

Издается с ноября 2013 года
Выходит один раз в квартал

№ 1 (2)
Март 2014

ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

Главный редактор	д.т.н., профессор Ю.С. АРХАНГЕЛЬСКИЙ
Зам. главного редактора	д.т.н., профессор В.А. ЦАРЕВ
Ответственный секретарь	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 (2)
March 2014

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

Поздравления..... 5

ЭЛЕКТРОФИЗИКА

Гуляев Ю.В., Яфаров Р.К., Суздальцев С.Ю., Нефедов Д.В., Шаныгин В.Я. Влияние адгезионного слоя и плазмохимической обработки на автоэмиссию алмазографитового катода..... 6

Яфаров Р.К., Шаныгин В.Я. Кинетика структурирования субмонослойных углеродных покрытий на кристаллах кремния (100) при СВЧ вакуумно-плазменном осаждении..... 14

ЭЛЕКТРОТЕРМИЯ

Архангельский Ю.С., Гришина Е.М. Многочастотные установки СВЧ диэлектрического нагрева..... 26

Гришина Е.М., Архангельский Ю.С. Техничко-экономическая оптимизация СВЧ электротермического оборудования, собранного на камерах с бегущей волной..... 33

Зимин Л.С., Сорокин А.Г. Анализ применения индукционного нагрева при производстве пластмассы..... 36

Данилушкин А.И., Пименов Д.Н., Таймолкин А.Ю. Численное моделирование электротепловых процессов в трехфазном индукционном нагревателе..... 40

Данилушкин В.А., Зубарев С.А., Ошкин Я.М. Исследование электромагнитных и тепловых полей на базе численной математической модели процесса индукционного дискретно-непрерывного нагрева..... 46

ЭЛЕКТРОХИМИЯ

Райгородский В.М. Использование электрохимических методов для восстановления измененных или уничтоженных маркировочных обозначений..... 52

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

Кошелев П.А., Опре В.М., Парамонов С.В., Темников А.О., Цариашвили А.А. Импульсный источник питания для электро-технологических установок на основе трансформаторно-ёмкостного преобразователя..... 58

Заикин А.Г., Плотников А.Н. Основные формы стимулирования инновационной деятельности в целях эффективной реализации стратегии энергосбережения..... 66

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

Мошкин В.И., Угаров Г.Г. Основные размеры и их соотношения для магнитной системы импульсного линейного электромагнитного двигателя..... 71

Куренков А.С., Попов Ю.И., Соколов О.О., Смирнов В.П., Космодамианский А.С., Ба-

ташов С.И. Определение интенсивности теплового старения изоляции приводного двигателя вентилятора электровоза..... 78

Куренков А.С., Попов Ю.И., Соколов О.О., Смирнов В.П., Космодамианский А.С., Баташов С.И. Расчет теплового старения изоляции тяговых электродвигателей электровозов..... 82

Мошкин В.И., Вдовина О.В., Угаров Г.Г. Импульсные линейные электромагнитные приводы в энергосберегающих электро-технологиях..... 86

Вырханов Д.А., Угаров Г.Г. Алгоритм расчета динамических зависимостей токов и пространственных координат обобщенного электромеханического преобразователя энергии..... 90

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

Бочкарёв А.О., Сивяков Б.К. Расчёт СВЧ реактора плазмы для осаждения однородных по поверхности тонких плёнок в микро- и нанoeлектронике..... 96

Гестрин С.Г., Щукина Е.В. Излучение электромагнитных волн колеблющейся дислокацией в щелочногалоидном кристалле..... 100

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Таран В.М., Лясникова А.В., Лясников В.Н., Дударева О.А., Маркелова О.А. Разработка автоматизированного комплекса для адаптивного проектирования и управления плазменным процессом получения пористых покрытий..... 104

СОЦИАЛЬНЫЙ АСПЕКТ

Архангельский Ю.С., Гришина Е.М. Подготовка научно-технических кадров для электротехнического социума..... 113

Дунаева Т.Ю. Основные проблемы заочного и заочного сокращенного обучения студентов специальности «Электротехнологические установки и системы» и направления «Электроэнергетика и электротехника»..... 117

ЛЕТОПИСЬ

Казаков Г.Т. Становление академической науки в области радиотехники и электроники в Саратове..... 121

«Физики» и «лирики» много лет спустя
Беседа с А.А. Понукалиным..... 124

Махова Л.А. Династия Грязевых – Гришиных..... 127

Евгений Юрьевич Альтшулер..... 134

К сведению авторов..... 137

CONTENTS

Congratulations	5
-----------------------	---

ELECTROPHYSICS

Gulyayev Y.V., Yafarov R.K., Suzdaltsev S.Y., Nefedov D.V., Shanygin V.Y. Influence Of Adhesive Layer And Plasmochemical Processing On Emission Of Diamond Graphite Cathode	6
Yafarov R.K., Shanygin V.Y. Kinetics Of Structuring Sub-Monolayer Carbon Coatings On Silicon Crystals (100) Under Microwave Vacuum Plasma Deposition.....	14

ELECTROTHERMY

Arkhangelskiy Yu.S., Grishina E.M. Multi-frequency Position Microwave Dielectric Heating.....	26
Grishina E.M., Arkhangelskiy Yu.S. Technical And Economic Optimization Of Microwave Electrothermal Equipment Assembled With Running Wave Cameras.....	33
Zimin L.S., Sorokin A.G. Application Of Induction Heating In The Production Of Plastics.....	36
Danilushkin A.I., Pimenov D.N., Taymolkin A.J. The Numeral Design Of Electro-Thermal Processes In A Three-Phase Induction Heater	40
Danilushkin V.A., Zubarev S.A., Oshkin Ya.M. A Study Of Electromagnetic And Thermal Fields In Discrete-And-Continuous Modeling Of Induction Heating Using A Numerical Mathematical Model	46

ELECTROCHEMISTRY

Raigorodskii V.M. Using Electrochemical Method For Restoration Of Changed Or Destroyed Marked Indications.....	52
---	----

ELECTRIC POWER SUPPLY

Koshelev P.A., Opre V. M., Paramonov S.V., Temnikov A.O., Tsariashvili A.A. The Pulse Power Supply For Electrotechnological Installations On To Basis Of The Transformer And Capacitor Converter.....	58
Zaikin A.G., Plotnikov A.N. Basic Incentives For Innovation Activities To Effectively Implement The Energy Saving Strategy	66

ELECTROMECHANICS

Moshkin V.I., Ugarov G.G. Dimensions And Their Relations To The Magnetic System Of Pulse Linear Electromagnetic Motor.....	71
Kurenkov A.S., Popov Yu.I., Sokolov O.O., Smirnov V.P., Kosmodamiansky A.S., Batashov S.I. Thermal Aging Intensity Of The	

Motor Driving Insulation In The Electric Locomotive Fan.....	78
Kurenkov A.S., Popov Yu.I., Sokolov O.O., Smirnov V.P., Kosmodamiansky A.S., Batashov S.I. Calculating Thermal Aging Of Insulation In Traction Electric Motors Of Electric Locomotives.....	82
Moshkin V.I., Vdovina O.V., Ugarov G.G. Pulsed Electromagnetic Linear Actuators For Energy Saving Electrotechnologies.....	86
Vyryhanov D.A., Ugarov G.G. An Algorithm For Calculating Dynamic Characteristics Of A Generalized Electromechanical Energy Converter.....	90

ELECTRODYNAMICS

Bochkarev A.O., Sivyakov B.K. Calculation Of The Microwave Plasma Reactor For Precipitation Of Uniform Thin Films In Micro - And Nanoelectronics.....	96
Gestrin S.G., Schukina E.V. Emission Of Electromagnetic Waves Oscillating Dislocations In Alkali-Halide Crystals.....	100

CONTROLLING SYSTEMS

Taran V.M., Lyasnikova A.V., Lyasnikov V.N., Dudareva O.A., Markelova O.A. Development Of An Automated System For Adaptive Design And Control Of Porous Plasma Spray Coating.....	104
--	-----

SOCIAL ASPECT

Arkhangelskiy Yu.S., Grishina E.M. Training Academic And Engineering Staff Members For Electrical Engineering Community.....	113
Dunaeva T.Yu. Key Issues Of Providing Correspondence Education And Correspondence Education With Reduced Program To Learners Enrolled In The Programmes "Electrotechnology Units And Systems" And "Electricity And Electrical Engineering"	117

CHRONICLE

Kazakov G.T. Formation of academic science in the fields of radiotechnics and electronics in Saratov.....	121
Arkhangelskiy Yu.S. "Physics" and "lyrics" many years later.....	124
Mahova L.A. Dynasty of family by-Gryazevs-Grishins.....	127
<u>Evgeny Yurievich Altshuler</u>	134
Information for Authors.....	137

Ректору СГТУ имени Гагарина Ю.А.
д.и.н. И.Р. Плевне

Уважаемый Игорь Рудольфович!

Создание научно-технического журнала «Вопросы электротехнологии» - существенный вклад Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. в информационное обеспечение научных исследований и практических разработок в области электротехнологии.

Научно-технический журнал «Вопросы электротехнологии», несомненно, принесет пользу для науки, практики и подготовки кадров.

Поздравляю коллектив университета и редакцию нового научно-технического журнала с этим знаменательным событием!

Директор Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН,
член Президиума РАН,
академик РАН



Ю.В. Гуляев

Главному редактору
научно-технического журнала
«Вопросы электротехнологии»
Архангельскому Ю.С.

Уважаемый Юрий Сергеевич!

Считаем, что тематическое направление журнала, характер, научное и техническое содержание публикуемых статей делает его весьма полезным для научной общественности.

Журнал представляет несомненный интерес для технических работников, занимающихся вопросами проектирования и эксплуатации электротехнологического оборудования. Особенно необходимо отметить его значимость для студентов и аспирантов.

Считаем необходимым рекомендовать включение данного журнала в перечень изданий, утвержденный ВАК.

Заведующий кафедрой «Электроснабжение
промышленных предприятий» Самарского
государственного технического университета,
Заслуженный деятель науки РФ,
д.т.н., профессор



Л.С. Зимин

Заведующий кафедрой «Управление и
системный анализ в теплоэнергетике» Самарского
государственного технического университета,
д.т.н., профессор



М.Ю. Лившиц

Профессор кафедры «Автоматика и управление
в технических системах» Самарского
государственного технического университета,
Заслуженный деятель науки и техники РФ,
д.т.н., профессор



Э.Я. Рапопорт

УДК 537.533.2

**ВЛИЯНИЕ АДГЕЗИОННОГО СЛОЯ И ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЙ
ОБРАБОТКИ НА АВТОЭМИССИЮ АЛМАЗОГРАФИТОВОГО
КАТОДА**

Ю.В. Гуляев, Р.К. Яфаров, С.Ю. Суздальцев, Д.В. Нефедов, В.Я. Шаныгин

**INFLUENCE OF ADHESIVE LAYER AND PLASMOCHEMICAL
PROCESSING ON EMISSION OF DIAMOND GRAPHITE CATHODE**

Y. V. Gulyayev, R. K. Yafarov, S. Y. Suzdaltsev, D. V. Nefedov, V. Y. Shanygin

Исследованы влияние материала адгезионного подслоя и низкоэнергетической плазмохимической обработки в различных газовых средах на характеристики автоэмиссионных наноалмазграфитовых структур на пластинах кремния различных типов проводимости.

Ключевые слова: автоэлектронная эмиссия, СВЧ плазма, алмазграфитовый композит

Investigated the effect of material adhesion-precision and low-energy plasma-chemical sub-layer processing in various gaseous media on the characteristics of the auto-emission nano-diamond-graphite platinum silicon structures of different types of conductivity.

Keywords: field emission, microwave plasma, almazografitovy composite

Создание приборных структур с высокой плотностью тока автоэлектронной (АЭ) эмиссии является актуальной задачей как фундаментальной, так и прикладной науки. Обязательным условием функционирования автоэмиссионных структур является обеспечение эффективного теплоотвода от эмиссионных центров, поскольку протекание токов высокой плотности приводит к их перегреву и последующей деградации [1]. При этом подложка должна обеспечивать эффективный распределенный токоподвод к эмиссионным центрам.

Предварительные исследования показывают [2], что алмазграфитовые (АГ) нанокompозитные структуры, полученные на стеклянной подложке, обеспечивают токи АЭ эмиссии порядка $0,7 \text{ А/см}^2$. Однако особенности протекания процесса АЭ эмиссии [3] и наличие теплоизолирующей

непроводящей подложки не позволяют адаптировать данные структуры для промышленного применения. В связи с этим, одной из основных проблем при создании пленочных АГ нанокompозитных АЭ катодов является подбор подложки, обеспечивающий максимальные плотности тока АЭ эмиссии. Целью работы являлось обоснование выбора материала подложки и определение оптимальных условий их подготовки для автоэмиссионных структур, обеспечивающих плотности токов АЭ эмиссии порядка 1 А/см^2 и выше.

Исследовалось влияние материала адгезионного подслоя на электронный транспорт структур и на АЭ характеристики АГ композитного катода. В качестве материала подслоя были использованы кремнийсодержащие и металлодиэлектрические пленки, осажденные на стекло, на стекло со слоем оксида индия и на пласти-

ны высоколегированного монокристаллического кремния p- и n-типа при различной предварительной плазменной обработке кремния в среде аргона или хладона.

