

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

**№ 1 (1)
Ноябрь 2013**

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	ассистент 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	ассистент кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» СГТУ имени Гагарина Ю.А.

Since November 2013
Published Quarterly

№ 1 (1)
November 2013

JOURNAL OF ELECTROTECHNICS

Scientific and Technical Publication

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

Chief Editor

Dr.Sc., Professor **YU.S. ARKHANGELSKIY**

Assistant to the Chief Editor

Dr.Sc., Professor **V.A. TSAREV**

Chief Executive Officer

Assistant Lecturer **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 *Almaz*

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

Assistant Lecturer at Department of Automated Installations and Systems in Electrotechnology, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

СОДЕРЖАНИЕ

Архангельский Ю.С., Ларин Е.А. Уважаемый коллега	5
--	---

ЭЛЕКТРОТЕРМИЯ

Базаров А.А., Головачев А.Л., Данилушкин А.И. Разработка индукционного нагревателя для термоупрочнения дисков турбин.....	6
Зимин Л.С., Сорокин А.Г. Синтез алгоритмов работы системы индукционного нагрева для производства пластмассы методом литья.....	11
Данилушкин А.И., Пименов Д.Н., Васильев И.В. Моделирование процесса непрерывного индукционного нагрева заготовок подшипниковых колец как объекта управления.....	15
Данилушкин В.А., Зубарев С.А., Ошкин Я.М. Моделирование и оптимизация параметров индукционного нагревателя трубопровода	21
Гдалёв А.В., Огурцов К.Н. Измерение диэлектрических свойств материалов при высоких температурах	27
Слухай А.В. Влияние воздействия СВЧ электромагнитного поля на эпоксидный компаунд.....	31
Гришина Е.М., Архангельский Ю.С. Техничко-экономическая оптимизация структуры и параметров СВЧ электротермического оборудования на камерах лучевого типа.....	34
Кожевников В.Ю., Дихор Д.В. Проектирование СВЧ камеры с бегущей волной для установки по получению наночастиц серебра ..	37
Огурцов К.Н. СВЧ рабочие камеры для высокотемпературного нагрева диэлектриков.....	40
Антонов И.Н., Бозриков А.В. Дифференциальное эффективное сечение рассеяния электромагнитной волны сферой искусственного диэлектрика	45

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

Артюхов И.И., Земцов А.И. Переходные процессы в накальной цепи магнетрона малой мощности	49
---	----

Митяшин Н.П., Томашевский Ю.Б., Астапович Ю.М., Миргородская Е.Е. Динамические модели групповых выпрямителей для питания электротехнологических установок.....	54
---	----

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

Вырыханов Д.А., Угаров Г.Г. Математическая модель процесса электромеханического преобразования энергии.....	61
Угаров Г.Г., Менщиков И.А., Бондырева Е.А. Построение параметрической модели оценки коммутации тяговых электрических машин электровозов.....	65
Менщиков И.А., Угаров Г.Г. Автоматизированная диагностическая система силового электрооборудования электровозов.....	71

ЭЛЕКТРОНИКА

Волкова С.Д., Царев В.А. Оценка качества производства основных изделий и узлов ЛБВ на примере ОАО НПП «Алмаз».....	76
---	----

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Долотовский И.В., Ларин Е.А., Долотовская Н.В. Управление потреблением энергетических ресурсов путем режимной оптимизации привода технологических нагнетателей.....	84
Антонов И.Н., Алексеев В.С. Влияние автоматического регулирования на возникновение температурных волн в полужограниченном теле.....	91

СОЦИАЛЬНЫЙ АСПЕКТ

Архангельский Ю.С., Гришина Е.М. Гуманитарный компонент электротехнического образования	94
Кириянова Т.А., Васин А.Н. Быть или не быть ядерной энергетике	98

ЛЕТОПИСЬ

Архангельский Ю.С. Анатолий Иванович Андриященко.....	102
К сведению авторов.....	104

CONTENTS

Arkhangelskiy Yu.S., Larin E.A. Dear Colleague	3
---	---

ELECTROTHERMY

Bazarov A.A., Golovachev A.L., Danilushkin A.I. Development of the Induction Heater for Thermohardening of Turbine Disks.....	4
Zimin L.S., Sorokin A.G. Synthesis of Induction Heating Algorithms for Manufacturing Plastics Using the Molding Method.....	9
Danilushkin A.I., Pimenov D.N., Vasilev I.V. Modeling Continuous Induction Heating of Bearing Rings as the Controlled Process.....	13
Danilushkin V.A., Zubarev S.A., Oshkin Ya.M. Modeling and Optimization of Parameters for the Pipeline Induction Heater	19
Gdalov A.V., Ogurtsov K.N. Measuring Dielectric Properties of Materials under High Temperatures.....	25
Sluhay A.V. Impact of SHF Electromagnetic Field on the Epoxy Compound.....	29
Grishina E.M., Arkhangelskiy Yu.S. Technical and Economic Optimization for the Structure and Parameters of the Microwave Electrothermal Equipment Using Beam-Type Cameras. 33	
Kozhevnikov V.Yu., Dikhor D.V. Designing the Microwave Oven with the Running Wave Camera for an Installation Providing Silver Nanoparticles.....	36
Ogurtsov K.N. Microwave Oven Working Cameras for High Temperature Heating of Dielectrics.....	40
Antonov I.N., Bozrikov A.V. Differential Cross-section Electromagnetic Scattering Field of Artificial Dielectrics.....	44

ELECTRIC POWER SUPPLY

Artyukhov I.I., Zemtsov A.I. Transients in the Filament Circuit Magnetron of Low Power.....	48
Mityashin N.P., Tomashevsky Yu.B., Astapovich Yu.M., Mirgorodskaya E.E. Dynamic	

Models of Group Rectifiers for Electrotechnological Power Plants.....	53
---	----

ELECTROMECHANICS

Vyryhanov D.A., Ugarov G.G. A Mathematical Model for the Conversion of Electromechanical Energy	61
Ugarov G.G., Menshikov I.A., Bondyрева E.A. Building the Parametric Switching Assessment Model for the Traction Electric Machines of Electric Locomotives	65
Menshikov I.A., Ugarov G.G. The Automated Diagnostic System for the Power Electric Equipments of Electric Locomotives.....	71

ELECTRONICS

Volkova S.D., Tsarev V.A. Evaluation of the quality production of basic units Traveling-Wave Tubes (with Reference to JSC «Almaz»)...	75
--	----

CONTROLLING SYSTEMS

Dolotovskiy I.V., Larin E.A. Dolotovskaya N.V. Managing Consumption Energy Resources Using Regime Optimization of the Technological Supercharger Drive.....	83
Antonov I.N., Alekseyev V.S. Impact of Automatic Control on the Emergence of Temperature Waves in a Semi-Infinite Object.....	90

SOCIAL ASPECT

Arkhangelskiy Yu.S., Grishina E.M. Humanitarian Component of Electrotechnical Formation.....	94
Kiryanova T.A., Vasin A.N. Nuclear Power: To Be or Not To Be	99

CHRONICLE

Arkhangelskiy Yu.S. Anatoly Ivanovich Andryuschenko	102
Information for Authors	104

Уважаемый коллега!

Вы держите в руках первый номер научно-технического журнала «Вопросы электротехнологии». Журнал создан по приказу ректора Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А., д.и.н., профессора И.Р. Плеве № 399П от 15.05.13.

Миссия журнала состоит в расширении информационного пространства для ученых, производителей, разработчиков новой техники, инвесторов, аспирантов и студентов.

Тематические направления журнала – электротермия, электрохимия, электрофизика, электросварка, электромеханика, электроснабжение, электроника и электродинамика, тепло-массоперенос, системы управления технологическими процессами и установками, материаловедение, измерения в электротехнологии, математическое моделирование технологических процессов, социальные аспекты электротехники.

Редакция журнала приглашает к сотрудничеству всех заинтересованных в развитии электротехнологии.

*Главный редактор журнала
«Вопросы электротехнологии»
профессор Архангельский Ю.С.*

Формирование научной школы электротехнологов на энергетическом факультете Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. осуществилось на базе кафедр электроэнергетического направления. Большое влияние на формирование, становление и развитие научной школы оказал ректор Саратовского политехнического института Анатолий Иванович Андрющенко. Являясь научным руководителем известной в стране Саратовской научной школы теплоэнергетиков, А.И. Андрющенко считал необходимым развитие фундаментальных научных исследований по актуальным проблемам электротехнологии и СВЧ энергетики. Именно он пригласил возглавить кафедру «Теоретические основы электротехники» профессора Ю.Г. Альтшулера. Впоследствии он пригласил возглавить кафедру «Электроснабжение промышленных предприятий» молодого доктора наук Ю.С. Архангельского.

С этого момента развитие научных исследований в области электротермии и СВЧ энергетики логически привело к созданию новой кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы», которую возглавил Ю.С. Архангельский.

Имея богатейший опыт организатора науки и образования, А.И. Андрющенко способствовал формированию коллектива ученых – единомышленников энергетического факультета, факультета электронной техники и приборостроения, а также специалистов профильных предприятий как коллектива, способного решать не только фундаментальные и прикладные задачи, но и задачи подготовки инженерных и научных кадров.

Желаю успехов новому научно-техническому журналу «Вопросы электротехнологии». Обсуждение теоретических и практических вопросов электротехнологии на страницах журнала, несомненно, принесет пользу для науки, практики и подготовки кадров.

*Декан энергетического факультета с 1990 по 2000 гг.
профессор Ларин Е.А.*

ЭЛЕКТРОТЕРМИЯ

УДК 621.365

Разработка индукционного нагревателя для термоупрочнения дисков турбин

А.А. БАЗАРОВ, А.Л. ГОЛОВАЧЕВ, А.И. ДАНИЛУШКИН

Development of the Induction Heater for Thermohardening of Turbine Disks

A.A. BAZAROV, A.L. GOLOVACHEV, A.I. DANILUSHKIN

В статье представлены результаты математического моделирования процесса индукционного нагрева локальной области диска для термопластического упрочнения. На базе предложенной модели выполнен анализ различных вариантов конструкции индукционной системы и даны рекомендации по использованию той или иной конструкции индуктора для нагрева в соответствии с технологией термоупрочнения.

Ключевые слова: термоупрочнение, индукционный нагрев, моделирование, теплопроводность, температура

The article presents the data of the mathematical modeling conducted for induction heating of the local area of a disk to achieve thermoplastic hardening. Analysis of the various options of the induction system design has been made on the basis of the offered model, and recommendations have been given as to the design of an inductor to be used for heating under the thermohardening technology.

Keywords: thermohardening, induction heating, modeling, heat conductivity, temperature

Для восстановления дисков газотурбинных агрегатов методом термопластического упрочнения используется специальная технология, включающая заделку образовавшихся в процессе эксплуатации трещин с помощью сварки, слесарную доработку поверхности, нагрев до определенной температуры и последующее охлаждение.

При термопластическом упрочнении диска без его демонтажа применяется непрерывно-последовательный способ обработки [1], при котором осуществляют локальный нагрев и последующее охлаждение одного или нескольких выступов.

Одним из эффективных методов нагрева, наиболее полно отвечающим всем требованиям практики термопластического упрочнения, является индукционный нагрев. По сравнению с другими видами нагрева он об-

ладает рядом преимуществ, которые заключаются не только в возможности создания практически любой заданной неравномерности распределения температуры по радиусу диска, но и в обеспечении высокой интенсивности нагрева. Однако на пути реализации преимуществ индукционного нагрева возникает ряд специфических проблем. К числу таких проблем относится проблема моделирования электромагнитных и тепловых полей, расчет режимов нагрева, теоретические и экспериментальные исследования алгоритмов управления процессами нагрева и реализация на их основе автоматизированных систем, обеспечивающих требуемое температурное распределение.

Сложность конфигурации изделия, разнородность его структуры и жесткие технологические требования к процессу делают в

большинстве ситуаций неприемлемым использование аналитических методов расчета электромагнитных и тепловых полей. Указанные выше причины обусловили необходимость применения численных методов расчета на этапах идентификации объекта и проектирования индукционной системы.

Учитывая сложную конфигурацию обрабатываемой зоны диска, неравномерность распределения внутренних источников тепла и различные условия теплообмена, точный расчет температурных полей чрезвычайно сложен, так как невозможно определить зависимости коэффициентов теплообмена от формы, температуры, режимов и физического состояния системы на различных поверхностях диска. Это вносит дополнительные трудности в определение температурных полей. Математический анализ режимов конвективного и лучистого теплообмена является чрезвычайно сложным, а получение точных аналитических решений для определения коэффициентов теплообмена не представляется возможным. В связи с этим моделирование температурных полей при индукционном нагреве тел сложной геометрии осуществляется при некоторых допущениях, не искажающих принципиальной сущности физических явлений, но позволяющих решить задачу с требуемой точностью приближения.

В общем случае процесс индукционного нагрева сложнопрофильного диска описывается нелинейной взаимосвязанной системой уравнений Максвелла [4] и Фурье [3] соответственно для электромагнитного и теплового полей с соответствующими краевыми условиями.

$$\operatorname{rot}\{\vec{H}\} = \{J\} + \left\{ \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right\} = \{J_s\} + \{J_e\} + \left\{ \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right\}; \quad (1)$$

$$\operatorname{rot}\{\vec{E}\} = -\left\{ \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right\}, \quad \operatorname{div}\{\vec{B}\} = 0; \quad (2)$$

$$c(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda(T)\operatorname{grad}T) - \operatorname{div}[EH]. \quad (3)$$

Здесь $\{\vec{H}\}$, $\{\vec{B}\}$, $\{\vec{D}\}$ – векторы напряженности магнитного поля, магнитной и элект-

рической индукции, $\{J_s\}$ – вектор плотности приложенного тока, $\{J_e\}$ – вектор плотности индуцированного тока, ρ – плотность электрических зарядов, t – время, c , γ , λ – удельные значения теплоемкости, плотности и теплопроводности материала диска, $T(t, x, x, t)$ – температурное поле диска, r, x, z – пространственные координаты нагреваемого участка диска. Объемная плотность внутренних источников тепла, индуцируемых в тепловыделяющем цилиндре, определяется дивергенцией вектора Пойнтинга $\Pi = -\operatorname{div}[EH]$ [2]. Связь электромагнитного поля в системе с температурным полем обусловлена зависимостью удельного сопротивления и магнитной проницаемости от температуры.

Для решения тепловой задачи с учетом реальных режимов теплообмена с окружающей средой в качестве общей исходной модели температурного поля на всех стадиях процесса принято трехмерное нелинейное нестационарное уравнение теплопроводности.

Расчет параметров процесса производится с помощью вычислительного комплекса, включающего три последовательных алгоритма:

1) алгоритм расчета электромагнитных процессов, протекающих в системе, «индуктор – нагреваемое изделие»;

2) алгоритм расчета нестационарной теплопроводности, описывающий температурное распределение в детали сложной геометрии;

3) алгоритм расчета упругих деформаций, используемый для расчета электродинамических усилий, смещений и концентрации напряжений в различных точках элементов конструкций.

Выполнение конечно-элементного расчета состоит в прохождении следующих шагов: описание расчетной области (геометрической модели); создание конечно-элементной модели; задание физических характеристик материала изделия, выбор типа расчета, выбор метода решения и расчетных параметров (количество итераций); решение; исследование результатов.

Характер распределения источников тепла при индукционном нагреве зависит от

многих факторов, обусловленных электро- и теплофизическими свойствами материала, частотой источника питания, температурой нагрева. Для решения электромагнитной задачи используется конечно-элементная модель, которая позволяет учесть практически все особенности исследуемого процесса. Данная задача решалась с помощью программного пакета Elcut 5.6.

При решении электромагнитной задачи приняты следующие допущения [4].

1. Поле принимается квазистационарным. Под этим понимается отсутствие запаздывания электромагнитной волны в воздухе (но не в металле). Это допущение позволяет пренебречь токами смещения по сравнению с токами в проводниках.

2. Не учитываются потери на гистерезис при нагреве ферромагнитных тел в силу их незначительности по сравнению с потерями от вихревых токов.

Принятые допущения позволяют упростить решение рассматриваемой задачи. Для расчёта электромагнитных параметров в качестве исходных задаются размеры и профиль диска, размеры и форма индуктора, физические характеристики материалов, взаимное расположение индуктора и диска, напряжение индуктора, настройки численного метода. Результаты решения электромагнитной задачи в виде удельной мощности внутренних источников тепла задаются в локальных областях диска для определения температурного поля диска на следующем этапе расчета.

Квазистационарные электромагнитные поля определяются уравнениями Максвелла:

$$\nabla \times \{H\} = \{J\} = \{J_s\} + \{J_e\} + \{J_v\}; \quad (4)$$

$$\nabla \times \{E\} = -\left\{\frac{\partial B}{\partial t}\right\}, \quad \nabla \cdot \{B\} = 0, \quad (5)$$

где $\nabla \times$ – оператор ротора; ∇ – оператор дивергенции; $\{H\}$ – вектор магнитной напряженности; $\{J\}$ – полный вектор плотности тока (намагниченность); $\{J_s\}$ – вектор плотности источника тока; $\{J_e\}$ – вектор возбужденного вихревого тока; $\{J_{vs}\}$ – вектор плотности тока, обусловленный движением; t – время; $\{E\}$ – вектор напряженно-

сти электрического поля; $\{B\}$ – вектор магнитной индукции.

Для учета нелинейной зависимости $\mu_a(H)$ в ферромагнитных областях в пакете Elcut задается кривая намагничивания. Это позволяет повысить точность расчетов.

Определение температурного поля нагреваемого изделия сводится к решению уравнения теплопроводности Фурье (1) с известной функцией распределения внутренних источников тепла, найденной в результате решения электромагнитной задачи и с граничными условиями на различных поверхностях вида

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = \alpha(z) [T_c - T(R, z, t)] + \varepsilon \sigma_0 [T_c^4 - T^4(R, z, t)];$$

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = \alpha(r) [T_c - T(r, Z, t)] + \varepsilon \sigma_0 [T_c^4 - T^4(r, Z, t)];$$

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=Z} = \alpha(r) [T_c - T(r, Z, t)] + \varepsilon \sigma_0 [T_c^4 - T^4(r, Z, t)],$$

где ε – степень черноты материала загрузки; σ_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела; α – коэффициент конвективного теплообмена с окружающей средой. Начальные условия характеризуются произвольным в общем случае пространственным распределением $T(r, z, 0) = T_0(r, z)$.

В граничных условиях отражены два вида теплообмена: конвективный и излучением.

Температурное поле диска в процессе нагрева является одним из основных факторов, влияющих на качество упрочняемого изделия. На характер температурного распределения, кроме мощности нагревателей, влияют условия теплообмена в процессе нагрева. Установлено, что в процессе термообработки необходимо учитывать оба вида теплообмена – конвективный и лучистый теплообмен, которые являются нелинейными и в значительной степени зависят от формы, физического состояния и температуры диска. Проведенный анализ режи-

мов конвективного и лучистого теплообмена показал, что для большинства практических задач достаточной оказывается оценка коэффициента теплообмена α по эмпирическим зависимостям, полученным обработкой экспериментальных результатов. Операция охлаждения в процессе термоциклирования осуществляется путем подачи под большим давлением струй воды на упрочняемые поверхности диска. Коэффициент конвективного теплообмена на этих поверхностях согласно проведенным расчетам составляет 500-700 Вт/(м²·град).

Расчет усилий, перемещений и концентрации напряжений в элементах конструкций сводится к определению компонентов векторов: перемещений точек тела

$$\{\Delta\} = \{u, v, w\}^T, \quad (6)$$

деформаций

$$\{\varepsilon\} = \left\{ \varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \frac{1}{2} \gamma_{xy}, \frac{1}{2} \gamma_{yz}, \frac{1}{2} \gamma_{zx} \right\}^T \quad (7)$$

и напряжений

$$\{\sigma\} = \left\{ \sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \frac{1}{2} \tau_{xy}, \frac{1}{2} \tau_{yz}, \frac{1}{2} \tau_{zx} \right\}^T, \quad (8)$$

где символ « T » означает операцию транспонирования матриц. Все эти неизвестные являются функциями координат точек тела.

Описанная конечно-элементная методика расчета реализована на базе программного пакета Comsol, позволяющего быстро создавать связанные модели термоупругой деформации в диске в двух- и трехмерной постановках. Моделирование процессов нагрева позволило выявить допустимые скорости нагрева, градиенты температур, обеспечивающие отсутствие недопустимых термонапряжений, что потребовало корректировки параметров индукционного нагревателя.

С помощью разработанной методики поставлен ряд численных экспериментов, позволивших определить интегральные электрические параметры и разработать индукционный нагреватель, обеспечивающий высокую энергоэффективность и качество процесса термоупрочнения.

Рассмотрены варианты конструктивных решений систем индукционного нагрева диска или его части. Выполнен расчет и анализ систем индукционного нагрева диска в процессе термоупрочнения для стандартного ряда частот в диапазоне 50-8000 Гц. Как следует из проведенного анализа, не существует однозначного решения при выборе рабочей частоты. Так, при одновременном нагреве всех выступов в цилиндрическом индукторе, охватывающем весь диск, решение должно быть принято в пользу промышленной частоты. При локальном индукционном нагреве сегмента диска предпочтительным оказывается выбор более высокой частоты. В этом случае критерием могут служить как энергетические характеристики, так и конструктивные. Известно, что при индукционном нагреве одним из основных энергетических показателей индукционный нагревателей является коэффициент мощности, который снижается по мере увеличения частоты. Повысить коэффициент мощности позволит применение магнитопровода, однако это приведет к увеличению массогабаритных показателей и усложнению конструкции.

Наиболее эффективной и простой в реализации конструкцией индукционной системы при нагреве на промышленной частоте является цилиндрический индуктор, охватывающий весь диск. Однако применение такой схемы предполагает одновременный нагрев и последующее охлаждение всех 90 выступов. Это требует установки специального трансформатора большой мощности (160 кВт), конденсаторной батареи для компенсации реактивной мощности индуктора и сложной конструкции спрей-ерного устройства высокой производительности, обеспечивающего охлаждение сразу всех выступов. Кроме того, мощная однофазная нагрузка может привести к несимметрии питающей сети.

Нагрев части диска (сегмента) на промышленной частоте приводит к снижению мощности индуктора, но значительно усложняет согласование параметров индуктора и сети из-за низких значений напряжений на индукторе (несколько десятков

вольт) и больших токов (десятки килоампер). Вторичные цепи получают громоздкими и требуют принудительного водяного охлаждения.

Анализ показал, что наиболее эффективной и простой в реализации конструкцией индукционной системы, обладающей рядом преимуществ по массогабаритным показателям, простоте конструкции, согласованию параметров индуктора и источника питания, имеет щелевой индуктор без магнитопровода с рабочей частотой 8000 Гц.

Следует отметить, что конструкция индуктора обладает рядом особенностей. Во-первых, катушка является дисковой, а не соленоидальной. Во-вторых, кроме самих витков, имеются соединительные части (перемычки), которые вносят существенные особенности в распределение электромагнитного поля. Все это приводит к тому, что, в отличие от соленоидальных катушек, приходится учитывать тот факт, что ток протекает не только в той части трубки, что обращена к заготовке, но и по периферии трубки. Проявляющиеся в этой ситуации эффекты не позволяют механически пересчитать одновитковый индуктор на многовитковый, так как существенно изменяется индуктивная составляющая импеданса.

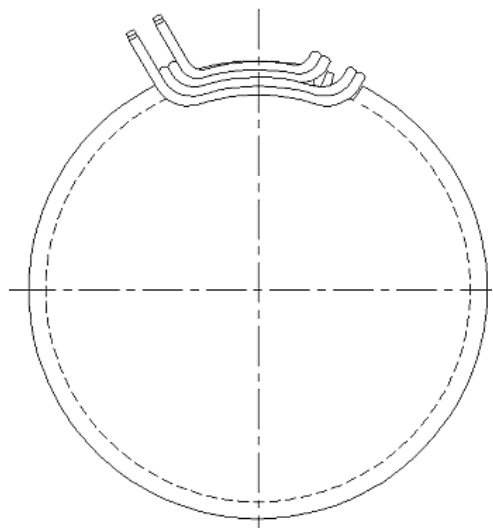


Рис. 1. Вид многовиткового щелевого индуктора

На рис. 1 изображен щелевой индуктор с диском (зубцы не показаны).

На рис. 2 представлены результаты расчета температуры поверхности диска в районе зубца в процессе нагрева. Мощность нагрева 20 кВт, объемная удельная мощность $W = 46 \cdot 10^6$ Вт/м³. Расчет показывает, что кривая температуры в зоне выступа выходит на заданное значение за время, равное 800 с, а перепад температуры между поверхностью выступа и линией, проведенной на расстоянии 10 мм от поверхности выступа, не превышает 20 град, что соответствует требованиям технологии термоупрочнения.

В работе проводится анализ различных конструктивных решений систем индукционного нагрева диска или его части для термопластического упрочнения для стандартного ряда частот в диапазоне 50-8000 Гц. Анализ индукционных систем различных конструкций показал, что преимущества по массогабаритным показателям, простоте конструкции, согласованию параметров индуктора и источника питания имеет щелевой индуктор без магнитопровода с рабочей частотой 8000 Гц.

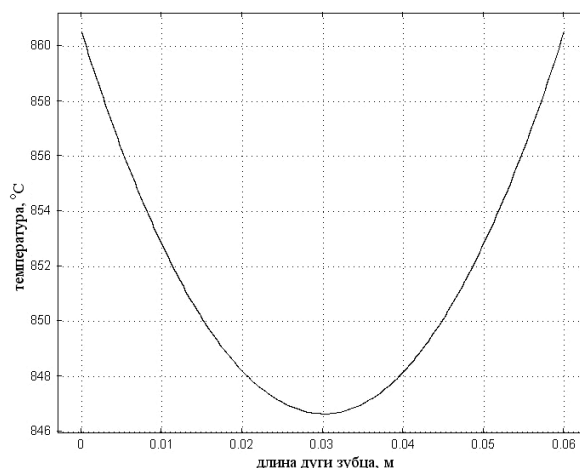


Рис. 2. Температурное распределение на поверхности зубца по ширине

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кравченко Б.А.** Термопластическое упрочнение – резерв повышения прочности и надежности деталей машин: монография / Б.А. Кравченко, В.Г. Круцило, Г.Н. Гутман. Самара: СамГТУ, 2000. 216 с.

2. **Вайнберг А.М.** Индукционные плавильные печи / А.М. Вайнберг. М.: Энергия, 1967. 415 с.

3. **Лыков А.В.** Тепломассообмен: справочник / А.В. Лыков. М.: Энергия, 1978. 480 с.

4. **Немков В.С.** Теория и расчет устройств индукционного нагрева / В.С. Немков, В.Б. Демидович. Л.: Энергоатомиздат, 1988. 280 с.

Базаров Александр Александрович – доктор технических наук, доцент, Самарский государственный технический университет

Alexander A. Bazarov – Dr.Sc., Associate Professor, Samara State Technical University

Головачев Александр Леонидович – кандидат технических наук, заместитель генерального директора ООО «Газпром трансгаз Самара»

Alexander L. Golovachev – Ph.D., Deputy Director General: JSC Gazprom Transgaz Samara

Данилушкин Александр Иванович – доктор технических наук, профессор, Самарский государственный технический университет

Alexander I. Danilushkin – Dr.Sc., Professor, Samara State Technical University

Статья поступила в редакцию 12.08.13, принята к опубликованию 01.10.13

УДК 621.365

Синтез алгоритмов работы системы индукционного нагрева для производства пластмассы методом литья

Л.С. ЗИМИН, А.Г. СОРОКИН

Synthesis of Induction Heating Algorithms for Manufacturing Plastics Using the Molding Method

L.S. ZIMIN, A.G. SOROKIN

Предложена оригинальная система индукционного нагрева для производства пластмассы методом литья. Определены основные энергетические показатели и алгоритмы работы, которые обеспечивают требуемое температурное распределение в нагреваемом полимерном материале.

Ключевые слова: литьевая машина, полимер, электротепловая модель, индуктор, алгоритм, проектирование

A unique induction heating system is offered for manufacturing plastics by means of the molding method. The basic energy index and the operation algorithms have been determined to provide the required temperature distribution within the heated polymeric material.

Keywords: cast car, polymer, electrothermal model, inductor, algorithm, design

На сегодняшний день изделия из полимерных материалов, полученные методом литья, очень широко применяются в промышленности, а именно автомобильной, аэрокосмической, судоходной, электротехнической, сельскохозяйственной и строительной отрасли, а также в производстве хозяйственных товаров народного потребления. Высокие требования к качеству готовой продукции делают актуальной проблему синтеза надежных, эффективных и высокотехнологичных установок для нагрева полимерных материалов.

При производстве изделий из пластмассы методом литья применяют гидравлические литьевые машины. Процесс производства носит название литья под давлением. Исследуемая в работе конструкция гидравлической литьевой машины представлена на рис. 1.

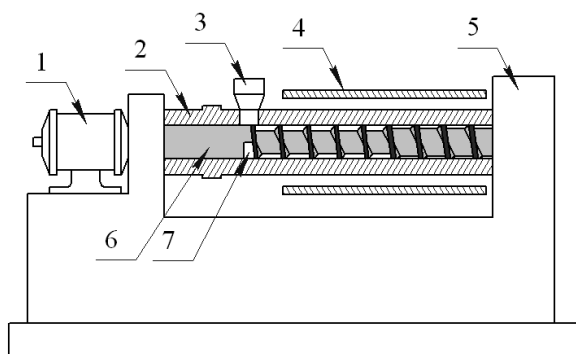


Рис. 1. Технологическая схема гидравлической литьевой машины

Сырье 7 из приемного бункера 3 попадает в цилиндр пластикации 2 и равномерно распределяется по его длине посредством вращения шнека 6. Шнек приводится во вращение двигателем 1. Затем с помощью нагревателей 4 нагревается до заданной температуры, далее с помощью шнека расплавленный материал через сопло, которое программируется в зависимости от номенклатуры материала, выливается в пресс-форму штамповочного устройства 5.

В настоящее время для нагрева полимерного материала в литьевой гидравлической машине применяются трубчатые электронагреватели, а также специальные электрические нагреватели бандажного типа. Нагреватели сопротивления просты в изго-

товлении, не критичны к качеству электроэнергии и имеют сравнительно невысокую стоимость. Однако наряду с указанными достоинствами нагреватели сопротивления имеют ряд недостатков, которые сдерживают рост производительности технологической линии и не позволяют обеспечить все более растущие требования к качеству выпускаемой продукции. Имеющиеся альтернативные способы нагрева с помощью электрической дуги, прямого нагрева сопротивлением, за счет прямого воздействия горячей водой или пара оказываются неэкономичными и малопродуктивными в силу большой тепловой инерции процесса и невозможностью получения заданного диапазона температур при снижении энергопотребления установки нагрева.

Повышение эффективности технологии производства изделий из пластмассы методом литья возможно посредством применения систем индукционного нагрева.

Для составления целостной картины изменения характера распределения плотности тока и мощности в цилиндре пластикации и шнеке в процессе нагрева и возможности аналитического описания функции распределения внутренних источников тепла требуется последовательное решение электромагнитной и тепловой задач. Разделение во времени процедур расчета электромагнитного и теплового полей объясняется разной инерционностью этих процессов. Поэтому электромагнитная задача может быть сформулирована как квазистационарная, а тепловая имеет в дифференциальном уравнении временную производную первого порядка. Все это позволяет создать полностью или частично независимые процедуры расчетов электромагнитных и тепловых полей.

Модели, которые учитывают взаимное влияние электромагнитного и температурного полей в процессе нагрева, называются электротепловыми. Такие модели дают исчерпывающую характеристику индукционного устройства с точки зрения потребления энергии от внешнего источника питания и выделения ее в нагрузку [1].

В общем случае процесс индукционного нагрева описывается нелинейными уравне-

ниями Максвелла для электромагнитного поля с соответствующими краевыми условиями:

$$\operatorname{rot} \dot{H} = \frac{1}{\rho} E + \frac{\partial D}{\partial t}; \operatorname{rot} \dot{E} = -\frac{\partial B}{\partial t}; \quad (1)$$

$$\operatorname{div} \dot{H} = 0; \operatorname{div} \dot{E} = 0.$$

Здесь $\dot{H}, \dot{B}, \dot{E}, \dot{D}$ – векторы напряженности и индукции магнитного и электрического полей.

Исходная постановка нелинейной электромагнитной задачи выражается через векторный потенциал общим уравнением Пуассона в двумерной области:

$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu_a} \operatorname{rot} \dot{A} \right) + \gamma \frac{\partial \dot{H}}{\partial t} = \dot{J}_0; \quad (2)$$

$$\operatorname{rot} \dot{A} = \dot{B}; \operatorname{div} \dot{A} = 0.$$

Здесь $\dot{A}$ – векторный потенциал, μ_a – абсолютная магнитная проницаемость среды, $\dot{J}$ – удельная электрическая проводимость.

Для решения тепловой задачи используется первый закон термодинамики, записанный в виде дифференциальных уравнений для объемных тел:

$$\gamma c \left[\frac{\partial T}{\partial t} + (v)^T (L) T \right] + (L)^T (q) = \ddot{q}. \quad (3)$$

Здесь $\ddot{q}$ – скорость образования тепла в конечном объеме; (q) – вектор теплового потока; $(L)^T$ – векторный оператор; (v) – вектор, характеризующий скорость переноса тепла.

Связь между вектором теплового потока и температурным градиентом устанавливается по закону Фурье:

$$(q) = -[D](L)T. \quad (4)$$

Объединение двух последних уравнений дает уравнение вида

$$\gamma c \left[\frac{\partial T}{\partial t} + (v)^T (L) T \right] = (L)^T ([D](L)T) = \ddot{q}. \quad (5)$$

Полученные уравнения применяются в декартовой системе координат в линейной постановке. Для полной физической определенности общая система уравнений дополняется эмпирическими зависимостями удельной теплоемкости, вязкости, коэффициентов теплопроводности, теплопередачи и других величин от температуры. Расчет теплового поля системы осуществляется с помощью метода конечных элементов.

Указанная постановка задачи охватывает самые общие электромагнитные явления и позволяет рассчитывать практически весь класс устройств индукционного нагрева, который может быть математически описан двумерным уравнением Пуассона. Сущность подхода, основанного на методе конечных элементов, заключается в исследовании глобальной функции процесса, в данном случае векторного потенциала в дискретных частях анализируемой области Q (рис. 2), которая должна быть предварительно разбита на конечные смежные подобласти, что позволяет свести задачу с бесконечным числом степеней свободы к задаче, содержащей конечное число параметров [2].

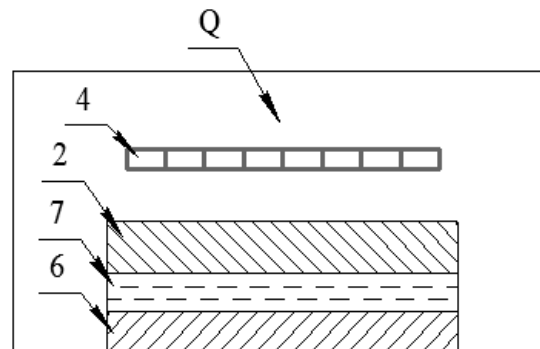


Рис. 2. Схема индукционного нагрева при производстве пластмассы

Расчет электротепловой модели осуществляется методом конечных элементов, который реализован с помощью пакета ELCUT и FEMLAB, учитывающего специфику поставленной задачи, и предварительно группирует в области отдельные сегменты, форма которых глобально отображает конфигурацию исследуемой системы.

Самым ответственным моментом технологии производства изделий из пластмассы методом литья является нагрев полимерного материала до фиксированной температуры. Для получения качественного продукта необходимо создать температурное поле, равномерно распределенное по объему нагреваемого полимерного материала, так как перегрев ведет к потере эластичных свойств и невозможности проводить литье. Но главное при наружном индукционном нагреве цилиндра пластикации возможен при удачном выборе частоты нагрев металлического шнека. Это обеспечит нагрев полимерного материала одновременно с двух сторон.

Проведенный поиск конструкции и алгоритма управления определил, что наиболее рациональной является конструкция однослойного цилиндрического индуктора, который выполнен медным проводом ПОЖ 6,3×2. Рабочая температура до 600°C с никелированной медной жилой и двумя слоями стекловолокна с пропиткой органосиликатным составом. Число витков индуктора – 110, полная мощность индуктора 20 кВт, напряжение 220 В, частота 50 Гц. Внешний диаметр цилиндра – 0,088 м. Внутренний диаметр цилиндра – 0,046 м. Толщина стенки цилиндра – 0,021 м. Диаметр шнека – 0,036 м. Толщина слоя полимерного материала – 0,005 м [3].

Работа данной установки (рис. 3) осуществляется посредством программного управления, при котором обеспечивается заданная точность и минимум времени нагрева.

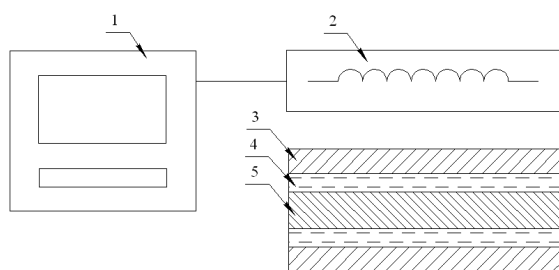


Рис. 3. Схема индукционного нагрева:

1 – рабочая станция, 2 – индуктор,
3 – цилиндр пластикации, 4 – полимерный материал, 5 – шнек

На основе анализа электротепловой модели реализованной программно разработанный алгоритм работы, который состоит из трех этапов:

- засыпка балластного материала и разогрев в течение 1800 с;
- удаление балласта и уточненное догревание шнека до установленной температуры в течение 600 с;
- рабочий цикл – три порции сырья, время нагрева одной порции 600 с;
- подогрев системы до заданной температуры.

При найденных параметрах индукционного нагревателя точность температурного распределения (рис. 4) в полимерном материале составляет 3°C, что полностью удовлетворяет технологии производства пластмассы методом литья.

Кроме рассматриваемой системы управления на данной рабочей станции размещены и другие системы, обеспечивающие функционирование и диагностику всего технологического процесса, а также документирование всех параметров технологического процесса. Таким образом, выбранная установка для управления процессом индукционного нагрева при производстве пластмассы методом литья позволит производить контроль температуры в изделии, а также отразить влияние того или иного возмущающего воздействия в виде определенной программы управления.

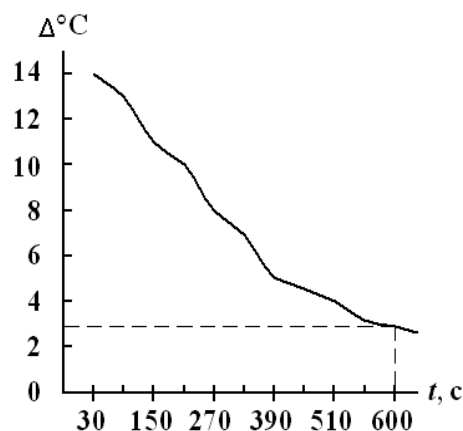


Рис. 4. Зависимость перепада температуры от времени нагрева

ЛИТЕРАТУРА

1. **Сорокин А.Г.** Исследование электромагнитных и тепловых полей в технологической установке для производства пластмассы / А.Г. Сорокин, Л.С. Зимин // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Техн. науки. 2007. Вып. № 1(19). С. 131-135.

2. **Сорокин А.Г.** Система индукционного нагрева для производства пластмассы / А.Г. Сорокин, Л.С. Зимин // Вестник Самар.

гос. техн. ун-та. Сер. Техн. науки. 2012. Вып. № 1 (33). С. 223-227.

3. **Сорокин А.Г.** Идентификация математической модели системы индукционного нагрева при производстве пластмассы методом литья / А.Г. Сорокин, Л.С. Зимин // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Техн. науки. 2012. Вып. № 4(36). С. 163-168.

Зимин Лев Сергеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий», Самарский государственный технический университет

Сорокин Алексей Григорьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры математических и естественнонаучных дисциплин, Сызранский филиал Самарского государственного экономического университета

Lev S. Zimin – Dr.Sc., Professor, Head: Department of Power Supply for Industrial Enterprises, Samara State Technical University

Alexey G. Sorokin – Ph.D., Associate Professor, Department of Science and Mathematics, Part of Samara State University of Economics (Syzran)

Статья поступила в редакцию 12.08.13, принята к опубликованию 01.10.13

УДК 621.365

Моделирование процесса непрерывного индукционного нагрева заготовок подшипниковых колец как объекта управления

А.И. ДАНИЛУШКИН, Д.Н. ПИМЕНОВ, И.В. ВАСИЛЬЕВ

Modeling Continuous Induction Heating of Bearing Rings as the Controlled Process

A.I. DANILUSHKIN, D.N. PIMENOV, I.V. VASILEV

Исследуется процесс нагрева ферромагнитных полых цилиндрических заготовок под пластическую деформацию в индукционном нагревателе непрерывного действия. Предложены аналитическая модель процесса непрерывного индукционного нагрева полых цилиндрических заготовок под обработку на деформирующем оборудовании и её аппроксимация

The article deals with investigation of the heating process referring the ferromagnetic hollow cylindrical preform made for plastic deformation in the continuous-type induction heater. The proposed analytical model can be applied for the continuous induction heating process of the hollow cylindrical preforms made to be processed by the deforming equipment, and its approximation by

математической моделью теплотехнически тонкого тела.

Ключевые слова: индукционный нагрев, частота, моделирование, электромагнитное поле, температурное распределение

При исследовании процесса непрерывного индукционного нагрева подшипниковых колец до температур пластической деформации как объекта автоматизации ставится задача определить его реакцию на наиболее существенные возмущения (напряжение питания, скорость перемещения изделий через нагреватель, изменение начальной температуры изделия, выходного теплосодержания, тепловых потерь и т.д.).

Процесс непрерывного индукционного нагрева описывается в общем случае нелинейной системой уравнений Максвелла и Фурье для электромагнитного и теплового полей соответственно [1, 2]

$$\begin{cases} \operatorname{rot} \mathbf{H} = -\delta + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}; & \operatorname{div} \mathbf{H} = 0; \\ \operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}; & \operatorname{div} \mathbf{E} = 0; \end{cases} \quad (1)$$

$$c(T) \gamma(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda(T) \operatorname{grad} T) - c(T) \gamma(T) V \operatorname{grad} T - \operatorname{div}[\mathbf{EH}]. \quad (2)$$

Здесь $\mathbf{H}$, $\mathbf{E}$, $\mathbf{B}$ – векторы напряженностей магнитного и электрического полей, магнитной и электрической индукции,

$\delta = \frac{1}{\rho} \mathbf{E}$ – плотность тока проводимости,

c , γ – удельные значения теплоемкости и

mathematical model a thermotechnical thin body.

Keywords: induction heating, frequency, modeling, electromagnetic field, temperature distribution

плотности металла нагреваемых изделий, V – вектор скорости перемещения обрабатываемого металла, T – температурное поле изделия, $\operatorname{div}[\mathbf{EH}]$ – объемная плотность внутренних источников тепла [1].

