко поступает в бак 2.

В такой установке используется система управления с распределенными по структурным частям элементами управления.

С переходом в нашей стране к рыночной экономике пришло понимание значения экономических расчетов. В СВЧ электротермии были разработаны методы технико-экономической оптимизации СВЧ ЭТУ [1-4, 8-13], но, на наш взгляд, вопрос о роли и месте системы управления по-прежнему остается в тени, хотя соотнести прибыль и затраты в СВЧ электротермии теперь можно расчетным путем.

Внимание к системе управления в СВЧ ЭТУ требует логика развития СВЧ электротермии.

Любопытно, что СВЧ ЭТУ можно научить настраивать режимы работы на экономическую эффективность и проводить технико-экономические расчеты, контролируемые ее экономическую эффективность. В перспективе – построение интеллектуальной СВЧ ЭТУ на нескольких СВЧ генераторах, нескольких рабочих камерах.

Есть здесь и серьезные организационные задачи: надо или получить разрешение применять в СВЧ электротермии широкополосные генераторы, или научиться строить рабочие камеры и СВЧ генераторы, по сути дела, абсолютно изолированными, не имеющими СВЧ излучения в окружающую среду.

Отдельный разговор о так называемой нетепловой модификации полимерных материалов [16]. Первые исследования по облучению сред, содержащих биополимеры (бактерии), в СВЧ диапазоне относятся к пятидесятым годам XX в. (см. обобщающие работы [17-19]). Уже тогда высказывалось предположение о наличии специфического, нетеплового действия СВЧ электромагнитного поля на бактериальную клетку [19-21], проявляющегося на

отдельных, вполне определенных частотах даже при малых мощностях.

Сейчас наличие такого нетеплового действия СВЧ электромагнитного поля на биополимеры никто не отрицает. Оно наиболее эффективно на частотах, не совпадающих с разрешенными для применения в промышленности [22]. В [16] приведены данные о нетепловой СВЧ модификации полимеров неживой природы на разрешенной частоте 2450 МГц.

Можно ожидать, что нетепловая СВЧ модификация полимерных материалов неживой природы даст куда больший эффект на иной, не разрешенной к применению частоте СВЧ диапазона. Выявить и использовать это можно лишь на СВЧ ЭТУ, оснащенных перестраиваемым по частоте СВЧ генератором. Так что интеллектуальные СВЧ электротехнологические установки открывают перспективы и этому направлению СВЧ электротехнологии.

Таким образом, интеллектуальные электротермические (электротехнологические) установки дадут возможность освоить новые энерго- и экономически эффективные электротехнологии.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Архангельский Ю.С.** Элементная база СВЧ электротермического оборудования / Ю.С. Архангельский, В.А. Воронкин. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2003. 212 с.
2. **Толстов В.А.** Эффективность электротехнологических установок / В.А. Толстов, Ю.С. Архангельский. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2000. 148 с.
3. **Архангельский Ю.С.** СВЧ электротермия / Ю.С. Архангельский. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 1998. 408 с.
4. **Колесников Е.В.** Проектирование и эксплуатация электротехнологических установок / Е.В. Колесников, Ю.С. Архангельский. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2008. 197 с.
5. **Архангельский Ю.С.** Сверхвысокочастотные нагревательные установки для интенсификации технологических процессов / Ю.С. Архангельский,

И.И. Девяткин. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 1983. 140 с.

6. **Архангельский Ю.С.** Установки диэлектрического нагрева. СВЧ установки / Ю.С. Архангельский. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2008. 343 с.

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

8. **Архангельский Ю.С.** Камеры лучевого типа СВЧ электротехнологических установок / Ю.С. Архангельский, К.Н. Огурцов, Е.М. Гришина. Саратов: Изд. Дом «Полиграфия Поволжья», 2010. 229 с.

9. **Тапилина Н.В.** Оптимизация структуры пастеризатора молока для фермерского хозяйства / Н.В. Тапилина // Технологические СВЧ установки, функциональные электродинамические устройства:

межвуз. науч. сб. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 1998. С. 55-59.

10. **Архангельский Ю.С.** Ущерб и резервирование в СВЧ электротермии / Ю.С. Архангельский, А.В. Доценко. Саратов: Изд. Дом «Полиграфия Поволжья», 2010. 114 с.

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

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

13. **Гришина Е.М.** Техно-экономическая оптимизация СВЧ электротермического оборудования, собранного на камерах со стоячей волной / Е.М. Гришина, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. 2014. № 2 (3). С. 17-20.

14. **Архангельский Ю.С.** Многочастотные установки СВЧ диэлектрического нагрева / Ю.С. Архангельский, Е.М. Гришина // Вопросы электротехнологии. 2014. № 1 (2). С. 26-33.

15. **Федоров А.В.** Применение полупроводниковых генераторов в СВЧ электротехнологических установках /

А.В. Федоров, Ю.С. Архангельский // Актуальные проблемы электронного приборостроения: сб. науч. тр. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2014. Т. 2. С. 165-169.

16. **Архангельский Ю.С.** СВЧ модификация полимеров / Ю.С. Архангельский, Е.М. Гришина, В.А. Лаврентьев, С.К. Слепцова. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2012. 288 с.

17. **Пресман А.С.** Электромагнитные волны и живая природа / А.С. Пресман. М.: Наука, 1968. 289 с.

18. Действие ионизирующих излучений и полей сверхвысоких частот на биологические объекты: сборник статей. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1974. С. 81-87.

19. **Игнатов В.В.** Влияние электромагнитных полей сверхвысокочастотного диапазона на биологическую клетку / В.В. Игнатов и др. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1978. 77 с.

20. **Исмаилов Э.Ш.** К механизму влияния микроволн на проницаемость эритроцитов для ионов калия и натрия / Э.Ш. Исмаилов // Научные доклады высшей школы. Биологические науки. 1974. № 3. С. 58-60.

21. **Исмаилов Э.Ш.** Инфракрасные спектры теней эритроцитов в области полос амид I и амид II при микроволновом облучении / Э.Ш. Исмаилов // Биофизика. 1976. Т. 21. Вып. 5. С. 940-942.

22. **Хардман Л.** Распределение частот электромагнитного спектра в условиях напряженного графика / Л. Хардман // Электроника. 1972. № 20. С. 30-32.

Архангельский Юрий Сергеевич – заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Yuri S. Arkhangelskiy – Dr.Sc., Professor, Honored Master of the Russian Federation, Department of Automated Electrotechnical Plants and Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 06.10.14, принята к опубликованию 15.11.14

УДК 621.365.5

**ОЦЕНКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИХ
УСТАНОВОК И РАБОТОСПОСОБНОСТИ СИСТЕМ
ИХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ
ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ОБСЛЕДОВАНИЙ**

С.В. Тригорлый

**EVALUATING ENERGY EFFICIENCY OF ELECTROTHERMAL PLANTS
AND PERFORMANCE OF POWER SUPPLY SYSTEMS
USING THERMAL IMAGING MONITORING**

S.V. Trigorly

На основе проведенного тепловизионного обследования электротермических установок промышленных предприятий и систем их электроснабжения выполнен расчет тепловых потерь и разработаны мероприятия по повышению энергоэффективности электротермических установок и надежности эксплуатации электрооборудования.

Ключевые слова: тепловизионные обследования, электротермические установки, электроснабжение, электрооборудование, тепловые потери, энергоэффективность, энергосберегающие мероприятия

Одним из приоритетных направлений развития технологий и техники является повышение энергоэффективности и энергосбережение [1]. В этой связи актуальными задачами являются оценка энергоэффективности действующих электротермических установок (ЭТУ), потребляющих большое количество электрической энергии, определение работоспособности электроустановок системы электроснабжения ЭТУ и разработка мероприятий по повышению эффективности и надежности их эксплуатации.

Целью данной работы является обобщение результатов тепловизионного контроля электротермических установок и

Calculation of heat losses is based on the thermal imaging inspection of electrothermal plants at industrial enterprises and power supply systems. A set of measures were developed to improve energy efficiency of electrothermal plants and reliability of electrical equipment.

Keywords: thermal imaging inspection, electrothermal plants, power supply, electrical equipment, heat losses, energy efficiency, energy saving measures

систем их электроснабжения, полученных в процессе энергетического обследования различных промышленных потребителей энергоресурсов, проведение расчета тепловых потерь и разработка мероприятий по повышению энергоэффективности и надежности ЭТУ.

Одним из этапов оценки энергоэффективности действующих ЭТУ является определение тепловых потерь с наружной поверхности ЭТУ по данным тепловизионного контроля или тепловых измерений с помощью пирометров. Ключевым элементом расчета тепловых потерь является моделирование реальных условий теплообмена между ЭТУ и окружающей средой.

Для решения этой задачи и автоматизации расчетов тепловых потерь предложены математические модели для определения коэффициентов конвективной h_k и лучистой h_l теплоотдачи [2].

При моделировании используется база данных по теплофизическим свойствам воздуха (коэффициент теплопроводности λ , удельная плотность ρ , удельная изобарная теплоемкость c_p , кинематическая вязкость ν) и их зависимости от температуры. Разработанный в системе MathCAD комплекс программ позволяет рассчитывать коэффициенты теплоотдачи и тепловые потери при свободной и вынужденной конвекции [3].

Тепловизионный контроль электроустановок и электротермического оборудования ряда промышленных предприятий Саратовской области проводился в процессе комплексного энергетического обследования в соответствии с требованиями следующих руководящих документов: РД 34.45-51.300-97 в части приложения № 3 «Тепловизионный контроль электрооборудования и ВЛ» по методике тепловизионного обследования РД 153-34.0-20.363-99 «Методика инфракрасной диагностики электрооборудования и ВЛ», «Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей».

Оценка теплового состояния электрооборудования и токоведущих частей в зависимости от условий их работы и конструкции осуществляется по нормированным температурам нагрева (превышениям температуры). Предельные значения температуры нагрева и ее превышения приведены в РД 34.45-51.300-97

В процессе тепловизионного обследования элементов системы электроснабжения выявляются дефекты контактных соединений оборудования, определяются перегрузки кабелей, предохранителей, автоматических выключателей, нагрев изоляции и другие дефекты, возникающие вследствие перегрева электроустановок. Тепловизионное обследование позволяет выявить наличие дефекта и зафиксировать его точное месторасположение на термограммах. На основе тепловизионного об-

следования технологических и электротермических установок определяются тепловые потери и оценивается энергоэффективность ЭТУ.

Объектами тепловизионного обследования на одном из предприятий были следующие виды электроустановок и их конструктивные элементы: распределительные устройства РУ-0,4 кВ ТП-1, трансформаторы 6/0,4 кВ, электродвигатели, электротехнологическое оборудование.

Тепловизионные обследования электроустановок проводились с использованием тепловизора Testo-882. Результаты тепловизионных обследований электроустановок приведены в таблице, где кратко сформулированы выводы по термограммам электроустановок.

На основе проведенного анализа результатов тепловизионного контроля электроустановок и технологического оборудования установлено следующее.

1. В некоторых электроустановках выявлено превышение температуры по сравнению с нормативными значениями (см. таблицу). Так, например, в распределительных устройствах РУ-0,4 кВ, 2 с.ш. ТП-1 наблюдается перегрев в токоведущей шине фазы «В», в которой температура достигает 155,9°C, что превышает допустимую температуру 120°C (рис. 1). Предложено перераспределение однофазных нагрузок для уменьшения тока в фазе «В» с целью снижения риска аварийного отключения и повышения надежности электроснабжения.

2. В технологических установках, использующих электронагревательные элементы, имеются местные перегревы (во входных проемах технологических линий, металлических элементах конструкций), которые составляют от 110 до 185°C, что превышает допустимую температуру наружной поверхности эксплуатируемых технологических электроустановок (70°C) (см. рис. 2). Это приводит к непроизводительному расходу электрической энергии за счет дополнительных (сверхнормативных) тепловых потерь с наружной поверхности установок и непроизводительным потерям электроэнергии в электротехнологических установках.

Результаты тепловизионных обследований электрооборудования

Наименование объекта	Наименование части (фрагмента) объекта	Результаты измерения и визуального обследования			Выводы
		Максимальная температура, °C	Средняя температура аномальной поверхности, °C	Максимально допустимая температура по НТД (РД 34.45-51.300-97), °C	
ТП-1	Трансформатор Т-1	97,3	61,7	90	Дефектов и температурных неоднородностей не выявлено. Имеется небольшое превышение температуры в верхней части бака трансформатора
ТП-1	Трансформатор Т-2	110,2	53,4	90	Дефектов и температурных неоднородностей не выявлено. Имеется небольшое превышение температуры в верхней части бака трансформатора
ТП-1, РУ-0,4 кВ, 1 с.ш.	Предохранители 400 А	119,3	59,2	105	Дефектов и температурных неоднородностей не выявлено, имеется превышение температуры на выводах предохранителей
ТП-1, РУ-0,4 кВ, 2 с.ш.	Токоведущие шины	155,9	57,6	120	Дефектов не обнаружено. Имеются температурные неоднородности в токоведущей шине фазы «В»
Технологическая линия	Электродвигатель	36,1	28,6	80	Дефектов и температурных неоднородностей не выявлено
Технологическая линия формовки	Входное окно технологической линии	110	37,1	70	Обнаружены температурные неоднородности в окнах входа-выхода изделий
Технологическая линия	Наружная поверхность пресс-формы	185,4	39,6	70	Обнаружены температурные неоднородности в элементах неизолированных металлических частей технологического оборудования

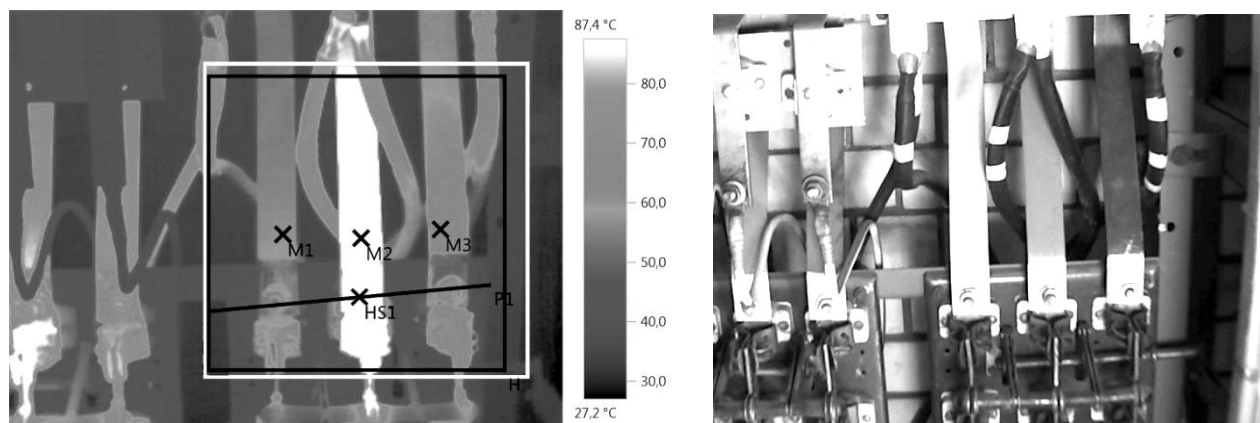


Рис. 1. Термограмма РУ-0,4 кВ, 2 с.ш. ТП-1

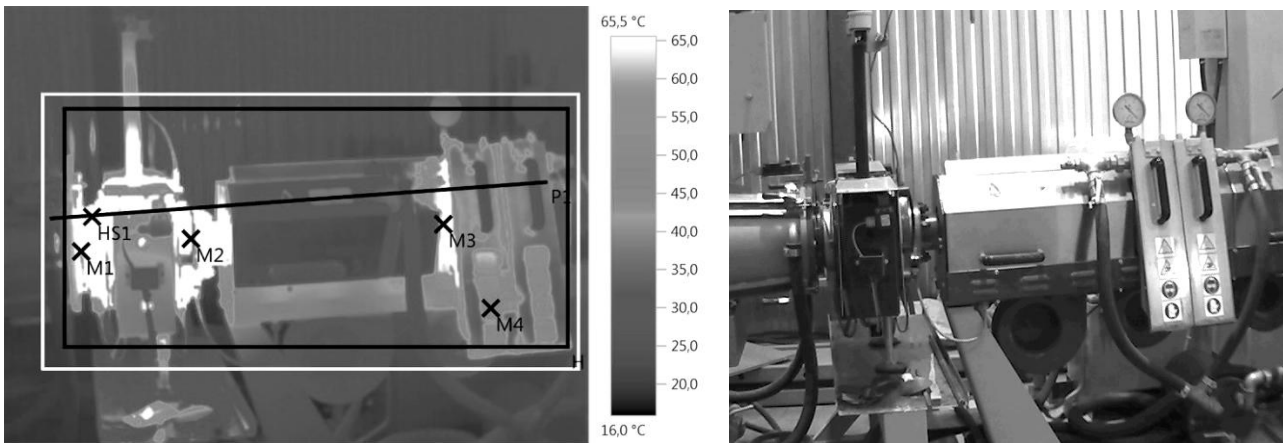


Рис. 2. Термограмма технологической линии

Проведенный расчет потерь электроэнергии с помощью программных средств [3] только для двух рассмотренных поверхностей технологических установок показал, что годовой перерасход для них составляет около 11,5 тыс. кВт·ч. Учитывая, что на предприятии используются десятки аналогичных электротехнологических установок, актуальной задачей является теплоизоляция перегретых поверхностей технологических установок, а в перспективе – замена указанных установок на энергоэффективные.

3. Для термического участка, имеющего 19 электропечей сопротивления

различного назначения с общей установленной мощностью 2,3 МВт, в результате проведенного тепловизионного обследования двух электропечей Н-60 и СШЗ-15.30/7, находящихся в работе, получены следующие результаты. Отдельные участки наружной поверхности печей имеют температуру, значительно превышающую нормативную величину. В частности, для фронтальной части электропечи Н-60 средняя температура составляет 200°C, а для крышки шахтной электропечи СШЗ она равна 100°C.

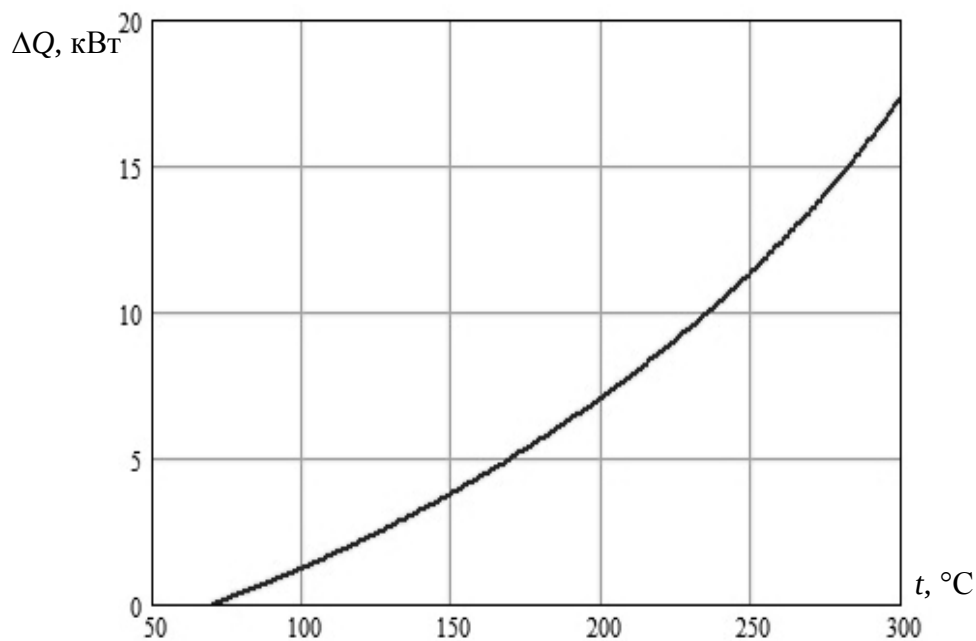


Рис. 3. Зависимость сверхнормативных потерь мощности электропечи сопротивления Н-60 от температуры наружной поверхности

На основе проведенных расчетов тепловых потерь по [3] установлено, что нерациональный (сверхнормативный) расход электроэнергии, обусловленный увеличением тепловых потерь в электротермических установках из-за повышенной температуры наружных поверхностей только для двух электропечей типа Н-60 и СШЗ-15.30/7 достигает 39,76 тыс. кВт·ч/год. На рис. 3 представлена расчетная зависимость сверхнормативных потерь с наружной поверхности электропечи Н-60 от температуры поверхности. Следует учесть, что при полной загрузке термического участка цеха сверхнормативные потери тепла будут в несколько раз превышать приведенные выше величины.

Для уменьшения потерь теплоты и снижения расхода электрической энергии в электропечах сопротивления предложено

использование дополнительной тепловой изоляции. Расчет толщины изоляции для уменьшения тепловых потерь с наружной поверхности печи выполнен с помощью программы в системе MathCAD. Сроки окупаемости энергосберегающих мероприятий по изоляции указанных выше печей составят соответственно: для печей типа Н-60 – 0,1 года, а для печей СШЗ – 0,12 года.

Таким образом, проведенные тепловизионные обследования позволили определить соответствие тепловых режимов эксплуатации электроустановок системы электроснабжения и ЭТУ установленным требованиям, рассчитать сверхнормативные потери в электротермических установках и предложить мероприятия по повышению их энергоэффективности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации: Указ Президента РФ от 7 июля 2011 г. № 899 // Собрание законодательства РФ. 2011. № 28. Ст. 4168.

2. **Тригорлый С.В.** Разработка подсистемы моделирования процессов тепломассоотдачи в САПР СВЧ электротехнологиче-

ских установок / С.В. Тригорлый, Д.В. Джема // Электротехнологические СВЧ установки, функциональные электродинамические устройства: межвуз. науч. сб. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 1999. С. 72-76.

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

Тригорлый Сергей Викторович – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Sergey V. Trigorly – Ph.D., Head: Department of Automated Electrotechnical Plants and Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 10.10.14, принята к опубликованию 15.11.14

УСТАНОВКА ДЛЯ СВЧ ОБРАБОТКИ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР

А.О. Морозов, О.А. Морозов, А.В. Прокопенко, В.П. Требух

A UNIT FOR MICROWAVE PROCESSING OF GRAIN CROPS

A.O. Morozov, O.A. Morozov, A.V. Prokopenko, V.P. Trebukh

Предложен подход к созданию оптимальной конструкции волновода рабочей камеры СВЧ установки, работающего в режиме бегущей волны. Проведены исследования и разработка автоматизации установки. Выполнено экспериментальное испытание установки СВЧ мощностью 25 кВт. Определены параметры высокоинтенсивной термообработки зерна и зерновых продуктов, которые показали перспективность применения разработанной СВЧ установки в сельском хозяйстве и пищевой промышленности.

Ключевые слова: СВЧ установка, рабочая камера, бегущая волна, СВЧ мощность, перспективность применения

В последнее десятилетие в России проводятся интенсивные работы по исследованию СВЧ воздействия на зерновые культуры [1-3]. Цели этих научных исследований: повышение питательности кормов и снижение энергетических затрат в процессе кормоприготовления, обеззараживание зерна и продуктов его переработки, улучшение хлебопекарного качества зерна, повышение урожайности посевных культур и обеспечение сохранности урожая. Из проведенных работ следует, что создание эффективной СВЧ промышленной установки по тепловому воздействию на зерновые культуры является актуальной задачей для сельского хозяйства и пищевой промышленности.

В ЗАО «НПП «Магратеп» разработана промышленная установка для СВЧ обра-

The paper presents a new approach to creating an optimum design of the waveguide working chamber in the microwave unit operating in the traveling wave mode. The authors conducted a research to develop an automated unit. Experiments were made to test the 25 kW microwave units. The parameters were defined for high-intensity heat treatment of grain and grain products which showed promising application of the developed microwave unit in agriculture and food industry.

Keywords: microwave installation, operation chamber, traveling wave, microwave power, promising applications

ботки зерновых продуктов, которая может работать в следующих режимах: предпосевная обработка семян, обеззараживание зерна, предпомольная обработка зерна, кормоприготовление смесей из фуражного зерна. Режимы работы установки зависят от температуры и скорости нагрева зерна. Так, в режиме кормоприготовления для эффективной деструкции крахмала в пшенице требуется нагреть зерно до 150°C при скорости нагрева не более 5 градусов в секунду, а для обеззараживания зерна температура нагрева не должна превышать 80°C.

СВЧ установка собрана на магнетроне марки М-175 с регулируемой выходной СВЧ мощностью от 10 до 25 кВт на частоте 915 МГц. Предварительные энергетические оценки производительности установ-

ки показывают, что в режиме кормоприготовления (деструкции крахмала в пшенице) производительность может достигать до 320 кг/ч, в режиме обеззараживания – до 650 кг/ч, а в режиме предпосевной обработки – более 1500 кг/ч. Подобная установка может использоваться в крупных фермерских хозяйствах для приготовления эффективных кормов в птицеводстве и животноводстве.

Рабочая камера установки волноводно-проходного типа выполнена на основе волновода увеличенного прямоугольного сечения 516×312 мм с волной H_{10} с частичным заполнением диэлектриком. В центре волновода размещается толстостенная фторопластовая труба с внутренним диаметром 175 мм, заполненная диэлектриком с потерями, например пшеницей, имеющей диэлектрические характеристики $\epsilon' = 2,93$ и $\operatorname{tg} \delta = 0,13$ при влажности 9,9 % на частоте 915 МГц. Волноводная камера имеет длину около 2 м и расположена вертикально. Зерно в трубе движется сверху вниз навстречу СВЧ энергии. Проведенный расчет камеры показал возможность перехода на СВЧ мощность до 50 кВт для увеличения производительности установки.

Используя аналитический метод теории возмущений и численное моделирование в пакете прикладных программ CST Studio Suite 2013, выполнен расчет волноводной рабочей камеры установки для тепловой обработки зерна. Согласно расчетам, коэффициент затухания частично заполненного зерном волновода в зависимости от характеристик зерна лежит в диапазоне от 5 до 10 дБ/м. Изменяя длину волновода и степень заполнения его сечения зерном, возможно достичь практически полного поглощения СВЧ мощности в диэлектрике на заданной длине. При этом основные потери СВЧ энергии приходятся на начальный участок волновода, у которого расположен узел ввода СВЧ мощности.

Узел ввода мощности расположен в нижней части рабочей камеры, выполнен в виде поворотного рупорного перехода от прямоугольного волновода сечением

220×104 мм. Согласование рабочей камеры с СВЧ трактом достигается подбором угла наклона и длины прямоугольного рупорного перехода относительно оси рабочей камеры. Для эффективной передачи СВЧ энергии в рабочую камеру и устойчивой работы магнетрона необходимо обеспечить долговременный K_{cmU} не выше 1,5, что позволит отказаться от использования ферритового циркулятора при работе установки. Источник питания магнетрона трансформаторного типа с регулировкой мощности током соленоидов на магнетроне. Для защиты магнетронного генератора при работе на пустую или частично заполненную зерном фторопластовую трубу на конце волноводной рабочей камеры размещаются симметричные парные водяные нагрузки. Эти нагрузки практически не поглощают СВЧ мощность при нагреве зерна. Для охлаждения магнетрона и волноводной нагрузки используется замкнутая система принудительного водяного охлаждения на основе чиллера, который рассеивает в атмосфере тепловую мощность до 35 кВт.

Разработана конструкция волноводной рабочей камеры, которая легко разбирается на 3 основные секции: волноводный переход, волновод и согласованная нагрузка. Материалом для рабочей камеры и основных узлов установки является нержавеющая сталь. Выполнено исследование электродинамических характеристик изготовленной волноводной рабочей камеры. С использованием векторного анализатора цепей фирмы Anritsu MS2025B проведены исследования значения K_{cmU} при полном заполнении рабочей камеры пшеницей с влажностью не более 10%, которые показали, что в полосе 890-940 МГц значение K_{cmU} не превысило 1,2. Проведенные дополнительные исследования показали отсутствие значительного влияния водяной нагрузки на значение K_{cmU} при заполненной зерном волноводной рабочей камере.

Зерно из бункера, размещенного над установкой, движется по фторопластовой трубе внутри рабочей камеры сверху

вниз с использованием самоочищающихся шнеков, расположенных на входе и выходе фторопластовой трубы. Скорость вращения шнеков управляется частотно-регулируемыми электродвигателями, которые позволяют устанавливать производительность от 200 до 2000 кг/ч. Максимальная скорость нагрева зерна – на начальном участке волноводной рабочей камеры, длина которого не более 45 см. Водяной пар, образующийся при нагреве зерна на этом участке в режиме кормоприготовления, поднимается по фторопластовой трубе через зерно вверх и дополнительно прогревает его. Безопасность по СВЧ излучению из узлов ввода и вывода зерна обеспечивается предельным характером устройства шнеков и специальными крестообразными вставками на выходе из трубопровода. С использованием промышленных микропроцессоров серии EASY LOGIC разработана система автоматического управления работой установки. Эта система контролирует источник питания магнетрона, работу магнетрона на высоком уровне мощности, частоту вращения шнеков, температуру зерна на выходе и безопасность работы установки.

Проведен запуск и исследована работа установки на высоком уровне мощности. Исследования выполнялись на пшенице. Автоматическая система позволяла регулировать температуру зерна от 40 до 200°C. В процессе пусконаладочных работ сняты зависимости температуры зерна на выходе установки от производительности при уровнях СВЧ мощности 10, 15, 20 и 25 кВт. При малой скорости подачи зерна и максимальной СВЧ мощности достигнута максимальная температура нагре-

ва зерна 210°C. На установке получен эффект частичного диспергирования зерен пшеницы. В процессе работы отмечена необходимость более тщательной разработки режимов обработки зерна, что является задачей технологов на пищевых и комбикормовых предприятиях. При исследовании работы установки с использованием прибора ПЗ-33М контролировался уровень СВЧ излучения, который оказался безопасным для работы персонала. Для интенсификации процессов обеззараживания разработана система тепловой выдержки обработанного зерна при температуре до 80°C. Выполненная оценка энергетических характеристик работы установки показала, что в различных режимах работы установки не менее 85% СВЧ мощности, выработанной магнетроном, идет на нагрев зерна.

Проведены испытания работы установки в племенном птицеводческом заводе «Птичное» Россельхозакадемии, которые показали возможность непрерывной работы установки в течение 8 часов. Данная установка прошла сертификационные испытания на электробезопасность и электромагнитную совместимость. Проводятся государственные приемочные испытания на Владимирской машиноиспытательной станции.

Таким образом, разработана промышленная установка и проведены предварительные экспериментальные исследования её работы, которые показали эффективность СВЧ обработки зерна и необходимость проведения экспериментальных исследований с целью создания технологии обработки зерновых культур.

ЛИТЕРАТУРА

1. Юсупова Г.Г. Обеззараживание зерна пшеницы энергией СВЧ-поля / Г.Г. Юсупова // Хранение и переработка сельхозсырья. 2003. № 12. С. 67-69.
2. Пахомов В.И. Оптимизация тепловой обработки фуражного зерна СВЧ-

энергией / В.И. Пахомов, В.Д. Каун // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2000. № 9. С. 8-10.

3. Семенова О.Л. Влияние режимных параметров СВЧ-установки на показатели качества пшеничной муки / О.Л. Семенова //

Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2012. № 1(87). С. 74-77.

4. Development of Industrial Microwave Installation for Grain Processing /

O.A. Morozov [et al.] // Pross. Int. Crimean Conf. Microwave & Telecommunication Technology. Sevastopol, Ukraine. 2013. P. 1000-1001.

Морозов Александр Олегович – аспирант филиала Московского государственного технического университета радиотехники, электроники и автоматики в г. Фрязино, начальник отдела ЗАО «НПП «Магратеп», г. Фрязино

Морозов Олег Александрович – директор ЗАО «НПП «Магратеп», г. Фрязино

Прокопенко Александр Валерьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры электрофизических установок Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (Московский инженерно-физический институт)

Требух Валерий Петрович – начальник отдела ЗАО «НПП «Магратеп», г. Фрязино

Aleksandre O. Morozov – Postgraduate, Part of Moscow State Technical University of Radio Engineering, Electronics and Automation (Fryazino), Head of Department at ZAO NPP Magratep, Fryazino

Oleg A. Morozov – Director, ZAO NPP Magratep, Fryazino

Aleksandre V. Prokopenko – Ph.D., Associate Professor, Department of Electrophysic Plants, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

Valeriy P. Trebukh – Head of Department, ZAO NPP Magratep, Fryazino

Статья публикуется с согласия авторов по материалам научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения». Саратов: СГТУ, 2014. Т. 2. С. 75-79

К СВЕДЕНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

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

ПОВЫШЕНИЕ РАВНОМЕРНОСТИ НАГРЕВА В БЫТОВОЙ СВЧ ПЕЧИ

Д.А. Давыдов, Е.И. Юсов

INCREASING UNIFORMITY OF HEATING IN HOUSEHOLD MICROWAVES

D.A. Davydov, E.I. Yusov

Предлагается вариант модернизации бытовой СВЧ печи обеспечивающий повышение качества нагрева.

Ключевые слова: бытовая СВЧ печь, резонатор, нагрев, инфракрасный датчик

Нагрев до заданной температуры и обеспечение равномерности нагрева – принципиальные задачи для СВЧ установок на основе камер со стоячей волной (КСВ), в частности бытовых СВЧ печей.

Причина заключается в том, что рабочая камера печи представляет собой резонатор, колебания в котором происходят в виде стоячих волн. Особенностью стоячих волн является наличие пространственных максимумов и минимумов электрического поля (рис. 1).

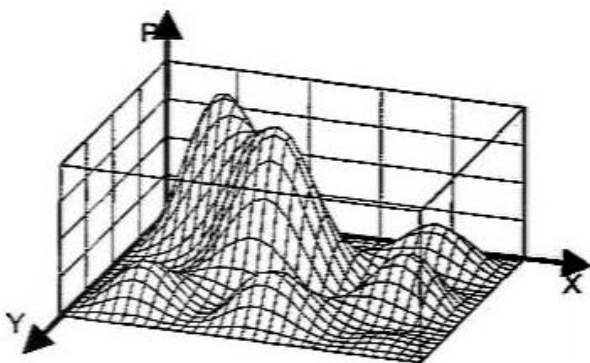


Рис. 1. Распределение мощности в камере бытовой СВЧ печи

Для решения первой задачи на сегодняшний день наибольшее распространение получили конструкции печей с диссектором или вращающимся столом.

The paper proposes a new way of modernizing household microwave ovens which ensure higher quality heating.

Keywords: household microwave oven, resonator, heating, infrared sensor

Диссектор представляет собой несколько металлических лопастей различной конфигурации, закрепленных на общей оси, которые расположены в непосредственной близости от ввода СВЧ энергии. Принцип действия диссектора состоит в следующем: во время вращения он своими лопастями возмущает электромагнитное поле в том месте, где СВЧ энергия поступает в камеру. Поэтому структура поля в камере постоянно видоизменяется. Для большей эффективности попасть диссектора могут быть неодинаковыми, так чтобы каждая лопасть по-своему влияла на условия возбуждения резонатора. Дополнительный результат достигается за счет того, что вращение диссектора периодически изменяет форму камеры, что влияет на распределение электромагнитного поля в резонаторе. Достоинствами диссектора являются простота его конструкции и, как следствие, низкая стоимость и высокая надежность.

Недостатки напрямую связаны с принципом его действия. Чем лучше условия для возмущения поля, тем хуже условия согласования резонатора с СВЧ генератором. В настоящее время не существует способа, позволяющего рассчитать диссектор так, чтобы при любом угле поворота

он не влиял на согласование резонатора с генератором, что, как следствие, приводит к более напряженному режиму работы магнетрона, снижению его КПД и срока службы.

В случае использования поворотного стола каждая точка продукта поочередно попадает в места с разной напряженностью электрического поля. Предполагается, что в течение полного оборота поглощаемая мощность усредняется и выравнивает температуру по объёму продукта. Однако при этом разные участки продукта будут находиться разное время в зонах максимума электрического поля, а в случае неоднородного продукта или его расположения несимметрично оси вращения участки продукта с большим содержанием воды будут нагреваться интенсивнее. Особенно ярко это проявляется при размораживании.

Для обеспечения необходимой температуры нагрева в существующих бытовых СВЧ печах или применяют регулирование времени нагрева в зависимости от веса объекта [1], или используют инфракрасные датчики [2].

Реализация первого способа представлена на рис. 2. В данном случае реализуется программное управление, определяемое исключительно весом объекта. Так как не учитываются диэлектрические параметры продукта, нагрев до заданной температуры может быть реализован только методом проб и ошибок.

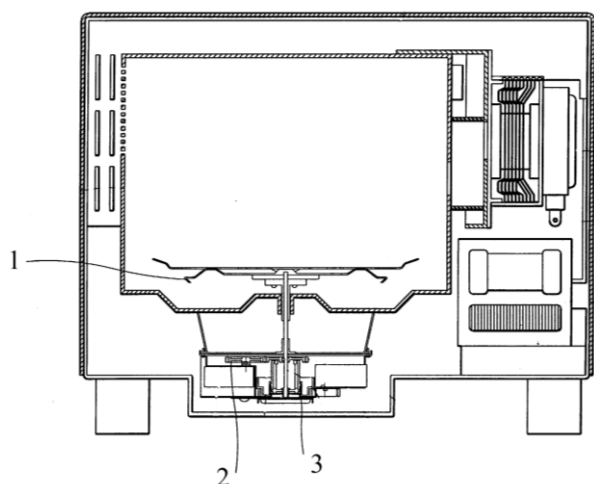


Рис. 2. СВЧ печь с датчиком веса. 1 – вращающийся лоток; 2 – привод лотка; 3 – датчик веса

Во втором случае реализуется регулирование с обратной связью по температуре с помощью инфракрасного датчика (рис. 3). Естественно, процесс нагрева прекращается при достижении отдельным участком нагреваемого продукта заданной температуры без учёта температуры нагрева объекта в целом.

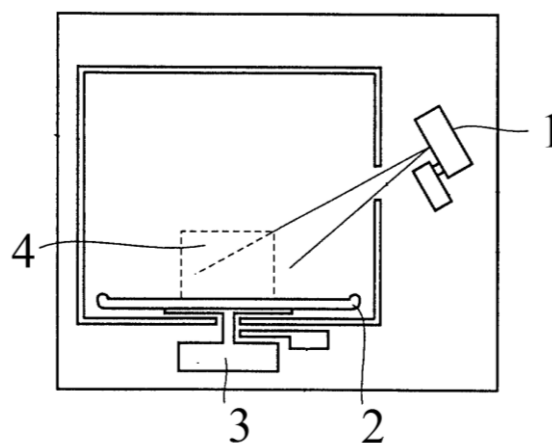


Рис. 3. СВЧ печь с инфракрасным датчиком. 1 – инфракрасный датчик; 2 – вращающийся лоток; 3 – привод лотка; 4 – объект

Данный недостаток может быть устранен в случае использования вместо одного инфракрасного датчика их совокупности (в частности, трех) (рис. 4). В этом случае принятие решения о продолжении нагрева или о его прекращении происходит на основе сравнения показателей трёх датчиков.

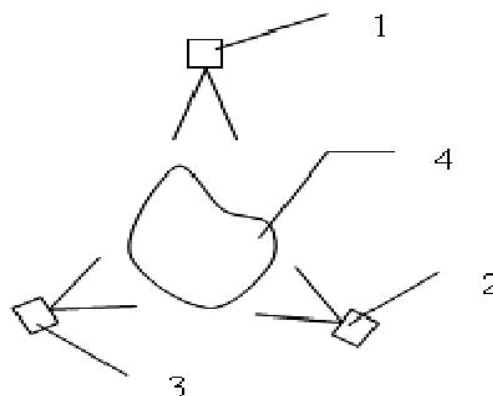


Рис. 4. Схема установки с тремя датчиками: 1, 2, 3 – инфракрасные датчики; 4 – объект

При этом принципиально меняются функция поворотного стола и сам алгоритм функционирования печи. Вместо

равномерного одностороннего вращения поворотный стол должен обеспечивать дискретное реверсивное перемещение продукта от датчика с наименьшим показателем температуры к датчику с максимальным показателем. Прекращение нагрева происходит при равенстве показате-

лей всех трёх датчиков. Таким образом, нивелируется неравномерность поглощения СВЧ мощности в области продукта, что приводит к повышению точности и равномерности нагрева. Вариант алгоритма, реализующего подобное функционирование, представлен на рис. 5.

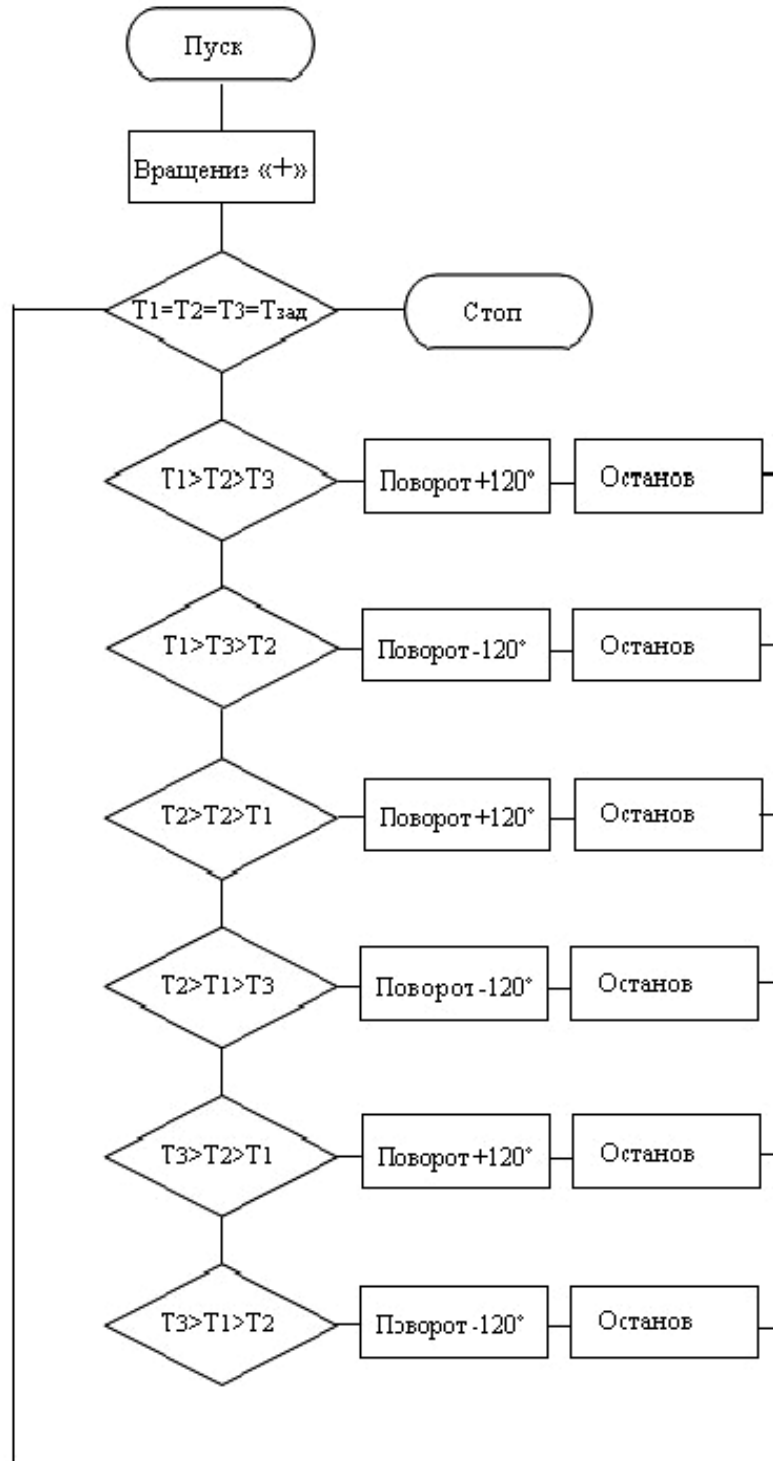


Рис. 5. Алгоритм функционирования установки с тремя инфракрасными датчиками: поворот по часовой стрелке «+», против «-»

ЛИТЕРАТУРА

1. Способ управления длительностью приготовления пищи в микроволновой печи: пат. 2124279 Рос. Федерация: МПК6 Н 05 В 6/68, Н 05 В 6/64, А 47 J 27/00, А 47 J 27/088, G 01 G 3/00, G 05 F 1/00, G 05 F 3/00 / Кванг-Кеун Ким и др. № 97102735/13; заявл. 21.02.1997; опубл. 27.12.1998.