Осаждение кремнийсодержащих и металлодиэлектрических пленок на стеклянные подложки осуществлялось в СВЧ плазме газового разряда. Осаждение пленок аморфного гидрогенизированного кремния (a-Si:H) и аморфного карбида кремния (a-SiC) осуществлялось по методике изложенной в [4]. Пленки a-SiC осаждались с 20% и 80% содержанием (SiH_4) кремния в газовой фазе. Пленки аморфной нестехиометрической окиси кремния (a-SiO_x) осаждались в ходе разложения паров тетраэтилоксисилана (ТЭОС) в СВЧ плазме газового разряда. Толщина пленок составляла 0,3 и 0,5 мкм. Формирование металлодиэлектрических пленок на стеклянных подложках осуществлялось путем одновременного роста пленки a-Si:H и осаждения продуктов распыления никелевой мишени, находившейся под потенциалом -200, -400, -600 В. Толщина пленок данного типа составляла 10, 20, 30 и 300 нм. Использование металлодиэлектрического композита позволяет в широких пределах варьировать электропроводность материала, причем без существенного изменения каталитической активности поверхности подложки, сильно влияющей на рост углеродного конденсата.

На подложки из монокристаллического кремния p- и n-типа осаждались пленки a-Si:H по той же методике, что и на стекло. Осаждение производилось на исходные необработанные в плазме пластины монокристаллического кремния, а также на предварительно обработанные в плазме аргона (Ar) или хладона-14 (CF_4) при потенциале смещения -100В в течение 5 мин. Толщина пленок данного типа составляла также 10, 20, 30 и 300 нм.

Со структур, подготовленных вышеуказанными способами, снималась ВАХ поперечного электронного транспорта. Измерения проводились в диапазоне напряжений от 0 до 10 В в прямом и обратном направлении. В качестве материала

контактов использован металлический никель, нанесенный методом термовакuumного испарения.

Нанесение АГ композита на подготовленные подложки осуществлялось методом разложения паров углеродсодержащего вещества в микроволновой плазме в условиях соответствующих получению алмазографитового композитного материала с преимущественным содержанием модификаций графита [2]. Автоэмиссионные характеристики снимались на установке УСУ-4 с помощью измерительного устройства с подвижным молибденовым анодом. Измерения проводились при комнатной температуре в условиях вакуума $5 \cdot 10^{-6}$ Па, расстояние между анодом и катодом 60, 40 и 20 мкм, диаметр анода 3мм. На каждом образце проведено трехкратное измерение вольтамперной зависимости для трех участков поверхности катода. Полученные данные усреднялись.

На рис. 1 приведены графики ВАХ поперечного транспорта электронов в низкоразмерных кремнийсодержащих металлодиэлектрических структурах на стеклянных подложках с подслоем из оксида индия для фиксированных толщин пленок, полученных при различных потенциалах на распыляемой мишени, построенные в двойном логарифмическом масштабе. Толщина пленок составляла 10, 20, 30 и 300 нм, потенциал на никелевой мишени во время нанесения 0, -200, -400, -600 В.

При исследовании структур толщиной 10 нм обнаружено, что полученные ВАХ оказались очень близки к ВАХ оксида индия. Это показывает, что осажденный металл уменьшил и без того малую эффективную толщину тонкой пленки [5]. Эффективная толщина диэлектрика уменьшается по следующим причинам: глубокое проникновение атомов металла в процессе осаждения металлических электродов, наличие в диэлектрике дефектов, ионизованных примесей и ловушек. Даже небольшое изменение эффективной толщины пленки будет сопровождаться очень сильным изменением тока через такую пленку.

При исследовании структур толщиной

300 нм обнаружено, что удельное сопротивление материала уменьшается на 4 порядка при возрастании потенциала на никелевой мишени от -200 до -600 В. Это показывает, что с ростом содержания металла в испытанных структурах, представляющих собой двухкомпонентный металлодиэлектрический композит, формируется перколяционный кластер и появляется металлическая проводимость [6]. Поэтому наиболее толстые пленки (30 и 300 нм) с высоким содержанием металла, полученные при максимальном потенциале распыления никелевой мишени, характеризуются ВАХ, близкими к ВАХ оксида индия. Причем обратные ветви ВАХ (т.е. при из-

менении от 10 до 0 В) спадают линейно и лежат в области больших токов, что показывает на необратимое модифицирование структуры пленки при приложении к ней высоких напряжений и протекании значительных токов.

Вероятно, имеет место локальная формовка композитной структуры с образованием проводящего канала («нити»), как это описано в [7] для МДМ структур. Такая деструкция пленок, приводящая к возникновению проводящего канала, объясняет последующую неизменность удельного сопротивления для пленок 10, 20, 30 нм в независимости от содержания металла в металлодиэлектрике.

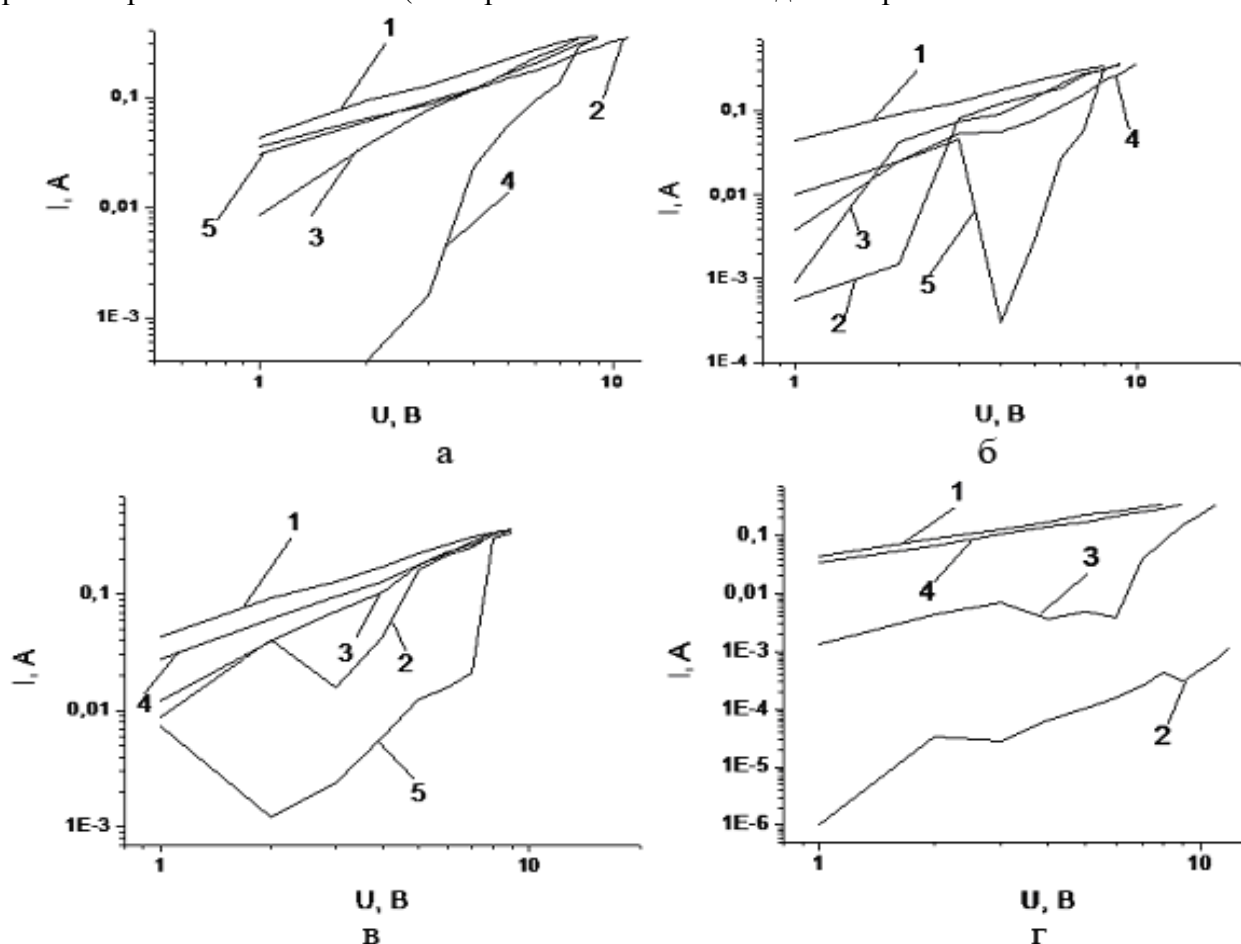


Рис. 1. ВАХ поперечного транспорта электронов в структурах оксид индия – металлодиэлектрик различных толщин (а – 10 нм, б – 20 нм, в – 30 нм, г – 300 нм), полученных при различных электрических потенциалах на никелевой мишени в процессе осаждения: 1 - ВАХ оксида индия без нанесения на него пленок, 2 - 200 В, 3 - 400 В, 4 - 600 В, 5 - 0 В

Тем не менее, электропроводность канала, образовавшегося после деструкции пленки, связана с исходной толщиной пленки. Электропроводность канала об-

ратно пропорциональна толщине пленки. На основании этого сделан вывод об эффективности формирования металлодиэлектриков для получения подложек с за-

данной электропроводностью как путем управления содержанием металла в композите, так и путем получения каналов проводимости различной длины при пробое пленок разной толщины.

На подложках, аналогичных исследованным выше, из стекла со слоем оксида индия и пленками металлодиэлектрика, подготовлены образцы АЭ катодов с АГ пленкой. Толщины металлодиэлектрика составляли 10, 30 и 300 нм, которые были получены при различных значениях вытягивающего потенциала, прикладываемого к никелевой мишени (0, -200, -400 и -600 В). АЭ исследования полученных структур показали, что использование подслоя из оксида индия существенно (в 10-20 раз) снижает максимальные автоэмиссионные токи и повышает на 40-100% порог начала эмиссии. Кроме того, обнаружено, что использование поверхности оксида индия и оксида индия с покрытием 10 нм металлодиэлектрика не позволяет получать стабильные пленки АГ в заданных условиях осаждения. Обнаружено отслаивание углеродного покрытия, которое может быть обусловлено высокими различиями в коэффициентах термического расширения (КТР) пленки и подложки. Однако более толстые слои металлодиэлектрика нанесенного поверх оксида индия (от 30 нм и более), обеспечивают фиксацию углерода на подложке преимущественно по всей площади поверхности. Это происходит либо по причине хорошей адгезии полученного переходного слоя одновременно к InO и к углероду, либо по причине формирования слоя, на котором вырастает менее напряженная углеродная пленка. Причем более тонкие слои металлодиэлектрика не позволяют этого добиться, несмотря на то, что увеличение толщины пленок едва ли может способствовать улучшению их адгезии. Это показывает, что в таком покрытии с ростом его толщины изменяется структура пленки [8]. Таким образом, обнаружено что, начиная с толщины металлодиэлектрика 30 нм, структура его поверхности позволяет получить слабонапряженные АГ пленки, пригодные для исследований, но характеризующиеся

низкими АЭ параметрами.

Обнаружено влияние электропроводности подложки на АЭ параметры АГ катодной структуры. Рост содержания никеля в металлодиэлектрике, нанесенном на оксид индия приводит к снижению максимальных АЭ токов (рис. 2), т.е. рост поперечной электропроводности на 4 порядка приводит к снижению АЭ токов всего в несколько раз.

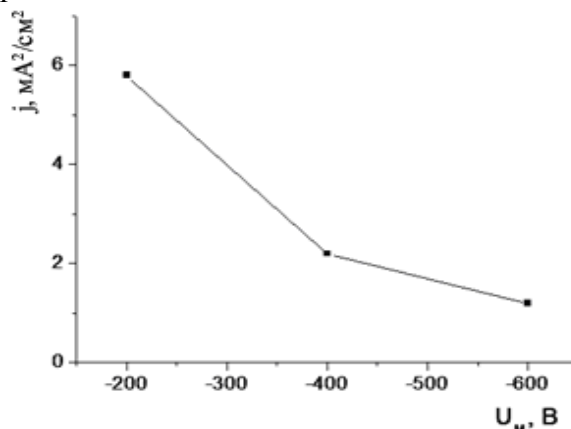


Рис. 2. Зависимость плотности тока АЭ эмиссии от потенциала смещения на никелевой мишени в процессе получения металлодиэлектрического подслоя.

При выяснении роли электропроводности подложки для формирования эффективных АЭ катодов из пленки АГ композита нами были использованы подложки с хорошей адгезией к материалам подслоя и к углероду - это пластины высоколегированного монокристаллического кремния (с-Si). Часть подложек с-Si p- и n-типа предварительно обрабатывались в плазме аргона или хладона. Поперечный транспорт электронов в таких структурах исследовался путем анализа ВАХ, снятых в полуавтоматическом режиме с помощью АЦП. При построении полученных данных для каждого образца определялось значение напряжения, при котором протекает ток величиной 10^{-4} А. Для этого тока рассчитана электропроводность (G) структуры.

На рис. 3 приведены зависимости G от толщины пленок a-Si:H, осажденных на подложки монокремния p- и n-типов, (рис. 3 а, б), предварительно обработанные в плазме CF₄ (рис. 3, кривая 2) и Ar (рис. 3,

кривая 3). В точке 0 по оси толщин показано значение G для необработанной подложки c-Si без пленки a-Si:H. Для сравнения приведены данные о таких структурах, полученных без предварительной обработки (рис. 3, кривая 1).