Решение системы (1), (2) относительно температурного поля, описывающего тепловое состояние объекта, возможно только численными методами для каждой конкретной технологической ситуации.

Однако численные модели, хотя и позволяют получить точное решение, но при разработке алгоритмов управления нагревателями дискретно-непрерывного и методического действия для ферромагнитных заготовок оказываются чрезвычайно громоздкими и требуют применения вычислительной техники с большим объемом памяти и высоким быстродействием. По этой причине решение задач управления для объектов с распределенными параметрами, к которым относятся исследуемые в работе индукционные нагреватели, наиболее эффективно при использовании аналитических методов описания процесса непрерывного индукционного нагрева.

Процесс индукционного нагрева полых ферромагнитных цилиндров, непрерывно движущихся через индуктор, описывается с учетом некоторых обоснованных допущений уравнением нестационарной теплопроводности вида [4]

$$\frac{\partial T(r, x, t)}{\partial t} = a \left[\frac{\partial^2 T(r, x, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r, x, t)}{\partial r} \right] - V \frac{\partial T(r, x, t)}{\partial x} + \Phi(r, x, t). \quad (3)$$

Здесь $T(r, x, t)$ – температурное распределение по объему кольца, a – коэффициент температуропроводности, V – скорость перемещения изделий через индуктор, r, x – радиальная и аксиальная координаты соответственно, $\Phi(r, x, t)$ – функция распределения внутренних источников тепла, t – время процесса. Как показано в [4, 5], действительный

характер зависимости $\Phi(r, x, t)$ можно заменить с небольшой погрешностью зависимостью от пространственных координат. В этом случае функция $\Phi(r, x, t)$ распределения внутренних источников тепла может быть представлена в виде

$$\Phi(r, x, t) = W(r) \cdot F(x) \cdot P(t). \quad (4)$$

Здесь $W(r)$ – функция распределения внутренних источников по радиальной координате r , $F(x)$ – функция распределения внутренних источников тепла по аксиальной координате x , $P(t)$ – мощность источников тепла.

В ряде работ [3-6], посвященных решению задач теплопроводности с учетом объемного распределения источников тепла, зависящего от температуры, сложная нелинейная зависимость распределения внутренних источников тепла от температуры по длине проходного нагревателя аппроксимируется ступенчатой функцией координаты, имеющей три участка постоянства, в пределах каждого из которых физические свойства стали считаются постоянными. В «холодной» зоне нагрева, где температура любой точки сечения кольца ниже температуры магнитных превращений, источники тепла практически сосредоточены на поверхности изделия, и процесс нагрева можно рассматривать при граничных условиях II рода без учета распределенности источников тепла по радиальной координате. В «промежуточной» зоне, где слои металла, начиная от поверхности, проходят при нагреве точку Кюри, магнитная проницаемость от слоя к слою резко изменяется, приводя к неопределенности закона распределения мощности теплоисточников по радиусу изделия. В «горячей» зоне нагрева, когда изделие теряет магнитные свойства, закон распределения источников тепла по радиальной координате определяется однозначно как для немагнитного тела. Принятая аппроксимация позволяет для односекционного нагревателя непрерывного действия рассматривать процесс нагрева как трехстадийный нагрев, где теплофизические параметры $\alpha(y)$, $\beta(y)$, тепловые потери $q(y)$, относительная мощность $P(y)$ и функция распределения внутренних источников тепла представляется в виде ступенчатой функции [6, 7]

$$F(x) = H[1(x) - 1(x - x_1)] + H[1(x - x_1) - 1(x - x_2)] + H[1(x - x_2) - 1(x - L)]. \quad (5)$$

Здесь L – длина индуктора, x_1 , x_2 – границы зон «холодного», «промежуточного» и «горячего» режимов, координаты которых определяются на основании электромагнитного и теплового расчетов.

Каждая зона при этом характеризуется своими постоянными теплофизическими параметрами и функциями внутреннего тепловыделения, что и позволяет считать их зависимыми от осевой координаты.

Переходя в целях большей общности последующего анализа к относительным единицам, представим уравнение (3) в форме [4]

$$\frac{\partial \theta(l, y, \phi)}{\partial \phi} = \frac{\partial^2 \theta(l, y, \phi)}{\partial l^2} + \frac{1}{l} \frac{\partial \theta(l, y, \phi)}{\partial l} - \beta(y) \frac{\partial \theta(l, y, \phi)}{\partial y} + \alpha(y) \frac{\Phi(l, y, \phi)}{P_\delta}, \quad (6)$$

где $\theta(l, y, \phi) = \frac{[T(l, y, \phi) - T_\delta] \lambda_\delta}{P_\delta \cdot R_2^2}$ – относи-

тельная температура, T_δ – базовая температура в °C, $\lambda_\delta = \text{const}$ – базовое значение коэффициента теплопроводности, $P_\delta = \text{const}$ – базовое значение удельной мощности, R_2 –

внешний радиус заготовки, $y = \frac{x}{L}$ – относи-

тельное значение продольной координаты, $l = \frac{r}{R}$ – относительный радиус, $\phi = \frac{a\tau}{R^2}$ –

относительное время, $\beta(y) = V \frac{R_2^2}{a(y)L}$,

$\alpha(y) = \frac{\lambda_\delta}{\lambda(y)}$ – теплофизические параметры,

$\lambda(y)$ – коэффициент теплопроводности.

Уравнение (6) дополняется начальными и граничными условиями, которые при нагреве в футерованном индукторе представляются в виде

$$\theta(l, y, 0) = \theta_0; \quad (7)$$

$$\frac{\partial \theta(l, y, \phi)}{\partial l} = q_1(l, y, \phi); \quad (8)$$

$$\frac{\partial \theta(l_1, y, \phi)}{\partial l} = q_2(l_1, y, \phi); \quad (9)$$

$$\theta(l, 0, \phi) = \theta_c(\phi). \quad (10)$$

Здесь $q_1(1, y, \phi)$ – тепловой поток с внешней поверхности изделия, $q_2(l_1, y, \phi)$ – теплоотдача в окружающую среду с внутренней поверхности изделия, $\theta_c(\phi)$ – температура среды, θ_0 – температура изделия на входе в индуктор. Стационарное распределение температуры при нагреве изделий с постоянной скоростью перемещения и постоянной удельной мощностью описывается уравнением стационарной теплопроводности вида

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 \theta(l, y)}{\partial l^2} + \frac{1}{l} \frac{\partial \theta(l, y)}{\partial l} - \\ & - \beta(y) \frac{\partial \theta(l, y)}{\partial y} + \alpha(y) W(l, y) P_0 = 0; \\ & l \in [l_1, 1], \quad y \in [0, 1], \end{aligned} \quad (11)$$

с граничными условиями

$$\frac{\partial \theta(1, y)}{\partial l} = q_1(1, y); \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \theta(l, y) = & \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\psi_n(\mu_n l) \pi^2 \mu_n^2 J_1^2(\mu_n l)}{2 R_1^2 [J_1(\mu_n) - J_1^2(\mu_n l)]} \cdot \left\{ e^{-\int_0^y \frac{\mu_n^2}{\beta(z)} dz} \cdot \left[\int_{l_1}^1 l \theta_c \psi_n(\mu_n) dl + \right. \right. \\ & \left. \left. + \int_0^y \frac{q(x)}{\beta(x)} \psi_n(\mu_n) \cdot e^{\int_0^x \frac{\mu_n^2}{\beta(z)} dz} dx + \int_0^1 \int_{l_1}^1 \frac{W(l, \xi) l \psi_n(\mu_n) P(x) \alpha(x)}{\beta(x)} \cdot e^{\int_0^y \frac{\mu_n^2}{\beta(z)} dz} dx dl \right] \right\}; \quad (17) \\ & l \in [l_1, 1], \quad y \in [0, 1]. \end{aligned}$$

В ряде широко распространенных технологических процессов горячей обработки металла, таких как, например, раскатка и калибровка подшипниковых колец, штамповка клапанов для двигателей внутреннего сгорания и др., перепад температур между центром и поверхностью нагреваемой заготовки в процессе нагрева не достигает предельно допустимых значений при любых реальных значениях скорости перемещения заготовок и мощности нагрева. В этом случае процесс индукционного нагрева с достаточно высокой степенью достоверности характеризу-

$$\frac{\partial \theta(l_1, y)}{\partial l} = q_2(l_1, y); \quad (13)$$

$$\theta(l, 0) = \theta_c. \quad (14)$$

Для решения уравнения (11) с граничными условиями (12)-(14) применим конечное интегральное преобразование Ханкеля по радиальной координате l вида [8]

$$\bar{f}(\mu_n) = \int_{l_1}^1 l \psi_n(\mu_n l) f(l) dl, \quad (15)$$

где ядро преобразования $\psi_n(\mu_n l)$ определяется согласно [8], как решение граничной задачи Штурма – Лиувилля в форме

$$\begin{aligned} \psi_n(\mu_n l) = & Y_1(\mu_n) J_0(\mu_n l) - \\ & - J_1(\mu_n) Y_0(\mu_n l). \end{aligned} \quad (16)$$

Здесь $J_0(\mu_n l)$, $J_1(\mu_n)$, $Y_0(\mu_n l)$, $Y_1(\mu_n)$ – функции Бесселя, μ_n – собственные числа, определяемые как корни уравнения Бесселя первого и второго рода.

Решение уравнения (11) с краевыми условиями (12)-(14) в окончательной форме имеет вид

ется одной лишь средней по сечению температурой изделия, что позволяет все последующие расчеты режимов индукционного нагрева выполнить на базе математической модели непрерывного нагрева теплотехнически тонкого тела [4].

В рассматриваемом случае при сквозном индукционном нагреве полых цилиндрических заготовок аппроксимация процесса непрерывного индукционного нагрева математической моделью нагрева теплотехнически тонкого тела дает достаточную для практических целей точность. Такая точность обеспечивается благодаря

наличию внутренних источников тепла, при которых равномерность нагрева по сечению изделия значительно выше, чем при нагреве внешними источниками. Указанная неравномерность определяется характером изменения плотности тока по радиусу изделия, который определяется параметром $\zeta = \frac{R\sqrt{2}}{\Delta}$ [1], характеризующим степень проявления поверхностного эффекта. Для сквозного индукционного нагрева подшипниковых колец $\zeta = 4$. В этом случае температурный градиент по радиусу заготовки имеет небольшую величину и

$$\begin{aligned} \theta_{cp}(y) = \theta_0(y) + \sum_{\kappa=1}^{\infty} \int_{l_1}^1 & \left\{ \left[\frac{\bar{Q}_{хол} P_{хол} \alpha_{хол}}{\mu_n^2} + \frac{\bar{q}_{хол}}{\mu_n^2} \psi(\mu_n) \right] \left(e^{-\mu_n^2 \frac{y_{зоп} - y_{np}}{\beta_{хол}}} - e^{-\mu_n^2 v_{зоп}} \right) \Phi(\mu_n, l) + \right. \\ & + \left[\frac{\bar{Q}_{np} P_{np} \alpha_{np}}{\mu_n^2} + \frac{\bar{q}_{np}}{\mu_n^2} \psi(\mu_n) \right] \cdot \left(e^{\frac{\mu_n^2}{\beta_{хол}} y_* + \frac{\mu_n^2}{\beta_{np}} (y_{зоп} - y_{np}) - v_{зоп}} - e^{\frac{\mu_n^2}{\beta_{хол}} y_{np} - o_{зоп}} \right) + \\ & \left. + \left[\frac{\bar{Q}_{зоп} P_{зоп} \alpha_{зоп}}{\mu_n^2} + \frac{\bar{q}_{зоп}}{\mu_n^2} \psi_{\kappa}(\mu_{\kappa}) \right] \cdot \left(1 - e^{-\frac{\mu_{\kappa}^2}{\beta_{зоп}} (y - y_{зоп})} \right) \right\} dl, \end{aligned} \quad (18)$$

где $q_{1хол} = \frac{Q_{1хол}}{P_6 \cdot R_2}$; $q_{2хол} = \frac{Q_{2хол}}{P_6 \cdot R_2}$;
 $q_{1np} = \frac{Q_{1np}}{P_6 \cdot R_2}$; $q_{2np} = \frac{Q_{2np}}{P_6 \cdot R_2}$; $q_{1зоп} = \frac{Q_{1зоп}}{P_6 \cdot R_2}$;
 $q_{2зоп} = \frac{Q_{2зоп}}{P_6 \cdot R_2}$; $Q_{1хол}$, $Q_{2хол}$, Q_{1np} , Q_{2np} , $Q_{1зоп}$,
 $Q_{2зоп}$ – соответственно удельные тепловые потери q и удельные объемные мощности Q на «холодном», «промежуточном» и «горя-

разность температур по сечению кольца в процессе нагрева не достигает критического значения.

Благодаря такой особенности оценку температурного режима можно производить по средней по сечению кольца температуре, принимая ее за единственный параметр, характеризующий тепловое состояние кольца в процессе нагрева.

Интегрируя (17) в пределах от l_1 до 1 с учетом принятой аппроксимации (5) функции распределения внутренних источников тепла, получим для средней по радиальной координате температуры

чем» участках, определяемые при электромагнитном расчете индуктора.

С другой стороны, средняя по сечению температура кольцевой заготовки при ее индукционном нагреве может быть легко представлена (как интегральный параметр) в форме температуры $\theta^*(l, y)$ эквивалентного тонкого тела, теплофизические характеристики которого определяются через параметры реального объекта в виде

$$\theta^*(l, y) = \begin{cases} A(1 - e^{-\beta y}), & \forall y \in [0, y_{np}]; \\ A(1 - e^{-\beta y_{np}}) \cdot e^{-\beta y} + B \cdot (1 - e^{-\beta y}), & \forall y \in [y_{np}, 1], \end{cases} \quad (19)$$

для которого коэффициенты A и B приближения определяются из условия минимизации среднеквадратичной ошибки

$$J^* = \int_0^1 [\theta_{cp}(y) - \theta^*(y)]^2 dy. \quad (20)$$

Такая аппроксимация дает вполне удовлетворительную точность, что позво-

ляет весь последующий анализ исследуемого процесса непрерывного индукционного нагрева и синтез алгоритмов управления выполнить для модели нагрева теплотехнически тонкого тела с коэффициентами, рассчитанными по предлагаемой методике.

1. **Вайнберг А.М.** Индукционные плавильные печи / А.М. Вайнберг. М.: Энергия, 1967. 415 с.

2. **Лыков А.В.** Тепломассообмен: справочник / А.В. Лыков. М.: Энергия, 1978. 480 с.

3. **Слухоцкий А.Е.** Индукторы для индукционного нагрева машиностроительных деталей / А.Е. Слухоцкий, С.Е. Рыскин. Л.: Энергия, 1975. 183 с.

4. **Рапопорт Э.Я.** Оптимизация процессов индукционного нагрева металла / Э.Я. Рапопорт. М.: Metallurgia, 1993. 279 с.

5. **Немков В.С.** Теория и расчет устройств индукционного нагрева / В.С. Нем-

ков, В.Б. Демидович. Л.: Энергоатомиздат, 1988. 280 с.

6. **Павлов Н.А.** Инженерные тепловые расчеты индукционных нагревателей / Н.А. Павлов. М.; Л.: Энергия, 1978. 120 с.

7. **Синдяков Л.В.** Оптимизация энерготехнологических характеристик установившихся режимов работы индукционных установок непрерывного действия для нагрева стальных заготовок: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Л.В. Синдяков. Л., 1984. 19 с.

8. **Карташов Э.М.** Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел / Э.М. Карташов. М.: Высшая школа, 1985. 480 с.

Данилушкин Александр Иванович – доктор технических наук, профессор, Самарский государственный технический университет

Alexander I. Danilushkin – Dr.Sc., Professor, Samara State Technical University

Пименов Данил Николаевич – аспирант, Самарский государственный технический университет

Danil N. Pimenov – Postgraduate, Samara State Technical University

Васильев Иван Владимирович – студент, Самарский государственный технический университет

Ivan V. Vasilev – Undergraduate, Samara State Technical University

Статья поступила в редакцию 12.08.13, принята к опубликованию 01.10.13

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 настоящей 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.

Моделирование и оптимизация параметров индукционного нагревателя трубопровода

В.А. ДАНИЛУШКИН, С.А. ЗУБАРЕВ, Я.М. ОШКИН

Modeling and Optimization of Parameters for the Pipeline Induction Heater

V.A. DANILUSHKIN, S.A. ZUBAREV, Ya.M. OSHKIN

С помощью разработанной конечно-элементной модели электротепловых полей в системе, состоящей из двух разделенных диэлектрической жидкостью осесимметричных металлических труб с различными электрофизическими свойствами, проведены расчеты и выполнен анализ распределения мощности электромагнитных источников тепла по длине нагревателя. На основании результатов расчета электромагнитных и тепловых полей получено оптимальное распределение удельной мощности по длине нагревателя.

Ключевые слова: индукционный нагрев, моделирование, электромагнитное поле, теплообмен, температурное распределение

Математическое моделирование процесса нагрева потока жидкости энергией, выделяющейся в трубе при протекании вихревых токов, наведенных электромагнитным полем индуктора, представляет собой сложную задачу. Сложность моделирования заключается в наличии физически неоднородной структуры объекта, нелинейных физических характеристик составных частей системы и движением нагреваемой жидкости. Проектируемые индукционные нагревательные установки должны отвечать высоким технологическим и энергетическим требованиям: они должны обеспечить энергоэффективность, заданную скорость нагрева, минимальные массогабаритные показатели, заданную температуру жидкости на выходе из нагревателя. Для обеспечения всех требований требуется разработать методику расчета режимов работы, основанную на математических моделях,

Estimate analysis has been performed for power dispatch provided by electromagnetic heat sources along the heater length by means of a new finite element model of electrothermal fields in the system consisting of two axis-symmetric metal pipes divided by dielectric liquid and distinguished for various electrophysical properties. Optimum distribution of specific power along the heater length has been received using the results of electromagnetic and thermal field estimation.

Keywords: induction heating, modeling, electromagnetic field, heat exchange, temperature distribution

описывающих процесс теплообмена в сложной физически неоднородной структуре с учетом всех возмущающих факторов.

Схема теплообмена, используемая при решении задачи моделирования в исследуемой структуре тел, представлена на рис. 1. Здесь $W(x, t)$ – источники тепла, обусловленные вихревыми токами в стенке трубы, $q(x, t)$ – тепловые потоки, характеризующие тепловые потери, $T(x, t)$ – температурное распределение в потоке жидкости, $V(r)$ – распределение скорости жидкости по сечению потока.

Для разработки математической модели процессов нестационарной теплопроводности в рассматриваемой структуре требуется решение комплексной задачи, включающей электромагнитные процессы в системе «индуктор – металл», процесс тепловыделения в стенке трубы, процесс нестациона-

нарного теплообмена между разнородными по физическим свойствам телами – стенкой металлической трубы и жидкостью. Кроме того, при разработке математической модели процесса нагрева жидкости внутренни-

ми источниками тепла необходимо учитывать влияние неравномерного распределения скорости потока по сечению на температурное распределение.

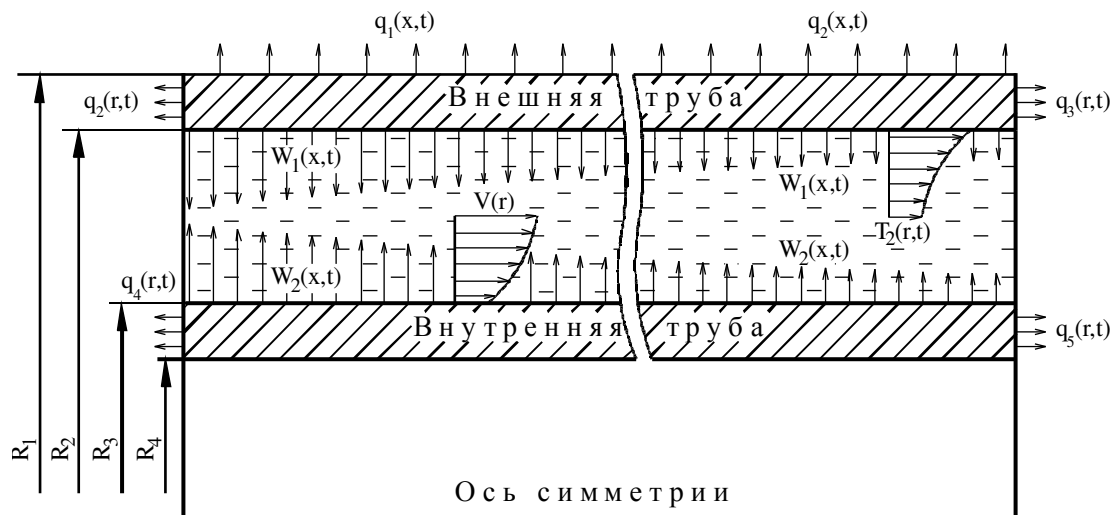


Рис. 1. Схема тепломассопереноса

Как известно, максимальный экономический эффект достигается при совместной оптимизации конструктивных и режимных параметров. Для стационарного процесса непрерывного индукционного нагрева актуальной является задача минимизации длины индуктора, решение которой обеспечивает одновременно максимальное быстродействие и минимум тепловых потерь, что существенно повышает технико-экономические показатели процесса.

При разработке энергоэффективных установок индукционного нагрева необходимо решить ряд задач, в том числе:

1) разработка математической модели процесса индукционного нагрева трубопровода и протекающей по нему вязкой жидкости, учитывающей нелинейную зависимость мощности, выделяющейся в стенке трубы, от температуры трубы;

2) разработка оптимальной конструкции нагревателя, обеспечивающей заданное распределение температуры при минимальных массогабаритных показателях;

3) обеспечение минимального времени выхода на установившийся режим работы при изменении производительности трубо-

проводной системы или при вводе её в эксплуатацию;

4) разработка и реализация системы управления, обеспечивающей заданные требования по быстродействию и качеству процесса нагрева.

Моделирование процесса нагрева потока неэлектропроводной жидкости в индукционном нагревателе принципиально отличается от моделирования процессов индукционного нагрева металла под обработку давлением или термообработку из-за наличия физически неоднородной структуры сопряженных тел.

В общем случае процесс непрерывного индукционного нагрева рассматриваемого класса объектов, представляющего собой систему двух сопряженных разнородных по физическим свойствам цилиндрических тел, описывается нелинейной взаимосвязанной системой уравнений Максвелла и Фурье соответственно для электромагнитного и теплового полей с соответствующими краевыми условиями [1, 2].

$$\text{rot}\{\bar{H}\} = \{J\} + \left\{ \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} \right\} = \{J_s\} + \{J_e\} + \left\{ \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} \right\}, \quad (1)$$

$$\operatorname{rot}\{\bar{E}\} = -\left\{\frac{\partial \bar{B}}{\partial t}\right\}; \operatorname{div}\{\bar{B}\} = 0; \operatorname{div}\{\bar{D}\} = \rho, \quad (2)$$

$$c_1(T_1)\gamma_1(T_1)\frac{\partial T_1}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda_1(T_1)\operatorname{grad}T_1)_1 - \operatorname{div}[EH], \quad (3)$$

$$c_2(T_2)\gamma_2(T_2)\frac{\partial T_2}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda_2(T_2)\operatorname{grad}T_2)_1 - c_2(T_2)\gamma_2(T_2)V_2\operatorname{grad}T_2. \quad (4)$$

Здесь $\{H\}$, $\{B\}$, $\{D\}$ – векторы напряженности магнитного поля, магнитной и электрической индукции, $\{J_s\}$ – вектор плотности приложенного тока, $\{J_e\}$ – вектор плотности индуцированного тока, ρ – плотность электрических зарядов, t – время, c_1 , c_2 , γ_1 , γ_2 – удельные значения теплоемкости и плотности материалов цилиндров, V_2 – вектор скорости потока жидкости, T_1 , T_2 – температурные поля внешней трубы и жидкости соответственно. Объемная плотность внутренних источников тепла, индуцируемых в тепловыделяющем цилиндре, определяется дивергенцией вектора Пойнтинга $\Pi = -\operatorname{div}[EH]$.

На первом этапе решается задача поиска характера распределения мощности источников тепла в стенке трубы. Учитывая осевую симметрию рассматриваемой системы, уравнение Максвелла для комплексной амплитуды векторного потенциала может быть представлено в виде [3]:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{1}{\mu_a(r, z)} \cdot \frac{\partial \dot{\mathbf{A}}(r, z)}{\partial z} \right] + \\ & + \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{\mu_a(r, z)} \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial r \dot{\mathbf{A}}(r, z)}{\partial r} \right] - \\ & - j\omega\gamma \dot{\mathbf{A}}(r, z) - J_0(e, z) = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь $\dot{\mathbf{A}}$ – векторный магнитный потенциал, $\dot{\mathbf{J}}$ – вектор плотности тока.

В качестве граничных условий для определенности задачи примем наиболее общие условия – равенство нулю вектор-

ного потенциала на границе расчетной области, достаточно удаленной от источников тока, где магнитная энергия поля близка к нулю.

Решение уравнения (5) ищется путем минимизации нелинейного функционала, выражающего энергию электромагнитного поля [3]

$$\begin{aligned} f(\dot{\mathbf{A}}) = & \\ = \frac{1}{2} \iint_Q & \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu_a} \right) \frac{\partial \dot{\mathbf{A}}}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{\mu_a r} \right) \frac{\partial r \dot{\mathbf{A}}}{\partial r} \right] dr dz + \\ & + \frac{1}{2} \iint_Q j\omega\gamma |\dot{\mathbf{A}}|^2 dr dz + \frac{1}{2} \iint_Q \dot{\mathbf{J}} \dot{\mathbf{A}} dr dz. \end{aligned} \quad (6)$$

Учет нелинейной зависимости $\mu_a(H)$ в ферромагнитной трубе осуществляется итерационным способом, предусматривающим многократное решение результирующей системы уравнений. В начальной стадии расчета задается значение $\mu_a = \text{const}$ по всей области ферромагнитных макроэлементов, затем вычисляются распределенные параметры поля, что позволяет на следующей стадии расчета корректировать μ_a внутри каждого ферромагнитного конечного элемента в зависимости от значения напряженности поля в данной области. Итерации повторяются до полной сходимости процесса.

Высокое быстродействие электромагнитных процессов по сравнению с тепловыми позволяет разделить во времени процедуру решения электромагнитной и тепловой задач. Это позволяет электромагнитную задачу решать как стационарную, а тепловую представить в форме системы дифференциальных уравнений нестационарной теплопроводности.

Проведенные с помощью численных методов исследования температурных полей показали, что для рассматриваемого диапазона рабочих температур процесс нестационарного теплообмена между стенкой трубы и потоком жидкости при индукционном нагреве можно представить в виде системы линейных неоднородных уравнений вида [4, 5]

$$\frac{\partial T_1(r, x, t)}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T_1(r, x, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_1(r, x, t)}{\partial r} \right) + \gamma \frac{\partial^2 T_1(r, x, t)}{\partial r^2} + W(r, x, t), \quad (7)$$

$$r \in [R_1, R_2], \quad x \in [0, L],$$

$$\frac{\partial T_2(r, x, t)}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T_2(r, x, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_2(r, x, t)}{\partial r} \right) + \gamma \frac{\partial^2 T_2(r, x, t)}{\partial x^2} - V(r) \frac{\partial T_2(r, x, t)}{\partial x}, \quad (8)$$

$$r \in [0, R_1], \quad x \in [0, L]$$

с начальными условиями

$$T_1(r, x, 0) = T_{10}(r, x), \quad T_2(r, x, 0) = \theta_{20}(r, x). \quad (9)$$

Здесь R_1 – внутренний радиус трубы.

В качестве основного варианта принимаются краевые условия второго рода и условия сопряжения четвертого рода на поверхности контакта:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(R, x, t)}{\partial r} = q_1(x, t), \quad \frac{\partial T_2(0, x, t)}{\partial r} = 0;$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(R_1, 0, T)}{\partial x} = q_2(r, t), \quad \forall r \in [R_1, R_2];$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(R_1, L, t)}{\partial x} = q_3(r, t), \quad \forall r \in [R_1, R_2];$$

$$T_2(r, 0, t) = 0, \quad \forall r \in [R_1, R_2];$$

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2(r, 1, t)}{\partial x} = q_4(r, t), \quad \forall r \in [0, R_1];$$

$$\frac{\partial T_1(R_1, x, t)}{\partial r} = \beta \frac{\partial T_2(R_1, x, t)}{\partial r};$$

$$T_1(R_1, x, t) = T_2(R_2, x, t). \quad (10)$$

Здесь $T_1(r, x, t)$, $T_2(r, x, t)$, $q_1(x, t)$, $q_2(x, t)$, $q_3(x, t)$, $q_4(x, t)$ – соответственно температурные поля внешнего (стенки трубы) и внутреннего (потока жидкости) сопряженных цилиндров, потоки тепла с поверхностей цилиндров, $W(r, x, t)$ – распределенные по объему внешней трубы источники внутреннего тепловыделения, r , x – соответственно радиальная и осевая координаты. Для конкретной рассматриваемой ситуации функцию распределения

мощности $W(r, x, t)$ источников внутреннего тепловыделения можно представить в виде произведения.

Для рассматриваемого класса технологических объектов действительный характер функции $W(r, x, t)$ распределения внутренних источников тепла можно с небольшой погрешностью представить в виде произведения

$$W(r, x, t) = Q(r) \cdot F(x) \cdot P(t). \quad (11)$$

Здесь $Q(r)$ – функция распределения внутренних источников по радиальной координате r , $F(x)$ – функция распределения внутренних источников тепла по длине x нагревателя, $P(t)$ – мощность источников тепла.

Исследование процесса теплопередачи в системе «труба – поток жидкости» производится с учетом неравномерного распределения скорости по сечению потока. В зависимости от характера течения (числа Рейнольдса) рассмотрены два варианта теплообмена – при ламинарном и турбулентном течении жидкости в трубе [5]. Для учета влияния характера течения на температурное распределение выполнено совместное решение уравнений теплопроводности и уравнения движения сплошной среды, описываемое уравнением движения Навье – Стокса [4] для вязких ньютоновских жидкостей.

Решение (9)-(12) позволяет определить температурные распределения в жидкости и стенке трубы.

При проектировании индукционных установок непрерывного действия для нагрева

жидкости основными параметрами, определяющими эффективность нагревателя, являются общая длина нагревателя, число автономных секций, уровень и характер распределения мощности, найденные с учетом технологических и энергетических ограничений. Оптимизация пространственных параметров для исследуемых технологических процессов сводится к решению специальной системы трансцендентных уравнений относительно неизвестных параметров оптимальной конструкции – числа автономных секций, длины каждой секции, числа слоев индуктирующей обмотки, числа витков в каждом слое. Процесс проектирования рассматривается на двумерной модели, которая учитывает геометрию поверхности нагрева и условия теплообмена.

Первоначальный вариант конструкции индукционного нагревателя определяется исходя из известных конструктивных решений для рассматриваемого класса объектов и комплекса технологических и эксплуатационных требований, обусловленных спецификой исследуемого процесса.

Задача на минимум длины индукционной системы формулируется следующим образом [6].

Для объекта, описываемого в установленном режиме уравнениями вида

$$a \left(\frac{\partial^2 T_1(r, x)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_1(r, x)}{\partial r} \right) + \gamma \frac{\partial^2 T_1(r, x)}{\partial r^2} + Q(r) F(x) = 0, \quad (12)$$

$$r \in [R_1, R_2], \quad x \in [0, L],$$

$$a \left(\frac{\partial^2 T_2(r, x)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_2(r, x)}{\partial r} \right) + \gamma \frac{\partial^2 T_2(r, x)}{\partial x^2} - V(r) \frac{\partial T_2(r, x)}{\partial x} = 0, \quad (13)$$

$$r \in [0, R_1], \quad x \in [0, L]$$

с краевыми условиями второго рода и условиями сопряжения четвертого рода на поверхности контакта:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(R, x)}{\partial r} = q_1(x);$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(R_1, 0)}{\partial x} = q_2(r), \quad \forall r \in [R_1, R_2];$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(R_1, L)}{\partial x} = q_3(r), \quad \forall r \in [R_1, R_2];$$

$$T_2(r, 0) = 0, \quad \forall r \in [R_1, R_2];$$

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2(r, L)}{\partial x} = q_4(r), \quad \forall r \in [0, R_2];$$

$$\frac{\partial T_1(R_1, x)}{\partial r} = \beta \frac{\partial T_2(R_1, x)}{\partial r};$$

$$T_1(R_1, x) = T_2(R_1, x), \quad (14)$$

требуется найти стесненное ограничением

$$0 \leq F(x) \leq F_{\max}(x) \quad (15)$$

распределение удельной мощности $F_{1onm}(x)$ по длине, обеспечивающее выполнение условия

$$\max_{r \in [0, R]} |T_{onm}(r, L) - T_{зад}(r)| \leq \Delta T_{зад} \quad (16)$$

в выходном сечении ($x = L$) при заданной точности $\Delta T_{зад}$ нагрева и минимальной полной длине L нагревателя.

На рис. 2 приведены расчетные графики распределения удельной мощности индукционного нагревателя при симметричном нагреве для различной производительности. Снижение уровня мощности по ходу нагрева обусловлено уменьшением коэффициента теплоотдачи от стенки трубы к жидкости по мере ее перемещения к выходу.

Так как на практике реализовать полученное расчетным путем распределение мощности по длине нагревателя не представляется возможным, предлагается ступенчатая аппроксимация функции распределения источников. Количество интервалов постоянства зависит от уровня мощности нагревателя, требований к плавности регулирования, условий согласования мощности индукционного нагревателя с источником питания. Для исследуемого в работе нагревателя оптимальным с точки зрения согласования параметров индуктора и трехфазного источника питания является использование трехсекционного нагревателя с уменьшающейся по ходу нагрева мощностью каждой секции.

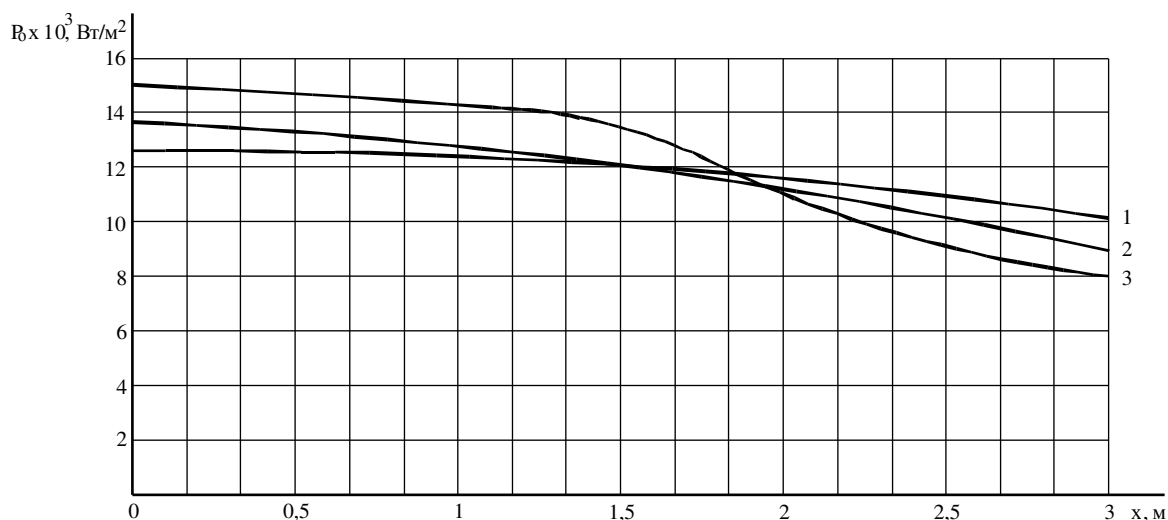


Рис. 2. Расчетные значения удельной мощности по длине нагревателей: 1 – температура на выходе из нагревателя – 60 град.; 2 – температура на выходе из нагревателя – 70 град.; 3 – температура на выходе из нагревателя – 90 град.

Приведенные выше результаты получены без учета технологических ограничений на параметры процесса при постоянном значении коэффициента теплообмена между стенкой трубы и жидкостью по всей длине нагревателя. В реальной ситуации коэффициент теплообмена изменяется в широких пределах (50-500) Вт/(м²·град). Кроме того, имеют место ограничения на температуру нагрева, обусловленные физическими свойствами нефти. При наличии технологического ограничения на максимальную температуру нагреваемой жидкости в процессе нагрева температура стенки трубы также должна быть ограничена на определенном уровне. Так как между температурой стенки трубы и средней по сечению потока темпе-

ратурой жидкости в установившемся режиме перекачки существует однозначная связь, при уменьшении производительности установки температура трубы при неизменной длине нагревателя также должна быть снижена. В стационарном режиме указанное требование обеспечивается стабилизацией на заданном уровне температуры трубы, что при переменном коэффициенте теплообмена приводит к неравномерному распределению мощности по длине нагревателя. Алгоритм распределения удельной мощности по длине нагревателя при различной производительности находится аналогично предыдущему на основании решения тепловой задачи с переменным коэффициентом теплообмена по длине трубы.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Вайнберг А.М.** Индукционные плавильные печи / А.М. Вайнберг. М.: Энергия, 1967. 415 с.
2. **Лыков А.В.** Теплообмен: справ. / А.В. Лыков. М.: Энергия, 1978. 480 с.
3. **Немков В.С.** Теория и расчет устройств индукционного нагрева / В.С. Немков, В.Б. Демидович. Л.: Энергоатомиздат, 1988. 280 с.
4. **Исаченко В.П.** Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. М.: Энергоиздат, 1981. 416 с.
5. **Данилушкин А.И.** Идентификация процесса низкотемпературного индукционного нагрева при обработке полимерных материалов / А.И. Данилушкин, Л.С. Зимин // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Техн. науки. 1994. № 1. С. 171-177.
6. **Рапопорт Э.Я.** Оптимизация процессов индукционного нагрева металла / Э.Я. Рапопорт. М.: Металлургия, 1993. 279 с.

Данилушкин Василий Александрович – кандидат технических наук, доцент, Самарский государственный технический университет

Vasily A. Danilushkin – Ph.D., Associate Professor, Samara State Technical University

Зубарев Сергей Александрович – аспирант, Самарский государственный технический университет

Sergey A. Zubarev – Postgraduate, Samara State Technical University

Ошкин Ярослав Михайлович – аспирант, Самарский государственный технический университет

Yaroslav M. Oshkin – Postgraduate, Samara State Technical University

Статья поступила в редакцию 12.08.13, принята к опубликованию 01.10.13

УДК 621.365.5

Измерение диэлектрических свойств материалов при высоких температурах

А.В. ГДАЛЕВ, К.Н. ОГУРЦОВ

Measuring Dielectric Properties of Materials under High Temperatures

A.V. GDALOV, K.N. OGURTSOV

Рассмотрена проблема измерения диэлектрических свойств материала при высоких температурах и предложен вариант измерительной камеры.

Ключевые слова: измерение, диэлектрические свойства, СВЧ установки, СВЧ нагрев

The article considers the issues of measuring dielectric properties of a material under high temperatures, and proposes a measuring camera option.

Keywords: measurement, dielectric properties, microwave installation, microwave heating

Диэлектрические параметры ϵ' и $\text{tg } \delta$ показывают, насколько эффективно обрабатывать объект в СВЧ рабочих камерах. Их необходимо знать для конструирования и математического моделирования СВЧ рабочих камер и реализации в них технологических процессов. Значения ϵ' и $\text{tg } \delta$ индивидуальны для каждого материала и в наибольшей степени зависят от температуры.

Для измерения ϵ' и $\text{tg } \delta$ при высоких температурах предлагается использовать установку, представленную на рис. 1, доработав короткозамкнутую волноводную секцию с

исследуемым объектом 11 и электронагреватель 13. Если к одному из плеч С и D волноводного моста подключить нагрузку, принятую за эталонную (например, короткое замыкание), а к другому – исследуемую нагрузку (12), то часть СВЧ энергии поступает в плечо В и характеризует отличие исследуемой нагрузки от эталонной. Это свойство волноводного моста и используется для измерений ϵ' и $\text{tg } \delta$ [1, 2].

Чтобы нагреть короткозамкнутую волноводную секцию с исследуемым образцом 11 до высокой температуры (например

1500°C), предлагается использовать индуктор, а в качестве материала короткозамкнутой волноводной секции использовать молибден, так как температура плавления этого металла составляет 2620°C, что позволяет ему выдерживать высокие температуры при нанесении на его поверхность специального защитного слоя, предотвращающего коррозию [3]. Так как короткозамкнутая волноводная секция, нагреваясь до высоких температур, изменяет свои геометрические размеры, необходимо ее калибровать для внесения поправок в показания микрометрического винта 7.

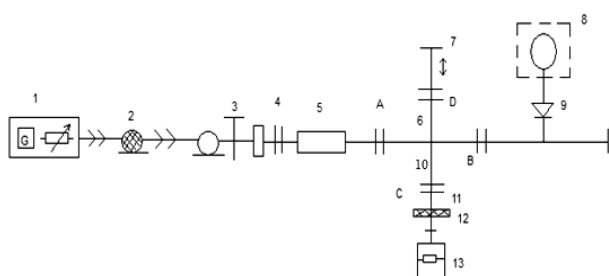


Рис. 1. Блок-схема установки для измерения ϵ' и $\operatorname{tg} \delta$: 1 – СВЧ генератор; 2 – коаксиальный кабель; 3 – волноводно-коаксиальный переход; 4 – фланцевое соединение волноводов; 5 – аттенюатор; 6 – волноводный мост; 7 – подвижный микрометрический винт; 8 – индикаторный прибор с усилителем; 9 – детекторная головка; 10 – отрезок волновода, охлаждаемый водой; 11 – короткозамкнутая волноводная секция с исследуемым объектом; 12 – исследуемый объект; 13 – электронагреватель

Обычно достигаемая точность измерений ϵ' составляет 1-1,5%, $\operatorname{tg} \delta$ 10-15%. Но для целей СВЧ электротермии высоких значений точности этих параметров не требуется, так как рабочие камеры проектируются с тем расчетом, чтобы значительное изменение параметров ϵ' и $\operatorname{tg} \delta$ в процессе термообработки не влияло на КПД рабочей камеры.

Для защиты измерительной установки и индуктора от воздействия высоких температур предлагается использовать футеровку 2 (рис. 2) из керамоволокнистых модулей иглопробитого материала МКВМП Z, которая выдерживает температуру до 1740°C. Для защиты от теплового излучения, воз-

действия газов, которые могут выделяться в процессе нагрева из исследуемых образцов, и предотвращения конвекции горячего воздуха по волноводам измерительной установки имеются радиопрозрачные крышки из бериллиевой керамики 6.