2. Устройство для приготовления пищевых продуктов с датчиком инфракрасного излучения: пат. 2145403 Рос. Федерация: МПК6 F 24 C 7/00, Н 05 В 6/68 / Хироюки Уэхаси и др. № 98105419/03; заявл. 17.03.1998; опубл. 10.02.2000.

Давыдов Дмитрий Алексеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета им. Гагарина Ю. А.

Dmitriy A. Davydov – Ph.D., Associate Professor, Department of Automated Electrotechnical Devices and Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Юсов Евгений Игоревич – студент кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета им. Гагарина Ю. А.

Eugeniy I. Yusov – Undergraduate, Department of Automated Electrotechnical Devices and Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 20.10.14, принята к опубликованию 15.11.14

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

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

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

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

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО МЕТОДА ДЛЯ РАСЧЁТА ГЛУБИНЫ ПРОНИКНОВЕНИЯ ИМПУЛЬСА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ

В.Д. Гончаров, С.А. Калинин, Р.В. Яшкардин, К.С. Сорокин

USING THE SPECTRAL METHOD TO CALCULATE THE PENETRATION DEPTH OF AN ELECTROMAGNETIC FIELD IMPULSE OF ARBITRARY SHAPE

V.D. Goncharov, S.A. Kalinin, R.V. Yashkardin, K.S. Sorokin

Изложены основы спектрального метода расчёта взаимодействия импульсного магнитного поля и проводящих материалов. Приведены результаты численного моделирования изменения формы сигнала на разном расстоянии от поверхности и спектры сигналов различной формы. Разработанная методика легла в основу нелинейной математической модели системы питания импульсной электротехнологической установки. Приведены результаты, полученные с помощью экспериментальной установки.

Ключевые слова: электромагнитный импульс, глубина проникновения, математическая модель, наночастицы

В рабочем цикле большинства технологических устройств важное место занимает система питания, состоящая из источника питания (ИП) и системы его согласования с нагрузкой. В системах с импульсным вкладом энергии, где мгновенные значения токов достигают $10^4 \dots 10^6$ А [1, 2], ошибки в расчетах ИП и системы их согласования могут привести к неэффективному использованию энергии и даже к повреждению системы.

При проектировании подобных систем особое внимание уделяют процессам, происходящим в системе питания. Для данных целей используют либо сложные математические модели, основанные на решении

The paper provides basics of the spectral method for calculation of electric and magnetic fields. The results of numeric modeling of changes in the impulse shape at various gaps between the influenced electrodes and the substrate, as well as impulse specters of different shapes are presented. The developed methods became the basis for a non-linear mathematical model of power supply systems in pulse electrotechnical devices. The research results were achieved using the presented model.

Keywords: electromagnetic impulse, penetration depth, mathematical model, nanoparticles

уравнений Максвелла в трехмерном приближении [3], либо математические модели, описывающие происходящие процессы в так называемых системах с сосредоточенными параметрами. В основе таких моделей – системы дифференциальных уравнений, описывающие процессы в эквивалентной электрической схеме замещения устройства. Адекватность математической модели реальному устройству зависит от того, насколько точно определены параметры отдельных элементов схемы замещения [4]. Таким образом, определение параметров отдельных элементов схемы замещения становится одной из главных задач, возникающих при математическом

моделировании систем питания импульсных технологических устройств.

Параметры схем замещения таких систем – сопротивления, индуктивности, а иногда и ёмкости токоподводящих элементов и нагрузки – зачастую определяют по методикам, используемым для систем постоянного или гармонического тока. Вместе с тем широко известно, что данные параметры проводников зависят от формы протекающего через них тока.

Следовательно, напрямую использовать приемы, известные для расчета систем постоянного или гармонического тока, при расчете импульсных систем недопустимо, поскольку при этом значения сопротивлений и индуктивностей устанавливаются неизменными во времени и могут многократно отличаться от реального значения. Всё это приводит к большим погрешностям в расчете. Для того чтобы избежать этих ошибок, определение значений отдельных элементов схемы замещения должно опираться на более глубокие теоретические исследования взаимодействия импульсного магнитного поля и связанного с ним тока с проводящими средами.

Рассмотрим спектральный метод расчёта взаимодействия импульса магнитного поля сложной формы с проводящей средой.

В основе этого метода лежит постулат о том, что произвольный одиночный импульс магнитного поля $H(t)$ длительностью T_p можно представить в виде интеграла Фурье:

$$H(t) = A_0 + \frac{1}{2\pi} \int_{0+}^{\infty} A(\omega) \cos(\omega t + \varphi(\omega)) d\omega, \quad (1)$$

где A_0 – постоянная составляющая импульса; $A(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ – амплитуда спектральной плотности импульса и ее начальная фаза на частоте ω . Природа рассматриваемого импульса магнитного поля не имеет значения. Он может быть как результатом протекания тока по самому проводнику, так и наведен сторонним током.

Для того чтобы упростить решение поставленной задачи, примем следующие допущения:

– электромагнитная волна, падающая по нормали к поверхности проводника, является плоской;

– проводящая среда, на которую падает волна, является полубесконечной. На практике достаточно, чтобы вычисленные действующие значения напряженности магнитного поля на «входной» и «выходной» поверхностях различались более чем на порядок;

– электромагнитные свойства среды постоянны,

– одиночный импульс можно заменить периодической последовательностью импульсов той же формы со скважностью $Q = T / T_p$, где T – период следования импульсов.

Первые два допущения позволяют свести задачу к одномерному приближению. Третье допущение ограничивает применимость предложенных ниже расчетов линейными и изотропными средами. Четвёртое допущение справедливо в том случае, когда период импульсов окажется больше группового времени задержки электромагнитной волны в среде, чтобы отдельные импульсы периодического сигнала не оказывали взаимного влияния друг на друга. На практике значение Q нужно выбрать так, чтобы на исследуемой глубине амплитуда реакции на предшествующий импульс не превышала 2...3% от максимальной к началу следующего импульса.

Последнее допущение существенно упрощает процесс расчёта, так как позволяет перейти от интеграла (1) к ряду Фурье, а от бесконечно малых амплитуд спектральной плотности – к конечному набору гармоник с амплитудами A_k , что удобно для практического расчета:

$$H_0(t) \approx A_0 + \sum_{k=1}^N A_k \cos(k\omega_1 t + \phi_k),$$

$$A_k = \frac{2}{T} A(\omega) \Big|_{\omega=k\omega_1}, \quad \phi_k = \frac{2}{T} \varphi(\omega) \Big|_{\omega=k\omega_1}, \quad (2)$$

где k – порядковый номер гармоники; $\omega_1 = 2\pi / QT_p$ – частота первой гармоники; ϕ_k – начальная фаза k -й гармоники.

Согласно известным представлениям о распространении гармонического магнитного поля в проводящей среде [5], каждая k -я гармоника взаимодействует со средой, уменьшаясь по амплитуде в e раз на расстоянии, равном глубине проникновения Δ_k . На некоторой произвольной глубине h в линейной изотропной среде значение напряженности магнитного поля k -й гармоники составит

$$H_k = A_k e^{-h/\Delta_k}, \quad (3)$$

а начальная фаза

$$\phi_k + h \sqrt{\frac{\mu \gamma k \omega_1}{2}}, \quad (4)$$

$$H_1(t) \approx A_0 + \sum_{k=1}^N A_k e^{-h/\Delta_k} \cos \left(k \omega_1 t + \phi_k + h \sqrt{\frac{\mu \gamma k \omega_1}{2}} \right). \quad (6)$$

Выражения (2) и (6) представляют собой отрезки ряда Фурье с конечным количеством членов N . Точность расчета с использованием данных выражений связана с выбором N и определяется отношением $\Delta \omega / Q$, где $\Delta \omega$ – ширина спектра одиночного импульса последовательности.

Для определения $\Delta \omega$ известен ряд практических критериев, однако все они требуют предварительного расчета амплитудного спектра импульса на всем интервале $\omega > 0$, что невозможно при численном расчете в случае произвольной формы импульса. Указанная проблема устраняется путем аналитического решения задачи о верхней оценке ширины спектра произвольного физического импульса:

$$\Delta \omega \leq \int_0^T |f'(t)| dt \Big/ n \int_0^T f(t) dt,$$

где $f(t)$ – функция, описывающая импульс, а $n \in (0;1)$ – доля максимальной амплитуды спектра, значения ниже которой считаются несущественными [6].

Проведем далее численный расчет эволюции формы импульса магнитного поля сложной формы при его распространении в глубь проводящей среды спектральным методом.

где μ и γ – соответственно абсолютная магнитная проницаемость и проводимость среды. Глубина Δ_k определяется соотношением

$$\Delta_k = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega_k \mu}}, \quad (5)$$

где ρ – удельное сопротивление среды.

Поскольку рассматриваемая среда линейна с учетом (2)-(4), на той же глубине h напряженность магнитного поля исходного импульса можно представить в виде отрезка ряда Фурье:

Описанный выше подход, позволяющий по известной начальной форме импульса магнитного поля и свойствам проводящей среды определить изменение его формы на любом расстоянии от ее поверхности, реализован в среде MATLAB в виде численного алгоритма.

В качестве примера расчета, выполненного с помощью разработанного алгоритма, на рис. 1 показана эволюция формы импульса магнитного поля длительностью $T_p = 10^{-5}$ с в зависимости от расстояния в глубину проводящей среды при его начальной форме в виде прямоугольника (а) и затухающей экспоненты (б).

Возможный диапазон значений скважности Q был определен путем расчета связанного с ней группового времени задержки τ_g импульса прямоугольной формы при $N = 100$ на некоторой глубине. Результат расчета показал, что в этом случае τ_g перестает существенно изменяться при $Q > 25$. При таких Q форма импульса реакции будет определена с достаточной для практического применения точностью.

Рассмотрим теперь методику определения эффективной глубины проникновения магнитного поля в проводящую среду.

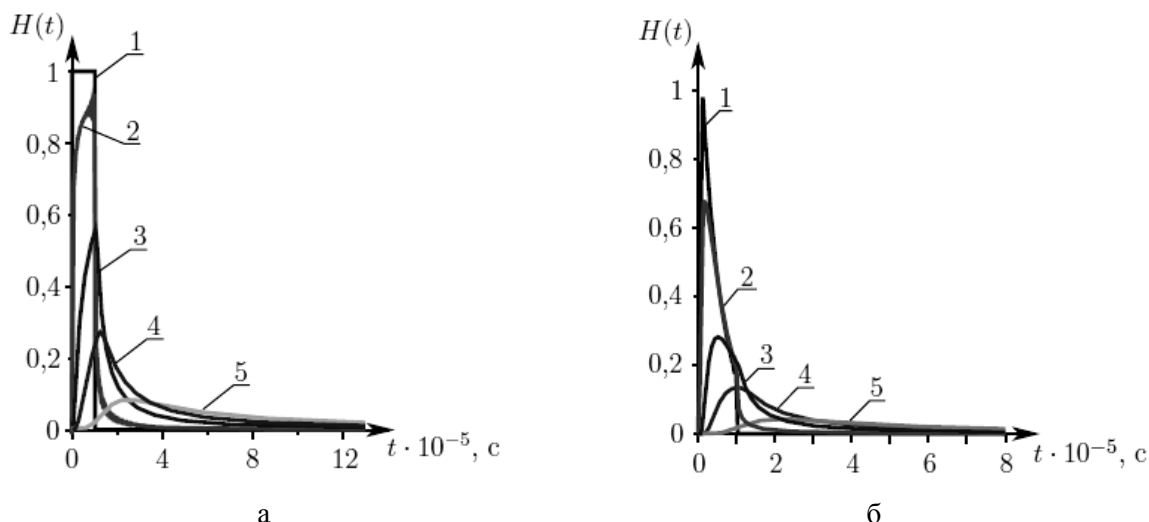


Рис. 1. Эволюция формы прямоугольного (а) и затухающего экспоненциального (б) импульса магнитного поля с увеличением расстояния в глубину проводящей среды (кривая 1 соответствует форме импульса на поверхности среды, глубина растет с увеличением номера кривой)

Изложенный выше подход позволяет расширить применение хорошо разработанного математического аппарата расчета ВЧ систем с гармоническими воздействиями на случай воздействий произвольной формы. Одним из основных параметров, используемых при расчете ВЧ систем, является глубина проникновения в проводник гармонического магнитного поля и связанного с ним тока Δ . Модификация существующего математического аппарата, таким образом, должна заключаться в определении эффективной глубины проникновения в проводник импульса магнитного поля произвольной формы Δ_{eff} , на которой действующее значение напряженности магнитного поля и однозначно связанная с ним плотность тока проводимости уменьшаются в e раз.

Знание Δ_{eff} позволит с достаточной для практики точностью определять такие важнейшие параметры технологических систем как эффективная индуктивность и активное сопротивление нагрузки и токоподводов при импульсных воздействиях. Для определения Δ_{eff} предлагается следующий подход.

Используя (2), определим действующее значение напряженности магнитного поля на поверхности среды:

$$H_0 \approx \sqrt{A_0^2 + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N A_k^2}.$$

Для каждой k -й гармоники определим глубину проникновения магнитного поля Δ_k в проводник. Зная Δ_k , амплитуду k -й гармоники на произвольной глубине h можно найти, используя (3). Определим действующее значение напряженности магнитного поля на этой глубине:

$$H_1 \approx \sqrt{A_0^2 + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (A_k e^{-h/\Delta_k})^2}.$$

Теперь, зная действующие значения напряженности магнитного поля на поверхности и на произвольной глубине, можно записать выражение для эффективной глубины проникновения Δ_{eff} , аналогичное (5):

$$e^{-h/\Delta_{eff}} = H_1 / H_0 \Rightarrow \Delta_{eff} = h (\ln(H_0 / H_1))^{-1}.$$

Очевидно, что при выполнении предельного перехода к гармоническому воздействию Δ_{eff} , рассчитанная по выражению (6), окажется равной Δ на выбранной частоте, полученной с использованием (5).

Адекватность предложенной математической модели и программы, её реализующей, была продемонстрирована путём расчётов глубины проникновения для им-

пульса синусоидальной формы. Оказалось, что для импульса, содержащего 10 периодов синусоидального сигнала, расчётное

значение глубины проникновения отличается от того, что получается из известного выражения, менее чем на 3% (рис. 2, 3).

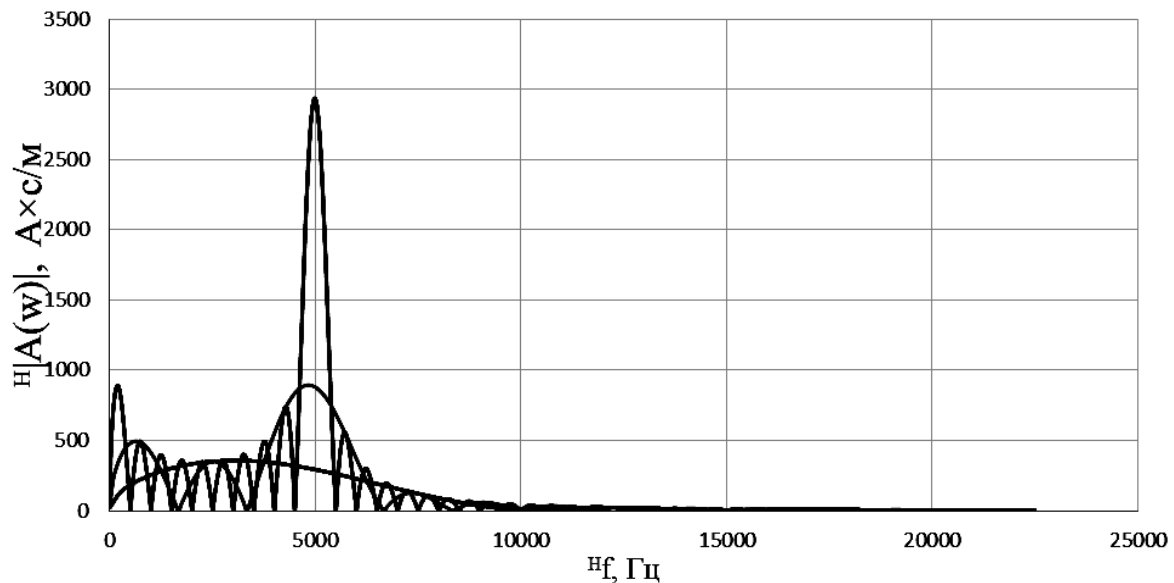


Рис. 2. Спектры синусоидального сигнала 1, 3 и 10 периодов

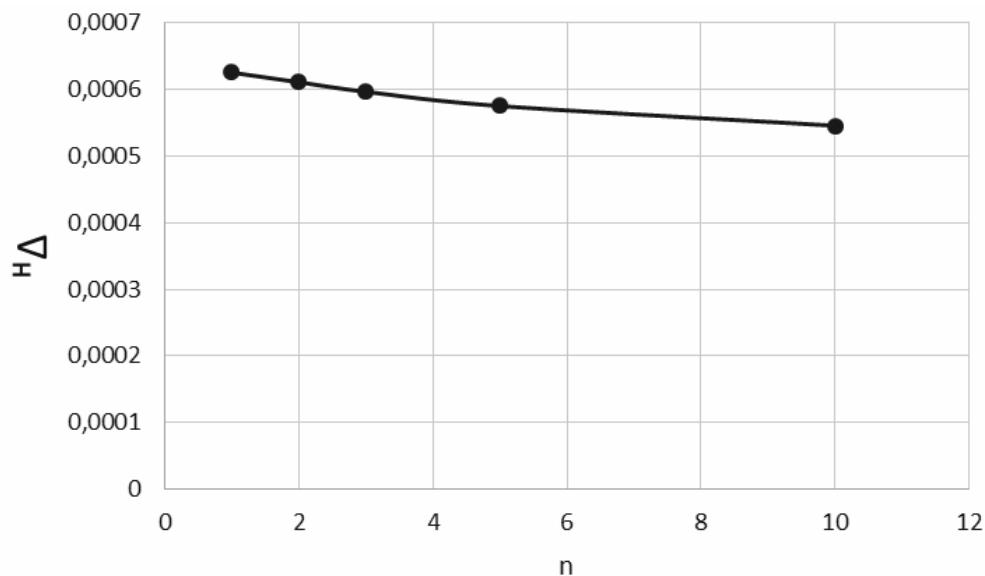


Рис. 3. Изменение эффективной глубины проникновения в зависимости от количества учитываемых периодов синусоидального сигнала

Предложенная методика определения Δ_{eff} использована для расчета параметров силовых токоподводов в ходе разработки нелинейной математической модели системы питания импульсной электротехнологической установки [2]. Использование результатов, полученных с помощью реализации этой нелинейной математической модели, позволило соз-

дать экспериментальную установку для получения и нанесения ультрадисперсных частиц с помощью импульсного дугового разряда.

В экспериментальной установке предварительно запасённая в конденсаторной батарее энергия выделяется в дуговом разряде за короткий промежуток времени (менее 10^{-4} с).

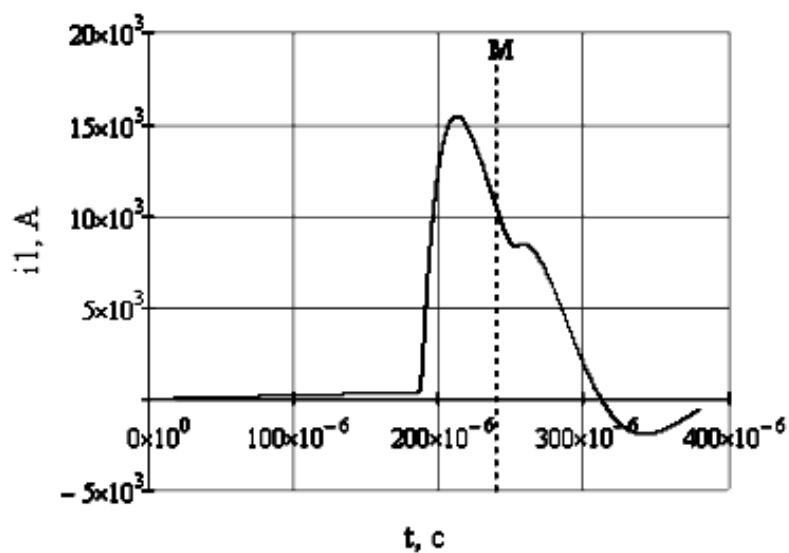


Рис. 4. Типичная зависимость изменения во времени тока разряда экспериментальной установки

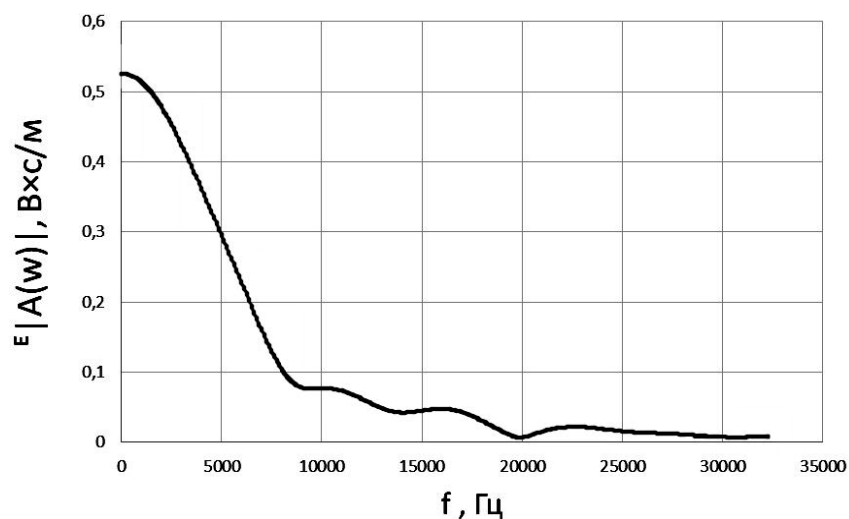


Рис. 5. Спектр импульса зависимости изменения во времени тока разряда экспериментальной установки

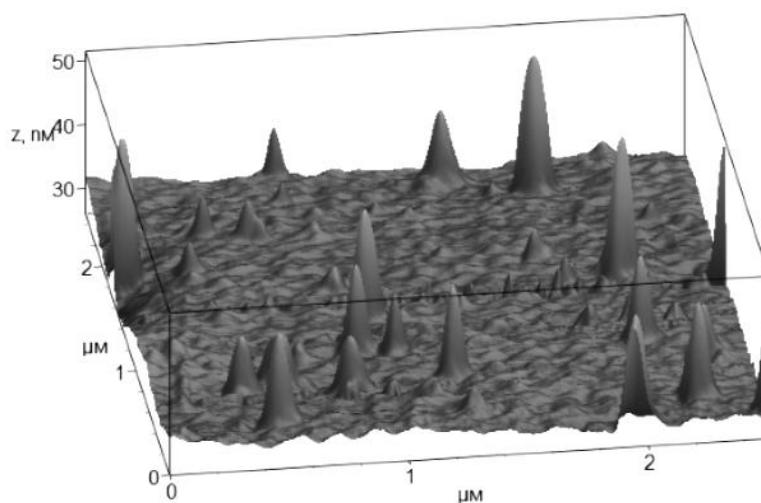


Рис. 6. Результаты АСМ исследования подложки с нанесёнными на поверхность ультрадисперсными частицами железа

Конструкция протяжённых в одном направлении электродов заставляет импульсный дуговой разряд перемещаться по их поверхности под действием собственного магнитного поля. Экспериментально измеренная зависимость тока разряда от времени приведена на рис. 4. На рис. 5 показан спектр данного импульса, рассчитанный по предложенной методике. Мощное энергетическое воздействие (10^8 Вт/см²) приводит к их поверхностно-

му оплавлению, частичному испарению и диспергированию материала электродов. Полученные таким образом капли осаждаются на поверхность подложки, закреплённой на расстоянии в несколько сантиметров от поверхности электродов. В дальнейшем подложки с нанесёнными на их поверхность частицами исследуются с помощью сканирующей зондовой микроскопии. Результаты подобного исследования приведены на рис. 6.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Орловский В.М.** Мощные импульсные лазеры и лазерные системы высокого давления ИК-диапазона: дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.04.05 / Орловский Виктор Михайлович. Томск, 2001. 251 с.

2. **Седой В.С.** Исследование электрического взрыва проводников и его применение в электрофизических установках: дис. ... д-ра техн. наук: 01.04.13 / Седой Валентин Степанович. Томск, 2003. 235 с.

3. **Джексон Д.** Классическая электродинамика / Д. Джексон. М.: Мир, 1965. 702 с.

4. **Шимони К.** Теоретическая электротехника / К. Шимони. М.: Мир, 1964. 773 с.

5. **Слухоцкий А.Е.** Индукторы для индукционного нагрева / А.Е. Слухоцкий, С.Е. Рыскин. Л.: Энергия, 1974. 264 с.

6. **Самсонов Д.С.** Электроимпульсная технология получения ультрадисперсных материалов: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.10 / Самсонов Дмитрий Сергеевич. СПб., 2014. 140 с.

Гончаров Вадим Дмитриевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретические основы электротехники» Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ»

Калинин Сергей Александрович – магистр, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Яшкардин Ростислав Владимирович – бакалавр, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Сорокин Константин Сергеевич – студент, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Vadim D. Goncharov – Dr.Sc., Professor, Department of Theoretical Foundations of Electrical Engineering, Saint Petersburg Electrotechnical University LETI

Sergey A. Kalinin – Master, Saint Petersburg Electrotechnical University LETI

Rostislav V. Yashkardin – Bachelor, Saint Petersburg Electrotechnical University LETI

Konstantin S. Sorokin – Undergraduate, Saint Petersburg Electrotechnical University LETI

Статья поступила в редакцию 30.10.14, принята к опубликованию 15.11.14

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 621.318.3

МАТРИЧНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБОБЩЕННОГО
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭНЕРГИИ

Д.А. Вырыханов, Г.Г. Угаров

MATRIX MATHEMATICAL MODEL OF A GENERALIZED
ELECTROMECHANICAL ENERGY CONVERTER

D.A. Vyrykhanov, G.G. Ugarov

На основании матричной математической модели процесса электромеханического преобразования энергии в неограниченном множестве магнитосвязанных электрических контуров обосновывается возможность применения методов наложения при расчетах динамических характеристик процесса энергопреобразования. Показано разделение переменных в системе дифференциальных уравнений, описывающих динамические характеристики токов и механических координат обобщенного электромеханического преобразователя энергии, что упрощает расчеты данных характеристик.

Ключевые слова: электромеханическое преобразование энергии, магнитосвязанные электрические контуры, матричная математическая модель

Уравнение Кирхгофа, описывающее баланс напряжений в контуре, содержащем электромеханический преобразователь [1], является неоднородным дифференциальным уравнением с переменными коэффициентами:

$$u = iR + \frac{d}{dt}(iL), \quad (1)$$

где u – внешнее электрическое напряжение; i – ток, протекающий в цепи; $R = f(i, x)$ – активное сопротивление, в

Using the matrix for a mathematical model of electromechanical energy conversion in an unlimited variety of magnet-coupled electric circuits, the authors demonstrate application of the methods for blending calculations to dynamic characteristics of energy transformations. Separation of variables in the system of differential equations describing dynamic characteristics of the currents, and mechanical coordinates of the generalized electromechanical energy converter, which simplifies the calculations of the given characteristics are presented.

Keywords: electromechanical energy conversion, magneto-coupled electric circuits, matrix mathematical model

общем случае зависящие от действующего значения электрического тока и геометрической координаты x (например, оказывающей влияние на интенсивность охлаждения обмоток преобразователя); $L = f(i, x)$ – индуктивность, в общем случае зависящая от тока и координаты x ; t – время. Аналитическое интегрирование уравнения (1) невозможно вследствие трудности разделения переменных, то есть преобразования уравнения (1) к виду

$$di = Fdt, \quad (2)$$

где F – некоторая функция, не зависящая от дифференциала тока di . Допуская неизменность активного сопротивления $R = \text{const}$, разделению переменных уравнения (1) в виде (2) не позволяет зависимость индуктивности от тока $L = f(i, x)$.

При рассмотрении общего случая конструкции электромеханического преобразователя, содержащего n количество магнитосвязанных контуров, уравнение (1) записывается для каждого из них, образуя систему дифференциальных уравнений:

$$u_i = i_i R_i + \sum_{j=1}^n \frac{d}{dt} (i_j L_{ij}), \quad (3)$$

где $i \in (1 \dots n)$; n – количество рассматриваемых электрических контуров; L_{ij} – взаимоиנדуктивность контуров (при $i \neq j$) или собственная индуктивность (при $i = j$) контура.

Невозможность разделения переменных, обусловленная зависимостью индуктивностей и взаимоиנדуктивностей от токов и геометрических координат $L_{ij} = f(i_1, i_2, \dots, i_n; x_1, x_2, \dots, x_m)$ (здесь m – количество свободных геометрических координат преобразователя) не позволяет применить метод наложения при определении динамики процесса электромеханического преобразования энергии как алгебраической суммы параметров данного процесса в каждой из рассматриваемых взаимосвязанных паре электрических контуров. Это усложняет расчеты, требует применения исключительно численных методов, затрудняет качественную оценку эффективности процессов энергопреобразования.

В настоящей статье представлены математические построения, позволяющие найти функцию F в уравнении (1) для обобщенного случая конструкции электромеханического преобразователя, содержащего n магнитосвязанных контуров.

Основой математической модели описания процессов электромеханического преобразования в системе, содержащей произвольное количество электрических

контуров, лежат следующие известные выражения [1]:

$$\begin{aligned} A_1 &= a_{11} \frac{di_1}{dt} + a_{12} \frac{di_2}{dt} + \dots + a_{1n} \frac{di_n}{dt}, \\ A_2 &= a_{21} \frac{di_1}{dt} + a_{22} \frac{di_2}{dt} + \dots + a_{2n} \frac{di_n}{dt}, \\ &\dots \\ A_n &= a_{n1} \frac{di_1}{dt} + a_{n2} \frac{di_2}{dt} + \dots + a_{nn} \frac{di_n}{dt}, \end{aligned} \quad (4)$$

где i_n – электрический ток, протекающий в n -м контуре; A_k – коэффициент, определяющий разность напряжения питания k -го электрического контура и падения напряжения на его активном сопротивлении, а также величин противоЭДС движения; a_{kn} – коэффициент уравнения (4), определяющий взаимоиנדуктивность между контурами k и n при $k \neq n$ и собственную индуктивность контура при $k = n$.

Коэффициенты A_i и a_{kn} определяются на основании следующих выражений, соответственно:

$$A_i = u_i - i_i R_i - \sum_{j=1}^{j=m} i_j \frac{dL_{i1}}{dx_{ij}} \frac{dx_{ij}}{dt} i_1; \quad (5)$$

$$a_{ij} = L_{ij} + \sum_{j=1}^n i_j \frac{\partial L_{ij}}{\partial i_j}, \quad (6)$$

где m – количество степеней свободы преобразователя; u_i – напряжение питания i -го контура; R_i – активное сопротивление i -го контура; L_{ij} – взаимоиנדуктивность между контурами i и j при $i \neq j$ и собственная индуктивность i -го контура при $i = j$; x_{ij} – относительная координата между контурами i и j при $i \neq j$ и абсолютная координата рассматриваемого i -го контура при $i = j$.

При записи выражений (5), (6) учтено, что в общем случае $L_{ij} = f(x_{ij}, i_j)$, $j = (1 \dots n)$.

Систему уравнений (4) запишем в матричной форме:

$$|A| = |a| \left| \frac{di}{dt} \right|. \quad (7)$$

Физический смысл выражения (7) заключается в равенстве падений напряжений на активных элементах (матрица $|A|$,

при этом механическую мощность также соотносим с активной составляющей сопротивления электромеханического преобразователя) падению напряжения на реактивных элементах (выражение $|a| \left| \frac{di}{dt} \right|$).

Таким образом, выражение (7) определяет производную тока как отношение падения напряжения на активных элементах (5) к индуктивному полному сопротивлению (6):

$$\left| \frac{di}{dt} \right| = \frac{|A|}{|a|}. \quad (8)$$

Выражение (8) представляет собой закон Ома для цепей, содержащих электро-механические преобразователи энергии.

Представим производную тока (8) в виде суммы «магнитной» и «механической» составляющих [2, 3]:

$$\left| \frac{di}{dt} \right| = \left| \frac{di_{\text{мар}}}{dt} \right| + \left| \frac{di_{\text{мех}}}{dt} \right|. \quad (9)$$

«Магнитную» составляющую приращения тока (9) можно выразить из (4), приравняв нулю скорости изменения механических координат $\frac{dx_{ij}}{dt}$, $i, j \in (1...n)$, при этом получим систему уравнений:

$$\begin{aligned} B_1 &= b_{11} \frac{di_{\text{мар.1}}}{dt} + b_{12} \frac{di_{\text{мар.2}}}{dt} + \dots + b_{1n} \frac{di_{\text{мар.n}}}{dt}, \\ B_2 &= b_{21} \frac{di_{\text{мар.1}}}{dt} + b_{22} \frac{di_{\text{мар.2}}}{dt} + \dots + b_{2n} \frac{di_{\text{мар.n}}}{dt}, \\ &\dots \\ B_k &= b_{k1} \frac{di_{\text{мар.1}}}{dt} + b_{k2} \frac{di_{\text{мар.2}}}{dt} + \dots + b_{kn} \frac{di_{\text{мар.n}}}{dt}, \end{aligned} \quad (10)$$

где

$$B_i = u_i - i_{\text{мар.i}} R_i, \quad (11)$$

$$b_{ij} = i_{\text{мар.i}} \frac{dL_{ij}}{di_{\text{мар.i}}} + L_i, \quad (12)$$

то есть, записывая в матричной форме,

$$|B| = |b| \left| \frac{di_{\text{мар}}}{dt} \right|, \quad (13)$$

откуда

$$\left| \frac{di_{\text{мар}}}{dt} \right| = \frac{|B|}{|b|}. \quad (14)$$

В свою очередь, «механическую» составляющую приращения тока можно определить из системы уравнений

$$\begin{aligned} \frac{di_{\text{мех.1}}}{dt} &= \frac{F_{\text{эл.м.1}} - F_{\text{сопр.1}}}{i_1 L_1 m_1} \int_0^t (F_{\text{эл.м.1}} - F_{\text{сопр.1}}) dt, \\ \frac{di_{\text{мех.2}}}{dt} &= \frac{F_{\text{эл.м.2}} - F_{\text{сопр.2}}}{i_2 L_2 m_2} \int_0^t (F_{\text{эл.м.2}} - F_{\text{сопр.2}}) dt, \end{aligned} \quad (15)$$

...

$$\frac{di_{\text{мех.k}}}{dt} = \frac{F_{\text{эл.м.k}} - F_{\text{сопр.k}}}{i_k L_k m_k} \int_0^t (F_{\text{эл.м.k}} - F_{\text{сопр.k}}) dt.$$

Перепишем (15) в матричной форме:

$$\left| \frac{di_{\text{мех}}}{dt} \right| = |C|, \quad (16)$$

$$\text{где } C_i = \frac{F_{\text{эл.м.i}} - F_{\text{сопр.i}}}{i_i L_i m_j} \int_0^t (F_{\text{эл.м.i}} - F_{\text{сопр.i}}) dt,$$

$L_i = \frac{\psi_i}{i_i}$ – суммарная индуктивность рассматриваемого контура, определяющая отношение между мгновенными значениями потокосцепления данного контура ψ_i и тока i_i , протекающего в нем.

Таким образом, в матричной форме выражение приращения тока в обмотках обобщенного электромеханического преобразователя можно записать:

$$\left| \frac{di}{dt} \right| = \frac{|B|}{|b|} - |C|. \quad (17)$$

Матрицы правой части (17) содержат только мгновенные значения. Поэтому становится возможным провести интегрирование правой части (17) и получить выражения для приращений токов в каждом из рассматриваемых контуров.

Сравнивая выражения (17) и (2), можно увидеть, что в правой части (17) получена искомая матричная функция $|F|$.

Итак, предложена математическая модель процесса электромеханического преобразования энергии в матричной форме,

позволяющая в наиболее общем виде провести анализ динамических зависимостей токов в магнитосвязанных контурах преобразователя.

Предложенная математическая модель процесса электромеханического преобразования энергии показывает возможность преобразования системы дифференциальных уравнений (3) к матричному виду (17) с последующим ее решением матричными методами. Это говорит о возможности аналитического рассмотрения процесса электромеханического преобразования энергии во множестве магнитосвязанных

контуров на основании алгебраической суммы соответствующих параметров процессов энергопреобразования в каждой отдельной паре магнитосвязанных контуров.

Определение матрицы приращений токов в электрических контурах преобразователя (9) в виде суммы «магнитной» и «механической» составляющих позволяет разделить переменные в системе дифференциальных уравнений (3) и получить аналитическое выражение производной токов в виде (17) в наиболее удобной форме, поддающейся численному интегрированию.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Уайт Д.** Электромеханическое преобразование энергии / Д. Уайт, Г. Вудсон. М.: Энергия, 1964. 312 с.

2. **Вырыханов Д.А.** Анализ мощностных и энергетических структур линейного электромагнитного двигателя / Д.А. Вырыханов, Г.Г. Угаров // Проблемы электро-

энергетики: межвуз. науч. сб. / СГТУ. Саратов, 2004. С. 192-198.

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

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

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

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

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

Статья поступила в редакцию 20.10.14, принята к опубликованию 15.11.14

К СРАВНЕНИЮ КОНСТРУКТИВНЫХ СХЕМ ИМПУЛЬСНЫХ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров

COMPARING CONSTRUCTIVE SCHEMES OF PULSED ELECTROMAGNETIC LINEAR MOTORS

V.I. Moshkin, G.G. Ugarov

Получены энергетические и динамические характеристики однообмоточного линейного электромагнитного двигателя с пружинным накопителем. Выполнено сравнение полученных характеристик с аналогичными характеристиками однообмоточного линейного электромагнитного двигателя с возвратной пружиной и проанализированы преимущества и недостатки этих схем.

Ключевые слова: импульсный линейный электромагнитный двигатель, энергия удара, пружинный накопитель, якорь, тяговое усилие

К настоящему времени накоплен значительный опыт проектирования и эксплуатации электромагнитных приводов для ряда импульсных технологий [1-3]. Импульсный линейный электромагнитный двигатель (ЛЭМД), входящий в состав такого привода, выполняется по различным схемам для организации возвратно-поступательного движения якоря. Однообмоточные конструкции таких двигателей выполняются по различным схемам: с возвратной пружиной, с пружинным накопителем, с противовесом и т.п. Наиболее часто используется схема с возвратной пружиной. В ней цикл начинается с рабочего хода, а завершается холостым ходом. Рабочий ход двигателя происходит за счет электромагнитного тягового усилия при одновременном сжатии возвратной пружины, а холостой – за счет накопленной потенциальной энергии возвратной пружины.

The paper considers the energy and dynamic characteristics of linear electromagnetic motors with a single winding spring energy store. The conducted comparison refers the obtained characteristics with the similar characteristics in the constructive scheme of linear electromagnetic motors with a single winding pull-back spring. The authors analyzed the advantages and disadvantages of the schemes.

Keywords: pulsed linear electromagnetic motor, impact energy, the spring drive, the anchor, traction

Реже используется схема с пружинным накопителем, в которой цикл начинается с холостого хода, а завершается рабочим. В такой схеме за период холостого хода двигателя, совершаемого с помощью электромагнитного усилия, сжимается более энергоемкая накопительная пружина, после чего происходит рабочий ход без участия электромагнитных сил за счет потенциальной энергии накопительной пружины. Каждая из этих схем обладает рядом особенностей.

В [4] приводятся экспериментально полученные результаты сравнительного анализа динамики рабочих циклов ударных машин, выполненных по рассмотренным схемам. В качестве исследуемой физической модели в эксперименте использован однообмоточный импульсный ЛЭМД переносной ударной машины для погружения стержневых элементов в грунт. В этой ра-

боте одна и та же пружина использована для совершения как холостого хода в схеме с возвратной пружиной, так и для рабочего хода в схеме с пружинным накопителем. Кроме того, конечные скорости якоря как при рабочем ходе, так и при холостом ходе, были одинаковыми за счет длительности импульса питающего напряжения [4].

Однако при таких условиях сравнения избыточная накопленная кинетическая энергия к концу холостых ходов будет преобразовываться в тепловые потери и шум при работе двигателя, снижая его энергетические показатели и надежность.

Цель статьи – сравнить обе схемы между собой на основе полученных выражений энергетических и динамических характеристик однообмоточного импульсного ЛЭМД, выполненного по двум схемам. В качестве критериев сравнения целесообразно использовать следующие: энергию удара, частоту ходов якоря для режима непрерывных ходов и ударную мощность для такого же режима [5]. Целесообразно сравнить эти схемы при таком режиме работы ударной машины, когда конечные скорости якоря при рабочих ходах будут значительно выше, чем при холостых хо-

дах, в отличие от [4], где эти скорости одинаковы. В пределе при холостых ходах конечные скорости якоря невелики и близки к нулю, что соответствует безударному холостому ходу машины.