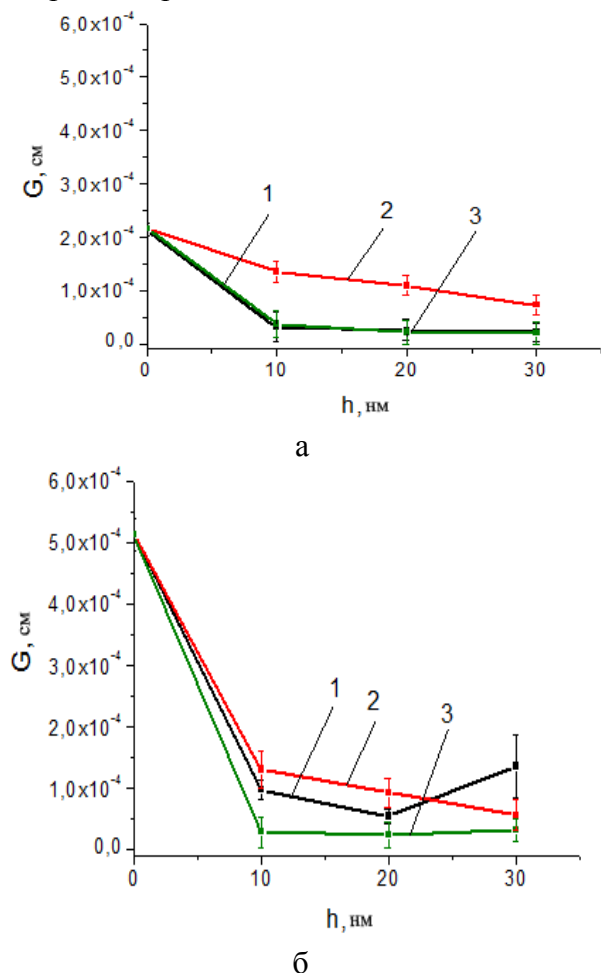


Рис. 3. Зависимости поперечной электропроводности структур a-Si:H/c-Si на подложке монокристаллического кремния (а – р-тип проводимости, б – n-тип проводимости) от толщины подслоя a-Si:H и вида предварительной плазменной обработки пластин c-Si: 1 – без обработки; 2 – обработка в CF₄; 3 – обработка в Ar.

Можно заметить, что для образцов, осажденных после обработки в плазме Ar, G в 3-5 раз меньше, чем для образцов после обработки в плазме CF₄, а для структур на кремнии р-типа, обработанных в аргоне и без обработки, зависимости проводимости от толщины почти полностью совпадают. При этом толщина осажденного слоя a-Si:H влияет на проводимость структуры только в случае обработки подложки в хладоне,

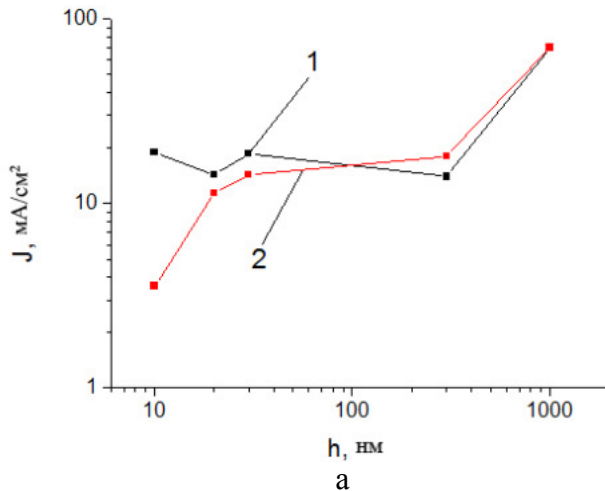
для структур обработанных в аргоне проводимость практически не зависит от толщины слоя a-Si:H.

Известно, что ионно-плазменная обработка поверхности в плазме Ar осуществляется преимущественно за счет физического распыления материала [9]. Такое воздействие на монокристалл кремния является причиной аморфизации поверхностного слоя и существенного повышения его химической активности, приводящей к окислению кремния кислородом остаточной атмосферы. Так, после непродолжительной обработки подложки c-Si в плазме Ar толщина окисного слоя может составлять 3-5 нм, что в 3-5 раз больше естественного окисла [10]. Кроме того, в приповерхностном слое монокристалла происходит вытеснение атомов легирующей примеси из узлов решетки в электрически неактивное междоузельное положение, что приводит к дополнительному снижению электропроводности.

В отличие от обработки в плазме Ar, плазмохимическая обработка монокремния в плазме CF₄ не приводит к повышению химической активности поверхности кремния, очищенного от окисла. Это обусловлено тем, что разложение CF₄ в плазме приводит к образованию радикалов CF₃, способных образовать полимерную пленку на обрабатываемых поверхностях [10]. Такая пленка будет препятствовать окислению очищенной поверхности атомами кислорода остаточной атмосферы. Снижение влияния окисного слоя увеличивает обнаруженную нами электропроводность структуры a-Si:H/c-Si (кривая 2 на рис. 3). В этом случае полноценное удаление естественного окисного слоя с помощью CF₄ приводит к выраженным последствиям и позволяет экспериментально увидеть влияние толщины аморфного кремния a-Si:H на параметры автоэмиссии.

На подложки кремния, подготовленные плазменной обработкой в различных газовых средах, проведено осаждение алмазографита и исследованы АЭ характеристики. На рис. 4 приведены значения максимальной достигнутой плотности токов в зависи-

мости от толщины слоя a-Si:H на подложках р-типа (рис. 4 а) и п-типа (рис. 4 б). Для сравнения в точке 1000 нм оси толщин



пленки a-Si:H указано среднее значение плотности токов эмиссии для АГ пленок на стекле.

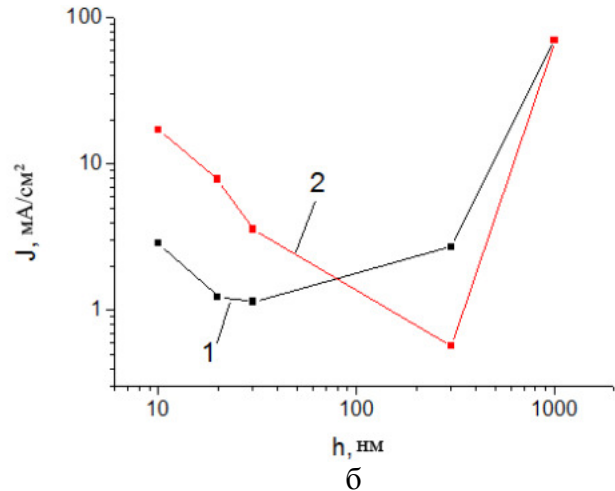


Рис. 4. Зависимость плотности тока автоэмиссии от толщины слоя a-Si:H, осажденного на подложку монокристаллического кремния р- типа а) и п-типа б), предварительно обработанного в плазме аргона - 1 и хладона - 2.

Несмотря на то, что измеренные АЭ токи существенно ниже токов, снятых со стеклянной подложки, изготовленные АЭ катоды более качественны, чем полученные на слое оксида индия, и позволяют получать стабильную эмиссию. Обнаружено, что предварительная обработка подложки с-Si в Ag для обоих типов проводимости (рис.4 а, б, кривая 1) приводит к получению катодного материала, который не позволяет отметить однозначного монотонного изменения плотности АЭ тока с ростом толщины подслоя из a-Si:H. Для всех толщин a-Si наблюдаются близкие значения плотности тока, но для подложек р-типа среднее значение выше. После предварительной обработки пластин кремния в CF_4 рост толщины аморфного кремния на подложке р-типа сопровождается монотонным ростом плотности АЭ тока, а для п-типа, напротив, его плавное убывание (рис.4 а, б, кривая 2).

Измеренную электропроводность подложек (рис.3) и плотность АЭ тока (рис. 4) можно связать между собой. На рис.5 представлена зависимость плотности АЭ тока от электропроводности G с подложек монокремния р- и п- типа и подслоя из a-Si:H, нанесенного после обработки в аргоне либо в хладоне. Видно, что характер зависимостей существенно различается для р- и п-

типов подложки. Так, для п- типа электропроводность и плотность АЭ тока возрастают одновременно, но для р-типа, напротив, плотность АЭ тока падает с ростом электропроводности.

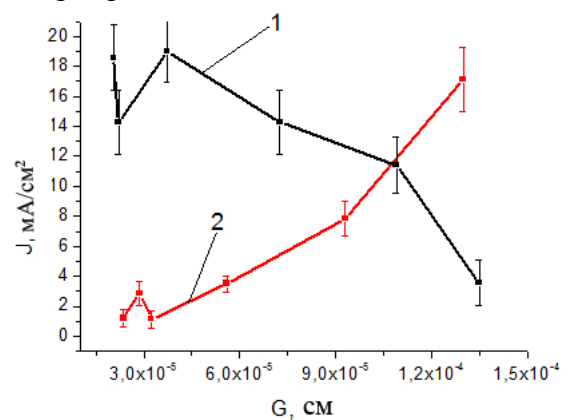


Рис. 5. Взаимосвязь поперечной электропроводности подслоя и плотности тока АЭ эмиссии АГ пленки, осажденной на поверхность структур a-Si:H/c-Si: 1 – подложка р-тип; 2 – подложка п-тип

Показанное на р-типе пластин кремния (рис.5, кривая 1) убывание плотности АЭ тока с ростом поперечной электропроводности структуры подложки согласуется с данными об убывании плотности тока при возрастании электропроводности металлодиэлектрика, осажденного на оксид индия с подложкой из стекла (рис.2).

Ухудшение АЭ параметров отмечалось и при нанесении тонкого (около 1 нм) подслоя из никеля на стекло, что также увеличивало электропроводность исходной подложки перед нанесением углерода. Подобное снижение плотности АЭ тока объясняется ухудшением условий формовки эмиссионных центров [3]. Это связано с тем, что в рассматриваемых нами структурах, доставка электронов к центрам эмиссии может обеспечиваться электропроводностью через массивную подложку либо электропроводностью вдоль углеродной электропроводной пленки. Следовательно, если используется подложка р-типа, где электроны – это неосновные носители заряда, то протекание АЭ токов происходит преимущественно по углеродной пленке так же, как и при использовании диэлектрических подложек. В таком случае на диэлектрических подложках и на с-Si р-типа реализуются похожие механизмы формирования эмиссионных центров за счет протекания электронных токов по углеродной пленке. Однако при использовании подложек из с-Si n-типа (рис. 5, кривая 2), где преимущественное протекание электронного тока происходит через подложку, а не вдоль углеродной пленки, обнаруживается иной характер за-

висимости плотности АЭ тока от электропроводности подложки. В такой эмиссионной структуре формирование эмиссионных центров происходит по иным механизмам.

Итак, обнаружены существенные различия АЭ на подложках с-Si разного типа проводимости. Для кремния n-типа проводимости поперечная электропроводность катодной гетероструктуры и плотность АЭ тока возрастают одновременно, но для р-типа плотность АЭ тока падает с ростом электропроводности. Это свидетельствует о различном механизме формирования токовых нагрузок эмиссионных центров в катодной структуре в зависимости от схемы преимущественного токоподвода электронного тока: в поперечном направлении относительно углеродной пленочной гетероструктуры или в продольном.

Наилучшими автоэмиссионными характеристиками обладают катодные гетероструктуры на кремнии с адгезионным подслоем аморфного кремния. Установлено, что предварительная обработка кремния в СВЧ плазме в атмосфере CF_4 улучшает по сравнению с обработкой в плазме аргона автоэмиссионную способность полученных катодов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Фурсей Г.Н.** Автоэлектронная эмиссия / Г.Н. Фурсей. - СПб.: Лань, 2012. - 320 с.
2. **Алехин А.А.** Тонкая структура углеродородных пленок, полученных в плазме микроволнового газового разряда низкого давления / А.А. Алехин, С.Ю. Суздальцев, Р.К. Яфаров // ПЖТФ, 2003. - 29 (15). - С.73.
3. **Суздальцев С.Ю.** Метод получения углеродных нановолокон из алмазографитовой композитной пленки / С.Ю. Суздальцев, Д.В. Нефедов, К.Н. Огурцов, А.М. Буров // ПЖТФ, 2011. - 37 (18). - С 37-43.
4. **Кульбацкий Д.М.** Влияние режима синтеза в неравновесной плазме СВЧ газового разряда на фундаментальные свойства наноразмерного пленочного кремния и его соединений / Д.М. Кульбацкий, Д.В. Нефедов, С.И. Семенов, Р.К. Яфаров // Вестник СГТУ, 2007, - №4 (29), - вып. 2, - С. 121-128.
5. **Чопра К.Л.** Электрические явления в тонких пленках / К.Л. Чопра. - М.: Мир, 1972. - 426 с.
6. **Калинин Ю.Е.** Электрические свойства аморфных нанокмозитов $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{1-x}$ / Ю.Е. Калинин, А.Н. Ремизов, А.В. Ситников // ФТТ, 2004. - 46 (11). - С. 2076.
7. **Waser R.** Nanoionics-based resistive switching memories / R. Waser, M. Aono // Nature materials, 2007. - V. 6, - С. 833-840.
8. **Суздальцев С.Ю.** Микротопография

и автоэмиссионные свойства углеродных пленок, полученных в плазме микроволнового газового разряда / С.Ю. Суздальцев, Р.К. Яфаров // ФТТ, 2004. – 46 (2). – С. 367.