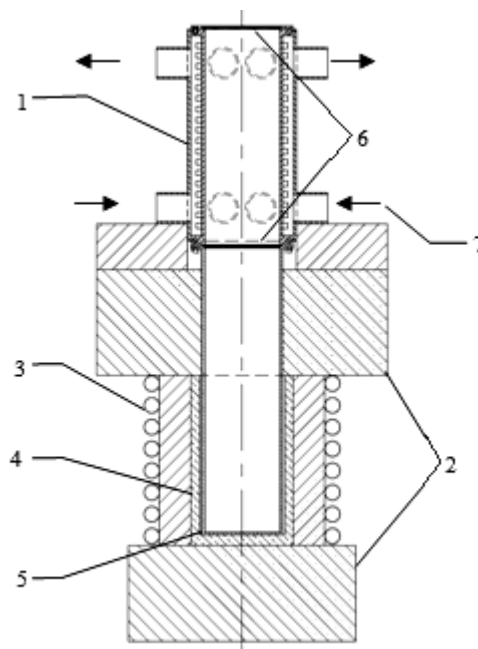


Рис. 2. Высокотемпературная измерительная линия в разрезе: 1 – водоохлаждаемый волновод; 2 – теплоизоляция; 3 – индуктор; 4 – графитовый тигель; 5 – молибденовая короткозамкнутая волноводная секция; 6 – радиопрозрачная крышка из бериллиевой керамики; 7 – направление течения охлаждаемой жидкости

Молибденовую короткозамкнутую волноводную секцию от измерительной линии отделяет водоохлаждаемый отрезок волновода 1. В качестве материала для его изготовления предлагается нержавеющая сталь. Чтобы предотвратить пленочное кипение охлаждающей жидкости, на внешней поверхности волновода следует установить специальные штыри, которые проходят сквозь кипящий слой и вызывают турбулентность омывающего потока охлаждающей жидкости (рис. 3). Этот способ используется, например, в охлаждении атомных реакторов [4].

Нагрев короткозамкнутой волноводной секции (рис. 2) 5 осуществляется косвенным образом за счет теплопередачи от графитового стакана 4 (марка графита МПГ-6),

который, в свою очередь, нагревается индуктором 3 (рис. 2) [5, 6].

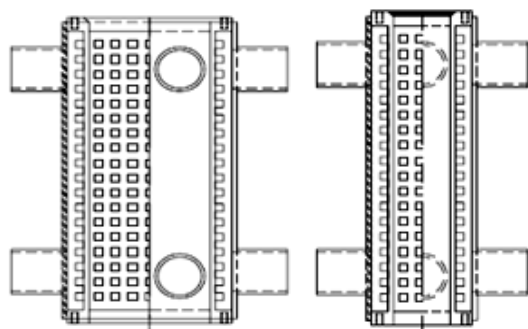


Рис. 3. Водоохлаждаемая секция волновода

Индуктор представляет собой медную трубку, обвитую вокруг футеровки, внутрь которой помещен графитовый тигель с молибденовой короткозамкнутой волноводной секцией. Он имеет 8 витков сечением 15 мм с толщиной стенки 0,4 мм. Работает индуктор на частоте 66 кГц.

В результате математического моделирования процесса нагрева в программе Elcut было получено распределение температурного поля по длине рабочей камеры (рис. 4).

На рис. 5 представлено распределение температуры в нижней части молибденовой

короткозамкнутой секции 5, в которой находится исследуемый образец 6 (рис. 4). График (рис. 5) показывает, что в нижней части камеры присутствует изотермическая зона и исследуемый образец прогревается равномерно. Температура в изотермической зоне составляет 1786 К.

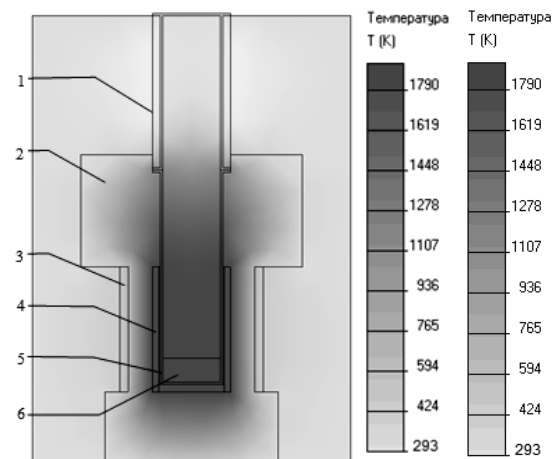


Рис. 4. Распределение температурного поля в рабочей камере со стороны широкой стенки волновода: 1 – водоохлаждаемый волновод; 2 – теплоизоляция; 3 – индуктор; 4 – графитовый тигель; 5 – молибденовая короткозамкнутая волноводная секция; 6 – исследуемый материал

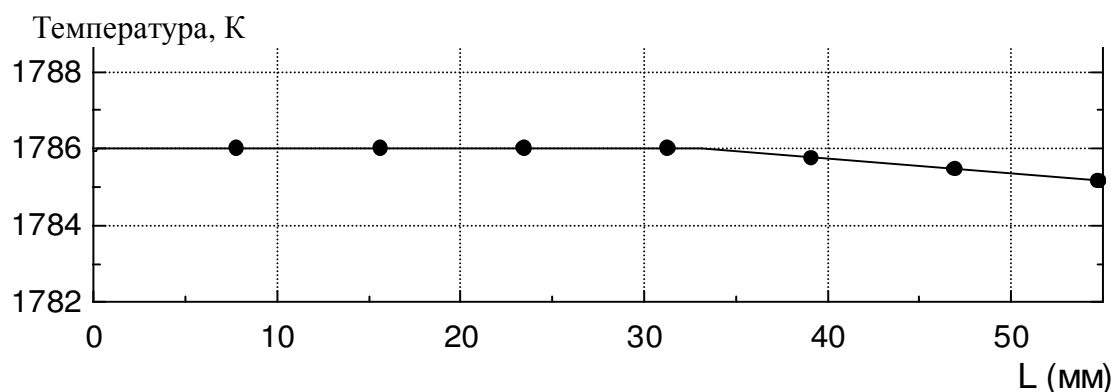


Рис. 5. Распределение температуры в нижней части молибденовой короткозамкнутой секции

После изотермической зоны температура начинает падать, и, чтобы уменьшить потери тепла, волновод футеруется теплоизолирующим материалом.

Средняя температура на боковой поверхности футеровки составляет 327 К, сверху 389 К. Также теплоизолирующий материал присутствует между графитовым

тиглем и индуктором, чтобы уберечь водоохлаждаемый индуктор от перегрева. Температура у индуктора со стороны футеровки составляет 470 К.

Саму измерительную установку предлагается поместить в металлический кожух для защиты обслуживающего персонала от повышенных температур.

1. **Брант А.А.** Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах / А.А. Брант. М.: Физматгиз, 1963.

2. **Архангельский Ю.С.** Измерение в СВЧ электротехнологии / Ю.С. Архангельский, С.Г. Калганова. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2008.

3. Способ защиты тугоплавких металлов от окисления [Текст]: пат. 2032763 Рос. Федерация: МПК7 С 23 С 10/00 / Молев Г.В. [и др.]; заявитель Научно-производственное объединение «Композит»; Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова; патентообладатель Научно-производственное объединение «Композит». 5034404/02; заявл. 08.07.1991; опубл. 10.04.1995.

4. Реактор для АЭС [Текст]: пат. 2456688 Рос. Федерация: МПК7 G 21 C 15/28 / Веселов Д.О., Асадский С.И., Мусатов Д.Ю., Рыжов С.Б.; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество «Ордена Трудового Красного Знамени и ордена труда ЧССЗ опытное конструкторское бюро «ГИДРОПРЕСС». 2010151810/07; заявл. 17.12.10; опубл. 20.07.2012, Бюл. № 20. 7 с.

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

6. **Свенчанский А.Д.** Электрические печи сопротивления / А.Д. Свенчанский. М.: Энергия, 1975.

Гдалёв Антон Владимирович – аспирант, ассистент кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Anton V. Gdalov – Graduate Assistant, Department of Automated Electrotechnological Plants and Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Огурцов Константин Николаевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Konstantin N. Ogurtsov – Ph.D., Associate Professor, Head: Department of Automated Electrotechnological Plants and Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 22.08.13, принята к опубликованию 03.10.13

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).

Влияние воздействия СВЧ электромагнитного поля на эпоксидный компаунд

А.В. СЛУХАЙ

Impact of SHF Electromagnetic Field on the Epoxy Compound

A.V. SLUHAY

В статье рассматривается процесс отверждения эпоксидного компаунда. Приведены серии экспериментов и их результаты, когда эпоксидная смола и отвердитель обрабатывались в СВЧ электромагнитном поле. Сравнивалось время отверждения эпоксидного компаунда, обработанного в СВЧ электромагнитном поле, с эпоксидным компаундом, нагретым до той же температуры, на водяной бане.

Ключевые слова: *отвердитель, эпоксидная смола, полимеры, нетепловая модификация*

Эпоксидным компаундом называют композицию из эпоксидной смолы и отвердителя. Эпоксидную смолу получают в результате химической реакции эпохлоргидрина с дефинилпропаном, отвердитель состоит из азотосодержащих соединений (полиэтиленполиамин или пиридин) [1]. Отвержденные эпоксидные компаунды применяют в различных отраслях промышленности, таких как [2, 3]:

- строительство (в качестве клеев, красок, лаков);
- самолетостроение (для изготовления ячеистых структур);
- приборостроение и машиностроение (для получения матриц для изготовления деталей);
- электротехническая промышленность (для изготовления обмоток сухих трансформаторов).

В обычных условиях процесс отверждения эпоксидного компаунда идет достаточно медленно и желательное сокращение

This article discusses the curing process of the epoxy compound. A series of experiments and experimental data are provided to demonstrate the epoxy resin and hardener processed in the microwave electromagnetic field. Comparison has been made as to the curing time of the epoxide compound treated in the microwave electromagnetic field and the epoxy compound heated in the water bath up to the same temperature.

Keywords: *hardener, epoxy resin, polymers, nonthermal modification*

времени отверждения. Ускорить процесс отверждения можно при помощи, например, минеральных наполнителей и ультразвука [4]. В [5] для этой цели предлагается воздействовать на эпоксидный компаунд СВЧ электромагнитным полем. Утверждается, что в этом случае имеет место как тепловая, так и нетепловая СВЧ модификация эпоксидного компаунда, приводящая к сокращению времени отверждения.

На наш взгляд, для доказательства наличия нетепловой СВЧ модификации эпоксидного компаунда требуются дополнительные исследования. Так, во-первых, следует рассмотреть влияние СВЧ электромагнитного поля на компоненты эпоксидного компаунда в отдельности. Во-вторых, нужно испытать компаунд на прочность, сравнить время отверждения при воздействии СВЧ электромагнитного поля с временем нагрева на водяной бане и измерить вязкость эпоксидного компаунда.

Проверка влияния СВЧ воздействия в отдельности на эпоксидную смолу и отвердитель проводилась с помощью СВЧ печи «Электроника СП23-1», имеющей генератор с СВЧ мощностью 700 Вт и частотой 2450 МГц. Эпоксидную смолу и отвердитель размещали в диэлектрических кюветах и поочередно помещали в СВЧ печь на заданное время. Кювета размещались в центре рабочей камеры на высоте 6 см. Поскольку такая нагрузка для магнетрона была мала, в рабочей камере находился стакан с водой объемом 200 мл. После обработки в СВЧ электромагнитном поле эпоксидная смола смешивалась с необлученным отвердителем в пропорциях 7:1, 8:1, 10:1. Аналогичный эксперимент проводился и с необлученной смолой и облученным отвердителем, а также с облученными отдельно эпоксидной смолой и отвердителем, которые смешивались в тех же пропорциях. Время отверждения эпоксидного

компаунда измерялось с помощью секундомера. Отверждение эпоксидного компаунда контролировалось с помощью иглы: в момент, когда игла не проникала в компаунд, секундомер останавливался. Измерения делались с временным интервалом в 5 минут.

Была проведена серия экспериментов, когда эпоксидная смола и отвердитель обрабатывались в СВЧ электромагнитном поле, но в отличие от вышеприведенных экспериментов компаунд остывал до комнатной температуры. Эксперименты показали, что остывший эпоксидный компаунд отверждается так же, как и эпоксидный компаунд без СВЧ обработки, так что трудно говорить о СВЧ модификации объекта.

Результаты приведены в табл. 1.

Результаты испытаний отвержденных образцов эпоксидного компаунда на прочность по Викарсу приведены в табл. 2.

Таблица 1

Время отверждения эпоксидного компаунда при различных условиях

Смола/ отвердитель	7:1	8:1	10:1	10:1	10:1	10:1	10:1
Время обработки, с	$\tau_{отв}$, мин	$\tau_{отв}$, мин	$\tau_{отв}$, мин	$\tau_{отв}$, мин, обработана смола	$\tau_{отв}$, мин, обработан отвердитель	$\tau_{отв}$, мин, обработаны оба	$\tau_{отв}$, мин, компаунд из остывших компонентов
Без обра- ботки, с	450	530	600	600	600	590	600
15	260	300	320	310	820	310	600
20	120	170	200	200	—	230	600
25	50	110	140	140	—	130	600
30	кипение	40	60	65	—	60	600
35	кипение	кипение	30	30	—	30	600

Таблица 2

Прочность эпоксидного компаунда при различных условиях

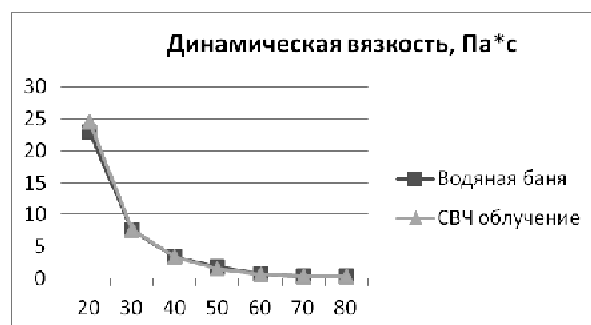
Смола/ отвердитель	7:1	8:1	10:1	10:1	10:1	10:1	10:1
Время об- работки, с	σ_B	σ_B	σ_B	σ_B , обработа- на смола	σ_B , обработан отвердитель	σ_B , оба обработаны	σ_B , до ком- натной
Без обра- ботки, с	28,4	28,4	28,4	28,4	28,4	28,4	28,4
15	27,9	29,1	27,5	29,4	23,4	28,6	27,4
20	28,6	28,7	27,9	29,4	—	28,2	27,5
25	28,4	28,4	28,2	27,1	—	29,1	29,6
30	—	28,4	28,3	27,4	—	27,8	29,1
35	—	—	28,1	28,7	—	28,6	27,7

Как видно из табл. 2, прочность эпоксидного компаунда меняется в пределах погрешности измерительного прибора, а при СВЧ обработке отвердителя эпоксидный компаунд теряет способность к отверждению.

Наконец, сравнивалось время отверждения эпоксидного компаунда, обработанного в СВЧ электромагнитном поле, с эпоксидным компаундом, нагретым до той же температуры на водяной бане. Водяная баня – емкость с водой, в которую помещалась кювета с эпоксидным компаундом. Сравнение производилось в одинаковых пропорциях и при одинаковых условиях. Время отверждения эпоксидных компаундов с одинаковыми компонентами, нагретого на паровой бане и обработанного в СВЧ электромагнитном поле, одинаково. Процесс нагрева на паровой бане занимает, разумеется, длительное время и большие энергетические затраты в сравнении с СВЧ обработкой.

Была также измерена вязкость эпоксидного компаунда, обработанного в СВЧ электромагнитном поле, и вязкость эпоксидного компаунда, нагретого в водяной бане. Измерения проводились на вискози-

метре ВПЖ-4. Результаты приведены на рисунке.



Вязкость эпоксидного компаунда

Вязкости эпоксидного компаунда, нагретого в водяной бане и обработанного в СВЧ электромагнитном поле, находятся в пределах погрешности вискозиметра ВПЖ-4.

Таким образом, совокупность экспериментов свидетельствует, что тепловое воздействие – главная составляющая в ускорении отверждения эпоксидного компаунда. Эксперименты не доказывают нетепловой СВЧ модификации, в то же время, на наш взгляд, нет основания отрицать полное отсутствие нетепловой модификации, поскольку в [5] доказана нетепловая модификация полимеров.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ли Х.** Справочное руководство по эпоксидным смолам / Х. Ли, К. Невилл. М.: Энергия, 1973. 416 с.

2. Композиционные материалы / под ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнопольского. М.: Машиностроение, 1990. 512 с.

3. Справочник по пластическим массам / под ред. В.М. Катаева, В.А. Попова, Б.Н. Сажина. М.: Химия, 1975. Т. 2. 568 с.

4. **Дунаев Л.И.** Ускорение процесса отверждения эпоксидных компаундов /

Л.И. Дунаев // Динамические эффекты мощного ультразвука. Ижевск, 1977. С. 57.

5. **Калганова С.Г.** Исследование воздействия СВЧ электромагнитного поля на физико-химические свойства полимеров / С.Г. Калганова, Ю.С. Архангельский // Направляющие линии, функциональные устройства, элементы технологических установок СВЧ: межвуз. науч. сб. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2000. С. 63-67.

Слухай Альберт Владимирович – аспирант кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Albert V. Sluhay – Postgraduate, Department of Automated Electrotechnological Plants and Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 26.08.13, принята к опубликованию 03.10.13

Технико-экономическая оптимизация структуры и параметров СВЧ электротермического оборудования на камерах лучевого типа

Е.М. ГРИШИНА, Ю.С. АРХАНГЕЛЬСКИЙ

Technical and Economic Optimization for the Structure and Parameters of the Microwave Electrothermal Equipment Using Beam-Type Cameras

E.M. GRISHINA, Yu.S. ARKHANGELSKIY

Рассмотрена технико-экономическая оптимизация числа СВЧ установок, числа, мощности и частоты СВЧ генераторов в установке, собранной на камерах лучевого типа и работающей в периодическом режиме.

Ключевые слова: оптимизация, СВЧ электротехнологическое оборудование, СВЧ установки, периодический режим.

The article considers the technical and economic optimization of microwave installations, and power and frequencies of microwave generators within an in installation assembled under on the beam type camera and operating in the periodic mode.

Keywords: optimization, microwave electrotechnology equipment, SHF installation, periodic mode.

В качестве целевой функции технико-экономической оптимизации структуры и параметров СВЧ электротермических установок в [1, 2] предложено использовать интегральный (социально-экономический) за срок службы проектируемой установки эффект $\mathcal{E}_\Sigma$ [3]. Если установка выпускает один вид продукции, по истечении года ни целиком, ни по частям она не ликвидируется, банковский кредит на ее приобретение выдается в начале проекта и возвращается с банковским процентом в течение года, то

$$\mathcal{E}_\Sigma = \{ (P\Pi - C_c)(1 - \gamma_n - \gamma_{ндс}) - C_э(1 - \gamma_n) - C_{зн}(1 - \gamma_n - \gamma_{зн}) - C_{бр}(1 - \gamma_n) - K[1 + i_{кр} + \gamma_{им} + (\kappa_{зч} + \kappa_a)(1 - \gamma_n)] \} (1 - \gamma_y),$$

где Π , Π – годовой объем и цена единицы продукции; C_c , $C_э$, $C_{зн}$, $C_{бр}$ – затраты на приобретение сырья, на электроэнергию и воду, на заработную плату, на брак; K – капиталовложение; γ_n , $\gamma_{ндс}$, $\gamma_{им}$, $\gamma_{зн}$, $\kappa_{зч}$, κ_a , γ_y – коэффициенты, учитывающие выплаты налогов на прибыль, добавленную сто-

имость, имущество, начисления на заработную плату, затраты на запасные части, амортизацию, выплату дивидендов; $i_{кр}$ – банковский кредит.

Используем соотношение (1) в качестве целевой функции при технико-экономической оптимизации структуры и параметров СВЧ электротермического оборудования, состоящего из N одинаковых СВЧ установок, собранных на рабочих камерах лучевого типа, в каждой из которых имеется M источников СВЧ энергии на магнетронах. Эти камеры вызывают особый интерес, поскольку позволяют обеспечить равномерную, объемную термообработку диэлектриков с большими поверхностями и объемами.

Пусть СВЧ электротермическое оборудование работает автономно в периодическом режиме и осуществляет термообработку без фазового перехода. Согласно [2]

$$C_{зн} = N \sum_{i=1}^K \gamma_i \Phi_i, \quad (2)$$

где Φ_i , Φ_i – численность и годовая зарплата сотрудников i -й категории; κ – количество категорий сотрудников, работающих на одной СВЧ установке,

$$C_3 = \Delta N \left[t_p \left[\frac{T_3 MP}{\eta_{эл}} + MG_{x6} \Pi_{x6} \right] + t_{36c} T_3 MP_{36} \right], \quad (3)$$

где Δ – число рабочих дней в году; t_p – время работы СВЧ установки в сутки; T_3 – тариф на электроэнергию промышленной частоты; $\eta_{эл}$ – КПД магнетрона; P – СВЧ мощность магнетрона; G_{x6} – количество воды, расходуемой на охлаждение одного магнетрона; Π_{x6} – тариф на холодную воду; t_{36c} – время загрузки-выгрузки диэлектрика в сутки, когда СВЧ установка работает в дежурном режиме; P_{36} – мощность, потребляемая от сети магнетроном в дежурном режиме, причем

$$t_{36c} = \frac{t_{36v} t_p (1 - |\Gamma|^2 MP)}{C_d \rho_d V \theta_3}, \quad (4)$$

$$P_{36} = \frac{0,1P}{\eta_{эл}}, \quad G_{x6} = \frac{(1 - \eta_{эл})P}{c_6 \rho_6 \eta_{эл} \Delta T}.$$

Здесь t_{36v} – время загрузки-выгрузки диэлектрика объемом V ; Γ – коэффициент отражения от рабочей камеры; c_d , ρ_d – удельная теплоемкость и плотность диэлектрика; $\theta_3 = T_3 - T_0$; T_3 , T_0 – заданная и начальная температуры диэлектрика; ΔT – разность температур воды на выходе и входе системы водяного охлаждения магнетрона; c_6 , ρ_6 – удельная теплоемкость и плотность воды. Далее, пусть $c_{6p} = 0$, а

$$K = N(\Pi_{\kappa} + \Pi_{u3}), \quad (5)$$

где $\Pi_{\kappa} = aM$; $\Pi_{u3} = M(aP^2 + bP + c)$ a , b , c – коэффициенты аппроксимации зависимости цены одного источника СВЧ энергии от СВЧ мощности P магнетрона.

С учетом (2), (3) соотношение (1) можно записать в виде

$$\begin{aligned} \Xi_{\Sigma} &= [A_1 - \\ &= -(L_1 + L_2 MP + L_3 M^2 P^2 + L_4 MP^2 + L_5 M)] \cdot (1 - \gamma_y), \end{aligned} \quad (6)$$

где $A_1 = (\Pi_{\Sigma} - C_c)(1 - \gamma_n - \gamma_{noc})$;

$$L_1 = \sum_{i=1}^k \Phi_i \Phi_i (1 - \gamma_n - \gamma_{3n});$$

$$L_2 = \frac{\Delta t_p t_3 (1 - \gamma_n)}{\eta_3} + \frac{\Delta t_p \Pi_{x6} (1 - \eta_{эл})(1 - \gamma_n)}{c_6 \rho_6 \eta_{эл} \Delta T} + 6A_2;$$

$$L_3 = \frac{0,1 \Delta t_{36v} (1 - |\Gamma|^2) T_3}{c_d \rho_d V \theta_{3ad} \eta_{эл}}; \quad L_4 = aA_2;$$

$$L_5 = (d + c)A_2;$$

$$A_2 = 1 + i_{kp} + \gamma_{un} + (\kappa_{3ч} + \kappa_a)(1 - \gamma_n);$$

$$N = \frac{H_1 \Pi}{MP}; \quad P = \frac{c_d \rho_d V T_n}{1 - |\Gamma|^2}. \quad (7)$$

Здесь T_n – требуемый темп нагрева. Отметим, что в (6) A_1 , A_2 , L_1 , L_2 , L_3 , L_4 , L_5 , H_1 , P – величины нормативные, то есть заданные. Соотношение (6) можно представить в виде

$$\frac{P \Xi_{\Sigma}}{H_1 \Pi (1 - \gamma_y)} = \frac{-L_1 + L_7 M - L_8 M^2}{M}, \quad (8)$$

$$\text{где } L_6 = \frac{A_1 P}{H_1 \Pi}; \quad L_7 = L_6 - L_2 P - L_4 P^2 - L_5;$$

$$L_8 = L_3 P^2.$$

Максимум Ξ_{Σ} согласно (7) будет при

$$L_8 M^2 - L_1 = 0,$$

так как из-за $L_1 > 0$; $M > 0$

$$\left(\frac{P \Xi_{\Sigma}}{H_1 \Pi (1 - \gamma_y)} \right)' = -\frac{2L_1}{M^3} < 0.$$

В таком случае

$$M_{opt} = \sqrt{\frac{L_1}{L_8}} \Rightarrow M_{opt} P = \sqrt{\frac{L_1}{L_3}};$$

$$N_{opt} = \frac{P c_d \rho_d \theta_3}{D t_p (1 - |\Gamma|^2)} \sqrt{\frac{L_3}{L_1}}, \quad (9)$$

а СВЧ мощность магнетрона (СВЧ мощность источника энергии) определяется соотношением (7).

Таким образом, по соотношениям (7) и (9) можно рассчитать оптимальные значения числа СВЧ установок в СВЧ электро-термическом оборудовании, числа магнетронов (излучателей) в камере лучевого

типа и требуемую СВЧ мощность одного магнетрона. Что касается длины волны СВЧ колебаний λ , то так как эта величина в соотношение (1) в явном виде не входит, ее можно найти, исходя из объема диэлектрика и его диэлектрических свойств

$$\lambda = \sqrt[3]{V} \sqrt{\epsilon' \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}}, \quad (10)$$

где ϵ' , $\operatorname{tg} \delta$ – относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь обрабатываемого диэлектрика. Разумеется, в проекте должны быть учтены значения P и λ серийных магнетронов, ближайшие к рассчитанным по соотношениям (9) и (10).

ЛИТЕРАТУРА

1. Толстов В.А. Эффективность электротехнологических установок / В.А. Толстов, Ю.С. Архангельский. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2000. 148 с.

2. Архангельский Ю.С. Элементная база СВЧ электротехнологического оборудования / Ю.С. Архангельский, В.А. Воронкин. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2003. 212 с.

3. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов и их отбору для финансирования. Официальное издание. М.: Госстрой России, Мин. экономики РФ, Мин. фин. РФ, Госкомпром России, 1994, 31 марта. № 7. 12/47.

Гришина Екатерина Михайловна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

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

Ekaterina M. Grishina – Ph.D., Associate Professor, Department of Automated Electrotechnological Plants and Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Yuri S. Arkhangelskiy – Honoured Scientist of the Russian Federation, Dr.Sc., Professor, Department of Automated Electrotechnological Plants and Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 29.08.13, принята к опубликованию 04.10.13

Проектирование СВЧ камеры с бегущей волной для установки по получению наночастиц серебра

В.Ю. КОЖЕВНИКОВ, Д.В. ДИХОП

Designing the Microwave Oven with the Running Wave Camera for an Installation Providing Silver Nanoparticles

V.Yu. KOZHEVNIKOV, D.V. DIKHOR

Приведены методика расчета и результаты проектирования рабочей камеры для синтеза наночастиц серебра в водных растворах методом химического восстановления при СВЧ воздействии. Разработанная рабочая камера позволит получать наночастицы размерами 0,7-2,8 нм в методическом режиме.

Ключевые слова: СВЧ энергия, наночастицы серебра, методический режим получения

В последние годы очень быстро развивается такая область науки, как нанотехнология. Это связано с уникальными свойствами материалов в наноструктурном состоянии. Например, наночастицы серебра обладают бактерицидными свойствами, что делает перспективным их применение в медицине и экологии.

Одним из наиболее перспективных способов синтеза наночастиц серебра в водных растворах является метод химического восстановления при СВЧ воздействии [1]. Размер образующихся частиц лежит в диапазоне 0,7-2,8 нм. СВЧ нагрев имеет ряд других преимуществ перед традиционными способами нагрева: интенсификация процесса термообработки за счет объемного нагрева раствора, существенное сокращение времени реакции, высокое качество нагрева за счет большой равномерности тепловыделения, высокая точность управления технологическим процессом благодаря возможности точного дозирования СВЧ энергии.

Водный раствор для СВЧ воздействия получают следующим образом: готовится раствор диамина серебра $[\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]^+$, кото-

The article presents calculation methods and the design output of the working camera developed for synthesizing silver nanoparticles in the water solutions using the chemical restoration method under the SHF impact. The developed working camera will help generating nanoparticles sized up to 0,7-2,8 nanometers in the methodical mode.

Keywords: microwave oven energy, silver nanoparticles, methodical mode

рый получают последовательным смешиванием AgNO_3 , водного раствора NH_3 и H_2O в определенной концентрации. Полученный раствор $[\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]^+$ смешивают с водным раствором карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ). Полученный раствор подвергают СВЧ термическому воздействию до температуры 100°C.

СВЧ установка для получения наночастиц серебра в водных растворах состоит из следующих основных узлов: источника СВЧ энергии, линии передачи, рабочей камеры проточного типа, позволяющей обеспечивать эффективное взаимодействие энергии СВЧ электромагнитного поля с раствором, системы загрузки-выгрузки и системы управления (рис. 1).

В данной работе произведен расчет камеры СВЧ установки. Для эффективного синтеза наночастиц серебра предложена камера с бегущей волной (КБВ) на круглом волноводе с экспоненциальным согласующим экраном. Этот тип камеры позволяет получить не только практически идеальное согласование рабочей камеры с линией передачи, но и равномерное тепловыделение в

обрабатываемом объекте по всей длине

камеры [2], а это является одним из условий образования наночастиц меньшего размера и более узкого распределения размеров.

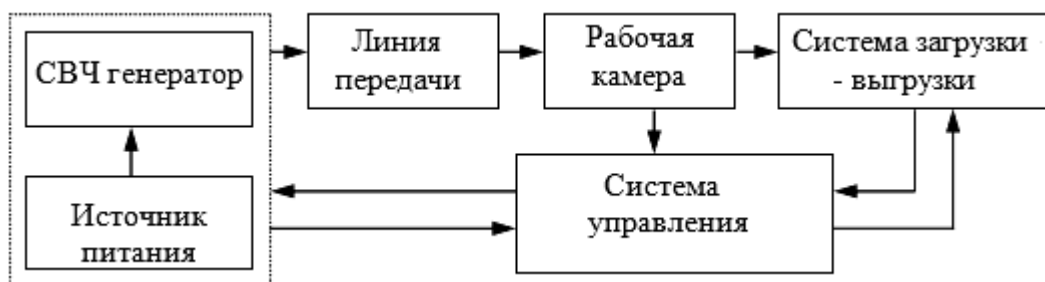


Рис. 1. Структурная схема СВЧ установки

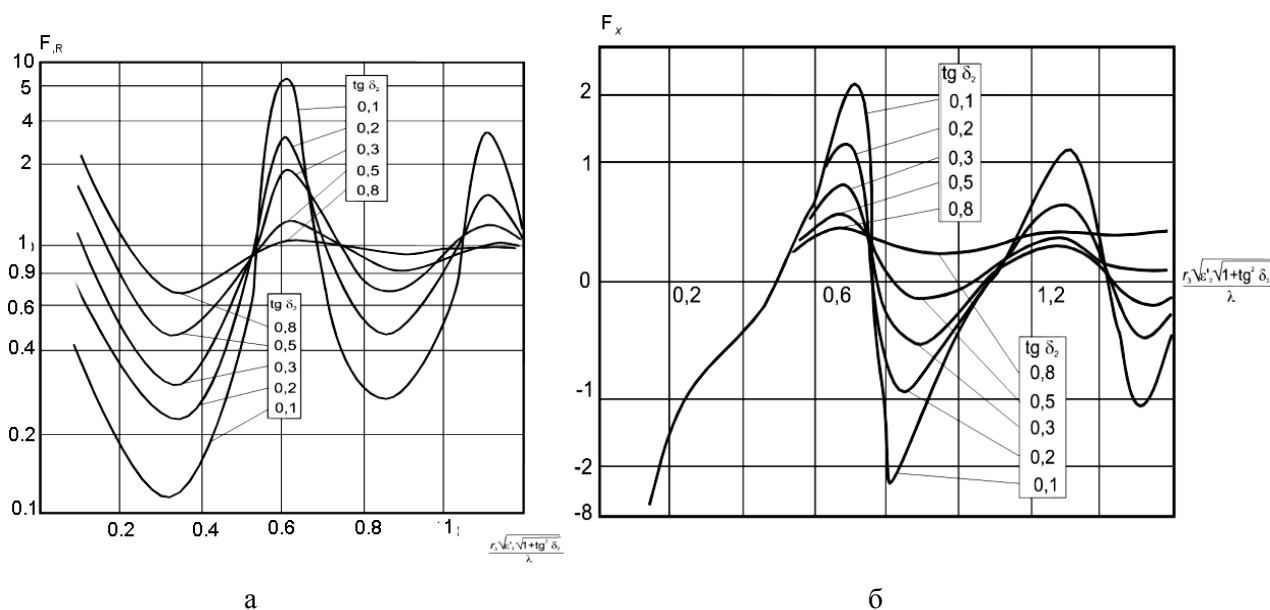


Рис. 2. Зависимости $F_R\left(r\sqrt{\epsilon'\sqrt{1+\operatorname{tg}^2\delta}}/\lambda\right)_{\operatorname{tg}\delta=\operatorname{const}}$ и $F_X\left(r\sqrt{\epsilon'\sqrt{1+\operatorname{tg}^2\delta}}/\lambda\right)_{\operatorname{tg}\delta=\operatorname{const}}$ для круглого волновода с поглощающим стержнем вдоль оси

Для расчета параметров камеры использован метод эквивалентных схем, который позволяет существенно ускорить проектирование рабочих камер и получить общий алгоритм решения задачи синтеза КБВ.

Исходные данные для расчета: $f = 2450 \cdot 10^6$ Гц – частота магнетрона, $\lambda = 0,122$ м – длина волны, $Z_0 = 50$ Ом – волновое сопротивление СВЧ разъема линии, диэлектрические параметры ϵ' и $\operatorname{tg} \delta$ взяты из [3].

Расчет камеры начинается с определения ϵ' и $\operatorname{tg} \delta$, так как эти параметры в ходе нагрева практически не изменяются; принимаем значения $\epsilon' = 81,93$ и $\operatorname{tg} \delta = 0,14$. В

таком случае $\sqrt{\epsilon'\sqrt{1+\operatorname{tg}^2\delta}} = 8,91$. По зависимостям

$$F_R = 2 \pi r R_n / |\eta_2|; \quad F_X = 2 \pi r X_n / |\eta_2|,$$

где $|\eta_2| = \left| 377 / \epsilon'\sqrt{1+\operatorname{tg}^2\delta} \right|$ (рис. 2) находим, что:

$$r\sqrt{\epsilon'\sqrt{1+\operatorname{tg}^2\delta}}/\lambda = 0,85, \quad (1)$$

при котором $F_X = 0$, а F_R минимально, что позволяет получить наиболее узкий диапазон изменения значения R_n , X_n – активная и реактивная составляющая погонного сопротивления обрабатываемого объекта.

Тогда из (1) $r = \lambda \cdot 0,85 / \sqrt{\varepsilon' \sqrt{1 + \operatorname{tg} \delta}}$. Из зависимостей

$$F_R \left(r \sqrt{\varepsilon' \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}} / \lambda \right)_{\operatorname{tg} \delta = \operatorname{const}},$$

$$F_X \left(r \sqrt{\varepsilon' \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}} / \lambda \right)_{\operatorname{tg} \delta = \operatorname{const}}$$

находим значения погонных сопротивлений $R_n = 289,3$ и $X_n = 0$.

Для согласования КБВ с линией передачи используется так называемый согласующий экран. Для определения параметров экрана нужно рассчитать значение входного сопротивления.

Входное сопротивление КБВ с экспоненциальным профилем рассчитывается из соотношения

$$\frac{dZ_{ex}}{dz} = R_n + jX_n + \frac{(j2\pi/\lambda)(Z_0^2 - Z_{ex}^2)}{Z_0},$$

но при $X_n = 0$ имеем

$$Z_{ex}(z) = \operatorname{Re} Z_{ex}(z) = R_n \cdot z. \quad (2)$$

При $Z_0 = R_n \cdot l$ имеет место полное согласование рабочей камеры с линией передачи, где l – длина камеры, так что

$$l = \frac{Z_0}{R_n}.$$

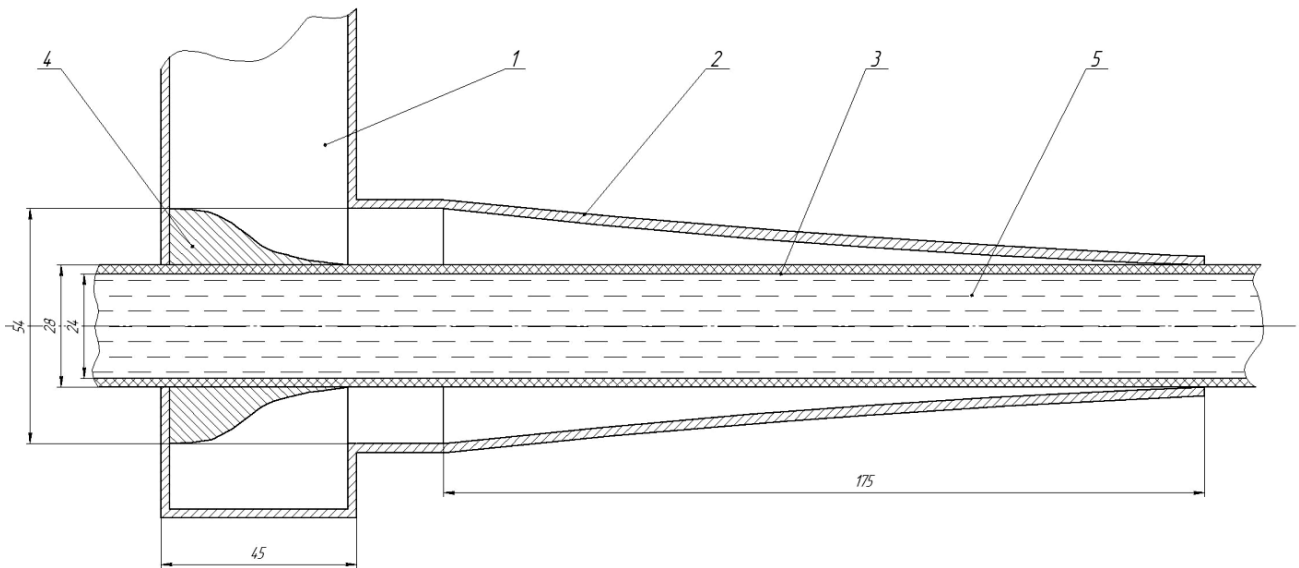


Рис. 3. СВЧ камера проточного типа

Согласующий экран с изменяющимся внешним проводником при воздушном заполнении над обрабатываемой средой рассчитывается по соотношению

$$D(z) = 2r \cdot \exp \left\{ \left[-\lambda X_n / 4\pi + \sqrt{(\lambda X_n / 4\pi)^2 + (R_n z)^2} \right] / 60 \right\}. \quad (3)$$

Рабочая камера должна быть хорошо согласована с питающим трактом, поскольку в этом случае максимально используется СВЧ энергия. Для оценки согласования используется коэффициент стоячей волны по напряжению, расчет которого сводится к определению входного сопротивления камеры:

$$K_{cmU} = \frac{(1 + |\Gamma|)}{(1 - |\Gamma|)}, \text{ где } \Gamma = \frac{(Z_{ex} - Z_0)}{(Z_{ex} + Z_0)}. \quad (4)$$

Алгоритм расчета был реализован в программе Mathcad, который позволил рассчитать основные параметры камеры: длина камеры $l = 0,175$ м, радиус внутреннего проводника (технологического канала) $r = 0,012$ м, внешний проводник $D(0,175) = 0,054$ м, КСВ = 1.

На рис. 3 представлен общий вид СВЧ камеры проточного типа для воздействия на жидкую среду, где 1 – прямоугольный волновод, 2 – согласующий экран, 3 – диэлектрическая трубка, 4 – волноводно-коаксиальный переход, 5 – обрабатываемая жидкость.

Таким образом, разработанная рабочая камера позволит получить производительность установки 40 л/ч. При такой производительности требуется СВЧ мощность

3,7 кВт. В качестве источника СВЧ энергии может быть выбран «Хазар 5» с варьируемой мощностью от 1,5 до 5 кВт.

ЛИТЕРАТУРА

1. Access to small size distributions of nanoparticles by microwave-assisted synthesis. Formation of Ag nanoparticles in aqueous carboxymethylcellulose solutions in batch and continuous-flow reactors / S. Horikoshi, H. Abe, K. Torigoe, M. Abe, N. Serpone // *Nanoscale*. 2010. Vol 2. P. 1441-1447.

2. **Архангельский Ю.С.** Установки диэлектрического нагрева. СВЧ установки:

учебное пособие / Ю.С. Архангельский. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2003. 344 с.

3. **Кожевников В.Ю.** Исследование диэлектрических параметров водного раствора наночастиц серебра / В.Ю. Кожевников, Д.В. Дихор, Е.А. Добролюбова // Состояние и перспективы развития электротехнологии (XVII Бенардосовские чтения): Междунар. науч.-техн. конф. Иваново, 2013.

Кожевников Вячеслав Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Дихор Дмитрий Васильевич – магистр кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» по направлению «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Vyacheslav Yu. Kozhevnikov – Ph.D., Associate Professor, Department of Automated Electrotechnological Plants and Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Dmitry V. Dikhor – Master's Degree Student, Department of Automated Electrotechnological Plants and Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 02.09.13, принята к опубликованию 07.10.13

УДК 621.365.55

СВЧ рабочие камеры для высокотемпературного нагрева диэлектриков

К.Н. ОГУРЦОВ

Microwave Oven Working Cameras for High Temperature Heating of Dielectrics

K.N. OGURTSOV

В работе рассмотрены высокотемпературные СВЧ технологии и процессы.

The article presents high-temperature microwave oven technologies and processes. The

Предложены конструкции рабочих камер для получения кристаллов, наноматериалов, керамики и металлокерамик с использованием СВЧ энергоподвода.

Ключевые слова: СВЧ нагрев, высокотемпературный нагрев, рабочая камера, кристалл, керамика, металлокерамика, наноматериалы

Одним из перспективных направлений электротермии является использование СВЧ диэлектрического нагрева для реализации высокотемпературных технологий: выращивание кристаллов из расплавов, получение наноматериалов, спекание керамик, получение композиционных и огнеупорных материалов. Использование СВЧ диэлектрического нагрева при выращивании монокристаллов позволит увеличить равномерность распределения температуры в расплаве и затравке, что приведет к уменьшению дефектов в кристалле. Использование энергии СВЧ при получении наноматериалов (ультрадисперсных порошков) позволит повысить производительность в сравнении с другими электрофизическими методами, а отсутствие нагревательных элементов сведет к минимуму количество примесей в наноматериале.

Наибольший интерес у исследователей вызывает вопрос о предельных температурах, достигаемых в СВЧ электротермических установках, а также варианты конструкций СВЧ рабочих камер и способы увеличения температуры нагреваемого объекта при заданной мощности серийных генераторов, поскольку именно от этого зависит сфера применения этих установок.