Предварительно получим расчетные выражения энергетических и динамических характеристик схемы двигателя с пружинным накопителем (рис. 1 б) в виде трех названных выше критериев. Для этого, как и в работе [5], используем известное выражение (1) кинетической энергии якоря импульсного ЛЭМД, полученное с помощью принципа взаимности для электромеханических систем без учета потерь в магнитопроводе двигателя от перемагничивания и вихревых токов, а также потерь, связанных с преодолением сил трения [5-7]. Такое приближенное выражение позволяет, не решая дифференциальных уравнений движения, найти кинетическую энергию A_k якоря двигателя (энергию удара A_y) по его статическим характеристикам – интегральной работе A_u и работе A_n , связанной с противодействующим усилием:

$$A_k = 0,5(A_u - A_n) = A_y. \quad (1)$$

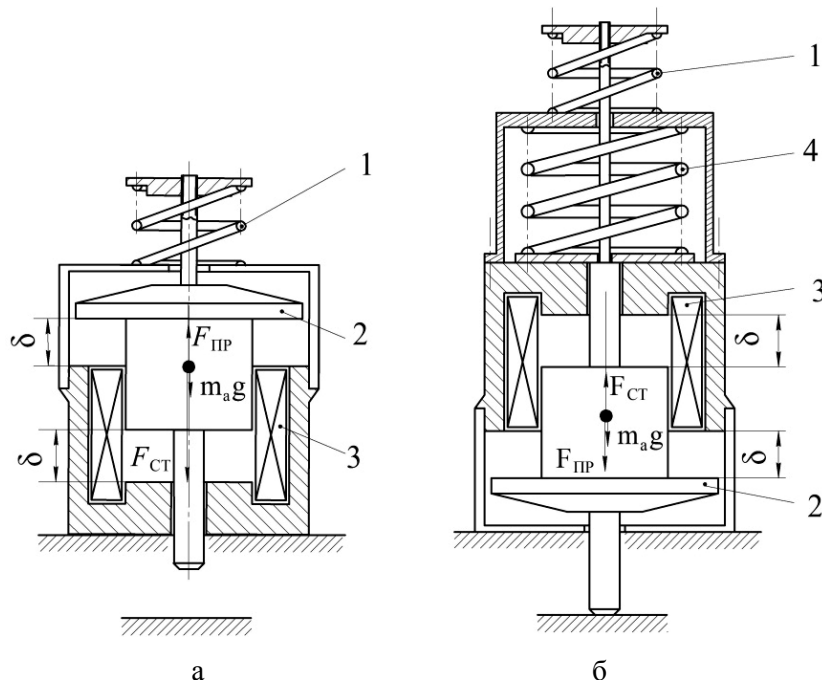


Рис. 1. Конструктивные схемы однообмоточных ЛЭМД с возвратной пружиной (а) и с пружинным накопителем (б): 1 – возвратная пружина; 1' – вспомогательная пружина; 2 – якорь; 3 – обмотка возбуждения; 4 – накопительная пружина

При выводе энергетических и динамических характеристик учтены те же допущения, что и в работе [5]: двигатель расположен вертикально, начальная скорость движения его якоря равна нулю, при холостом ходе машины противодействующее якорю усилие накопительной пружины $F_{\text{пр}}$ пропорционально его перемещению δ , характеристики питающего импульса напряжения и пружины неизменны, имеется соответствие окончания и появления тока в обмотке момента остановки якоря, совершающего рабочий или холостой ход. Кроме того, в обесточенном состоянии обмотки 3 и нижнем (исходном) по схеме на рис. 1 б положении якоря 2 его вес уравновешен вспомогательной пружиной 1'. С её помощью устанавливают исходное положение якоря с усилием начального поджатия F_0 накопительной пружины, у которой жесткость c неизменна на всем перемещении якоря, массой пружин пренебрегаем.

С целью упрощения примем, как и в [5], что значения статического тягового усилия $F_{\text{СТ}}(\delta)$ двигателя не зависят от перемещения δ , тогда

$$A_{\text{и}} = \int_{\delta_{\text{н}}}^{\delta_{\text{к}}} F_{\text{СТ}}(\delta) d\delta = F_{\text{СТ}}(\delta_{\text{н}} - \delta_{\text{к}}) = F_{\text{СТ}}\delta,$$

где $\delta_{\text{н}}$, $\delta_{\text{к}}$ – начальный и конечный рабочие зазоры; $\delta = \delta_{\text{н}} - \delta_{\text{к}}$.

В итоге получим относительное значение энергии удара A_{y*} , выраженное через относительные усилие начального поджатия накопительной пружины 4 (рис. 1 б) $F_{0*} = F_0/(m_a g)$ и жесткость накопительной пружины $c_* = c\delta/(m_a g)$:

$$A_{y*}^{\text{пн}} = A_y / (m_a g \delta) = 0,5c_* + F_{0*} + 1, \quad (2)$$

где m_a – масса подвижных частей якоря; g – ускорение свободного падения.

Если принять, что для этапа холостого хода машины при полностью возбуждаемом и равном δ перемещении якоря его кинетическая энергия $A_{\text{к}}$, определяющая выбег, должна к концу перемещения отсутствовать, то для $A_{\text{к}} = 0$ получим

$$F_{\text{СТ}}\delta = m_a g \delta + A_{\text{пр}},$$

откуда получаем соотношение, связывающее энергию удара, статическую силу тяги, массу подвижных частей, жесткость и усилие начального поджатия пружины при условии $A_{\text{к}} = 0$, то есть при условии безударного холостого хода:

$$F_{\text{СТ}} = m_a g + 0,5c\delta + F_0$$

или в относительной форме:

$$F_{\text{СТ}*} = 1 + 0,5c_* + F_{0*}. \quad (3)$$

Из (3) следует, что каждому значению жесткости и усилия начального поджатия пружины и массы подвижных частей соответствует определенное значение статической силы тяги ЛЭМД, при котором выбег якоря отсутствует. Если это усилие $F_{\text{СТ}*} > 1 + 0,5c_* + F_{0*}$, то при ограниченном перемещении якоря избыток его кинетической энергии при холостом ходе машины будет преобразовываться в другие виды энергии, например в механическую при ударе якоря о детали конструкции ЛЭМД, и переходить в теплоту. Величина энергии удара при этом не изменится, однако КПД двигателя упадет, повысится шум и снизится надежность привода. Если $F_{\text{СТ}*} < 1 + 0,5c_* + F_{0*}$, то величина перемещения якоря станет меньше δ , а полезная энергия (например, энергия удара) понизится. Кроме того, для некоторых приводов необходимо обеспечить заданное перемещение δ , чтобы, например, взвести накопительную пружину. Для работоспособности исследуемой схемы машины для импульсных технологий должно существовать соответствие между параметрами пружинного накопителя и статическим тяговым усилием импульсного ЛЭМД. Следовательно, регулировочные свойства такой схемы ограничены верхним пределом, при котором полезная энергия будет неизменной.

Для исследуемой схемы существуют области допустимых значений параметров в виде ограничений, для которых выполняется (3):

$$F_{0*} \geq 0; c_* \geq 1; F_{\text{СТ}*} > 1. \quad (4)$$

Аналогичное выражение энергии удара для схемы однообмоточного импульсного ЛЭМД с возвратной пружиной получено в [5]:

$$A_{y*}^{ВП} = 0,5 (F_{ст*} + 1 - 0,5 c_*). \quad (5)$$

Таким образом, выражения (2) и (5) используем для сравнения по первому критерию.

Поскольку конструктивная схема однообмоточного ЛЭМД с возвратной пружиной (рис. 1 а) является самой распространенной, при сравнении она нами принята за базу. Следовательно, с учетом (2)-(5) получим выражение для сравнения схем по первому критерию:

$$\frac{A_{y*}^{ПН}}{A_{y*}^{ВП}} = \frac{1}{0,5 + (0,5 - 0,25 c_*) / F_{ст*}}. \quad (6)$$

На рис. 2 представлены зависимости первого критерия $A_{y*}^{ПН} / A_{y*}^{ВП}$ от режимного $F_{ст*}$ и конструктивного c_* параметров исследуемых схем. Для каждой совокупности параметров $F_{ст*}$, F_{0*} и c_* предельное значение критерия $A_{y*}^{ПН} / A_{y*}^{ВП}$ ограничено точками (кружочками на рис. 2), в которых значение параметра $F_{0*} = 0$. Заштрихованная область на рис. 2 соответствует недопустимому сочетанию параметров для схемы с пружинным накопителем, при котором в течение холостого хода накопитель не «зарядится». В диапазоне допустимого изменения этих параметров схема однообмоточного ЛЭМД с пружинным накопителем превосходит по первому критерию схему с возвратной пружиной в 1,5...4 раза.

Кроме того, благодаря падающему по перемещению движущему усилию схема с пружинным накопителем (рис. 1 б) обеспечивает и большую стабильность энергии

удара по сравнению со схемой на рис. 1 а, что показано в [8]. С ростом жесткости c_* накопительной пружины и, соответственно, тягового усилия $F_{ст*}$ превосходство схемы по рис. 1 б возрастает. Для реализованных на практике конструкций импульсных ЛЭМД значения, например, относительного тягового усилия $F_{ст*}$ составляют 50...100 и более.

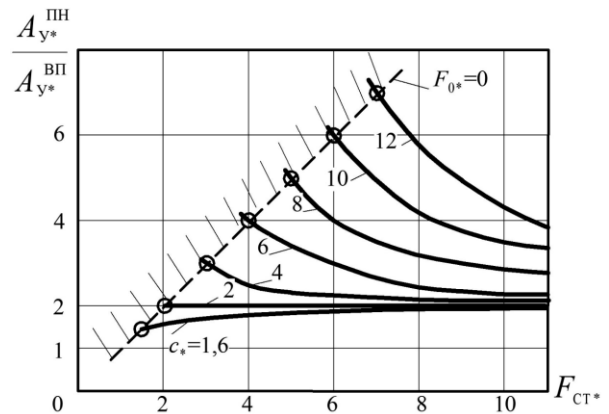


Рис. 2. Сравнение конструктивных схем по критерию $A_{y*}^{ПН} / A_{y*}^{ВП}$

Как известно, цикл машины с пружинным накопителем начинается с холостого хода длительностью $t_{хх}$, а заканчивается рабочим ходом длительностью $t_{рх}$. Их сумма определяет время цикла $t_{ц}$, а по нему легко найти относительное число ходов якоря в минуту n_* при заданных параметрах $F_{ст*}$, F_{0*} и c_* . Для нахождения $t_{хх}$ и $t_{рх}$ потребуется использовать решение дифференциального уравнения, найденное в [5], и применить его к холостому и рабочему ходам якоря. В результате получим для режима непрерывных ходов машины выражение частоты ходов импульсного ЛЭМД с пружинным накопителем:

$$n_*^{ПН} = \frac{60}{t_{ц*}} = \frac{60 \sqrt{2 c_*}}{\frac{3\pi}{2} - \arcsin \left(\frac{1}{1 + c_* / (F_{ст*} - 0,5 c_*)} \right)}. \quad (7)$$

Аналогичное выражение частоты ходов импульсного ЛЭМД с возвратной

пружиной для режима непрерывных ходов получено в [5]:

$$n_*^{\text{ВП}} = \frac{60}{\frac{\pi}{2\sqrt{2(c_*-1)}} + \sqrt{\frac{1}{2c_*}} \left[\frac{\pi}{2} - \arcsin \left(1 - \frac{2c_*}{F_{\text{СТ}*} + 1 + 0,5c_*} \right) \right]}. \quad (8)$$

С учетом выражений (7), (8) и принятых выше ограничений получим выраже-

ние для сравнения схем по второму критерию:

$$\frac{n_*^{\text{ПН}}}{n_*^{\text{ВП}}} = \frac{\sqrt{2c_*} \left[\frac{\pi}{2\sqrt{2(c_*-1)}} + \sqrt{\frac{1}{2c_*}} \left[\frac{\pi}{2} - \arcsin \left(1 - \frac{2c_*}{F_{\text{СТ}*} + 1 + 0,5c_*} \right) \right] \right]}{\frac{3\pi}{2} - \arcsin \left(\frac{1}{1 + c_* / (F_{\text{СТ}*} - 0,5c_*)} \right)}. \quad (9)$$

На рис. 3 представлены зависимости второго критерия $n_*^{\text{ПН}}/n_*^{\text{ВП}}$ от режимного $F_{\text{СТ}*}$ и конструктивного c_* параметров исследуемых схем, полученные по выражению (9). Для каждой совокупности параметров $F_{\text{СТ}*}$, F_{0*} и c_* предельное значение

этого критерия ограничено точками (кружочками на рис. 3), в которых значение параметра $F_{0*} = 0$. Заштрихованная область на рис. 3 соответствует недопустимому сочетанию параметров для схемы с пружинным накопителем.

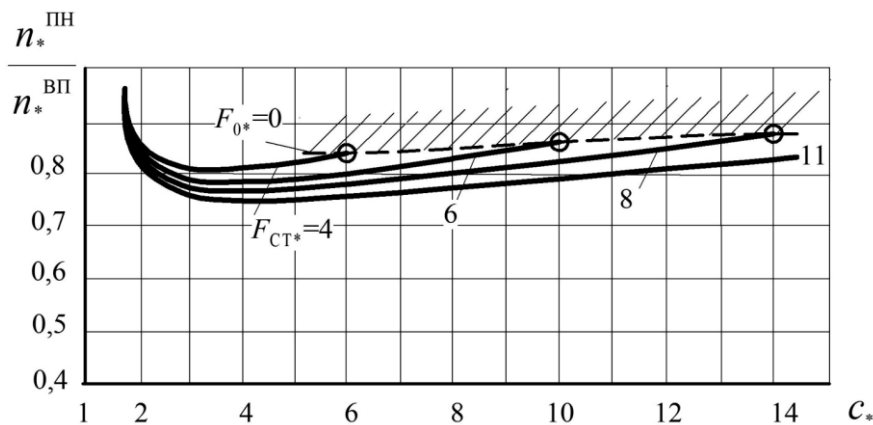


Рис. 3. Сравнение конструктивных схем по критерию $n_*^{\text{ПН}}/n_*^{\text{ВП}}$

Из рис. 3 следует, что схема ЛЭМД с пружинным накопителем по критерию $n_*^{\text{ПН}}/n_*^{\text{ВП}}$ уступает схеме ЛЭМД с возвратной пружиной всего на 15...25 %. Это происходит из-за вынужденного увеличения времени движения якоря на интервале холостого хода для исключения удара в конечной точке. Также из графика видно,

что с ростом жесткости накопительной пружины c_* превосходство схемы ЛЭМД с возвратной пружиной падает.

Для режима непрерывных ходов на основе формул (2) и (7) и с учетом ограничений (3) и (4) получим выражение ударной мощности импульсного ЛЭМД по схеме с пружинным накопителем:

$$P_{y*}^{\text{ПН}} = A_{y*}^{\text{ПН}} n_*^{\text{ПН}} = \frac{60 F_{\text{СТ}*} \sqrt{2c_*}}{\frac{3\pi}{2} - \arcsin \left(\frac{1}{1 + c_* / (F_{\text{СТ}*} - 0,5c_*)} \right)}. \quad (10)$$

Аналогичное выражение ударной мощности для конструктивной схемы им-

пульсного ЛЭМД с возвратной пружиной получено в [5]:

$$P_{y*}^{\text{ВП}} = \frac{30(F_{\text{СТ}*} + 1 - 0,5c_*)}{\frac{\pi}{2\sqrt{2(c_* - 1)}} + \sqrt{\frac{1}{2c_*}} \left[\frac{\pi}{2} - \arcsin \left(1 - \frac{2c_*}{F_{\text{СТ}*} + 1 + 0,5c_*} \right) \right]}. \quad (11)$$

Выражения (10) и (11) позволяют получить формулу для сравнения исследуемых схем по третьему критерию $P_{y*}^{\text{ПН}} / P_{y*}^{\text{ВП}}$:

$$\frac{P_{y*}^{\text{ПН}}}{P_{y*}^{\text{ВП}}} = \frac{2F_{\text{СТ}*} \sqrt{2c_*} \left[\frac{\pi}{2\sqrt{2(c_* - 1)}} + \sqrt{\frac{1}{2c_*}} \left[\frac{\pi}{2} - \arcsin \left(1 - \frac{2c_*}{F_{\text{СТ}*} + 1 + 0,5c_*} \right) \right] \right]}{\left[\frac{3\pi}{2} - \arcsin \left(\frac{1}{1 + c_* / (F_{\text{СТ}*} - 0,5c_*)} \right) \right] (F_{\text{СТ}*} + 1 - 0,5c_*)}. \quad (12)$$

На рис. 4 представлены зависимости третьего критерия $P_{y*}^{\text{ПН}} / P_{y*}^{\text{ВП}}$ от режимного $F_{\text{СТ}*}$ и конструктивного c_* параметров исследуемых схем, полученные по выражению (12). Для каждой совокупности параметров $F_{\text{СТ}*}$, F_{0*} и c_* предельное значение этого критерия ограничено точками (кру-

жочками на рис. 4), в которых значение параметра $F_{0*} = 0$. Заштрихованная область на рис. 4 соответствует недопустимому сочетанию параметров для схемы с пружинным накопителем и поэтому не используется для сравнения.

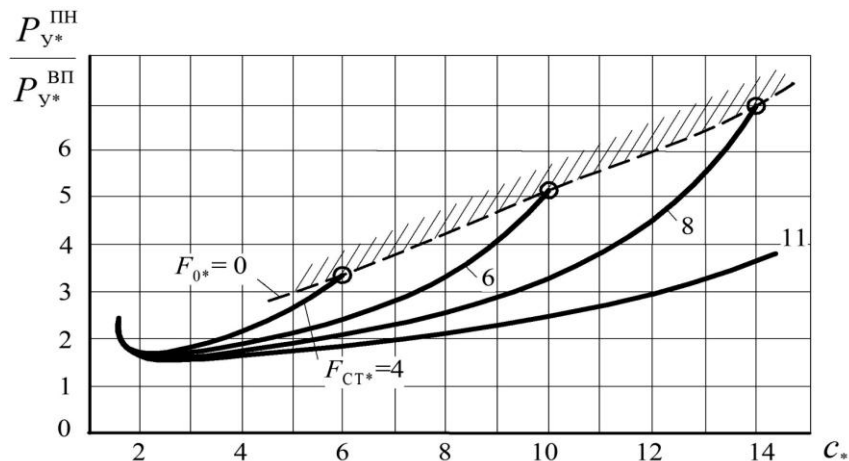


Рис. 4. Сравнение конструктивных схем по критерию $P_{y*}^{\text{ПН}} / P_{y*}^{\text{ВП}}$

Из рис. 4 следует, что во всем диапазоне изменения жесткости c_* пружинного накопителя эта схема по третьему критерию превосходит в 1,5...4 раза схему импульсного ЛЭМД с возвратной пружиной и с ростом жесткости это превосходство увеличивается.

Машины, выполненные по схеме однообмоточного импульсного ЛЭМД с возвратной пружиной, значительно проигрывают машинам, выполненным по схеме однообмоточного импульсного ЛЭМД с

пружинным накопителем, по величине энергии удара и ударной мощности при одних и тех же параметрах $F_{\text{СТ}*}$, F_{0*} и c_* , однако на 15...25 % превосходят по частоте ходов. При наличии фиксатора схема с пружинным накопителем позволяет сохранить механическую энергию после «зарядки» механического аккумулятора и использовать ее, например, на объектах без электроснабжения [4].

Итак, по сравнению со схемой однообмоточного ЛЭМД с возвратной пружи-

ной схема однообмоточного ЛЭМД с пружинным накопителем по энергетическим характеристикам (энергия удара в режиме одиночных ходов и ударная мощность в режиме непрерывных ходов) является более предпочтительной и перспективной, обеспечивая большую стабильность этих характеристик. Однако она незначительно уступает схеме с возвратной пружиной по динамическим характеристикам при условии безударного

холостого хода, в то же время обладает высоким быстродействием при выполнении рабочего хода, совершаемого под действием пружины.

К недостаткам конструктивной схемы однообмоточного ЛЭМД с пружинным накопителем следует отнести ограниченную возможность регулирования энергии удара с помощью устройства питания и управления из-за необходимости замены и регулирования накопительной пружины.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ряшенцев Н.П.** Электромагнитные прессы / Н.П. Ряшенцев, Г.Г. Угаров, А.В. Львицын. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1989. 160 с.

2. **Усанов К.М.** Линейный импульсный электромагнитный привод машин с автономным питанием: / К.М. Усанов, В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров. Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2006. 284 с.

3. **Певчев В.П.** Проектирование мощных короткоходовых импульсных электромагнитных двигателей / В.П. Певчев, В.В. Ивашин. Тольятти: Изд-во ТГУ, 2012. 142 с.

4. **Усанов К.М.** Динамическая эффективность однообмоточных электромагнитных ударных машин с различными рабочими циклами / К.М. Усанов, В.А. Каргин, И.В. Трубенкова // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2010. № 12(74). С. 67-70.

5. **Мошкин В.И.** Энергетическая и динамическая эффективность однообмоточных линейных электромагнитных двигателей с возвратной пружиной / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Вестник СГТУ. 2012. № 2 (66). Вып. 2. С. 129-135.

6. **Гордон А.В.** Электромагниты постоянного тока / А.В. Гордон, А.Г. Сливинская. М.: Госэнергоиздат, 1960. 446 с.

7. **Мошкин В.И.** Использование принципа взаимности при исследовании и расчёте энергетических характеристик линейных электромагнитных двигателей / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Задачи динамики электрических машин. 1988. С. 120-128.

8. **Ряшенцев Н.П.** Электромагнитный привод линейных машин / Н.П. Ряшенцев, В.Н. Ряшенцев. Новосибирск: Наука, 1985. 153 с.

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

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

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

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

Статья поступила в редакцию 20.10.14, принята к опубликованию 15.11.14

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

УДК 62-53

АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ УРОВНЯ ОСВЕЩЕННОСТИ ИСКУССТВЕННЫМ СВЕТОМ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ЕСТЕСТВЕННОГО

Д.А. Давыдов, А.Н. Пименов

AUTOMATIC CONTROL OF ARTIFICIAL LIGHT UNDER CHANGES OF THE NATURAL LIGHT

D.A. Davydov, A.N. Pimenov

Рассматривается устройство автоматического фазового регулятора, предназначенное для поддержания заданной освещенности в помещении с целью обеспечения нормальных условий для трудовой деятельности и экономии электрической энергии.

Ключевые слова: диммер, автоматический регулятор, фазовое регулирование

Расход электроэнергии на освещение промышленных предприятий непрерывно растет и составляет в среднем по отраслям промышленности 5-10% их общего потребления. По отдельным отраслям расход электроэнергии на осветительные установки существенно колеблется: в металлургических предприятиях – около 5%, в машиностроении – 10%, в легкой промышленности – в среднем 15%. На некоторых предприятиях легкой промышленности доля расхода электроэнергии на осветительные установки превышает 30% [1]. На основании этого в данной статье предлагаются методы автоматического регулирования освещенности источниками искусственного света (электроосветительными приборами) с целью создания равномерного светового потока на заданной площади при изменении естественного освещения.

The paper considers the automatic phase control device designed to maintain the desired lighting level in the room in order to ensure normal conditions for work, and consume electricity.

Keywords: dimmer, automatic control, phase control

Несмотря на широкое распространение люминесцентных ламп, существуют помещения, в которых целесообразно применять лампы накаливания [2]. Необходимая освещенность может быть достигнута за счет регулирования светового потока источника освещения. Для этих целей все чаще используются регуляторы электрической мощности нагрузки. Простейшая тиристорная схема диммера изображена на рис. 1.

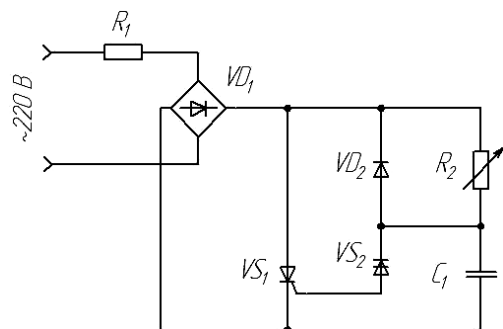


Рис. 1. Принципиальная схема диммера

Принцип работы диммера основан на фазовом регулировании. При изменении величины сопротивления R_2 меняется скважность. Из этого следует, что при увеличении сопротивления R_2 действующие значения напряжения и тока уменьшаются [3].

При фазовом регулировании изменяют фазу импульсов управления относительно момента естественного отпирания вентилей, при этом также регулируется длительность подключения нагрузки к питающей сети (рис. 2), но эта длительность не превышает половины периода частоты сети. Этот способ позволяет получить более плавную и быстродействующую регулировку мощности. Он используется для регулирования освещения, управления асинхронными двигателями, регулирования напряжения на первичной стороне трансформатора в высоковольтных выпрямителях, выполненных на диодах, а также применяется в сварочных аппаратах [4].

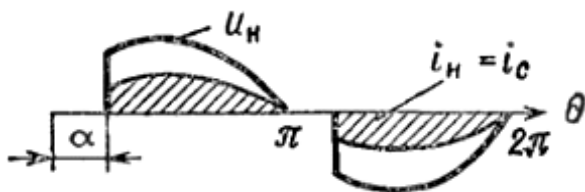


Рис. 2. Временная диаграмма при фазовом регулировании

Мощность в активной нагрузке можно рассчитать через действующее значение напряжения на нагрузке U_i [4]:

$$P_n = \frac{U_n^2}{R_n},$$

где

$$U_n = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (\sqrt{2} E_c \sin \theta)^2 d\theta} = E_c \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}.$$

При увеличении угла управления интервал передачи мощности от сети к нагрузке $\alpha - \pi$ уменьшается, мощность в нагрузке падает. Регулировочная характеристика преобразователя переменного напряжения $U_i = f(\alpha)$ приведена для активной нагрузки на рис. 3 [4].

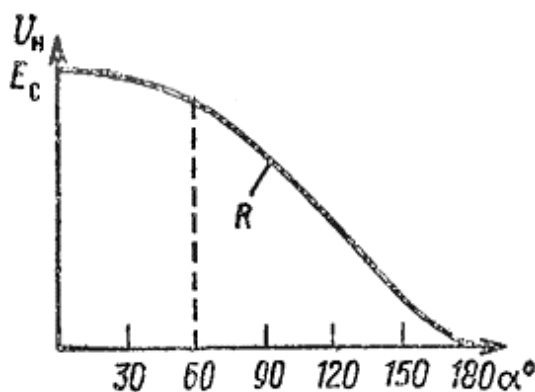


Рис. 3. Регулировочная характеристика преобразователя переменного напряжения

При увеличении угла управления α интервал, на котором энергия передается в нагрузку, будет уменьшаться, и действующее значение напряжения на нагрузке будет снижаться [4]. На основании этого предлагается схема устройства автоматического регулирования уровня освещенности, которое позволит выровнять освещенность в разных участках помещения, где, помимо искусственного, имеет место естественное освещение. Структурная схема автоматического регулятора приведена на рис. 4.

На рис. 1 в качестве источника импульсов, подаваемых на управляющий электрод тиристора, используется релаксационный RC – генератор, в структурной схеме, показанной на рис. 4, эту роль выполняет микроконтроллер. Для оценки уровня освещенности на заданной площади путем размещения устройства на заданном участке помещения в качестве датчика используется фотодиод. В зависимости от топологии схемы и программного кода возможно использование иных фотоэлементов (фототранзистор, фоторезистор). В качестве силового (управляемого) блока используются бесконтактные коммутационные устройства, такие как биполярные транзисторы, тиристоры и симисторы.

Принцип работы устройства заключается в следующем. Допустим, на некотором участке помещения освещенность в момент времени t_1 равна E_1 . При этом значение фотоЭДС на контактах оптоэлектронного полупроводникового прибора (фотодиода) и на соответствующих

входах микроконтроллера равно V_1 , напряжение, приложенное к электроосветительному прибору, при угле управления α_1 равно U_1 , а мощность в момент времени t_1 равна P_1 . В момент времени t_2 освещенность в помещении увеличилась за счет изменения естественного освещения и стала равна E_2 , при этом $E_2 > E_1$. Значение фотоЭДС на контактах фотодиода увеличилось до значения V_2 , где $V_2 > V_1$. Угол управления уменьшился и стал равен α_2 , где $\alpha_2 < \alpha_1$. Напряжение и, соответственно, мощность, потребляемая на-

грузкой (электроосветительным прибором) в момент времени t_2 , уменьшились и стали равны U_2 и P_2 , где $U_2 < U_1$ и $P_2 < P_1$. В момент времени t_3 освещенность стала равна E_3 , при этом $E_3 < E_1 < E_2$, а значение фотоЭДС равно V_3 , где $V_3 < V_1 < V_2$. Угол управления увеличился и стал равен α_3 , при этом $\alpha_3 > \alpha_1 > \alpha_2$, а напряжение и мощность, потребляемая нагрузкой, стали равны U_3 и P_3 , где $U_3 > U_1 > U_2$ и $P_3 > P_1 > P_2$.

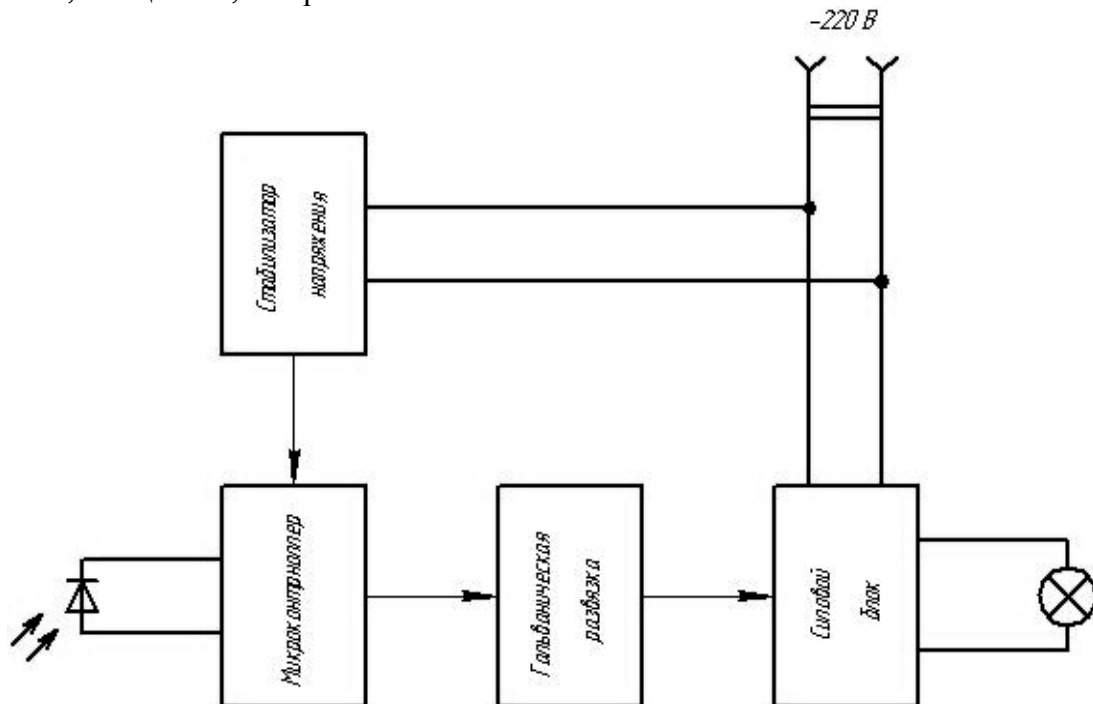


Рис. 4. Структурная схема автоматического регулирования уровня освещенности помещения

Как правило, лампы накаливания не терпят кратковременных, часто повторяющихся режимов работы, что приводит к сокращению срока их работы на 30-40%. Предложенный автоматический регулятор в момент включения нагрузки в сеть постепенно, в течение некоторого времени увеличивает напряжение, приложенное к лампе, тем самым увеличивая срок ее службы.

Устройство с момента включения постепенно уменьшает угол управления до значения, соответствующего освещенности в момент времени включения, в результате чего происходит постепенный ра-

зогрев спирали лампы. При этом напряжение на лампе в течение нескольких секунд плавно увеличится от U_0 до U_1 , где $U_1 > U_0$. Это сглаживает бросок тока в момент включения лампы и тем увеличивает ее срок службы при частом включении.

Альтернативой лампам накаливания являются люминесцентные лампы. Из-за принципиальных физических различий в работе ламп накаливания и люминесцентных ламп управление последними с помощью автоматического фазового регулятора невозможно. На основании этого предлагается иная структурная схема автоматического управления, приведенная на рис. 5.

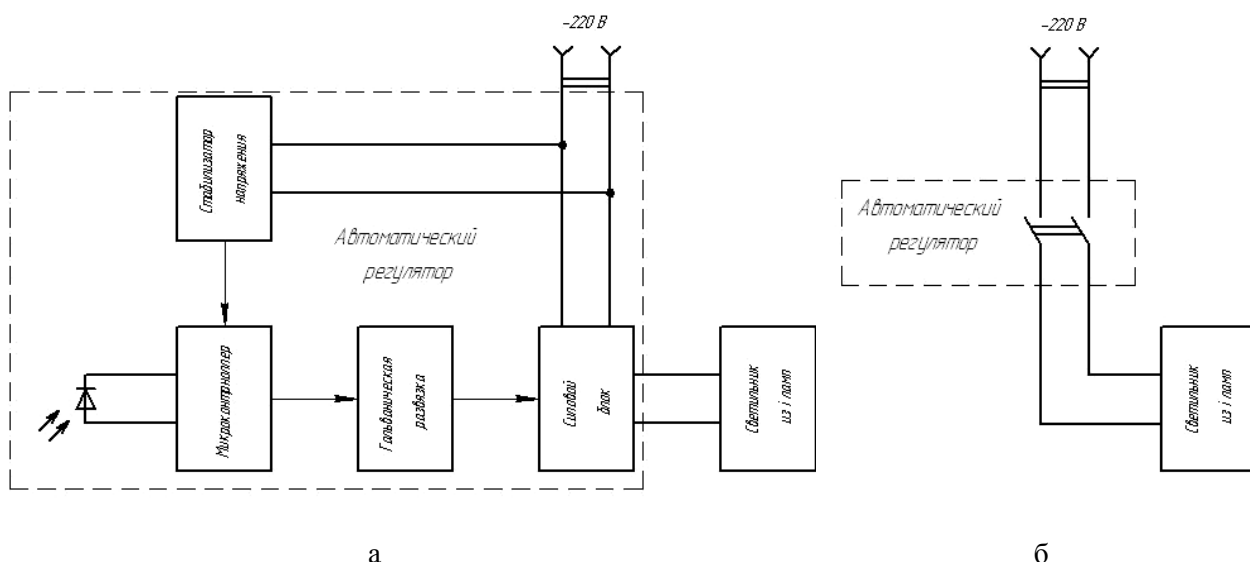


Рис. 5. Структурная схема автоматического управления люминесцентными лампами: а – общий вид; б – схема замещения

Принцип работы основан на избирательном включении ламп (светильников) в зависимости от значения освещенности на выбранном участке. В качестве датчика освещенности используется фотоземент (в данном случае фотодиод). Работа микроконтроллера сводится к сравнению сигнала при освещенности E_0 на выбранном участке с заранее выставленными параметрами программного кода микроконтроллера (для описания процесса сравнение будем проводить с величиной $V_{кр}$ соответствующей $E_{кр}$).

Допустим, в момент времени t_1 освещенность на заданном участке равна E_1 , значение фотЭДС на контактах фотодиода, а соответственно и на входе микроконтроллера равно V_1 . Так как, следовательно, $V_1 < V_{кр}$, при этом микроконтроллер переходит на верхний логический уровень, на

управляющий электрод силового прибора подается сигнал, и через него течет ток (лампа горит).

При условии $E_1 > E_{кр}$ и, соответственно, $V_1 > V_{кр}$, микроконтроллер переходит на нижний логический уровень, ток не течет (лампа не горит). Чтобы исключить частые переходы из включенного состояния в выключенное из-за резкого изменения величины освещенности, используется таймер, который позволит сравнивать уровень освещенности через определенные интервалы времени. Как правило, таймер входит в состав микроконтроллера.

Предложенные выше методы позволяют избежать перепадов уровня освещенности в разных участках помещения, чем обеспечивают нормальные условия для трудовой деятельности и экономию электрической энергии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Способы экономии электроэнергии в осветительных установках [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://electricalschool.info/main/lighting/196-sposoby-jekonomii-jelektroenergii-v.html>. Заглавие с экрана. (Дата обращения 09.10.2014).

2. ГОСТ ИСО 8995-2002. Принципы зрительной эргономики. Освещение рабочих систем внутри помещений. М.:

ИПК Издательство стандартов, 2003. 31 с.

3. Диммер [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://h4e.ru/komplektuyuushchie/104-dimmer>. Заглавие с экрана. (Дата обращения 09.10.2014).

4. **Королев Г.В.** Электронные устройства автоматики: / Г.В. Королев. М.: Высш. шк., 1991. 256 с.

Давыдов Дмитрий Алексеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Dmitriy A. Davydov – Ph.D., Associate Professor, Department of Automated Electrotechnical Devices and System, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Пименов Арсений Николаевич – студент кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Arseniy N. Pimenov – Undergraduate, Department of Automated Electrotechnical Devices and System, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 15.10.14, принята к опубликованию 15.11.14

К СВЕДЕНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

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

ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.382:621.314.6

РАСЧЁТ ЭЛЕМЕНТОВ ТРАНЗИСТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ СИМВОЛЬНЫХ И ЧИСЛЕННЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ПРОГРАММ

П.А. Кошелев, В.М. Опре, С.В. Парамонов

CALCULATION OF THE TRANSISTOR CONVERTER ELEMENTS AND SIMULATION OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES USING ADVANCED CHARACTER AND NUMERIC MATHEMATICAL PROGRAMS

P.A. Koshelev, V.M. Opre, S.V. Paramonov

Изложена методика проектирования электротехнических устройств, связывающая параметры конструкции, тепловые и электрические характеристики. Используются современные математические методы и программное обеспечение. Рассмотрен пример реализации методики, проиллюстрированный последовательностью и результатами расчёта элементов транзисторного преобразователя.

Ключевые слова: транзисторный преобразователь, трансформатор, электрический расчёт, тепловой расчёт

The paper presents a method for designing electrotechnical devices which combines the construction parameters, thermal and electrical characteristics. Advanced mathematical methods and software were utilized. The authors considered a case relating implementation of the method, and illustrated the sequence and results of calculating components of the transistor converter.

Keywords: transistor converter, transformer, electrical calculation, thermal calculation

Транзисторные преобразователи (ТП) используются в качестве базовых узлов вторичных источников питания (ВИП) для широкого класса электрооборудования.

Достоинствами импульсных (ИВИП) в отличие от ВИП, питающихся от сети переменного тока, являются небольшие масса и габариты при относительно низкой стоимости, что существенно для подвижных объектов.

В современной технике применяются 4 класса ИВИП:

- автономные инверторы;
- двухтактные ТП (Full-Bridge);
- однотактные прямоходовые ТП с индуктивным накопителем (Forward);
- однотактные обратноходовые ТП с индуктивным накопителем (Flyback).

Проблемы, связанные с проектированием ТП различных классов, а также методики расчётов их элементов освещены в литературе [1, 2].

В то же время назрела необходимость в модификации упомянутых методик, что

позволяют современное математическое обеспечение, программные средства, новые разработки в области проектирования электротехнических систем.

Широкие возможности предоставляет пользователю сочетание символьных и численных математических программ, например, MAPLE, MATLAB и др. [3].

Цель данной работы заключается в заполнении некоторых пробелов в традиционных методиках. К таким пробелам можно отнести:

- отсутствие общих аналитических выражений, которые после подстановки и вариации численных значений параметров позволили бы оценить диапазон влияния входных переменных на результат;
- не представлен способ определения активных потерь в трансформаторе (Т) с учётом спектра намагничивающего тока;
- нет внятной методики расчёта индуктивностей рассеяния магнитного потока многообмоточного Т в зависимости от параметров конструкции;
- не встречаются рекомендации, касающиеся методик оптимизации проектного решения, связывающего электрические, конструкционные и тепловые характеристики изделия.

В качестве примера в работе представлен одноконтурный обратнотокосовый ТП, хотя результаты могут быть распространены и на другие типы ТП.

Недостатки обратнотокосового ТП: низкая энергетическая эффективность по сравнению с ИВИП других классов, присутствие постоянной составляющей намагничивающего потока, сложность анализа электромагнитных процессов с учё-

том рекуперации и взаимосвязи с параметрами конструкции Т в значительной степени компенсируются преимуществами: простота, низкая стоимость, устойчивость к коротким замыканиям нагрузки, высокая надёжность.

Предлагаемая методика предполагает несколько этапов.

Нестандартным элементом ИВИП, требующим персонального проектирования, является Т. Остальные элементы могут быть выбраны на основании моделирования электромагнитных процессов.

1. Предварительный расчёт Т по основной гармонике на основании фундаментальных законов электротехники. Задача состоит в нахождении аналитических выражений параметров Т при условиях передачи в нагрузку активной мощности P , Вт, на частоте f , Гц, ограничении значения магнитной индукции на уровне B_m , Тл, максимальной плотности тока в обмотках $deltad$, А/м².

На основании предварительного расчёта легко проследить взаимное влияние параметров, которые будут использованы в уточнённом расчёте, а выведенные соотношения включить в алгоритмы параметрической оптимизации.

Вывод соотношений осуществлён в пакете MAPLE.

Геометрический параметр $ScSo$, м⁴ (1) – произведение площадей сечений стержня магнитопровода и окна для размещения обмоток. В (1) k_c , k_o – соответствующие коэффициенты заполнения, $etat$ – предполагаемый КПД, ϕ – коэффициент распределения токов:

$$ScSo = P / (\phi \cdot f \cdot k_c \cdot k_o \cdot deltad \cdot B_m \cdot etat). \quad (1)$$

На рис. 1 показаны основные элементы конструкции Т стержневого типа.

В случае квадратного сечения магнитопровода выражения для площади его сечения Sc (2) и размера стороны $A=B$ (3):

$$Sc = \sqrt{ScSo}, \quad (2)$$

$$A = B = (ScSo)^{1/4}. \quad (3)$$

Длина средней линии полезного магнитного потока lm , м (4) и эквивалентная магнитная проницаемость изделия μ_{ue} , Гн/м (5):

$$lm = 2(LCA + LC0) + DH0; \quad (4)$$

$$\mu_{ue} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_{ur}}{1 + \frac{\mu_{ur} \cdot DH0}{lm}}. \quad (5)$$

Здесь $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная, $\mu_{r\text{г}}$ – относительная магнит-

ная проницаемость материала. Остальные обозначения по рис. 1.