9. **Галперин В.А.** Процессы плазменного травления в микро- и нанотехнологиях: учебное пособие / В.А. Галперин. - М.: БИНОМ, Лаборатория знаний, 2010. – 283 с.

10. **Данилин Б.С.** Вакуумные технологические процессы и оборудование микроэлектроники / Б.С. Данилин. -М.: Машиностроение, 1987. -72 с.

Гуляев Юрий Васильевич – доктор физико-математических наук, член президиума РАН, академик РАН, директор Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Яфаров Равиль Кяшшафович – доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией «Субмикронная электронно-ионная технология» Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Шаныгин Виталий Яковлевич – старший инженер лаборатории электронно-ионной субмикронной технологии Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Нефедов Денис Владимирович – кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории «Субмикронная электронно-ионная технология» Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Суздальцев Сергей Юрьевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории «Субмикронная электронно-ионная технология» Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Yuri V. Gulyayev – Dr.Sc., Professor, member of the Presidium the Russian Academy of Sciences, academician of the Russian Academy of Sciences, Director: Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences

Ravil K. Yafarov – Dr.Sc., Head: Laboratory of Submicron Technologies, Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences (Saratov branch)

Vitalii Y. Shanygin – Senior Engineer at the Laboratory of Submicron Technologies, Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences (Saratov branch)

Denis V. Nefedov – PhD, Researcher at the Laboratory of Submicron Technologies, Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences (Saratov branch)

Sergey Yu. Suzdaltsev – PhD, Senior Researcher at the Laboratory of Submicron Technologies, Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences (Saratov branch)

Статья поступила в редакцию 12.03.14, принята к опубликованию 30.03.14

КИНЕТИКА СТРУКТУРИРОВАНИЯ СУБМОНОСЛОЙНЫХ УГЛЕРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ НА КРИСТАЛЛАХ КРЕМНИЯ (100) ПРИ СВЧ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННОМ ОСАЖДЕНИИ

Р.К. Яфаров, В. Я. Шаныгин

KINETICS OF STRUCTURING SUB-MONOLAYER CARBON COATINGS ON SILICON CRYSTALS (100) UNDER MICROWAVE VACUUM PLASMA DEPOSITION

Rk. Yafarov, Vy. Shanygin

Впервые с использованием методов сканирующих атомно-силовой и электронной микроскопии зафиксирована кинетика самоорганизации наноразмерных доменов при осаждении субмонослойных углеродных покрытий на кремнии (100) в СВЧ плазме паров этанола низкого давления. Исследовано влияние кинетической энергии углеродосодержащих ионов на кинетику структурирования углеродных кластеров на атомно-чистой поверхности кристаллов кремния (100). Показано, что полученные наноразмерные углеродсодержащие домены могут быть использованы в качестве масочных покрытий для получения с использованием высокоанизотропного плазмохимического травления пространственных низкоразмерных систем на монокристаллическом кремнии (100).

Ключевые слова: углеродное покрытие, СВЧ плазма, кремний

Актуальной задачей современного полупроводникового материаловедения является разработка новых методов создания квантово-размерных систем на основе кремния и его соединений. Благодаря им преодолена трудность использования кремния из-за низкой вероятности излучательной рекомбинации, обусловленной запретом на прямые переходы носителей в процессе рекомбинации, в качестве световых излучающих полупроводниковых прибо-

The methods of scanning atomic force microscopy and electron microscopy were first applied to detect the kinetic effect and the self-organization process for nanoscale domains under the deposition of sub-monolayer carbon coatings on the silicon (100) in the microwave plasma ethanol vapor of low pressure. The impact of the kinetic energy in carbon-containing ions on the kinetics of carbon cluster structures over atomically clean surface of silicon crystals (100). It is shown that nano-sized carbon-containing domains can serve as masked coatings in fabrication of spatial low-dimensional systems on the single-crystal silicon (100) based on highly anisotropic plasma chemical etching.

Keywords: carbon coating, microwave plasma, silicon

ров в фотоэлектронике, и, тем самым, получен новый импульс его широкого применения в опто- и микроэлектронике.

Основными методами, используемыми при создании квантово-размерных структур в микро- и наноэлектронике, являются молекулярно-лучевая эпитаксия и осаждение из газовой фазы. Эти методы основываются на получении планарных гетероструктур с относительно высокой разностью параметров решеток пленки и подложки.

Последующая релаксация упругих напряжений вблизи свободной поверхности способствует спонтанному образованию поверхностных 3D-наноструктур. Такой процесс получил название самоорганизации в процессе роста. Созданные квантово-размерные системы обеспечили существенное повышение функциональных характеристик электронных и оптических приборов, а также сенсоров. Так, в области оптоэлектроники наноструктуры обеспечивают более низкие пороговые токи, повышают быстродействие и обеспечивают более узкий спектр излучения в лазерах на квантовых точках. Наноструктурированные сенсоры обеспечивают рекордные селективность и чувствительность и т. д. К сожалению, достигнутый на сегодня уровень поверхностной плотности самоорганизованных квантовых точек составляет всего $10^9 - 10^{10} \text{ см}^{-2}$. Их максимальная объемная плотность также очень мала ($10^{15} - 10^{16} \text{ см}^{-3}$), что не обеспечивает необходимого уровня эффективности приборов, созданных на их основе.

Не менее актуальным в настоящее время является разработка методов создания пространственно упорядоченных квантово-размерных структур, представителями которых являются фотонные кристаллы и нанокомпозитные материалы. Наиболее распространенные сегодня подходы к решению этой задачи заключаются в использовании пористого кремния. Важным фактором, определяющим свойства таких наноматериалов, является влияние матрицы и среды нахождения объектов с размерно-зависимыми свойствами. На их основе возможно создание различных нелинейных оптических наносистем для оптических преобразователей, получение светоперестраиваемых диодов и лазеров с изменением длины волны и др.

В настоящее время известно [1], что одним из основных управляющих факторов, способствующих упорядочению 3D-островков при создании квантово-размерных систем, как по размерам, так и по их пространственному распределению, является наноморфология поверхности, на

которой эти островки формируются. Одним из путей управления параметрами поверхности является литография: создание окон на подложке, ограничивающих область сбора адатомов в островок и отделяющих островки друг от друга. Однако существующие литографические методы высокого разрешения обладают недостатками, которые ограничивают область их использования экспериментальными исследованиями. Это низкая производительность и высокая стоимость, что делает их недоступными для широкого круга исследователей. Поэтому все большее внимание исследователей привлекают процессы самоорганизации при создании массочных наноструктур с использованием атомной структуры чистых поверхностей полупроводниковых кристаллов. Получение равновесных массивов трехмерных островков нанометровых размеров инородных материалов со сверхвысокой поверхностной плотностью и последующее их использование в качестве самоорганизованных массочных покрытий для высокоразрезающего травления не только открывают широкие возможности создания упорядоченных нанообъектов на поверхности и в объеме кристалла без применения литографических методов [2], но и вносят новое понимание в структурные процессы на поверхности кристаллов. Особенности строения решетки и наноморфологии поверхности монокристаллов являются факторами, которые могут обеспечить управление процессами зарождения и роста низкоразмерных эпитаксиальных структур, плотностью стоков для адатомов. Таким образом, использование свойств наноморфологии атомно-чистых поверхностей кристаллов различных кристаллографических ориентаций открывает возможности для создания принципиально новых двух- и трехмерных квантово-размерных систем.

В связи с этим целью работы является исследование кинетики структурирования субмонослойных углеродных покрытий на кристаллах кремния (100) для создания пространственных квантово-размерных систем путем использования высокораз-

решающего плазмохимического травления и самоорганизующихся островковых масочных покрытий суб-10 нм размера.

Эксперименты, связанные с получением атомно-чистых поверхностей кристаллов кремния (100) осаждением субмонослойных углеродных покрытий и высокоанизотропным сухим травлением кремния с использованием полученных покрытий в качестве масочных, проводились в одном вакуумном технологическом цикле в установке с СВЧ ионно-плазменным источником на частоте 2,45 ГГц [3]. Мощность СВЧ излучения и индукция магнитного поля составляли, соответственно, 250 Вт и 875 Гс. В качестве рабочего газа для получения атомно – чистой поверхности кристаллов кремния использовался аргон, травление пластин монокристаллического кремния с углеродным масочным покрытием осуществлялось в хладоне-14. Давление газов в процессах подготовки поверхности и сухого высокоанизотропного травления кремния было равным 0,1 Па и обеспечивало выполнение условий электронного циклотронного резонанса (ЭЦР), при котором степень ионизации плазмы составляла около 5%.

В результате ранее проведенных исследований определены оптимальные режимы подготовки поверхностей монокристаллического кремния под осаждение углеродных пленок [4]. Показано, что наилучшие морфологические характеристики атомно-чистой поверхности кремния достигаются при СВЧ плазменной обработке в аргоне со смещением -100 В в течение 5 мин. В этом случае разброс высот Δh микровыступов поверхности является минимальным и составляет около 0,2 нм. Этот режим подготовки поверхности кремния был использован и в настоящей работе.

Осаждение углеродных покрытий осуществлялось в СВЧ плазме с использованием в качестве рабочего вещества паров этанола. Температуры осаждения варьировались в диапазоне от 100⁰С до 300⁰С с интервалом 100⁰С. Потенциал смещения на подложкодержателе в процессе осаждения изменялся в диапазоне от -100 до – 300 В.

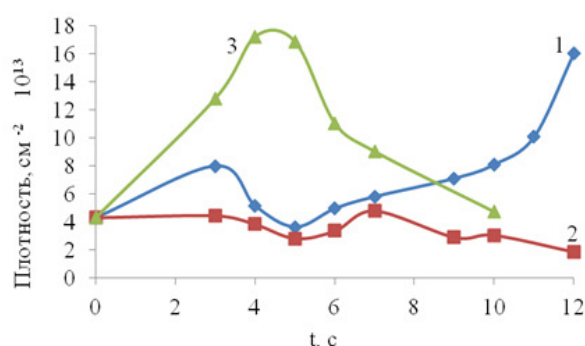
Осаждение осуществлялось в условиях малой адсорбции при давлении паров этанола около 0,05 Па.

Наноморфология поверхностей пластин изучалась с помощью сканирующих атомно-силового (АСМ) и электронного микроскопов Solver-P-47 и Auriga. В качестве зонда для АСМ использовались стандартные кремниевые кантилеверы CSG10 пирамидальной формы с радиусом закругления 10 нм и жесткостью 0,1Н/м. Поле сканирования составляло 3 x 3 мкм при шаге сканирования 8 нм и шаге ЦАП пьезосканера по оси Y равном 0,24 нм. Схема регистрации отклонения кантилевера обеспечивает разрешение 0,1 нм при шаге АЦП пьезосканера по оси Z равном 0,05 нм. Обработка результатов измерений производилась с использованием программного обеспечения этого микроскопа.

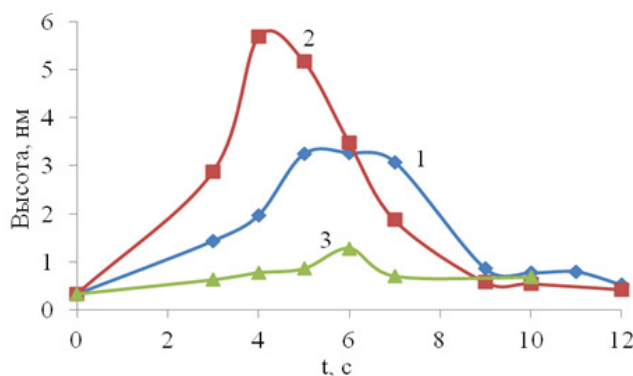
На рис. 1 приведены кинетические зависимости параметров наноморфологии кремния (100) после осаждения углерода в СВЧ плазме паров этанола при температуре подложки $T_n = 100^{\circ}\text{C}$ и различных напряжениях смещения на подложкодержателе. На этом и последующих рисунках значениям координат при $t = 0\text{с}$ соответствуют плотности и высоты микровыступов на кремниевых пластинах после их предварительной микрообработки в СВЧ плазме аргона при $U_{cm} = -100\text{В}$ в течение 5 минут. Для $U_{cm} = -100\text{В}$ (кривые 1) зависимость плотности микровыступов от длительности осаждения имеет два участка роста, разделенные между собой областью, в которой они находятся на уровне исходной (без осаждения углерода) плотности выступов поверхности кремния. В интервале длительностей осаждения от 5 до 7 с высоты выступов имеют один максимум, после чего они уменьшаются и при $t > 9\text{с}$ достигают постоянных значений, аналогичных тем, что были до осаждения углерода, а плотность выступов растет по степенному закону. Экстремумы плотностей и высот выступов реализуются в практически одинаковых интервалах длительности процессов осаждения углерода, которые находятся между 4 и 7с.

Соответствующие АСМ изображения наноморфологии поверхностей углеродных покрытий, осажденных в СВЧ плазме

паров этанола на кремний (100) при $T_{\text{п}} = 100^{\circ}\text{C}$ и $U_{\text{см}} = -100\text{В}$ и различных длительностях процессов, приведены на рис. 2.