При разработке нового электротермического оборудования следует соблюдать правила безопасности эксплуатации установок. Для электротермических установок это электробезопасность (заземление установки) и теплобезопасность (температура на кожухе печи должна быть ниже 60°C). Традиционными для электротермии методами понижения температуры кожуха печей являются: достаточная толщина теплоизоляционного слоя футеровки, вакуумные экраны, водяное охлаждение стенок печи.

proposed design of the working cameras can be applied for the production of crystals, nanomaterials, ceramics and metal ceramics using the microwave oven as the power supply resource.

Keywords: microwave oven heating, high-temperature heating, working camera, crystal, ceramics, metal ceramics, nanomaterials

В [1-3] рассмотрены процессы нагрева материалов для случаев нагрева объекта в футерованной рабочей камере, в рабочей камере с водяным охлаждением стенок камеры и нагрева непосредственно футерованного объекта. Анализ полученных результатов говорит о наибольшей эффективности футерования объекта нагрева. Этот вариант имеет наибольший КПД, но накладывает ограничения на материал футеровки – максимальная радиопрозрачность и способность выдерживать высокие температуры. Для увеличения температуры нагреваемого объекта при условии сохранения целостности футеровки при многократном нагреве потребуется добавить слой огнеупора в футеровку, как это делается в высокотемпературных печах сопротивления. При этом требование радиопрозрачности переносится и на огнеупорный слой.

Такой тип футеровки позволяет экономить материалы футеровки, уменьшить тепловые потери и увеличить равномерность нагрева.

Рассмотрим варианты конструкций рабочих камер для реализации реальных технологических процессов.

1. Установки для выращивания кристаллов

Выращивание кристаллов из жидкой или газовой среды можно реализовать как в рабочих камерах с бегущей волной (КБВ), так и в камерах резонаторного типа (КСВ). КБВ позволяют обрабатывать объекты правильной формы – цилиндр, параллелепипед, КСВ – произвольной. Так как кристаллы в основном выращиваются в виде цилиндров, использование КБВ наиболее перспективно. На рис. 1 изображена КБВ на круглом волноводе для выращивания кристаллов по методу

Вернеля [1]. Исходный материал 7 в виде порошка или цилиндра посредством поршня 6 подается в рабочую камеру (область нерегулярного волновода). Там он разогревается до температуры плавления, испарения или возгонки и в некоторой части нерегулярного участка волновода присутствует газовая фаза исходного вещества 3. Этот пар конденсируется на затравочном кристалле 2, который посредством вращающегося штока 1 вытягивают из рабочей камеры. Для выращивания кристаллов прямоугольного сечения можно использовать КБВ на нерегулярном прямоугольном волноводе.

Аналогичную конструкцию по получению монокристаллов можно построить и для КСВ (рис. 2).

Для получения небольших кристаллов, а также для напыления тонких пленок можно использовать КБВ и КСВ, работающие в периодическом режиме (рис. 3, 4). В этих камерах исходный материал после испарения конденсируется на затравке при получении монокристалла или на подложке для получения наноразмерного слоя пленки.

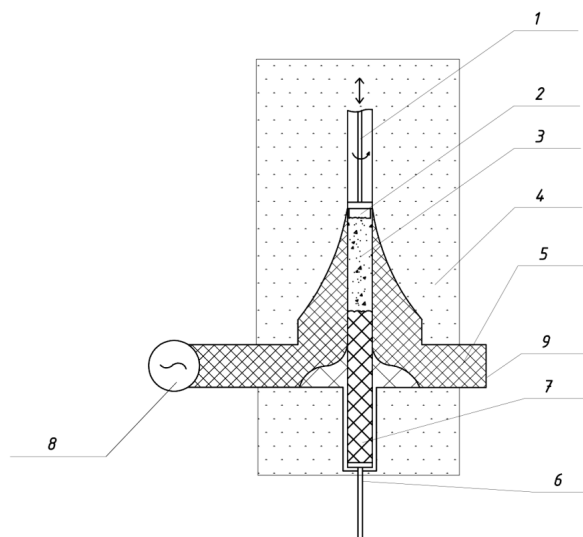


Рис. 1. Установка для получения монокристаллов на КБВ с круглым нерегулярным волноводом:

- 1 – вращающийся шток, 2 – затравочный кристалл, 3 – газовая фаза вещества,
- 4 – футеровка рабочей камеры,
- 5 – футеровка внутри волновода,
- 6 – поршень подачи исходного вещества,
- 7 – исходное вещество, 8 – СВЧ генератор,
- 9 – волновод

На рис. 5 показаны образцы кристаллов оксида цинка, полученных в КБВ периодического действия.

2. Установки для получения ультрадисперсных сред

СВЧ электротермические установки позволяют осуществить нагрев диэлектриков до температур плавления, испарения и сублимации, что делает возможным получение в них ультрадисперсных сред конденсационным методом. На рис. 6 представлена конструкция рабочей камеры для получения ультрадисперсных сред.

Исходный материал 2 в виде порошка или бруска посредством поршня 6 подается в КБВ на круглом нерегулярном волноводе, где он переходит в газовую фазу 1. Испаренное вещество с помощью вакуумного насоса перекачивается в специальный бункер *а*, в котором оно конденсируется. Конденсировать вещество можно в жидкой среде (например, в воде), получив, таким образом, эмульсию *б*.

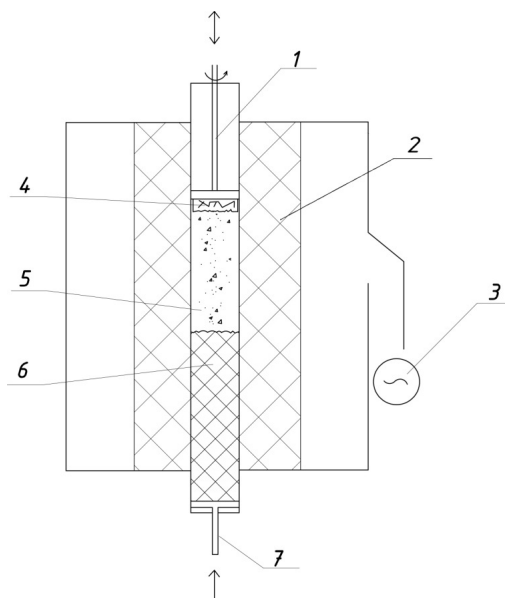


Рис. 2. Установка для получения монокристаллов на КСВ:

- 1 – вращающийся шток, 2 – футеровка рабочей камеры, 3 – СВЧ генератор,
- 4 – затравочный кристалл, 5 – газовая фаза вещества, 6 – исходное вещество,
- 7 – поршень подачи исходного вещества

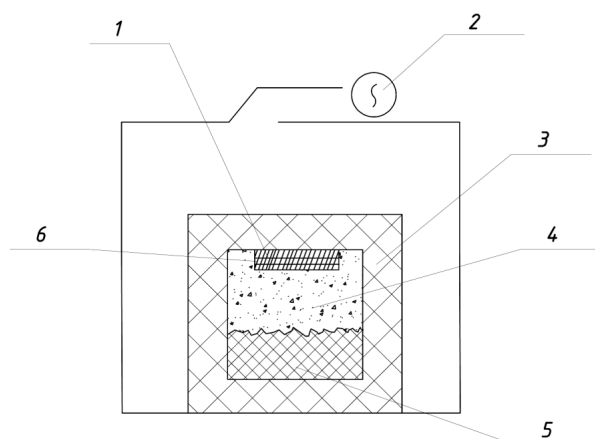


Рис. 3. Установка для получения небольших кристаллов на КСВ: 1 – затравочный кристалл, 2 – СВЧ генератор, 3 – футеровка рабочей камеры, 4 – газовая фаза вещества, 5 – исходное вещество, 6 – напыленная пленка/кристалл

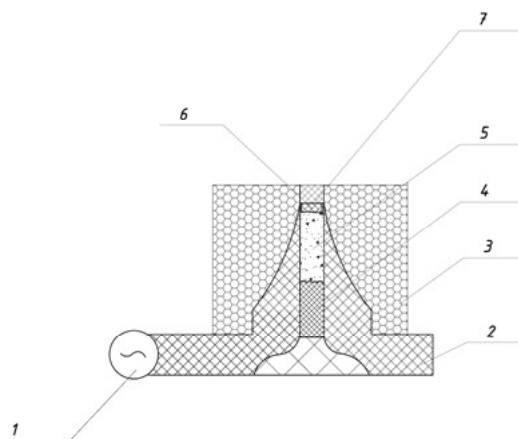
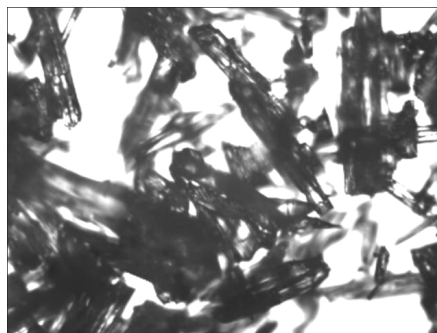


Рис. 4. Установка для получения небольших кристаллов и нанесения пленок на КБВ: 1 – СВЧ генератор, 2 – футеровка волновода, 3 – футеровка рабочей камеры, 4 – исходное вещество, 5 – газовая фаза вещества, 6 – затравочный кристалл, 7 – напыленная пленка/кристалл



а



б

Рис. 5. Образцы кристаллов, полученных в СВЧ электромагнитном поле

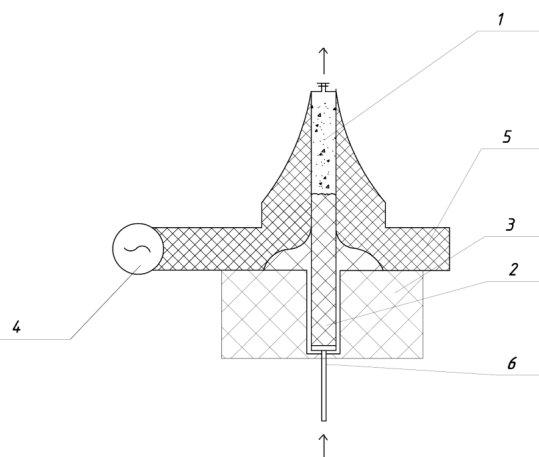


Рис. 6. Установка для получения ультрадисперсных сред на КБВ: 1 – газовая фаза вещества, 2 – исходное вещество, 3 – футеровка рабочей камеры, 4 – СВЧ генератор, 5 – футеровка волновода, 6 – поршень подачи исходного вещества

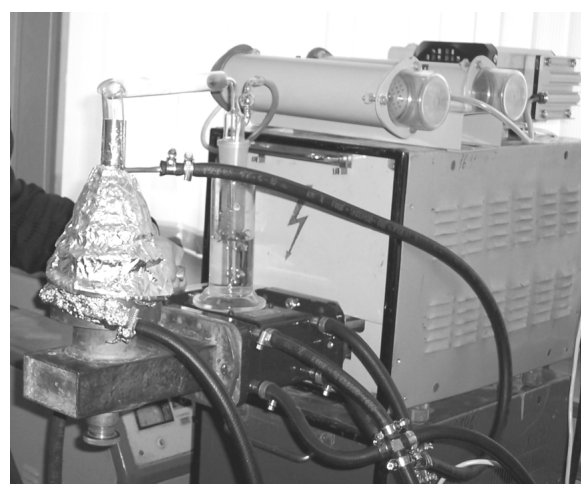


Рис. 7. Высокотемпературная СВЧ установка с рабочей камерой на нерегулярном круглом волноводе и скляжкой Дрекеля для конденсации ультрадисперсных сред

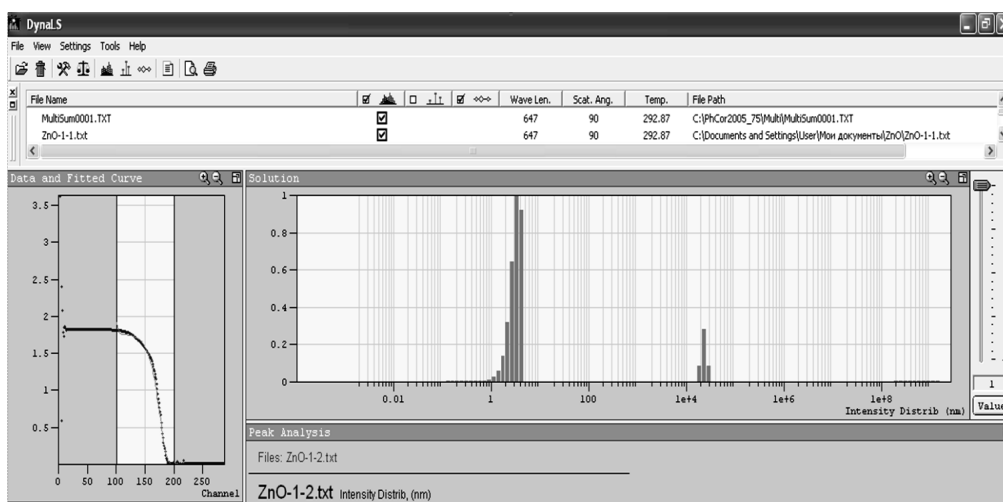


Рис. 8. Результаты гранулометрического анализа суспензии оксида цинка

На рис. 7 представлена установка для получения эмульсий с ультрадисперсной средой. Для получения наноразмерных частиц оксида цинка конденсационным методом спрессованный образец помещался в рабочую камеру с бегущей волной. Вакуумный насос откачивал пары из рабочей камеры. Парогазовая смесь, проходя через водяной затвор в склянке Дрекселя, конденсировалась. Результаты анализа гранулометрического состава полученной суспензии представлены на рис. 8.

3. Установки для спекания керамик и металлокерамик

Особенностью спекания керамических и металлокерамических изделий является их сложная форма и, как следствие, неравномерность термообработки, а также сильная зависимость диэлектрических свойств от температуры и размеров исходного порошка перед прессованием. Кроме того, в процессе спекания изделие может существенно менять свои размеры из-за термического расширения. В зависимости от размеров и формы спекаемых материалов термообработку можно проводить в высокотемпера-

турных КБВ, КСВ и КЛТ, описанных в [1-3]. Главная особенность этих рабочих камер – это наличие теплоизоляционного, а иногда и огнеупорного слоев футеровки. К футеровке при этом предъявляются особые требования – радиопрозрачность. Такими радиопрозрачными свойствами обладают почти все вспененные (вспененные диатомит, доломит и т.д.) и волокнистые (минеральные ваты) футеровочные материалы, а также материалы, имеющие кристаллическую структуру. Металлические части волноводных трактов и рабочих камер выгоднее изготавливать из тонких листовых жаростойких сплавов или методом напыления, т.к. наибольшие тепловые потери могут быть именно через металлические элементы установки. Для защиты СВЧ генератора от стоячей волны в высокотемпературных установках необходимо применять ферритовые вентили, которые обязательно защищать от прямого попадания теплового излучения от горячих элементов установки.

Из полученных спектрограмм видно, что в образцах присутствуют наночастицы размером порядка 3 нм и 2000 нм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Огурцов К.Н. Математическое моделирование процессов нагрева диэлектриков в СВЧ электромагнитном поле с учетом фазовых переходов / К.Н. Огурцов, Т.Ю. Дунаева // Современные энергосберегающие

тепловые технологии (Сушка и термо-влажностная обработка материалов). СЭТТ-2011: материалы Четвертой Междунар. науч.-практ. конф. М., 2011. С. 234-238.

2. **Архангельский Ю.С.** Футеровка в установках СВЧ диэлектрического нагрева / Ю.С. Архангельский, К.Н. Огурцов // Проблемы электроэнергетики: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2011. С. 112-115.

3. **Архангельский Ю.С.** Высокотемпературный нагрев диэлектриков с фазовыми переходами / Ю.С. Архангельский, К.Н. Огурцов // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2012. № 66. С. 34-37.

Огурцов Константин Николаевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Konstantin N. Ogurtsov – Ph.D., Associate Professor, Head: Department of Automated Electrotechnological Plants and Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov.

Статья поступила в редакцию 02.09.13, принята к опубликованию 08.10.13

УДК 621.31

Дифференциальное эффективное сечение рассеяния электромагнитной волны сферой искусственного диэлектрика

И.Н. АНТОНОВ, А.В. БОЗРИКОВ

Differential Cross-section Electromagnetic Scattering Field of Artificial Dielectrics

I.N. ANTONOV, A.V. BOZRIKOV

Рассмотрены несколько случаев эффективных дифференциальных сечений различно поляризованных электромагнитных волн сферой искусственного диэлектрика.

Ключевые слова: композиционный материал, искусственный диэлектрик, электромагнитная волна, поляризация, рассеивание, полимер

The article considers a number of cases relating effective differential cross sections of multi-polarized electromagnetic waves through the artificial dielectric sphere.

Keywords: composite material, artificial dielectric, electromagnetic wave, polarization, dispersion, polymer

Композиционные материалы с токопроводящей арматурой могут быть использованы для склеивания, создания гидроизоляции, создания экранирующих от электрических полей и радиочастотного излучения материалов.

Для достижения поставленной цели требуется:

– выбрать матрицу, в качестве матрицы могут быть выбраны диэлектрики с различ-

ными эксплуатационными характеристиками в зависимости от назначения создаваемого композиционного материала (битумы, парафин, полиуретан, полиакрилат, натуральные или синтетические смолы);

– выбрать токопроводящую арматуру, в качестве которой предлагается использовать электропроводящий металлический порошок (алюминиевая пудра, железная пудра и т.п.);

– построить математическую модель оптимизации задачи по распределению температурного поля в матрице, созданной из электропроводящих частиц, расположенных равномерно в непроводящей среде;

– провести оптимизацию концентрации и размера электропроводящих частиц наполнителя в непроводящей среде [1, 2].

При создании искусственных сред с заданными свойствами по отражению, пропусканию и поглощению электромагнитных волн важным признаком является характер рассеяния на включенных неоднородностях [3, 4].

На плоскость с равномерно расположенными сферами падает электромагнитная волна. Вычислим дифференциальное эффективное сечение рассеяния.

Монохроматическая волна падает на диэлектрическую проводящую сферу радиуса a (рис. 1 а). Диэлектрическая и магнитная проницаемости сферы $\epsilon, \mu = 1$. Сделанные допущения позволяют считать поле, воздействующее на сферу, квазистационарным и однородным. Для диэлектрической сферы индуцированный дипольный момент $\mathbf{P}$ можно рассчитывать электростатическими методами.

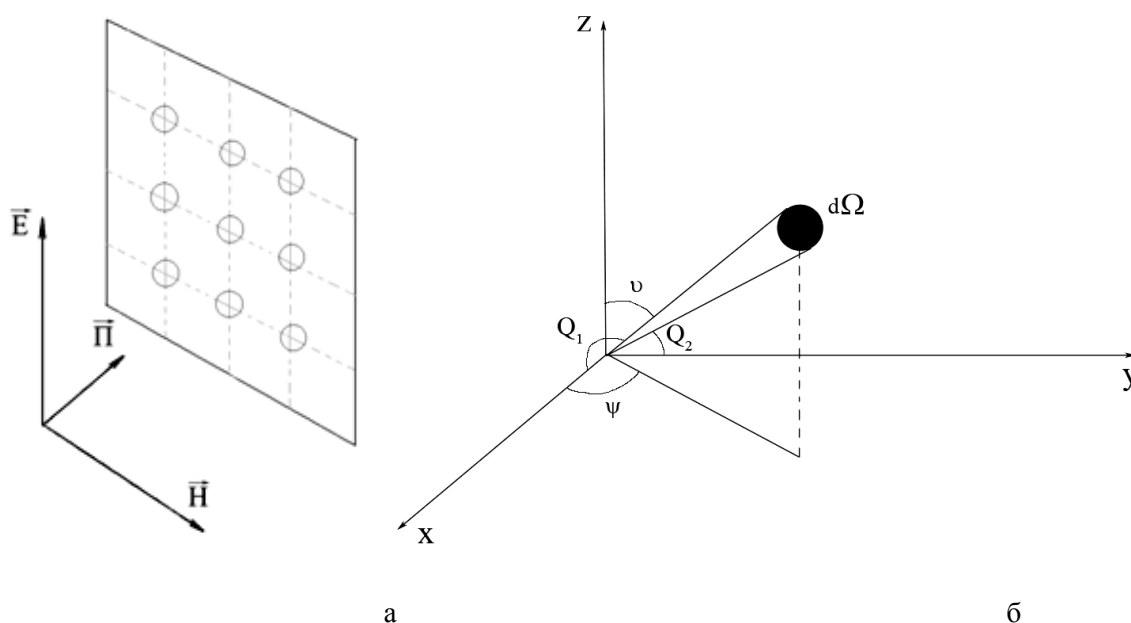


Рис. 1. а – падение монохроматической электромагнитной волны на плоскую среду с равномерно включенными сферами; б – формирование телесного угла для $d\Omega$

$$\vec{P} = [\vec{E}, \vec{H}],$$

где $\vec{P}$ – вектор Умова – Пойнтинга, $\vec{E}$, $\vec{H}$ – векторы напряженности электрического и магнитного полей.

Вне шара на внешнее квазиоднородное поле накладывается поле от поляризованного проводящего шара (сфера – проводник). Поскольку шар симметричный, поле зависит только от его центра и направления внешнего поля.

Единственным решением уравнения Лапласа, удовлетворяющим этим условиям и убывающим на бесконечности, является поле диполя.

Ищем потенциал ϕ в виде

$$\phi_1 = C \quad (r < a),$$

$$\phi_2 = -E_0 r \cos \theta + \frac{P}{r^2} \cos \theta \quad (r > a),$$

при $r = a$, $C = 0$ дипольный момент шара $P = \alpha^3 E_0$, где поляризуемость $\alpha = a^3$ для проводника, где $r = a$ – радиус сферы, P – дипольный момент, E_0 – амплитудное значение напряженности электрического поля, C – интегральный коэффициент, θ – угол между рассматриваемым направлением рассеяния $d\Omega$ и направлением поляризации падающей волны.

Для шара (сфера – диэлектрик) аналогично ищем потенциал искомого поля в виде

$$\varphi_1 = -Cr \cos \theta \quad (r < a),$$

$$\varphi_2 = -E_0 r \cos \theta + \frac{P}{r^2} \cos \theta \quad (r > a),$$

при $r = a$, $C = \frac{3}{\varepsilon + 2} E_0$

$$P = \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} a^3 E_0,$$

где ε – диэлектрическая проницаемость.

Отсюда поляризуемость диэлектрического шара

$$\alpha = \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} a^3.$$

Эти переменные диполи излучают как диполь Герца и интенсивность излучения J в направлении телесного угла $d\Omega$ равна

$$dJ = \frac{\sin^2 \theta}{4\pi c^3} (\ddot{\mathbf{P}}^2) d\Omega.$$

Поскольку мы предположили, что волна линейно поляризована, отсюда следует интенсивность излучаемой (рассеиваемой) энергии электроном:

$$J = \frac{2}{3} \frac{e^2}{c^3} \dot{\mathbf{V}}^2,$$

где $\dot{\mathbf{V}} = \frac{e\mathbf{E}}{m}$.

Плотность потока энергии падающей волны равна

$$J_0 = \frac{c}{4\pi} E^2,$$

отсюда эффективное сечение рассеяния

$$\sigma = \frac{J}{J_0} = \frac{8\pi}{3} \frac{e^4}{m^2 c^4} = \frac{8\pi}{3} r_0^2,$$

Полное сечение рассеяния

$$\sigma = \int d\sigma = r_0^2 \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \left(1 - \sin^2 \nu \frac{A^2 \cos^2 \psi + B^2 \sin^2 \psi}{A^2 + B^2} \right) \sin \nu d\nu d\psi = \frac{8}{3} \pi r_0^2.$$

где $r_0 = \frac{c^2}{mC^2}$ – классический радиус электрона, m – масса электрона.

Дифференциальное эффективное сечение рассеяния

$$d\sigma = \frac{dJ}{J_0},$$

где dJ – интенсивность излучения в направлении $d\Omega$.

Пусть имеет место случай линейно поляризованной падающей волны

$$dJ = \frac{\sin^2 \theta}{4\pi c^3} e^2 \dot{\mathbf{V}}^2 d\Omega,$$

тогда:

$$d\sigma = r_0^2 \sin^2 \theta d\Omega.$$

Для эллиптически поляризованной волны обозначим через A и B полуоси эллипса поляризации и через θ_1 и θ_2 – углы, которые они составляют с рассматриваемым направлением рассеяния $d\Omega$.

Поскольку эллиптически поляризованную волну можно рассматривать как совокупность двух линейно-поляризованных волн с амплитудами A и B , на этом основании

$$d\sigma = r_0^2 \frac{A^2 \sin^2 \theta_1 + B^2 \sin^2 \theta_2}{A^2 + B^2} d\Omega.$$

Направим ось z вдоль направления распространения падающей волны, а оси x и y направим вдоль осей эллипса поляризации (рис. 1 б). Пусть ν и ψ – полярные углы, которыми определяется рассматриваемое направление рассеяния $d\Omega$, тогда

$$\cos \theta_1 = \sin \nu \cos \psi;$$

$$\cos \theta_2 = \sin \nu \sin \psi,$$

отсюда

$$d\sigma = r_0^2 \left(1 - \sin^2 \nu \frac{A^2 \cos^2 \psi + B^2 \sin^2 \psi}{A^2 + B^2} \right) d\Omega.$$

В случае неполяризованной волны нужно полученное выражение для $d\sigma$ усреднить по всем возможным значениям угла поляризации

$$\psi \left(\overline{\cos^2 \psi} = \overline{\sin^2 \psi} = \frac{1}{2} \right),$$

и тогда

$$\begin{aligned} d\sigma &= r_0^2 \left(1 - \frac{1}{2} \sin^2 v \right) d\Omega = \\ &= \frac{1}{2} r_0^2 (1 + \cos^2 v) d\Omega. \end{aligned}$$

Для линейно-поляризованной волны при $B = 0$ и заданном v минимум интенсивности рассеянного излучения будет соответствовать

$$\psi = 0; \quad d\sigma_2 = r_0^2 (1 - \sin^2 v) d\Omega,$$

а максимум –

$$-\psi = \frac{\pi}{2}; \quad d\sigma_1 = r_0^2 d\Omega.$$

Отсюда степень деполяризации:

$$\frac{J_q}{J_1} = 1 - \sin^2 v = \cos^2 v.$$

Полученные результаты могут быть использованы для оценки рассеивающей способности искусственно созданной диэлектрической среды при воздействии на нее электромагнитного излучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Антонов И.Н.** Математическое моделирование композиционного материала на основе токопроводящей арматуры / И.Н. Антонов, А.В. Пивоваров, А.В. Бозриков // Вестник СГТУ. 2012. № 2(66). Вып. 2. С. 15-20.

2. **Бозриков А.В.** Создание композиционного материала с заданными диэлектрическими свойствами / А.В. Бозриков, И.Н. Антонов // Состояние и перспективы

развития электротехнологии» (XVII Бенардосовские чтения 29-31 мая): материалы Междунар. науч.-техн. конф. Иваново: ИГЭУ им. В.И. Ленина, 2013. С. 46-49.

3. **Пановский В.** Классическая электродинамика / В. Пановский, М. Филипс. М.: Физматгиз, 1963.

4. **Тамм И.Е.** Основы теории электричества / И.Е. Тамм. М., 1989.

Антонов Игорь Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Бозриков Алексей Васильевич – аспирант кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Igor N. Antonov – Dr.Sc., Professor, Department of Automated Electrotechnological Plants and Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Aleksey V. Bozrikov – Postgraduate, Department of Automated Electrotechnological Plants and Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov.

Статья поступила в редакцию 03.09.13, принята к опубликованию 08.10.13

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

УДК 621.382

Переходные процессы в накальной цепи магнетрона малой мощности

И.И. АРТЮХОВ, А.И. ЗЕМЦОВ

Transients in the Filament Circuit Magnetron of Low Power

I.I. ARTYUKHOV, A.I. ZEMTSOV

Излагаются результаты теоретического и экспериментального исследования переходных процессов в накальной цепи магнетрона малой мощности при включении источника питания.

Ключевые слова: магнетрон, накал, источник питания, математическая модель

Theoretical and experimental investigations data are provided for the transients in the filament circuit of low power magnetrons under power supply delivery.

Keywords: magnetron, filament, power supply, mathematical model

В бытовых печах СВЧ нагрева, а также в промышленных электротехнологических установках с распределенным подводом СВЧ энергии широко применяются магнетроны малой (до 1000 Вт) мощности. Для работы магнетрона к нему необходимо подвести энергию двух источников: питания цепи накала катода и анодного питания [1, 2].

Источник питания цепи накала обеспечивает разогрев катода. Надежная эмиссионная способность катода достигается в ограниченном интервале температур. Ниже минимально допустимой температуры эмиссия электронов становится недостаточной для получения необходимого уровня выходной мощности. Выше верхней границы происходит быстрое истощение активного компонента эмиттера, что приводит к потере эмиссии. Напряжение питания накала для пакетируемых магнетронов, как правило, равно 3,15 В, величина потребляемого тока составляет 10-20 А.

Анодный источник питания обеспечивает подачу выпрямленного высоковольтного напряжения величиной не менее 3 кВ,

которое служит для разгона электронов в промежутке катод – анод. Величина потребляемого тока анодной цепи составляет порядка 0,5 А.

Мощность, потребляемая от источника питания накала, составляет всего 3-4% от мощности в цепи анодного питания. Однако имеются определенные сложности при реализации источника питания накала.

Во-первых, конструктивно с корпусом СВЧ печи соединяется анод магнетрона, поэтому катод находится под напряжением в несколько тысяч вольт относительно корпуса. Вследствие этого между первичной и вторичной обмотками накального трансформатора действует высокое напряжение, что заставляет принимать меры по обеспечению необходимой изоляции.

Во-вторых, сопротивление холодного катода в несколько раз меньше его сопротивления в рабочем состоянии. Поэтому в процессе разогрева катода наблюдается значительный бросок тока.

Для упрощения конструкции источники питания магнетронов малой мощности часто выполняют по схеме, которая показана

на рис. 1. Особенностью этой схемы является применение одного силового трансформатора Т с двумя вторичными обмотками для создания цепей накала катода и анодного питания. Первичная обмотка трансформатора подключается к сети

220 В, 50 Гц. Одна вторичная обмотка и несимметричный удвоитель напряжения на конденсаторе С и диоде VD образуют источник анодного питания магнетрона. Другая вторичная обмотка служит для создания тока накала.

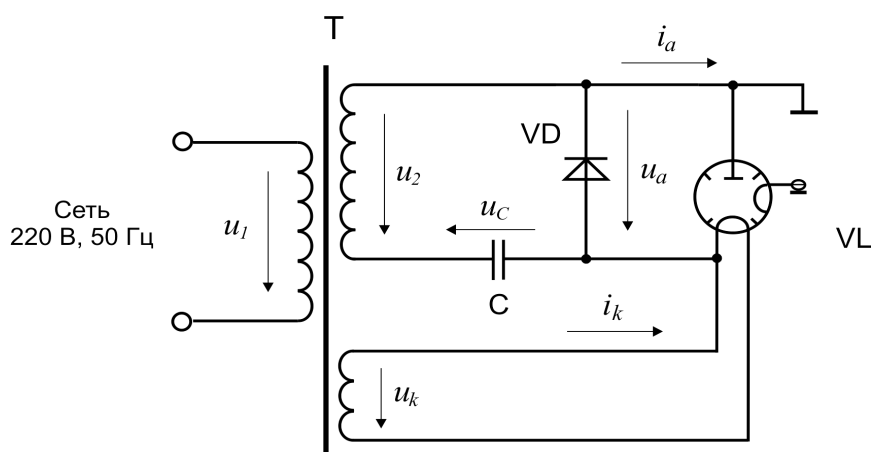


Рис. 1. Схема источника питания магнетронного генератора

Работа источника питания состоит из двух полупериодов. В первый из них происходит заряд конденсатора С от вторичной обмотки трансформатора Т через диод VD. При этом напряжение на аноде $u_a = 0$. Во второй полупериод напряжение u_2 на обмотке трансформатора суммируется с напряжением u_C на конденсаторе С. Как только анодное напряжение $u_a = u_2 + u_C$ становится больше порогового значения, через магнетрон начинает протекать ток i_a , и возникает генерация СВЧ колебаний. Затем в течение всего интервала работы магнетрона анодное напряжение u_a и ток i_a магнетрона изменяются в соответствии с траекториями, которые определяются динамическим сопротивлением магнетрона и параметрами трансформатора.

Уровень СВЧ мощности магнетронного генератора регулируется широтно-импульсным методом. Блок управления периодически включает и выключает источник питания магнетрона с помощью коммутационного устройства. Так как в схеме, показанной на рис. 1, для питания анодной и накальной цепей используется один трансформатор, то из-за инерционности процесса термоэмиссии катода анодный ток достигает рабочего значения спустя неко-

торое время после подачи напряжения на первичную обмотку трансформатора.

При проектировании источников питания магнетронов необходима информация о протекании переходных процессов в цепи питания накала. Эта информация может быть получена экспериментально либо путем математического моделирования [3].

На рис. 2 показаны осциллограммы, полученные при экспериментальном исследовании переходных процессов в источнике питания магнетрона М105. Схема питания магнетрона была реализована на трансформаторе ТВ-11. При исследовании переходных процессов в цепи питания накала запись осциллограмм осуществлялась цифровым запоминающим осциллографом Fluke 196С, который имеет два гальванически изолированных входа. На вход А подавалось напряжение u_k на вторичной обмотке трансформатора, на вход В – сигнал с вторичной обмотки трансформатора тока, по первичной обмотке которого протекает ток накала i_k . Через оптический порт интерфейса RS-232 результаты измерения сигналов и растровые изображения экранов передавались на персональный компьютер для последующей обработки с помощью программного обеспечения FlukeView для Windows.

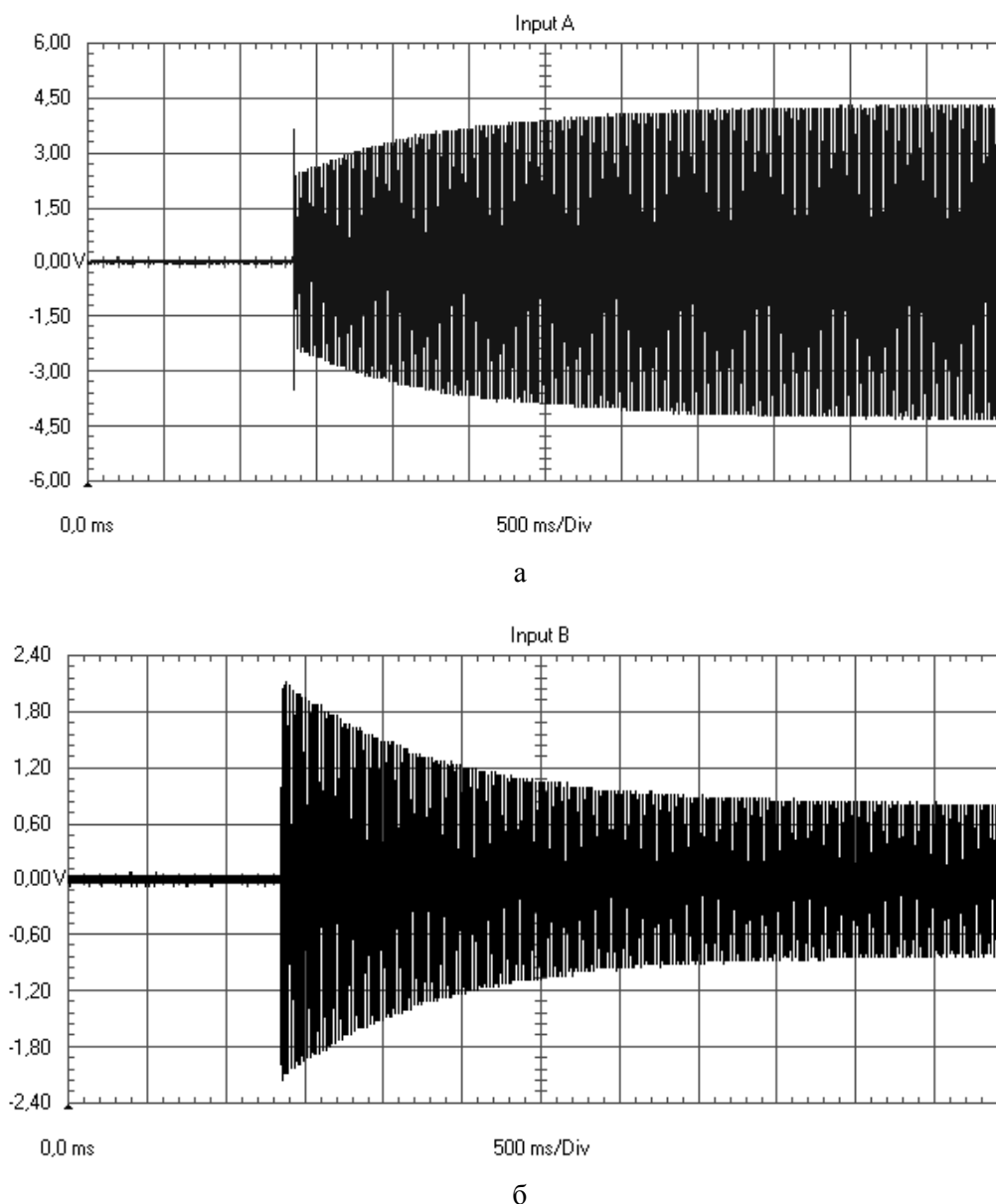


Рис. 2. Осциллограммы: *a* – напряжения; *б* – тока накала при включении магнетрона М-105-1 (масштаб по оси ординат 1:33)

Из осциллограмм отчетливо видно, что в начальный момент переходного процесса ток накала имеет максимальную величину, затем происходит его снижение до номинальной величины. При этом наблюдается провал напряжения на накальной обмотке трансформатора с последующим увеличением до установившегося значения.

На основе экспериментальных данных, полученных при проведении измерений на магнетроне М105, построена зависимость температуры катода от времени, которая представлена на рис. 3. Эта зависимость получена путем пересчета по уравнению

$$T = B + \frac{R_0(T_0 - B)}{R_K}, \quad (1)$$

где B – константа, равная 50 К, R_0 , R_K – соответственно начальное и конечное значение сопротивления катода, T_0 – начальная температура, равная 293 К [4].

Для построения математической модели накальной цепи представим катод нелинейным резистором, величина которого связана с температурой катода T зависимостью

$$R_K = R_0 \cdot [1 + \alpha(T - T_0)], \quad (2)$$

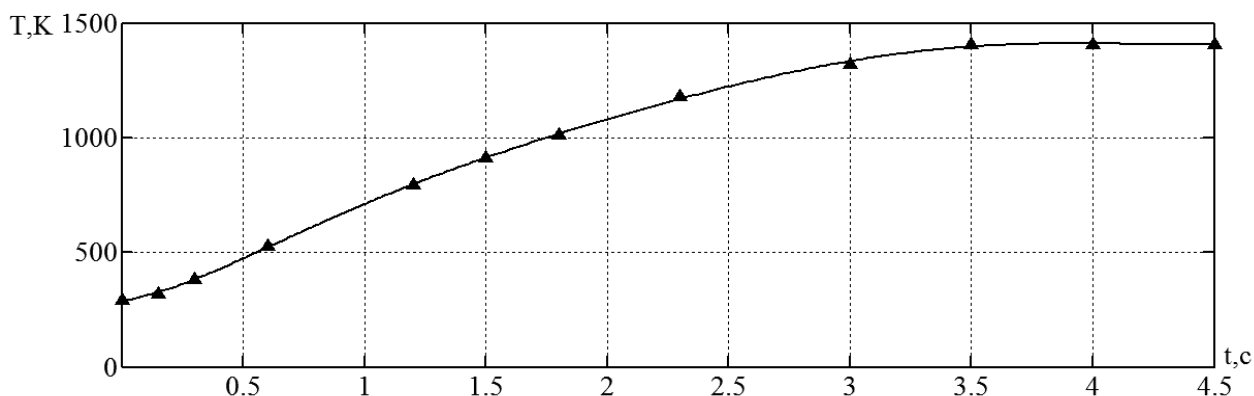


Рис. 3. Изменение температуры катода в процессе разогрева

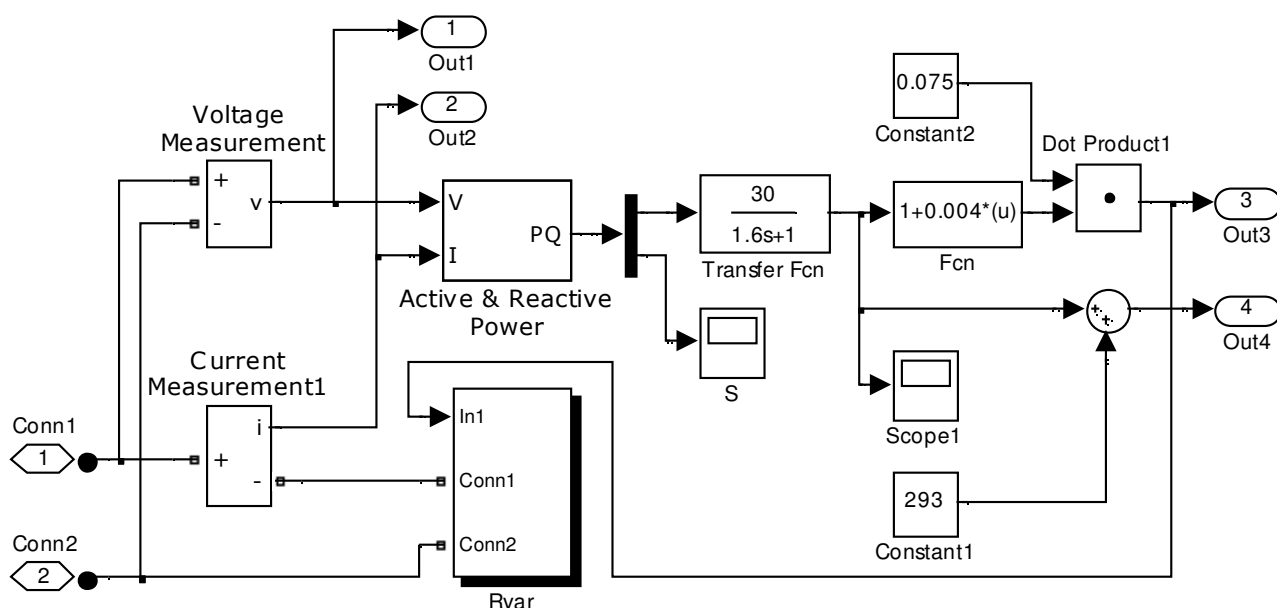


Рис. 4. Схема модели накаливающей цепи магнетрона

где R_0 – начальное сопротивление катода при температуре T_0 ; α – температурный коэффициент сопротивления.

Уравнение для катодной цепи имеет вид

$$u_K = R_K \cdot i_K = e - L_H \frac{di_K}{dt} - R_H i_K, \quad (3)$$

где e , R_K , L_K – ЭДС, активное сопротивление и индуктивность источника питания.