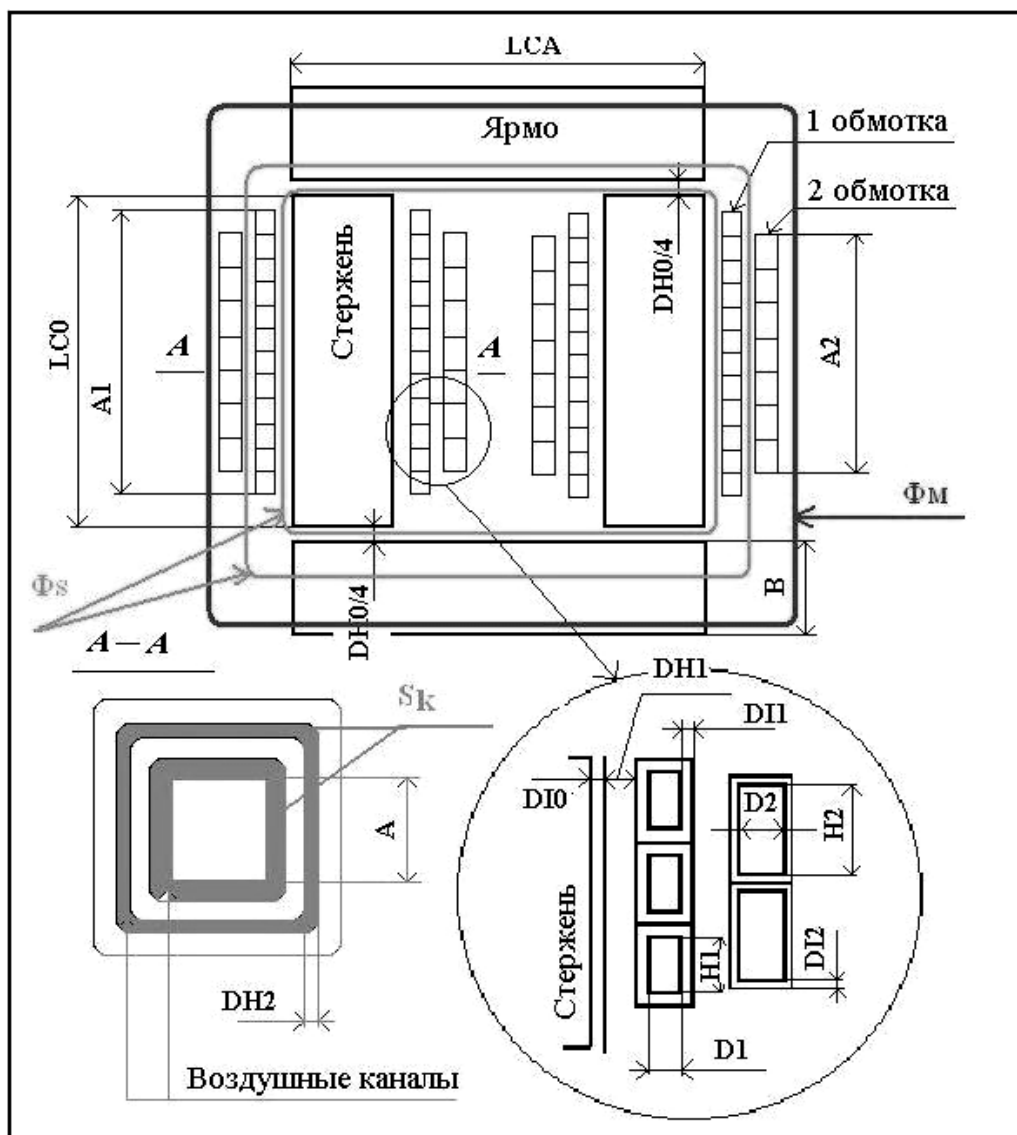


Рис. 1. Основные элементы конструкции трансформатора

Число витков 1 обмотки w_1 (6) и индуктивность намагничивания L_m , Гн (7):

$$w_1 = E / (2\pi \cdot f \cdot B_m \sqrt{S_c S_o}); \quad (6)$$

$$L_m = \frac{\mu_0 \cdot \mu_{r\text{г}} \cdot E^2 \cdot \varphi \cdot k_c \cdot k_o \cdot \text{deltad} \cdot \text{etat} \cdot \sqrt{S_c S_o}}{4 \left(1 + \frac{\mu_{r\text{г}} \cdot DH_0}{12 S_c S_o^4 + DH_0} \right) \pi^2 \cdot f \cdot B_m \cdot P \left(12 S_c S_o^4 + DH_0 \right)} \quad (7)$$

На рис. 2 представлена зависимость некоторых параметров трансформатора от размера немагнитного зазора в результате

предварительного расчёта по исходным данным (приведены ниже, фрагмент программы MAPLE).


```

> Ud:=20:           # Напряжение нагрузки (номинальное), В
> Id:=10:           # Ток нагрузки (номинальный), А
> R:=Ud^2/P:        # Сопротивление нагрузки, Ом
> P:=Ud*Id:         # Активная мощность нагрузки, Вт
> P1:=P/eta:        # Потребляемая мощность, Вт
> I1:=P1/EE:        # Потребляемый ток сети, А
> E:=300:          # Напряжение сети постоянное, В
>                  # Число витков 1 обмотки w1
>                  # Ток холостого хода I0, А
> w2:=w1*sqrt(P*R)/EE: # Число витков 2 обмотки w2
> I11:=sqrt((w2/w1*Id)^2+I0^2): > # Ток 1 обмотки, А
> # Размеры шин обмоток
> RAT:=h/d          # Отношение ширины шины к толщине (рис. 1)
> h1:=sqrt(RAT*I11/deltad):
> h2:=sqrt(RAT*Id/deltad):
> # Магнитопровод 2500HMC1
> mu0:=4*Pi*10^(-7): # Магнитная постоянная, Гн/м
> mur:=2500:         # Относительная магнитная проницаемость
> f:=100000:         # Частота преобразования, Гц
> k0:=0.5:          # Коэффициент заполнения окна м.провода обмотками
> kc:=0.99:         # Коэффициент заполнения магнитным материалом
> deltax:=2e6:       # Допустимая плотность тока, А/м^2
> Bm:=0.2:          # Максимальная индукция, Тл
> etat:=0.98:       # Предполагаемый КПД трансформатора
> eta:=0.95:        # Предполагаемый КПД преобразователя
> RAT:=1:           # Отношение ширины шины к толщине
> DH0:=1e-3:        # Размер немагнитного зазора, м
> phi:=0.5:         # Коэффициент распределения токов 1 и 2 обмоток
    
```

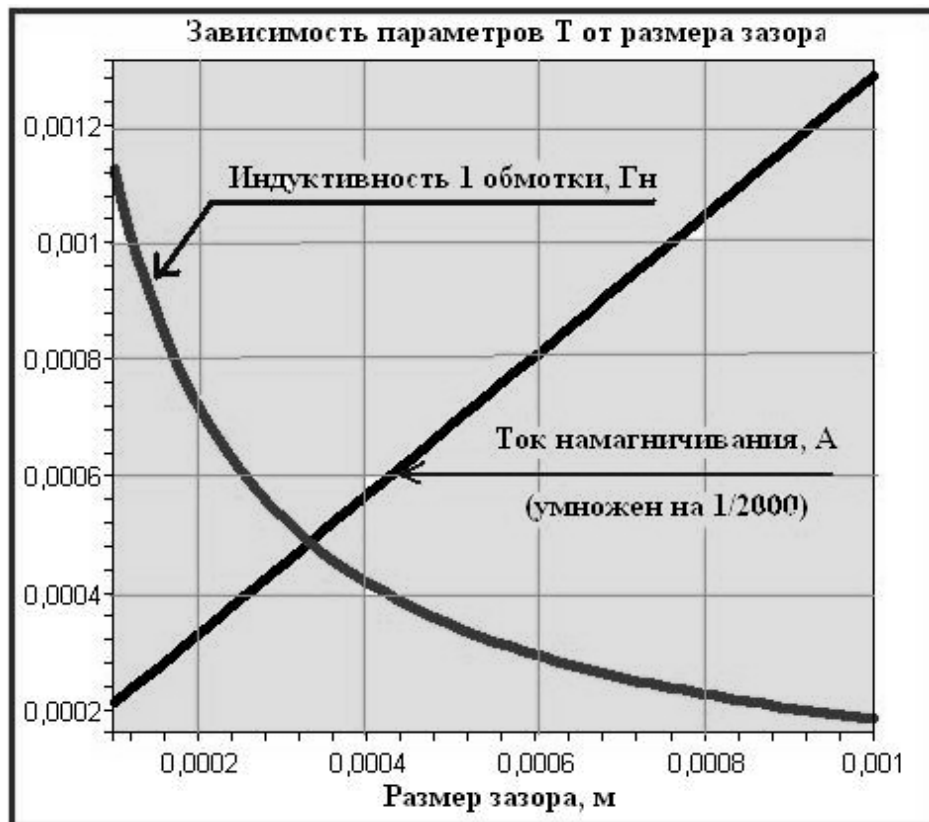


Рис. 2. Зависимость параметров трансформатора от размера зазора DH0

2. Уточнённый расчёт.

Результаты предварительного расчёта передаются в программы системы MATLAB, в которых предусмотрены следующие функции.

2.1. Расчёт основных электрических параметров и элементов конструкции Т по рис. 1 (размеры проводов, изоляции, воздушные зазоры), имитация процесса намотки обмоток Т с переходом на следующий слой.

2.2. Визуализация эскиза рассчитанного Т (рис. 3).

2.3. Расчёт параметров, описывающих циркуляцию реактивной энергии по

предлагаемой методике (индуктивность рассеяния, коэффициент связи между обмотками Т).

2.4. Численное моделирование электромагнитных процессов в ИВИП на основе созданной математической модели (ММ).

2.5. Расчёт активных потерь, учитывающий потери на перемагничивание и вихревые токи [4], поверхностный эффект в обмотках на всех гармониках токов Т, влияющих на потери.

2.6. Оценка теплового режима Т, формулирование требований к системе охлаждения.

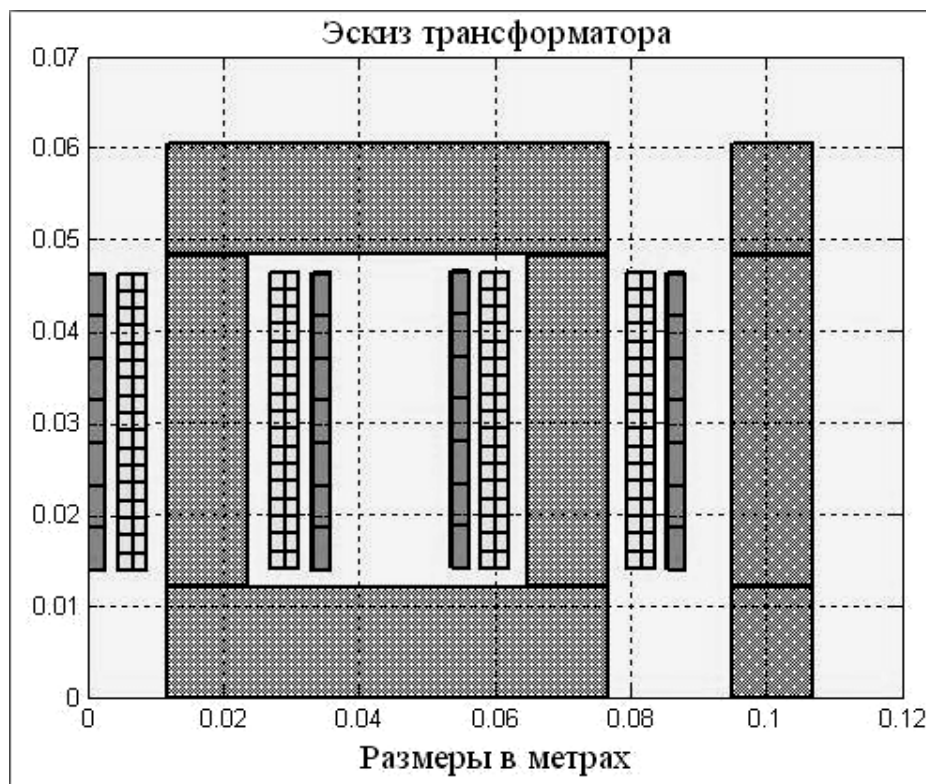


Рис. 3. Эскиз рассчитанного трансформатора

Вывод соотношений и результат по п. 2.3.

Вычисление коэффициента связи между обмотками k_s и взаимной индуктивности M по конструкции трансформатора – трудоёмкая задача и, что более существенно, сопровождается погрешностью.

Причина погрешности в том, что никакая схема замещения с сосредоточенными элементами не может быть полностью адекватной реальному трансформатору, пара-

метры которого являются распределёнными.

Индуктивности обмоток L_1 , L_2 и рассеяния L_s (рис. 4 а) могут быть измерены на готовом устройстве по результатам опытов ХХ и КЗ, используя измерительные приборы, или рассчитаны на этапе проектирования по эскизу Т. Для перехода к параметрам естественной схемы замещения (рис. 4 б) требуются значения коэффициента связи обмоток k_s и их взаимной индуктивности M .

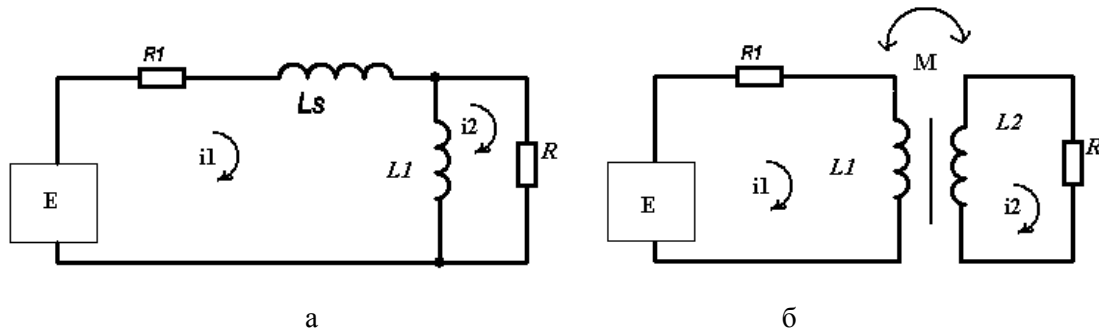


Рис. 4. Схемы замещения трансформатора

Часто встречающееся в литературе допущение $ks=1$ не является корректным и вносит заметную погрешность в расчёты, особенно для Т средней и большой мощности, имеющих значительные размеры изоляции и воздушных каналов для принудительного охлаждения.

Предлагается проверенная на практике методика вычисления ks и M .

Принцип заключается в фиксации значения ks в момент совпадения переходных характеристик схем по рис. 4 а и 4 б в точке временной оси, соответствующей периоду частоты сети питания.

Отметим, что в реальном ТП некоторые факторы могут не быть постоянными.

Это характерно для преобразователей с частотно-импульсной и широтно-импульсной модуляцией, где изменяются основная частота, спектр сигналов, сопротивление нагрузки.

В таком случае параметры схем замещения следует находить в реальном диапазоне изменения этих величин.

Реактивная энергия поля рассеяния W_m , ВАР:

$$W_m = \mu_0 \cdot H^2 V / 2, \quad (8)$$

$$W_{4a} = L_1 \cdot E / (p^2 L_s \cdot L_1 + p(R_1 \cdot L_1 + L_s \cdot R + L_1 \cdot R) + R_1 \cdot R). \quad (11)$$

Передаточная функция схемы по рис. 4 б:

$$W_{4b} = M \cdot E / (p^2 (L_1 \cdot L_2 - M^2) + p(R_1 \cdot L_2 + L_1 \cdot R) + R_1 \cdot R). \quad (12)$$

Выражения (11), (12) экспортируются в программу MATLAB, выполняется обратное преобразование Лапласа, находятся оригиналы переходных характеристик

где H – напряжённость магнитного поля, А/м; L_m – средняя длина магнитной силовой линии, м; V – объём пространства циркуляции поля, м³; Sk – площадь «кольца» рассеяния, м² (рис. 1); I_1 – намагничивающий ток, А.

При определении примем допущение: напряжённость поля в толщине обмотки спадает по экспоненциальному закону, считаем, что радиальный размер кольца рассеяния включает по 1/3 толщин обмоток.

Для перехода от распределённых параметров Т к схеме замещения в сосредоточенных параметрах используем следующие закономерности.

Реактивная энергия, запасаемая в индуктивности, в данном случае рассеяния L_s , ВАР:

$$W_{L_s} = L_s I_1^2 / 2. \quad (9)$$

Приравняв (8) и (9), решив относительно L_s , получим выражение индуктивности рассеяния

$$L_s = \mu_0 \cdot W^2 \cdot Sk / l_m. \quad (10)$$

Передаточная функция схемы по рис. 4 а:

(ПХ, рис. 5), в цикле изменяются значения ks , фиксируется точка пересечения ПХ, выводятся значения переменных.

В данном случае $ks = 0,903$.

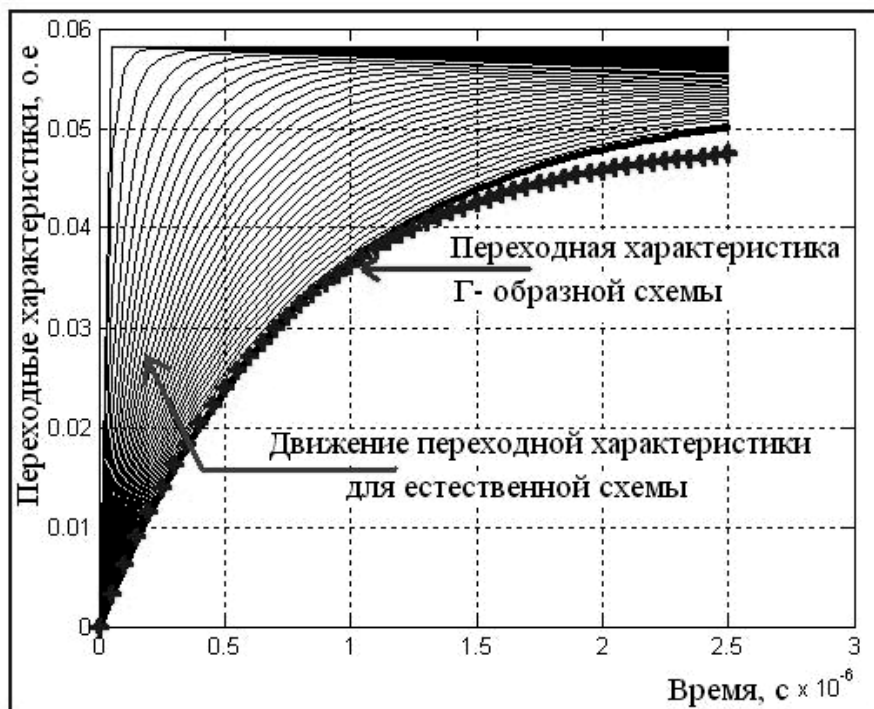


Рис. 5. К определению коэффициента связи

Математическая модель (ММ) и результаты моделирования по п. 2.4.

Структура ММ в пакете SIMULINK POWER SYSTEMS представлена на

рис. 6, результат моделирования по рассчитанным данным – на рис. 7.

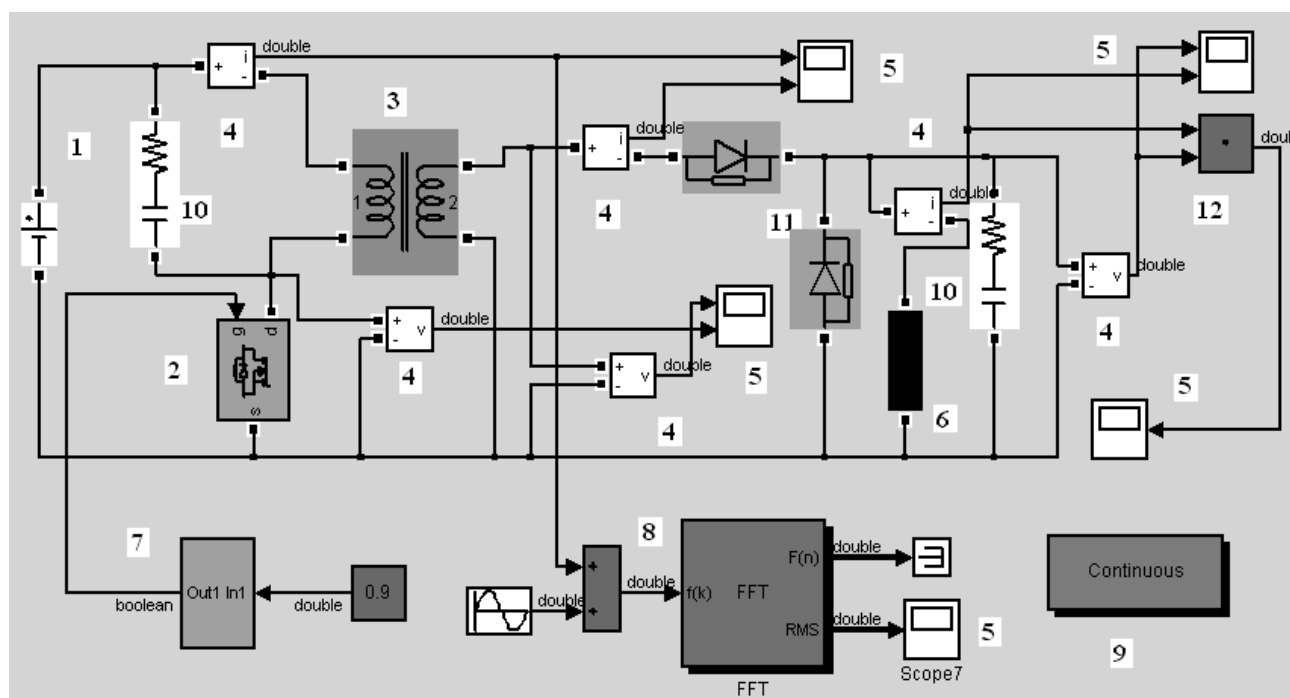


Рис. 6. Структура математической модели: 1 – источник постоянного напряжения; 2 – транзисторный ключ; 3 – трансформатор; 4 – измерительные приборы; 5 – приборы наблюдения; 6 – нагрузка; 7 – подсистема генератора импульсов управления; 8 – блок FFT (анализатор спектра); 9 – интерфейс пользователя; 10 – фильтры; 11 – прямой и обратный диоды; 12 – блок вычисления активной мощности

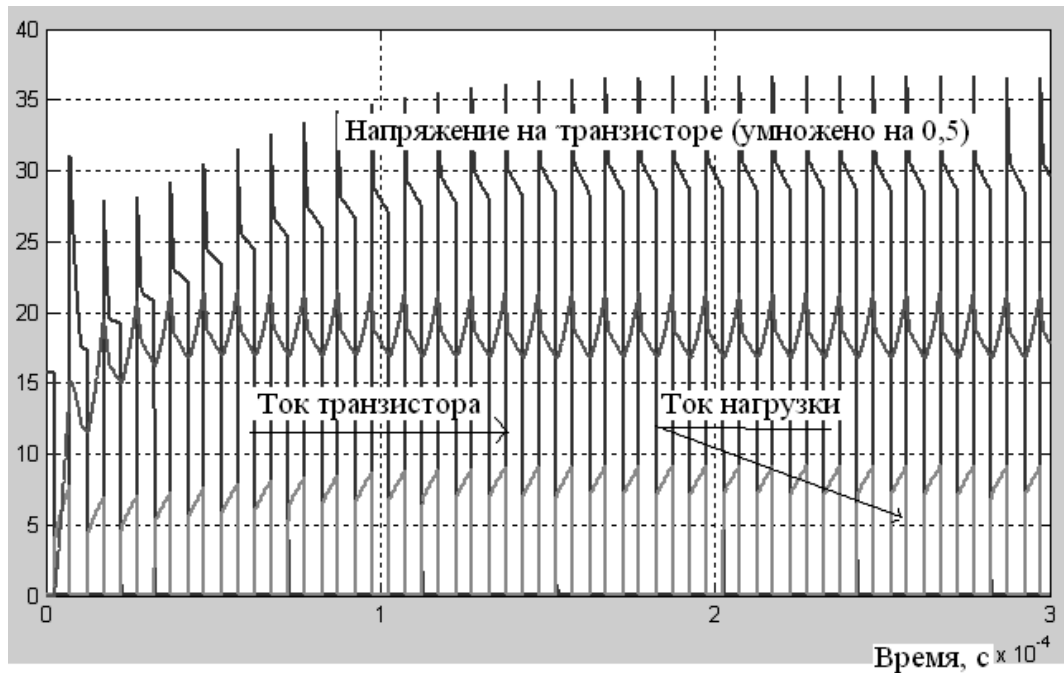


Рис. 7. Некоторые результаты моделирования

Оценка теплового режима Т по п. 2.6.

Цель данного раздела – определение параметров конструкции Т и элементов системы охлаждения, при которых обеспечивается заданный тепловой режим, а именно: температура элементов Т не должна превышать значение T_{max} при средней температуре T_{ex} окружающей среды.

Принятые допущения:

- Т «сухой», то есть охлаждение воздушное, естественное или принудительное;
- температура всех элементов Т одинакова и равна T_{max} ;
- не учитывается влияние окружающих предметов;
- теплообмен с окружающей средой осуществляется только за счёт излучения и конвекции; передача теплоты за счёт теплопроводности не учитывается.

Это допущение оправдано тем, что площадь соприкосновения сухого Т с кожухом мала. Оно же предоставляет некоторый запас для компенсации возможной погрешности анализа.

Рассчитанная общая мощность активных потерь в Т, обозначенная в программах MATLAB как P_{sum} , включает активные потери мощности в обмотках с учётом поверхностного эффекта и активные поте-

ри на перемагничивание и вихревые токи в магнитопроводе.

P_{sum} рассеивается в окружающую среду за счёт излучения и конвекции:

$$P_{sum} = P_{izl} + P_{konv}. \quad (13)$$

Мощность, выводимая с излучающей поверхности с суммарной площадью $\sum_1^n S_{izl}$ в соответствии с законом Стефана-Больцмана:

$$P_{izl} = \sum_1^n S_{izl} 5.76\varepsilon \left[\left(\frac{T_{max}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{ex}}{100} \right)^4 \right]. \quad (14)$$

Здесь ε – коэффициент черноты, обычно $\varepsilon = 0,75 \dots 0,9$.

В S_{izl} учитываются только «открытые» поверхности, не обращённые к элементам Т, нагретым до такой же температуры.

Мощность, рассеиваемая путём конвекции элементами с суммарной площадью поверхности $\sum_1^m S_{konv}$ (закон Ньютона):

$$P_{konv} = \sum_1^m S_{konv} \alpha_k (T_{max} - T_{ex}), \quad (15)$$

где α_k – коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/(м²·°С), зависящий от структуры поверхности, способа и интенсивности охлаждения.

В реальном изделии интенсивностью охлаждения T можно управлять, изменяя скорость потока охлаждающего воздуха и размеры каналов (рис. 1).

Из (15) требуемое значение α_k равно:

$$\alpha_k = \frac{TWR(P_{sum} - P_{izl})}{S_{konv}(T_{max} - T_{ex})}, \quad (16)$$

где TWR – относительная продолжительность работы T .

В суммарном объёме V , включающем объёмы воздушных каналов и приповерхностных слоёв, запасается тепловая энергия:

$$W = VC_v \gamma_v (T_{max} - T_{ex}), \quad (17)$$

где $C_v = 1,006 \cdot 10^3$ Дж/кг/°С – удельная теплоёмкость воздуха; $\gamma_v = 1,3$ кг/м³ – его плотность при нормальном давлении.

Объём V рассчитывается по эскизу T (рис. 1), соответствующие выражения выведены и включены в программы.

Требуемая скорость воздушного потока, м/с:

$$V_h \approx P_{konv} LC0 / W. \quad (18)$$

На рис. 8 построены графики, иллюстрирующие взаимосвязь конструкции T с электрическими и тепловыми характеристиками. В данном примере расчётов требуемая скорость потока охлаждающего воздуха составила около 0,3 м/с.

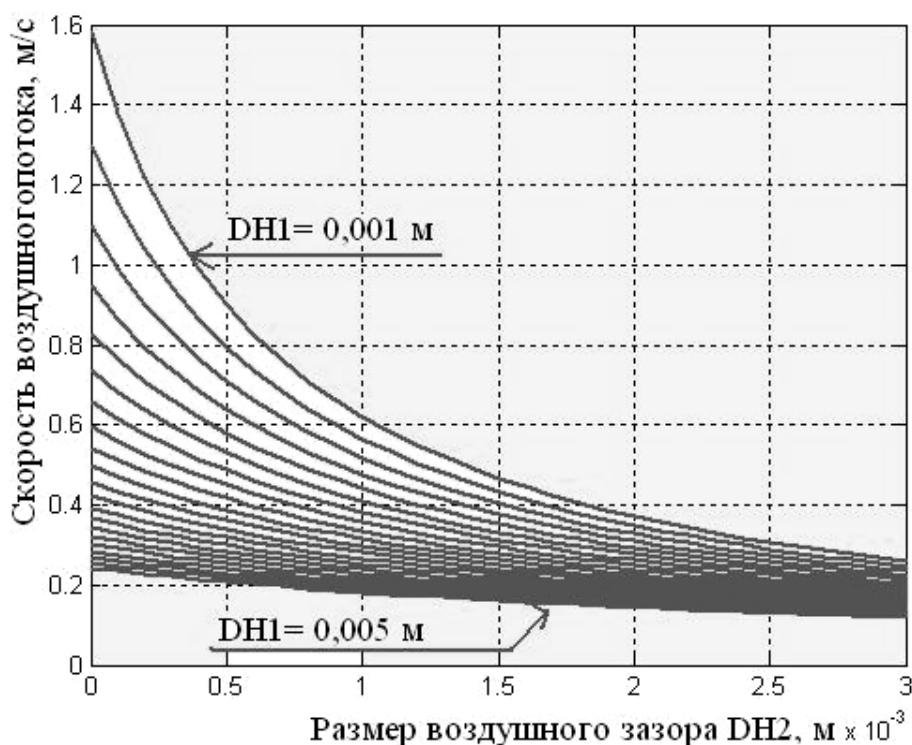


Рис. 8. Зависимости требуемой скорости воздушного потока от конструкции трансформатора

Таким образом, рекомендована методика проектирования электротехнических устройств, связывающая параметры конструкции, тепловые и электрические характеристики, использующая

современные математические методы и программное обеспечение.

Приведён пример реализации методики, проиллюстрированный последовательностью и результатами расчёта элементов транзисторного преобразователя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ромаш М. Высоочастотные транзисторные преобразователи / М. Ромаш,

Ю.И. Дробович, Н.Н. Юрченко. М.: Радио и связь, 1988. 288 с.

2. **Моин В.С.** Стабилизированные транзисторные преобразователи / В.С. Моин. М.: Энергоатомиздат, 1986. 377 с.

3. **Кошелев П.А.** Моделирование электронных устройств в символьных и матричных математических вычислительных средах / П.А. Кошелев, С.В. Парамонов,

С.Н. Пшенкин // Exponenta pro: Математика в приложениях. 2004. № 3-4. С. 146-152.

4. **Богачев В.С.** Активные потери в трансформаторах электротехнологических установок / В.С. Богачев [и др.] // Проблемы электроэнергетики: сб. науч. тр. Саратов, 2010. С. 52-61.

Кошелев Петр Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры «Электротехнологическая и преобразовательная техника» Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ»

Опре Виктор Михайлович – доктор технических наук, профессор кафедры «Электротехнологическая и преобразовательная техника» Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ»

Парамонов Сергей Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехнологическая и преобразовательная техника» Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ»

Peter A. Koshelev – Dr.Sc., Professor, Department of Electrotechnical and Conversional Equipment, Saint Petersburg Electrotechnical University LETI

Viktor M. Opre – Dr.Sc., Professor, Department of Electrotechnical and Conversional Equipment, Saint Petersburg Electrotechnical University LETI

Sergey V. Paramonov – Ph.D., Associate Professor, Department of Electrotechnical and Conversional Equipment, Saint Petersburg Electrotechnical University LETI

Статья поступила в редакцию 27.10.14, принята к опубликованию 15.11.14

ИМПУЛЬСНЫЕ СИСТЕМЫ НАКАЧКИ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ЛАЗЕРОВ

П.А. Кошелев, В.М. Опре, А.В. Прилуцкий, А.О. Темников

IMPULSE SYSTEMS FOR PUMPING SOLID-STATE LASERS

P.A. Koshelev, V.M. Opre, A.V. Prilutskiy, A.O. Temnikov

Рассматриваются вопросы разработки импульсных систем питания для накачки твердотельных лазеров с импульсными газоразрядными лампами накачки и лазеров с диодной накачкой. Определяются критерии выбора основных элементов импульсных генераторов – емкостных или индуктивных накопителей, работающих в режиме частичного разряда с учетом вольтамперных характеристик нагрузок.

Ключевые слова: твердотельный лазер, импульс, диодная накачка

В последние десятилетия в серийных технологических импульсных твердотельных лазерах (ТЛ) в основном используются системы оптической накачки с импульсными газоразрядными лампами накачки (ИЛН). Такие системы накачки имеют низкий КПД, ограниченный рабочий ресурс и высокое тепловыделение, требующее мощных систем охлаждения квантронов. Кроме этого, широкий спектр оптического излучения ИЛН плохо согласуется с узким спектром поглощения различных активных тел, применяемых в ТЛ. В результате развития лазерной техники в настоящее время все более широкое применение находят ТЛ, в которых используются для оптической накачки лазерные диоды (ЛД), имеющие узкополосный спектр излучения, хорошо согласующийся со спектром поглощения активных тел, при этом значительно вырос оптический КПД излучателей, возросла надежность, увеличились сроки эксплуатации ТЛ и т.п.

The paper deals with the issues relating development of impulse feed systems for pumping two types of solid-state lasers: lasers with impulse gas discharge pumping tubes and lasers with diode pumping. The authors define the criteria for selecting key elements of pulse oscillators including the capacitor or inductive storage operating in the partial discharge mode with account for the current-voltage characteristics of loadings.

Keywords: solid-state laser, pulse, diode pumping

Разработка надежных источников питания лазеров с диодной накачкой, работающих в импульсном режиме, является одной из актуальных задач современной лазерной техники. От источников питания требуется повышенная стабильность параметров выходных импульсов, причем даже кратковременное превышение допустимого уровня тока приводит к разрушению структуры ЛД.

Особенностью большинства импульсных систем накачки ТЛ являются повышенные требования к величине спада плоской части прямоугольных импульсов тока накачки и необходимость обеспечения плавной регулировки длительности этих импульсов в широком диапазоне. При этом следует отметить, что ВАХ нагрузок – ламп накачки и лазерных диодов – существенно различаются между собой, в силу чего различаются и требования, предъявляемые к генераторам импульсов, обеспечивающих питание этих нагрузок. Необходи-

димость регулирования длительности прямоугольных импульсов при соотношении максимальной и минимальной длительности $\tau_{\max}/\tau_{\min} \approx 10$ приводит к использованию генераторов с частичным разрядом емкостных накопителей [1]. В тех случаях, когда не предъявляются высокие требования к форме импульсов, используются однородные искусственные линии с дискретным регулированием длительности за счет изменения параметров ячеек линии, как это реализовано в лазерных технологических установках серии «Квант». Для обеспечения плавной регулировки длительности импульсов также могут быть использованы однородные искусственные линии с вентилями [2]. В качестве коммутаторов в таких генераторах применяются либо полностью управляемые тиристорные ключи, либо силовые транзисторы.

Среди ряда проблем, возникающих перед проектировщиками импульсных систем накачки твердотельных лазеров, следует вычленить основную проблему, а именно выбор вида накопителя, работающего в режиме частичного разряда. На практике основное применение нашли генераторы импульсов с емкостными накопителями как обладающие наибольшим КПД. Такие накопители оправдывают себя при работе на ИЛН, но при этом величина энергии, запасаемой в накопителе, существенно превышает величину энергии, выделяемой в ИЛН за один импульс. В итоге это приводит к тому, что в аварийном режиме при несрабатывании силового ключа вся избыточная энергия накопителя выделяется в ИЛН. При этом разрушается как ИЛН, так и активное тело, что приводит к большим материальным затратам. Тем не менее особенности ВАХ ИЛН позволяют использовать емкостные накопители в генераторах с широким диапазоном изменения длительности импульсов накачки благодаря высоким значениям КПД процесса формирования импульсов.

При расчете генераторов необходимо учитывать параметры нагрузок, имеющих нелинейные ВАХ. На рис. 1 представлены типичные ВАХ импульсных ламп накачки

типа ИНП, имеющие как падающие, так и возрастающие участки характеристики.

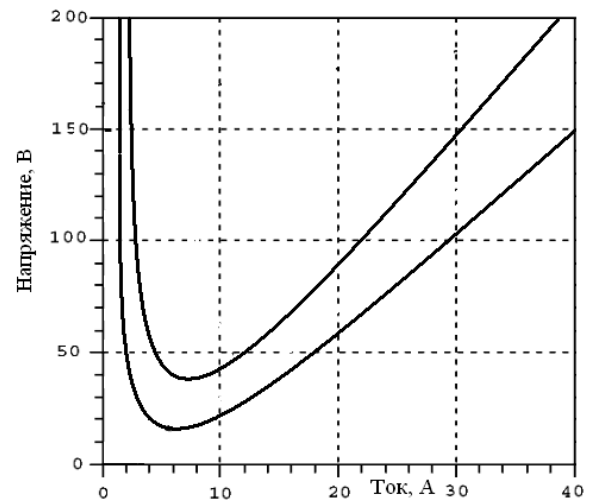


Рис. 1. ВАХ ламп накачки типа ИНП

Работа ламп накачки в режиме дежурной дуги происходит на падающем отрезке ВАХ и обеспечивается слаботочным источником питания постоянного тока с крутопадающей внешней характеристикой. Основной импульсный рабочий режим происходит на возрастающем отрезке ВАХ при величинах токов порядка 500-1000 А и напряжениях 800-1200 В. Обычно в расчетах принимается допущение, что нагрузка генератора резистивная, величина сопротивления порядка $R = 0,65-1,3$ Ом, то есть нелинейность нагрузки не учитывается. При этом использование емкостных накопителей представляется вполне оправданным. При проектировании генераторов с емкостными накопителями, работающими в режиме частичного разряда, следует обеспечить заданную относительную величину спада напряжения плоской части импульса $\Delta E = 5-10\%$, что в конечном итоге определяет величину емкости накопителя.

Принимая $\Delta E = E_{\max} - E_{\min}$, где $E_{\max}$ — амплитуда напряжения на фронте импульса; $E_{\min}$ — амплитуда напряжения на срезе импульса; τ — максимальная длительность импульса; R — сопротивление нагрузки, можно определить емкость накопителя, обеспечивающего заданную величину спада плоской части ΔE [2]. Постоянная вре-

мени цепи разряда в этом случае равна $t = CR$.

$$C = \frac{(E_{\max} + E_{\min})}{2\Delta E} \frac{\tau}{R} = \frac{1+k}{1-k} \frac{\tau}{2R}, \quad (1)$$

где $k = \frac{E_{\min}}{E_{\max}}$.

При работе импульсного генератора в системах питания лазеров с диодной накачкой необходимо учитывать особенности ВАХ нагрузки. ВАХ одного лазерного диода имеет вид, представленный на рис. 2.

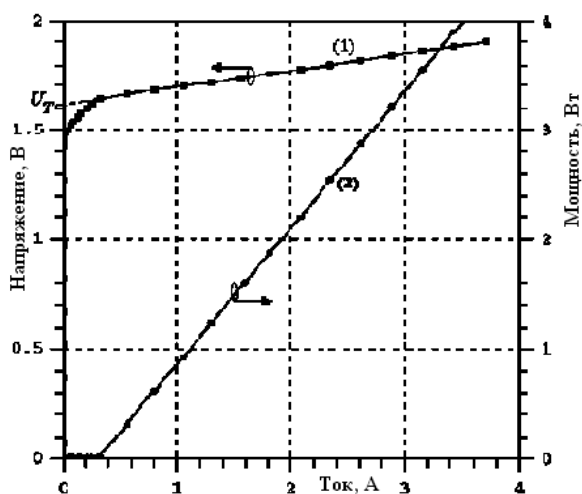


Рис. 2. Типичная ВАХ лазерного диода

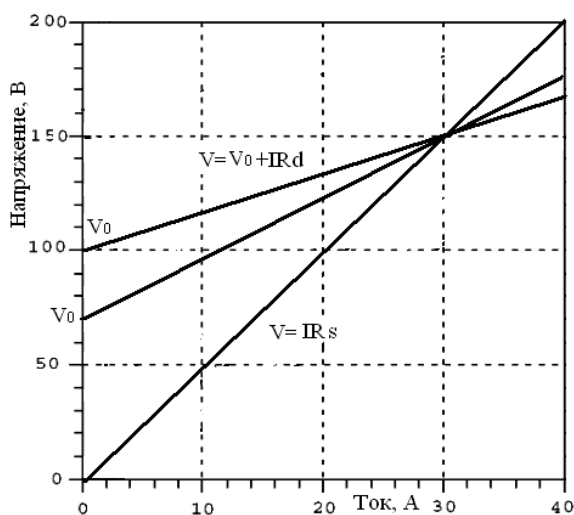


Рис. 3. Примеры линейризации нелинейных ВАХ

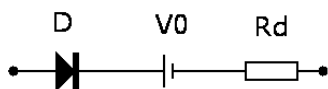


Рис. 4. Эквивалентная схема нагрузки

В практических системах накачки лазерные диоды включены последовательно и ВАХ нагрузки является суммой ВАХ отдельных диодов. Линеаризация подобных ВАХ (рис. 3) позволяет использовать в расчетах обобщенную модель нагрузки, а именно, $R_d + U_0$, где U_0 — противо-ЭДС, $R_d = \frac{\Delta U}{\Delta I}$ — дифференциальное сопротивление.

На рис. 4 приведена эквивалентная схема такой нагрузки, причем если принять $U_0 = 0$, то $R_d = R_s$ и нагрузка будет чисто резистивной.

При работе емкостных накопителей, работающих на обобщенную нагрузку в режиме частичного разряда, величина спада плоской части импульса, а следовательно и величина емкости накопителя, будет определяться величиной дифференциального сопротивления R_d , которая существенно меньше величины статического сопротивления

$$R_s = \frac{U_H}{I_H},$$

где U_H — напряжение на нагрузке; I_H — ток нагрузки.

Постоянная времени цепи разряда в этом случае равна

$$t = C_{\text{лд}} R_d$$

и емкость накопителя будет в R_s / R_d раз больше емкости накопителя, работающего на резистивную нагрузку.

$$C_{\text{лд}} = \frac{(E_{\max} + E_{\min})}{2\Delta E} \frac{\tau}{R_d} = \frac{1+k}{1-k} \frac{\tau}{2R_d}, \quad (2)$$

где $k = \frac{E_{\max}}{E_{\min}}$.

Особо следует отметить тот факт, что в таком генераторе (рис. 5) в случае нелинейной нагрузки нестабильность напряжения накопителя приводит к существенно большей нестабильности амплитуды импульса тока нагрузки.

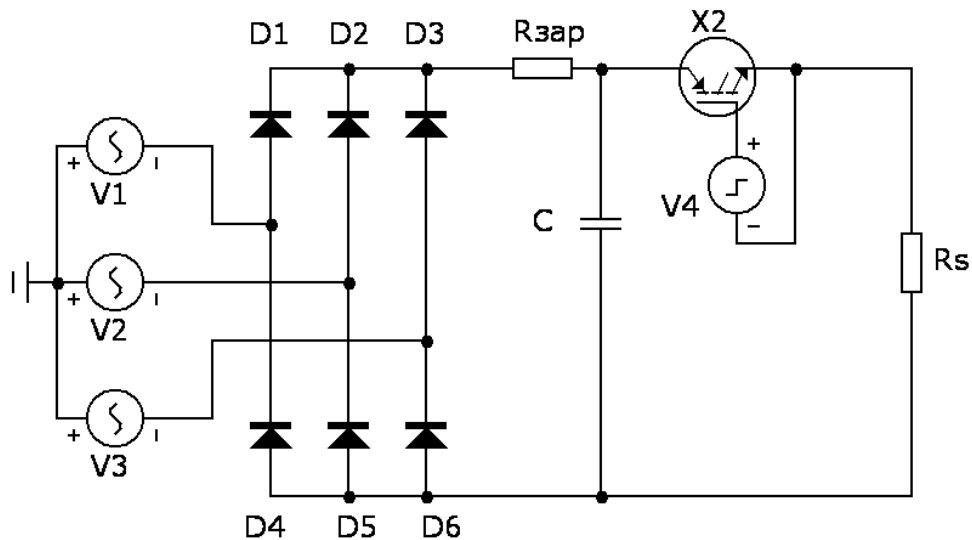


Рис. 5. Расчетная схема емкостного генератора импульсов

Это происходит в результате того, что ток нелинейной нагрузки равен

$$I_H = \frac{E \pm \Delta E - U_0}{R_d} = \frac{(E - U_0) \pm \Delta E}{R_d}$$

и в силу того, что $(E - U_0) < E$, а $R_d < R_s$, нестабильность тока в относительных величинах будет существенно

больше, чем нестабильность напряжения накопителя.

В связи с этим следует рассмотреть, как альтернативный, вариант использования индуктивных накопителей, также работающих в режиме частичного разряда. Расчетная схема генератора импульсов приведена на рис. 6.