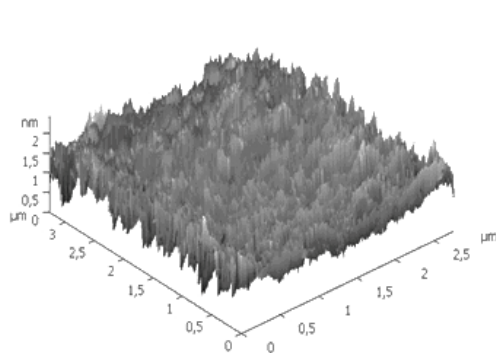


а

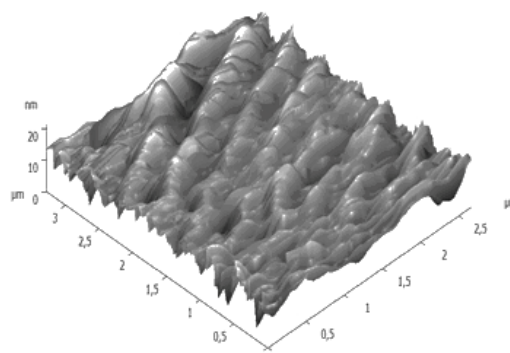


б

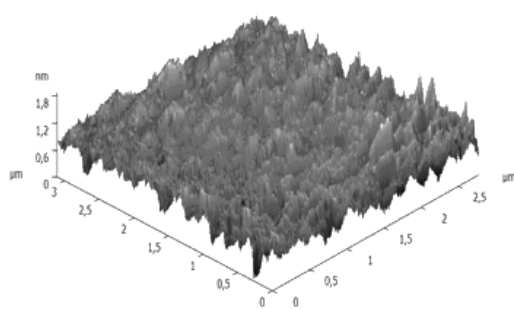
Рис. 1. Зависимости плотностей (а) и высот микровыступов (б) от длительности осаждения углерода на пластины кремния (100) при $T_{\text{п}} = 100^{\circ}\text{C}$ и различных смещениях на подложкодержателе: 1- $U_{\text{см}} = -100\text{В}$, 2- $U_{\text{см}} = -200\text{В}$, 3- $U_{\text{см}} = -300\text{В}$



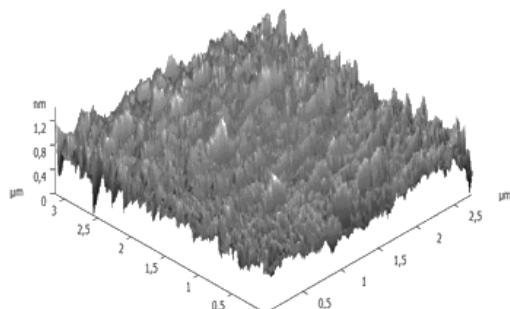
а



б



в



г

Рис. 2. АСМ - изображения поверхностей субмонослойных углеродных покрытий, осажденных на кремний (100) при $T_{\text{п}} = 100^{\circ}\text{C}$, $U_{\text{см}} = -100\text{В}$ и различных длительностях процесса: а – 3с, б – 5с, в – 9с, г – 12с.

При $U_{\text{см}} = -200\text{В}$ для плотностей выступов при большой длительности осаждения углерода наблюдается небольшой экстре-

мум с последующим уменьшением. Другим принципиальным различием зависимостей для $U_{\text{см}} = -100\text{В}$ и $U_{\text{см}} = -200\text{В}$ явля-

ется то, что экстремум высот выступов в последнем случае является более острым, большим по величине почти в 2 раза и реализуется он при меньших длительностях осаждения равных 4-5с (рис. 1 б). Сдвиг длительностей с экстремумами высот в меньшую сторону составляет около 2с.

При увеличении смещения до -300В (кривые под номером 3) на зависимости для плотностей выступов наблюдается один ярко выраженный максимум, величина которого в 2-4 раза больше по сравнению с режимами с меньшими $U_{см}$. Максимум реализуется при длительностях осаждения 4-5с, после которого происходит достаточно быстрое уменьшение плотности до величины, равной плотности микровыступов на пластине кремния после ее травления в плазме аргона. Высоты микровыступов для всех длительностей осаждения остаются практически одинаковыми и близкими к высоте микровыступов на исходной пластине кремния. Это свидетельствует о практически послойно-равномерном осаждении углеродного покрытия в течение всех длительностей процессов.

На рис. 3 приведены зависимости, ха-

рактеризующие кинетику изменения наноморфологии поверхности кремния (100) с осажденным углеродным покрытием при температуре подложки $T_{п} = 200^{\circ}\text{C}$ и различных напряжениях смещения на подложкодержателе. Видно, что для $U_{см} = -100\text{ В}$ при коротких длительностях осаждения (3-4с) плотности выступов, в отличие от более низкой температуры осаждения, не увеличиваются с увеличением длительности процессов, а уменьшаются. Резкий рост плотностей наблюдается при длительности осаждения 5-6 с, после чего они вновь уменьшаются по степенному закону и при длительности больше 7с стабилизируются на уровне, близком к плотности выступов на исходной кремниевой пластине. Нарастание высот выступов с увеличением длительности осаждения происходит более интенсивно, чем при $T_{п} = 100^{\circ}\text{C}$, однако их максимальная величина не изменяется. В обоих случаях она не превышает 3,5нм. Следует отметить, что резкий рост плотности и резкий спад высот выступов реализуются одновременно. Спад высот и их стабилизация при $T_{п} = 200^{\circ}\text{C}$ начинаются при длительности больше 4 с, что на 3 с раньше, чем при $T_{п} = 100^{\circ}\text{C}$.

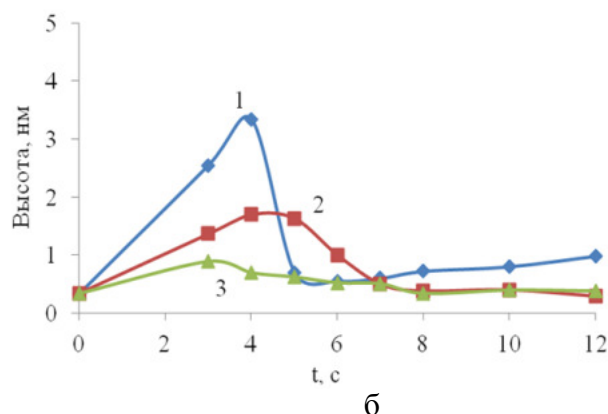
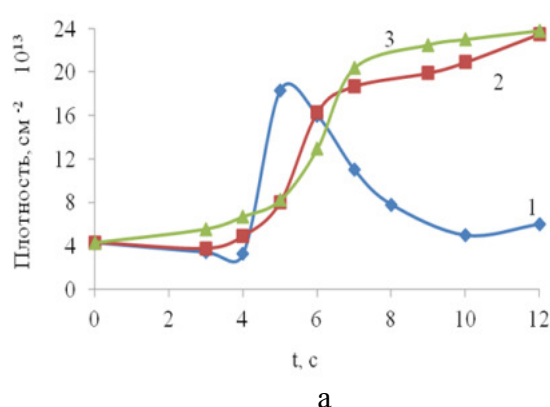


Рис. 3. Зависимости плотностей (а) и высот микровыступов (б) от длительности осаждения углерода на пластины кремния (100) при $T_{п} = 200^{\circ}\text{C}$ и различных смещениях на подложкодержателе: 1- $U_{см} = -100\text{ В}$, 2- $U_{см} = -200\text{ В}$, 3- $U_{см} = -300\text{ В}$

При увеличении смещения до $U_{см} = -200\text{ В}$ плотности выступов при длительности осаждения больше 3с монотонно увеличиваются с точкой перегиба около 7с. Скорость увеличения высот и их абсолютные значения меньше, чем при $U_{см} = -100\text{ В}$.

Экстремум высот неровностей покрытия реализуется позже. Однако участки наиболее резкого роста плотностей выступов и спада высот реализуются, как и в предыдущем случае, практически одновременно, но с задержкой на 1 с.

При увеличении $U_{\text{см}}$ до -300В характер зависимостей по сравнению с предыдущим случаем практически не изменяется. Отличием является то, что при длительности больше 7с плотности выступов выходят практически на насыщение. Насыщение реализуется при плотностях выступов порядка $2,4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, что весьма близко к предельной расчетной поверхностной плотности ненасыщенных связей на кремнии (100). Высоты выступов, хотя и повторяют ход зависимостей для $U_{\text{см}} = -200\text{В}$, но остаются на уровне высот выступов исходной пластины, т. е., так же как при $T_{\text{п}} = 100^\circ\text{C}$ наблюдается практически послойное осаждение углеродного покрытия для всех длительностей процессов.

На рис. 4 приведены кинетические параметры наноморфологии пластины крем-

ния (100) с осажденным углеродом при температуре подложки $T_{\text{п}} = 300^\circ\text{C}$ и различных напряжениях смещения на подложкодержателе. Видно, что характер зависимостей в целом сохраняется таким же, как и при более низких температурах подложек. Однако при $T_{\text{п}} = 300^\circ\text{C}$ поверхностные плотности и высоты выступов в $1,5 - 2$ раза меньше, чем при осаждении углеродного покрытия на более холодные подложки, т. е. они являются более гладкими и менее напряженными, что соответствует классическим представлениям о изменении размеров кристаллитов, полученных конденсацией из газовой фазы при увеличении температуры подложки. Максимумы высот реализуются при длительности осаждения на $2-3\text{с}$ меньше, чем при осаждении с более низкими температурами.

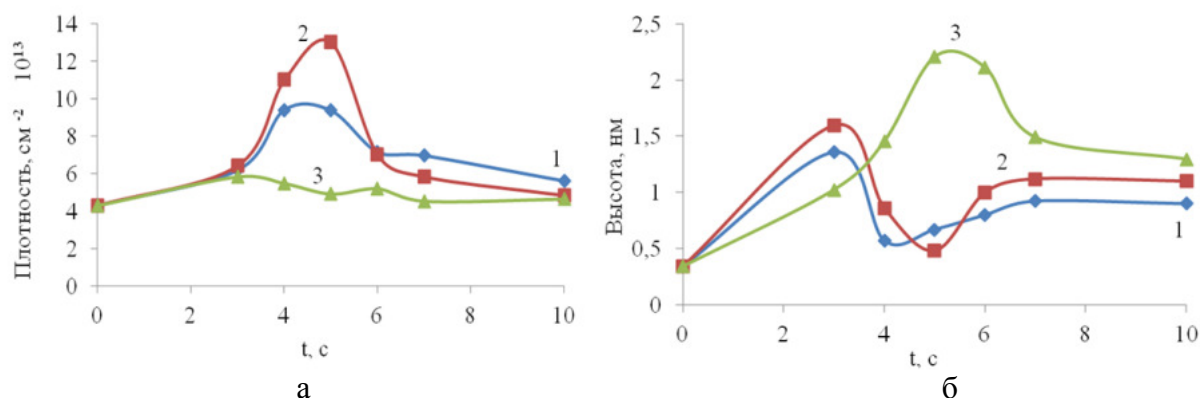


Рис. 4. Зависимости плотностей (а) и высот микровыступов (б) от длительности осаждения углерода на пластины кремния (100) при $T_{\text{п}} = 300^\circ\text{C}$ и различных смещениях на подложкодержателе: 1- $U_{\text{см}} = -100\text{В}$, 2- $U_{\text{см}} = -200\text{В}$, 3- $U_{\text{см}} = -300\text{В}$

При вакуумно-плазменном осаждении из паров этанола в условиях малой адсорбции формирование углеродных покрытий на кристаллах кремния может осуществляться только в результате разложения и активации молекул и атомов паров этанола (структурная формула $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ или $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-OH}$), которые происходят за счет соударения с ускоренными электромагнитным полем электронами, и последующей адсорбции углеродосодержащих ионов на подложке. Поток таких ионов в течение 1с при условии, что все они однозарядные, может быть определен из выражения:

$$I_+ = \alpha \frac{J}{q}, \quad (1)$$

где J – измеряемая плотность тока однозарядных ионов на подложку, q – заряд электрона, α – доля углеродосодержащих ионов в общем потоке ионов на подложку, которая, исходя из парциального состава плазмы паров этанола, составляет величину близкую к $0,5$. Величина J определяется характеристиками плазмы и величиной ускоряющего потенциала на подложкодержателе.

Согласно модели адсорбции Ленгмюра [6] скорость адсорбции R можно представить как произведение потока адсорбции

углеродосодержащих ионов на их коэффициент прилипания s :

$$R = s I_{c+}, \quad (2)$$

где I_{c+} - поток адсорбции углеродосодержащих ионов.

Общее выражение для коэффициента прилипания в случае активационной адсорбции записывается согласно [6] как:

$$s = \sigma f(\theta) \exp(-E_a / kT), \quad (3)$$

где σ - коэффициент конденсации, который отвечает за передачу энергии адсорбированных частиц; $f(\theta)$ - функция, зависящая от покрытия, которая описывает вероятность адсорбата найти свободное адсорбционное состояние; $\exp(-E_a / kT)$ - величина, обусловленная энергетикой активационной адсорбции.

Из приведенных выражений следует, что температурная зависимость коэффициента прилипания, представленная в (3), может определяться только температурной зависимостью скорости адсорбции, которая в каждый момент времени зависит от поверхностной концентрации хемосорбированных атомов (кластеров) углерода на кремнии. И обратно, экспериментальная зависимость поверхностной плотности

кремний-углеродных кластерных образований от температуры подложки с точностью до некоторого постоянного коэффициента (потока адсорбции углеродосодержащих ионов) будет определять зависимость коэффициента прилипания от температуры.