Температуру катода можно определить в результате решения дифференциального уравнения теплового баланса

$$cmdT + (\alpha_k + \alpha_u)STdt = I_K^2 R_K \cdot dt, \quad (4)$$

где c – удельная теплоемкость; m – масса катода; α_k , α_u – соответственно коэффициенты удельных потерь катода и изоляции;

S – площадь катода; I_K – действующее значение тока катода; R_K – сопротивление катода, рассчитываемое по формуле (2).

Предположим, что питание накала катода осуществляется от источника синусоидального напряжения

$e = \sqrt{2}E \sin \omega t$. В этом случае действующее значение тока катода определится по формуле

$$I_K = \frac{E}{\sqrt{(R_H + R_K)^2 + (\omega L_H)^2}}. \quad (5)$$

Уравнения (1)–(4) образуют систему, которая позволяет описать процессы в накаливающей цепи магнетрона при синусоидальной форме питающего напряжения.

Для исследования переходных процессов при произвольной форме питающего напряжения в среде MATLAB+Simulink построена математическая модель накаливающей цепи магнетрона, схема которой показана на рис. 4.

Элементы Current Measurement и Voltage Measurement измеряют ток и напряжение накала и подают соответствующие значения в блок «Active and Reactive Power», который вычисляет значение мгновенной мощности цепи накала.

Затем сигнал с блока Active and Reactive Power подается в блок Transfer Fcn, на вы-

ходе которого определяется приращение температуры накала. Далее блоки Fcn, Constant2 и Dot Product вычисляют значение сопротивления накала согласно выражению (1), после чего данный сигнал подается в канал управления блоком Rvar, который моделирует сопротивление катода. Блок Constant1 задает начальные условия для температуры накала магнетрона.

С помощью модели, схема которой показана на рис. 4, можно получить информацию о влиянии схемы и параметров источника питания на характер переходных процессов в накаливающей цепи магнетрона.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Артюхов И.И.** Магнетронные генераторы для установок СВЧ нагрева: учеб. пособие / И.И. Артюхов, М.А. Фурсаев. Саратов: СГТУ, 2000. 48 с.

2. **Артюхов И.И.** Направления совершенствования мультигенераторных СВЧ электротехнологических установок / И.И. Артюхов, А.И. Земцов // Вестник СГТУ. 2011. № 1(54). Вып. 3. С. 151-156.

3. **Артюхов И.И.** Переходные процессы при включении источника питания магнетронного генератора / И.И. Артюхов, А.И. Земцов, А.Г. Сошинов // Вестник СГТУ. 2010. № 3 (47). Вып. 2. С. 59-61.

4. **Титов В.Н.** Исследование вакуумного цилиндрического диода с термокатодом: учеб.-метод. пособие / В.Н. Титов. Саратов: СГУ им. Н.Г. Чернышевского, 2008. 17 с.

Артюхов Иван Иванович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Земцов Артем Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» филиала Самарского государственного технического университета в г. Сызрани

Ivan I. Artyukhov – Dr.Sc., Professor, Head: Department of Power Supply for Industrial Enterprises, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov.

Artem I. Zemtsov – Ph.D., Associate Professor, Department of Power Supply for Industrial Enterprises, Part of Samara State Technical University in Syzran

Статья поступила в редакцию 04.09.13, принята к опубликованию 09.10.13

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

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

Динамические модели групповых выпрямителей для питания электротехнологических установок

Н.П. МИТЯШИН, Ю.Б. ТОМАШЕВСКИЙ,
Ю.М. АСТАПОВИЧ, Е.Е. МИРГОРОДСКАЯ

Dynamic Models of Group Rectifiers for Electrotechnological Power Plants

N.P. MITYASHIN, Yu.B. TOMASHEVSKY,
Yu.M. ASTAPOVICH, E.E. MIRGORODSKAYA

Описывается математическая модель системы автоматического распределения нагрузки между объединенными по выходу выпрямителями, нагруженными на технологическую нагрузку. Модель позволяет исследовать систему на устойчивость, определять параметры качества переходных процессов. Приводятся результаты исследования математической модели системы.

Ключевые слова: *групповые преобразователи, автоматическое управление, параллельная работа, распределение мощности, устойчивость, качество переходного процесса, выпрямитель, собственные значения матрицы, регулятор*

В связи с ростом потребления электроэнергии в преобразованном виде возрастают мощности преобразовательных устройств. Электроснабжение мощных потребителей, например установок электротехнологического назначения, целесообразно осуществлять с использованием группы параллельно работающих преобразовательных устройств, на основе которой можно строить гибкие и эффективные структуры электроснабжения.

Одной из главных задач при организации подобных систем электроснабжения является обеспечение загрузки работающих преобразователей пропорционально их номинальным мощностям. В статье решается задача исследования динамики процесса автоматического распределения нагрузки между объединенными по выходу регулируемые выпрямителями, на-

The article describes the mathematical model for automatic load sharing between the joint on the output rectifiers loaded upon the loading process. The model can be used to investigate the system stability, determine the quality parameters of the transients. The results of the study are related with the mathematical model of the system.

Keywords: *group converters, automatic control, parallel operation, the power distribution, stability, transient quality, rectifier, eigenvalues of the matrix, regulator.*

груженными на общую технологическую нагрузку.

В [1, 2] предложен общий принцип построения автоматической системы распределения потоков передаваемых ресурсов (в частности, электрической мощности) между параллельно включенными каналами их передачи. При этом управление распределением осуществляется в процессе функционирования оборудования в динамическом режиме. Преимущества такого способа очевидны: возможность осуществить управление в реальном масштабе времени без остановки основного технологического процесса, отсутствие дополнительных затрат на исполнительные элементы управления, возможность адаптивной реакции системы на изменение условий функционирования оборудования.

Суть этого принципа состоит в следующем. Пусть имеется n агрегатов, включенных параллельно на общую нагрузку. Удобно считать, что этими агрегатами являются источники электропитания, а распределяемым ресурсом является электрический ток. Пусть, кроме того, ток каждого источника является монотонной функцией некоторой управляющей величины, т.е.

$$I_k = f(\alpha_k).$$

Здесь I_k – ток k -го агрегата, α_k – соответствующая управляющая величина, f – монотонная функция.

Заданное распределение токов определим положительными параметрами $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$, такими что:

$$\gamma_k > 0; \quad \gamma_1 + \gamma_2 + \dots + \gamma_n = 1.$$

При этом в установившемся режиме должно выполняться для любых двух токов I_k и I_j условие

$$I_k/I_j = \gamma_k/\gamma_j. \quad (1)$$

Иными словами, мы задаем пропорции между токами агрегатов, т.е. распределение нагрузки между ними.

Реализовать такое распределение можно следующим образом. Снабдим каждый агрегат регулятором, который для определенности будем считать пропорциональным, т.е.

$$\alpha_j = \kappa_{\Pi} \cdot \varepsilon_j,$$

где α_j – управляющая переменная j -го регулятора, κ_{Π} – коэффициент усиления регулятора, $\varepsilon_j = I_j^0 - I_j$ – входная величина регулятора, причем уставка j -го регулятора I_j^0 высчитывается следующим образом:

$$I_j^0 = \gamma_j \cdot \sum_{i=1}^n I_i.$$

Для упрощения выкладок функцию f примем линейной, положив $I_j = a + b\alpha_j$. Тогда

$$\begin{aligned} \varepsilon_j &= I_j^0 - I_j = I_j^0 - a - b\alpha_j = \\ &= I_j^0 - a - b \cdot \kappa_{\Pi} \cdot \varepsilon_j, \end{aligned}$$

откуда $\varepsilon_j = (I_j^0 - a)/b \cdot \kappa_{\Pi}$.

Следовательно, при достаточно большом значении коэффициента усиления регулятора κ_{Π} величину ε_j можно считать близкой к нулю, т.е.

$$I_j \approx I_j^0 = \gamma_j \cdot \sum_{i=1}^n I_i.$$

Таким образом, требуемое условие распределения выполняется.

Особенностью рассмотренной системы регулирования является то, что уставка регулирования для каждого регулятора изменяется с изменением общего тока нагрузки, что обеспечивает заданное распределение при любой ее величине. Это является достоинством при работе преобразовательного комплекса в режимах, близких к режиму максимальной нагрузки.

Рассмотрим обобщенную схему включения n управляемых выпрямителей (УВ), работающих на общую нагрузку (рисунок), и снабженную системой автоматического распределения нагрузки, построенной по указанному принципу. Здесь каждый из УВ получает питание от входной сети через трансформатор. Величина напряжения на выходе i -го УВ определяется углом управления α_i .

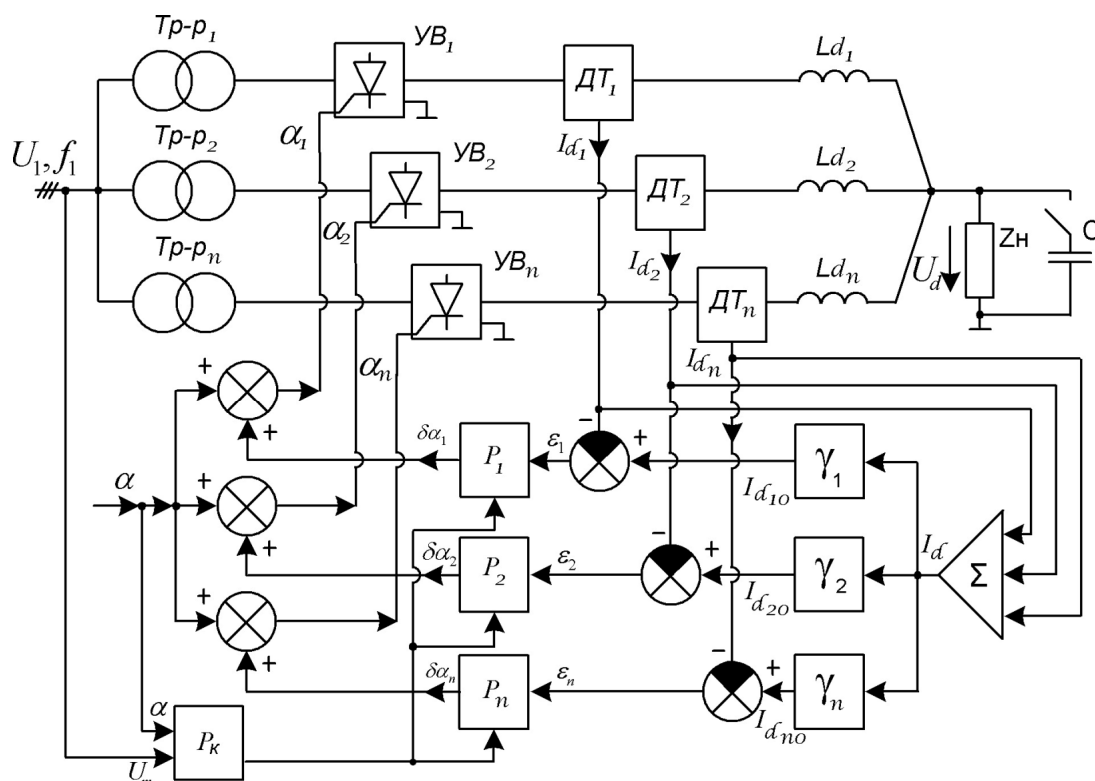
В соответствии с общим принципом управления объединенными по выходу преобразователями этот угол имеет две составляющие: общий угол управления α , обеспечивающий заданное напряжение на нагрузке, и индивидуальную для каждого УВ составляющую $\delta\alpha_i$, обеспечивающую заданное распределение мощности между ними.

В дальнейшем все рассуждения ведутся при следующих допущениях: коммутация вентилей УВ мгновенная (пренебрегаем индуктивностью рассеяния входных трансформаторов $\text{Tr-p}_1, \text{Tr-p}_2, \dots, \text{Tr-p}_n$), выходные токи УВ $i_{d1}, i_{d2}, \dots, i_{dn}$ – непрерывные, коэффициенты трансформации всех трансформаторов одинаковы. В связи с этим средние значения выпрямленных напряжений равны

$$e_i(\alpha_i) = U_{dm} \cos \alpha_i. \quad (2)$$

Здесь U_{dm} – максимально возможное значение выпрямленного напряжения, равное $2,34E_2$, где E_2 – действующее значение

напряжения на вторичных обмотках трансформаторов.



Структурная схема объединенных по выходу управляемых выпрямителей

Для исследования динамики системы распределения необходимо построить ее математическую модель. Составим систему дифференциальных уравнений для огибающих кривых токов индуктивностей фильтра x_i ($i = 1, 2, \dots, n$). При этом мы пренебрегаем пульсациями токов внутри интервала симметрии УВ [3], что допустимо ввиду значительной величины индуктивностей фильтров L_k ($k = 1, 2, \dots, n$). Заметим, что интервалы симметрии всех УВ

совпадают, что следует из сделанных выше допущений. Длительность интервала симметрии τ равна шестой части периода напряжения входной сети. Кроме того, в данном параграфе нагрузку считаем чисто активной, т.е. полагаем $Z_n = r$, конденсатор C отключен. Активные сопротивления реакторов фильтра одинаковы и равны r_d .

В скалярном виде система уравнений принимает вид

[illegible]

В матрично-векторном виде система записывается так

$$L\dot{\bar{x}} + R\bar{x} = \vec{e}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i, \dots, \alpha_n), \quad (4)$$

где

$$L = \begin{bmatrix} L_{d1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_{d2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & L_{di} & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_{dn} \end{bmatrix}; R = \begin{bmatrix} r_d + r & r & r & r & r & r \\ r & r_d + r & r & r & r & r \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r & r & r & r_d + r & r & r \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r & r & r & r & r & r_d + r \end{bmatrix};$$

$$\vec{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_i \\ \dots \\ x_n \end{bmatrix}; \vec{e}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i, \dots, \alpha_n) = \begin{bmatrix} e_1(\alpha_1) \\ e_2(\alpha_2) \\ \dots \\ e_i(\alpha_i) \\ \dots \\ e_n(\alpha_n) \end{bmatrix}.$$

Запишем уравнение в форме Коши:

$$\dot{\vec{x}} = A\vec{x} + \vec{b}(\alpha_1, \alpha_2), \quad (5)$$

где

$$A = -L^{-1}R; \vec{b}(\alpha_1, \alpha_2) = L^{-1}\vec{e}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i, \dots, \alpha_n). \quad (6)$$

Решая это уравнение с помощью матричной экспоненты, получим связь между значениями вектора $\vec{x}$ в начале $(n+1)$ -го и n -го интервала

$$\vec{x}_{n+1} = e^{A\tau} \vec{x}_n + (E - e^{A\tau}) \vec{x}_\infty. \quad (7)$$

При фиксированных значениях углов $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i, \dots, \alpha_n$ установившееся значение вектора $\vec{x}$ равно

$$\vec{x}_\infty = R^{-1} \cdot \vec{e}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i, \dots, \alpha_n). \quad (8)$$

Отсюда

$$\vec{x}_{n+1} = e^{A\tau} \vec{x}_n + (E - e^{A\tau}) R^{-1} \cdot \vec{e}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i, \dots, \alpha_n). \quad (9)$$

Это соотношение является дискретной динамической моделью разомкнутой системы по рисунку. Для получения модели замкнутой системы необходимо добавить уравнения, отражающие обратные связи системы распределения.

Поскольку каждый из углов УВ α_i образован из двух составляющих

$$\alpha_i = \alpha + \delta\alpha_i, \quad (10)$$

то, разложив в ряд по приращениям $\delta\alpha_i$ вектор $\vec{e}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i, \dots, \alpha_n)$ и ограничиваясь линейными членами разложения, получим

$$\begin{aligned} \vec{e}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i, \dots, \alpha_n) &= \\ &= \vec{e}(\alpha, \alpha, \dots, \alpha, \dots, \alpha) + \\ &+ \delta\vec{e}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i, \dots, \alpha_n), \end{aligned} \quad (11)$$

где

$$\delta\vec{e}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i, \dots, \alpha_n) = \begin{bmatrix} \delta e_1(\alpha_1) \\ \delta e_2(\alpha_2) \\ \dots \\ \delta e_i(\alpha_i) \\ \dots \\ \delta e_n(\alpha_n) \end{bmatrix}.$$

Для каждой компоненты этого вектора имеем для малых $\delta\alpha_i$

$$\delta e_i(\alpha_i) = U_{dm} \delta \cos \alpha_i = -U_{dm} \sin \alpha \cdot \delta\alpha_i. \quad (12)$$

Таким образом

$$\begin{aligned} \vec{e}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i, \dots, \alpha_n) = \\ = -U_{dm} \sin \alpha \cdot \delta \vec{\alpha}, \end{aligned} \quad (13)$$

где

$$\delta \vec{\alpha} = \begin{bmatrix} \delta \alpha_1 \\ \delta \alpha_2 \\ \dots \\ \delta \alpha_i \\ \dots \\ \delta \alpha_n \end{bmatrix}.$$

Из (2) следует, что

$$\vec{e}(\alpha, \alpha, \dots, \alpha, \dots, \alpha) = U_{dm} \cdot \cos \alpha \cdot \vec{1}, \quad (14)$$

где $\vec{1}$ – n -мерный вектор, все компоненты которого равны 1.

Подставив (13) и (14) в (11), находим

$$\begin{aligned} \vec{e}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i, \dots, \alpha_n) = \\ = U_{dm} (\cos \alpha \cdot \vec{1} - \sin \alpha \cdot \delta \vec{\alpha}). \end{aligned} \quad (15)$$

Вектор $\delta \vec{\alpha}$ формируется регуляторами $P_1, P_2, \dots, P_n$ на основании информации, получаемой от системы датчиков тока, сумматоров и умножителей (рис. 1). Математически это может быть выражено с помощью формулы

$$\delta \vec{\alpha} = k \cdot G \cdot \vec{x}, \quad (16)$$

где k – коэффициент усиления каждого из регуляторов $P_1, P_2, \dots, P_n$, а матрица G в соответствии с алгоритмом системы распределения имеет вид

$$G = \begin{bmatrix} 1-\gamma_1 & \gamma_2 & \dots & \gamma_j & \dots & \gamma_n \\ \gamma_1 & 1-\gamma_2 & \dots & \gamma_j & \dots & \gamma_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \gamma_1 & \gamma_2 & \dots & 1-\gamma_j & \dots & \gamma_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \gamma_1 & \gamma_2 & \dots & \gamma_j & \dots & 1-\gamma_n \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Подставив (16) в (15), получим

$$\begin{aligned} \vec{e}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i, \dots, \alpha_n) = \\ = U_{dm} (\cos \alpha \cdot \vec{1} - \sin \alpha \cdot G \cdot \vec{x}). \end{aligned} \quad (18)$$

Для получения модели замкнутой системы достаточно теперь подставить последнюю формулу в уравнение (9):

$$\begin{aligned} \vec{x}_{n+1} = (e^{A\tau} - kU_{dm} \cdot \sin \alpha \cdot (E - e^{A\tau}) \times \\ \times R^{-1} \cdot G) \vec{x}_n + U_{dm} \cdot \cos \alpha \cdot (E - e^{A\tau}) R^{-1} \cdot \vec{1}. \end{aligned} \quad (19)$$

В стандартной форме это разностное уравнение можно записать так:

$$\vec{x}_{n+1} = D(\alpha) \vec{x}_n + d(\alpha), \quad (20)$$

где

$$\begin{aligned} D(\alpha) = e^{A\tau} (E + kU_{dm} \sin \alpha \cdot R^{-1} \cdot G) - \\ - U_{dm} \cdot \sin \alpha \cdot R^{-1} \cdot G, \end{aligned} \quad (21)$$

$$d(\alpha) = U_{dm} \cdot \cos \alpha \cdot (E - e^{A\tau}) R^{-1} \cdot \vec{1}. \quad (22)$$

При фиксированном угле α разностное векторно-матричное уравнение (20) представляет собой линейаризованную динамическую модель системы распределения по рисунку. Аналогичная модель, в которой размерность пространства состояний больше на единицу, составлена для схемы по рисунку с подключенным конденсатором C .

Динамические свойства системы (устойчивость, качество переходных процессов) определяются параметрами модели и прежде всего матрицей $D(\alpha)$. В частности, для устойчивости системы необходимо и достаточно, чтобы все собственные значения (СЗ) этой матрицы были по модулю меньше единицы. В случае выполнения этого условия знание СЗ позволяет оценить время переходного процесса в системе и его колебательность [4]. Матрица $D(\alpha)$, а следовательно и ее СЗ, определяются параметрами нагрузки и реакторов (входят в выражения матриц A и R^{-1}), параметрами распределения γ_j (матрица G), напряжением входной сети U_m , коэффициентом усиления регуляторов k и углом управления α . Авторами разработана программа, позволяющая находить с использованием известных численных методов собственные значения матрицы $D(\alpha)$ и исследовать влияние всех указанных факторов на устойчивость и качество переходных процессов в системе.

Особый интерес представляет влияние на характер переходных процессов угла управления α . Результаты соответствующих исследований для двухмостового преобразователя ($n = 2$) с подключенным конденсатором C приведены в таблице.

В таблице показана зависимость показателя n_{20} от угла управления α . Показатель n_{20} равен числу интервалов работы преоб-

разователя, после которых переходный процесс затухает в 20 раз [3]. Фактически этот показатель, адаптированный к оценке динамики устройств силовой электроники, эквивалентен длительности переходного процесса.

Зависимость длительности переходного процесса от угла α
для различных значений коэффициента усиления K^*

K^*	Alpha, эл. гр										
	30	33	36	39	42	45	48	52	54	57	60
0,28	5	5	6	7	8	10	12	16	21	32	59
0,32	5	6	7	8	10	12	16	23	40	127	*
0,36	5	6	7	8	11	15	22	42	249	*	*
0,4	5	6	7	9	13	19	35	183	*	*	*
0,48	5	6	8	10	15	26	81	*	*	*	*
0,52	5	6	8	11	18	40	*	*	*	*	*
0,56	5	6	8	13	23	86	*	*	*	*	*
0,6	5	7	10	16	46	*	*	*	*	*	*
0,64	5	7	10	19	92	*	*	*	*	*	*

Зависимости рассчитаны для следующих значений параметров схемы и нагрузки: $r = 1$ Ом, $r_{d1} = r_{d2} = 0,01$ Ом, $L_{d1} = L_{d2} = 0,01$ Гн, $C = 300$ мФ, $\gamma_1 = 0,3$, $\gamma_2 = 0,7$. Поскольку коэффициент усиления k входит в формулу для матрицы $D(\alpha)$, умноженной на напряжение U_{dm} , то целесообразно ввести обобщенный коэффициент усиления $K^* = U_{dm}k$. Поэтому строки таблицы относятся к значениям именно этого коэффициента.

Из анализа таблицы следует, что с увеличением угла управления α и коэффициента K^* время переходного процесса увеличивается. Знак «*» в клетках правого нижнего угла таблицы означает, что для соответствующей комбинации угла α и коэффициента K^* система неустойчива. Этот результат приводит к выводу о необходимости введения вспомогательного регуля-

тора P_k (рисунок), обеспечивающего уменьшение коэффициентов k основных регуляторов при соответствующем увеличении угла α . Введение P_k приводит к адаптации системы распределения к реальным условиям работы преобразователя в режиме регулирования или стабилизации напряжения на нагрузке.

Аналогичные результаты получены при исследовании показателя колебательности переходного процесса в системе распределения.

Построена математическая модель системы автоматического распределения нагрузки между объединенными по выходу выпрямителями. Модель позволяет исследовать систему на устойчивость, определять параметры качества переходных процессов. Модель и результаты исследований могут быть использованы при про-

ЛИТЕРАТУРА

1. А.с. 896724 СССР, МКИ Н 02 М 5/27, Н 02 М5/515. Групповой преобразователь частоты / И.И. Кантер, Н.П. Митяшин, И.И. Артюхов и др. // Открытия. Изобретения. 1982. № 12.

2. Автоматическое распределение нагрузки между параллельно работающими агрегатами / Ю.М. Астапович, Н.П. Митяшин, Р.А. Билуков и др. // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 1; URL: <http://www.science-education.ru/107-8571> (дата обращения: 12.03.2013).

3. **Миргородская Е.Е.** Исследование динамики автономных инверторов корневым методом / Е.Е. Миргородская, Н.П. Митяшин, М.В. Радионова // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. № 4 (62). Вып. 4. С. 140-144.

4. **Бесекиерский В.А.** Теория систем автоматического регулирования / В.А. Бесекиерский, Е.П. Попов. М.: Наука, 1966. 992 с.

Митяшин Никита Петрович – доктор технических наук, профессор кафедры «Системотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Томашевский Юрий Болеславович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Системотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Астапович Юрий Михайлович – аспирант кафедры «Системотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Миргородская Екатерина Евгеньевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Системотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Nikita P. Mityashin – Dr.Sc., Professor, Department of System Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Yuri B. Tomashevsky – Dr.Sc., Professor, Head: Department of System Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Yuri M. Astapovich – Postgraduate, Department of System Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Ekaterina E. Mirgorodskaya – Ph.D., Associate Professor, Department of System Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 17.09.13, принята к опубликованию 09.10.13

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 621.318.3

Математическая модель процесса электрохимического преобразования энергии

Д.А. ВЫРЫХАНОВ, Г.Г. УГАРОВ

A Mathematical Model for the Conversion of Electromechanical Energy

D.A. VYRYHANOV, G.G. UGAROV

Предлагается модель электрохимического преобразования энергии, позволяющая аналитически представить зависимость между током в обмотке возбуждения и механической координатой подвижной части преобразователя.

Ключевые слова: электрохимическое преобразование энергии, противо-ЭДС, динамическая индуктивность, режим работы

The proposed model for converting electromechanical energy can be used to analyze the relationship between the current in the excitation winding and mechanical coordinate to the moving element of the converter.

Keywords: electromechanical energy conversion, back-EMF, dynamic inductance, operating mode

Известные математические модели процесса электрохимического преобразования энергии [1-4] основаны на решении системы дифференциальных уравнений с двумя независимыми переменными: током i в обмотке возбуждения магнитного поля преобразователя и геометрической координаты якоря x или ротора электрической машины, параметрически зависимыми от времени t :

$$i = f(t); \quad x = f(t). \quad (1)$$

Параметрическая зависимость (1) не позволяет непосредственно определить соотношение между магнитной и механической мощностями процесса энергопреобразования в двигателе. Это объясняется отсутствием в выражении, определяющем производную потокоцепления Ψ обмотки возбуждения по времени, механической координаты якоря:

$$\frac{d\Psi}{dt} = L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{dt}, \quad (2)$$

где $L = \frac{\Psi}{i}$ — мгновенная индуктивность обмотки возбуждения.

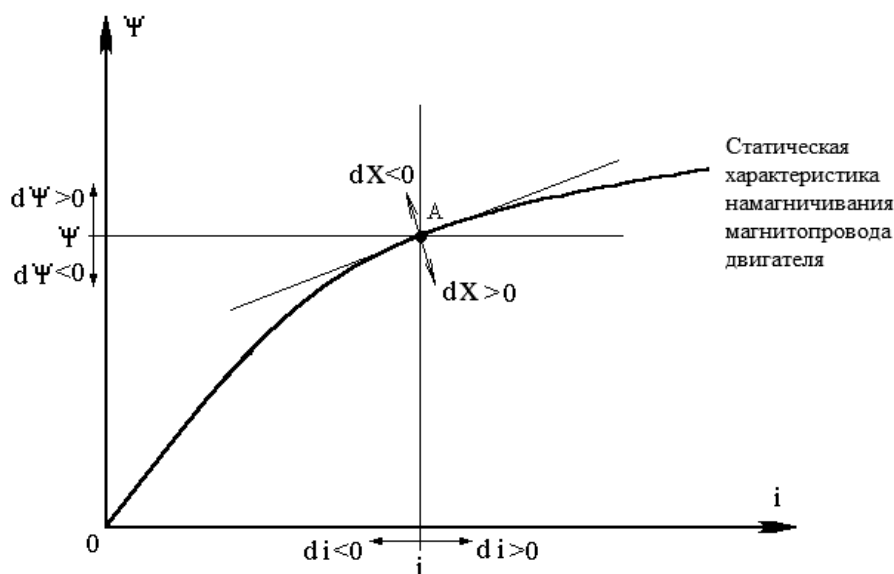
В [5-7] приведен анализ эффективности различных по величинам преобразованных видов энергий (электрической, магнитной и механической) циклов электрохимического преобразования энергии. Целью данной работы является переход от интегральных оценок процесса электрохимического энергопреобразования (через соотношения энергий) к дифференциальному анализу — через соотношения электрической, магнитной и механической мощностей, развиваемых двигателем. Поставленная цель достигается нахождением аналитической зависимости между дифференциально малыми приращениями электрического тока i в обмотке возбуждения и механической координаты x подвижной части двигателя.

Параметрическая зависимость (1) определяет режим энергопреобразования в двигателе [5, 6], как соотношение между при-

ращениями тока i и механической координаты x . Наиболее наглядно данные соотношения представляются в координатах тока и потокосцепления (см. рисунок). Следует отметить, что из рисунка связь между дифференциальными приращениями тока di и механической координаты dx определяется при участии дифференциала потокосцепления $d\psi$ [8].

Рассмотрим элементарную систему электромеханического преобразователя энергии. Будем под ней понимать единичную индук-

тивность L , изменяющую собственную величину в соответствии с изменением геометрической координаты якоря x . Индуктивность L составляет электрический контур с внешним источником ЭДС u и активным сопротивлением обмотки R . В данном контуре под действием внешнего источника ЭДС и наведенных в индуктивности противо-ЭДС протекает ток i . Дополнительных ограничений анализа не накладываем, последующие выкладки справедливы и при насыщенной магнитной системе двигателя.



Дифференциальные приращения тока i , геометрической координаты x и потокосцепления ψ в процессе электромеханического преобразования энергии, определяющие режим работы преобразователя

Представим магнитную $P_{\text{маг}}$ и механическую $P_{\text{мех}}$ мощности в виде [8]:

$$P_{\text{маг}} = i \frac{d\psi_{\text{маг}}}{dt}, \quad (3)$$

$$P_{\text{мех}} = i \frac{d\psi_{\text{мех}}}{dt}, \quad (4)$$

где $\frac{d\psi_{\text{маг}}}{dt}$, $\frac{d\psi_{\text{мех}}}{dt}$ — слагаемые противо-ЭДС наводимой на индуктивности, формирующие, соответственно, магнитную и механическую мощности:

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{d\psi_{\text{маг}}}{dt} + \frac{d\psi_{\text{мех}}}{dt}. \quad (5)$$

Каждая из составляющих противо-ЭДС формирует в электрическом контуре собст-

венную составляющую тока, приращение которой следует задать в виде [8]:

$$di = di_{\text{маг}} - di_{\text{мех}}. \quad (6)$$

В выражении (6) знак минус при механической составляющей тока учитывает последовательность электромеханического преобразования энергии, а именно тот факт, что положительная механическая мощность в процессе электромеханического преобразования энергии снижает величину тока в цепи за счет возникновения противо-ЭДС движения. Об этом свидетельствует снижение тока во время движения якоря электромагнитных механизмов.

Соотношения (3), (4) можно представить в виде [8]:

$$P_{\text{маг}} = iL \frac{di_{\text{маг}}}{dt}, \quad (7)$$

$$P_{\text{мех}} = iL \frac{di_{\text{мех}}}{dt}. \quad (8)$$

При этом магнитную и механическую мощности можно также записать как [1-5]

$$P_{\text{маг}} = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} i \psi \right) = \frac{1}{2} \left(i \frac{d\psi}{dt} + \psi \frac{di}{dt} \right), \quad (9)$$

$$P_{\text{мех}} = (F_{\text{эл.м}} - F_{\text{сопр}}) \frac{dx}{dt}. \quad (10)$$

Сопоставляя правые части выражений (7) и (9), а также (8) и (10), находим магнитное и механическое приращение тока в обмотке электромеханического преобразователя:

$$di_{\text{маг}} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{L} d\psi + di \right), \quad (11)$$

$$di_{\text{мех}} = \frac{F_{\text{эл.м}} - F_{\text{сопр}}}{\psi} dx. \quad (12)$$

Подставляя (11), (12) в (6), получим выражение для приращения тока в цепи:

$$di = \frac{1}{L} d\psi - \frac{2(F_{\text{эл.м}} - F_{\text{сопр}})}{\psi} dx. \quad (13)$$

Выражение (13) связывает дифференциальные приращения трех физических величин: электрического тока в цепи обмотки, потокосцепления обмотки возбуждения двигателя и механической координаты якоря. Разделив обе стороны уравнения (13) на дифференциал времени, учитывая выражение (10) и соотношение

$$\frac{d\psi}{dt} = u - iR, \quad (14)$$

получим

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L} (u - iR) - \frac{2}{\psi} P_{\text{мех}}. \quad (15)$$

Интегрирование выражения (15) по времени позволяет найти значения тока в цепи обмотки возбуждения электромеханического преобразователя. При этом величина механической мощности является функцией раз-

виваемого преобразователем электромагнитного усилия, противодействующего усилия и массы подвижных частей согласно (10). При исключительно электромагнитном преобразовании ($P_{\text{мех}} = 0$) выражение (15) приходит к известному уравнению [1-5]:

$$\frac{di'}{dt} = \frac{1}{L} (u - i' R) \text{ или } u = i' R + L \frac{di'}{dt}, \quad (16)$$

где штрих определяет значение тока в отсутствии электромеханического преобразования энергии.

Вычитаемое в правой части выражения (15) показывает влияние механической мощности, развиваемой двигателем, на приращение тока в обмотке возбуждения. Коэффициент $2/\psi$ определяет зависимость данного влияния от потокосцепления обмотки: чем больше потокосцепление, тем меньше сказывается величина механической мощности на ток.

Режим работы электромеханического преобразователя энергии определяется его дифференциальной индуктивностью, то есть отношением дифференциальных приращений потокосцепления к току в процессе энергопреобразования. Разделив (14) на (15), получим

$$\frac{d\psi}{di} = L \frac{u - iR}{(u - iR) - \frac{2}{i} P_{\text{мех}}}. \quad (17)$$

Согласно выражению (17) механическая мощность оказывает влияние на режим электромеханического преобразования энергии (определяемый его динамической индуктивностью) обратно пропорционально значению тока, протекающего в обмотке возбуждения двигателя.

Умножив числитель и знаменатель правой части выражения (17) на значение тока в обмотке возбуждения, получим:

$$\frac{d\psi}{di} = L \frac{P_{\text{эл}}}{P_{\text{эл}} - 2P_{\text{мех}}}, \quad (18)$$

где $P_{\text{эл}} = i(u - iR)$ – электрическая мощность, потребляемая электромеханическим преобразователем. Выражение (18) можно представить в виде

$$\frac{d\psi}{di} = L \frac{1}{1 - 2 \frac{P_{\text{мех}}}{P_{\text{эл}}}}. \quad (19)$$

Выражение (19) определяет соотношение между мгновенной и динамической индуктивностями электромеханического преобразователя.

Итак, предложенная математическая модель процесса электромеханического преобразования энергии определяет представленную в [1-4] параметрическую взаимосвязь основных динамических характеристик двигателя (1) в виде аналитического выражения (13). Оптимизация режимных и

конструктивных параметров двигателей, описываемых представленными уравнениями, возможна на основании поиска оптимальных соотношений между составляющими формулы (19): мгновенной индуктивностью L (определяющей конструкцию), динамической индуктивностью $\frac{d\psi}{di}$ (определяющей режим работы), соотношением между потребляемой электрической и развиваемой механической мощностями $\frac{P_{\text{мех}}}{P_{\text{эл}}}$, являющимся критерием оптимума.

ЛИТЕРАТУРА

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

2. Кениг Г. Теория электромеханических систем / Г. Кениг, В. Блекуэл. М.: Энергия, 1965. 424 с.

3. Ленк А. Электромеханические системы / А. Ленк. М.: Мир, 1978. Т. 1. 288 с.

4. Шмитц Н. Введение в электромеханику / Н. Шмитц, Д. Новотный. М.: Энергия, 1969. 336 с.

5. Электропривод с линейными электромагнитными двигателями / Н.П. Ряшенцев, Г.Г. Угаров, В.Н. Федонин и др. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-е, 1981. 348 с.

6. Угаров Г.Г. Импульсные линейные электромагнитные двигатели с повышен-

ными силовыми и энергетическими показателями: дис. ... д-ра техн. наук: 05.09.01 / Г.Г. Угаров. Новосибирск, 1992. 492 с.

7. Массад А. Электромеханическое преобразование энергии в ЛЭМД / А. Массад, Г.Г. Угаров, И.М. Хусаинов // Новые технологии на железнодорожном транспорте и в образовании: сб. науч. ст. Саратов: СГУ, 2001. С. 128-132.

8. Вырыханов Д.А. Анализ мощностей и энергетических структур линейного электромагнитного двигателя / Д.А. Вырыханов, Г.Г. Угаров // Проблемы электроэнергетики: межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ, 2004. С. 192-198.

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

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

Статья поступила в редакцию 10.09.13, принята к опубликованию 11.10.13

Построение параметрической модели оценки коммутации тяговых электрических машин электровозов

Г.Г. УГАРОВ, И.А. МЕНЩИКОВ, Е.А. БОНДЫРЕВА

Building the Parametric Switching Assessment Model for the Traction Electric Machines of Electric Locomotives

G.G. UGAROV, I.A. MENSNIKOV, E.A. BONDYREVA

Приведены результаты исследования проблемы повышения качества диагностирования тяговых электрических машин электровозов на железнодорожном транспорте. Проблема предлагается решать с помощью алгебраических методов и теории графов, которые базируются на использовании параметрического моделирования функционирования тягового электродвигателя электровоза.

Ключевые слова: электрические машины, моделирование, контроль технического состояния

Решение задач автоматизации контроля технического состояния тягового электропривода удобно выполнять с помощью алгебраических методов, которые базируются на использовании информации, содержащейся в различных сочетаниях бинарных значений признаков и легко формируемой на графе. Это позволяет обходиться малыми выборками и обеспечивать высокую надежность распознавания.

При использовании только математических методов описания объекта диагностирования с помощью дифференциальных уравнений и набора взаимосвязанных линейных и нелинейных звеньев в процессе диагностирования возникают трудности, связанные с различием технических состояний объектов и локализацией неисправностей.

В качестве математического аппарата моделирования целесообразно использовать аппарат, базирующийся на понятии теории графов с рассмотрением отношений на множестве свойств функционирования

The results of this study indicate problems related with the quality test system for traction electric machines of electric locomotives used by the rail transport. The algebraic graph theory and algebraic methods based on the parametric operation modeling used for drive motors of electric locomotives are proposed to help solving the problem.

Keywords: electric cars, modeling, control of a technical condition

объекта контроля, на множестве его параметров либо на множестве функциональных элементов [1].

Для построения параметрической модели тягового электродвигателя (ТЭД), как сложного объекта контроля, на первом этапе выберем наиболее общие свойства функционирования, которые затем свяжем в единую систему. ТЭД является преобразователем электрической энергии в механическую, у которого сложно выделить конструктивные функционально самостоятельные части. В результате анализа причинно-следственных связей между параметрами и свойствами объекта можно получить достоверную параметрическую модель [2].

В процессе функционирования ТЭД под воздействием различных факторов изменяются его параметры, что может привести к нарушению условий коммутации, следовательно, процесс коммутации ТЭД можно рассматривать как динамическую систему.

Первоначальная параметрическая модель является основой для построения конкретизированной первичной модели, которая получается путем дополнения модели множеством параметров функционирования ТЭД, влияющих на качество коммутации и определяющих тем самым интенсивность и характер различных неисправностей.

Поскольку неидентичность коммутационных циклов определяется не только явлениями, присущими преобразованию энергии в тяговом электроприводе, но и определенными технологическими отклонениями, возникающими при изготовлении ТЭД, первоначальная модель дополнена множеством структурных параметров, а также элементами, отображающими возможные неисправности.

Список возможных основных дефектов сформулирован по данным статистики от-

казов и на основании анализа влияния различных факторов на состояние ТЭД. Совокупность элементов такой статистики образует множество дефектов $D = (d_1, \dots, d_p)$, подлежащих распознаванию.

Параметрическая модель ТЭД в пространстве параметров содержит множество вершин S , обусловленных замыканием $\{M\}$ множества внутренних параметров.

Операция замыкания множества M обуславливает наличие в параметрической модели параметров других объектов и параметров внешней среды [3].

В вершины параметрической модели могут попасть параметры, не обладающие достаточной информативностью относительно дефектов. Поэтому их следует исключить из дальнейшего рассмотрения, то есть удалить некоторые вершины. В результате чего получается рабочая параметрическая модель (рис. 1).

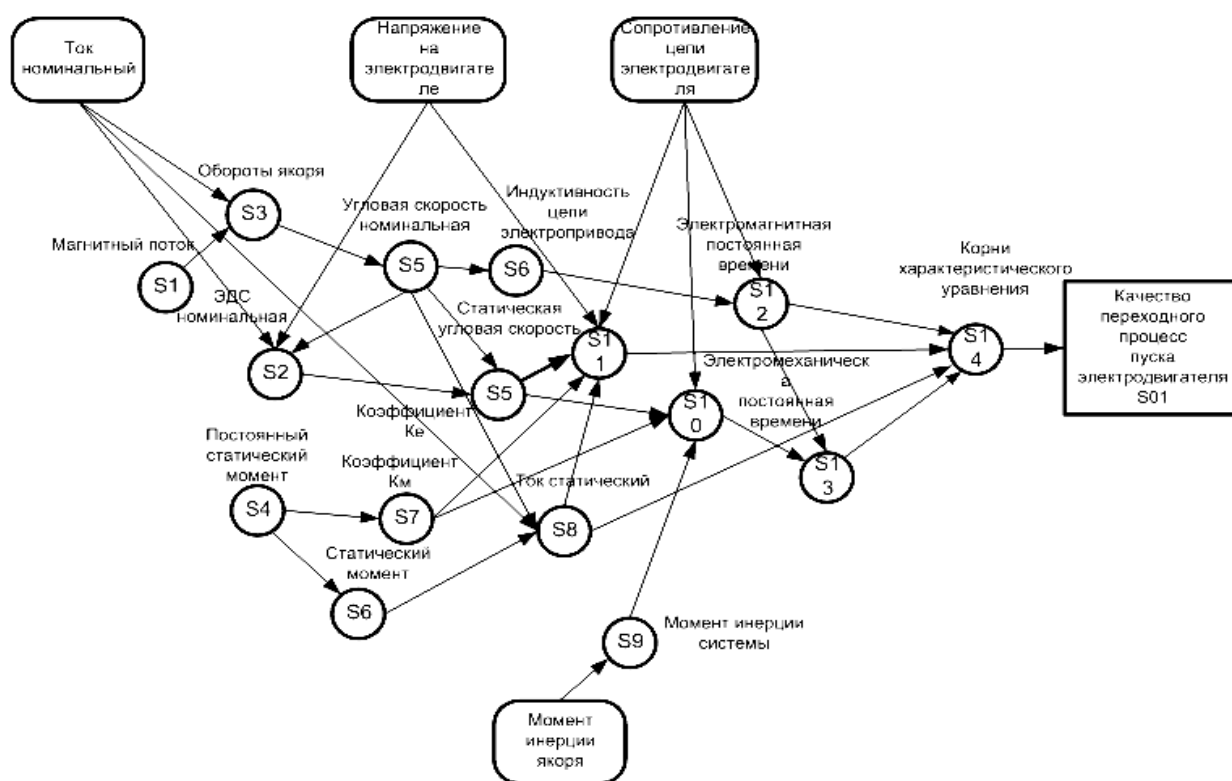


Рис. 1. Рабочая параметрическая модель тягового электродвигателя РТ-51М

Рабочая параметрическая модель представляет собой объединение компонентов достижимости вершин S_i структурных параметров, соединяющих эту вершину с другими вершинами графа.