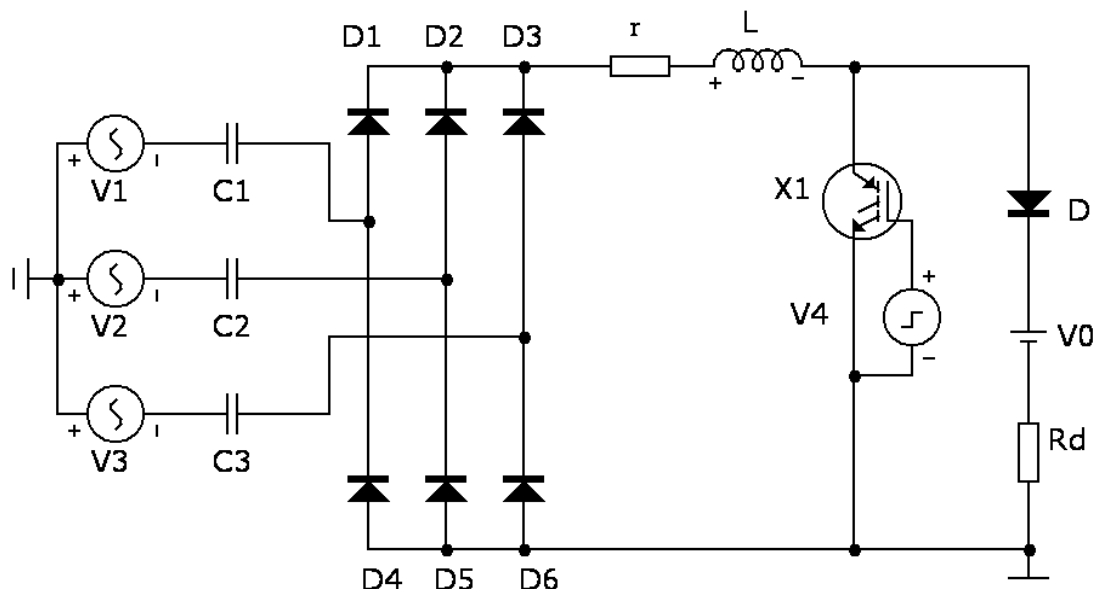


Рис. 6. Расчетная схема индуктивного генератора импульсов

В этом примере ток накопителя ограничен трехфазным емкостным балластом, а нагрузка представлена в обобщенном виде.

При расчете величины индуктивного накопителя, обеспечивающего заданную величину спада плоской части импульса

тока, принимаем $\Delta I = I_{\max} - I_{\min}$. Разность энергий индуктивного накопителя на фронте и срезе импульса в нелинейной нагрузке равна энергии, выделенной в нагрузке за время τ . Отсюда следует

$$\frac{LI_{\max}^2}{2} - \frac{LI_{\min}^2}{2} = \frac{LI_{\max}^2}{2} - \frac{Lk^2 I_{\max}^2}{2} = \left(\frac{I_{\max} + kI_{\max}}{2} \right)^2 R_d \tau + \frac{I_{\max} + kI_{\max}}{2} U_0 \tau,$$

$$k = \frac{I_{\max}}{I_{\min}},$$

где среднее значение амплитуды импульса и величина индуктивности равны

$$I_{\text{cp}} = \frac{I_{\max} + kI_{\max}}{2},$$

$$L = \frac{1+k}{1-k} \frac{R_d \tau}{2} + \frac{1}{1-k} \frac{U_0}{I_{\max}} \tau \quad (3)$$

В случае линейной нагрузки при одинаковых величинах амплитуд и максимальных длительностях импульсов тока, но для разных накопителей, энергии $W_{H1} = W_{H2} = U_H I_H \tau$, выделяемые в нагрузку, одинаковы. В случае эквивалентных нелинейных нагрузок энергия, запасенная в накопителях, $W_C = \frac{CE_{\max}^2}{2}$ и $W_L = \frac{LI_{\max}^2}{2}$ различны. При работе на одну и ту же нели-

нейную нагрузку величина запасенной энергии емкостного накопителя всегда больше величины энергии, запасаемой в индуктивном накопителе.

С учетом (2) и (3) можно показать, что

$$\frac{W_C}{W_L} = \frac{E_{\max}^2}{I_{\max}^2} \frac{1}{R_s R_d} = \frac{R_s}{R_d}.$$

Существенным преимуществом при импульсном питании нелинейных нагрузок от источника тока является более высокая стабильность напряжения импульсов нагрузки относительно нестабильности тока индуктивного накопителя. Нестабильность тока оказывает существенно меньшее влияние на стабильность напряжения нагрузки, поскольку

$$U_H = (I_{\max} \pm \Delta I_{\max}) R_d + U_0 = I_{\max} R_d + U_0 \pm \Delta I_{\max} R_d \text{ и } R_d < R_s.$$

Тем не менее индуктивные накопители, работающие в режиме частичного разряда [3], длительное время не находили широкого применения на практике. Это объясняется тем, что хранение энергии в магнитном поле индуктивного накопителя связано с постоянным протеканием в нем тока большой величины. Поскольку обмотка индуктивного накопителя имеет омическое сопротивление r , в накопителе постоянно выделяется энергия и мощность

потерь равна $P_{\text{пот}} = r I_{\max}^2$. КПД таких устройств низкий и существенно зависит как от скважности импульсов тока нагрузки $Q = T / \tau$, где T – период частоты следования импульсов, так и от отношения $K_R = R_s / r$ статического сопротивления нагрузки к омическому сопротивлению накопителя.

КПД будет равен

$$\eta = \frac{I_{\max}^2 R_d \tau + I_{\max} U_0 \tau}{I_{\max}^2 r T + I_{\max}^2 R_d \tau + I_{\max} U_0 \tau} = \frac{I_{\max} R_d + U_0}{I_{\max} r Q + I_{\max} R_d + U_0}. \quad (4)$$

В случае линейной нагрузки $U_0 = 0$ и $R_d = R_s$. Отсюда следует, что уже при величине $K_R = 10$ и $Q = 10$, $\eta = 50\%$. Увеличение КПД возможно за счет уменьшения как потерь в накопителе, так и скважности. Но обычно в импульсных генераторах скважность достигает больших величин (от 100 до 1000), и КПД становится неприемлемо низким. Пример расчета по зави-

симости (4) для нелинейной нагрузки ($R_d = 0,8 \text{ Ом}$, $U_0 = 80 \text{ В}$, $I_{\max} = 100 \text{ А}$) при величине активного сопротивления индуктивности $r = 0,1 \text{ Ом}$ и скважности $Q = 20$ дает величину $\eta = 44\%$, что в некоторых случаях приемлемо.

На рис. 7 приведены две эквивалентных схемы генераторов с емкостным и индуктивным накопителем.

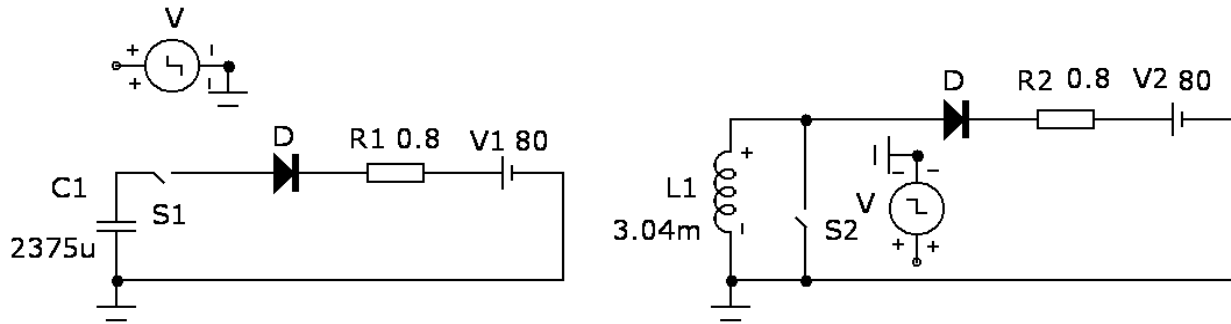


Рис. 7. Схемы генераторов с эквивалентными накопителями

Величины накопителей рассчитаны по зависимостям (2) и (3). Численный анализ и эксперимент показали, что параметры импульсов тока (длительности, амплитуды и величины спада плоской части импульсов) абсолютно идентичны. Но при этом следует отметить, что энергия, запасенная в емкостном накопителе ($C = 2375$ мкФ), в этом конкретном случае ($R_d = 0,8$ Ом, $U_0 = 80$ В, $I_{\max} = 10$ А,

$E_{\max} = 160$ В) равна $W_C = \frac{CE_{\max}^2}{2} = 30,4$ Дж,

а энергия индуктивного накопителя ($L = 3,04$ мГн) равна

$W_L = \frac{LI_{\max}^2}{2} = 15,06$ Дж, то есть в два раза

меньше.

В случае нелинейных нагрузок отношение величины энергии емкостного накопителя к величине энергии эквивалентного индуктивного накопителя $\frac{W_C}{W_L} \geq 1$ и определяется параметрами конкретной нагрузки.

Следует сделать вывод, что импульсное питание лазеров с диодной накачкой от индуктивных накопителей, работающих в режиме частичного разряда, предпочтительнее систем питания с емкост-

ными накопителями с точки зрения стабильности амплитуды импульсов. При этом максимальная энергия индуктивных накопителей существенно меньше, а в аварийных ситуациях защита нагрузки обеспечивается предельно просто путем шунтирования нагрузки любым быстродействующим коммутатором в случае превышения максимальной длительности импульса тока.

Тем не менее серьезным препятствием на пути широкого практического применения генераторов с индуктивными накопителями все-таки является низкий КПД. Увеличение КПД возможно за счет использования высокочастотных индуктивностей, но это существенно повышает их стоимость, и такое решение не всегда оправданно. В отдельных случаях, когда скважность импульсов тока нагрузки небольшая, величина КПД может быть приемлемой и выбор вида накопителя определяется разработчиком. Более перспективными представляются системы импульсного питания с рекуперацией в паузах остаточной энергии индуктивного накопителя в промежуточный емкостный накопитель, как это предлагается в [4].

ЛИТЕРАТУРА

1. **Иванов А.Б.** Импульсные передатчики СВЧ / А.Б. Иванов, Л.Н. Сосновкин. М.: Советское радио, 1956. 615 с.

2. **Опре В.М.** Силовая импульсная техника / В.М. Опре. СПб.: Литера, 2008. 125 с.

3. **Гой А.И.** Лазер с индуктивным накопителем для сварки и термообработки / А.И. Гой, Л.В. Данилов, Р.А. Таиров // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Технология производства и оборудования. 1967. № 2. С. 39-42.

4. Импульсный генератор: пат. 141250
Рос. Федерация: МПК(2006.1) Н 03 К 3/00 /

В.М. Опре [и др.]. № 2014103372/08; заявл.
31.01.2014; опубл. 27.05.2014, Бюл. № 15.

Кошелев Петр Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры «Электротехнологическая и преобразовательная техника» Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ»

Petr A. Koshelev – Dr.Sc., Professor, Department of Electrotechnical and Conversional Equipment, Saint Petersburg Electrotechnical University LETI

Опре Виктор Михайлович – доктор технических наук, профессор кафедры «Электротехнологическая и преобразовательная техника» Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ»

Viktor M. Opre – Dr.Sc., Professor, Department of Electrotechnical and Conversional Equipment, Saint Petersburg Electrotechnical University LETI

Темников Анатолий Олегович – начальник производства ООО «ФЕДАЛ», г. Санкт-Петербург

Anatoliy O. Temnikov – Production Director, ООО FEDAL, Saint Petersburg

Прилуцкий Андрей Владимирович – инженер ООО «ФЕДАЛ», г. Санкт-Петербург

Andrey V. Prilutskiy – Engineer, ООО FEDAL, Saint Petersburg

Статья поступила в редакцию 27.10.14, принята к опубликованию 15.11.14

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

В разделе «Летопись» можно опубликовать воспоминания, рассказы, информацию об ученых, преподавателях, представителях промышленности, бизнеса, работающих в области электротехнологии.

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.79

ВЛИЯНИЕ ДИФфуЗИОННОЙ СВАРКИ НА СВОЙСТВА МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Н.М. Котина, О.Ю. Жевалёв, Л.Е. Куц

IMPACT OF DIFFUSION WELDING ON MAGNETIC MATERIALS PROPERTIES

N.M. Kotina, O.Yu. Zhevaley, L.E. Kuts

Одна из основных проблем технологии диффузионной сварки ферритов с металлами – возможность изменения структуры и основных электромагнитных параметров ферритов. Большое многообразие физических и химических свойств ферритовых материалов требует оценки влияния вакуумно-термического воздействия на параметры фактически каждого типа ферритов. Глубина этого влияния определяет дальнейшую технологию изготовления ферритометаллических узлов.

Ключевые слова: феррит, металл, неразъемное соединение, ферритометаллический узел, диффузионная сварка, механические свойства

Созданием технологических процессов диффузионной сварки металлов с различными видами технической керамики, в том числе ферритов, невозможно без четкого представления о механизме формирования соединений разнородных материалов, то есть о процессах физико-химического взаимодействия в металл – неметаллическом контакте и установления общих химических связей различного типа (металлических – ненасыщенных со стороны металла и ковалентных – с жесткими ограничениями на углы, число и длину связей со стороны неметалла) в контакте соединяемых материалов.

One of the key problems of the diffusion ferrite-metal welding technology is related with the changes in the structure and main electromagnetic parameters of ferrites. Significant variety of physical and chemical properties of ferrite materials require assessment of the vacuum thermal impact on the parameters of each type of the ferrite. Importance of the given impact determines the manufacturing technology of ferrite-metal nodes.

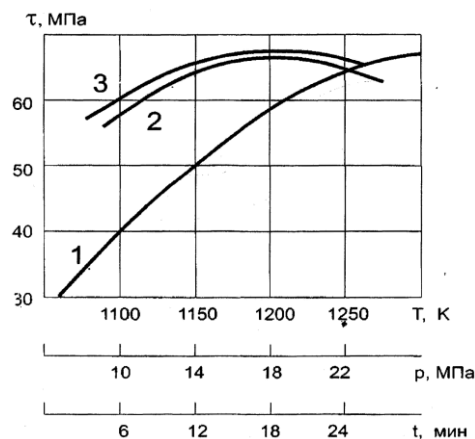
Keywords: ferrite, metal, non-detachable connection node ferritic metal, diffusion welding, mechanical properties

Важнейшим качественным показателем керамики, определяющим возможность ее сварки и применения, является прочность и термостойкость. В процессе сварки и эксплуатации керамических изделий неизбежны колебания температуры, вследствие чего возникают температурные напряжения. Температурным изменениям, приводящим к разрушению изделий, соответствует критическая разность температур, определяемая произведением двух величин: термического напряжения и фактора формы тела. Сравнение физико-механических свойств показывает, что термостойкость ферритов в 5-14 раз ниже, чем алюмоок-

сидной керамики, а самые низкие значения имеют феррошпинели. Поэтому обычно используемые при сварке электроизоляционных керамик скорости нагрева и охлаждения (0,25-0,3 К/с.) при сварке ферритов пригодны только для небольших узлов. Для узлов больших размеров они должны быть понижены до 0,08-0,12 К/с. Таким образом, скорости нагрева и охлаждения – важные параметры сварки металлов с керамическими материалами.

Одна из основных проблем технологии диффузионной сварки ферритов с металлами – возможность изменения структуры и основных электромагнитных параметров ферритов. Большое многообразие физических и химических свойств ферритовых материалов требует оценки влияния вакуумно-термического воздействия на параметры фактически каждого типа ферритов. Глубина этого влияния определяет дальнейшую технологию изготовления ферритометаллических узлов. Учитывая, что ферритовая структура может быть изменена под действием нагрева в вакууме и что причина такого изменения будет связана с потерей кислорода, измерение температурной зависимости удельного электросопротивления феррита было выбрано как основной способ оценки таких изменений. Исследования показали, что нагревание ферритов в вакууме влияет на их электросопротивление и некоторые другие характеристики [1]. Уменьшение электросопротивления можно объяснять потерей кислорода ферритовым материалом и, как результат, появление дополнительного количества ионов Fe^{2+} . Это подтверждается результатами дополнительных химических исследований: исходный феррит содержал 0,11-0,17% Fe^{2+} , после нагревания при 1173 К – 1,47-1,59% Fe^{2+} . Наблюдается увеличение доли катионов Fe^{2+} и электропроводности феррита. Необходимо отметить, что повторное нагревание на воздухе фактически восстанавливает электропроводность, что объясняется возвратом кислорода в структуру феррита. Все эти выводы справедливы для классических режимов диффузионной сварки (см. рисунок и таблицу).

тивления можно объяснять потерей кислорода ферритовым материалом и, как результат, появление дополнительного количества ионов Fe^{2+} . Это подтверждается результатами дополнительных химических исследований: исходный феррит содержал 0,11-0,17% Fe^{2+} , после нагревания при 1173 К – 1,47-1,59% Fe^{2+} . Наблюдается увеличение доли катионов Fe^{2+} и электропроводности феррита. Необходимо отметить, что повторное нагревание на воздухе фактически восстанавливает электропроводность, что объясняется возвратом кислорода в структуру феррита. Все эти выводы справедливы для классических режимов диффузионной сварки (см. рисунок и таблицу).



Зависимости прочности соединений феррограната 30СЧ6 + медь МБ (1 – от температуры; 2 – от сварочного давления; 3 – от времени изотермической выдержки)

Температура сварки и прочностные характеристики материалов [2]

Материал	Температура сварки		Прочность соединения, МПа
	абсолютная, К	гомологическая, $T_{св}/T_{пл}$	
Pb - Al_2O_3	563	0,94	56
Al - Al_2O_3	893	0,96	95
Cu - Al_2O_3	1298	0,96	153
Cu - $Y_{2,22}Cd_{0,75}O_{12}$ (феррогранат)	1298	0,96	65
Cu - ультрафарфор	1303	0,96	120
УФ46	1313	0,97	180
Cu - ВК94-2	1623	0,94	200
Ni - Al_2O_3	1647	0,89	220
Fe - Al_2O_3	893	0,96	180
АМц-ВК94-1, АМц-ВК100-2	893	0,96	70

Итак, соединения феррограната 30СЧ6+медь МБ с высокой прочностью могут быть получены при температуре

1190÷1210 К, давлении 16÷20 МПа, времени 17÷19 мин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Куц Л.Е. Влияние термовакuumной обработки на свойства ферритовых материалов / Л.Е. Куц, О.Ю. Жевалев, Н.М. Котина, Г.В. Конюшков // Вакуумная техника и технология. Санкт-Петербург, июнь 2011. Т. 21. № 2. С. 74.

2. Куц Л.Е. Изменение свойств ферритовых материалов при нагреве в вакууме / Л.Е. Куц, О.Ю. Жевалев, Н.М. Котина, В.Г. Конюшков // Вакуумная техника и технология. Санкт-Петербург. 2011. Т. 21. № 4. С. 237-238.

Котина Наталия Макаровна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Natalia M. Kotina – Ph.D., Associate Professor, Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Жевалев Олег Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Oleg Yu. Zhevaley – Ph.D., Associate Professor, Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Куц Любовь Евгеньевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Lyubov E. Kuts – Ph.D., Associate Professor, Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 12.11.14, принята к опубликованию 15.11.14

МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЦИРКОНИЯ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ И ВОЗДЕЙСТВИИ ТОКОВ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

А.А. Фомин, И.В. Родионов, А.М. Захаревич,
М.А. Фомина, В.А. Нахов, М.Е. Федосеев

MORPHOLOGICAL TRANSFORMATIONS ON ZIRCONIUM SURFACE DURING MACHINING AND ELECTROTECHNOLOGICAL TREATMENT WITH HIGH-FREQUENCY CURRENTS

A.A. Fomin, I.V. Rodionov, A.M. Zakharevich,
M.A. Fomina, V.A. Nakhov, M.E. Fedoseev

Приведены результаты исследований влияния механической обработки и последующего воздействия токов высокой частоты на химический состав и морфологические характеристики поверхности циркониевых изделий. Установлено, что при температуре от 600 до 1200 °С и продолжительности термообработки от 30 до 300 секунд формируются оксидные покрытия, состоящие из нанометровых зерен. Представлены данные качественного морфологического анализа влияния индукционно-термического оксидирования плоских и шероховатых поверхностей циркония

Ключевые слова: токи высокой частоты, оксидное покрытие, цирконий, наноструктура

Функциональные металлические материалы, используемые в химическом, энергетическом и точном машиностроении, широко представлены различными металлами и неметаллами, композитами и покрытиями. Конструктивной основой многих высокотехнологичных изделий могут служить различные жаростойкие и жаропрочные металлические материалы, например нержавеющие хромоникелевые стали, молибден, вольфрам, ванадий, тантал, титан и сплавы на их основе, а также цирконий. Обычно заготовками из цирко-

The paper describes the research results relating the chemical composition and surface morphological characteristics of zirconium products after machining and treatment with high-frequency currents. It is found that at temperatures ranging from 600 to 1200 °C and thermal treatment period from 30 to 300 seconds, oxide coatings consisting of nano-grains are formed. The authors present the qualitative morphological analysis data which show the influence of thermal induction oxidation of planar and rough zirconium surfaces.

Keywords: high-frequency currents, oxide coating, zirconium, nanostructure

ния являются слитки или прокатная продукция (фольга), которые маркируются Э100, Э110, Э125, Э635 и отличаются содержанием добавок, в частности ниобия, а также кислорода, углерода, кальция, кремния, алюминия, гафния, хрома, олова, железа и прочих примесей. В инструментальном производстве также применяют вакуумно-конденсационные методы осаждения различных соединений циркония (карбидов, нитридов). Для этого используют циркониевые катоды, например марки КЦр, состав которых отличается отсутст-

вием примеси ниобия. При работе изделий из данных материалов в условиях воздействия экстремально высоких значений различных факторов, например температурных, химических, механических и различных типов высокоэнергетических излучений, могут возникать ситуации, приводящие к снижению их функциональности и утрате конструктивной целостности.

Для защиты металлических поверхностей от негативного влияния факторов внешней среды активно применяются различные методы оксидирования металлов, основными из которых являются газотермические и электрохимические методы [1-3]. Покрываются ZrO_2 можно также получить методами осаждения [4]. В связи с этим для создания защитных пленочных систем и специальных функциональных покрытий на поверхности циркония может использоваться высокоэффективный метод индукционно-термического оксидирования, который достаточно успешно апробирован для технического титана и его конструкционных сплавов, а также нержавеющей хромоникелевой стали [1, 5]. В результате такой обработки на поверхности циркония вероятно протекание процессов диффузионного насыщения кислородом и образование оксидных соединений в виде пленок и покрытий [6]. В связи с указанной целью данной работы является изучение влияния режимов термической обработки токами высокой частоты (ТВЧ) на химический состав и морфологические характеристики оксидных покрытий конструкций высокотехнологичных изделий из циркония, в частности получение субмикрометровых и нанометровых кристаллов функционального покрытия.

Экспериментальные образцы представляют собой цилиндры диаметром 5,8 мм и длиной 2,5 мм, изготовленные из технического циркония. Их поверхность подвергается формообразующей (токарной) и микротекстурирующей механической обработке, включающей воздушно-абразивную обработку корундовым порошком средней дисперсностью 200...300 мкм. Полученные металлические основы образцов также подвер-

гаются ультразвуковой очистке. Далее поверхность подготовленных образцов оксидируется при обработке ТВЧ [7]. Максимальная потребляемая мощность $P_{\max}$ лабораторного устройства обработки ТВЧ при нагреве изделий данной геометрии не превышает 550 Вт, частота тока на индукторе – 90 ± 10 кГц; при достижении заданной температуры обработки 600, 800, 1000 и 1200°C потребляемая мощность P_{II} устройства снижается и составляет 65 ± 5 , 150 ± 10 , 260 ± 10 и 520 ± 15 Вт, соответственно. В ходе исследований устанавливается влияние обработки ТВЧ в диапазоне температуры 600...1200°C на химические и морфологические изменения, происходящие на поверхности при образовании оксидных покрытий. Режимам обработки экспериментальных образцов покрытий присвоена двойная нумерация: первое число соответствует температуре t термообработки циркониевой основы, второе – продолжительности τ процесса. Например, режим 800-030 соответствует температуре 800°C при продолжительности обработки не более 30 секунд.

Морфология поверхности образцов после выбранных технологических воздействий изучается с использованием растровой электронной микроскопии (РЭМ) в микро- и нанометровом масштабе для выявления закономерностей структурообразования поверхностного слоя и покрытий. РЭМ в сочетании с энергодисперсионным рентгенофлуоресцентным анализом (ЭДРФА) химического состава образцов проводится на приборе MIRA II LMU с детектором INCA PentaFETx3. Изменения концентраций циркония, кислорода и прочих элементов, измеряемых в атомных процентах (ат.%), и структуры поверхности (морфологии) с оксидными покрытиями изучаются на образцах, полученных механическими методами формообразования и микротекстурирования.

Микроструктура поверхности образцов обусловлена физико-механическим воздействием процесса резания. Воздействие режущего клина токарного резца оставляет специфические канавки на поверхности циркония (рис.1 а). Характерная полосчатая текстура сохраняется как в микро-, так и в

субмикронном диапазоне (рис. 1 в). Отличительной особенностью рельефа после воздушно-абразивной обработки является наличие разнонаправленных углублений неправильной формы (рис. 1 б). При этом образуется морфологически гетерогенный наклепанный слой, который в субмикронном масштабе исследования морфологии имеет мельчайшие элементы – фрагменты раздробленного материала металлической основы и единичные вкрапления корундового абразива (рис. 1 г).

Воздействие ТВЧ на цирконий приводит к активации процессов диффузионного насыщения приповерхностного слоя кислородом, окисления с образованием пленок ZrO_{2-x} и более толстых покрытий ZrO_2 в различных аллотропных модификациях: стабильный бадделеит $m-ZrO_2$ (моноклинная сингония), метастабильный диоксид циркония $t-ZrO_2$ (тетрагональная сингония) и нестабильный $c-ZrO_2$ (кубическая сингония) [6].

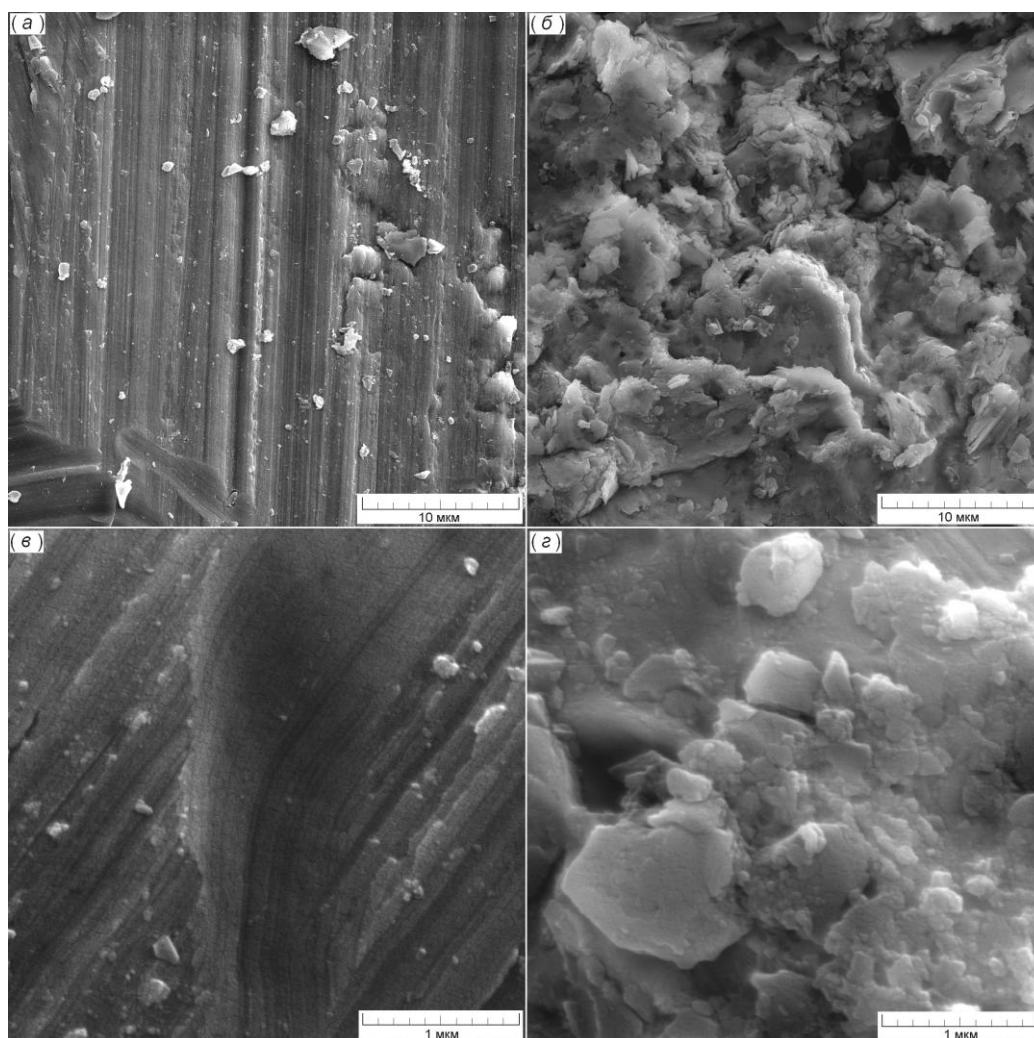


Рис. 1. Морфология микро- (а, б) и субмикронной (в, г) структуры поверхности образцов циркония после различных методов механической обработки: а, в – точение; б, г – пескоструйная обработка (увеличение $\times 10.000$ и $\times 100.000$, соответственно; в нижнем углу кадров указана размерная метка)

Морфология исходной микроструктуры образцов циркония практически не изменяется вплоть до температуры 1000°C и максимальной продолжительности процесса окислирования (рис. 2 а). При достиже-

нии температуры около 1200°C и продолжительности обработки около $120\ldots 300$ с кристаллы образованной высокотемпературной фазы диоксида циркония успевают вырасти до субмикронных значений,

что существенно изменяет рельеф поверхности после токарной и воздушно-абразивной обработки (рис. 2 б). Формируемые нанокристаллы оксидной пленки

начинают стремительно увеличиваться в размере, что приводит к их дальнейшему росту до субмикрометровой величины и появлению трещин (рис. 2 з).

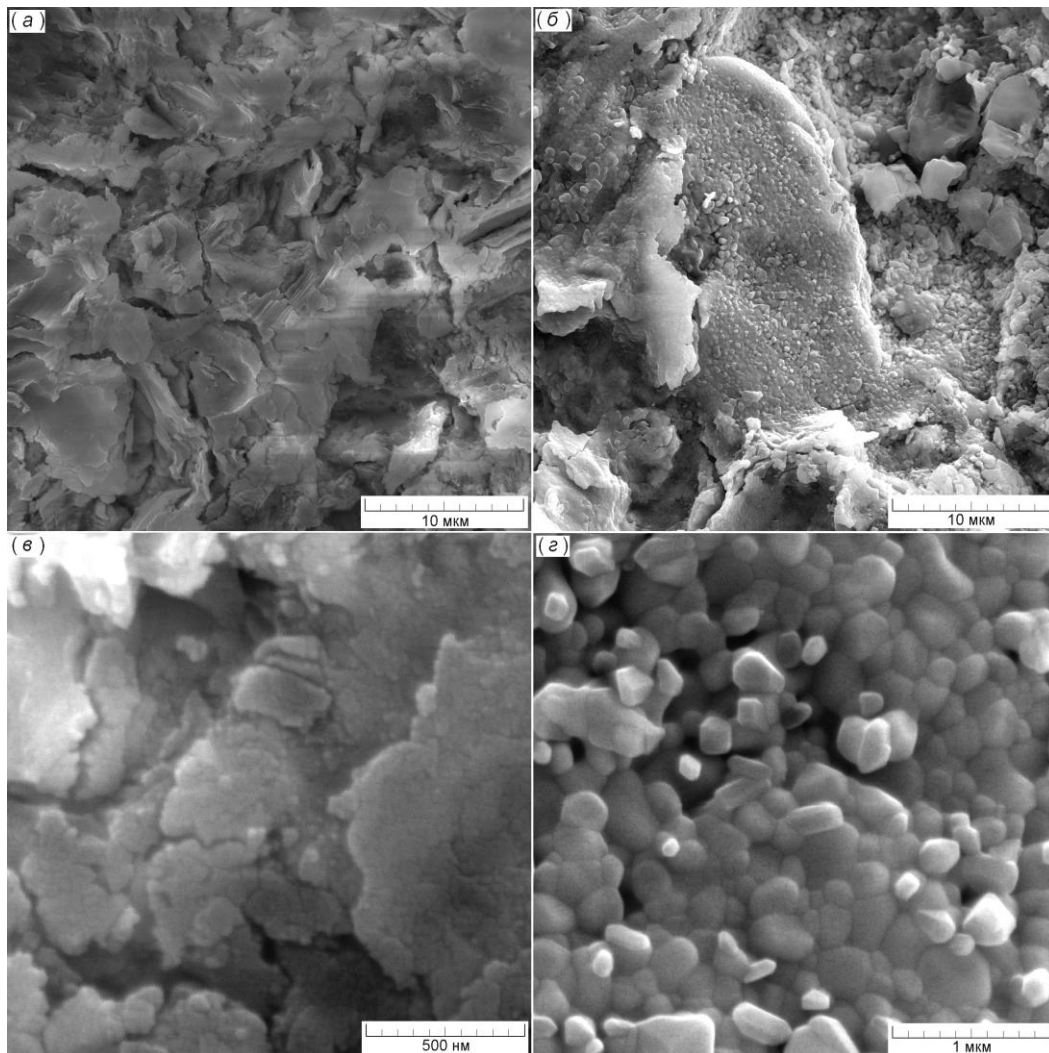


Рис. 2. Морфология микро- (*а, б*) и наноструктуры (*в, г*) поверхности образцов циркония после оксидирования ТВЧ при различных режимах: *а, в* – 800-300 (увеличение $\times 10.000$ и $\times 200.000$, соответственно); *б, г* – 1200-300 (увеличение $\times 10.000$ и $\times 100.000$, соответственно)

Сформированная наноструктура оксидного покрытия имеет зерна, средний размер которых не превышает 40 ± 10 нм. Интенсивный рост наблюдается при увеличении температуры термообработки до 1200°C и продолжительности свыше 30 с. Максимальные значения зерен диоксида циркония после высокотемпературной обработки (режим 1200-120 и 1200-300) составляют 100...250 нм. Однако при этом не происходит самопроизвольного отделения наружного толстослойного оксида, что свойственно, например, техническому титану и

его сплавам в данном диапазоне обработки ТВЧ [1, 7].

Химический состав образцов после электротехнологического воздействия ТВЧ исследован методом ЭДРФА (рис. 3, таблица). На поверхности циркония, имеющего исходную структуру $\alpha\text{-Zr}$ (гексагональная сингония), при рассматриваемых режимах образуются оксидные покрытия, состав которых в основном представлен соединениями типа ZrO_{2-x} , а также прочими углеродсодержащими фазами, например аморфной или карбидами Zr_xC_y .

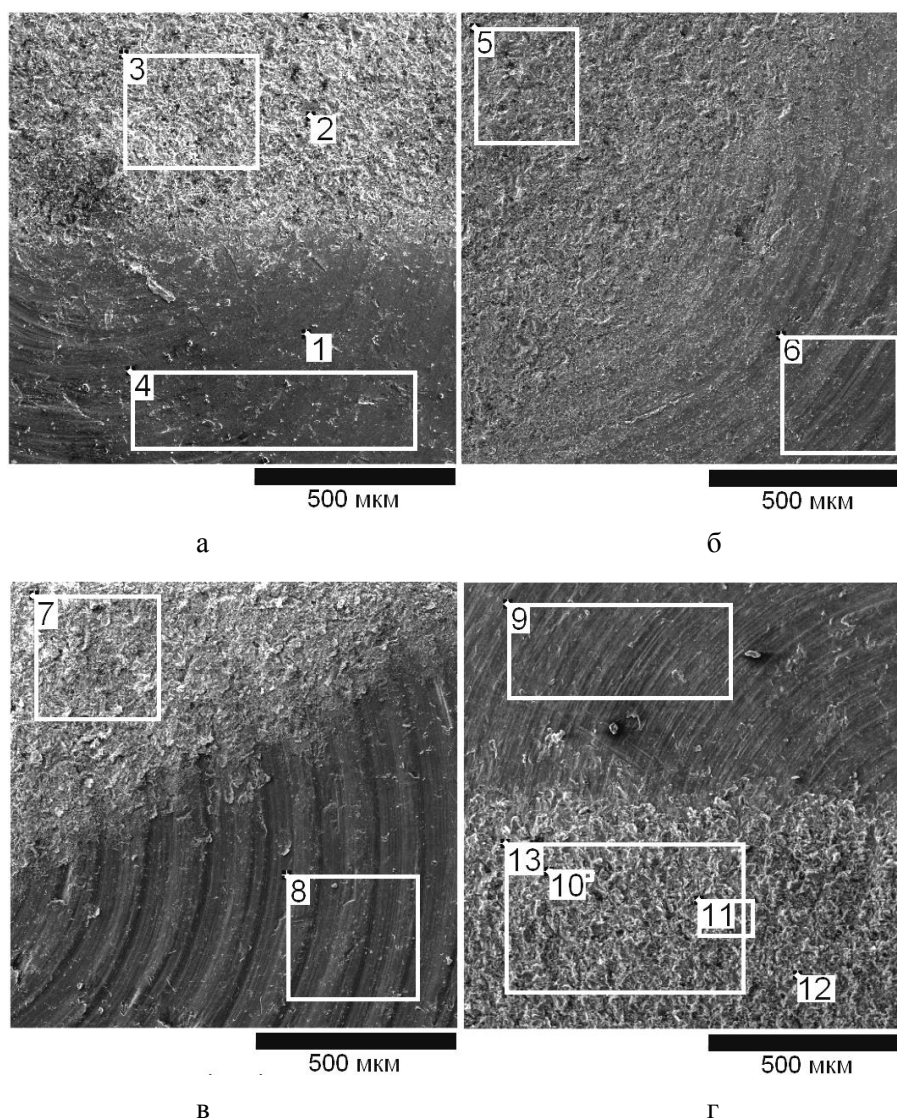


Рис. 3. РЭМ в сочетании с ЭДРФА микроструктуры поверхности образцов циркония после оксидирования ТВЧ при различных режимах: а – без обработки ТВЧ; б – 600-001; в – 800-300; г – 1200-300 (увеличение $\times 300$)

Подготовительные технологические операции механообработки циркониевых образцов с использованием абразива (корунда) способствуют вкраплению его фрагментов в приповерхностный слой. Это подтверждается сравнением результатов дифференциального (точечного) и интегрального (по выбранной площади) химического анализа гладких и шероховатых участков поверхности образцов (см. таблицу).

Высокое содержание углерода в поверхностном слое циркониевых образцов свидетельствует о его высокой адсорбционной способности. Наиболее активной по отношению к углероду является гладкая поверхность, что прослеживается во всем диапазо-

не термообработки. Установлено, что с повышением температуры обработки ТВЧ содержание углерода резко спадает с 30 до 23 ат.%. При этом содержание кислорода достигает 49...57 ат.%, что отражается как на стабилизации исходной фазы α -Zr, так и на образовании диоксида циркония [6].

Повышенное содержание кислорода также обусловлено наличием вкраплений корунда, химическая формула которого – Al_2O_3 , что подтверждается наличием алюминия от 7 до 12 ат.% на шероховатых участках образцов. Остальные элементы (Fe, W) и алюминий в количестве около 0,7 ат.% являются естественными примесями технического циркония.

Результаты ЭДРФА поверхности образцов циркония после механообработки и последующего оксидирования ТВЧ (в ат.%)

Образец	Фактура поверхности	Спектр	Zr	O	C	Al	Примеси (Fe, W и др.)
без обработки ТВЧ	гладкая	1	39.86	8.33	50.79	-	1.02
	шероховатая	2	13.13	56.17	18.33	12.22	0.15
	шероховатая	3	19.61	49.21	22.50	7.87	0.81
	гладкая	4	44.81	16.13	37.44	0.79	0.83
режим 600-001	шероховатая	5	21.70	49.40	20.53	7.98	0.39
	гладкая	6	39.73	30.04	29.14	0.82	0.26
режим 800-300	шероховатая	7	14.53	57.54	17.28	10.18	0.47
	гладкая	8	28.26	45.43	25.61	0.69	-
режим 1200-300	гладкая	9	29.53	47.08	23.26	-	0.14
	шероховатая	10	18.92	55.22	17.81	7.25	0.80
	шероховатая	11	18.83	54.90	18.27	7.46	0.55
	шероховатая	12	19.20	53.70	19.62	7.12	0.36
	шероховатая	13	18.62	56.35	17.64	6.92	0.47

Таким образом, структура поверхности образцов циркония после обработки ТВЧ характеризуется образованием пленок и покрытий диоксида циркония, модифицированных углеродсодержащей фазой. Функциональные покрытия образованы преимущественно нанометровыми и субмикрометровыми кристаллами округлой и призматической формы. Образцам шероховатых покрытий с наиболее выраженными показателями морфологической гетерогенности в нанометровом диапазоне соответствуют режимы обработки ТВЧ: 800-120 (при $P_{II} = 150$ Вт, $t = 800^\circ\text{C}$, $\tau = 120$ с), 800-300 (при $P_{II} = 150$ Вт, $t = 800^\circ\text{C}$, $\tau = 300$ с), 1000-030 (при $P_{II} = 260$ Вт, $t = 1000^\circ\text{C}$, $\tau = 30$ с), 1000-120 (при $P_{II} = 260$ Вт, $t = 1000^\circ\text{C}$, $\tau = 120$ с), 1200-001 (при $P_{II} = 520$ Вт, $t = 1200^\circ\text{C}$, $\tau \approx 1$ с) и 1200-030 (при $P_{II} = 520$ Вт, $t = 1200^\circ\text{C}$, $\tau = 30$ с). Структура

поверхности циркониевых образцов с гладкой фактурой остается практически без трещин при обеспечении сниженной скорости охлаждения металлической основы и формировании равномерной нанокристаллической структуры.

Следует также отметить, что изделия из циркония, изготовленные традиционными методами механической обработки, могут быть подвергнуты наноструктурирующей обработке ТВЧ с формированием необходимой морфологической гетерогенности поверхности. Улучшение качества циркониевых изделий может быть также связано с возможностью управления прочностными и трибологическими показателями их поверхности, в частности твердости, модуля упругости, износостойкости и коэффициента трения.

Статья подготовлена при поддержке проекта № 1189 в рамках базовой части государственного задания образовательным организациям высшего образования, подведомственным Минобрнауки РФ, в сфере научной деятельности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нанокристаллическая структура поверхностного слоя технически чистого титана, подвергнутого индукционно-термическому оксидированию / А.А. Фомин, А.Б. Штейнгауз, И.В. Родионов, М.А. Фомина, А.М. Захаревич // Письма в

Журнал технической физики. 2013. Т. 39. Вып. 21. С. 70-75.

2. Preparation of Near Micrometer-sized TiO_2 Nanotube Arrays by High Voltage Anodization / J. Ni, K. Noh, C.J. Frandsen, S. Kong, G. He, T. Tang, S. Jin // Materials

Science and Engineering: C. 2013. Vol. 33. P. 259-264.

3. **Rodionov I.V.** Application of the Air-Thermal Oxidation Technology for Producing Biocompatible Oxide Coatings on Periosteal Osteo Fixation Devices from Stainless Steel, Inorganic Materials / I.V. Rodionov // Applied Research. 2013. № 2(4). P.119-126.