На рис. 5 на основании экспериментальных данных приведенных на рис. 1, 3, 4, построены зависимости коэффициентов прилипания, определенных согласно (2) отношением поверхностной плотности хемосорбированных кластеров к плотности потока адсорбции, от температуры пластин кремния при осаждении углерода из паров этанола при различных смещениях на подложкодержателе и длительности процессов. Из рис. 5 а видно, что для $U_{см} = -200$ В при короткой длительности осаждения (3с) коэффициенты прилипания от температуры подложки не зависят. При длительности 4-5с наблюдается линейная зависимость s от T с коэффициентами пропорциональности, которые от длительности осаждения практически не зависят. При длительности осаждения больше 5 с зависимости имеют максимумы при $T_p = 200^\circ\text{C}$. Величина коэффициентов прилипания в максимумах тем больше, чем больше длительности осаждения.

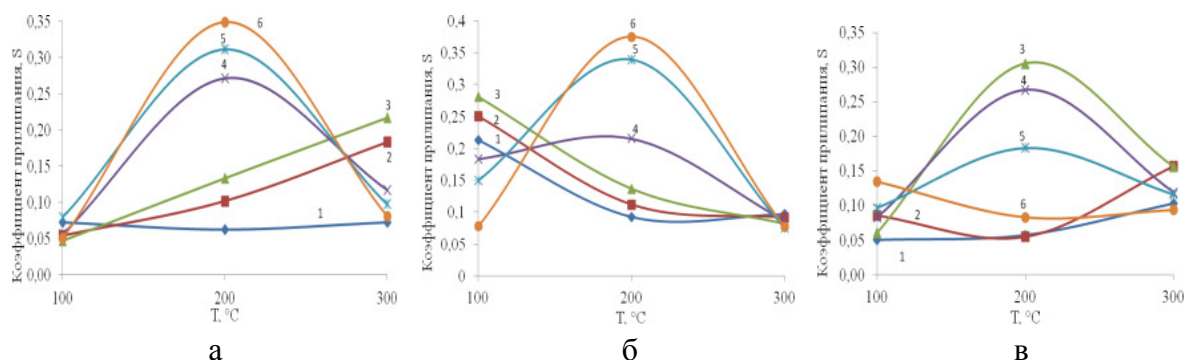


Рис. 5. Зависимости коэффициентов прилипания от температуры пластин кремния для $U_{см} = -200$ В (а), $U_{см} = -300$ В (б) и $U_{см} = -100$ В (в) и различных длительностях осаждения углерода из паров этанола: 1- 3 с; 2- 4 с; 3- 5 с; 4- 6 с; 5- 7 с; 6- 10 с

При увеличении температуры подложки в процессе осаждения атомы (или молекулы) адсорбата получают от тепловых колебаний решетки энергию, которой может быть достаточно для того, чтобы уйти из адсорбционной потенциальной ямы и

покинуть поверхность. Однако вероятность этого процесса при низкотемпературном СВЧ плазменном осаждении углерода на кремний крайне мала, так как при изменении T_p в интервале от 100 до 300°C $E_{des} \gg kT_p$. Другими результатами увели-

чения температуры подложки является усиление генерации углеродных атомов за счет термической диссоциации адсорбированных углеродосодержащих радикалов на поверхности, что эквивалентно увеличению пересыщения (скорости осаждения), и поверхностной миграции адсорбированных частиц. Частота перескоков атомов из одного адсорбционного состояния в другое может быть представлена в виде [5]:

$$\gamma = \gamma_0 \exp(-E_{\text{diff}}/kT), \quad (4)$$

где γ_0 – частота колебаний атома в потенциальной яме; E_{diff} – энергия активации диффузии. $E_{\text{diff}} \ll E_{\text{des}}$ (обычно $E_{\text{diff}} = (0,05 - 0,2)E_{\text{des}}$). Для хемосорбированных частиц $E_{\text{diff}} \gg kT_{\text{п}}$. Это означает, что хемосорбированные углеродосодержащие частицы не участвуют в перемещении по поверхности кремния.

Таким образом, количество центров зародышеобразования новой углеродосодержащей фазы в виде хемосорбированных на кремнии Si – C $\equiv$ – кластеров с увеличением температуры подложки может только увеличиваться из-за увеличения пересыщения. Это приводит к наблюдаемому в экспериментах сокращению длительности стадии хемосорбции по сравнению с осаждением на подложки при более низких температурах.

Согласно модели адсорбции Лэнгмюра [5] изменение характера зависимостей коэффициентов прилипания от температуры свидетельствует о изменении механизмов хемосорбции. Так, при короткой длительности осаждения (3с) согласно модели Лэнгмюра, имеет место простая неактивационная адсорбция, при которой коэффициенты прилипания не зависят от температуры (рис.5 а). При длительности 4-5с наблюдается активационная хемосорбция из прекурсорного состояния, которая обуславливается ударами углеродосодержащих ионов о поверхность кремния с последующей диссоциацией и переходом в хемосорбированное состояние.

Возрастание коэффициентов прилипания s с увеличением длительности осаждения

может свидетельствовать о том, что лимитирующим фактором в этих процессах является поступление частиц на поверхность: чем больше длительность процесса и концентрация поступивших на поверхность кремния адатомов, тем большее количество частиц перейдет в хемосорбированное состояние при данной температуре. Спад коэффициентов прилипания при $T_{\text{п}} > 200^{\circ}\text{C}$ для длительности осаждения больше 5 с обусловлен изменением механизма от активационной хемосорбции с активационным барьером (рис. 6 а) на безактивационную хемосорбцию (рис. 6 б). Переход от одного механизма адсорбции к другому осуществляется при $t_{\text{ос}}$ осаждения с $s \approx 0,28$. На кинетических зависимостях (рис. 3) при этом наблюдаются скачкообразные рост поверхностной плотности выступов и снижение их высот. Максимальный коэффициент прилипания реализуется при длительности осаждения 10 с и составляет 0,35. Из рис. 5б, на котором построены температурные зависимости коэффициентов прилипания адатомов углерода при $U_{\text{см}} = -300$ В, видно, что при коротких длительностях осаждения, по сравнению с $U_{\text{см}} = -200$ В, основным является безактивационный механизм хемосорбции из прекурсорного состояния, который характеризуется уменьшением коэффициента прилипания с увеличением температуры (рис. 6 б). Так, при малых (3-5с) длительностях осаждения (малых заполнениях поверхности) наблюдается не повышение, как при $U_{\text{см}} = -200$ В, а уменьшение коэффициентов прилипания с увеличением температуры во всем исследованном интервале ее изменения. Уменьшение коэффициентов прилипания с увеличением температуры больше 200°C наблюдается и при длительностях осаждения от 6 до 10с с тем большим активационным барьером $E_{\text{акт}}$, чем больше концентрация поступивших на поверхность активных частиц и, соответственно, больше заполнение поверхности.

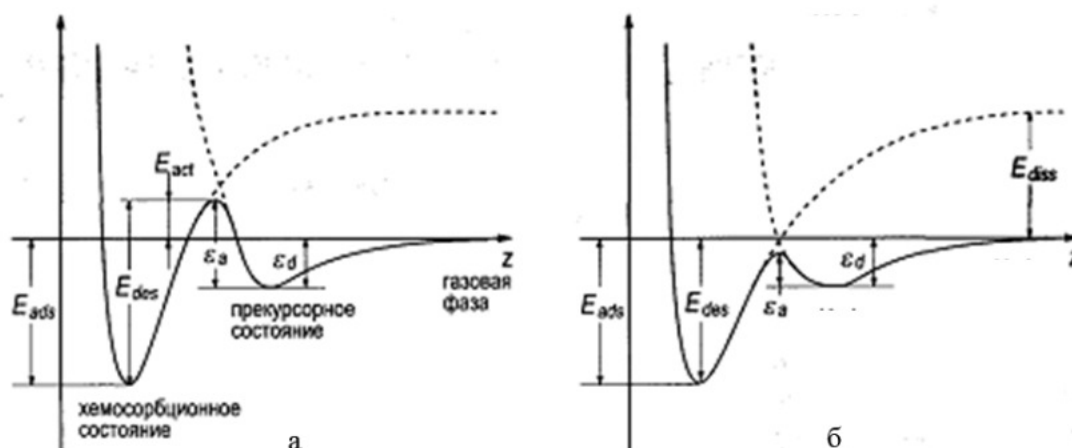


Рис. 6. Схематическое изображение кривых потенциальной энергии для прекурсорной хемосорбции [5]: а – активационная хемосорбция с активационным барьером $U_{act} = \epsilon E_{act} - \epsilon_a - \epsilon_d$; б – безактивационная хемосорбция, когда $\epsilon_a < \epsilon_d$. E_{act} – энергия связи в хемосорбированном состоянии, E_{des} – барьер для десорбции из хемосорбированного состояния, E_{dis} – энергия диссоциации (ионизации) молекулы в газовой фазе

Увеличение коэффициентов прилипания при $T_{п} = 100^{\circ}\text{C}$ с увеличением длительности осаждения от 3 до 5с обусловлено тем, что лимитирующим фактором, также как и при $U_{см} = -200\text{ В}$ с такими же длительностями процессов, является поступление частиц на подложку.

При температуре подложки больше 200°C коэффициенты прилипания для длительности осаждения 4 и 5 с значительно меньше, чем при $U_{см} = -200\text{ В}$, зависят от температуры, а при длительности осаждения 3с практически от температуры не зависят. Это свидетельствует о том, что при малом коэффициенте покрытия поверхности подложки, так же как и при $U_{см} = -200\text{ В}$ с длительностью осаждения 3с, реализуется случай простой неактивационной адсорбции.

Основной причиной изменения механизма хемосорбции в этих случаях является изменение условий плазменного воздействия, обусловленных повышением кинетической энергии бомбардирующих поверхность кремния углеродосодержащих ионов при увеличении смещения, которая, так же как и нагрев подложки, приводит к повышению энергии адсорбированных на подложке частиц и уменьшению активационного барьера $E_{act} = \epsilon_a - \epsilon_d$ до отрицательных значений. При $U_{см} = -300\text{ В}$ толь-

ко при длительности осаждения от 6 до 10с хемосорбция в интервале температур от 100°C до 200°C является активационной с активационным барьером тем большим, чем больше длительность осаждения и величина покрытия. Переход от одного механизма хемосорбции к другому, как и при $U_{см} = -200\text{ В}$, осуществляется при длительности осаждения около 6с и коэффициенте прилипания близкому к 0,2. На кинетических зависимостях (рис. 4) при этом наблюдается достаточно резкое снижение поверхностных плотностей и высот выступов. Максимальное значение коэффициента прилипания равное 0,38 реализуется при длительности осаждения 10 с.

Из рис. 5 в видно, что при $U_{см} = -100\text{ В}$ характер зависимостей коэффициентов прилипания от температуры для различных длительностей осаждения в целом остается таким же, как при больших смещениях. Отличие состоит в том, что переход от активационной к безактивационной хемосорбции при $T_{п} = 200^{\circ}\text{C}$ осуществляется уже при длительности около 4 с и коэффициенте прилипания 0,15, причем коэффициент прилипания в экстремумах с увеличением длительности осаждения не увеличивается, как при больших смещениях, а уменьшается. Максимальный коэффици-

ент прилипания равный 0,3 реализуется при длительности осаждения 5с. При увеличении длительности осаждения больше 5с переход от активационного осаждения к безактивационному осуществляется с меньшей разностью $\varepsilon_a - \varepsilon_d$. При длительности 10с осаждение сразу же носит безактивационный механизм. На соответствующих кинетических зависимостях (рис. 1, 3, 4) при этом, так же как и при других смещениях, наблюдается достаточно резкое снижение поверхностных плотностей и высот выступов.

Из рис. 5 можно видеть, что при $T_{\text{п}} = 100^\circ\text{C}$ коэффициенты прилипания для $U_{\text{см}} = -200$ В и $U_{\text{см}} = -100$ В практически одинаковы и находятся на уровне 0,05 – 0,1. При $U_{\text{см}} = -300$ В они увеличиваются в 3 – 5 раз и достигают величины 0,25-0,27. Кроме того, с увеличением смещения увеличивается максимальный коэффициент прилипания, при котором хемосорбция изменяется от активационной из прекурсорного состояния к безактивационной. Так, для $U_{\text{см}} = -100$ В он равен 0,3, при $U_{\text{см}} = -200$ В и $U_{\text{см}} = -300$ В он составляет, соответственно, 0,35 и 0,38.

Таким образом, коэффициенты прилипания, кроме температуры, зависят также от роста кинетической энергии углеродосодержащих ионов. Наиболее существенно эффективность хемосорбции увеличивается при $U_{\text{см}} > -200$ В (рис. 7).

На рис. 8, 9 приведены СЭМ – изображения кремниевых наноструктур, полученных после высокоанизотропного СВЧ плазмохимического травления в хладоне – 14 в течение 30 минут пластин кремния с самоорганизованными углеродными масляными покрытиями в виде наноразмерных островковых образований. Из рис. 8 видно, что наноструктурирование поверхности кремния после травления наблюдается только для длительностей осаждения в 6с и больше. Этот результат соответствует данным, приведенным на рис.1, согласно которым высоты углеродных кластеров

достигают наибольших размеров (3-3,5 нм) именно при таких длительностях осаждения, а плотности наноструктур остаются на одинаковом уровне. При длительности осаждения менее 6 с использование углеродных островковых образований в качестве масляных покрытий представляет меньший интерес из-за недостаточной селективности травления кремния и углерода в хладоне 14. Из рис. 9б можно видеть, что глубина травления кремния через самоорганизованное углеродное островковое покрытие может достигать 50 нм при диаметре выступов 20-30 нм. Поверхностная плотность пространственных кремниевых наноструктур составляет в этом случае $(2-5) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$.