Для выявления контролируемых параметров ТЭД в рабочую параметрическую модель добавляются диагнозы $\bar{D}(S)$. Диагноз $\bar{D}(S)$ представляет собой совокуп-

ность параметров, на значения которых влияют значения структурного параметра S_i , если его данные не соответствуют техническим нормам (дефекты, отказы).

С целью упрощения рабочей параметрической модели исключим следующие вершины: $E_L(S1)$, $E_M(S2)$, $\Phi_K(S17)$, отобра-

жающиеся соответственно только в параметрах $E_P(S4)$ и $E_K(S7)$. Получим параметрические модели тягового электродвигателя РТ-51М для исследования среднего уровня искрения (рис. 2) и неидентичности коммутационных циклов (рис. 3).

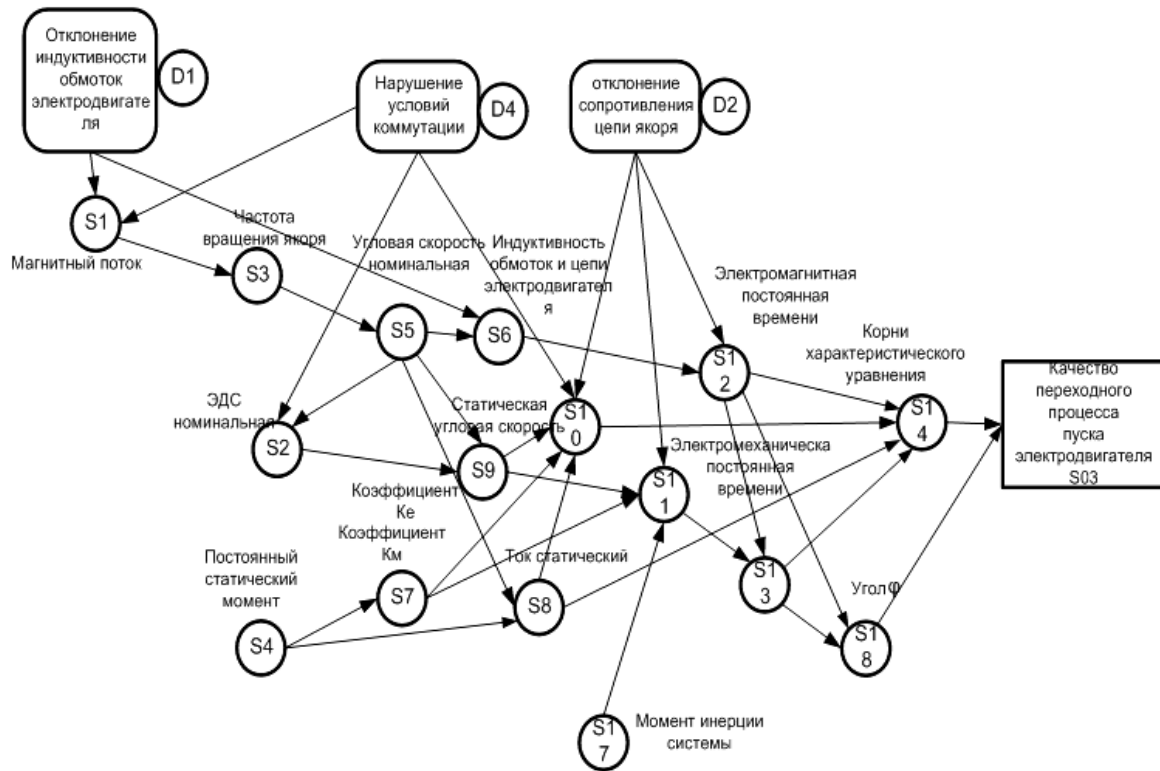


Рис. 2. Параметрическая модель, определяющая средний уровень искрения

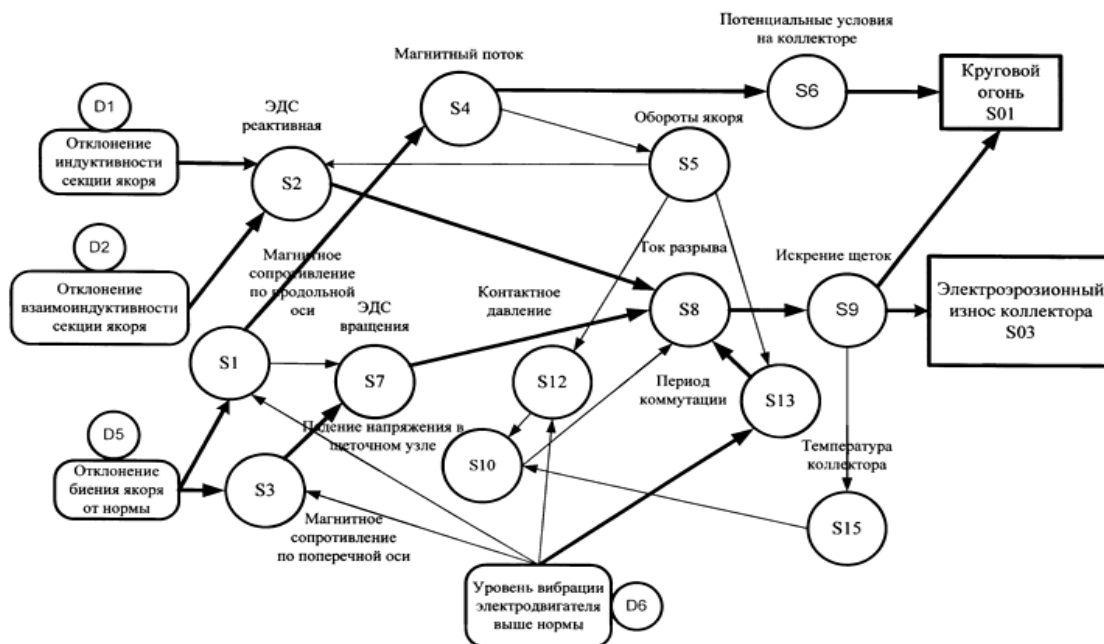


Рис. 3. Параметрическая модель, определяющая неидентичность коммутационных циклов

Выбранные параметры контроля должны обладать достаточной информативностью, мгновенно реагировать на любые изменения, происходящие в диагностируемом объекте, обладать высокой помехозащищенностью и достоверностью, способностью к преобразованию при использовании автоматизации процесса обработки информации. Большинство параметров контроля позволяют получить достаточную глубину поиска неисправностей, но вместе с тем удорожают диагностирование. Поэтому для автоматизации контроля технического состояния ТЭД необходимо решить задачу выбора достоверных параметров контроля.

Набор параметров будет достоверным, если их контроль будет достаточным для обнаружения отказов любого из узлов ТЭД. Для выбора минимального числа достоверных параметров контроля составим матрицу состояний контролируемых параметров для параметрической модели.

Теория графов позволяет минимизировать совокупность вершин параметрической модели, путем преобразования графов. Для каждого множества вершин S_i существует наименьшее устойчивое множество, в которое заходят все дуги из всех остальных вершин. Ориентированный граф выходов преобразуется в простую параметрическую модель, у которой каждая вершина S_i отображена в вершину S_j , а для каждой дуги $(S_i S_j)$ образуется дуга $S_i S_j$. Затем простая параметрическая модель упрощается: из нее удаляются вершины $S_i S_j$, имеющие висячие дуги, а также те вершины S_i , которые полностью заменяются вершинами S_j ($\Delta S_i \subset \Delta S_j$). Операции упрощения повторяются до тех пор, пока простая параметрическая модель не поддается дальнейшему упрощению. Затем в конфигурации параметрической модели находят те вершины, в которые дуги только входят.

После минимизации совокупности параметров контроля проводится ранжировка с точки зрения выявления их эффективности.

Для этого принимаем, что ТЭД характеризуется совокупностью m взаимосвязанных

параметров S_i , $1 \leq i \leq m$; $P(S_i)$ – вероятность того, что все параметры модели в норме; $C(S_i)$ – стоимость проверки всех параметров в совокупности; $Q(S_i)$ – цена потерь от неполноты контроля; $\tau_d(S_i)$ – среднее время диагностирования i -го параметра [4].

Оптимизация алгоритма ранжировки с одновременной минимизацией средних затрат или среднего времени возможна на основании информационной модели. Реализация информационной модели выглядит следующим образом: на параметрических моделях, определяющих средний уровень искрения и неидентичность коммутационных циклов, каждому из дискретных состояний параметров S_i соответствует вероятность P_i .

Энтропия моделируемого объекта из $n = 21$ вершины

$$H(S) = - \sum_{i=1}^n P_i \log_2 P_i. \quad (1)$$

Потеря работоспособности или энтропии ТЭД зависит от времени эксплуатации и в каждый промежуток времени ТЭД имеет определенное состояние, а каждая из проверок S несет информацию о работоспособности тягового электропривода в объеме:

$$I = \log [P(S / S_i) / P(S)], \quad (2)$$

где $P(S)$ – априорная вероятность пребывания тягового электродвигателя РТ-51М в работоспособном состоянии;

$$P(S / S_i) = \frac{P(S) \cdot P(S_i / S)}{P(S) \cdot P(S_i / S) + P(0) \cdot P(S_i / 0)},$$

где $P(S_i / S)$ – условная вероятность того, что S работоспособна; $P(0) = 1 - P(S)$ – вероятность отказа параметра.

Если принять, что погрешности в системе диагностирования отсутствуют, то тогда $P(S_i / S) = 1$ и соответственно условная вероятность пребывания тягового электропривода в исправном состоянии будет составлять

$$\begin{aligned} P(S / S_i) &= \\ &= \frac{P(S)}{P(S) + P(0) - P(0) \cdot P(S_i / 0)}. \end{aligned} \quad (3)$$

Тогда

$$I = \log_2 \left(\frac{1}{1 - P(0) \cdot P(S_i / 0)} \right). \quad (4)$$

Учитывая, что для сопоставления должно быть проведено n проверок, функция предпочтения проверок по $\max$ принимает вид

$$I_{\max} = \left[\sum_{i=1}^n P(0) \cdot P(S_i / 0) \right]. \quad (5)$$

Из матрицы состояний следует, что $\max[P_i(0) \cdot P(S_i / 0)]$ соответствует максимальному числу нулей в соответствующей строке, т.е. выражению

$$\max = \sum P_i(0) \leq 0_i. \quad (6)$$

Если вероятности состояний отдельных параметров оказываются неизвестными, то функция предпочтения упрощается и предпочтение отдается тому параметру, в строке которого больше нулей.

Процедура выбора совокупностей контролируемых параметров для автоматизации контроля технического состояния ТЭД заключается в анализе матрицы (таблицы) состояний, в которой столбцы соответствуют возможным состояниям системы S_j , а строки – всем возможным влияниям внутренних параметров на состояние системы.

Для каждой строки матрицы вычисляется функция предпочтения W и выбирается та, в которой $W \rightarrow \max$. Затем по результатам значений параметров матрицу состояний делят на две части. В первую часть входят положительные параметры – 1, а во вторую – отрицательные – 0. Первая часть матрицы является исходной для построения новой матрицы, в которую входят оставшиеся положительные параметры. Для новой матрицы выполняются те же операции по выбору предпочтительной функции, что и ранее, до тех пор, пока имеются параметры, содержащие нулевые $\max$ значения. Для автоматизации контроля технического состояния тягового электропривода выбираются наиболее информативные параметры, т.е. параметры, в максимальной степе-

ни уменьшающие остаточную неопределенность на каждом шаге выбора. Процесс заканчивается, когда остаточная энтропия становится равной нулю. В результате анализа таблиц состояния параметров по максимальным значениям функции предпочтения W выявлены следующие параметры контроля работоспособности тягового электропривода: наличие кругового огня по коллектору (S_0), значение оборотов электродвигателя (S_6), значение и форма тока разрыва (S_{10}), наличие максимального уровня искрения в КЩУ электродвигателя (S_{19}), наличие электроэрозионного износа коллектора и щеток (S_{01}), падение напряжения в КЩУ (S_{11}), плотность тока под щеткой (S_{14}), магнитный поток (S_8).

На основании минимизации таблиц состояния параметров построим двудольный граф соответствия диагнозов и выбранных контролируемых параметров (рис. 4).

Полученная совокупность контролируемых параметров, обеспечивающая полноту автоматизации контроля технического состояния тягового электропривода, включает такие физические величины как: значение и форма тока разрыва (S_{10}), наличие электроэрозионного износа коллектора и щеток (S_{01}), падение напряжения в щеточном узле (S_{11}), плотность тока под щеткой (S_{14}) и магнитный поток (S_8), контроль которых технически сложен и экономически нецелесообразен.

Если после исключения таких параметров обеспечивается необходимая достоверность и эффективность контроля, то оставшаяся совокупность контролируемых параметров будет минимально необходимой и достоверной для автоматизации контроля технического состояния ТЭД.

Полученный двудольный граф может быть использован для формирования задания по сбору статистических данных и организации процесса автоматизации контроля технического состояния ТЭД, а также для распознавания и диагностирования отказов.

Для автоматизации контроля технического состояния ТЭД необходимо с помощью пространственной модели исследо-

вать и получить дополнительные контролируемые параметры, отвечающие требо-

ваниям доступности и достоверности результатам измерений.

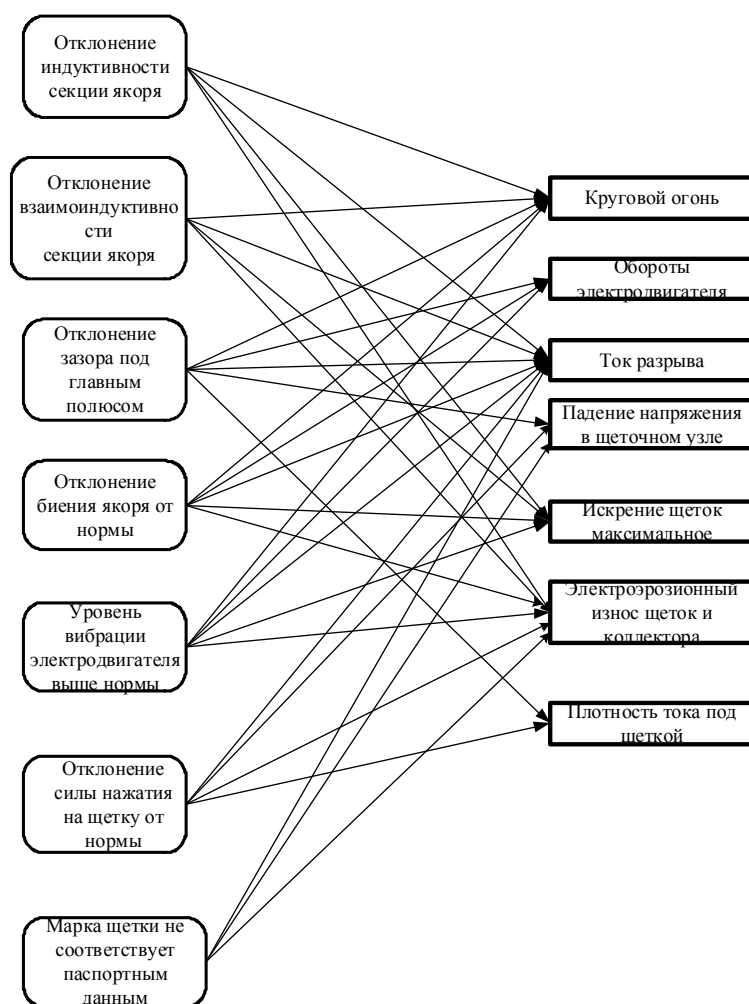


Рис. 4. Двудольный граф соответствия множества дефектов и множества контролируемых параметров

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ермолин Н.П.** Надежность электрических машин / Н.П. Ермолин, И.Л. Жирин. Л.: Энергия, 1976. 248 с.

2. **Курбасов А.С.** Повышение работоспособности тяговых двигателей / А.С. Курбасов. М.: Энергия, 1977. 223 с.

3. **Щербаков В.Г.** Закономерности износа коллектора и щеток тяговых электро-

двигателей электровозов / В.Г. Щербаков // Известия вузов. Электромеханика. 1978. № 12. С. 1293-1300.

4. Магистральные электровозы. Тяговые электрические машины / В.И. Бочаров, Г.В. Василенко, А.Л. Курочка и др. М.: Энергоатомиздат, 1992. 464 с.

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

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

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

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

Бондырева Екатерина Андреевна – студентка 5 курса Института электронной техники и машиностроения Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Ekaterina A. Bondyрева – Undergraduate, Institute of Electronics and Mechanical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 12.09.13, принята к опубликованию 14.10.13

УДК 681.171.5

Автоматизированная диагностическая система силового электрооборудования электровозов

И.А. МЕНЩИКОВ, Г.Г. УГАРОВ

The Automated Diagnostic System for the Power Electric Equipments of Electric Locomotives

I.A. MENSNIKOV, G.G. UGAROV

Представлены результаты исследования проблемы повышения качества диагностирования силовой цепи электрооборудования электровозов. Проблемы предлагается решать совершенствованием структуры известных систем технической диагностики и разработкой бортовых автоматизированных систем технической диагностики силового электрооборудования.

Ключевые слова: *диагностическая система, электрооборудование электровозов, отказы, автоматизация*

The article presents the research data aimed at improving the diagnostics quality of the power circuit used in electric equipment of electric locomotives. This problem can be solved by upgrading the existing system of technical diagnostics and developing on-board automated systems for technical diagnostics of electrical equipment.

Keywords: *diagnostic system, electric equipment of electric locomotives, refusals, automation*

Надежность электровозов и эффективность их использования являются определяющими условиями ритмичной и устойчивой работы железнодорожного транспорта.

В связи с увеличением объема перевозок и повышением интенсивности эксплуатации возрастают требования к экс-

плуатационной надежности тягового подвижного состава. Анализ отказов электрооборудования электровозов по сети железных дорог показывает, что 25-35% от их общего числа приходится на цепи силового электрооборудования, поэтому важнейшей задачей эффективной эксплуатации электровозов является обеспе-

чение надежной работы одного из основных узлов – цепи высоковольтного силового электрооборудования электровозов. Повышение надежности работы электровозов осуществляется за счет модернизации наиболее ответственных узлов и деталей и совершенствования системы технического обслуживания, ремонта при сокращении эксплуатационных расходов. Суммарные расходы локомотивного хозяйства составляют около 40% от общих эксплуатационных расходов сети железных дорог, причем 30-35% от общих расходов локомотивного хозяйства затрачивается на техническое обслуживание и ремонт электровозов.

Поэтому для повышения функционирования электровозов необходимо разработать бортовые автоматизированные системы технической диагностики высоковольтного электрооборудования электровозов, позволяющие выявлять опасные отказы и сокращать время их поиска.

Для исследования надежности функционирования высоковольтного электро-

оборудования авторами была разработана автоматизированная бортовая диагностическая система контроля изоляции высоковольтного электрооборудования электровозов (рис. 1).

На рис. 2 показаны кривые тока переходного процесса в результате диагностического воздействия на цепь силового высоковольтного электрооборудования электровоза. При исправной силовой цепи электрооборудования характер переходного процесса – колебательный (на графике показана кривая 1), при коротком замыкании в высоковольтной изоляции силового электрооборудования характер переходного процесса – апериодический (на графике показана кривая 2) [3].

Эффективность контроля выражается в сокращении эксплуатационных расходов во время плановых испытаний силовых цепей электрооборудования электровозов, своевременном обнаружении отказов, вплоть до автоматического определения характера отказа и упреждения возникновения аварийных ситуаций.

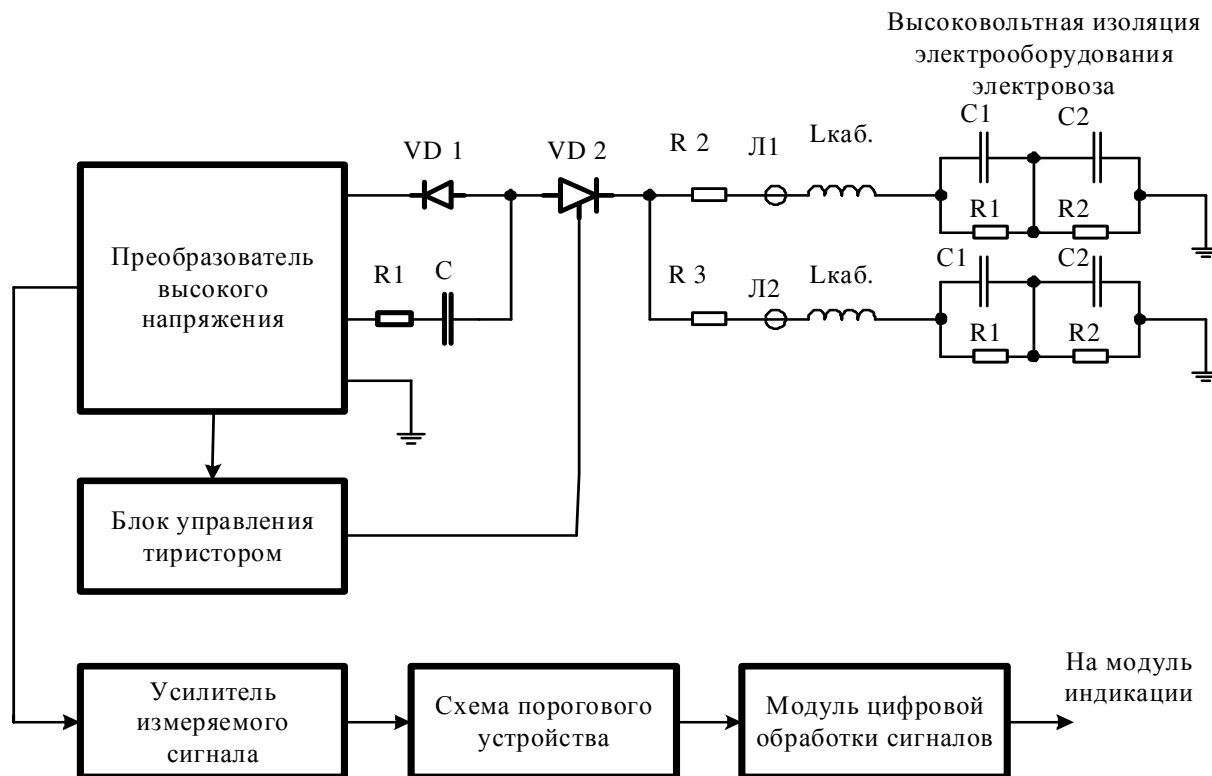


Рис. 1. Структурная схема автоматизированной диагностической системы контроля изоляции высоковольтного электрооборудования электровоза

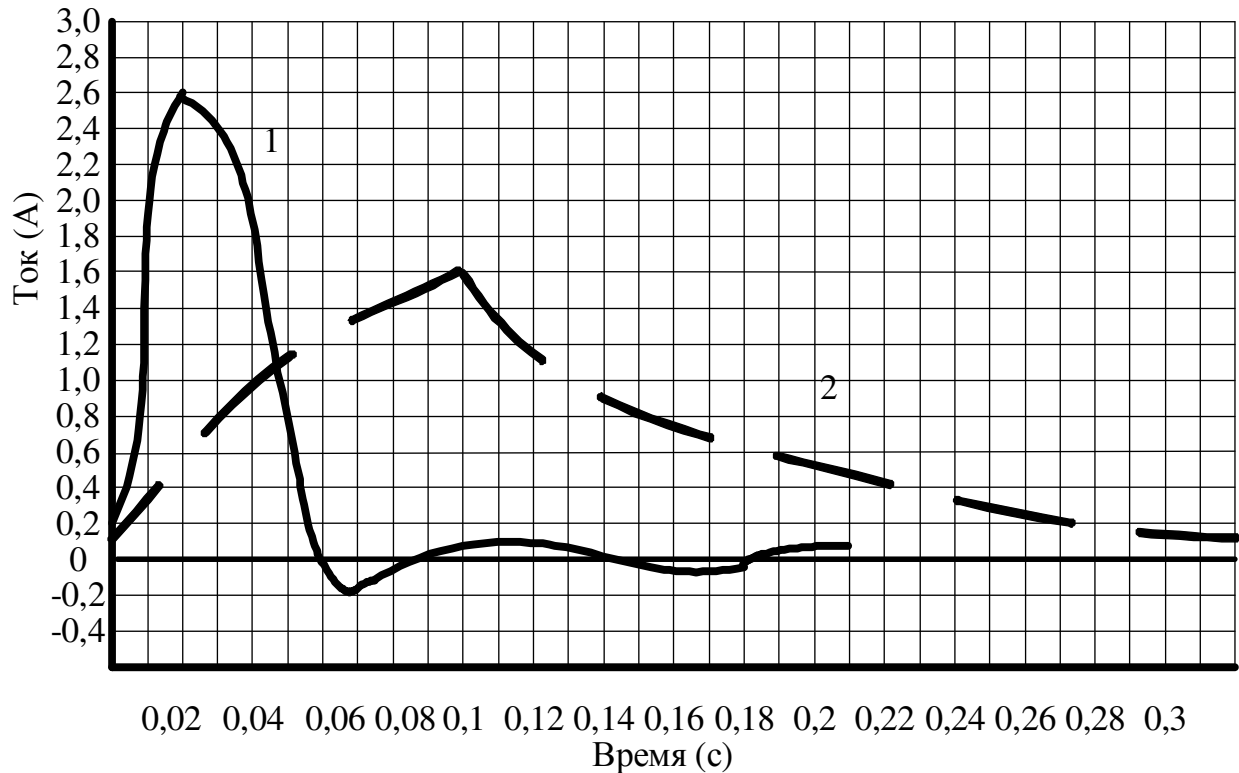


Рис. 2. Графики тока исправной и неисправной изоляции высоковольтного электрооборудования электровоза

При анализе реакции автоматизированной системы технической диагностики на воздействие определенных сигналов или при проектировании процессов обработки заданных сигналов, а также для передачи и обработки аналоговых сигналов на цифровых электронно-вычислительных машинах применяется преобразование сигналов из области времени в область частот. Для этого используется дискретное преобразование Фурье. Функцию $V(t)$, заданную на отрезке $t = 0 \dots t_N$, можно положить периодической, то есть считать $V(t \pm nt_N) = V(t)$, где n – любое целое число, а t_N – период [1, 2]:

$$V(t) = \sum_{k=0}^{\infty} (a_k \cos kwt + b_k \sin kwt). \quad (1)$$

Здесь $a_k = a(kw)$ и $b_k = b(kw)$ образуют комплексный частотный спектр сигнала $V(t)$, то есть $V(kw) = a_k - ib_k$; $W = 2\pi / t_N$ – основная круговая частота (бин – дискретность спектра); k – номер гармоники.

Составляющие спектра определяются преобразованием Фурье:

$$a_0 = \frac{1}{t_N} \int_0^{t_N} V(t) dt;$$

$$a_k = \frac{2}{t_N} \int_0^{t_N} V(t) \cos kwdt; \quad (2)$$

$$b_k = \frac{2}{t_N} \int_0^{t_N} V(t) \sin kwdt.$$

Спектр периодического сигнала является линейчатым и определяется дискретными значениями в точках частот, кратных W . Частота W играет роль масштабного множителя. Для непрерывного сигнала $k = 1 \dots \infty$, то есть спектр является бесконечным.

При исследовании и анализе переходных процессов удобно пользоваться интегралом свертки, который в дискретном виде имеет вид

$$y_m = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} V(k) g(m-k); \quad m = 0 \dots N-1, \quad (3)$$

где $V(k)$ – входной сигнал; $y(m)$ – выходной сигнал; $g(m-k)$ – импульсная переходная функция системы.

Вычисление по формуле (3) является круговой (периодической) сверткой дискретных функций $V(kT)$ и $g(kT)$.

Передающая функция диагностической системы имеет вид $\Phi(\omega) = c(\omega) + id(\omega)$, следовательно, в дискретном виде заменой $\omega = kw$ она получит вид $\Phi(kw) = c_k + id_k$, где $c_k = c(kw)$; $d_k = d(kw)$. Определено, что дискретный выходной сигнал $y(m)$ будет вычисляться обратным дискретным преобразованием Фурье (ДПФ) от произведения спектра сигнала $V(kw)$ и передающей функции системы $\Phi(kw)$ [2]. Обращаясь к (1), определим

$$V(kw)\Phi(kw) = (a_k - ib_k)(c_k + id_k) = a_k c_k + b_k d_k + i(a_k d_k - b_k c_k). \quad (4)$$

Обратное ДПФ в комплексной форме имеет вид

$$y(t) = \sum_{k=0}^{N-1} V(kw)\Phi(kw)e^{ikwt}. \quad (5)$$

Подставляя (4) в (5) и принимая во внимание тождество Эйлера, получим в вещественном виде:

$$y(t) = \sum_{k=0}^{N-1} \{ [a_k c_k + b_k d_k] \cos kwt + [b_k c_k - a_k d_k] \sin kwt \}. \quad (6)$$

В (6) мнимая часть отсутствует из-за того, что относительно средней частоты a_k и c_k являются четными, а b_k и d_k – не-

четными функциями. В общем случае входная последовательность может быть комплексной, тогда в комплексной форме прямое ДПФ, а произведение $V(kw)$ в дискретном виде получит вид:

$$V(kw) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} V(m)e^{-ikwm}, \quad (7)$$

произведение $V(m)e^{-ikwm}$ в дискретном виде:

$$V(m)e^{-ikwm} = [V_1(m) \cos kwm + V_2(m) \sin kwm] - i[V_1(m) \sin kwm - V_2(m) \cos kwm].$$

Тогда изменятся и соотношения для амплитуд гармоник ряда:

$$a_0 = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} V_1(m); \quad b_0 = 0;$$

$$a_k = \frac{2}{N} \sum_{m=0}^{N-1} [V_1(m) \cos kwm + V_2(m) \sin kwm];$$

$$b_k = \frac{2}{N} \sum_{m=0}^{N-1} [V_1(m) \sin kwm - V_2(m) \cos kwm]. \quad (8)$$

Таким образом, на основании полученных формул можно преобразовать форму тока переходного процесса в дискретное преобразование Фурье в виде цифровой кода для дальнейшей обработки на электронно-вычислительной машине и соответственно получить диагностическую информацию об опасных отказах в силовом электрооборудовании электровозов, таких как короткое замыкание в высоковольтной изоляции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гольдберг О.Д. Переходные процессы в электрических машинах и аппаратах и вопросы их проектирования: учеб. пособие для вузов / О.Д. Гольдберг, О.Б. Буль, И.С. Свириденко. М.: Высшая школа, 2001. 512 с.

2. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов / Р. Лайонс. М.: Бином-Пресс, 2009. 656 с.

3. Патент на изобретение № 2274869. Способ контроля электротехнического состояния электрических машин / И.А. Меншиков, А.В. Горелик. Заявл. 01.06.2004; Опубл. 20.04.2006. Бюл. № 11.

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

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

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

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

Статья поступила в редакцию 12.09.13, принята к опубликованию 14.10.13

К СВЕДЕНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

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

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.

УДК 005.6:681.2

**Оценка качества производства основных изделий и узлов ЛБВ
на примере ОАО НПП «АЛМАЗ»**

С.Д. ВОЛКОВА, В.А. ЦАРЕВ

**Evaluation of the quality production of basic units Traveling-Wave Tubes
(with Reference to JSC «ALMAZ»)**

S.D. VOLKOVA, V.A. TSAREV

Рассмотрен вопрос качества производства ламп бегущей волны и их комплектующих посредством статистических методов управления качеством (контрольного листа, диаграммы Исикавы и анализа Паретто) на примере ОАО НПП «АЛМАЗ». Результаты представлены с помощью контрольных карт Шухарта.

Ключевые слова: лампа бегущей волны (ЛБВ), контрольный листок, диаграмма Исикавы, анализ Паретто, контрольная карта Шухарта

Наличие большого количества брака в производстве присуще многим предприятиям, не стало исключением и ОАО НПП «АЛМАЗ». В связи с этим руководством было поручено принять меры по выявлению причин брака производимой продукции, проведению мероприятий по их устранению и общему повышению качества производства.

Применяя статистические методы анализа качества, мы выявляем степень влияния случайных и/или закономерных факторов на показатели качества. Влияние факторов случайного характера является преобладающим, что говорит о том, что технологический процесс статистически управляем и использование статистических методов контроля качества и хода технологических процессов возможно.

Диаграмма Исикавы как выявление факторов, влияющих на конечное качество продукции. Целью построения причинно-

The paper considers the issues of quality related with manufacturing of the travelling-wave tube and its components using statistical methods of quality management (the monitoring log sheet, Isikava chart, or Pareto analysis) as exemplified by JSC «ALMAZ». The research findings are presented using the Shukhart control cards.

Keywords: Traveling-wave tube (TWT), monitoring log sheet, Isikava chart, Pareto analysis, Shukhart control card

следственной диаграммы является проведение систематизации факторов, оказывающих влияние на качество производства ЛБВ. Используя метод «мозгового штурма», можно выявить ряд факторов, влияющих на рассматриваемую проблему. Список факторов был сгруппирован по их естественному родству в группы и подгруппы с различной степенью детализации [1]. На рис. 1 представлена получившаяся причинно-следственная диаграмма.

Указанные факторы объединяются в большие принципиально различающиеся группы: технология, оборудование, персонал, материалы, организация работы. Каждая из групп состоит из нескольких подгрупп: документация, здоровье и т.д. Схема позволяет наглядно показать множество факторов, систематизированных в определенном порядке, что существенно облегчает поиски правильных решений.

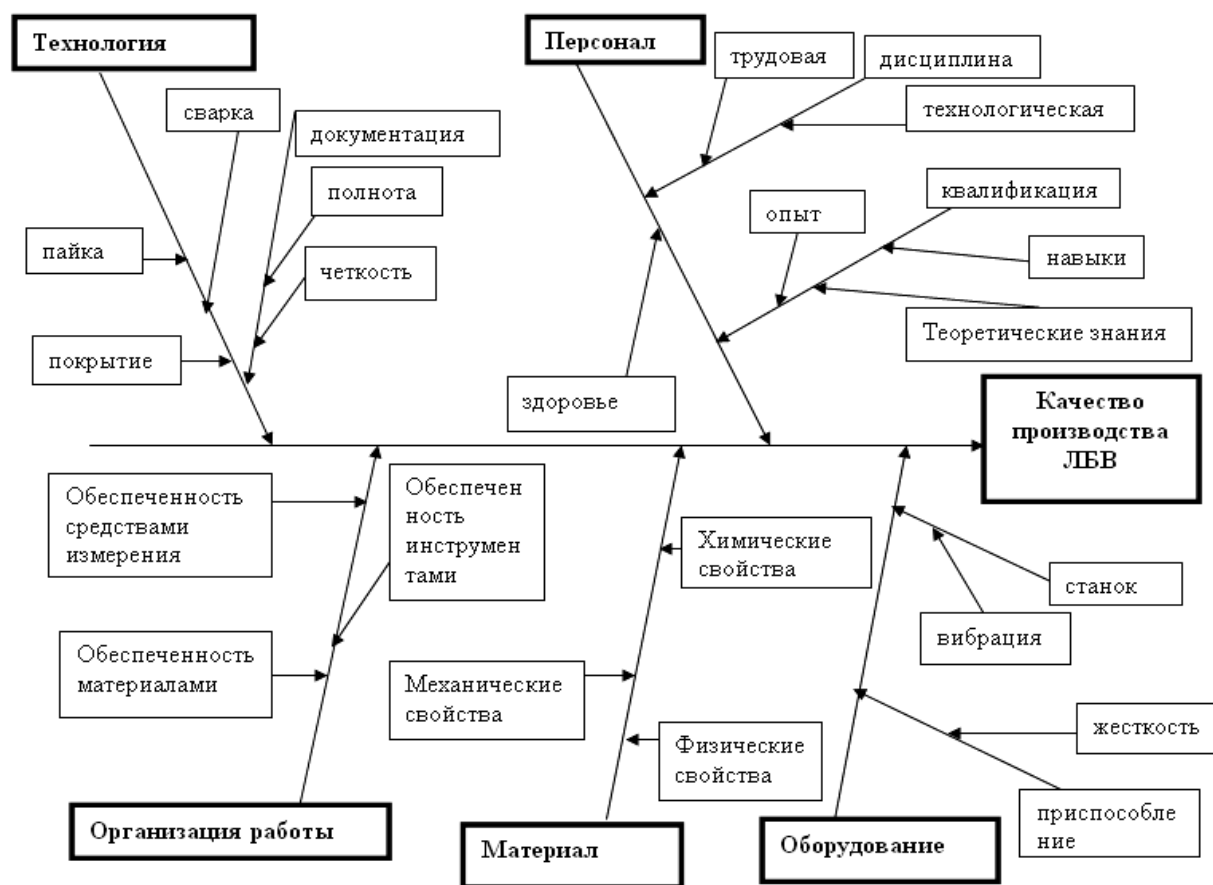


Рис. 1. Причинно-следственная диаграмма Исикавы

Контрольный лист регистрации видов дефектов применяется, если на объектах контроля возможны дефекты различных видов. Хотя с точки зрения отбраковки не важно, по какой причине изделие отбраковано, для управления производством, предупреждения повторения брака эти данные очень важны. Листок этого вида представляет собой бланк с заранее указанными типовыми дефектами (табл. 1).

Всякий раз, когда контролер обнаруживает дефект, он делает в нем пометку. В конце рабочего дня он может быстро подсчитать число и разновидности встретившихся дефектов.

В графе 1 указывается порядковый номер дефекта.

В графе 2 – наименование дефекта.

В графе 3 – результаты контроля, отмечаемые удобным для подсчета образом: в виде черточек (по четыре, перечеркнутые пятой).

В графу 4 вносится общее число дефектов данного вида за время наблюдения m_i .

В графе 5 дается результат вычисления доли (относительного числа) дефектов данного вида, рассчитанного по формуле

$$m_i / \Sigma m_i. \quad (1)$$

Редко встречающиеся нетиповые дефекты объединяются в строку «прочие дефекты». В листке также предусматриваются графы: «Общее число забракованных изделий» и «Общее число проконтролированных изделий». При приемочном контроле возникают большие трудности с оценкой дефектов при отсутствии инструментальных методов контроля. В технологической карте указывается, например: «не допускаются царапины, деформация и пятна». Следовательно, границы приемки и отбраковки оказываются размытыми. В этом случае в технологической карте необходимо привести более подробное объяснение, что является допустимым, а что – нет. Кроме того, на рабочем месте обязательно должны быть контролера эталоны с образцами допустимых и недопустимых дефектов, либо при

проведении операций необходимо присутствие технолога. Просто знание числа дефектов не позволяет принять корректирующие меры. Однако если используется листок подобно этому, то он может дать

важную информацию для совершенствования процесса, поскольку показывает какие виды дефекта встречаются наиболее часто, а какие нет.

Таблица 1

Контрольный лист регистрации видов дефектов

№ дефекта	Вид дефекта	Результат контроля	Число дефектов m_i	Доля дефектов $m_i / \Sigma m_i$
1	2	3	4	5
1	Деформация		3	0,03
2	Пятна		19	0,22
3	Полосы		13	0,16
4	Спилы		11	0,13
5	Не выдержан размер		5	0,06
6	Отслоение покрытия		8	0,09
7	Пористость		7	0,08
8	Проницаемость		9	0,10
9	Некачественный отжиг		4	0,05
10	Прочие дефекты		7	0,08
	Всего дефектов		86	1,00
	Общее число забракованных изделий		63	
	Общее число проконтролированных изделий		176	

Построение диаграммы Парето для выявления основной проблемы, вызывающей нежелательные результаты деятельности. Проблема: катоды плохого качества. Представлены две цели исследования:

1. Определить наиболее часто встречающиеся виды брака в катодах.

2. Определить виды брака, приводящие к наибольшим потерям.

На этапе наблюдений при сборе исходных данных о браке в катодах никаких изменений в технологию и организацию работ не вносится. Организуется сбор данных, получаемых при контроле, путем заполнения контролерами специальных листов регистрации дефектов. В этом листке предусмотрены дополнительные графы:

– графа 6 для коэффициента потерь, представляющего собой отношение затрат на устранение данного вида дефекта к затратам на устранение наиболее «дешевого» по затратам дефекта;

– графа 7 – «вес потерь», в которую вносятся произведения коэффициентов потерь на число дефектов данного вида;

– графа 8, в которой потери от каждого вида дефекта выражаются в относительных единицах.

Контролеру вручается листок, в котором заполнены графы 1 и 2. В процессе контроля он заполняет графу 3, а в конце смены подсчитывает результаты и заполняет графу 4 и подписывает листок.

Дальнейшая обработка результатов наблюдений может производиться по данным, зафиксированным на листке за один день или по результатам нескольких дней. В последнем случае все результаты суммируются за все дни наблюдений.

Последующие расчеты проводятся в следующем порядке:

1. Определяется общее число дефектов суммированием данных в графе 4:

$$3+19+13+11+5+8+7+7+4+9 = 86.$$

2. Определяется доля – относительная частота появления каждого дефекта:

первого дефекта – $3/86 = 0,03$;

второго дефекта – $19/86 = 0,22$ и т.д.

3. В сумме все относительные частоты должны составить 1,0.

4. Результаты заносятся в графу 5.

Эти результаты позволяют решить первую задачу – определить наиболее часто встречающиеся виды дефектов. Далее стро-

ится столбчатая диаграмма, высота столбиков которой соответствует количеству или доле каждого вида дефектов.

Такая диаграмма приведена на рис. 2, где левая вертикальная ось – число дефектов, а правая вертикальная ось представлена в долях: 1,0 соответствует суммарному числу дефектов – 100.