4. **Wang Q.M.** ZrO₂ and Y₂O₃-stabilized ZrO₂ Coatings Deposited Using an Arc Ion Plating Technique / Q.M. Wang, J. Gong, C. Sun, H.W. Lee, K.H. Kim // Journal of Ceramic Processing Research, 2011. Vol. 12. № 3. P. 259-264.

5. Модификация металлооксидными соединениями поверхности медицинских изделий из стали 12Х18Н10Т при воздействии токов высокой частоты / А.А. Фо-

мин, И.В. Родионов, Н.В. Петрова, А.М. Захаревич // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. № 3(58). Вып. 2. С. 314-317.

6. **Abriata J.P.** The O-Zr (Oxygen-Zirconium) System / J.P. Abriata, J. Garcés, R. Versac // Bulletin of Alloy Phase Diagrams. 1986. Vol. 7. № 2. P. 116-124.

7. Свойства покрытий диоксида титана, полученных индукционно-термическим оксидированием сплава ВТ1-00 / А.А. Фомин, А.Б. Штейнгауэр, И.В. Родионов, М.А. Фомина, А.М. Захаревич, А.А. Скапцов, А.Н. Грибов, Я.Д. Карсакова // Трение и износ. 2014. Т. 35. № 1. С. 43-51.

Фомин Александр Александрович – кандидат технических наук, доцент, докторант кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Родионов Игорь Владимирович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Захаревич Андрей Михайлович – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией диагностики наноматериалов и структур Образовательно-научного института наноструктур и биосистем Саратовского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского

Фомина Марина Алексеевна – студентка Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Нахов Владимир Андреевич – студент Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Федосеев Максим Евгеньевич – студент Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Aleksandr A. Fomin – Ph.D., Associate Professor, Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Igor V. Rodionov – D.Sc., Professor, Head: Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Andrey M. Zakharevich – Ph.D., Head: Laboratory of Nanomaterials and Structure Diagnostics at Educational Scientific Institute of Nanostructures and Biosystems, Chernyshevsky Saratov State University

Marina A. Fomina – Undergraduate, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Vladimir A. Nakhov – Student, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Maksim E. Fedoseev – Student, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov.

Статья поступила в редакцию 12.11.14, принята к опубликованию 15.11.14

ХИМИЧЕСКИЕ, ФАЗОВО-СТРУКТУРНЫЕ И МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНА ПРИ ОБРАБОТКЕ ТОКАМИ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

А.А. Фомин, И.В. Родионов, М.А. Фомина, И.А. Тукмаков

CHEMICAL, PHASE - STRUCTURAL, AND MORPHOLOGICAL TRANSFORMATIONS ON TITANIUM SURFACES DURING TREATMENT WITH HIGH-FREQUENCY CURRENTS

A.A. Fomin, I.V. Rodionov, M.A. Fomina, I.A. Tukmakov

Приведены результаты исследований влияния температуры и продолжительности обработки токами высокой частоты титановых изделий на химический состав и фазово-структурное состояние их поверхности. Установлено, что при температуре от 600 до 1200 °С и продолжительности термообработки не более 300 секунд формируются наноструктурированные покрытия диоксида титана с улучшенными функциональными качествами.

Ключевые слова: токи высокой частоты, оксидное покрытие, титан, наноструктура

Конструктивной основой многих высокотехнологичных медицинских имплантируемых изделий (имплантатов, эндопротезов и остеофиксаторов) долговременного функционирования чаще всего служат различные металлические материалы, например титан и сплавы на его основе, нержавеющие стали, кобальто-хромовые сплавы, а также цирконий, тантал и их сплавы [1]. Намного реже для этой цели используются керамические материалы [2]. Современные конструкции имплантатов представляют собой металлическую конструкцию с биофункциональным покрытием или тонкой пленкой [3].

Высокие значения функциональных нагрузок, действующих на имплантаты со стороны костной ткани, оказывают влияние на макро-, микро- и нанометровый уровни структуры имплантата. Макроуровень анализируется на этапе установки в

The paper describes the research results relating the impact of temperature and duration of titanium products treatment with high-frequency currents on the chemical composition and phase- structural condition of the surface. It was found that at the temperature ranging from 600 to 1200 °C and duration of heat treatment not exceeding 300 seconds, nanostructured coatings of titanium dioxide with improved functional characteristics are formed.

Keywords: high-frequency currents, oxide coating, titanium, nanostructure

подготовленное костное ложе с определенной величиной натяга [4]. При установке имплантата его конструкция находится под действием динамической осевой нагрузки и в ряде случаев (при вкручивании) – тангенциальной. Во всех случаях поверхность имплантата, включая ее отдельные элементы, подвергается интенсивному трению и неизбежному износу в случае невысоких физико-механических характеристик [5-7]. Эти явления вызваны наличием твердых фрагментов в структуре кортикальной костной ткани. Имеются данные, что твердость, определяемая при микро- и наноиндентировании этих фрагментов, достигает 0,3...0,6 ГПа, что в ряде случаев превышает твердость многих традиционно используемых пористых покрытий, например плазмонапыленных. Получили широкое распространение различные

методы оксидирования металлов, основными из которых являются газотермическое, микродуговое и анодирование [8-12]. К их недостаткам относятся значительная энергоемкость процесса и необходимость использования специально подготовленных реакционных окислительных смесей. Упрочненный пористый наноструктурированный материал можно получить при использовании комбинации ряда процессов, например традиционного плазменного напыления в сочетании с термической активацией металлической основы [13, 14]. В связи с указанным целью данной работы является изучение влияния режимов термической обработки токами высокой частоты (ТВЧ) на химический состав, фазово-структурное состояние и морфологические характеристики оксидных покрытий имплантационных титановых конструкций, полученных высокоэффективной обработкой ТВЧ.

Экспериментальные металлические образцы представляли собой цилиндры из технического титана марки BT1-00 и конструкционного ($\alpha+\beta$)-титанового сплава марки BT16. Их поверхность подвергается формообразующей и воздушно-абразивной обработке. Титановые основы образцов подвергаются очистке в ультразвуковой ванне. Далее поверхность подготовленных образцов оксидируется при обработке ТВЧ [5, 7, 8, 15]. При достижении заданной температуры обработки 600, 800, 1000 и 1200°C потребляемая мощность P лабораторного устройства нагрева ТВЧ составляет 80, 170, 290 и 550 Вт, соответственно. Режимам обработки экспериментальных образцов покрытий присвоена двойная нумерация: первое число соответствует температуре T термообработки титановой основы, второе – продолжительности t процесса. Например, режим 1000-120 соответствует температуре 1000°C и продолжительности обработки 120 секунд, при этом потребляемая электрическая мощность составляет 290 Вт.

Фазово-структурное состояние поверхности образцов после обработки ТВЧ изучается с применением рентгенофазового анализа (РФА) на приборе Gemini/Xcalibur (CuK α -излучение, $\lambda = 1,54 \text{ \AA}$). Морфология покрытий исследуется элек-

тронно-микроскопическим методом в микро- и нанометровом масштабе для выявления закономерностей структурообразования. Определяются морфологические параметры пористо-кристаллической структуры, в частности форма и средняя величина кристаллов (зерен) и пор. Растровая электронная микроскопия (РЭМ) в сочетании с энергодисперсионным рентгенфлуоресцентным анализом (ЭДРФА) химического состава покрытий и приповерхностного слоя образцов проводится на приборе MIRA II LMU с детектором INCA PentaFETx3. Изменения концентрации кислорода, измеряемой в атомных долях (ат.%), и структуры титановых образцов с покрытиями изучаются также по микрошлифам.

На поверхности титана, имеющего исходную структуру α -Ti, при рассматриваемых режимах ИТО образуются оксидные покрытия. Фазовый состав поверхности в основном представлен диоксидом титана TiO₂, находящимся в фазе рутила, и титаном различного типа кристаллической структуры (рис. 1, табл. 1).

В поверхностном слое титановых образцов основными фазами являются исходная фаза α -Ti, соответствующая техническому титану BT1-00, основная фаза оксидного покрытия TiO₂ (рутил) и побочная фаза β -Ti, появление которой обусловлено ускоренным охлаждением нагретого образца титана выше 900°C. При температуре 600°C на всем рассмотренном интервале продолжительности процесса оксидирования четко выявляется только исходная фаза α -Ti. В среднетемпературном диапазоне при 800 °C и вблизи твердофазного превращения α -Ti $\leftrightarrow$ β -Ti, а также при ограничении поступления кислородсодержащей среды в высокотемпературном диапазоне при 1000...1200°C создаются условия, способствующие образованию тонкого оксидного подслоя TiO₂. Образующая наружная оболочка в высокотемпературном диапазоне при температуре 1200 °C представляет собой хрупкое толстослойное оксидное покрытие TiO₂ (рис. 2 а). Фазовый состав этих образцов представлен тремя составляющими: α -Ti, β -Ti и TiO₂ – подслоя рутила, определяемый в количестве 17...20 % (рис. 2 б).

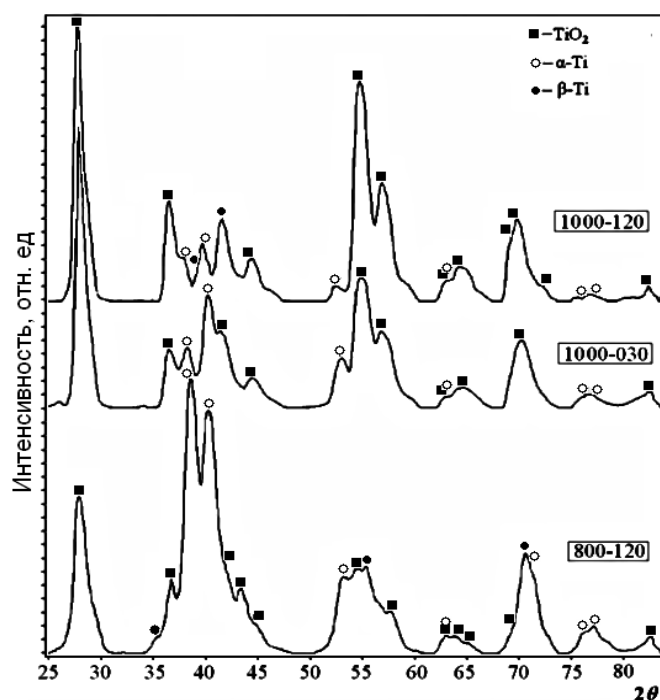


Рис. 1. Дифрактограммы поверхности титановых образцов с покрытиями (в прямоугольнике указаны режимы обработки ТВЧ)

Таблица 1

Фазовый состав основы имплантатов и образцов покрытий,
полученных обработкой ТВЧ технического титана BT1-00 и сплава BT16

Образец	Технологические режимы ИТО		Фазовый состав, %		
	Температура, °C	Продолжительность, с	α-Ti	β-Ti	TiO ₂
1	2	3	4	5	6
Титан BT1-00	—	—	100	0	0
600-001	600	1	100	0	0
600-030		30	100	0	0
600-120		120	100	0	0
600-300		300	100	0	0
800-001	800	1	100	0	0
800-030		30	100	0	0
800-120		120	36	41	23
800-300		300	44	35	21
1000-001	1000	1	22	0	78
1000-030		30	29	0	71
1000-120		120	17	0	83
1000-300		300	0	0	100
1200-001	1200	1	29	0	71
1200-001 (подслой)		1	46	34	20
1200-300		300	0	0	100
1200-300 (подслой)		300	28	55	17
Сплав BT16	—	—	60	40	0
BT16 травление 1 мин	—	—	44	56	0
BT16 травление 5 мин	—	—	38	62	0
BT16 800-120	800	120	30	0	70
BT16 1000-030 (подслой)	1000	30	94	0	6
BT16 1200-030 (подслой)	1200	30	46	0	54

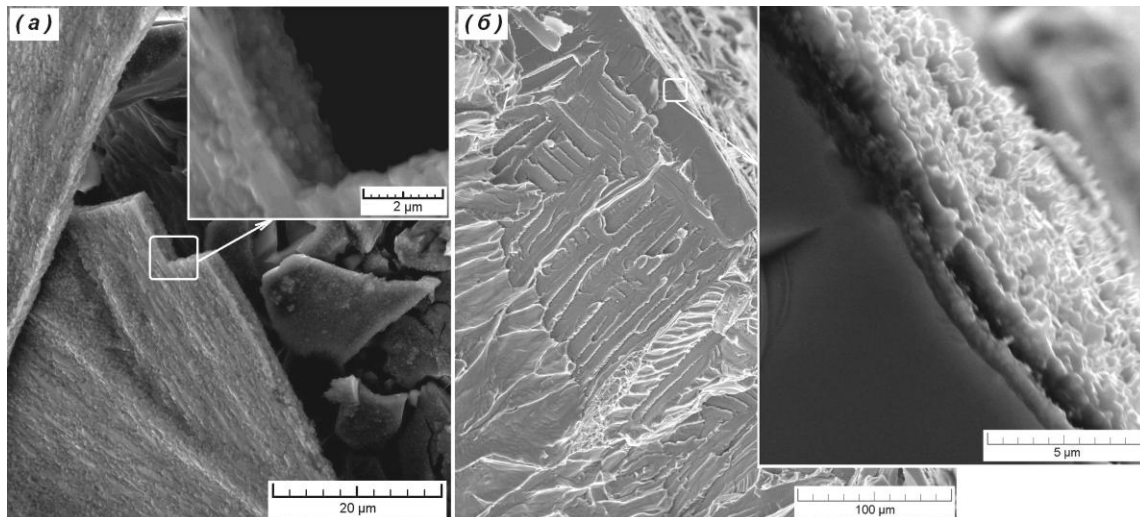


Рис. 2. РЭМ участков разлома покрытий, полученных на титане ВТ1-00 по режимам: а – 1000-120 (наружный оксидный слой); б – 1200-120 (фрактограмма образца и микроструктура подслоя) [16]

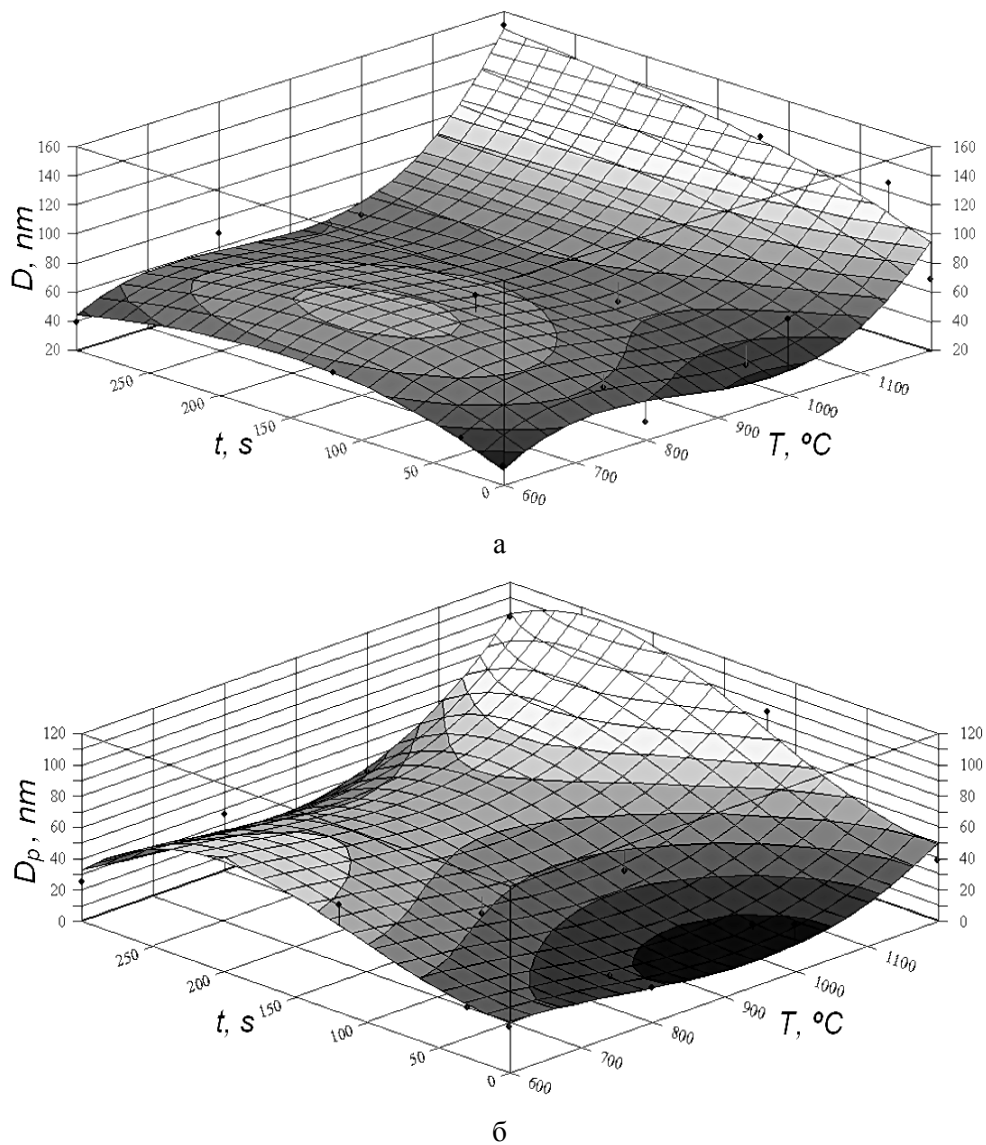


Рис. 3. Зависимости среднего размера зерен D (а) и пор D_p (б) оксидных покрытий от режимов обработки ТВЧ

Отличительной особенностью фазовых превращений, происходящих на поверхности титанового сплава ВТ16, является снижение количества α -Ti на всех этапах подготовки образца, включая травление (табл. 1). При оксидировании исходная фаза β -Ti практически полностью исчезает, при этом происходит образование TiO_2 . Процесс окисления протекает интенсивнее по сравнению с техническим титаном, что особенно хорошо заметно на режиме ИТО 800-120 (табл. 1).

Зависимость роста кристаллов рутила D и пор D_p в рассмотренном интервале режимов ИТО представлена в виде криволи-

$$Y = a + bT + ct + dT^2 + et^2 + fTt + gT^3 + ht^3 + iTt^2 + jT^2t,$$

где Y – рассчитанные значения для величины зерен D и пор D_p , нм (рис. 3); t – продолжительность обработки ТВЧ, с; T – температура термообработки, °C; $a, b, c, d, e, f, g, h, i$

нейных поверхностей (рис. 3). Характер зависимости среднего размера пор сходен с зависимостью для зерен, однако область максимума при высокотемпературных режимах ИТО менее выражена. Возрастание размера пор МОП в диапазонах низко- и среднетемпературной ИТО вплоть до высокотемпературной области характеризуется 1,5...2-кратным возрастанием.

Зависимости роста зерен и пор от режимов обработки ТВЧ титана представлены в полиномиальной форме с учетом взаимодействия всех технологических факторов обработки ТВЧ:

и j – эмпирические модельные коэффициенты, числовые значения которых представлены в табличной форме (табл. 2).

Таблица 2

Параметр	Коэффициенты модели									
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j
D	-1145,76	4,32	1,01	$-5 \cdot 10^{-3}$	$-2 \cdot 10^{-3}$	$-1 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-7}$
D_p	-238,10	1,16	0,42	$-2 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$-1 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-7}$	$-1 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-7}$	$7 \cdot 10^{-7}$

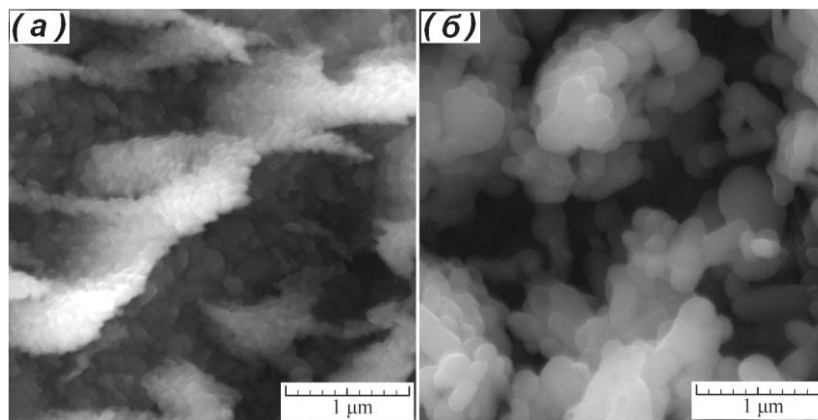


Рис. 4. Морфология оксидных покрытий, полученных на поверхности титанового сплава ВТ16 по режимам: *a* – 800-030; *б* – 1000-120

Сплав ВТ16 в рассматриваемом диапазоне изменения параметров обработки ТВЧ характеризуется интенсивным ростом подслоя, при этом концентрация рутила почти в 2 раза выше, чем для подслоя, полученного на техническом титане ВТ1-00. Образованный подслоем характеризуется высокой неоднородностью толщины, что связано с отделением его фрагментов. Морфологиче-

ской особенностью оксидированного титанового сплава ВТ16 является образование мелкозернистой (нанокристаллической) структуры, что особенно четко проявляется в низко- и среднетемпературном диапазоне (600...800°C) с продолжительностью термообработки не более 30 с (рис. 4 *a*). Использование высокотемпературных режимов (1000...1200°C) способствует сглаживанию

микрогеометрических параметров морфологии. Нанокристаллы оксидной керамики трансформируются в субмикрометровые зерна, при этом их форма остается практически неизменной (рис. 4 б).

Химические превращения, происходящие в приповерхностном слое титана BT1-00 и его сплава BT16, можно исследовать

при использовании подготовленных микрошлифов [16]. Процессы формирования покрытия и диффузии в приповерхностном слое титана и его высокопрочного сплава представлены комплексными данными РЭМ и табличными данными ЭДРФА (рис. 5; табл. 3).

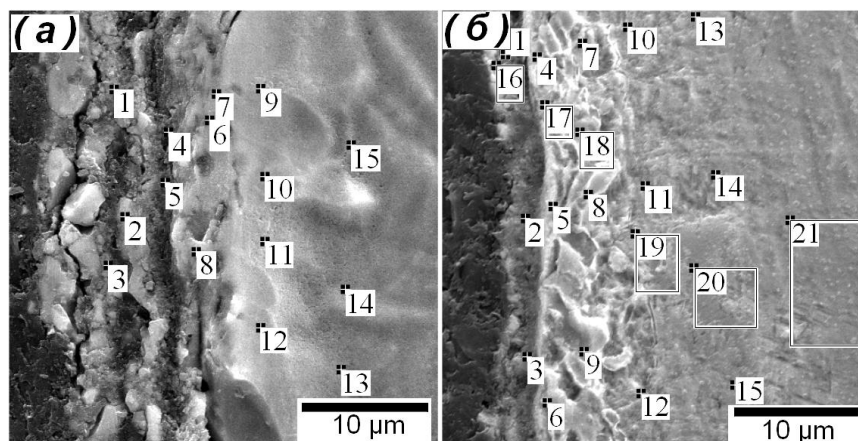


Рис. 5. РЭМ поверхности микрошлифов образцов покрытий, полученных на титане BT1-00 (а) и титановом сплаве BT16 (б) по режиму 1000-120

Таблица 3

Результаты ЭДРФА микрошлифов образцов после обработки ТВЧ титана BT1-00 и сплава BT16 по режиму 1000-120 (в ат.%)

Спектр	Состав образца, полученного на титане BT1-00		Состав образца, полученного на титановом сплаве BT16				
	O	Ti	O	Ti	Al	V	Mo
1	62,67	37,33	63,67	34,66	0,58	1,09	—
2	69,12	30,88	69,71	28,75	0,56	0,99	—
3	71,13	28,87	57,47	37,71	3,67	1,15	—
4	46,80	53,20	25,80	63,22	4,34	4,15	2,49
5	45,17	54,83	—	79,63	7,29	8,14	4,94
6	22,94	77,06	26,71	62,12	3,83	4,62	2,72
7	38,18	61,82	—	89,00	5,28	3,72	2,00
8	37,65	62,35	—	87,64	4,90	4,95	2,51
9	—	100,00	—	88,64	4,40	4,89	2,06
10	—	100,00	—	88,40	4,59	4,62	2,38
11	—	100,00	—	89,11	4,46	4,71	1,71
12	—	100,00	—	88,04	5,47	4,51	1,98
13	—	100,00	—	89,69	4,57	3,78	1,96
14	—	100,00	—	88,68	4,77	4,58	1,96
15	61,62	38,38	—	88,94	4,47	4,68	1,91
16	—	—	72,26	26,16	0,85	0,73	—
17	—	—	—	86,39	5,51	5,28	2,83
18	—	—	—	86,74	6,03	4,84	2,39
19	—	—	—	87,91	5,36	4,84	1,89
20	—	—	—	88,65	4,72	4,53	2,10
21	—	—	—	88,73	4,85	4,22	2,19

Структура поверхности технического титана BT1-00 после обработки ТВЧ характеризуется образованием покрытия диоксида титана с высокими показателями морфологической гетерогенности. Покрытия диоксида титана образованы нанометровыми и субмикрометровыми кристаллами овальной, игольчатой, пластинчатой и призматической формы. Образцам покрытий с наилучшими показателями морфологии соответствуют режимы обработки ТВЧ: 600-120 (при $P = 80$ Вт, $T = 600^\circ\text{C}$, $t = 120$ с), 800-120 (при $P = 170$ Вт, $T = 800^\circ\text{C}$, $t = 120$ с), 1000-001 (при $P = 290$ Вт, $T = 1000^\circ\text{C}$, $t \approx 1$ с), 1200-001 (при $P = 550$ Вт, $T = 1200^\circ\text{C}$, $t \approx 1$ с), а также в наибольшей

степени 1000-120 (при $P = 290$ Вт, $T = 1000^\circ\text{C}$, $t = 120$ с) при образовании высокопрочного подслоя. Структура поверхности титанового сплава BT16 после термообработки имеет однородную наноструктуру из овальных и призматических зерен.

Таким образом, имплантаты, изготовленные из термически обработанного титана, характеризуются наличием выраженных биосовместимых качеств поверхности за счет образования морфологически гетерогенного покрытия рутила. Это выявляется при электронно-микроскопическом исследовании в сочетании с химическим анализом.

Статья подготовлена при поддержке гранта РФФИ № 13-03-00898 «а» и проекта № 1189 в рамках базовой части государственного задания образовательным организациям высшего образования, подведомственным Минобрнауки РФ, в сфере научной деятельности.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Paital S.R.** Calcium Phosphate Coatings for Bio-Implant Applications: Materials, Performance Factors, and Methodologies / S.R. Paital, N.B. Dahotre // Materials Science and Engineering: R. 2009. № 66. P. 1-70.
2. **Dorozhkin S.V.** Bioceramics of Calcium Orthophosphates / S.V. Dorozhkin // Biomaterials. 2010. Vol. 31. № 7. P. 1465-1485.
3. **Catledge S.A.** Nanostructured Surface Modifications for Biomedical Implants / S.A. Catledge, M. Fries, Y.K. Vohra // Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology. 2004. № 1. P. 741-762.
4. **Бейдик О.В.** Экспериментальное исследование процессов остеоинтеграции имплантатов для наружного чрескостного остеосинтеза с различными биокомпозиционными покрытиями / О.В. Бейдик, К.Г. Бутовский // Гений ортопедии. 2002. № 4. С. 80-88.
5. Свойства покрытий диоксида титана, полученных индукционно-термическим оксидированием сплава BT1-00 / А.А. Фомин, А.Б. Штейнгауэр, И.В. Родионов, М.А. Фомина, А.М. Захаревич, А.А. Скапцов, А.Н. Грибов, Я.Д. Карсакова // Трение и износ. 2014. Т. 35. № 1. С. 43-51.
6. **Фомин А.А.** Плазменно-индукционное получение титан-гидроксипатитовых покрытий на дентальных имплантатах / А.А. Фомин // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2008. № 2 (32). Вып. 1. С. 49-58.
7. Наноструктура покрытий из диоксида титана, модифицированного гидроксипатитом, на медицинских титановых имплантатах / А.А. Фомин, А.Б. Штейнгауэр, И.В. Родионов, Н.В. Петрова, А.М. Захаревич, А.А. Скапцов, А.Н. Грибов // Медицинская техника. 2013. № 3. С. 24-27.
8. Нанокристаллическая структура поверхностного слоя технически чистого титана, подвергнутого индукционно-термическому оксидированию / А.А. Фомин, А.Б. Штейнгауэр, И.В. Родионов, М.А. Фомина, А.М. Захаревич // Письма в Журнал технической физики. 2013. Т. 39. Вып. 21. С. 70-75.
9. Preparation of Near Micrometer-Sized TiO₂ Nanotube Arrays by High Voltage Anodization / J. Ni, K. Noh, C.J. Frandsen, S. Kong, G. He, T. Tang, S. Jin // Materials Science and Engineering: C. 2013. Vol. 33. P. 259-264.

10. Microstructure and Bioactivity of Ca, P and Sr Doped TiO₂ Coating Formed on Porous Titanium by Micro-arc Oxidation / Y. Yan, J. Sun, Y. Han, D. Li, K. Cui // Surface and Coatings Technology. 2010. Vol. 205. P.1702-1713.

11. **Ou S.-F.** Microstructure and Surface Characteristics of Hydroxyapatite Coating on Titanium and Ti-30Nb-1Fe-1Hf Alloy by Anodic Oxidation and Hydrothermal Treatment / S.-F. Ou, C.-S. Lin, Y.-N. Pan // Surface and Coatings Technology. 2011. Vol. 205. P. 2899-2906.

12. **Rodionov I.V.** Application of the Air-Thermal Oxidation Technology for Producing Biocompatible Oxide Coatings on Periosteal Osteofixation Devices from Stainless Steel, Inorganic Materials / I.V. Rodionov / Applied Research. 2013. № 2(4). P.119-126.

13. **Фомин А.А.** Нанокристаллическая структура поверхностного слоя гидроксиапатитовых покрытий, сформированных при плазменном напылении с предварительной индукционно-термической обработкой металлической основы / А.А. Фомин, А.Б. Штейнгауэр, В.Н. Лясников //

Письма в Журнал технической физики, .012. Т. 38. Вып. 10. С. 64-69.

14. **Фомин А.А.** Биосовместимые наноструктурированные гидроксиапатитовые покрытия и технология их получения плазменно-индукционным напылением / А.А. Фомин, А.Б. Штейнгауэр, В.Н. Лясников // Упрочняющие технологии и покрытия. 2011. № 6. С. 35-42.

15. Оборудование для индукционно-термической обработки малогабаритных металлических изделий / А.А. Фомин, А.Б. Штейнгауэр, И.В. Родионов, С.Г. Калганова, А.М. Захаревич, Н.В. Петрова, А.Н. Грибов, К.А. Разумов // Индукционный нагрев. 2013. № 2(24). С. 44-47.

16. Химический состав, структура и свойства поверхности титана ВТ1-00 и сплава ВТ16 после индукционно-термической обработки / А.А. Фомин, И.В. Родионов, М.А. Фомина, А.Б. Штейнгауэр, А.В. Красников, Н.В. Петрова, А.Н. Грибов, В.С. Аткин // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2014. Т. 11. № 4. С. 481-494.

Фомин Александр Александрович – кандидат технических наук, доцент, докторант кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Родионов Игорь Владимирович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Фомина Марина Алексеевна – студентка Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Тукмаков Иван Алексеевич – студент Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Aleksandr A. Fomin – Ph.D., Associate Professor, Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Igor V. Rodionov – D.Sc., Professor, Head: Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Marina A. Fomina – Student, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Ivan A. Tukmakov – Student, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 12.11.14, принята к опубликованию 15.11.14

ИЗМЕРЕНИЯ

УДК 004.54.084

РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ ТЕРМОГРАММ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ СТРУКТУРНОГО ПЕРЕХОДА В ПОЛИМЕРЕ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЙ В ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ

А.А. Балашов, Д.С. Кацуба

REGRESSION ANALYSIS OF THERMOGRAMS WHEN DETERMINING THE STRUCTURAL TRANSITION IN POLYMERS USED IN THE INFORMATION-MEASUREMENT SYSTEM

A.A. Balashov, D.S. Katsuba

В результате применения способа снижения шума на термограмме в связи с нестабильностью мощности нагревателя, помех и других факторов была получена скорректированная графическая кривая, на которой можно наблюдать структурный переход в полимере.

Ключевые слова: *информационно-измерительная система, полимеры, регрессионный анализ, структурный переход, термограмма*

Полимеры находят широкое применение в различных отраслях промышленности, что вызвано разнообразием их свойств, которые можно изменять при применении новых технологий. Информация о структурных переходах в полимерах необходима для назначения технологических режимов их переработки в изделия.

В общем случае полимеры подразделяются на твердые (полиэтилен, поливинилхлорид, политетрафторэтилен и др.) и мягкие (резина, эластомеры и т.д.). К наиболее распространенным твердым полимерам относят политетрафторэтилен или фторопласт. Фторопласт используется в различных отраслях промышленности, в том числе в качестве конструкционного или изоляционного материала. На сего-

The corrected graphic curve demonstrating structural transition in polymers was obtained due to the method which ensures noise reduction on the thermogram and results from instability of the heater power, disturbances and other factors.

Keywords: *information-measurement system, polymers, regression analysis, structural transition, thermogram*

дняшний день одной из наиболее популярных разновидностей фторопласта считается коксонаполненный фторопласт (Ф4К20), получаемый с помощью метода плоскощелевой экструзии. Ф4К20 используется в цветной и черной металлургии, химической промышленности, электротехнике, авиастроении. В Ф4К20 происходят структурные твердофазные переходы в кристаллической фазе при 19,6°C и 30°C, которые сопровождаются поглощением теплоты и являются весьма удобными с точки зрения их обнаружения в ходе лабораторных исследований на различных устройствах [1-3].

Структурные твердофазные переходы в Ф4К20 были обнаружены методом неразрушающего контроля температурных ха-

рактических структурных переходов в полимерах, основанном на модели распространения теплоты в плоском полупространстве и реализованном в информационно-измерительной системе (ИИС) [4, 5].

Регистрация структурных переходов по аномалиями тепловой активности (сигналов) ε^* в узком температурном интервале с изменением интенсивного параметра (температуры или времени) предусматривает проведение градуировки ИИС по двум образцовым мерам. Способ включает следующие этапы [1, 4].

1. Градуировка ИИС: получение экспериментальных термограмм на двух образцах с известными теплофизическими свойствами (ТФС); определение рабочих участков термограмм; расчет постоянных ИИС.

2. Получение экспериментальных термограмм на исследуемом полимерном материале (ПМ). Разбиение термограммы на интервалы. Расчет текущих параметров d_{1i} , d_{0i} и температуры изделия T_s . Вычисление текущего значения ε^* по каждому интервалу. Построение зависимости $\varepsilon^* = f(T_s)$.

3. Определение температурно-временных характеристик структурных переходов, сопровождающихся аномальными изменениями ε^* на узком температурном интервале.

Информационно-измерительная система (рис. 1) состоит из персонального компьютера (ПК), измерительно-управляющей платы PCI-1202Н, сменных измерительных зондов (ИЗ), регулируемого блока питания (БП) [1].

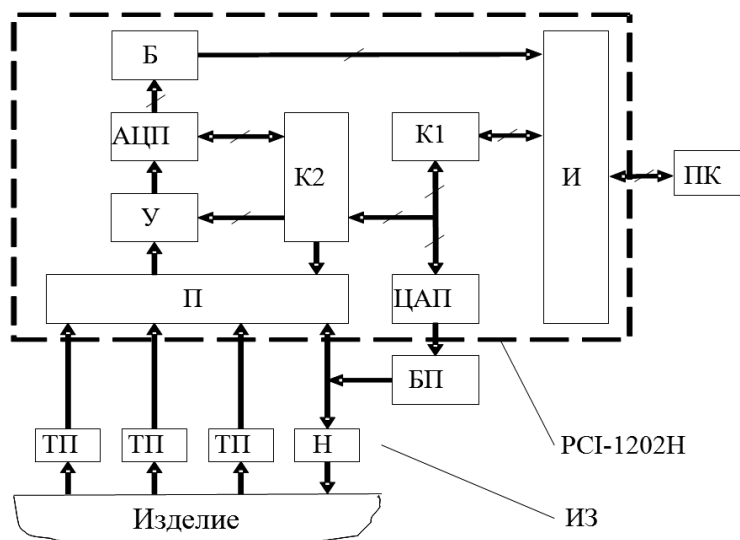


Рис. 1. Структурная схема информационно-измерительной системы

Измерительный зонд создает тепловое воздействие на исследуемое изделие и фиксирование температуры при помощи термоэлектрических преобразователей (ТП). Тепловое воздействие осуществляется с помощью нагревателя (Н), выполненного в виде тонкого плоского диска и встроенного в подложку ИЗ. Мощность и длительность теплового воздействия БП задаются программно через интерфейс (И), контроллер К1, цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП). Сигналы с ТП поступают через мультиплексор (П), усилитель (У), аналого-цифровой преобразователь (АЦП), буфер

обмена (Б) и интерфейс в ПК. Контроллер К2 обеспечивает необходимый порядок опроса каналов и различные диапазоны измерения на каждом из них.

Обработка сигналов на этапе устранения шумовой составляющей и оценки полезной составляющей осуществляется с помощью критериев и правил принятия решения [3]. Выделяют две большие группы критериев принятия решения: минимизация среднеквадратичного расстояния между элементами определенного класса функции (при обработке в пространстве непрерывных функций) и минимизация средне-

абсолютного расстояния (при обработке в пространстве кусочно-непрерывных функций). В теории обработки сигналов метод наименьших квадратов имеет широкое применение. Наряду с существующими методами выделения полезной составляющей используются различные методы сглаживания на основе квадратичной функции потерь. Способы устранения априорной неопределенности при решении задачи выделения полезного сигнала на фоне аддитивного шума рассматриваются в работах Давенпорта В.Б., Егизаряна К.О., Катковника В.Я., Уидроу В., Цыпкина Я.З. Одним из эффективных способов решения данной проблемы является использование адаптивных методов. Процесс адаптации в большинстве случаев является итерационным и основывается на результатах теории оптимизации. Для описания сигналов в частотной области применяется аппарат преобразования Фурье в большинстве радиотехнических систем. В основе многих методов фильтрации используется байесовский критерий – минимум байесовского риска.

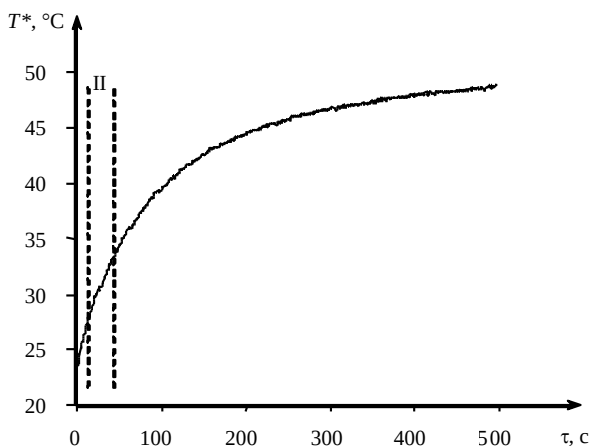


Рис. 2. Термограмма для изделия из Ф4К20 ($T^* = T_n + T$, где T_n – начальная температура, T – избыточная температура)

На рис. 2 представлена термограмма для изделия из Ф4К20. Условия эксперимента: радиус нагревателя $R = 4 \cdot 10^{-3}$ м; толщина изделия $H_n = 7 \cdot 10^{-3}$ м; мощность на нагревателе $N = 0,7$ Вт; временной шаг измерения температуры $\Delta\tau = 0,5$ с. Подложка зонда из пенополиуретана толщиной $H_n = 20 \cdot 10^{-3}$ м.

Начальная температура изделия $T_n = 24^\circ\text{C}$. Скорость нагрева $v = 10^\circ\text{C}/\text{мин}$ на рабочем участке II термограммы.

Оценки дисперсий текущих параметров d_{1i} и d_{0i} на рабочем участке в случае отсутствия структурного твердофазного перехода можно считать постоянными, их рассчитывают по формулам [1, 4]. Если в исследуемом изделии из полимера происходит структурный твердофазный переход, сопровождающийся тепловым эффектом, то значения текущих параметров d_{1i} и d_{0i} существенно изменяются в узком температурном интервале.

Построив графическую зависимость дисперсий $S_{d_{0i}}^2$ от температуры изделия T_s , по характерным сигналам определяют интервал значений температуры структурных твердофазных переходов в полимерах. На рис. 3 представлена графическая зависимость $S_{d_{0i}}^2 = f(T_s)$. Здесь T_s – среднее значение температуры из k измеренных значений, $^\circ\text{C}$ [1, 4].

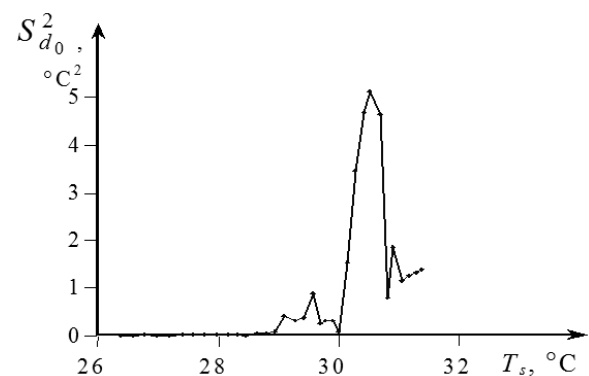


Рис. 3. Зависимость $S_{d_{0i}}^2 = f(T_s)$, построенная по экспериментальной термограмме

При регистрации термограммы в ходе проведения эксперимента возникают помехи, и наблюдается некоторая нестабильность мощности на нагревателе. Затем эта зашумленность термограммы проявляется на графической зависимости $S_{d_{0i}}^2 = f(T_s)$. Для определения наличия сигнала на уровне шума в термограмме был использован регрессионный анализ.

Задачи регрессионного анализа включают установление формы зависимости

ИЗМЕРЕНИЯ

между переменными, оценку функции регрессии и проверку достоверности построенной функции регрессии.

Уравнение регрессии предполагает наличие между переменными T^* и τ линейной статистической зависимости. Степень такой зависимости определяется с помощью коэффициента корреляции Пирсона. Одной из основных задач регрессионного анализа является установление вида функции регрессии. Параметры, входящие в функцию регрессии определяются с помощью метода наименьших квадратов, то есть находятся такие параметры модели, при которых сумма квадратов отклонений экспериментальных значений результирующего признака от теоретических, полученных по выбранному уравнению регрессии, будет стремиться к минимуму. Для оценки адекватности уравнения регрессии был использован коэффициент детермина-

ции R^2 , который показывает, какая доля вариации зависимой переменной обусловлена вариацией, объясняющей переменной. Коэффициент детерминации всегда находится в пределах интервала $[0,1]$. Чем ближе R^2 к единице, тем лучше регрессия аппроксимирует экспериментальные данные. С помощью средней относительной ошибки аппроксимации описывается качество (надежность) построенной функции регрессии. Средняя ошибка аппроксимации не должна превышать 10%.

Для регрессионного анализа использовали пакет прикладных программ Advanced Grapher Version 2.2. Критериями для принятия аппроксимирующей зависимости при обработке экспериментальной термограммы являлись: наибольшее значение множественного коэффициента детерминации и ошибка аппроксимации (см. таблицу).