Таким образом, при формировании субмонослойных покрытий углерода на кристаллах кремния (100) из паров этанола в микроволновой плазме в условиях слабой адсорбции основными процессами при малых длительностях осаждения являются не классические диффузионные механизмы зародышеобразования и роста тонких пленок из газовой фазы, активированной электрическим разрядом, а процессы, которые могут быть интерпретированы в рамках модели адсорбции Лэнгмюра.

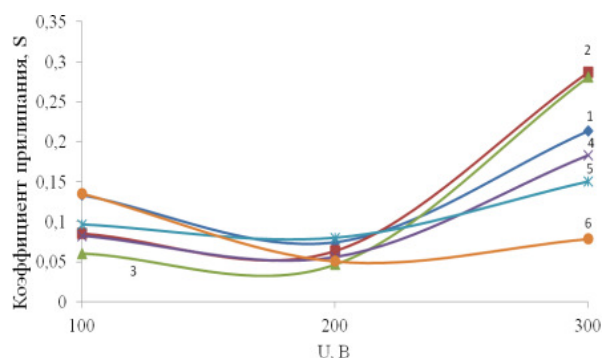


Рис. 7. Зависимости коэффициентов прилипания от потенциала смещения при $T_{\text{п}} = 100^\circ\text{C}$ для различных длительностей осаждения углерода из паров этанола на кремний (100): 1- 3 с; 2- 4 с; 3- 5 с; 4- 6 с; 5- 7 с; 6- 10 с

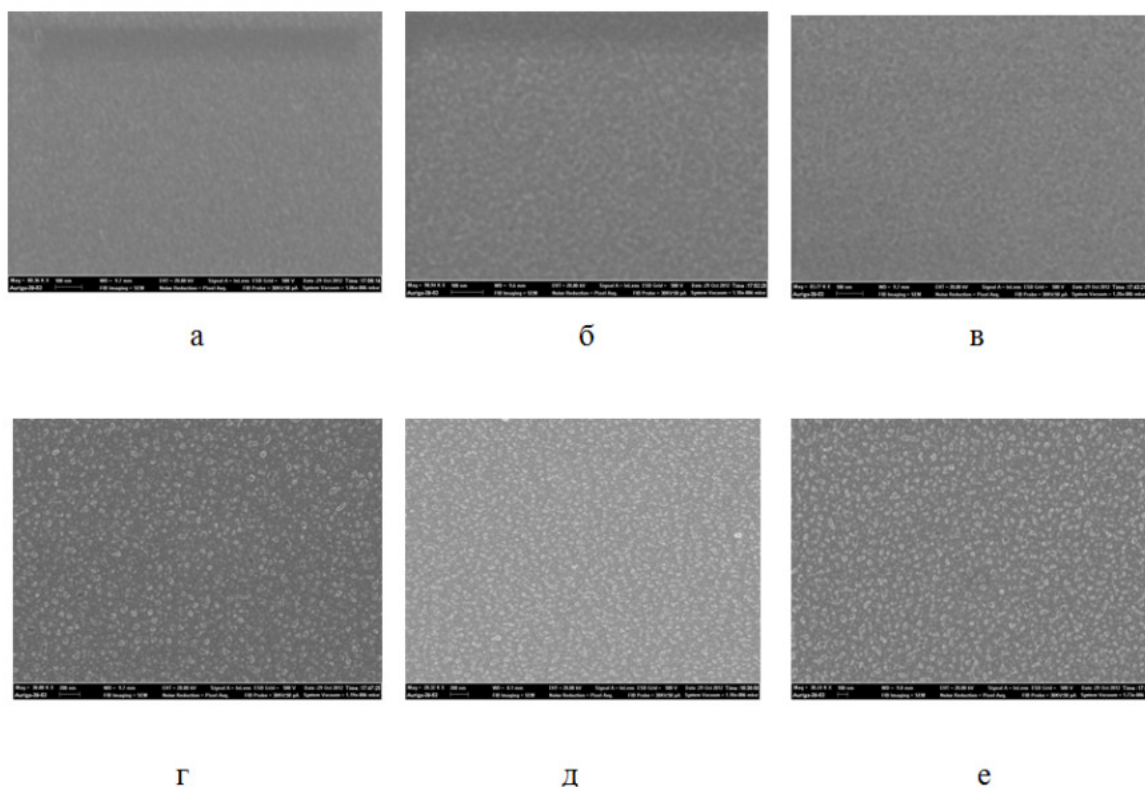


Рис. 8. СЭМ – изображения наноморфологий после травления пластин кремния в хладоне – 14 с использованием самоорганизованных углеродных масочных покрытий, полученных при $U_{\text{см}} = -100$ В и $T_{\text{п}} = 100^\circ\text{C}$ и различных длительностях процессов : а -3с, б- 4с, в -5с, г -6с, д- 7с, е -10с

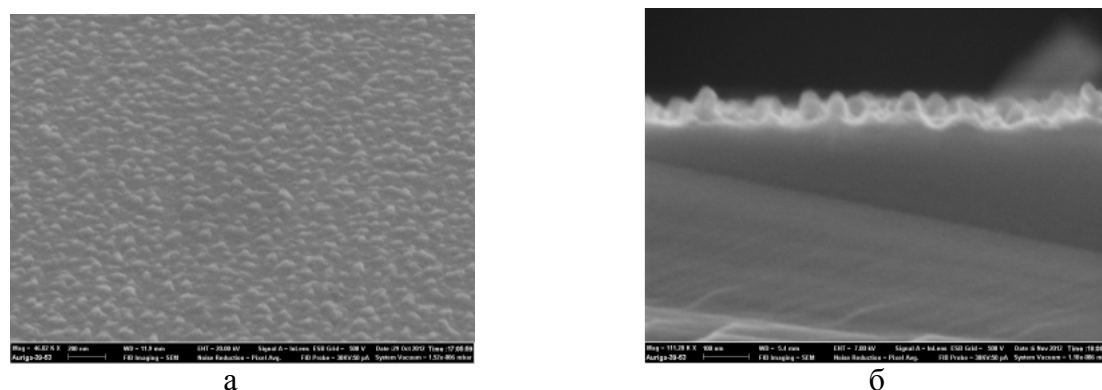


Рис. 9. СЭМ – изображения пространственных наноструктур после травления пластин кремния в хладоне – 14 с использованием самоорганизованных углеродных масочных покрытий, осажденных в течение 7с в СВЧ плазме паров этанола при $U_{\text{см}} = -100$ В и $T_{\text{п}} = 100^\circ\text{C}$: а – вид под углом 63° , б – изображение на сколе пластины

С увеличением длительности осаждения при остальных фиксированных параметрах режима наблюдаются переходы от активационной хемосорбции из прекурсорного состояния к безактивационной хемосорбции. Длительности, при которых

осуществляются переходы от одного механизма к другому, зависят от температуры подложки и смещения в процессе плазменного осаждения. Переходы между механизмами адсорбции сопровождаются на кинетических зависимостях синхронным

скачкообразным ростом поверхностных плотностей выступов на кремнии и снижением их высот.

Уменьшение длительности осаждения, при которой осуществляется переход от активационной хемосорбции из прекурсорного состояния к безактивационной (диффузионной) хемосорбции, с увеличением температуры подложки обусловлено увеличением пересыщения за счет термической диссоциации на поверхности и поверхностной миграции адатомов, позволяющих быстрее преодолевать активационные барьеры.

Основной причиной изменения механизма хемосорбции при увеличении смещения является повышение кинетической энергии бомбардирующих поверхность

кремния углеродосодержащих ионов, которая, так же как и нагрев подложки, приводит к повышению энергии адсорбированных на подложке частиц и уменьшению активационного барьера $E_{act} = \varepsilon_a - \varepsilon_d$ вплоть до отрицательных значений.

Выполненные экспериментальные исследования свидетельствуют, что самоорганизованные наноструктурные углеродные образования, формирующиеся при осаждении из паров этанола в СВЧ плазме в условиях слабой адсорбции, могут быть использованы в качестве нелиитографических масочных покрытий для получения путем последующего высокоанизотропного травления пространственных субнаноразмерных систем в кристаллах кремния (100).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Леденцов Н.Н.** Гетероструктуры с квантовыми точками: получение, свойства, лазеры. Обзор // Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов, В.А. Щукин, П.С. Копьев, Ж.И. Алферов, Д. Бимберг // ФТП, 1998. – Т. 32, №4. – С. 385 – 410.

2. **Шаныгин В.Я.** Особенности наноструктурирования субмонослойных покрытий углерода, осажденных на поверхность монокристаллов кремния в низкотемпературной плазме СВЧ разряда / В.Я. Шаныгин, Р.К. Яфаров // ЖТФ, 2012. – Т. 82. Вып. 8. С. 76-82.

3. **Яфаров Р.К.** Физика СВЧ вакуумно-плазменных нанотехнологий / Р.К. Яфаров // М.: Физматлит, 2009 -216 с.

4. **Шаныгин В.Я.** Наноморфологические характеристики поверхности кристаллов кремния (100) при СВЧ плазменной обработке в условиях слабой адсорбции / В.Я. Шаныгин, Р.К. Яфаров // ЖТФ, 2013. – Т. 83. – Вып. 4. – С. 92 - 98.

5. **Оура К.** Введение в физику поверхности / К. Оура, В.Г. Лифшиц, А.А. Саранин, А.В. Зотов, М. Катаяма // М.: Наука, 2006. – 490 с.

Яфаров Равиль Кяшшафович – доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией «Субмикронная электронно-ионная технология» Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Шаныгин Виталий Яковлевич – старший инженер лаборатории «Субмикронная электронно-ионная технология» Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Ravil K. Yafarov – Dr.Sc., Head: Laboratory of Submicron Technologies, Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences (Saratov branch)

Vitalii Y. Shanygin – Senior Engineer at the Laboratory of Submicron Technologies, Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences (Saratov branch)

Статья поступила в редакцию 12.01.14, принята к опубликованию 30.03.14

УДК 621.365.5

**МНОГОЧАСТОТНЫЕ УСТАНОВКИ
СВЧ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАГРЕВА**

Ю.С. Архангельский, Е.М. Гришина

**MULTIFREQUENCY POSITION
MICROWAVE DIELECTRIC HEATING**

Yu.S. Arkhangelskiy, E.M. Grishina

Рассмотрена возможность увеличения равномерности нагрева диэлектриков в СВЧ электромагнитном поле, создаваемом перестраиваемым по частоте источником СВЧ энергии.

Ключевые слова: *термообработка, СВЧ диэлектрический нагрев, многочастотные установки*

The article considers the possibility for increasing the uniformity of heating in the microwave dielectric electromagnetic field generated by a tunable source of microwave energy.

Keywords: *heat treatment, microwave dielectric heating, multi-frequency setting*

Равномерность термообработки – одна из основных проблем установок СВЧ диэлектрического нагрева (СВЧ электротермических установок).

В камерах с бегущей волной (КБВ) выбором геометрии нагреваемого диэлектрика и профиля камеры удастся создать конструкции, обеспечивающие равномерный нагрев, если расчет КБВ проведен на средние в диапазоне температур значения относительной диэлектрической проницаемости ϵ' и тангенса угла диэлектрических потерь $\tan\delta$ обрабатываемого диэлектрика (рис. 1 а, б). Но при фиксированной длине волны генератора идеальное соответствие диэлектрических параметров обрабатываемого диэлектрика и геометрии КБВ не достигается ни в один момент времени, а потому идеальной равномерности термообработки получить не удастся.

Если в камере со стоячей волной (КСВ), собранной на объемном резонаторе (рис. 1 в), возбудить один какой-либо вид

колебаний, то осуществить равномерную термообработку невозможно, так как каждый вид колебаний обладает в резонаторе узлами и пучностями напряженности электрического поля. В областях с большей напряженностью диэлектрик нагревается сильнее, а в узлах – слабее. [1]. Отметим, что в КСВ можно обрабатывать объекты разной формы и с разными диэлектрическими параметрами, и это выгодно отличает КСВ от рабочих камер других типов.

Способы выравнивания плотности энергии электромагнитного поля по объему КСВ, такие как металлические решетки, перемещение объекта обработки в резонаторе на предметном столе, изменение граничных условий с помощью вращающегося металлического элемента, изменение фазы поступающих в резонатор электромагнитных колебаний, иллюстрируют ресурсы конструкций КСВ, но и подтверждают наличие трудноразрешимой проблемы равномерного нагрева в КСВ. Нель-

зя получить равномерный нагрев и в КСВ на отрезках короткозамкнутых волноводов [2].

Что касается камер лучевого типа (КЛТ), например, с рупорными излучающими системами (рис. 1 г), то наиболее заметным и имеющим большое практическое значение имеет их применение для

термообработки объектов, линейные размеры которых намного больше глубины проникновения в них электромагнитной волны. [2,3]. Однако глубина проникновения зависит от ϵ' и $\text{tg}\delta$ и при фиксированной длине волны генератора в процессе термообработки она меняется.