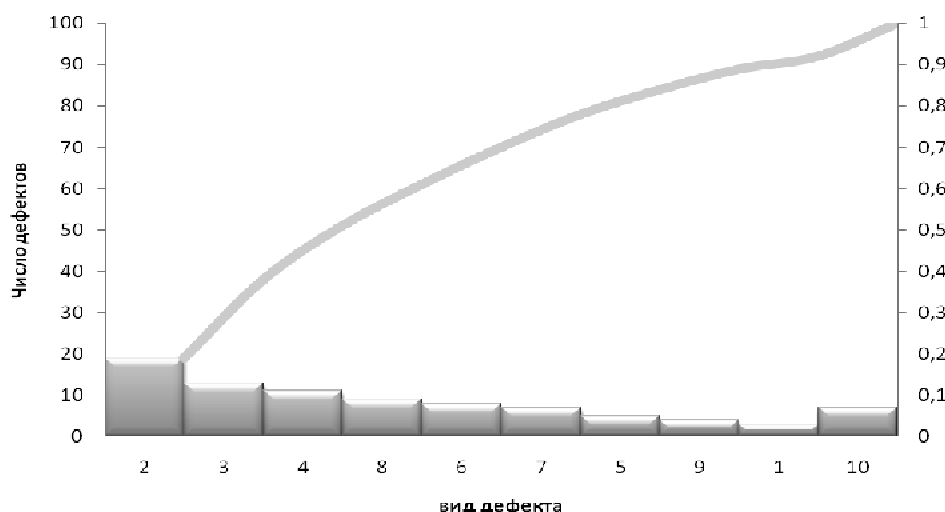


Рис. 2. Диаграмма Парето, отображающая наиболее часто встречающиеся виды дефектов

По полученным данным можно построить кумулятивную кривую, показывающую нарастающим итогом долю первого, второго и так далее дефектов. В данном случае первая точка соответствует доле дефекта № 2 – 0,19, вторая – сумме долей дефектов № 2 и № 3: $0,19 + 0,13 = 0,32$; третья: $0,32 + 0,11 = 0,43$; четвертая: $0,43 + 0,09 = 0,52$ и т.д. Полученные точки соединяются отрезками прямых линий. Напомним, что такая ломаная линия называется полигоном.

Решение второй задачи требует дополнительного анализа дефектов с точки зрения оценки их важности или опасности, или затрат на устранение дефектов. Коэффициенты, характеризующие значимость, вес каждого дефекта, получаются на основе или экономических расчетов, или инженерного анализа, а в некоторых случаях – методом экспертных оценок. В данном случае в качестве критерия, характеризующего значимость каждого вида дефектов, принята трудоемкость их устранения. В результа-

те анализа установлено, что наименьшие трудозатраты требуются для устранения дефектов № 3 и № 4.

Устранение дефектов № 2, № 6 и № 9 требует в 2 раза больших трудозатрат, трудозатраты на устранение дефектов № 1 и № 5 – в 4 раза больше, а дефектов № 7 и № 8 – в 8 раз больше, чем для дефектов № 3 и № 4. Эти коэффициенты определяют значимость каждого вида дефекта. Они и вносятся в графу «Коэффициент потерь» (табл. 2).

На эти коэффициенты умножаются данные из графы «Число дефектов». Результаты вносятся в графу «Вес потерь»:

– для дефекта № 1: $3 \times 6 = 18$;

– для дефекта № 2: $19 \times 4 = 76$ и т.д.

Полученные числа суммируются – сумма равна 355. На эту сумму делится вес каждого вида дефекта, и получаются значения относительных потерь или доли потерь, связанные с каждым из видов дефектов. Эти величины приведены в графе «Доли потерь». Их сумма равна единице. По по-

лученным результатам строится диаграмма Парето, которая в этом случае отражает потери, вызываемые различными видами дефектов. Эта диаграмма приведена на рис. 3. Из нее следует, что наибольшие потери связаны с дефектами № 2. На втором месте дефекты № 8 и № 7 и т.д.

Построим диаграмму Парето, отражающую зависимость извлечения причин 80/20, чтобы минимизировать проблему на 80%, устранив причину, вызывающую проблемы, на 20%. Данная диаграмма представлена на рис. 4.

Проанализировав полученную диаграмму, можно увидеть, что в 20% проблем входит достаточно много видов дефектов: пятна, полосы, спилы, проницаемость, отслоение покрытия, пористость. В первую очередь необходимо жестко контролировать их появление. Необходимо подвергнуть тщательному анализу данные разновидности дефектов, чтобы определить причины их появления и провести корректирующие мероприятия [2].

Таблица 2

Потери от различных видов дефектов

№ дефекта	Вид дефекта	Число дефектов	Коэффициент потерь	Вес потерь	Доля потерь
1	Деформация	3	6	18	0,050
2	Пятна	19	4	76	0,214
3	Полосы	13	2	26	0,073
4	Спилы	11	2	22	0,062
5	Не выдержан размер	5	6	30	0,085
6	Отслоение покрытия	8	4	32	0,090
7	Пористость	7	8	56	0,158
8	Проницаемость	9	8	72	0,203
9	Некачественный отжиг	4	4	16	0,045
10	Прочие дефекты	7	1	7	0,020
		86		355	1

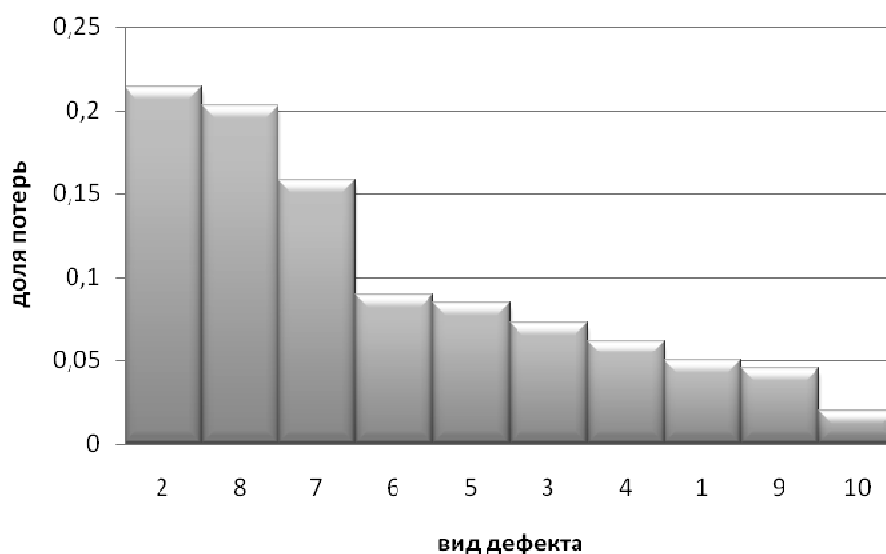


Рис. 3. Диаграмма Парето, отображающая потери от различных видов дефектов

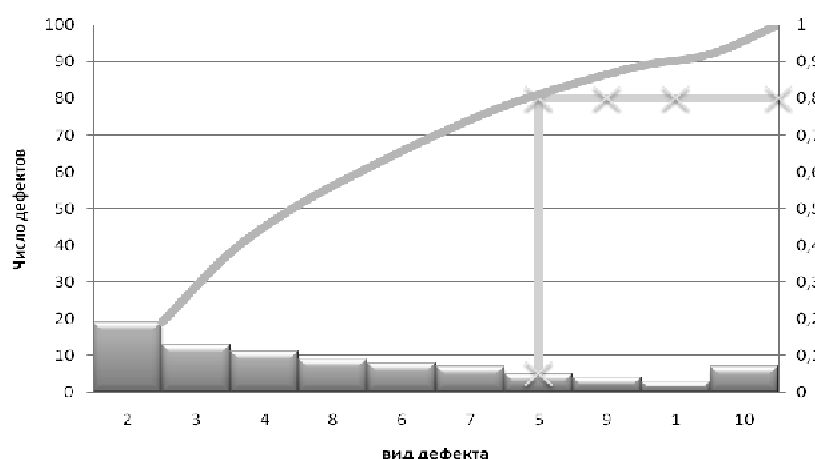


Рис. 4. Диаграмма Парето, отображающая проблемы, которые необходимо устранить

Результат применения инструментов контроля качества посредством построения контрольных карт. Проведя ряд мероприятий, направленных на выявление причин брака, их устранение и повышение качества выпускаемой продукции в целом посредством применения инструментов контроля качества, получили увеличение выпуска бездефектных изделий. Дальнейшие результаты будут

представлены также с помощью инструментов качества – контрольных карт Шухарта.

Контрольной картой индивидуальных значений разбираем ситуацию с одним из особо контролируемых параметров качества производства ЛБВ- τ_{20} , результаты которых позволят судить о готовности прибора к испытаниям.

Таблица 3

Таблица значений для построения X-карты

Порядковый номер измерения, n	Значение τ_{20} , X_i	Скольльзящий размах, R_i
1	70	—
2	73	3
3	70	3
4	73	3
5	72	1
6	60	12
7	77	17
8	75	2
9	70	5
10	85	15
11	75	10
12	70	5
13	75	5
14	77	2
15	79	2
16	78	1
17	65	13
18	81	16
19	70	11
20	78	8
	$\Sigma X_i = 1473$	$\Sigma R_i = 134$

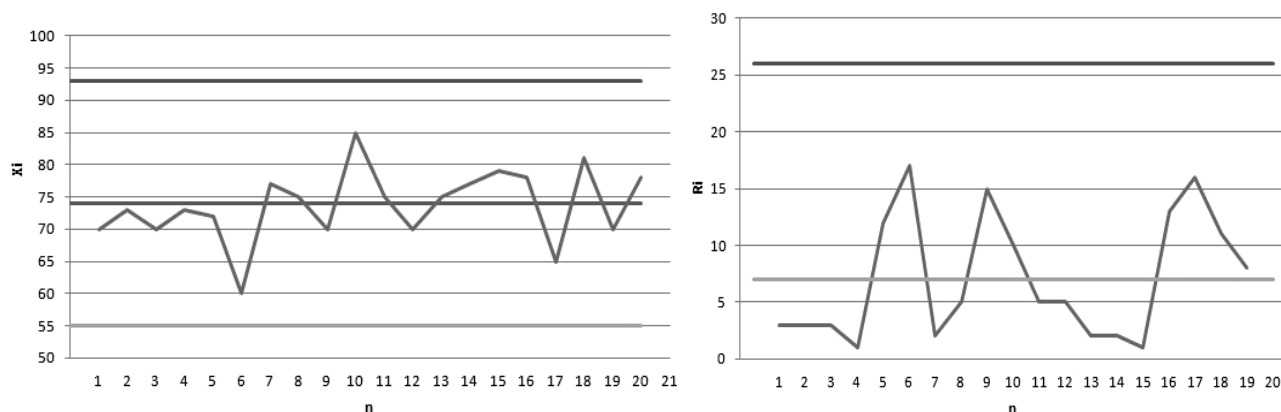


Рис. 5. Контрольная карта индивидуальных значений – X-карта (слева) и контрольная карта размахов – R-карта (справа)

Объектом исследования является параметр τ_{20} . Отражаться в контрольной карте будут только значения, допустимые по технологическому решению. Всего в ходе исследования таких параметров оказалось 20. Зафиксированные данные представлены в табл. 3.

Вычисляем среднее значение τ_{20} по формуле:

$$X_i = \frac{\sum X_i}{n} = \frac{1473}{20} \approx 74. \quad (2)$$

и средний скользящий размах по формуле:

$$R_s = \frac{134}{19} \approx 7,05. \quad (3)$$

Рассчитаем контрольные пределы и средние линии для X-карты по следующим формулам:

X карта:

$$UCL = x + 2,66 \cdot R_s = 74 + 2,66 \cdot 7,05 \approx 93; \quad (4)$$

$$LCL = x - 2,66 \cdot R_s = 74 - 2,66 \cdot 7,05 \approx 55; \quad (5)$$

$$CL = x = 74. \quad (6)$$

Rs карта:

$$\begin{aligned} UCL &= R_s + 2,66 \cdot R_s = \\ &= 7,05 + 2,66 \cdot 7,05 = 25,803; \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} LCL &= R_s - 2,66 \cdot R_s = \\ &= 7,05 - 2,66 \cdot 7,05 = -11,703; \end{aligned} \quad (8)$$

$$CL = R_s = 7,05. \quad (9)$$

Нанесём полученные контрольные границы и значения параметра на контрольную карту. Нижняя контрольная граница для R не наносится. Данная контрольная карта представлена на рис. 5.

Из X-карты видно, что ни одно из значений измеряемой величины не вышло за пределы регулирования и даже не приблизилось к ним. Из этого можно сделать вывод, что приборы с одинаковым «успехом» отправятся на дальнейшие испытания. Тоже можно сказать и о графике скользящего размаха, который хоть и имеет несколько резких перепадов, но не указывает на явные тенденции процесса. Это позволяет говорить о хорошем качестве катодов и правильности выполнения технологии отковки приборов [2].

Для НПЦ «Электронные системы» контроль качества – это одна из основных функций в процессе управления качеством. Значение контроля заключается в том, что он позволяет вовремя выявить ошибки, чтобы затем оперативно исправить их с минимальными потерями. Контроль качества осуществляется путем сравнения запланированного показателя качества с действительным его значением, а само качество определяет собой хронически неустойчивый объект, требующий контроля.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Мишин В.М.** Управление качеством: учебник / В.М. Мишин. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2005. 463 с.

2. **Магеп В.Е.** Управление качеством: учеб. пособие / В.Е. Магеп. М.: ИНФРА, 2012. 176 с.

Волкова Светлана Дмитриевна – аспирант кафедры «Электронные приборы и устройства» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Svetlana D. Volkova – Postgraduate, Department of Electronics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Царев Владислав Алексеевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Электронные приборы и устройства» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Vladislav A. Tsarev – Dr. Sc., Professor, Department of Electronics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 16.09.13, принята к опубликованию 15.10.13

Кафедры энергетического факультета

Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Кафедра «Автоматизированные электротехнологические установки и системы». Заведующий кафедрой к.т.н., доцент Огурцов Константин Николаевич, тел. 8(8452)99-87-63, e-mail: aeu@sstu.ru.

Кафедра «Электротехника и электроника». Заведующий кафедрой д.т.н., профессор Сивяков Борис Константинович, тел. 8(8452)99-87-66, e-mail: ete@sstu.ru.

Кафедра «Электроснабжение промышленных предприятий». Заведующий кафедрой д.т.н., профессор Артюхов Иван Иванович, тел. 8(8452)99-87-64, e-mail: erp@sstu.ru.

Кафедра «Теплоэнергетика». Заведующий кафедрой, декан энергетического факультета, к.т.н., доцент Антропов Павел Георгиевич, тел. 8(8452)99-87-47, e-mail: termo@sstu.ru.

Кафедра «Тепловые и атомные электрические станции». Заведующий кафедрой Аминов Рашид Зарифович, тел. 8(8452)99-87-82, e-mail: aminov@sstu.ru.

Кафедра «Промышленная теплотехника». Заведующий кафедрой Семенов Борис Александрович, тел. 8(8452)99-87-49, e-mail: pt@sstu.ru.

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 620.9:662.6.001.57

Управление потреблением энергетических ресурсов путем режимной оптимизации привода технологических нагнетателей

И.В. ДОЛОТОВСКИЙ, Е.А. ЛАРИН, Н.В. ДОЛОТОВСКАЯ

Managing Consumption Energy Resources Using Regime Optimization of the Technological Supercharger Drive

I.V. DOLOTOVSKIY, E.A. LARIN, N.V. DOLOTOVSKAYA

Разработаны методические положения режимной оптимизации привода технологических нагнетателей энергоемких предприятий переработки углеводородного сырья. Полученные результаты позволяют разработать стратегию развития энергетического комплекса предприятий во взаимосвязи с внешними энергогенерирующими системами.

Ключевые слова: энергетический комплекс, энергетические ресурсы, управление, оптимизация

В структуру современных энергоемких предприятий нефтехимии, газо- и нефтепереработки (ПНХГНП) входят технологические нагнетатели газопазных потоков – компрессоры, газодувки, воздуходувки, имеющие в связи со специфическими требованиями к надежности энергообеспечения и экологической безопасности стопроцентное резервирование и альтернативный привод (электродвигатели и паровые или газовые турбины). Поскольку оборудование технологической системы (ТС) и энергетического комплекса (ЭК) ПНХГНП взаимосвязано по материальным и энергетическим потокам производственными циклами и потребляет различные энергетические ресурсы (ЭР) как от внешних, так и от внутренних источников, формирование режимных карт его загрузки для расчетного интервала времени осуществляется в соответствии с логической схемой (рис. 1) об-

The article presents new methods of regime optimization developed for technological supercharger drives in order to process hydrocarbon raw materials at power-consuming plants. The received results can be used to create a strategy for developing power complex enterprises in interrelation with external power generation systems.

Keywords: power complex, energy resources, management, optimization

мена информацией ТС, ЭК, системы управления (СУ) технологическими процессами ПНХГНП, внешней системой энергообеспечения (ЭС). При этом качественной формулировке цели управления потреблением ЭР отвечает многокритериальная задача оптимизации динамического объекта, поскольку ЭК ПНХГНП с самого начала его жизненного цикла ставится несколько целей: максимизировать системную эффективность (целесообразность ЭК ПНХГНП в топливно-энергетическом комплексе региона) с одновременной минимизацией потребления ЭР от внешних источников.

В качестве базового принципа методологии оптимизации и управления потреблением ЭР нами принят агрегативно-декомпозиционный подход, реализуемый в два этапа: последовательная декомпозиция ПНХГНП и выполняемых им целей и функций и агрегирование (синтез) на соот-

ветствующих иерархических уровнях детализации оптимальных вариантов ЭК и режимов его эксплуатации во взаимосвязи с ТС ПНХГНП (далее – объекта).

Блочно-иерархическая структура объекта представлена древовидной формой с внутренними взаимосвязями на I и II уровнях – ТС–ЭК и производств / систем (рис. 2).

Синтез оптимальных вариантов объекта и режимов эксплуатации выполнен на основе критерия оптимальности R , который в общем виде представлен в виде функции входных X , выходных Y и управляющих U параметров за расчетный период времени t .

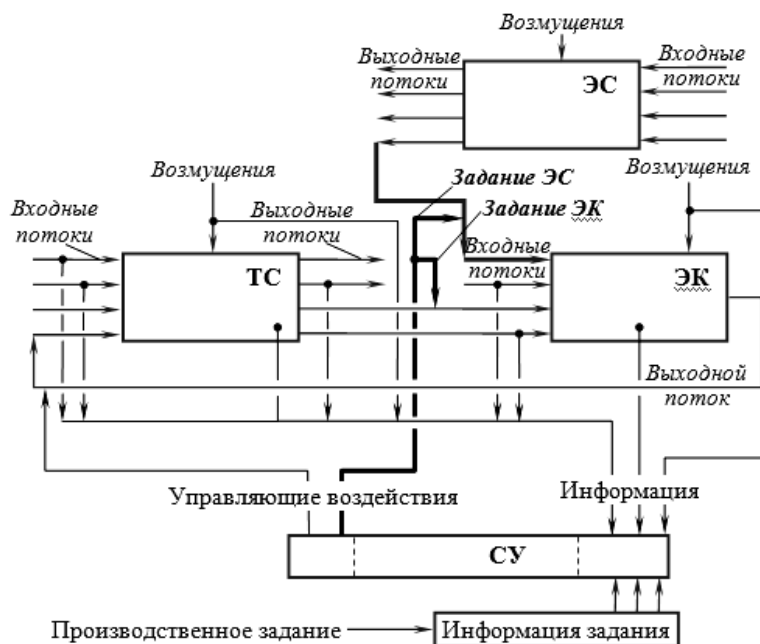


Рис. 1. Логическая схема управления потреблением ЭР

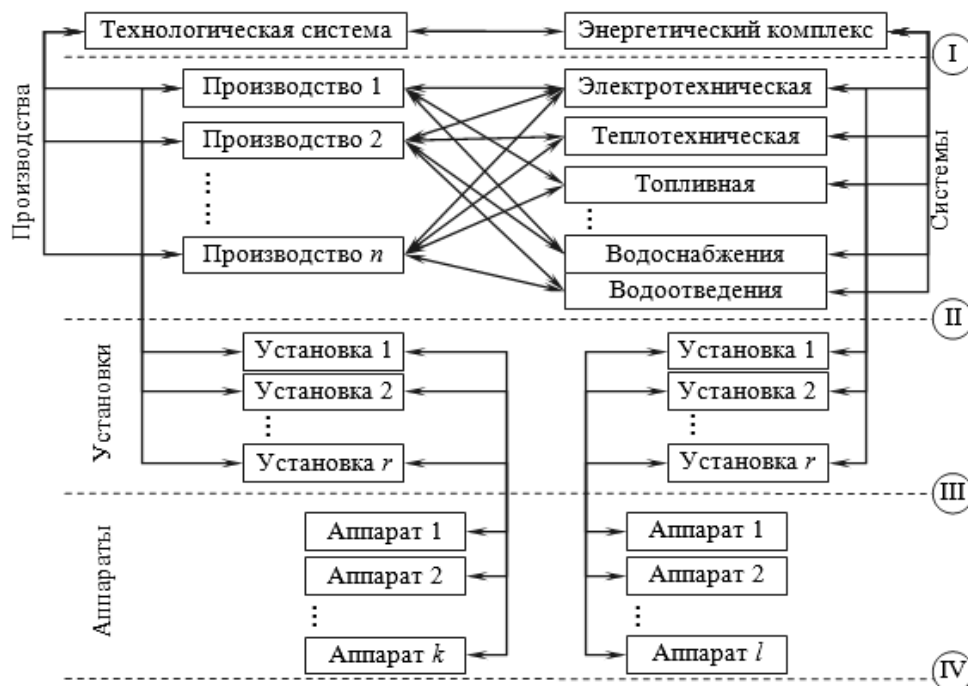


Рис. 2. Блочно-иерархическая структура ПНХГНП:
I-IV – иерархические уровни предприятия, производств, установок, аппаратов

$$R = \int_0^t R(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{U}) dt; \quad (1)$$

$$\bar{X} = (x_1, x_2, \dots, x_a); \quad (2)$$

$$\bar{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_b); \quad (3)$$

$$\bar{U} = (u_1, u_2, \dots, u_d). \quad (4)$$

Зависимость выходных параметров от входных и управляющих представлена в виде функции

$$\bar{Y} = F(\bar{X}, \bar{U}), \quad (5)$$

в которой F рассматривается как вектор-функция множества математических моделей элементов объекта $F = \{f_1, \dots, f_\Phi, \dots, f_\Phi\}$ на соответствующих уровнях иерархии (I-IV на рис. 2).

Частными случаями множества функций F являются следующие отображения:

$$f_{\varphi, \text{тс}, m} : (A_{\text{тс}, m}^{k, \varphi}, \text{ТП}_{\text{тс}, m}^{j, \varphi}) \rightarrow \Pi_{\text{тс}, m}^{n, \varphi}; \quad (6)$$

$$f_{\varphi, \text{эк}, m} : (A_{\text{эк}, m}^{l, \varphi}, \text{ТП}_{\text{эк}, m}^{i, \varphi}) \rightarrow \Pi_{\text{эк}, m}^{m, \varphi}, \quad (7)$$

где $f_{\varphi, \text{тс}, m}$, $f_{\varphi, \text{эк}, m}$ – множества математических моделей аппаратов A и технологических процессов ТП с участием m -го вида ЭР $(A_{\text{тс}, m}^{k, \varphi}, \text{ТП}_{\text{тс}, m}^{j, \varphi}, A_{\text{эк}, m}^{l, \varphi}, \text{ТП}_{\text{эк}, m}^{i, \varphi})$ в соответствующем описании производств $\Pi_{\text{тс}, m}^{n, \varphi}$ и $\Pi_{\text{эк}, m}^{m, \varphi}$ на пространстве технологических $(\Omega_{\text{ТС}}, \Omega_{\text{ЭК}})$, конструктивных $(Z_{\text{ТС}}, Z_{\text{ЭК}})$ характеристик ТС и ЭК, экологических/климатических S , экономических C факторов для m -го вида ЭР.

Математическая модель множества функций F (отображений $f_{(1 \dots \Phi) \text{тс}, (1 \dots M)}$ и $f_{(1 \dots \Phi) \text{эк}, (1 \dots M)}$ и $\Pi_{\text{тс}, (1 \dots M)}^{(1 \dots M), (1 \dots \Phi)}$ и $\Pi_{\text{эк}, (1 \dots M)}^{(1 \dots M), (1 \dots \Phi)}$) в общем виде представлена логически законченными блоками, основными из которых являются блоки: расчета энерготехнологического баланса, гидродинамики и свойств материальных потоков и ЭР, кинетики процессов; база данных параметров и констант по аппаратам и процессам; методические положения учета, нормирования, планирования,

регулирования и оптимизации генерации и потребления ЭР; результаты энергетического аудита и экспериментальные данные.

В результате реализации двух этапов оптимизации и управления потреблением ЭР решены следующие основные взаимосвязанные задачи:

- разработаны операционно-описательные и иконографические модели объекта; идентифицированы внутренние и внешние связи между элементами (производствами, подсистемами, установками, аппаратами) по степени значимости; выделены детерминирующие элементы и связи;

- разработана методология анализа локальной и системной энергетической эффективности и математические модели ее расчета для компонентов и объекта в целом;

- проведены экспериментальные исследования в рамках энергетического аудита крупных энергоемких предприятий – Астраханского газоперерабатывающего завода (ГПЗ), структурных подразделений ООО «Газпром переработка»: Сосногорского ГПЗ, Ново-Уренгойского завода по подготовке конденсата к транспорту, Сургутского завода стабилизации конденсата, Вуктыльского газопромыслового управления;

- разработаны рациональные алгоритмы расчета, программное обеспечение созданных информационно-аналитических моделей [1] и реляционная база данных (БД) объекта;

- создана информационно-аналитическая система нормирования и оптимизации выработки и потребления топлива и энергоносителей на предприятии (ИАС ТЭР) [2] для определения оптимальных параметров подсистем ЭК и объекта в целом на основе имитационного моделирования;

- проведена успешная экспериментальная апробация ИАС ТЭР в структурных подразделениях Астраханского ГПЗ (АГПЗ).

С использованием ИАС ТЭР для АГПЗ разработан комплекс технических решений по повышению энергетической эффективности ЭК. В частности, выполнена оптимизация режимов эксплуатации нагнетательного оборудования производства серы и установок компримирования товарного га-

за, имеющего альтернативный привод (электродвигатели и паровые турбины), в зависимости от внешних факторов, влияющих на эффективность этих установок:

- коэффициента загрузки оборудования производства серы k_z ;
- степени конверсии сероводорода X_S ;
- тарифов на электрическую $Ц_{\mathcal{E}}$ и тепловую $Ц_Q$ энергию.

Численный эксперимент с использованием ИАС ТЭР проводился для условия 100, 90, 70% загрузки всех установок производства серы и осушки газа и семи режимов, отличающихся количеством работающего нагнетательного оборудования установок.

Эффективность рассмотренных установок по удельной энергоёмкости, отнесенной к единице переработанного сырья (отсепарированного газа), показана на рис. 3. Технико-экономический анализ выполнен по критерию эксплуатационных затрат (рис. 4). Анализ полученных результатов показывает, что при уменьшении коэффициента загрузки на 40% оптимальная мощность электропривода должна быть увеличена почти в два раза. Аналогичный режим по мощности подключаемого электропривода должен поддерживаться и в условиях снижения степени конверсии сероводорода до 85% от номинальной величины (линия 5 на рис. 4).

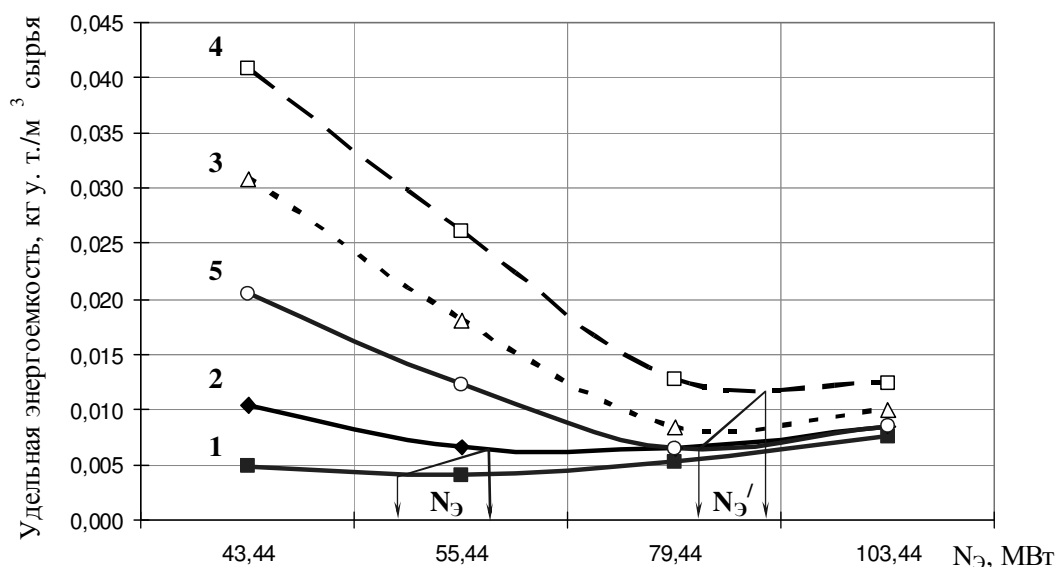


Рис. 3. Оптимизация мощности электропривода по удельной энергоёмкости перерабатываемого газа:
1-4 – $k_z = 1,0; 0,9; 0,7; 0,6$ при $X_S = X_{ном}$; 5 – $k_z = 0,9$ при $X_S = 0,85X_{ном}$.

На рис. 5 показаны зависимости эксплуатационных затрат на ЭР (электроэнергию $И_{\mathcal{E}}$, тепловую энергию $И_T$, суммарных $И_{\Sigma}$) в рассматриваемой системе от мощности подключаемого альтернативного привода установок и режимов эксплуатации пароперегревателей в производстве серы.

Анализ зависимостей на рис. 5 а показывает, что рациональный диапазон подключаемой мощности электропривода равен 45-52 МВт при эксплуатации пароперегревателей (П/П) производства серы с впрыском парового конденсата в пароохладители. В настоящее время эксплуатация оборудования установок осуществляется с

суммарной мощностью подключенного электропривода $N_{\mathcal{E}} = 55,44$ МВт. Такой режим эксплуатации оборудования близок к оптимальному по критерию эксплуатационных затрат только в условиях отсутствия впрыска парового конденсата в пароперегреватели (рис. 5 б).

Сопоставление зависимостей на рис. 4 показывает, что по экономическим показателям эффективности энергоиспользования в системе мощность подключаемого электропривода действующих установок 55,44 МВт обеспечивает оптимальное потребление ЭР только для варианта эксплуатации с максимальным коэффициентом за-

грузки оборудования и номинальной степени конверсии сероводорода.

Аналогичные выводы о рациональной мощности подключаемого электропривода можно сделать при сопоставлении вариантов по удельному потреблению ТЭР на 1 м³ перерабатываемой газоконденсатной смеси (рис. 6).

Минимальное удельное потребление ЭР при эксплуатируемой в настоящее время мощности электропривода 55,44 МВт соответствует расчетному режиму установок производства серы ($k_3 = 1,0$; $X_S = X_{ном}$). Для остальных режимов оптимум $N_{Э}$ смещается в диапазон 65-90 МВт.

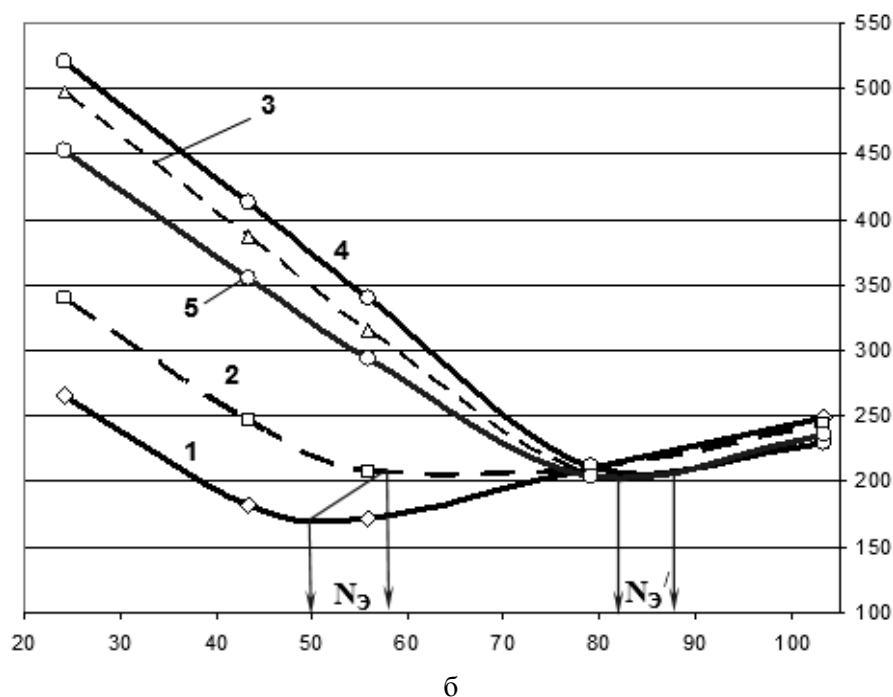
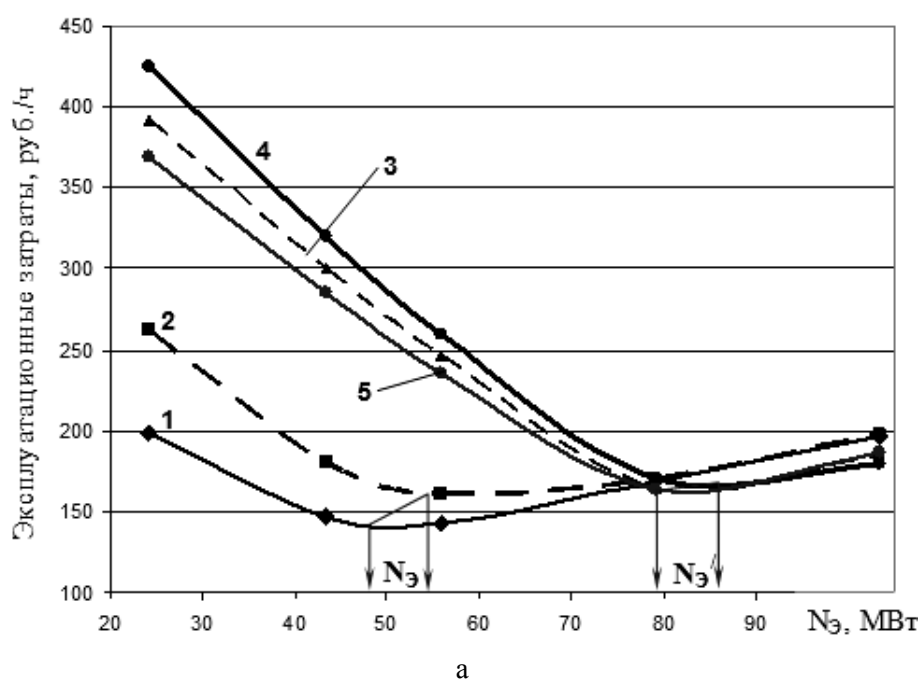


Рис. 4. Зависимость эксплуатационных затрат в системе от мощности электропривода:
а – $C_{Э} = 2,28$ руб./кВт·ч, $C_{О} = 327,6$ руб./ГДж; б – $C_{Э} = 3,84$ руб./кВт·ч, $C_{О} = 554,7$ руб./ГДж
(1-5 – то же, что на рис. 3)

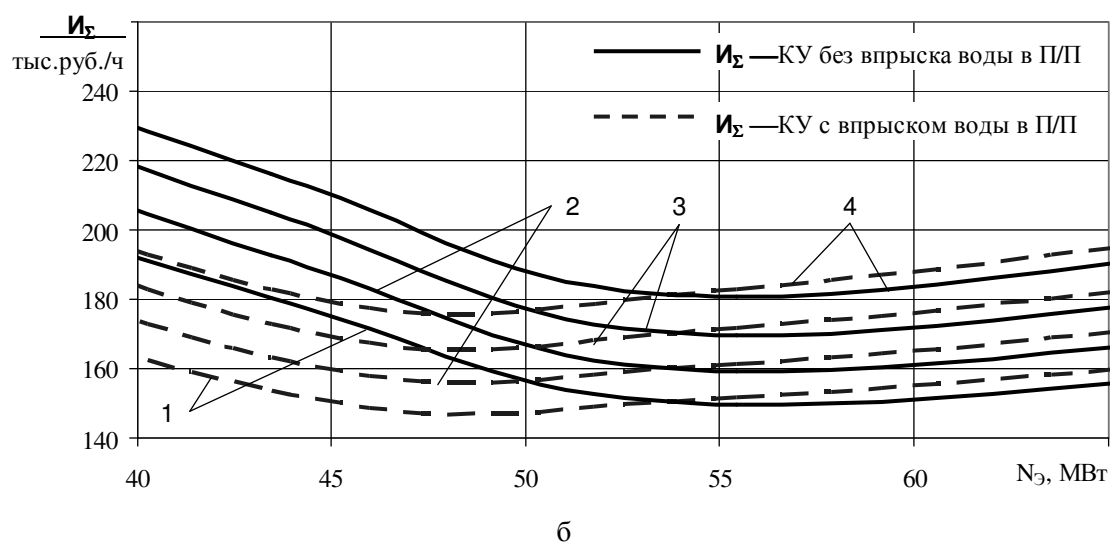
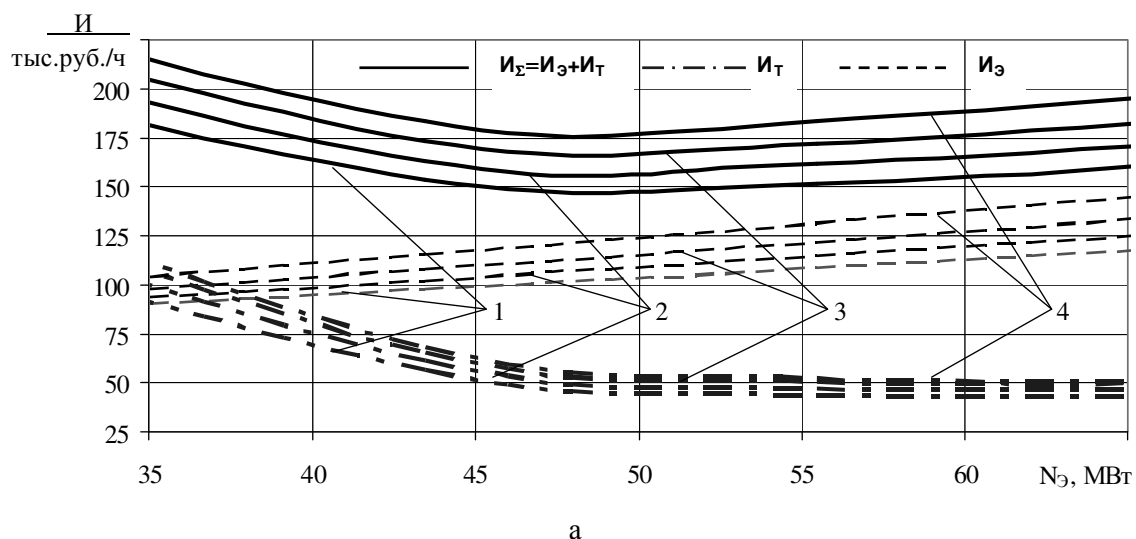


Рис. 5. Зависимость эксплуатационных затрат от мощности подключаемого электропривода для различных цен на энергоносители: а – пароперегреватель с впрыском воды; б – два режима работы пароперегревателя (1-5 – то же, что на рис. 3)

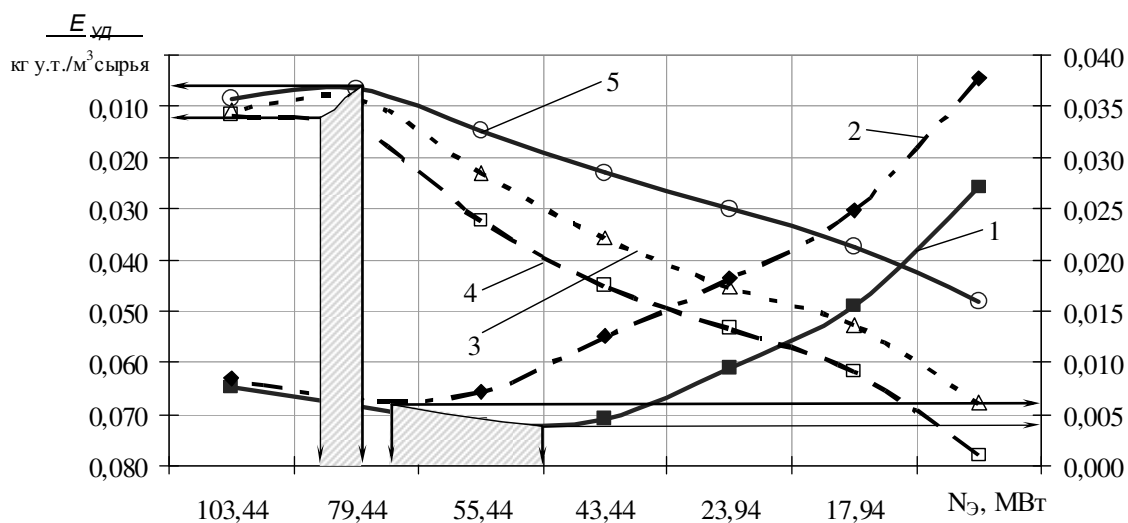


Рис. 6. Зависимости удельного потребления ТЭР от мощности подключаемого электропривода для различных k_s и X_s (1-5 – то же, что на рис. 3)

Анализ результатов оптимизации мощности электропривода нагнетательного оборудования производства серы и установок компримирования товарного газа по удельной энергоемкости и эксплуатационным затратам показал, что в реальных режимах эксплуатации оборудования при $k_3 < (0,9 \dots 1,0)$ мощность электропривода должна быть в 1,3-1,7 раза больше по сравнению с функционирующей в настоящее время, которая соответствует номинальному значению коэффициента загрузки: $N'_3 = (1,3 \div 1,7) N_3$.

Таким образом, по всем показателям энергетической эффективности данного элемента ЭК в реальных режимах эксплуатации оборудования количество включаемого электропривода должно быть больше по сравнению с функционирующим в настоящее время.

Полученные результаты являются не только основой для формирования задания внешней системе энергоснабжения, обеспечивающей предприятие электрической и тепловой энергией, но и позволяют разработать стратегию развития ЭК ПНХГНП во взаимосвязи с внешними энергогенерирующими системами. Поскольку для многих действующих объектов включение дополнительного (сверхлимитного) электропривода сопряжено с проблемами энергообеспечения регионов, основными направлениями повышения эффективности энергетических комплексов являются решения по созданию собственных источников выработки электрической и тепловой энергии и максимальное использование внутренних ресурсов для энергообеспечения технологических процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Система «Энергоресурс»: программа для ЭВМ № 2010615353 / Е.А. Ларин, И.В. Долотовский, Н.В. Долотовская. № 2010613798; заявл. 29.06.10; зарегистр. 20.08.10.

2. Патент № 2465639 РФ, МПК G06F 17/00. Информационно-аналитическая

система нормирования и оптимизации выработки и потребления топлива и энергоносителей на предприятии / И.В. Долотовский, Е.А. Ларин, Н.В. Долотовская. № 2011147445; заявл. 22.11.2011; опубл. 27.10.2012, Бюл. № 30.