Результат регрессионного анализа термограммы

Уравнение для термограммы	R^2	Ошибка аппроксимации
$T(\tau) = (8,351023 \cdot 10^{-17})\tau^7 - (1,6282566 \cdot 10^{-13})\tau^6 + (1,3116676 \cdot 10^{-10})\tau^5 - (5,7076589 \cdot 10^{-8})\tau^4 + (1,4926557 \cdot 10^{-5})\tau^3 - 0,0025392 \cdot \tau^2 + 0,3083838 \cdot \tau + 23,6932367$	0,999	0,086

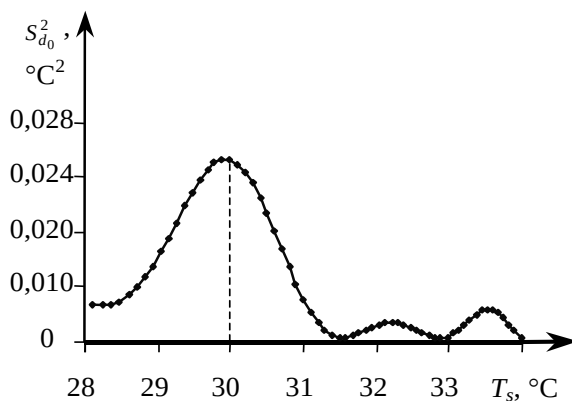


Рис. 4. Зависимость $S_{d_{0i}}^2 = f(T_s)$ для материала из Ф4К20 после снижения шумов

В результате применения способа снижения шумов на термограмме была получена скорректированная графическая зависимость $S_{d_{0i}}^2 = f(T_s)$ (рис. 4), на которой можно наблюдать структурный твердофазный переход при 30°C в коксонаполненном фторопласте марки Ф4К20.

Таким образом, с помощью регрессионного анализа термограмм возможно построить сглаженные графические зависимости $S_{d_{0i}}^2 = f(T_s)$ и $S_{d_{1i}}^2 = f(T_s)$, на которых явно проявляются структурные переходы в различных полимерных материалах.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Майникова Н.Ф.** Неразрушающий способ исследований релаксационных переходов в полимерных материалах / Н.Ф. Майникова, А.А. Балашов, С.О. Васильев // Вестник ТГТУ. 2014. Т. 20. № 1. С. 34-41.

2. Метод неразрушающего контроля температурных характеристик структурных переходов в полимерах / Н.П. Жуков, Н.Ф. Майникова, И.В. Рогов, А.А. Балашов // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. 2010. № 1-3. С. 253-259.

3. Методика повышения достоверности выделения полезного сигнала в условиях априорной неопределенности / В.И. Мар-

чук, А.И. Шерстобитов, С.А. Гридин, И.А. Торопов // Успехи современной радиоэлектроники. Зарубежная радиоэлектроника. 2013. № 5. С. 6-11.

4. **Полунин Е.П.** Измерительная система для определения теплофизических свойств теплоизоляционных материалов / Е.П. Полунин, Н.Ю. Тужилина, Д.С. Кацуба // Гаудеамус: Психолого-педагогический журнал. 2011. Т. 2. № 18. С. 136-138.

5. **Ивановский В.А.** Диагностика состояния полимерных материалов на основе анализа их электромагнитных флуктуаций / В.А. Ивановский // Приборы. 2010. № 6. С. 46-54.

Балашов Алексей Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергоэффективные системы» Тамбовского государственного технического университета

Кацуба Дарья Сергеевна – аспирант, ассистент кафедры «Энергоэффективные системы» Тамбовского государственного технического университета

Aleksey A. Balashov – Ph.D., Associate Professor, Department of Energy Efficient Systems, Tambov State Technical University

Darya S. Katsuba – Postgraduate, Assistant Lecturer, Department of Energy Efficient Systems, Tambov State Technical University

Статья поступила в редакцию 10.11.14, принята к опубликованию 15.11.14

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

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

СОЦИАЛЬНЫЙ АСПЕКТ

УДК 621.365.5

О ВОСТРЕБОВАННОСТИ СРЕДИ АБИТУРИЕНТОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

Е.М. Гришина, Д.А. Давыдов

DEMAND FOR QUALIFICATION IN ELECTROTECHNICAL AREA AMONG THE APPLICANTS TO UNIVERSITIES

E.M. Grishina, D.A. Davydov

Рассмотрена проблема востребованности среди абитуриентов электротехнического образования в области электротехнологии. Изложены результаты опроса студентов Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. о выборе профиля «Электротехнологические установки и системы» направления обучения «Электроэнергетика и электротехника».

Ключевые слова: *электротехнология, специальность, востребованность, абитуриент, социальный опрос*

Началом «Электротехнологии» как независимого направления инженерной подготовки, можно считать 1919 год, когда в Ленинградском электротехническом институте (Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ») была основана кафедра «Источники питания электрофизических и электросварочных установок» [1]. Позднее кафедры, осуществляющие подготовку специалистов подобного профиля, были открыты в Московском энергетическом институте, Новосибирском государственном техническом университете, Казанском государственном техническом университете, Саратовском государственном техниче-

The paper considers the issues relating the demand for high education in the area of electrical engineering among the applicants to universities. The authors present the results of the survey among the students at Yuri Gagarin State Technical University of Saratov relating the choice of the specialism Electrotechnical Plants and Systems within area Power and Electrical Engineering.

Keywords: *electrotechnology, specialty, demand, applicant, social survey*

ском университете и в других государственных высших технических учебных учреждениях. В ряде вузов были открыты кафедры, совмещающие подготовку электротехнологов с подготовкой электромехаников и электротехников. Такова, например, кафедра «Электротехнология и электрооборудование в сельском хозяйстве» в Волгоградском государственном аграрном университете. Но, на наш взгляд, специальность «Электротехнология» пока для абитуриентов малопонятна.

В чём причина? С одной стороны, солидная история, широкое распространение электротехнологического оборудования не только в промышленности, но и в быту

(СВЧ печи, электрообогревательные приборы и т.п., с другой стороны – низкие проходные баллы абитуриентов, желающих в 2010 году получить высшее образование в области электротехнологии: в последний набор на инженерную подготовку проходной балл в МЭИ составил 145 [2], СГТУ – 154). Причины, видимо следующие:

- невятное для большинства абитуриентов определение специальности. Подавляющее количество выпускников имеют представление только об отдельных электротехнологических процессах, таких как сварка, лазерные технологии, нагрев сопротивлением, но плохо представляют электротехнологию как инженерную область в целом. В частности, Википедия даёт очень размытую формулировку, не охватывающую всю сферу электротехнологий, причём статья, посвящённая электротехнологии, появилась только в 2010 году [3];

- созвучие слов «электротехнология» и «электротехника».

Об этом свидетельствуют и данные опросов студентов специальности ЭТС, поступивших в СГТУ в 2010 году.

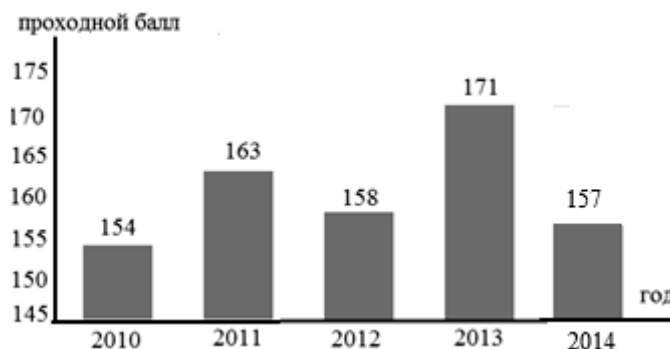
Так, согласно опросу, можно выделить три группы студентов.

1. Около 30% студентов выбрали данную специальность по профессиональным соображениям. Ведущим мотивом в этой группе стали социальная идентификация с родителями, компетентными в этой области. Именно мнение своих родителей, других значимых лиц, пример сверстников во многом определили выбор специальности.

2. 10 % затруднились с формулировкой.

3. Основная масса выбирала специальность ЭТС в качестве запасной, мотивируя в первую очередь её принадлежностью к электрическому направлению энергетического факультета.

Ситуация принципиально изменилась с переходом высшей школы от подготовки инженеров (специалистов) к подготовке бакалавров. «Электротехнология» оказалась в одном направлении с такими профилями как «Электроснабжение», а в некоторых вузах и рядом других. Причём, если учитывать баллы ЕГЭ как уровень подготовки абитуриентов, то колебания проходного балла на направление в целом за период 2010-2014 находятся в пределах 5%. То есть можно утверждать, что социальный состав поступающих фактически не изменился (см. рисунок).



Проходной балл на направления обучения «Электроэнергетика и электротехника»

Одна из особенностей бакалаврской подготовки заключается в выборе профиля обучения после третьего семестра. Таким образом, студент успевает адаптироваться к условиям обучения в вузе и имеет представление и об особенностях обучения и, благодаря таким дисциплинам как «Введение в специальность», «Перспективные

электротехнологии», о перспективах своей будущей профессиональной деятельности.

Разница в условиях выбора профиля отразилась на результатах опроса студентов 4 и 3 курсов, обучающихся по программе бакалавриата по направлению 140400.62 «Электроэнергетика и электротехника».

Так, первая группа, к которой можно отнести студентов, выбравших «Электротехнологию» ещё перед поступлением в университет, практически не изменилась и находится в пределах 30%.

В силу правил распределения по профилям, одним из которых является личное заявление студента, можно говорить об отсутствии второй группы.

Третья группа уменьшилась до 10 %. В первую очередь в силу превалирования студентов, изначально ориентированных на направление «Электроснабжение».

Но можно выделить четвёртую группу, определившихся уже во время обучения. Основную роль здесь сыграли имидж кафедры как коллектива и работа кураторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.eltech.ru>. Дата обращения (13.11.2014).

2. Национальный исследовательский университет Московский энергетический

институт [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://mei-tu.ru>. Дата обращения (13.11.2014).

3. Википедия-свободная энциклопедия [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org>. Дата обращения (13.11.2014).

Гришина Екатерина Михайловна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Давыдов Дмитрий Алексеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Ekaterina M. Grishina – Ph.D., Associate Professor, Department of Automated Electrotechnical Plants and Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Dmitriy A. Davydov – Ph.D., Associate Professor, Department of Automated Electrotechnical Plants and Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 10.11.14, принята к опубликованию 15.11.14

ЛЕТОПИСЬ

АЛЕКСАНДР ЕВГЕНЬЕВИЧ СЛУХОЦКИЙ



Доктор технических наук, профессор. Кавалер ордена Красной Звезды. Награжден медалями «За доблестный труд в ВОВ», «За оборону Ленинграда», «За доблестный труд» и другими.

А.Е. Слухоцкий – известный ученый с мировым именем в области электротермии, основоположник теории индукционного нагрева.

В 2012 году исполнилось 100 лет со дня рождения Александра Евгеньевича Слухоцкого. Это важная дата для его учеников, сотрудников ЛЭТИ и ВНИИТВЧ и для тех специалистов, кто развивает дело индукционного нагрева. Для всех нас важны и личность Александра Евгеньевича, и построенное им здание теории индукционного нагрева. Важны, несмотря на 100 лет бурного развития технологии решения сложных научно-технических задач.

А.Е. Слухоцкий родился в семье военных интеллигентов, его отец был царским генералом, артиллеристом, перешедшим на сторону Октябрьской революции и строившим Красную Армию. Молодой А.Е. Слухоцкий, как и все поколение двадцатых годов, увлекся электротехникой и радиотехникой. Его учителями в разное время были В.П. Вологдин и Л.Р. Нейман.

Пик напряженного творческого труда для Александра Евгеньевича пришелся на годы Великой Отечественной войны. Чудом уцелев в первую голодную блокадную зиму (он потерял продовольственные карточки и его спасли моряки с Красной Горки, которым он делал электросигнализацию), он оказался в эвакуации в Ессентуках и с группой комсомольцев-лэтишников пешком уходил через Главный Кавказский хребет от немецких танков. Потом была поездка через Среднюю Азию к

В.П. Вологдину на Урал, в Челябинск, куда тот был эвакуирован со своей лабораторией. В Челябинске – работа по закалке танковых деталей и заслуженная награда – орден в Кремле.

С первых дней создания ВНИИТВЧ Александр Евгеньевич начал строить единую теорию и методологию индукционного нагрева, для которой характерно соединение ясных физических представлений с реальным производственным опытом, учетом особенностей конструкции нагревательного оборудования. Основное внимание он уделял наиболее распространенным технологиям: поверхностной закалке и сквозному (кузнечному) нагреву. Это, естественно, подтолкнуло его к поиску разумного и доступного для инженеров того времени ответа на два наиболее важных вопроса: как учесть нелинейность кривой намагничивания стали и как рассчитывать

короткие, по существу двумерные нагревательные системы.

А.Е. Слухоцкий, опираясь на работы Л.Р. Неймана и классический аппарат схем замещения, нашел решение этих проблем, альтернатива которому возможна только сегодня при использовании всех возможностей вычислительной математики. Итогом этой работы стали книги, которые и сегодня не потеряли свою актуальность. Можно только удивляться широте анализа индукционных систем, проведенных Александром Евгеньевичем, в руках которого был только классический аппарат одномерного анализа. Сегодняшнего специалиста в области индукционного нагрева поражает широта охвата технических проблем А.Е. Слухоцким: от нагревательного индуктора до современных типов ключе-

вых источников питания. Работы по электронным и ионным инверторам были пионерскими в нашей стране и проложили путь к сегодняшнему состоянию полупроводниковых источников питания. В своих работах Александр Евгеньевич все время был нацелен не на абстрактные проблемы, а на оптимальную реализацию той или иной технической задачи. Именно это делает результаты А.Е. Слухоцкого неуязвимыми на протяжении полувека. Став после смерти В.П. Вологодина заведующим кафедрой в ЛЭТИ, Александр Евгеньевич создал мощную школу теории индукционного нагрева, известную во всем мире. Залогом этого было уникальное сочетание требовательности и доброжелательности Учителя к ученикам.

*Доктор технических наук, профессор П.А. Кошелев,
кандидат технических наук, доцент С.Г. Гуревич,
кандидат технических наук, доцент Н.А. Павлов*



САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ (ЛЭТИ)



В 2016 г. Санкт-Петербургскому государственному электротехническому университету (ЛЭТИ) исполняется 130 лет.

В сентябрьском номере за 1886 год журнал «Электричество» сообщал: «...Наконец, в четверг 4 сентября в 1 час дня это бесспорно полезное, ставящее нас в полную независимость от заграницы училище телеграфных инженеров открыто... Несмотря на желание придать торжеству освящения и открытия скромный, чисто семейный характер, оно вышло торжественным, насколько требовал случай открытия первого в России Высшего технического училища почтово-телеграфного ведомства».

ЛЭТИ – гордость отечественной электротехники.

В 1883 году министр внутренних дел граф Д.А. Толстой представил в Государственный Совет проект Положения и Штата Технического училища. 3 июня 1886 года он удостоился Высочайшего утверждения. Директором Училища был назначен Н.Г. Писаревский, видный общественный деятель России. Для помещения Училища была приспособлена часть здания бывшего Телеграфного департамента (Ново-

Исаакиевская, д. 18), и 4 сентября 1886 года состоялось открытие Училища.

Преподавательский состав Училища состоял в основном из выпускников Петербургского университета.

Результаты первых 5 лет работы Технического училища показали необходимость увеличения сроков обучения и расширения учебных программ, и 11 (23) июня 1891 г. императором Александром III был подпи-

сан указ о преобразовании Технического училища в Электротехнический институт с правом защиты дипломной работы после первого года практической работы.

В 1889 г. из числа первых выпускников были оставлены для преподавательской деятельности будущие профессора П.С. Осадчий и П.Д. Войнаровский.

В 1893 г. в институт для чтения курса электротехники был приглашен выпускник университета М.А. Шателен, первым в России получивший звание профессора электротехники, будущий академик. С 1894 г. курс теоретической электротехники читал профессор университета И.И. Боргман.

После кончины Н.Г. Писарецкого в 1895 г. институт возглавил Н.Н. Качалов. Под его руководством был разработан проект преобразования института, в котором деятельное участие приняли многие крупные ученые, профессора университета, в том числе управляющий Главной палаты мер и весов Д.И. Менделеев. В новом положении задач института определялась подготовка специалистов по всем направлениям электротехники.

4 (16) июня 1899 г. ЭТИ получил статус высшего учебного заведения с введением пятикурсного обучения, а с 12 (24) августа 1899 г. получил наименование «Электротехнический институт императора Александра III». С 1900 г. выпускникам присваивалось звание инженеров-электриков.

Начало XX века ознаменовалось началом строительства комплекса зданий для Электротехнического института. В 1903 г. строительные работы были в основном завершены и состоялся перевод института в новое здание на Аптекарском острове.

В начале 1901 учебного года профессором кафедры физики был назначен А.С. Попов, деловые связи которого с Электротехническим институтом начались ещё в 1897 г. С введением выборности на должность директора А.С. Попов в 1905 г. был избран директором ЭТИ.

За период 1901-1908 гг. в ЭТИ сложилась система образования «в области радио». Это были первые в России элементы системы радиотехнического образования.

Внезапная смерть А.С. Попова в январе 1906 г. не прервала сложившуюся структуру радиотехнической подготовки. Последователи А.С. Попова профессора А.А. Петровский и Н.А. Скрицкий совершенствуют структуру радиотехнического образования: в учебных планах тех лет появляются дисциплины «Беспроволочный телеграф», «Электрические колебания и волны», издаются учебные пособия, и в 1916 г. в ЭТИ начинается подготовка студентов по специальности «Радиотелеграфные станции».

В 1915 г. в ЭТИ начал работу выпускник института И.Г. Фрейман, который с 1917 г. до своей смерти в 1929 г. становится руководителем радиотехнической специальности. Проф. И.Г. Фрейман стал одним из основателей отечественной радиотехники как инженерной науки. Среди его учеников выпускник Военно-морской академии академик АН СССР А.И. Берг, выпускники института академики АН СССР А.А. Харкевич, А.Н. Щукин, чл.-корр. АН СССР В.И. Сифоров, С.Я. Соколов и впоследствии известные ученые профессора Б.П. Асеев, М.П. Долуханов, М.И. Конторович, А.Ф. Шорин, Е.Я. Щеголев, С.И. Панфилов, В.Н. Лепешинская и многие другие. Их работы во многом определили развитие радиотехники в нашей стране.

В 1907 г. преподавателем института стал Г.О. Графтио. С этого времени наиболее интенсивно стало развиваться энергетическое направление работ ЭТИ. Особенно ярко это проявилось в годы строительства первых тепло- и гидроэлектростанций. Уже в 1910 г. разработан проект Волховской ГЭС (разработчик и руководитель работ Г.О. Графтио). В разработке плана электрификации России (ГОЭЛРО) принимали участие многие профессора и преподаватели ЭТИ. Учеными и выпускниками ЭТИ в начале XX века был выполнен ряд пионерских работ, заложивших основы проектирования гидроэлектростанций, обеспечивших возможность выполнения задач плана ГОЭЛРО.

Под руководством профессора И.В. Егiazарова (академик Армянской АН

СССР) ЭТИ стал пионером и в области электрохимии. Первым преподавателем химии в Техническом училище был ученик А.М. Бутлерова и Н.Н. Бекетова А.А. Кракау. Он первым ввел в практику обучения лабораторные занятия по химии. «Эксперимент Кракау», как их тогда называли, перенял Технологический институт, и вскоре эта система утвердилась в высшей школе. Электрохимия стала обязательной в подготовке инженеров-электриков, а ЭТИ дал начало русской школе электрохимии. Профессора ЭТИ, будущие академики Н.С. Курнаков, И.В. Гребенщиков, чл.-корр. АН СССР П.Ф. Антипин, профессора А.А. Кракау, Н.А. Пушкин, М.С. Максименко и ряд других добились выдающихся результатов. Достаточно сказать, что А.С. Пушкин совместно с Э.Э. Дишлером и М.С. Максименко получили первый «русский алюминий» в стенах ЭТИ и разработали первый промышленный метод его получения на базе отечественных месторождений. Создание основ отечественной электрометаллургии было заложено трудами ученых ЭТИ – ЛЭТИ.

Выпускником ЭТИ профессором А.А. Смуровым была создана научная школа в области техники высоких напряжений и передачи электрической энергии. Лаборатория техники высоких напряжений, созданная А.А. Смуровым в 1920 г. в ЛЭТИ, была крупнейшей в Европе. Начиная с 1932 г., лаборатория взяла на себя инициативу по разработке проектов защиты от перенапряжения электрических сетей Донэнерго, Центрэнерго, Уралэнерго.

Научные труды и практические разработки учеников А.А. Смурова, профессоров Г.Т. Третьяка, Л.Е. Машкилейсона, К.С. Архангельского, В.И. Иванова и их коллег и учеников обеспечили создание крупных энергосистем с быстродействующей защитой генераторов, трансформаторов и линий электропередач.

Организация первой в мире кафедры электропривода (1922 г.), основание отечественной школы электропривода как нового научного направления в электротехнике связаны с именем ученика профессора

В.В. Дмитриева профессора С.А. Ринкевича. На базе этой кафедры в последующие годы были созданы кафедры с учетом решения задач электрификации в различных отраслях промышленности. В 1927-1929 гг. в ЛЭТИ была создана первая в стране научно-исследовательская лаборатория электропривода. Ученики профессора С.А. Ринкевича профессора А.В. Фатеев, Г.В. Одинцов, А.В. Берендеев, Б.И. Норневский, А.В. Башарин создали свои научные школы.

В 1930 г. в ЛЭТИ по инициативе чл.-корр. АН СССР профессора В.И. Коваленкова и профессора Н.А. Скрицкого создается специальность «Телемеханика» и несколько позже кафедра автоматики и телемеханики (заведующий кафедрой профессор В.А. Тимофеев). Развитие систем управления привело к созданию первой в стране кафедры «Синхронно-следящие системы» под руководством профессора Д.В. Васильева. Появившиеся несколько позже кафедры корабельных систем управления, электрификации и автоматизации промышленности, автоматики и процессов управления создали своей совокупностью мощный научно-образовательный комплекс подготовки специалистов по широкому спектру специальностей. Безусловным руководителем этого направления в течение многих лет был чл.-корр. АН СССР А.А. Вавилов.

С начала 30-х годов в ЛЭТИ началась подготовка, говоря современным языком, по вычислительной технике. Первоначально специалисты обучались счетно-решающей технике, основанной на электромеханических принципах. Пройдя свой путь развития через аналоговые, цифроаналоговые вычислительные машины, кафедра вычислительной техники ЛЭТИ стала одной из ведущих в этой области.

Впервые в стране исследования в области электроизоляционных материалов начались в ЛЭТИ под руководством А.А. Смурова в высоковольтной лаборатории. С 30-х годов в ЛЭТИ работы были продолжены Н.П. Богородицким в направлении разработки керамических материа-

лов для радиотехнической аппаратуры. Создание кафедры диэлектриков и полупроводников в 1946 г. под руководством Н.П. Богородицкого послужило мощным стимулом к развитию научных работ и постановке учебного процесса в области радиоматериаловедения, а затем и микроэлектроники. Сейчас по инициативе вуза организовано направление подготовки специалистов в области наноэлектроники и нанотехнологии.

Первая электровакуумная лаборатория была создана в 1921 г. по инициативе профессора М.М. Глаголева. В 1930 г. по инициативе профессоров М.М. Глаголева и А.А. Шапошникова была организована специальность «Электровакуумная техника». На этом направлении появились новые кафедры, осуществлявшие подготовку по широкому кругу специальностей электронного приборостроения.

Ещё одним примером появления в ЛЭТИ первых в стране специальностей стали «Ультразвуковая техника» и «Высокочастотная электротермия».

Развитие электротермии в ЛЭТИ связано с деятельностью чл.-корр. АН СССР В.П. Вологодина, работавшего в институте с 1924 г. В 1935 г. В.П. Вологдин создал при ЛЭТИ лабораторию электротехники высоких частот, которая в 1947 г. была преобразована в научно-исследовательский институт токов высокой частоты. Тогда же были учреждены новая специальность и новая кафедра «Высокочастотная техника» под руководством В.П. Вологодина. За прошедшие годы профиль подготавливаемых специалистов по кафедре изменялся с развитием техники, но и сейчас кафедра «Электротехнологическая и преобразовательная техника», преемница кафедры В.П. Вологодина, является ведущей по этим специальностям.

Одним из старейших направлений в области электромашиностроения в Электротехническом институте была подготовка специалистов по электрическим машинам и аппаратам. Кафедра «Электрические машины» была организована в 1899 г. Первым её руководителем был профессор

А.А. Воронов, его сменил в 1913 г. профессор Ф.И. Холуянов, ставший автором первых отечественных учебников по электрическим машинам. Только краткий перечень имен выпускников и преподавателей кафедры дает представление о её значении для отечественной промышленности и науки. Это академик АН СССР А.П. Костенко, чл.-корр. АН СССР А.Е. Алексеев, профессора В.Т. Касьянов, Р.А. Лютер, В.К. Горейличенко и ряд других.

В институте в разные годы работали выдающиеся математики России профессор К.А. Поссе, академик В.И. Смирнов, чл.-корр. АН СССР А.Н. Кошляков, чл.-корр. АН СССР Г.В. Колосов, профессор Г.М. Фихтенгольц.

В годы Великой Отечественной войны многие преподаватели, сотрудники и студенты института ушли на фронт. В результате эвакуации основной коллектив ЛЭТИ после тяжелых испытаний оказался в Ташкенте, лаборатория высокочастотной электротермии профессора В.П. Вологодина – в Челябинске, лаборатория электроакустики и звуковой техники профессора С.Я. Соколова – в г. Горьком (Нижний Новгород). В осажденном Ленинграде оставалась группа ученых под руководством профессора С.А. Ринкевича. В апреле 1942 г. усилиями профессора С.А. Ринкевича в Ленинграде при ЛЭТИ было создано Бюро научно-исследовательских работ Наркомата судостроительной промышленности, выполнявшее работы по переоборудованию и ремонту электрических устройств судового оборудования. Профессор А.А. Алексеев на Ладоге организовал работы по сварке металлических конструкций причалов и судов, работавших на Дороге жизни.

В 1956 г. кафедра приборов управления стрельбой (ПУС) была преобразована в кафедру счетно-решающей техники, а в 1960 г. получила название кафедры вычислительной техники. В развитие кафедры большой вклад внесли её заведующие профессор Я.В. Новосельцев и В.Б. Смолов. Благодаря усилиям профессоров А.Н. Лебедева, В.Б. Смолова, Е.П. Балашова, Е.П. Угрюмова и

Д.В. Пузанкова, создавших известные научные школы, кафедра стала самой крупной, одной из ведущих в стране, осуществляющей подготовку инженеров-системотехников по разработке ЭВМ и инженеров-математиков по их применению и математическому обеспечению.

По инициативе академика А.И. Берга в ЛЭТИ в 1962 г. была создана первая в СССР кафедра электронно-медицинской аппаратуры, положившая начало биотехническому образованию в стране. Развитие кафедры связано с именем лауреата Ленинской и Государственной премий профессора В.М. Ахутина.

Исследования широкого плана дали развитие ряду новых направлений, в том числе загоризонтной радиолокации (профессор В.М. Кутузов), электромагнитной совместимости (ЭМС) (профессор И.П. Харченко), рассеянию электромагнитных волн сложными целями (профессор В.В. Леонтьев). Начались исследования по обнаружению с помощью сейсмических волн (профессор А.Д. Викторов). Достижения в области научных исследований позволяли формировать новые направления и новые дисциплины в обучении.

В 1992 г. институт получил статус университета.

В 1993 г. Гуманитарный факультет СПбГЭТУ «ЛЭТИ» первым в Санкт-Петербурге и одним из первых в России начал обучение студентов по специальности «Связи с общественностью». В университете ежегодно проходит Всероссийский фестиваль преподавателей и студентов с международным участием «PR – профессия третьего тысячелетия».

В 1998 г. открылся Югорский филиал СПбГЭТУ в г. Югорске Ханты-Мансийского автономного округа.

В 1999 г. начал свое развитие факультет экономики и менеджмента.

В 2004 г. в «ЛЭТИ» открылась и успешно развивается специальность «Эргономика».

Бакалавров, магистров и дипломированных специалистов готовят в ЛЭТИ на 7 дневных факультетах. Подготовка бакалавров ведется по 19 образовательным направлениям, подготовка магистров – по 53 образовательным программам.

Подготовка кадров высшей научной квалификации осуществляется по 42 научным специальностям: 27 техническим, 6 естественно-научным и 9 гуманитарным. В университете функционируют 9 диссертационных советов по 23 научным специальностям. Ежегодно аспирантуру заканчивают более 80 человек.

Сейчас в «ЛЭТИ» обучается около 10000 студентов, аспирантов и слушателей. В университете работают 5 членов-корреспондентов РАН, 20 лауреатов национальных и международных наград, более 200 профессоров и докторов наук. Ежегодно по основным образовательным программам вуз выпускает свыше 1600 специалистов.

Среди выпускников «ЛЭТИ» – лауреат Нобелевской премии Жорес Иванович Алферов.

Университет известен одной из наиболее сильных в Санкт-Петербурге секций альпинизма, а также студенческим хором.

Последнее время университет уделяет больше внимания факультетам с уклоном на информационные технологии.

Бесспорные достижения «ЛЭТИ» – это результат деятельности многих поколений его преподавателей, сотрудников, выпускников и студентов.

*Информация предоставлена сотрудниками кафедры ЭТПТ ЛЭТИ
и получена из электронных ресурсов университета*

КАФЕДРА «ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА» САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА (ЛЭТИ)

Кафедра электротехнологической и преобразовательной техники (ЭТПТ) образовалась в результате объединения кафедры электротермических установок (ЭТУ) и кафедры источников питания электрофизических и электросварочных установок (ИПЭФУ) в 1982 г.

В 1919 г. профессором А.А. Смуровым была создана кафедра техники высоких напряжений (ТВН). А.А. Смуров начал с разработок в области электрифицированного транспорта, затем его интересы сосредоточились на технике высоких напряжений. Лаборатория ТВН в ЛЭТИ была создана А.А. Смуровым, а помещение высоковольтной лаборатории было организовано путем перекрытия внутреннего двора института. Лаборатория, оборудованная уникальным установками, оказала громадное влияние на развитие советской энергетики, формирование норм проектирования линий электропередач. Кафедра ТВН и лаборатория, носящая сейчас имя А.А. Смурова, стали базой для развития научных направлений, связанных с электрофизикой и схемами источников питания импульсного и непрерывного действия. Крупнейшей заслугой А.А. Смурова является объяснение механизма электрического пробоя в газах, жидкостях и твердых диэлектриках, позволившее усовершенствовать конструкции электрических аппаратов и повысить их надежность.

Учениками А.А. Смурова были профессор К.С. Архангельский, Г.Г. Третьяк, Л.Е. Машкиллейсон, имеющие большие заслуги в деле создания мощных линий электропередач.

В 1935-37 гг. А.А. Смуров привлекает в свою лабораторию таких ученых как А.А. Горев, А.А. Вульф, Н.Н. Щедрин, А.М. Залесский и совместно с ними реша-

ет вопросы релейной защиты и устойчивости параллельной работы синхронных генераторов. В лаборатории стали работать будущие доктора наук Н.П. Богородицкий, В.И. Иванов, Ю.Я. Юров, В.В. Пасынков.

В послевоенные годы под руководством заведующего кафедрой профессора В.И. Иванова в лаборатории им. А.А. Смурова сосредотачиваются работы в области создания мощных импульсных генераторов, релейной защиты энергосистем. С этого времени кафедра называется «Установки промышленной электроники» (УПЭ).

Кафедрой УПЭ до 1970 г. руководил профессор К.В. Булгаков.

В 1970 г. кафедра преобразуется в кафедру «Источники питания электросварочных и физических установок» (ИПЭФУ), возглавил ее профессор А.С. Васильев. На кафедре были развернуты крупные работы в области источников питания установок различных электротехнологических процессов, в первую очередь связанных со сваркой на постоянном и переменном токе, созданием мощных электронно-лучевых систем и первых технологических лазеров большой мощности.

В эти же годы был реконструирован высоковольтный зал и начались работы в области создания источников питания для лазерной и электронно-лучевой техники. Их возглавил будущий профессор В.М. Опре.

Конец семидесятых и восьмидесятые годы являются годами наибольшего успеха кафедры и отраслевой лаборатории ВЧЭТ. Объем работ кафедры и ОЛ ВЧЭТ превышает 2-3 млн. рублей в год, а учитывая значение этих работ, Минэлектротехпром СССР финансирует ЛЭТИ для строительства новых корпусов.

Известны работы кафедры в области математического моделирования электро-

сварочных процессов и создания источников питания с инверторами. В работах по источникам питания для сварочных процессов принял активное участие доцент Ю.А. Петров. Следует сказать и о работах доцента В.П. Стрельникова, который разработал оригинальную концепцию построения систем автоматического регулирования сварочных процессов.

В 1935 г. в ЛЭТИ профессором В.П. Вологдиным была организована лаборатория высокочастотной электротехники и ионных приборов. Вскоре она получила известность как научный центр, создавший метод поверхностной закалки при индукционном нагреве и разрабатывающий широкий круг вопросов высокочастотной электротермии. Важная роль в этих работах принадлежала сотрудникам В.П. Вологодина по Центральной радиолaborатории, перешедшим вместе с ним в ЛЭТИ: к.т.н. А.А. Фогелю, инженерам И.И. Контору, М.М. Вербицкому, В.Ф. Горюнову, а также пришедшим позже к.ф.-м.н. Г.А. Разоренову, А.Е. Слухоцкому.

Внедрение новых методов в промышленность потребовало подготовки специалистов. Начиная с 1937 г. несколько студентов ежегодно выполняли дипломные проекты, посвященные установкам индукционного нагрева. В числе их были В.В. Вологдин, в дальнейшем доцент кафедры ЭТУ, и К.З. Шепеляковский, позднее возглавивший коллектив высокочастотников ЗИЛа.

В 1940 г. на V курсе электроэнергетического факультета была создана специализация «Автоматизация электротермических установок». Шесть человек из первого выпуска стали известными специалистами в области высокочастотной электротермии, в том числе двое – директорами отраслевых институтов – В.Н. Богданов (ВНИИЭСО) и В.В. Вологдин (ВНИИТВЧ).

Великая Отечественная война прервала подготовку специалистов. Лаборатория В.П. Вологодина была эвакуирована в Челябинск, где ее работы на танковых заводах Урала привели к внедрению технологии индукционного нагрева для нужд обороны страны. За эти работы В.П. Вологдин

был удостоен Государственной премии СССР, а ряд сотрудников был награжден орденами и медалями. Будущий профессор кафедры А.Е. Слухоцкий был удостоен ордена Красной Звезды.

В 1946 г. было принято Постановление Совета Министров СССР об организации самостоятельного научно-исследовательского института (ВНИИТВЧ), который теперь носит имя В.П. Вологодина, и лаборатория со всем оборудованием переезжает в бывший Шуваловский дворец, а в ЛЭТИ открывается кафедра «Высокочастотная техника». Член-корреспондент АН СССР, профессор В.П. Вологдин возглавлял ее до своей кончины в 1953 г.

В 1949 г. В.П. Вологдин первым был награжден Золотой медалью им. А.С. Попова, а в 1953 г. вторично удостоен Государственной премии СССР за создание кузницы с индукционным нагревом.

С 1953 г. по октябрь 1982 г. коллективом кафедры руководил профессор А.Е. Слухоцкий. В 1954 г. кафедра получила название «Электротермические установки» (ЭТУ), сохранив направленность по высокочастотной электротермии.

Кафедра развернула работу в области теории индукционного нагрева, исследования и разработки новых источников питания – статических преобразователей частоты.

В 1963 г. на кафедре начинаются интенсивные работы по выращиванию кристаллов оксидов в индукторах – тиглях, на базе которых Ю.Б. Петров защитил сначала кандидатскую, потом докторскую диссертации. Это направление оказалось столь эффективным, что впоследствии захватило такие новые научные направления, как захоронение радиоактивных отходов, и ряд экологических направлений.

Большим событием в жизни кафедры явилась организация при ней в 1965 г. Отраслевой лаборатории высокочастотной электротехники (ОЛ ВЧЭТ), включившей в свою тематику, помимо традиционных также работы по сварке, плавке оксидов в холодных тиглях, плазменной и лазерной технике. Наиболее крупной внедренной

работой ОЛ ВЧЭТ является инверторная подстанция мощностью 11 МВт, частотой 1000 Гц для питания кузнечных индукционных нагревателей на Псковском заводе зубчатых колес (1976 г.).

В связи с возросшими запросами промышленности в 1966 г. прием на специальность был увеличен с одной до трех групп.

В 1970 г. в рамках специальности ЭТУ была открыта специализация «Электросварочные установки», переданная на новую кафедру «Источники питания электросварочных и физических установок», которую возглавил выпускник кафедры ЭТУ профессор А.С. Васильев.

В 1980 г. в рамках специальности ЭТУ была открыта новая специализация «Плазменные и лучевые установки».

После объединения в 1982 г. кафедр ЭТУ и ИПЭФУ объединенную кафедру «Электротехнологическая и преобразовательная техника» (ЭТПТ) возглавил профессор А.С. Васильев.

Кафедра выпускала инженеров по специальности «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» (АЭТУС) по трем специализациям – «Электротермические установки», «Электросварочные установки», «Лазерные и плазменные установки». Начиная с 1995 г. открыта новая специализация – «Электротехнологические установки защиты окружающей среды».

За это время на кафедре сформировалась ведущая научно-педагогическая школа «Высокочастотная электротермия» под руководством заслуженного деятеля науки и техники РФ, профессора А.С. Васильева.

В 1993 г. была образована Российская Академия электротехнических наук и в 1994 г. Международная Академия электротехнических наук. Профессор А.С. Васильев являлся членом президиумов этих академий и руководил отделением «Электротехнология».

Помимо основных научных направлений, на кафедре начинаются работы по раз-

работке методик проведения энергоаудитов различных предприятий и повышения энергоэффективности электротехнологических процессов. Проведенные энергоаудиты крупнейших металлургических, машиностроительных, электроэнергетических компаний позволили в некоторых случаях добиться снижения электропотребления на 20-40%. Ведутся научные исследования на стыке научных направлений; в частности, по внедрению информационных технологий в процессы управления электроэнергетикой.

Большой вклад в подготовку инженеров и развитие научных работ на кафедре внесли доценты Н.А. Павлов, С.Г. Гуревич, Г.Д. Комракова, Б.С. Полевых, Г.И. Дорофеев, Ю.А. Скворцов, А.М. Каргальцев, инженер А.Н. Щагин.

За время существования в ЛЭТИ подготовки в области электротермии с 1946 г. кафедрой ЭТПТ (ЭТУ, ИПЭФУ) выпущено более 1500 специалистов. Подготовлено значительное число специалистов для зарубежных стран.

Аспирантуру кафедры ЭТПТ успешно окончили более 125 человек. Восемь преподавателей кафедры ЭТПТ А.С. Васильев, Ю.Б. Петров, В.М. Опре, Ю.И. Блинов, П.А. Кошелев, В.Д. Гончаров, В.Б. Демидович, С.В. Дзлиев в разное время защитили докторские диссертации.

В 1997 г. кафедру ЭТПТ возглавил профессор Ю.И. Блинов. С этого времени научные работы кафедры получили международное признание. Большим достижением кафедры явился выигрыш пяти грантов Европейского Сообщества по программе TEMPUS в 1993, 1995, 1998, 2002 и 2010 гг. Партнерами по реализации проектов являлись дружественные кафедры Падуанского университета (Италия) и Ганновского университета (ФРГ). В рамках совместных проектов кафедра была оснащена большим количеством современного оборудования, которое позволило существенно повысить уровень подготовки современных специалистов.

*Информация предоставлена сотрудниками кафедры ЭТПТ ЛЭТИ
и получена из электронных ресурсов университета*

ИСТОРИЯ СВЧ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

Ю.С. Архангельский

Продолжение

9.

Работа в области СВЧ нагрева, начатая в СПИ в 1968 г. в отраслевой лаборатории электронной техники кафедры электроники Саратовского политехнического института, в значительной степени способствовала началу и успеху третьего этапа развития расчетных методов проектирования СВЧ электротермических установок. У истоков этих исследований стояли к.т.н., доцент Ю.С. Архангельский, аспирант В.А. Коломейцев, соискатели ученой степени кандидата технических наук инженеры Н.Г. Арделян, И.К. Сатаров.

В 1980 г. научная работа в области СВЧ электротермии начата на кафедрах «Электроснабжение промышленных предприятий» (Ю.С. Архангельский, Е.В. Колесников, С.В. Тригорлый, Л.Г. Бунин, Т.Н. Шишмило), «Теоретические основы электротехники» (В.А. Сосунов, И.И. Артюхов) энергетического факультета СПИ. На этом факультете в 1992 году была открыта кафедра «Автоматизированные электротехнологические установки и системы». Для ее преподавателей д.т.н., профессоров Ю.С. Архангельского, Е.В. Колесникова, к.т.н., доцентов С.В. Тригорлого, В.Ю. Коженикова, В.А. Лаврентьева, Е.М. Гришиной, Т.Ю. Дуаевой, Д.А. Давыдова, К.Н. Огурцова исследования в области СВЧ электротермии являются приоритетными.

На третьем этапе в СПИ была сформулирована самосогласованная (согласованная) краевая задача электродинамики и тепломассопереноса. Исключая из рассмотрения термообработку небольшого класса веществ, у которых электрофизические параметры зависят от напряженности электрического E и магнитного H полей, уже в сравнительно слабых полях

(ферромагнетики и сегнетоэлектрики), можно ограничиться линейной зависимостью вектора электрической индукции D от E и вектора магнитной индукции B от H , а так как подвергаемые СВЧ термообработке среды обычно изотропны, материальные уравнения можно записать в виде

$$D = \varepsilon E, \quad B = \mu H, \quad j = \sigma E$$

где ε , μ – абсолютные диэлектрическая и магнитная проницаемости диэлектрика; j – плотность тока проводимости; σ – проводимость диэлектрика.

Нагреваемые в СВЧ электротермических установках объекты являются диэлектриками с потерями, обладающими начальной (структурной) неоднородностью. Обычно эти неоднородности многочисленны, их размеры меньше длины волны в объекте, и поэтому в практических приложениях, воспользовавшись теорией смесей, можно заменить неоднородную среду однородной с эквивалентными параметрами.

У большинства сред ε' и $\tan \delta$ зависят от температуры. Следовательно, при нагреве таких сред ε' и $\tan \delta$ оказываются функциями координат и времени. Что касается тепловых параметров обрабатываемого объекта, то применимы традиционные для тепловых расчетов допущения о постоянстве этих параметров в узком интервале температуры (или влажности), введя в рассмотрение среднее на этом интервале значение.

В таком случае самосогласованная краевая задача электродинамики и тепломассопереноса для капиллярно-пористого материала имеет вид

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \mathbf{H} &= \mathbf{j} + \frac{d\mathbf{B}}{dt}, \\ \operatorname{rot} \mathbf{E} &= -\frac{d\mathbf{B}}{dt}, \\ \operatorname{div} \mathbf{D} &= 0, \\ \operatorname{div} \mathbf{B} &= 0, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\Theta}{dt} + V\nabla\Theta &= k_{11}\nabla^2\Theta + k_{13}\nabla^2U + k_{13}\nabla^2p + \frac{q_v}{c\rho}, \\ \frac{dU}{dt} + V\nabla U &= k_{21}\nabla^2\Theta + k_{22}\nabla^2U + k_{23}\nabla^2p, \\ \frac{dp}{dt} + V\nabla p &= K_{31}\nabla^2\Theta + k_{32}\nabla^2U + k_{33}\nabla^2p, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\Theta = T - T_0$, U , p – удельное влагосодержание и давление пара в объекте; k_{11} , k_{12} , ..., k_{21} , k_{22} , ..., k_{33} – теплообменные параметры; q_v определяется соотношением (1).