Долотовский Игорь Владимирович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник ПНИЛ ТЭУ и СЭ кафедры «Теплоэнергетика» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Ларин Евгений Александрович – кандидат технических наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Долотовская Надежда Васильевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная теплотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Igor V. Dolotovskiy – Ph.D., Senior Researcher: Thermal Research Laboratory at Power Plants and Electricity Supply Systems, Department of Power Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Evgeny A. Larin – Ph.D., Professor, Department of Power Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov.

Nadezhda V. Dolotovskaya – Ph.D., Associate Professor, Department of Heat Process Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 18.09.13, принята к опубликованию 16.10.13

Влияние автоматического регулирования на возникновение температурных волн в полугораниченном теле

И.Н. АНТОНОВ, В.С. АЛЕКСЕЕВ

Impact of Automatic Control on the Emergence of Temperature Waves in a Semi-Infinite Object

I.N. ANTONOV, V.S. ALEKSEYEV

В статье рассматривается влияние двухпозиционного регулирования процесса нагрева полугораниченного тела в электрической печи сопротивления на распределение температурного поля по глубине объекта.

Ключевые слова: температурная волна, двухпозиционное регулирование, электрическая печь сопротивления, полугораниченное тело, ряд Фурье, гармонический анализ

Особенностью теплообмена при периодическом тепловом воздействии является возникновение температурных волн. Эти волны широко применяются на практике при решении задач теплоустойчивости, термостатирования, определении теплофизических свойств материалов [1].

Предположим, что поверхность полугораниченного тела подвержена тепловому воздействию окружающей среды, изменяющемуся во времени по периодическому закону. Тогда и температура тела через некоторое время будет изменяться во времени с той же частотой, что и температура среды, отставая от нее по фазе и отличаясь по амплитуде, при условии, что теплофизические свойства в процессе теплообмена остаются неизменными.

Рассмотрим нагрев полугораниченного тела в электрической печи сопротивления. Как правило, распределение температуры по глубине тела находится при постоянной температуре печи. Однако в таких печах в большинстве случаев поддержание температуры производится методом двухпозиционного регулирования, то есть

The article examines the impact of two-position control heating process of a semi-infinite body in the electric resistance furnace on the temperature distribution across the facility depth.

Keywords: temperature wave, two-position control, electric resistance furnace, semi-infinite facility, Fourier series, Fourier analysis

температура окружающей среды представляет собой гармонические колебания [2].

В идеальном случае температура окружающей среды, а, следовательно, и температура поверхности тела должны изменяться по периодическому закону:

$$\vartheta_n = T_c - T_n = T_{mn} \cos \omega t, \quad (1)$$

где T_c – температура среды, К; T_n – средняя температура поверхности тела, К; T_{mn} – амплитуда изменения температуры на поверхности, К; $\omega = \frac{2\pi}{T_0}$ – циклическая частота колебания температуры, рад/с; T_0 – период колебания, с.

Таким образом, решение дифференциального уравнения теплопроводности для полугораниченного тела показывает распределение температуры по глубине тела, которое имеет вид [3]:

$$\vartheta = \frac{T(x, t) - T_n}{T_{mn}} = e^{-kx} \cos\left(\frac{2\pi t}{T_0} - kx\right), \quad (2)$$

где $k = \sqrt{\frac{\pi}{aT_0}}$ – коэффициент затухания;

a – коэффициент температуропроводности тела, $\text{м}^2/\text{с}$.

Проанализируем это решение. В начале процесса на температурное поле тела будет оказывать влияние начальное распределение температуры. Затем спустя определенный промежуток времени наступает стационарное периодическое состояние, характеризующееся тем, что температура в любой точке тела совершает гармоническое колебание с постепенно уменьшающейся амплитудой по мере удаления от поверхности тела (устанавливается периодический поток теплоты стационарного типа). Уменьшение амплитуды с глубиной показано на рис. 1.

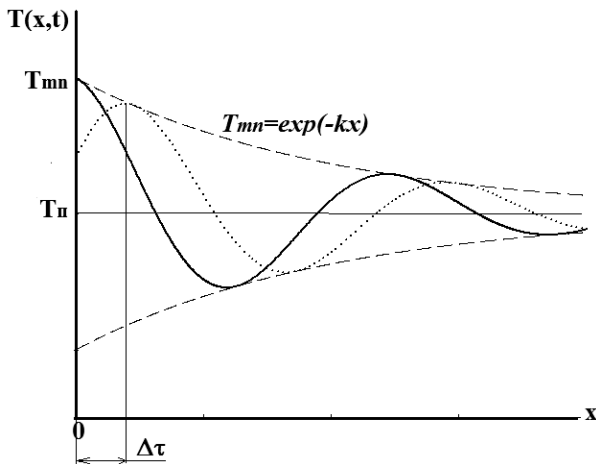


Рис. 1. Изменение температурного поля по глубине тела при различных моментах времени

На поверхности тела температура принимает среднее значение T_n , когда $\cos\left(\frac{2\pi}{T_0}t\right) = 0$, т.е. при $\tau = \frac{T_0}{4}$. На глубине x температура принимает значение T_n , когда $\cos\left(\frac{2\pi}{T_0}t - \sqrt{\frac{\pi}{aT_0}}x\right) = 0$, или в момент времени

$$\tau_x = \frac{T_0}{4} + \frac{1}{2}\sqrt{\frac{T_0}{\pi a}}x. \quad (3)$$

$$T(x, t) = T_{\text{зад}} + \frac{8\Delta T_{\text{зад}}}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{(2n-1)^2} \exp\left(-\sqrt{\frac{(2n-1)\pi}{aT_0}}x\right) \cos\left((2n-1)\left(\frac{2\pi t}{T_0} - \frac{\pi}{2} - \sqrt{\frac{(2n-1)\pi}{aT_0}}x\right)\right). \quad (6)$$

Этот момент наступает позднее, чем на поверхности тела, на промежуток времени

$$\Delta\tau = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{T_0}{\pi a}}x, \quad (4)$$

который носит название время запаздывания температурной волны [3].

Реальное изменение температуры окружающей среды в печах сопротивления в силу особенностей двухпозиционного регулирования подчиняется периодическому несинусоидальному закону (рис. 2).

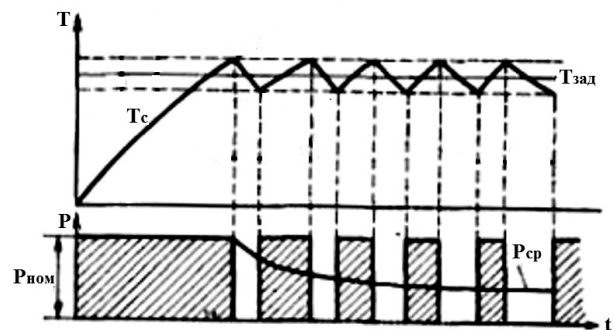


Рис. 2. Автоматическое регулирование процесса нагрева в печи сопротивления

Сделаем следующие предположения:

- в системе «регулятор – печь» отсутствует динамическое запаздывание;
- температура окружающей среды в печи достигла заданного значения;
- изменение температуры окружающей среды имеет «пилообразный» вид;
- коэффициент теплоотдачи с поверхности тела $\alpha \rightarrow \infty$

Тогда температуру поверхности тела можно представить в виде ряда Фурье [4]:

$$T_n(\omega t) = T_{\text{зад}} + \frac{8\Delta T_{\text{зад}}}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{(2n-1)^2} \cos\left[(2n-1)\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)\right]. \quad (5)$$

Решая уравнение теплопроводности, используя граничное условие (5) и принимая во внимание (2), получаем распределение температуры по глубине тела:

Как видно из рис. 3, двухпозиционное регулирование температуры печи искажает температурное поле тела за счет появления высших гармоник, что может негативно повлиять на технологический процесс в целом.

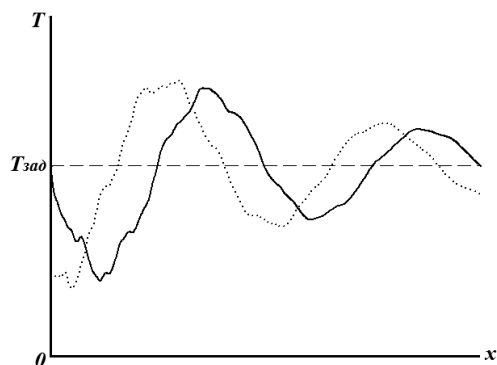


Рис. 3. Распределение температуры по глубине тела при двухпозиционном регулировании в различные моменты времени

Для того чтобы избежать таких последствий, необходимо ввести в процесс управления корректирующее действие, которое бы выравнивало температуру окружающей среды. Такое действие может быть записано как разница между необходимой и дей-

ствительной температурами окружающей среды (рис. 4):

$$\Delta f = \cos\left(\frac{2\pi t}{T_0}\right) - \frac{8\Delta T_{зад}}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{(2n-1)^2} \cos\left[(2n-1)\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)\right]. \quad (7)$$

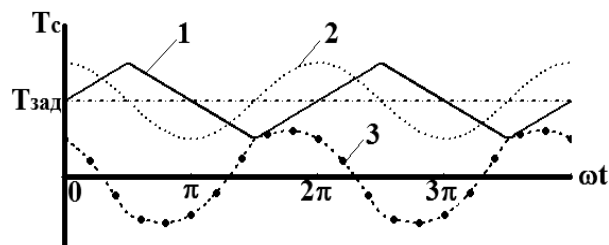


Рис. 4. Температура окружающей среды в печи сопротивления: 1 – действительная; 2 – необходимая; 3 – корректирующее действие

Такое корректирующее действие может быть реализовано введением дополнительного регулятора, который бы генерировал температурные волны (7), либо применением фильтров высших гармоник на выходе двухпозиционного регулятора.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ярышев Н.А.** Теоретические основы измерения нестационарных температур / Н.А. Ярышев. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. 256 с.
2. **Свенчанский А.Д.** Электрические промышленные печи: учебник для вузов: в 2 ч. Ч. 1. Электрические печи сопротив-

ления / А.Д. Свенчанский. М.: Энергия, 1975. 384 с.

3. **Лыков А.В.** Теория теплопроводности / А.В. Лыков. М.: Высш. шк., 1967. 600 с.

4. **Толстов Г.П.** Ряды Фурье / Г.П. Толстов. М.: Физматлит, 1960. 390 с.

Антонов Игорь Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Алексеев Вадим Сергеевич – ассистент кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Igor N. Antonov – Dr.Sc., Professor, Department of Automated Electrotechnological Plants and Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Vadim S. Alekseyev – Assistant Lecturer, Department of Automated Electrotechnological Plants and Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 19.09.13, принята к опубликованию 16.10.13

СОЦИАЛЬНЫЙ АСПЕКТ

УДК 621.365.5

Гуманитарный компонент электротехнического образования

Ю.С. АРХАНГЕЛЬСКИЙ, Е.М. ГРИШИНА

Humanitarian Component of Electrotechnical Formation

Yu.S. ARKHANGELSKIY, E.M. GRISHINA

Рассматриваются вопросы гуманитарной и социально-экономической подготовки студентов-электриков.

Ключевые слова: гуманитарный компонент, электротехническое образование

Связь между профессиональной компетенцией человека и его гуманитарной, общесоциальной компетентностью очевидна и общепризнана. В нашей стране студентам-электрикам традиционно дается основательная подготовка не только по техническим, но и по гуманитарным и социальным дисциплинам. История развития гуманитарного компонента технического образования рассмотрена, например, в [1]. Отметим только, что с развитием индустриальной системы происходили существенные изменения в модели образования: производственные и социальные проблемы стали сливаться в единый комплекс, определяющий интегрированные социотехнические задачи.

Не будем сравнивать советскую и постсоветскую модели гуманитарного образования в техническом вузе. Разница принципиальна и хорошо известна. Сопоставим гуманитарный компонент электротехнического образования, пользуясь учебными планами и рабочими программами подготовки инженеров-электриков и пришедшими им на смену учебными планами и рабочими программами подготовки бакалавров и магистров. В табл. 1 и 2 приведен сравнительный анализ гуманитарного компонента

The paper considers the issues of incorporating humanitarian and social-economic aspects into training electrical engineers.

Keywords: humanitarian component, qualification of an electrical engineer

учебных планов подготовки в Саратове электриков по специальности 140605 (180500) «Электротехнологические установки и системы» и 100400 (1400211) «Электроснабжение» (инженерная подготовка) и подготовки бакалавров по направлению 140400.062 «Электроэнергетика и электротехника» по профилям «Электротехнологические установки и системы» и «Электроснабжение».

Как следует из табл. 1, в базовой части гуманитарного компонента подготовки бакалавров сохранены все дисциплины базовой части гуманитарного компонента подготовки инженеров. Поскольку время подготовки бакалавров на год меньше, чем при подготовке инженеров, количество аудиторных занятий гуманитарного компонента подготовки бакалавров удалось частично сохранить за счет увеличения числа недель в семестре с 17 до 18.

$A_1 \approx A_{2,3}$, следовательно, сокращение времени аудиторных занятий в гуманитарном компоненте учебных планов подготовки бакалавров и в циклах математических и естественно-научных и профессиональных дисциплин проведено без предпочтения по какому-либо циклу.

В табл. 2 приведен сравнительный анализ вариативной части и дисциплин по выбору гуманитарного компонента учебных планов подготовки инженеров и бакалавров.

Дисциплины вариативной части гуманитарного компонента учебных планов подготовки инженеров полностью заменены. В гуманитарном компоненте учебного плана подготовки бакалавров нет дисциплин «Правоведение», «Общая и политическая социология», что, на наш взгляд, обеднило гуманитарный компонент. Вместо дисциплины «Русский язык для профессионального общения» введен курс «Иностранный язык для делового общения». Однако наш опыт учебной работы с первокурсниками показал, что до трети студентов с трудом читают написанный или напечатанный ими текст на рус-

ском языке. Студенческая аудитория чувствует это и откровенно смеется над своими сокурсниками.

Особого разговора заслуживают курсы по выбору в учебном плане подготовки бакалавров. Впервые в нашей стране курсы по выбору появились в учебных планах в 90-е годы после введения Государственных образовательных стандартов и начала подготовки бакалавров параллельно подготовке инженеров. Видимо, идея введения курсов по выбору была заимствована из опыта высшего образования США. Там тематика курсов по выбору (элективных курсов) весьма разнообразна, список тем (дисциплин), предлагаемых студентам, может содержать несколько десятков названий [1].

Таблица 1

Сравнительный анализ гуманитарного компонента (базовая часть) учебных планов подготовки инженеров и бакалавров

Подготовка	Дисциплина	Часы						
		Всего	Лекции	Коллоквиумы	Лаб. работа	Практ. занятия	Ауд. занятия	СРС
Инженер	Отечественная история	128	34	–	–	34	68	60
Бакалавр	История	48	18	–	–	36	54	54
Инженер	Философия	128	34	–	–	34	68	60
Бакалавр	Философия	108	18	–	–	36	54	54
Инженер	Иностранный язык	340	–	–	–	170	170	170
Бакалавр	Иностранный язык	228	–	–	–	144	144	144
Инженер	Экономика	128	34	–	–	34	68	60
Бакалавр	Экономика	108	18	–	–	36	54	54
Инженер	ИТОГО	724	102	–	–	272	374	350
Бакалавр	ИТОГО	552	54	–	–	252	306	306
A ₁ %		–23,8	–47,1	–	–	+7,4	–18,2	–12,6
A _{2,3} , %		+4,1	–40,2	–	–9,5	+36,3	–10,3	+20,4

Примечания: СРС – самостоятельная работа студента;

$$A = \left(\frac{\text{число бакалавр.подгот.}}{\text{число инженер.подготов.}} - 100 \right) \%;$$

A₁ – гуманитарный и социально-экономический цикл; A_{2,3} – математический и естественно-научный цикл и профессиональный цикл.

Сравнительный анализ гуманитарного компонента (вариативная часть и курсы по выбору)
учебных планов подготовки инженеров и бакалавров

Подготовка	Дисциплина	Часы						
		Всего	Лекции	Колл.	Лаб. раб.	Практ. зан.	Ауд. зан.	СРС
ВАРИАТИВНАЯ ЧАСТЬ								
Инженер	Правоведение	128	34	–	–	34	60	68
Бакалавр	Нет	–	–	–	–	–	–	–
Инженер	Рус. яз. для проф. общения	68	17	–	–	17	34	34
Бакалавр	Нет	–	–	–	–	–	–	–
Инженер	Инженерная психология	90	34	–	–	17	51	39
Бакалавр	Нет	–	–	–	–	–	–	–
Инженер	Общая и полит. социология	112	17	–	–	17	34	78
Бакалавр	Нет	–	–	–	–	–	–	–
Инженер	Нет	–	–	–	–	–	–	–
Бакалавр	История науки техники	72	14	4	–	18	36	36
Инженер	Нет	–	–	–	–	–	–	–
Бакалавр	Философия науки и техники	72	14	4	–	18	36	36
Инженер	Нет	–	–	–	–	–	–	–
Бакалавр	Ин. язык для проф. общения	144	–	–	–	72	72	72
Инженер	ИТОГО	398	102	–	–	85	179	219
Бакалавр	ИТОГО	288	28	8	–	198	144	144
А ₁ , %		–27,6	–72,5		–	+27,1	–19,6	–34,2
ДИСЦИПЛИНЫ ПО ВЫБОРУ								
Инженер	Не расшифрованная	270	34	–	–	34	68	202
Бакалавр	Психология	108	14	4	–	18	36	72
	Инженерная психология	108	14	4	–	18	36	72
	История культуры России	72	14	4	–	18	36	36
	Мировое культурное наследие	72	14	4	–	18	36	36
Инженер	ИТОГО	270	34	–	–	34	68	202
Бакалавр	ИТОГО	180	28	8	–	36	72	108
А ₂₁ , %		–33,3	–17,6		–	+5,9	+5,9	–46,5

Примечание: Вариативной части в гуманитарном компоненте учебного плана подготовки инженеров нет. В табл. 2 в вариативной части в гуманитарном компоненте учебного плана подготовки инженеров указаны дисциплины гуманитарного цикла, не вошедшие в базовую часть.

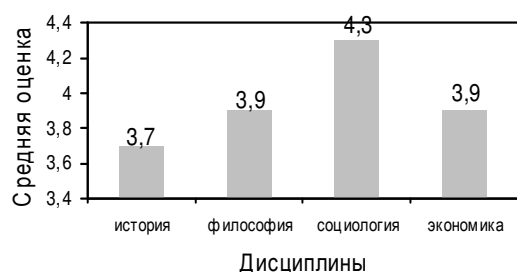
Преподаватели кафедр, ведущих дисциплины гуманитарного компонента, отнеслись к появлению курсов по выбору с большим интересом. Однако реализация этой идеи столкнулась с рядом трудностей: преподавателям пришлось тратить значительное время на работу со студентами, разъясняя открывающиеся для студента возможности; сохранение классической

модели учебных занятий (лекции, практические занятия, СРС) разбиение учебной группы на мелкие подгруппы привело к росту учебной нагрузки кафедр и, следовательно, требовалось существенно больше преподавателей; потребовалось больше аудиторного фонда.

Согласно табл. 2, в анализируемом учебном плане подготовки бакалавров студенты

могут выбрать всего две дисциплины. Выбор невелик, и в любом случае это будет психология и история культуры. Такой подход к реализации курсов по выбору в учебных планах бакалаврской подготовки лишает студентов возможности самостоятельно сконструировать индивидуальный вариант обучения в рамках гуманитарного компонента. Решение проблемы следует искать в изменении форм и методов учебного процесса в рамках дисциплин по выбору.

Аналогичные недостатки, на наш взгляд, присущи и учебным планам подготовки магистров.



Средняя оценка дисциплин гуманитарного компонента подготовки бакалавров и инженеров-электриков энергетического факультета СГТУ имени Гагарина Ю.А.

Анализ рабочих программ дисциплин гуманитарного компонента подготовки бакалавров и инженеров показал, что в них не хватает межпредметных (междисциплинарных) связей. Особенно это касается экономических дисциплин: в современных электроэнергетике и электротехнике все шире применяются технико-экономические расчеты для оптимизации принимаемых решений, но на эту тему говорят со студентами только преподаватели дисциплин профессионального цикла.

На рисунке показаны средние оценки, выставленные студентами-электриками занятиям по ряду учебных дисциплин гуманитарного компонента.

Заметим, что дисциплины «Социология» в учебном плане подготовки бакалавров сейчас нет.

Итак, гуманитарный компонент подготовки бакалавров и магистров-электриков в целом соответствует нынешнему Государственному образовательному стандарту, однако ему не хватает междисциплинарной направленности, в нем отсутствует такая принципиально-важная дисциплина как «Социология».

ЛИТЕРАТУРА

1. **Андреев А.Л.** Социология техники / А.Л. Андреев, П.А. Бутырин, В.Г. Горохов. М.: Альфа-М; ИНФА-М, 2009. 288 с.

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.

Гришина Екатерина Михайловна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Yuri S. Arkhangelskiy – Honoured Scientist of the Russian Federation, Dr.Sc., Professor, Department of Automated Electrotechnological Plants and Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Ekaterina M. Grishina – Ph.D., Associate Professor, Department of Automated Electrotechnological Plants and Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 19.09.13, принята к опубликованию 17.10.13

Быть или не быть ядерной энергетике

Т.А. КИРЬЯНОВА, А.Н. ВАСИН

Nuclear Power: To Be or Not To Be

T.A. KIRYANOVA, A.N. VASIN

В статье рассматриваются вопросы актуальности развития одного из направлений науки и техники – энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика, определенного Правительством РФ в качестве приоритетного. Авторы рассуждают о потенциале ядерной энергетики нашей страны, планах на будущее, приводят фрагменты социологических опросов населения на тему полезности и безопасности эксплуатации атомных станций и каким образом российское образование реагирует на сложившуюся ситуацию по подготовке специалистов в сфере энергетике.

Ключевые слова: ядерная энергетика, энергетический потенциал, безопасность, эффективность, образование

The article considers the current issues of science and engineering related with energy efficiency, energy conservation, and nuclear power which are prioritized by the Government of the Russian Federation. The authors present the data relating the perspectives of nuclear power utilization in Russia, plans for its future development, and provide the results of the public opinion poll referring such topics as benefits and safety of nuclear power stations, as well as the challenges connected with training professionals for power engineering industry.

Keywords: nuclear power, energy potential, safety, efficiency, education

В сфере образования, так же как и в других сферах деятельности человечества, существует серьезная конкуренция как среди внутренних российских образовательных структур, так и со стороны западных вузов. В последние годы возрастает поток абитуриентов, поступающих в западные университеты, институты и колледжи. Чтобы противостоять этой тенденции, необходимо повышать уровень отечественного образования, делая его более конкурентоспособным.

Правительством РФ определены приоритетные направления развития науки и техники на ближайшие годы, в которых сконцентрирован научный потенциал, и для реализации которых выделяются значительные финансовые и материально-технические ресурсы. Под приоритетными направлениями понимаются основные области исследований и разработок, реализация которых позволит обеспечить значительный вклад в социально-экономическое

и научно-техническое развитие страны и достичь благодаря этому национальных социально-экономических целей. В качестве приоритетных с учетом среднесрочных социально-экономических задач развития страны экспертные группы при Правительстве РФ определили 8 направлений:

1. Индустрия наносистем.
2. Информационно-телекоммуникационные системы.
3. Науки о жизни.
4. Рациональное природопользование.
5. Транспортные и космические системы.
6. Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика.
7. Перспективные виды вооружений, военной и специальной техники.
8. Безопасность и противодействие терроризму.

Таким образом, вопросы энергоэффективности, энергосбережения и ядерной

энергетики Правительство РФ рассматривает как ключевые, которые могут дать толчок развитию инновационной экономики.

Почему же ядерная энергетика в последнее время вызывает такой повышенный интерес со стороны самых широких научных кругов и, как следствие, актуализацию подготовки специалистов в этой отрасли?

Наша страна на сегодняшний день обладает самыми большими в мире запасами как высоко-, так и низкообогащенного урана. «По оценкам западных экспертов, российские запасы обогащенного урана достаточны для потребления действующими реакторами на протяжении около 90 лет без дополнительной добычи при ежегодном расходе порядка 4200 метрических тонн металлического урана» [3]. Но такой мощный потенциал ядерной энергетики может быть рационально использован далеко не всеми ядерными реакторами, а лишь реакторами-размножителями, коэффициент воспроизводства ядерного топлива которых больше единицы. Только такие ядерные реакторы способны переработать основную массу урана-238 и тория-232; только они могут увеличить выход от 1 кг урана до 100 раз и более [3].

В связи с этим энергетическая стратегия, рассчитанная до 2020 г., ставит во главу угла модернизацию и техническое перевооружение российских атомных электростанций. Рассматривается вопрос об освоении атомных реакторов нового поколения, обладающих повышенным коэффициентом безопасности и ресурсом долговечности. Разрабатываются планы ввода новых мощностей АЭС в нашей российской глубинке – удаленных северных и восточных районах.

Однако такие грандиозные задачи можно решать только умами и руками специалистов, обладающих новым мышлением. Следует признать, что на сегодняшний день специалистов высоко уровня в данной области у нас явно недостаточно, так же как недостаточно свежих научных идей, конструкторских и технологических разработок в области преобразования ядерной энергии. Отдельные разработки носят штучный характер и в большей степени демонстрируют

лишь имеющий потенциал наших энергетиков. До реализации в реальное производство мало что доходит в силу разных причин, в том числе и из-за недостаточного финансирования, слабой заинтересованности и неверия в собственные научно-технические ресурсы властных структур.

Но все может повернуться в лучшую сторону и об этом говорят результаты социологических опросов на тему «Отношение к атомной энергетике в России». Выяснилось, что мнения россиян по этому вопросу разделились. 39% опрошенных считают, что развитие атомной энергетики принесет больше пользы, чем вреда, 25% опрошенных считают иначе, 36% с ответом не определились [4]. При этом уровень образования и место постоянного проживания оказывали существенное влияние на результаты высказанных мнений респондентов. Так, например, опрошенные, имеющие неоконченное среднее образование, чаще опасались последствий интенсивного развития ядерной энергетики и отмечали преобладание вреда над пользой (соответственно 33 и 19%). Люди, получившие высшее образование, считают, что пользы от получения электроэнергии от АЭС гораздо больше, а опасения наносимого ею вреда или ядерной катастрофы преувеличены (55% против 15%). До половины жителей крупных городов уверены в позитивных последствиях развития ядерной энергетики, а в Москве таких 57% [4]. В ответах респондентов, негативно относящихся к развитию атомной энергоотрасли, более явно просматривается эмоциональная составляющая, нежели технически обоснованная.

Резюмируя итоги проведенных социологических исследований, можно отметить следующее:

1. Существует, и не без оснований (Чернобыль и Фукусима):

- страх ядерной катастрофы;
- страх радиационного заражения окружающей среды из-за нарушений требований техники безопасности, возникновения нештатных ситуаций в силу природных катаклизмов, износа защитных устройств, обычного разгильдяйства и других причин.

2. Вместе с тем отмечается перспективность, прогрессивность и полезность атомной энергетики.

3. Можно говорить о неумении просчитывать все возможные риски, присущие атомной отрасли.

Последний вывод свидетельствует как раз о дефиците специалистов высокого уровня в области ядерной энергетики, которые и могли бы учесть все риски и обеспечить достаточный уровень безопасности эксплуатации атомных станций.

О важности вопроса говорит тот факт, что на международном форуме «Атомэкспо – 2011», в котором приняли участие представители свыше 80 стран, ключевой темой было развитие инфраструктуры ядерного образования. На круглом столе ставилась задача разработки новых образовательных программ подготовки высококвалифицированных кадров для ядерной энергетики, отмечалась необходимость тесного сотрудничества всех стран, использующих ядерно-энергетические технологии. Участниками форума было выдвинуто предложение о создании единого информационного ресурса, который бы позволял оперативно обмениваться информацией о событиях, деятельности и тенденциях развития ядерного образования в разных странах.

Понимая всю важность этого вопроса в образовательной политике нашей страны, в последние годы был предпринят ряд мер для исправления сложившейся ситуации.

Так, например, МИФИ получил статус Национального исследовательского ядерного университета и дополнительное финансирование. В планах развития энергетики нашего государства запланировано сооружение атомных станций нового поколения. Но для обслуживания новых энергетических объектов нужны новые, высокообразованные кадры. В связи с этим планируется увеличить стипендии студентам, обучающимся по программам атомной энергетики, из фонда предприятий ГК «Росатом», выпускникам учебных заведений будут гарантированно предоставляться высокооплачиваемые рабочие места. Как отметил проректор Национального исследовательского ядерного уни-

верситета МИФИ, университет обладает мощной учебной и исследовательской базой и является крупнейшим в России центром подготовки специалистов по ядерным специальностям. С ядерными технологиями связаны более 40 образовательных программ, около 30 направлений подготовки аспирантов, более 200 программ переподготовки и повышения квалификации. Это позволяет успешно осуществлять подготовку специалистов не только для нашей страны, но и для стран, планирующих строительство первых атомных электростанций. Другой крупный российский центр ядерного образования находится в Томском политехническом университете, в котором четыре факультета готовят специалистов для предприятий атомной отрасли. Новейшее оборудование научно-производственных комплексов вуза дает возможность обучать бакалавров рабочим профессиям ядерной тематики.

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., который является одним из ведущих технических вузов в Поволжском регионе, также успешно наращивает потенциал в подготовке специалистов в области ядерной энергетики. СГТУ имеет богатый опыт по подготовке инженеров по направлению 140000 «Энергетика, энергетическое машиностроение и электротехника». Подготовка началась с 60-х годов прошлого века и к настоящему времени на энергетическом факультете СГТУ накоплены уникальные наработки по этому направлению. Учёные СГТУ выполняют многочисленные разработки в области различных сфер энергетики, в том числе и ядерной. Около тысячи студентов получают профессию в этой отрасли. СГТУ имени Гагарина Ю.А. сотрудничает с ОАО «Концерн Росэнергоатом» и Балаковской АЭС. Многие выпускники энергетического факультета работают на Балаковской АЭС. В последнее время на энергетическом факультете уделяется особое внимание подготовке специалистов по ядерной энергетике. По реализуемым в настоящее время образовательным программам энергетического профиля предусмотрены такие дисциплины, как «Природоохранные технологии на АЭС», «Турбины

ТЭС и АЭС», «Надежность теплоэнергетического оборудования АЭС», «Производство ремонта оборудования АЭС», «Реакторы и тепломеханическое оборудование АЭС». В 2010 году была открыта специальность, которая реализуется по государственному стандарту 3-го поколения «141403.65 Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг». Планируется открыть еще ряд направлений, которые связаны с использованием ядерной энергетики. На базе энергетического факультета открыт Региональный центр подготовки энергоаудиторов и повышения энергоэффективности. Центр организован приказом ректора СГТУ № 1086-П от 01.10.2010 г. во исполнение распоряжения Правительства Российской Федерации от 01.12.2009 № 1830-Р «Об утверждении плана мероприятий по энергосбережению и повышению энергетической эффективности в Российской Федерации». В центре в течение года проходят повышение квалификации более пятисот человек по следующим основным направлениям:

1. Подготовка и повышение квалификации энергоаудиторов.
2. Повышение квалификации специалистов в области энергосбережения.

3. Разработка, реализация и кадровое сопровождение проектов по повышению энергоэффективности и энергосбережению.

Кроме того, слушатели повышают квалификацию и проходят переподготовку по профилю основных профессиональных программ, реализуемых на энергетическом факультете.

Итак, ядерная энергетика, несмотря на огромное количество мифов вокруг нее, имеет хорошие перспективы развития, особенно учитывая, что надежность атомных реакторов нового поколения в разы превосходит предыдущие, а коэффициент воспроизводства ядерного топлива позволяет получить энергии на порядок больше.

Задача работников сферы образования при подготовке специалистов – шагать в ногу и даже опережать техническое перевооружение атомной энергетической отрасли. Для решения этой задачи необходимо создавать благоприятное общественное мнение, повышать мотивацию абитуриентов, направленную на освоение профессий в области ядерной энергетики, а также активнее готовить специалистов высшей квалификации, в том числе кандидатов и докторов наук в данной области.

ЛИТЕРАТУРА

1. Миндели Л.Э. Приоритетные направления развития и фундаментальная наука / Л.Э. Миндели, С.И. Черных // Приоритеты и модернизация экономики России. Институт экономики РАН. СПб.: Алетейя, 2011.

2. Ленчук Е.Б. Инвестиционные аспекты инновационного роста / Е.Б. Ленчук, Г.А. Власкин. М.: ЛИБРОКОМ, 2009. 142 с.
3. <http://pdomagos.ru/post-user/1188>.
4. <http://corp.fom.ru/uploads/socreal/post-116>.

Кирьянова Татьяна Алексеевна – заместитель начальника Управления контроля качества образования Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А., начальник отдела Аттестации, лицензирования и аккредитации

Васин Алексей Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения», начальник Управления контроля качества образования Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Tatyana A. Kiryanova – Deputy Director: Department for Quality Assurance Monitoring, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Alexey N. Vasin – Dr.Sc., Professor, Department of Technology of Mechanical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 23.09.13, принята к опубликованию 18.10.13

ЛЕТОПИСЬ

Анатолий Иванович Андриющенко



С именем Анатолия Ивановича Андриющенко связано становление и развитие в г. Саратове политехнического института. С 1955 г. он семь лет работал проректором по научной работе, а затем с 1962 по 1988 год – ректором Саратовского политехнического института. Под его руководством из узкопрофильного автодорожного института вуз превратился в крупный учебный и научный центр Поволжья. А.И. Андриющенко внес решающий вклад в создание и развитие подготовки в вузе инженеров-электриков.

Докторскую диссертацию по СВЧ электротермии я написал на кафедре «Электроника» факультета электронной техники и приборостроения Саратовского политехнического института. Защита планировалась в Ленинграде. Надлежащим образом были подготовлены документы, Анатолию Ивановичу оставалось подписать сопроводительное письмо. И тут декан В.М. Рассудов сообщил мне, что по указанию ректора я должен сделать доклад по диссертации на семинаре ректорской кафедры «Теплоэнергетика» на энергетическом факультете:

– Вы – электрик, а решаете тепловую задачу. Ректор – теплоэнергетик, хочет посмотреть, как вы ее решили.

– В диссертации сформирована и решена согласованная краевая задача электродинамики и тепломассопереноса. Выделить тепловую задачу нельзя, я буду докладывать диссертацию целиком. И передайте, пожалуйста, ректору, что ВАК не требует от соискателя ученой степени доклада на ректорской кафедре.

– Так и сказать? – удивился декан столь дерзкой просьбе...

На другой день В.М. Рассудов передал мне подписанное Анатолием Ивановичем сопроводительное письмо и сказал, что ректор мой доклад отменил... А вскоре

Анатолий Иванович вызвал меня к себе и предложил перейти на энергетический факультет заведующим кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий». После защиты диссертации он ввел меня в состав докторского диссертационного совета по энергетике, председателем которого он был. Я смог познакомиться с его научной школой, с развитыми им принципами технико-экономической оптимизации энергетических объектов. Адаптация этих идей к СВЧ электротермии дала возможность существенно расширить исследования в области термообработки диэлектриков в электромагнитном поле. Сейчас на эту тему в нашем вузе защищены докторская и четыре кандидатские диссертации.

И все-таки однажды мне довелось выступить на семинаре кафедры «Теплоэнергетика», приуроченном ко дню рождения Анатолия Ивановича. На семинаре много говорили на модную тему – энергосбережение. Когда мне дали слово, я сказал, что термин «энергосбережение» придумал, видимо, человек, у которого в институте по физике была тройка. Правильно говорить «энергоэффективность». Участники семинара замерли от удивления, и только плечи Анатолия Ивановича вздрагивали от сдерживаемого смеха: накануне мы с ним обсуждали эту тему.

В последующие годы Анатолий Иванович изредка звонил мне, поздравлял с юбилейными днями рождения, с получением почетных званий, с признанием нашей школы СВЧ электротехнологов ведущей научной школой России в области инженерных и технических наук... Я не звонил ему. Боялся потревожить. Заходил к нему на кафедру...

Помню, с каким интересом он обсуждал со мной результаты наших экспериментов по нетепловой СВЧ модификации полимеров. Требуется большая СВЧ мощность, но тратится лишь малая ее часть. КПД чрезвычайно мал, а прибыль от реализации по-

лимерных материалов с новыми свойствами весьма достойная.

– А нельзя ли придумать, как использовать оставшуюся мощность? – спросил Анатолий Иванович.

Мы придумали. Так появились принципиально новые СВЧ рабочие камеры, которые теперь называются гибридными...

Последний раз Анатолий Иванович позвонил мне за несколько недель до своей кончины. Меня дома не было, решил, что в ближайшие дни увижусь с ним на работе... Не довелось... Так и не знаю, что хотел мне сказать Анатолий Иванович в тот раз. Ведь поздравлять меня тогда было не с чем...

Доктор технических наук, профессор
Ю.С. Архангельский

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

1. Статья, представляемая в редакцию журнала «Вопросы электротехнологии», должна быть тщательно отредактирована. Текст вводится через 1 интервал, поля: верхнее, нижнее, левое, правое – 2,0 см; ориентация книжная; шрифт Times New Roman, высота 12. Текст статьи представляется в формате **.doc** текстового редактора «MS Word 2003» или на электронную почту aeu@sstu.ru.

2. Статья должна обосновывать актуальность темы, отражать теоретические и (или) экспериментальные результаты и содержать четкие выводы.

3. В начале статьи в левом верхнем углу ставится индекс УДК. Далее на первой странице данные идут в такой последовательности:

- инициалы и фамилии авторов,
- полное название статьи (шрифт жирный, буквы прописные),
- краткая (3-7 строк) аннотация (курсив),
- ключевые слова.

Далее авторы, название статьи, аннотация и ключевые слова повторяются на английском языке.

Затем идет текст самой статьи и список литературы, который повторяется на английском языке.

Статья завершается сведениями об авторах: ф.и.о. (полностью), ученая степень, ученое звание, место работы (полностью), должность, контактные телефоны. Сведения об авторах также повторяются на английском языке.

4. Объем статьи не должен превышать 10 страниц текста, содержать не более 5 рисунков или фотографий; объем обзора – 25 страниц, 10 рисунков; объем краткого сообщения – не более 3 страниц, 2 рисунков.

Иллюстрации (рисунки, графики) должны быть расположены в тексте статьи и выполнены в одном из графических редакторов (формат tif, pcc, jpg, pcd, msp, dib, cdr, cgm, eps, wmf). Допускается также создание и представление графиков при помощи табличных процессоров «Excel», «Quattro Pro», «MS Graph». Каждый рисунок должен иметь номер и подпись. Рисунки и фотографии должны иметь контрастное изображение.

Таблицы располагаются непосредственно в тексте статьи. Каждая таблица должна иметь номер и заголовок.

5. Формулы и буквенные обозначения величин должны быть набраны в редакторе формул Microsoft Equation 3.0. Каждая формула должна иметь номер.

6. 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.

7. Список литературы должен быть оформлен по ГОСТ 7.1-2003 и включать: 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.

8. Специалисты в технических отраслях к статье прилагают экспертное заключение.

9. Рукопись статьи рецензируется ведущим ученым в данной области, как правило, доктором наук.

10. Электронная версия опубликованной статьи размещается в системе РИНЦ.

11. Редакция оставляет за собой право производить редакционные изменения, не искажающие основное содержание статьи.

12. Статьи, не отвечающие перечисленным требованиям, к рассмотрению не принимаются, рукописи авторам не возвращаются. Датой поступления рукописи считается день получения редакцией окончательного текста. В случае отказа в публикации статьи редакция направляет автору мотивированный отказ.

13. Для публикации и своевременной подготовки журнала необходимо заполнить регистрационную карту участника, представляемую на отдельном бумажном носителе и в электронном виде.

14. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

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: vopros@sstu.ru

Подписано в печать 15.11.2013

Формат 60×84 1/8 Бум. офсет.

Усл. печ. л. 13,0 Уч. изд. л. 7,0

Тираж 500 экз. Заказ 210 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

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: vopros@sstu.ru

Print date: 15.11.2013

Paper size: 60×84 1/8 Offset-Print

Conventional printed sheet 13,0 Publication base sheet 7,0

Circulation: 500 printed copies 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*



Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. начинает свою историю с 6 октября 1930 года. К занятиям на двух факультетах – автомобильном и дорожно-строительном – приступило 440 студентов.

В годы Великой Отечественной войны, продолжая готовить инженеров, институт выполнял научные разработки оборонного значения, на его ресурсах функционировала авторемонтная база Юго-Западного фронта, выполнялся проект перевода автомашин на новые виды топлива.

Периодом интенсивного развития стали для вуза послевоенные годы. В 1946 году был открыт механико-технологический факультет, в 1947 году – строительный, в 1959 году – приборостроительный, в 1960 – теплоэнергетический (сегодня – энергетический) факультет.

Были открыты вечерние филиалы: в 1955 г. – в Заводском районе Саратова, в 1957 г. – в Балакове. Учитывая тот факт, что институт стал практически многоотраслевым вузом, готовящим специалистов для различных отраслей промышленности, 19 марта 1960 года САДИ был преобразован в политехнический институт (СПИ).

В 1969 году был создан факультет электронной техники и приборостроения, который вел подготовку инженеров по автоматике и телемеханике, электронике, автоматизированным системам управления, гироскопическим приборам и устройствам.

В 90-е годы в институте появились специальности гуманитарного профиля, и 24 декабря 1992 года СПИ получил статус государственного технического университета (СГТУ). Сегодня СГТУ имени Гагарина Ю.А. представляет собой учебно-научно-производственный комплекс, включающий 6 институтов (включая 2 филиала), 85 кафедр, в нем работает 1290 преподавателей, обучаются 16295 студентов (в том числе 7091 на госбюджетной основе). В 2013 году в СГТУ имени Гагарина Ю.А. принято на первый курс по очной и заочной формам обучения 5298 студентов.

В СГТУ имени Гагарина Ю.А. 202 доктора наук и 602 кандидата наук ведут научные исследования по широкому спектру научных направлений, в том числе в области электротехнологии.

На основании конкурса, проводимого по грантам Президента РФ в 2006 году, научная школа СГТУ, ведущая исследования в области СВЧ электротехнологии, была признана ведущей научной школой РФ в области инженерных и технических наук. Научная школа НШ 9553.2006.8 ведет исследования по всем основным разделам СВЧ электротехнологии: источники СВЧ энергии, рабочие камеры, транспортные системы, электротехнологические процессы, модификация полимеров и получение новых материалов, включая наноматериалы, измерения в СВЧ электротехнологии, энергоэффективность СВЧ электротехнологических установок.

В целях расширения информационного пространства для ученых, производителей, разработчиков новой техники, инвесторов, аспирантов и студентов в СГТУ имени Гагарина Ю.А. создан научно-технический журнал «Вопросы электротехнологии». Тематические направления журнала: электротермия, электрохимия, электрофизика, электросварка, электроснабжение, электроника и электродинамика, тепломассоперенос, электромеханика, системы управления технологическими процессами, материаловедение, измерения в электротехнологии.