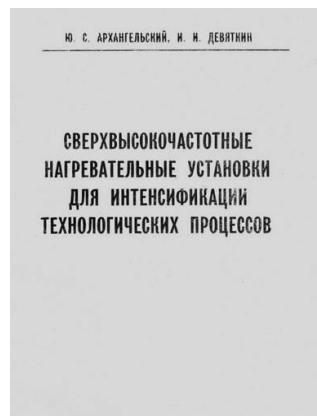
Граничные условия имеют вид

$$\begin{aligned} [n, H_2 - H_1] &= 0, \quad [n, E_2 - E_1] = 0, \\ n(D_2 - D_1) &= 0, \quad n(B_2 - B_1) = 0, \\ \lambda_g(\nabla\Theta)_n + [j_q(t)]_n + [r_j(t)]_n &= 0, \\ \lambda_m[(\nabla\Theta)_m\delta_Q + (\nabla U)_n + (\nabla p)_n\delta_p] + [j_m(t)]_n &= 0, \end{aligned} \quad (6)$$

где λ_g , λ_m – коэффициенты теплопроводности и массопроводности, δ_p – коэффициент фильтрационного переноса влаги; $\delta_\Theta = \delta/c_m$; c_m – удельная массоемкость; $j_g = h\Theta$ – плотность потока влаги, отводимой от поверхности материала (интенсивность испарения); h – коэффициент теплоотдачи конвекцией; h_m – коэффициент массообмена.

В монографической литературе самосогласованная краевая задача электродинамики и теплообмена впервые была опубликована в книге «Сверхвысокочастотные нагревательные установки для интенсификации технологических

процессов» Ю.С. Архангельского и И.И. Девяткина (1983 г.).

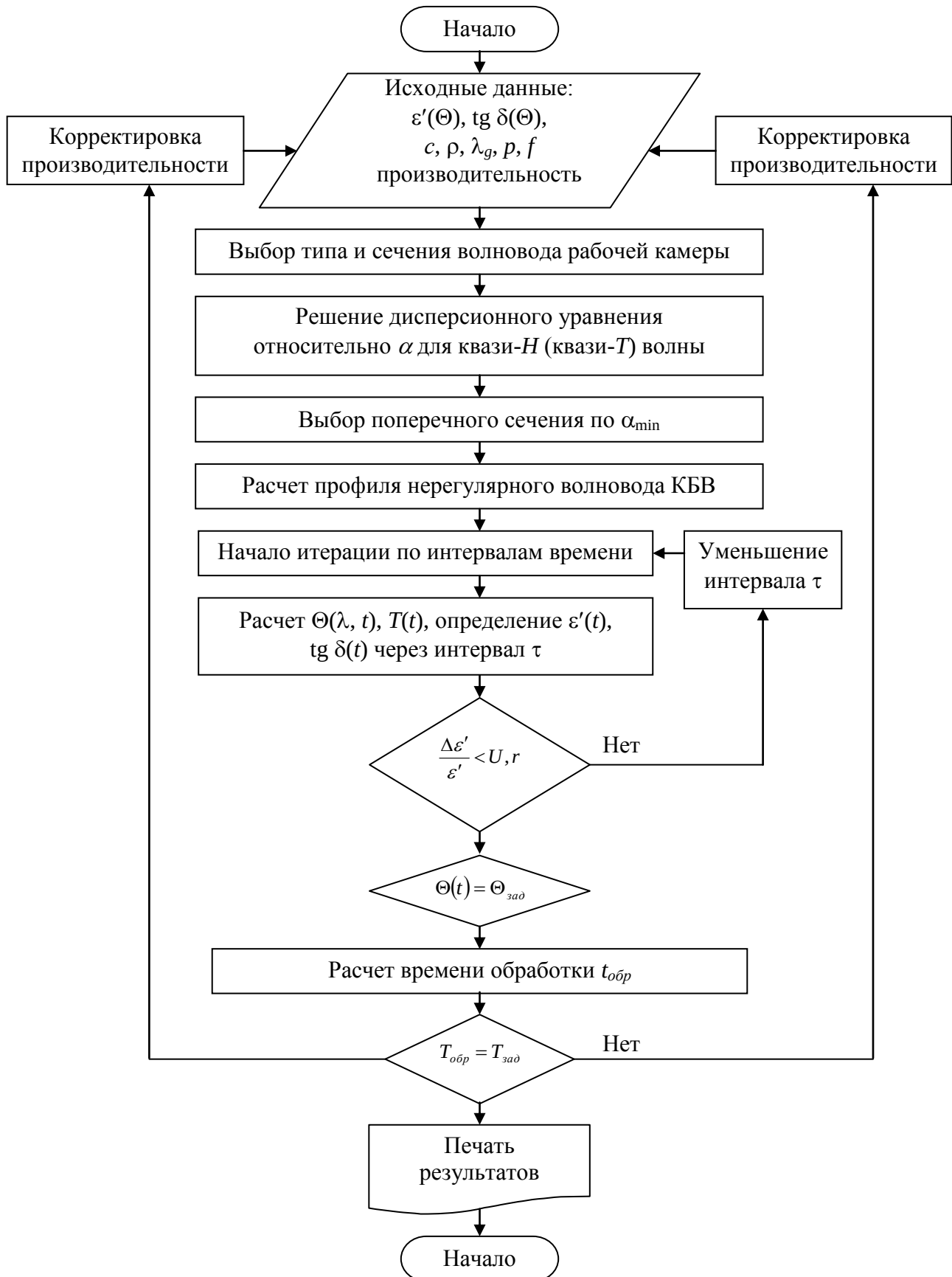


В монографии изложены вопросы расчета и конструирования СВЧ нагревательных установок, рассмотрены камеры СВЧ и источники СВЧ энергии таких установок, исследуются пути оптимизации камер, приведены сведения об их применении в различных отраслях. Первая монография, в которой излагается проблема расчета рабочих камер с одновременным учетом электродинамических и теплообменных процессов термообработки в СВЧ электромагнитном поле.

Решения самосогласованной краевой задачи (4)–(6) для рабочих камер различного типа приведены в монографиях «СВЧ электротермия» Ю.С. Архангельского (1998 г.) и «Камеры лучевого типа СВЧ электротехнологических установок» Ю.С. Архангельского, К.Н. Огурцова, Е.М. Гришиной (2010 г.).

Тепловые процессы в обрабатываемом объеме описываются решением краевой задачи теплообмена в приближении заданного электромагнитного поля, в свою очередь, найденного из решения краевой задачи электродинамики.

Решение самосогласованной краевой задачи (4)–(6) позволяет учесть взаимное влияние электромагнитных и тепловых процессов, а это, в свою очередь, дало возможность решить задачу синтеза рабочих камер, оптимизировать по геометрии размеры, КПД и равномерность термообработки, проводить математическое моделирование технологических процессов.

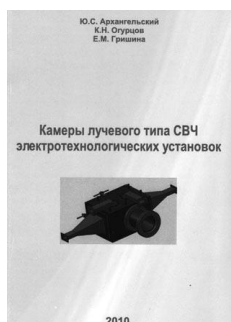


Алгоритм решения задачи синтеза КБВ и математического моделирования процесса термообработки



В монографии изложены основы СВЧ электротермии, систематизированы теоретические исследования, проведены экспериментальный материал и практические разработки, связанные с применением СВЧ энергии в термообработке сред, материалов и изделий.

Изложены вопросы технико-экономической оптимизации структуры СВЧ электротермического оборудования.



В монографии предложены методы расчета камер лучевого типа СВЧ электротехнологических установок для тепловой и нетепловой модификации диэлектриков. С помощью системного подхода

предложен порядок проектирования этого технологического оборудования.

В отсутствие массопереноса соотношения (4)-(6) описывают самосогласованную краевую задачу электродинамики и теплопроводности.

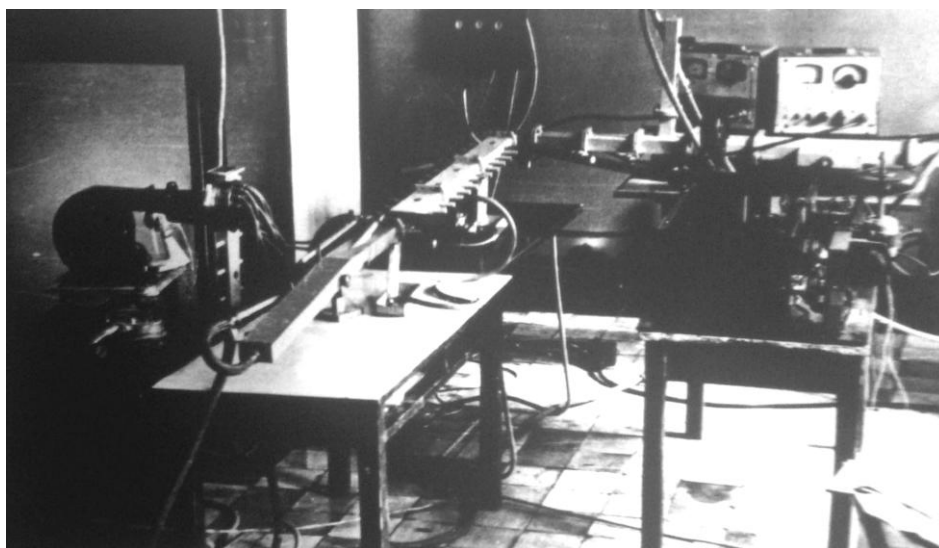
10.

Он чувствовал, начинается развал команды. Коломейцев защитил диссертацию и отдался. Арделян защитил диссертацию и перешел на энергофак. Сатаров защитил диссертацию, стал начальником научной лаборатории и неожиданно в нем вспыхнул костер чиновничьего тщеславия. С кем вести научную работу? В аспирантуру поступил выпускник СГУ Л.Г. Бунин, осталась работать в его группе окончившая кафедру электроники Т.Н. Шишмило.

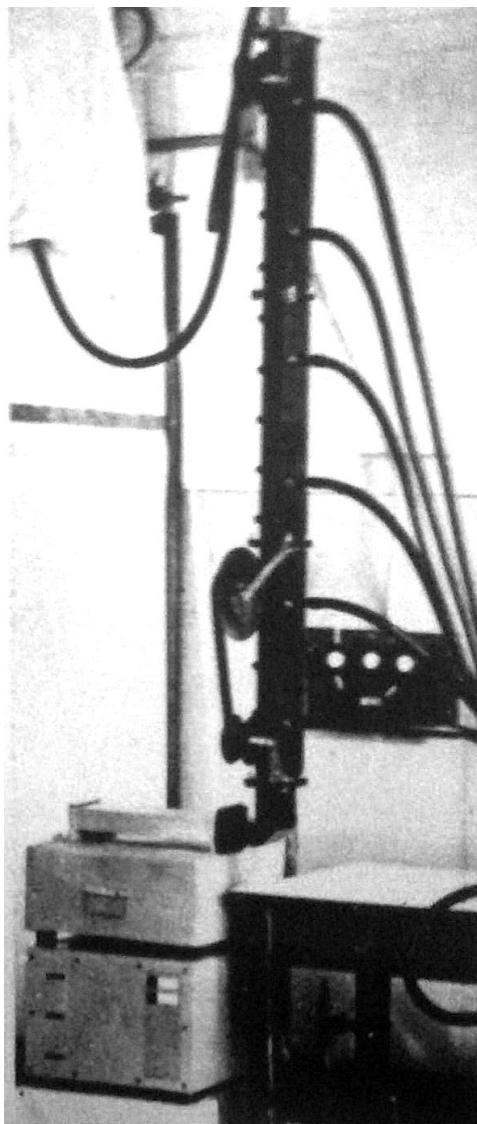
А что в работе? Разработкой СВЧ сушилок заинтересовался Научно-исследовательский кинофотоинститут (НИКФИ), начал финансировать эти работы. Мосфильм на СВЧ сушилках! Заманчиво.

Но их группа развалилась.

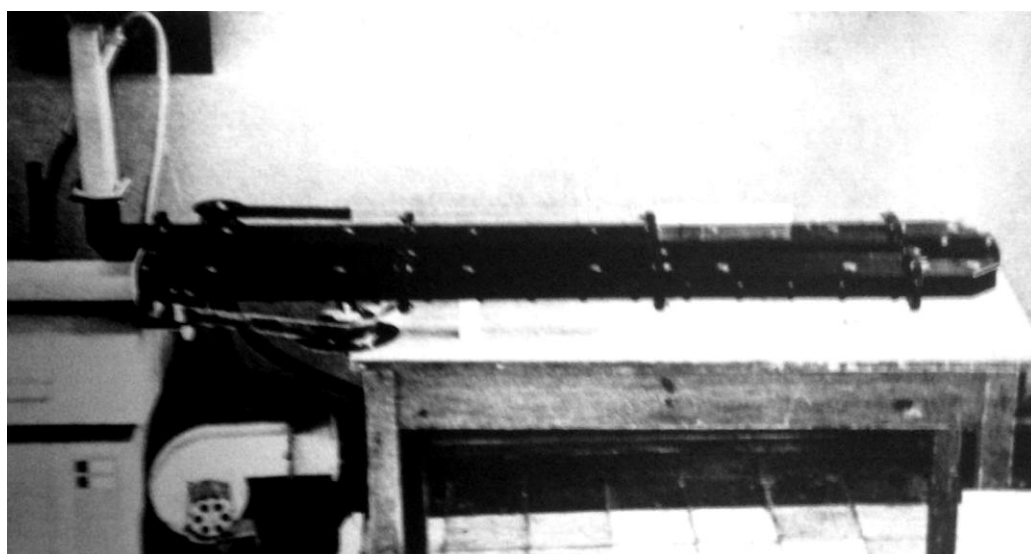
– Не удивляйся, – пояснили ему кафедральные ассистентки. – Советов беседует то с Коломейцевым, то с Сатаровым. Он боится за свое место. Ты пишешь докторскую, а ВАК его докторскую диссертацию не утвердил. К тому же ты поступил в докторантуру к Куликову.



Установка для экспериментального исследования технологии СВЧ сушки киноплёнки

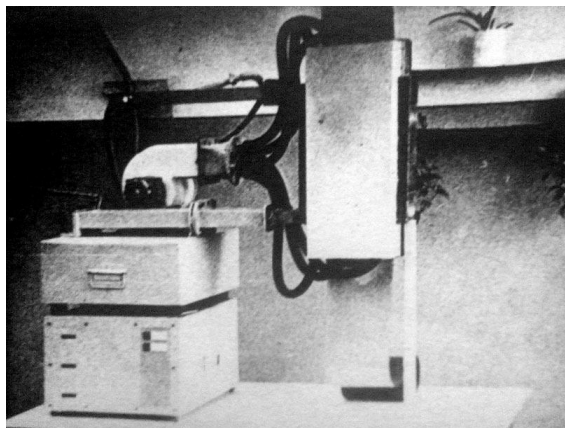


а

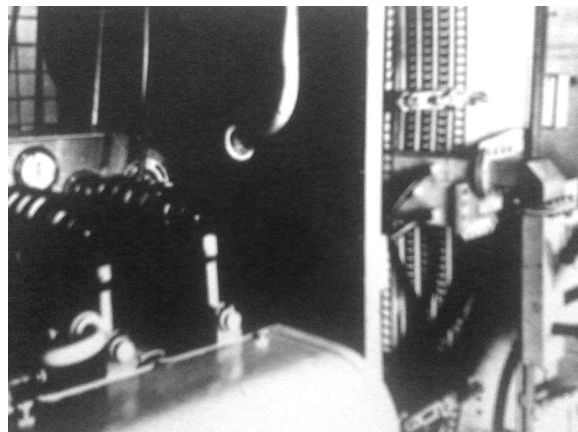


б

Малогабаритная установка для СВЧ сушки киноплёнки



Малогабаритная установки для СВЧ сушки аэрофотопленки



Камера СВЧ сушки кинопленки в проявочной машине (Мосфильм)



Куликов Э.Л. – доктор физико-математических наук, профессор. Окончил физический факультет Саратовского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского. Работал в СГУ, в НИИ электронной промышленности. В Саратовском политехническом институте создал и возглавил кафедру «Прикладная математика». Научные труды в области вариационных методов в электродинамике СВЧ.

– Слушай-ка! – как-то сказал ему Э.Л. Куликов. – Тут Советов рассказывает, что ты начал что-то нагревать в электромагнитном поле, создал какую-то дикую теорию. Расскажи-ка мне обо всем этом.

В конце рабочего дня небольшой кабинет заведующего кафедрой «Прикладная математика» был полон табачного дыма, на стульях, на полу в беспорядке валялись

листы ватмана с формулами, графиками, чертежами...

– И что здесь неправильно?

Так он, работая на кафедре электроники, стал докторантом кафедры «Прикладная математика». Первый докторант в истории СПИ.

За четыре года докторантуры изменилось многое. Заведующим кафедрой электроники стал доцент Г.Т. Казаков, ученик Н.М. Советова. Стало спокойнее, но нервных ситуаций хватало. В таких случаях помогал Ю.Г. Альтшулер.



Альтшулер Ю.Г. – доктор технических наук, профессор, работал в Саратовском государственном университете имени Н.Г. Чернышевского. Создал и возглавил кафедру «Теоретические основы электротехники» на энергетическом факультете Саратовского политехнического института. Научные труды в области электроники СВЧ.

Студентом он слушал лекции Ю.Г. Альтшулера на физфаке СГУ. И как-то так повелось, теперь в СПИ, взвинченный Советовым, он приходил на перемене в практически неотапливаемый кабинет Юрия Григорьевича, садился на кожаную кушетку перед сидящим за столом хозяином кабинета. Ю.Г. Альтшулер ни о чем не спрашивал, а начинал рассказывать, как ездил в командировку, как написал статью...

– Ну? Пришли в себя? Вам на лекцию? И мне...

Как-то декан В.М. Рассудов повел его к ректору А.И. Андриющенко.

Ректор встретил любезно.

– Юрий Сергеевич, вы написали докторскую диссертацию. Это похвально. Вы молоды, вам надо расти. Я предлагаю вам должность заведующего кафедрой АСУ.



Андриющенко А.И. – доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники СССР. Ректор Саратовского политехнического института с 1962 по 1988 год. Внес решающий вклад в развитие СПИ. Научные труды в области энергетики, технико-экономических методов проектирования ТЭС и АЭС. Основоположник Саратовской школы теплоэнергетиков.

11.

Инженерное решение самосогласованной краевой задачи электродинамики и те-

пломассопереноса, как показано в работах Саратовской школы электротехнологов, было получено в СПИ на базе теории длинной линии.

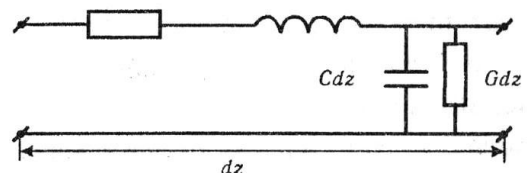
При $|\varepsilon| \gg 1$, где $\varepsilon = \varepsilon'(1 - j \operatorname{tg} \delta)$, погонные параметры эквивалентной схемы для прямоугольного частично заполненного диэлектриком прямоугольного волновода равны:

$$C = \frac{a}{60\pi^2 c b_1} \left[1 - \left(\frac{\lambda}{2a} \right)^2 \right]; \quad L = \frac{60\pi^2 b_1}{ca};$$

$$R_n = \frac{60\pi^2 F_R}{a \left[1 - \left(\frac{\lambda}{2a} \right)^2 \right] \sqrt{\varepsilon' \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}}};$$

$$X_n = \frac{60\pi^2 F_X}{a \left[1 - \left(\frac{\lambda}{2a} \right)^2 \right] \sqrt{\varepsilon' \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}}},$$

где $a \times b$ – сечение волновода; a – широкая стенка; $b_1 = b - b_2$, b_2 – толщина слоя диэлектрика, λ – длина волны генератора; F_R и F_X – функции от $\left(\frac{b_2 \sqrt{\varepsilon' \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}}}{\lambda} j\delta \right)$.



Эквивалентная схема линии передачи с потерями

Погонные параметры для круглого, частично заполненного диэлектриком волновода равны:

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon'_1}{\ln \frac{r_1}{r_3}}; \quad L = \frac{\mu_0\mu'_1}{2\pi} \ln \frac{r_1}{r_3};$$

$$R_n = \frac{1}{2\pi r_3} \operatorname{Re} \left[-j\eta_2 \frac{J_0(k_2 r_3)}{J_1(k_2 r_3)} \right];$$

$$X_n = \frac{1}{2\pi r_3} \operatorname{Im} \left[-j\eta_2 \frac{J_0(k_2 r_3)}{J_1(k_2 r_3)} \right],$$

где R_1 , r_3 – радиусы круглого волновода и диэлектрического стержня на его оси;

$k_2 = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon_2}$, ε'_2 , ε'_1 – диэлектрические параметры обрабатываемого диэлектрика и среды внутри волновода над стержнем ди-

$$\frac{b}{b_2} > 1 + \frac{\lambda \sqrt{F_R^2 + F_X^2}}{2\pi b_2 \sqrt{\varepsilon'_2 \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta_2}} \sqrt{\left[\varepsilon' - \left(\frac{\lambda}{2a} \right)^2 \right]^2 + (\varepsilon'_2 \operatorname{tg} \delta_2)^2}},$$

а для круглого волновода со стержнем обрабатываемого диэлектрика на его оси:

$$\ln \frac{r_1}{r_3} > \frac{\lambda \sqrt{\Phi_R^2 + \Phi_X^2}}{2\pi r_3 (\varepsilon' \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta_2})^2},$$

где Φ_R и Φ_X аналогичны функциям F_R и F_X для прямоугольного волновода.

С помощью эквивалентных схем были рассчитаны длина волновода рабочей камеры, оптимальный профиль нерегулярного волновода, распределение температурного поля по длине и поперечному сечению диэлектрика, коэффициент отражения, то есть КПД по использованию СВЧ энергии. Другими словами, разработан метод синтеза КБВ и математического процесса моделирования технологического процесса.

12.

В те годы научной специальности «Электротехнология» еще не было. Диссертационный совет по специальности «Электротермические процессы и установки» был только в Ленинградском электротехническом институте (ЛЭТИ), и он поехал туда на разведку. В Москве позвонил И.И. Девяткину.

– Вы в Ленинград? Слышали, что меняется руководство ВАК? Задержитесь на пару дней в Москве.

Через день он услышал по радио о назначении нового руководителя ВАК.

– Знаете? – ответил на его звонок И.И. Девяткин. – Советую с защитой не спешить. Дождитесь утверждения новых диссертационных советов.

И он вернулся в Саратов...

электрика; η_2 – характеристическое сопротивление обрабатываемого диэлектрика.

Условие применимости эквивалентной схемы для прямоугольного волновода со слоем диэлектрика на широкой стенке волновода имеет вид

Прошел год. И.И. Девяткин на его звонок согласился:

– Можно ехать.

В Ленинграде он знал только Ю.В. Лейбина.

– Заведующий кафедрой там Александр Сергеевич Васильев. Отзывы самые положительные.

– У нас на Неве – ВЧ нагрев, а у вас на Волге – СВЧ. Знаю... Вы ведь из радиофизиков? Сходите к нашим. Пусть они прочтут первыми, – сказал А.С. Васильев.

Он пошел искать коллег. Так, кабинет А.С. Попова, лекционная аудитория, на стене табличка «Здесь скрывался В.И. Ленин», коридор...

– При чем тут мы? – удивились радиоэлектронщики. – Это же электротермия... Ладно, оставьте... Через месяц позвоните.

Сколько раз ему еще придется приезжать в ЛЭТИ! Сколько раз он будет давать в СПИ телеграммы с просьбой продлить командировку!

Васильев пробежал глазами отзыв радиоэлектронщиков и сказал:

– Теперь вам надо показаться в НИИТВЧ.

– Кто вас знает? – спросили там.

– Рогов, Девяткин, – уверенно ответил он.

– Это кто такие?

– Москвичи.

– А здесь, в Питере?

– Лейбин...

– Это наш... И все? – собеседник посмотрел на него так, словно говорил: «И куда ты, дурашка, из своего Саратова в калашный ряд?»

– Знаете, неизвестный человек докторскую диссертацию не защитит. Так нет у вас знакомых? – и к нему подвинули его диссертацию.

– Еще Нетушил.

Собеседник потянул диссертацию к себе.

– С этого надо было начинать.

Он показал А.В. Нетушилу план своей будущей докторской диссертации во время стажировки в Москве, и тот его одобрил. Ему повезло участвовать в научных семинарах кафедры А.В. Нетушила...

– Вам надо сделать доклад по диссертации, – сказали ему в НИИТВЧ.



Нетушил А.В. – доктор технических наук, профессор. Один из основоположников ВЧ диэлектрического нагрева. Научные труды в области теоретических основ электротехники и высокочастотной электротермии.

Он делал доклад в актовом зале. Свободных мест нет... Вопрос – ответ, вопрос – ответ...

– Хорошо, – сказал А.С. Васильев. – Можете сдавать документы.

– Что-нибудь в конце весны, – сказали ему, приняв документы. – Не раньше. У нас очередь.

На дворе был ноябрь...

За два дня до защиты жена сказала:

– Я не хочу тебя расстраивать, но утром я встретила в нашей гостинице Советова.

Потом они встречали на вокзале оппонентов. Узнав о Советове, А.В. Нетушил улыбнулся:

– Если он выступит на вашей защите с критикой, все проголосуют за вас. Я знаю этот совет. Тут не терпят козни.

Позднее он узнал, что в тот же день в другом корпусе ЛЭТИ Н.М.Советов второй раз защитил свою докторскую диссертацию...

В СПИ никто не поинтересовался, защитил ли он диссертацию.

– Я защитил, – сказал он в коридоре пробежавшему мимо декану В.М. Рассудову.

– Что защитил?

– Диссертацию. Докторскую.

– А! – кивнул тот и побежал дальше.

Через неделю он вернулся в Ленинград, чтобы отправить документы в Москву, в ВАК.

– Не приму! – ответила ему девчонка в почтовом отделении. – Это не бандероль! Посылайте в ящике, посылкой.

– Нельзя. Нужно бандеролью.

– Делите на две части.

– Тоже нельзя, – он был в отчаянии.

– Да прими, – раздался женский голос из-за шкафа. – Диссертация у него.

– Вот всегда вы так, Мария Ивановна, – девчонка шлепнула штампом по бумажке. – Ходят здесь всякие!

Начались долгие дни ожидания ответа из ВАК. Он не знал, что ждать ему придется очень долго. Год.

13.

Научной школе СВЧ электротехнологии СГТУ принадлежит классификация СВЧ электротермических установок и в значительной степени терминологическая база СВЧ электротермии.

Так, стали говорить *СВЧ нагрев* сокращенно от *СВЧ диэлектрический нагрев, рабочая камера, СВЧ сушка, КСВ – камера со стоячей волной, КБВ – камера с бегущей волной, КЛТ – камера лучевого типа, СВЧ технология* и так далее.

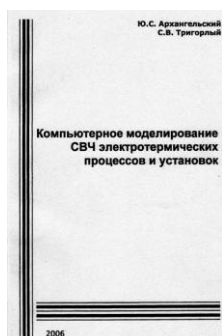
Когда СВЧ нагрев привлек к себе внимание новой группы специалистов в об-

ласти радиоэлектроники СВЧ, работавших до этого в других отраслях, в публикациях все чаще стали использовать новые термины взамен общепринятых. Так, вместо *СВЧ электротехнология* появился термин *микроволновые технологии*, в местах *СВЧ печь* – *микроволновая печь*. Саратовская школа электротехнологов выступает за сохранение исторически сложившейся в нашей стране терминологии.

КБВ на нерегулируемых волноводах, частично заполненных обрабатываемыми диэлектриками, разработанные в СПИ в 70-80 гг., были принципиально новым типом рабочих камер, который отличает рекордно равномерный нагрев ($\pm 2-3^{\circ}\text{C}$ на уровне 100°C), высокий КПД по использованию СВЧ энергии (до 99%), максимальное отношение объема обрабатываемого диэлектрика к объему рабочей камеры.

Решение самосогласованной краевой задачи стало методической базой для расчета КБВ с расширенными функциональными возможностями: удалось создать КБВ для сушки объемных диэлектриков.

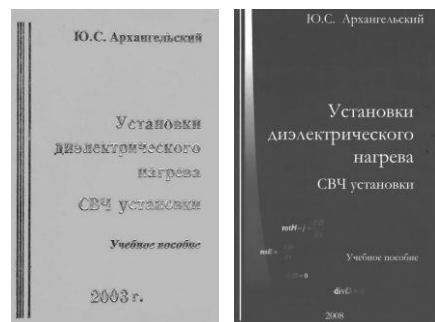
Все эти результаты были обобщены в монографиях «СВЧ электротермия» Ю.С. Архангельского (1998 г.), «Компьютерное моделирование СВЧ электротермических процессов и установок» Ю.С. Архангельского и С.В. Тригорлого (2006 г.), в учебных пособиях «Установки диэлектрического нагрева. СВЧ установки» Ю.С. Архангельского (2003 г. – первое издание, 2008 г. – второе издание).



В монографии рассмотрены вопросы математического моделирования СВЧ установок и процессов в КБВ и КЛТ. Изложены этапы проектирования СВЧ электротермических установок, приведе-

ны методы компьютерного моделирования таких установок с описанием программ и примерами расчета.

Предложены математические модели процессов СВЧ нагрева и сушки, определения термомеханических напряжений в твердых диэлектриках в процессе СВЧ обработки.

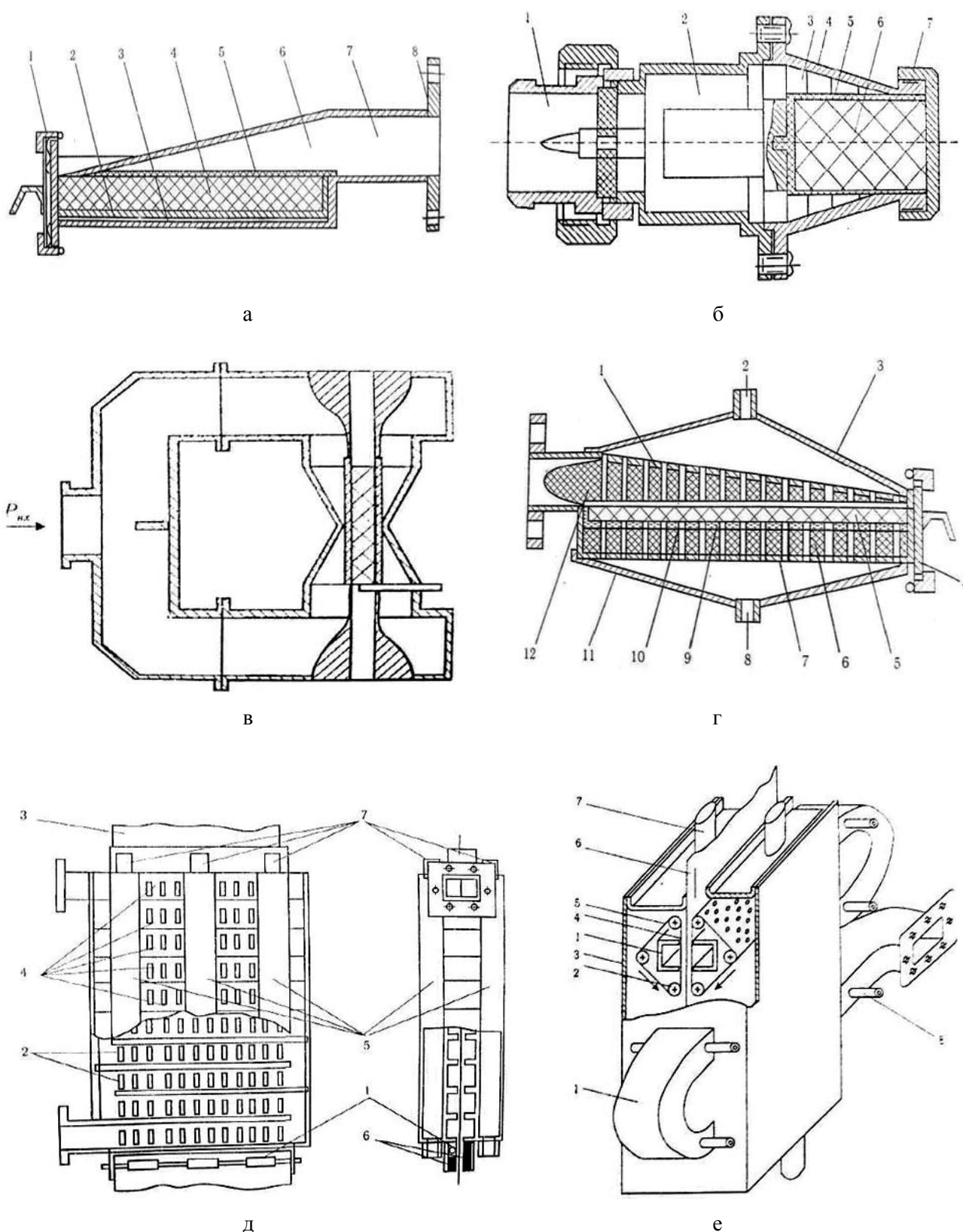


В учебных пособиях изложены основы диэлектрического нагрева, рассмотрены устройство, расчет и конструкции основных частей СВЧ установок, таких как источники СВЧ энергии, линии передач, рабочие камеры, системы загрузки и выгрузки обрабатываемого диэлектрика, управления установками, а также вопросы их эксплуатации.

Учебные пособия предназначены для студентов специальности 180500 «Электротехнологические установки и системы», могут быть полезны для студентов специальностей 100400 «Электроснабжение», 100800 «Энергетика теплотехнологии», 200300 «Электронные приборы и устройства», 200400 «Промышленная электроника», 120700 «Машины и технологии высокоэффективных процессов обработки».

Что касается КСВ, то бытует мнение, что специального расчета таких камер не требуется: они многоцелевого назначения, обрабатываемые в них объекты зачастую имеют сложную форму, возможность обработки в них тех или иных объектов проще проверить экспериментально.

Кроме нагрева, сушки, размораживания СВЧ энергия может быть использована в высокотемпературных технологических процессах, например, при производстве наноматериалов, огнеупорных материалов, керамики.



Рабочие камеры СВЧ электротермических установок: а – на прямоугольном волноводе; б – на круглом волноводе; в – сдвоенная на круглом волноводе; г – на прямоугольном волноводе с дополнительным поглощающим слоем; д – на прямоугольном волноводе с поперечно-периодическим взаимодействием (меандровый волновод) для сушки

Многие процессы сопровождаются фазовыми переходами, появлением больших температурных напряжений и деформаций. Самосогласованная краевая задача электродинамики, тепломассопереноса и термомеханики, кроме уравнений Максвелла, включает уравнение тепломассопереноса многокомпонентного объекта и термомеханики.

Эта задача сформулирована в монографии «СВЧ электротермические установки лучевого типа» Ю.С. Архангельского, С.В. Тригорлого (2000 г.)



В монографии изложены вопросы расчета СВЧ электротермических установок с рабочими камерами лучевого типа. Рассмотрены вопросы технико-экономической оптимизации структуры СВЧ электротермического оборудования с рабочими камерами лучевого типа, методы расчета рабочих камер, математического моделирования СВЧ электротермических процессов. Приведены сведения об электрооборудовании и электроснабжения СВЧ электротермических установок лучевого типа.

14.

Дни ожидания ответа из ВАК складывались в недели, недели – в месяцы. Ответ давно должен был прийти. В чем дело? Угнетала беспомощность. И тут его вызвали к ректору А.И. Андрющенко.

– Знаете что, переходите-ка на энергетический факультет заведующим кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий». Им нужен доктор наук.

– Я еще доктором-то не стал.

– Давно должны были ответить...

Ночью он опять стоял на балконе. Было по-осеннему холодно, моросил дождь... А если ВАК не утвердит его докторскую? Что тогда делать? Уходить? Куда? Работать доцентом на кафедре ЭПП? Чтобы показывали на него пальцем? Неудачник!..

Пришлось ему в очередной раз заново, теперь на кафедре ЭПП, создавать коллектив для работы в области СВЧ электротермии. С ним перешли на ЭПП работавшие над кандидатскими диссертациями Л.Г. Бунин, Т.Н. Шишмило. К нему потянулись только что принятый на кафедру ассистентом ее выпускник Е.В. Колесников и С.В. Тригорлый, вскоре защитивший кандидатскую диссертацию по тепловым режимам электрических сетей.

Однажды столкнулся в коридоре с ректором А.И. Андрющенко.

– Я только что вернулся из Москвы. Ваша докторская диссертация все еще у черного оппонента. Он ее даже не читал.

– Целый год?! Почему?

– Положил в сейф и уехал на год в заграничную командировку. Но ВАК ему напомнил. Приехал, читает.

Скоро пришла открытка с уведомлением, что ему присуждается ученая степень доктора технических наук по специальности «Электротермические процессы и установки».

А.И. Андрющенко ввел его в состав ученого совета СПИ, в состав докторского диссертационного совета по энергетике, в котором был председателем, и как-то Ю.С. Архангельский попросил поручить ему создать кафедру по электротермии. Ректор отказал.

С тех пор целых десять лет он донимал ректора этой просьбой. Тот постоянно отказывал. К нему обращались директора саратовских заводов. Ректор был непреклонен. Как-то он сказал Ю.С. Архангельскому:

– У меня нечем вас заменить в должности заведующего кафедрой ЭПП.

Продолжение следует.

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(8452)99-87-21 — Алексеев Вадим Сергеевич (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 aeu@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 естественно-научных 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.

Редактор Л.А. Скворцова
Компьютерная верстка Ю.Л. Жупиловой
Перевод на английский язык А.Х. Аскаровой

Почтовый адрес: 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77
Телефон: (845-2) 99-87-63
E-mail: aeu@sstu.ru

Подписано в печать 15.12.2014
Формат 60×84 1/8 Бум. офсет.
Усл. печ. л. 14,0 Уч. изд. л. 6,2
Тираж 500 экз. Заказ 207 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 2-е полугодие 2014 г.)
Свидетельство о регистрации СМИ *ПИ № ФС77-54621 от 01.07.2013*

Editor L.A. Skvortsova
Computer-assisted layout by Yu.L. Zhupilova
Translation into English by A.H. Askarova

Address: 77 Politekhnikeskaya Str., 410054, Saratov, Russia
Tel.: (845-2) 99-87-63
E-mail: aeu@sstu.ru

Print date: 15.12.2014
Paper size: 60×84 1/8 Offset-Print
Conventional printed sheet 14,0 Publication base sheet 6,2
Circulation: 500 printed copies Order 207 Subscription and individual copies: open rates
Published by SSTU Publishing, 410054 Saratov, 77 Politekhnikeskaya Str.
Online at www.eLIBRARY.RU
The certificate of media source registration: *PI No. FS77-54621 dated 1 July 2013*



**ПИСАРЕВСКИЙ
НИКОЛАЙ ГРИГОРЬЕВИЧ
(1821 - 1895)**

Организатор и первый директор
Технического училища Почтово-
телеграфного ведомства (1886 - 1891),
директор Электротехнического института (1891-1895).

ВЫСОЧАЙШЕ УТВЕРЖДЕННЫЯ МНѢНІЯ И ПОЛОЖЕНІЯ ГОСУДАРСТВЕННЫХЪ УЧРЕЖДЕНІЙ.

ВЫСОЧАЙШЕ УТВЕРЖДЕННЫЯ МНѢНІЯ ГОСУДАРСТВЕННАГО СОВѢТА:

598. Объ учрежденіи технического училища почтово-телеграфнаго вѣдомства.

Его Императорское Величество воспослѣдовавшее мнѣніе въ Общемъ Собраніи Государственнаго Совѣта, объ учрежденіи технического училища почтово-телеграфнаго вѣдомства, Высочайше утвердить соизволилъ и повелѣлъ исполнить.

Подписаль: Предсѣдатель Государственнаго Совѣта **МИХАИЛЪ.**

3 Іюня 1886 года.

МНѢНІЕ ГОСУДАРСТВЕННАГО СОВѢТА.

Выписано изъ жур- Государственный Совѣтъ, въ Соединенныхъ Депар-
наловъ: Соединенныхъ таментархъ Государственной Экономіи и Законовъ и въ
Департаментовъ Госу- Общемъ Собраніи, рассмотрѣвъ представленіе Министра
дарственной Эконо- Внутреннихъ Дѣлъ объ учрежденіи технического учи-
ми и Законовъ 16 Іюня почтово-телеграфнаго вѣдомства, *минимъ по-*
Апрѣля и Общаго Со- *ложилъ:*
бранія 19 Мая 1886 г.

1) Проекты временныхъ положенія и штата тех-
ническаго училища почтово-телеграфнаго вѣдомства под-

№ 64.

— 1319 —

Ст. 598.

На подлинномъ Собственною Его Императорскаго Величества рукою написано:
Въ Петергофѣ.
3 Іюня 1886 года. *Быть по сему.*



848. О преобразованіи технического училища почтово-телеграфнаго вѣдомства въ
электро-техническій институтъ.

Его Императорское Величество воспослѣдовавшее мнѣніе въ Общемъ Собраніи Государственнаго Совѣта, о преобразованіи
техническаго училища почтово-телеграфнаго вѣдомства въ электро-технич-
ескій институтъ, Высочайше утвердить соизволилъ и повелѣлъ исполнить.

Подписаль: Предсѣдатель Государственнаго Совѣта **МИХАИЛЪ.**

11 Іюня 1891 года.

МНѢНІЕ ГОСУДАРСТВЕННАГО СОВѢТА.

Выписано изъ жур- Государственный Совѣтъ, въ Соединенныхъ Де-
наловъ Соединенныхъ партаментархъ Государственной Экономіи и Законовъ
Департаментовъ Эконо- и въ Общемъ Собраніи, рассмотрѣвъ представленіе
ми и Законовъ 9 мая Министра Внутреннихъ Дѣлъ о преобразованіи тех-
и Общаго Собранія ническаго училища почтово-телеграфнаго вѣдомства:
27 мая 1891 года. въ электро-техническій институтъ, *минимъ положи:*

I. Техническое училище почтово-телеграфнаго вѣ-
домства преобразовать въ «электро-техническій институтъ».

**ВЫСОЧАЙШЕЕ повеление о
преобразованіи Техническаго
училища Почтово-
телеграфнаго вѣдомства в
Электротехнический институт.
11 Іюня 1891 г.**

На подлинномъ Собственною Его Императорскаго Величества рукою написано:
Въ Петергофѣ.
11 Іюня 1891 г. *Быть по сему.*

ПОЛОЖЕНІЕ

ОБЪ ЭЛЕКТРО-ТЕХНИЧЕСКОМЪ ИНСТИТУТѢ.

I. Общія положенія.

1. Электро-техническій институтъ есть открытое учебное заведеніе,
имѣющее цѣлью доставлять специальное образованіе, необходимое для
занятія техническихъ и административныхъ должностей по вѣдомству
почтъ и телеграфовъ, а также готовить преподавателей для мѣстныхъ
почтово-телеграфныхъ школъ и вообще дѣятелей по разнымъ отраслямъ
электро-техники.

2. Электро-техническій институтъ содержится на счетъ суммъ госу-
дарственнаго казначейства.

II. Учебная часть.

3. Учебный курсъ института продолжается четыре года и раздѣ-
ляется на четыре годовичные курса.