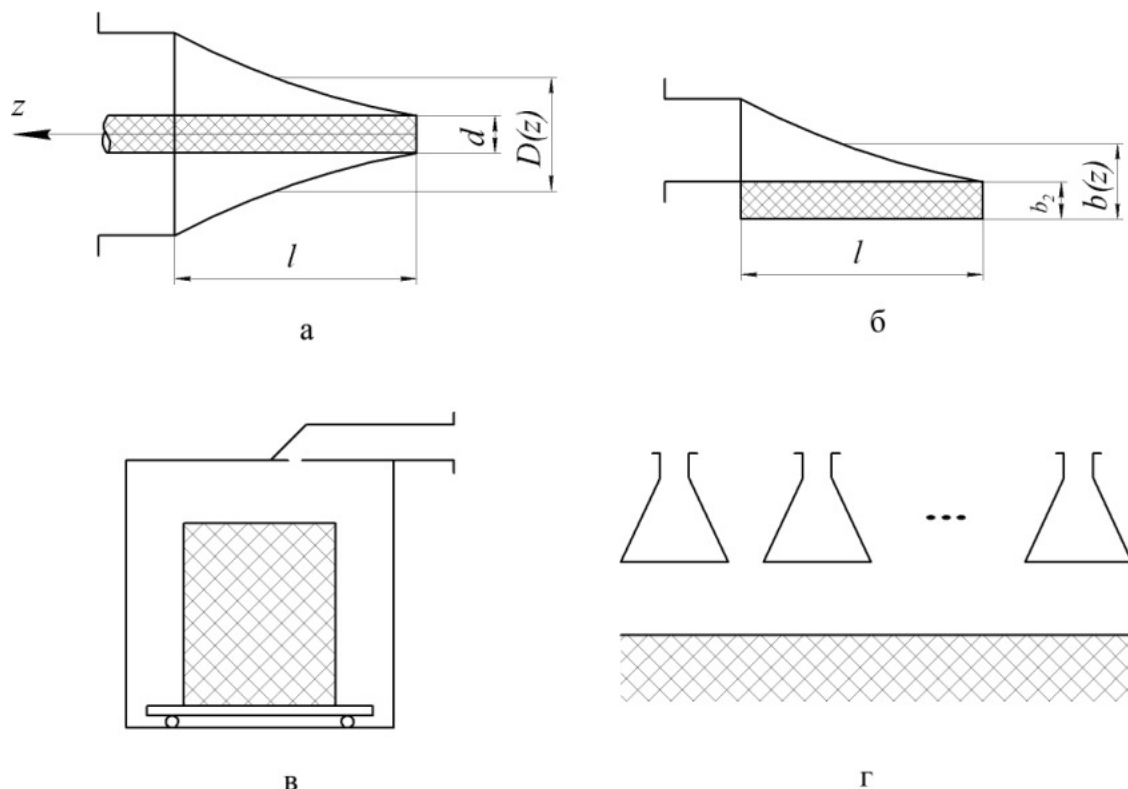


Рис. 1. Рабочие камеры установок СВЧ диэлектрического нагрева: а – КБВ на нерегулярном частично заполненном обрабатываемым диэлектриком круглом волноводе; б – КБВ на нерегулярном частично заполненном обрабатываемым диэлектриком прямоугольном волноводе; в – КСВ на частично заполненном обрабатываемым диэлектриком объемном резонаторе; г – КЛТ с несколькими рупорными излучающими системами

Для нагрева с повышенными требованиями к равномерности термообработки предлагается оптимизировать систему «источник СВЧ энергии – рабочая камера». Так как величина регулируемой СВЧ мощности не влияет на распределение тепловых источников в обрабатываемом диэлектрике, то объектом оптимизации может быть длина волны (частота) СВЧ генератора. Рассмотрим имеющиеся здесь воз-

можности для упомянутых на рис. 1 рабочих камер.

Решение самосогласованной краевой задачи электродинамики и тепломассопереноса и синтеза КБВ на нерегулярном волноводе с равномерным тепловыделением в обрабатываемом диэлектрике, рассчитанное на средние в диапазоне температур значения ϵ' и $\text{tg}\delta$, приведены, например, в [2-4].

Наиболее трудоемким является решение дисперсного уравнения для рассматриваемого частично заполненного обрабатываемым диэлектриком волновода. В связи с этим представляет интерес инженерный метод синтеза КБВ, основанный на применении теории длинных линий [2,4].

Эквивалентная схема бесконечно малого участка волновода, частично заполненного обрабатываемым диэлектриком, показана на рис. 2.

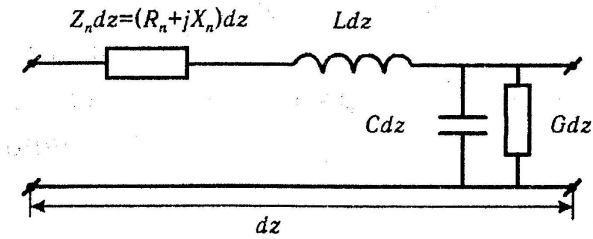


Рис.2. Эквивалентная схема образца волновода со слоем диэлектрика

Здесь обрабатываемый диэлектрик задан погонными активным R_n и реактивным X_n сопротивлениями, причем для круглого волновода с поглощающим диэлектрическим стержнем вдоль оси (рис.1 а) при $|\epsilon_2| \gg 1$ [2,4],

$$R_n = \frac{1}{2\pi r_3} \operatorname{Re} \left[-j\eta_2 \frac{J_0(k_2 r_3)}{J_1(k_2 r_3)} \right], \quad (1)$$

$$X_n = \frac{1}{2\pi r_3} \operatorname{Im} \left[-j\eta_2 \frac{J_0(k_2 r_3)}{J_1(k_2 r_3)} \right], \quad (2)$$

а для прямоугольного волновода с плоским слоем обрабатываемого диэлектрика на широкой стенке (рис.1 б)

$$R_n = \frac{60\pi^2 F_R}{a \left[1 - \left(\frac{\lambda}{2a} \right)^2 \right] \sqrt{\epsilon'_2 \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta_2}}}, \quad (3)$$

$$X_n = \frac{60\pi^2 F_X}{a \left[1 - \left(\frac{\lambda}{2a} \right)^2 \right] \sqrt{\epsilon'_2 \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta_2}}}, \quad (4)$$

где r_3 – радиус диэлектрического стержня; $\eta_2 = \sqrt{\frac{\mu_2}{\epsilon_2}}$; ϵ_2, μ_2 – абсолютные диэлектрическая и магнитная проницаемости стержня; $k_2 = \omega \sqrt{\epsilon_2 \cdot \mu_2}$; ω – круговая частота СВЧ генератора; a – ширина широкой стенки прямоугольного волновода; λ – длина волны СВЧ генератора; $\epsilon'_2, \operatorname{tg} \delta_2$ – относительная диэлектрическая проницаемость и также угла диэлектрических потерь обрабатываемого диэлектрика;

$$F_R = F_R \left(\frac{b_2}{\lambda} \cdot \sqrt{\epsilon'_2 \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta_2}}, \delta_2 \right),$$

$$F_X = F_X \left(\frac{b_2}{\lambda} \cdot \sqrt{\epsilon'_2 \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta_2}} \right),$$

b_2 – толщина слоя диэлектрика в прямоугольном волноводе, причем функции $\Phi_R = \frac{2\pi r_3}{|\eta_2|} R_n$; $\Phi_X = \frac{2\pi r_3}{|\eta_2|} X_n$; F_R и F_X приведены на рис 3. [2,4].

Поглощаемая единицей длины обрабатываемым диэлектриком СВЧ мощность равна [2,4]

$$P_n = \frac{PR_n}{\operatorname{Re} Z_{ex} l} \exp \left[2\beta \int_z^l \frac{\operatorname{Im} Z_{ex}(z)}{Z_0(z)} dz \right], \quad (5)$$

где P – мощность, поступившая в КБВ от СВЧ генератора, $Z_{ex}(z)$ волновое сопротивление в сечении z частично заполненного обрабатываемым диэлектриком волновода; $\operatorname{Re} Z_{ex}$, $\operatorname{Im} Z_{ex}$ – реальная и мнимая части входного сопротивления КБВ для квази- T волны в круглом волноводе и квази- H_{10} волн в прямоугольном волноводе.

Если [2,4]

$$Z_0(z) = -\frac{\Lambda}{4\pi} X_n + \sqrt{\left(\frac{\Lambda}{4\pi} X \right)^2 + (R_n Z)^2}, \quad (6)$$

профили нерегулярных круглого и прямоугольного волноводов рассчитаны по соотношениям

$$D(z) = d \exp \left[\left[\frac{\Lambda}{4\pi} X_n + \sqrt{\left(\frac{\Lambda}{4\pi} X_n \right)^2 + (R_n z)^2} \right] \frac{\sqrt{\epsilon'}}{60} \right], \quad (7)$$

$$b(z) = b_2 + \frac{a\sqrt{1-(\lambda/2a)^2}}{60\pi^2} \left[-\frac{\Lambda}{4\pi} X + \sqrt{\left(\frac{\Lambda}{4\pi} X_n \right)^2 + (R_n z)^2} \right], \quad (8)$$

где $d = 2$; b_2 – толщина плоского диэлектрика, то [2]

$$P_n = \frac{P}{l} = \text{const}; \quad \Gamma = \frac{Z_{\text{ex}} - Z_0}{Z_{\text{ex}} + Z_0} = 0.$$

Здесь Γ – коэффициент отражения от КБВ, а значит КБВ при условии (7) идеально согласована с СВЧ генератором, и термообработка диэлектрика по z равномерная.

Соотношения (1) – (8) и рис. 3 достаточно, чтобы сравнить возможности получения равномерного нагрева диэлектрика в одночастотной и многочастотной установ-

ках СВЧ диэлектрического нагрева без решения тепловой задачи. Это сравнение можно осуществить с помощью номограмм, показанных на рис. 4 и 5.

Рис. 4 и 5 свидетельствуют – идеально равномерного нагрева получить не удастся ни в одночастотной, ни в многочастотной установке, потому что профили КБВ, рассчитываются по (7) и (8) для определенных значений R_n и X_n и выполняют свою роль лишь при заданных значениях

$$\frac{\sqrt{\epsilon' \sqrt{1 + \text{tg}^2 \delta_2}}}{\lambda}.$$

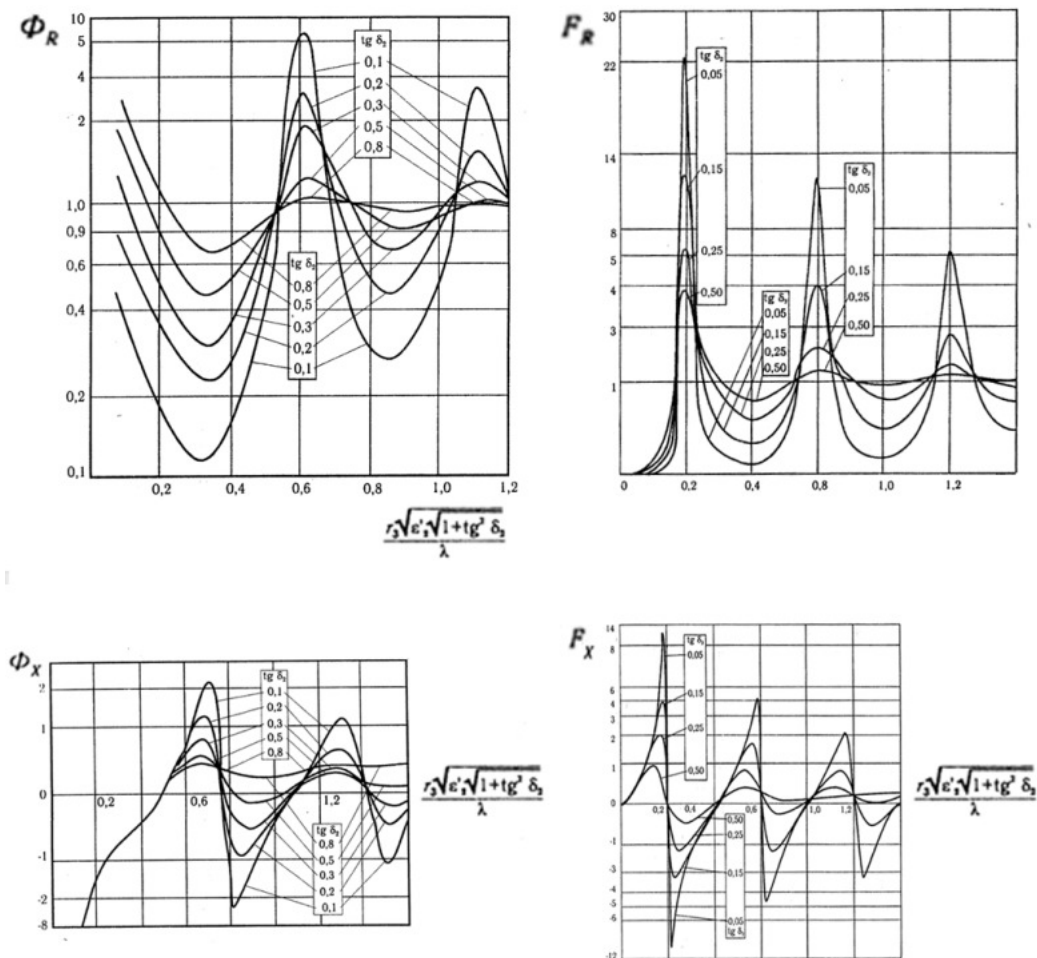


Рис.3. Зависимости Φ_R , Φ_X для круглого (а) и F_R и F_X – для прямоугольного волноводов

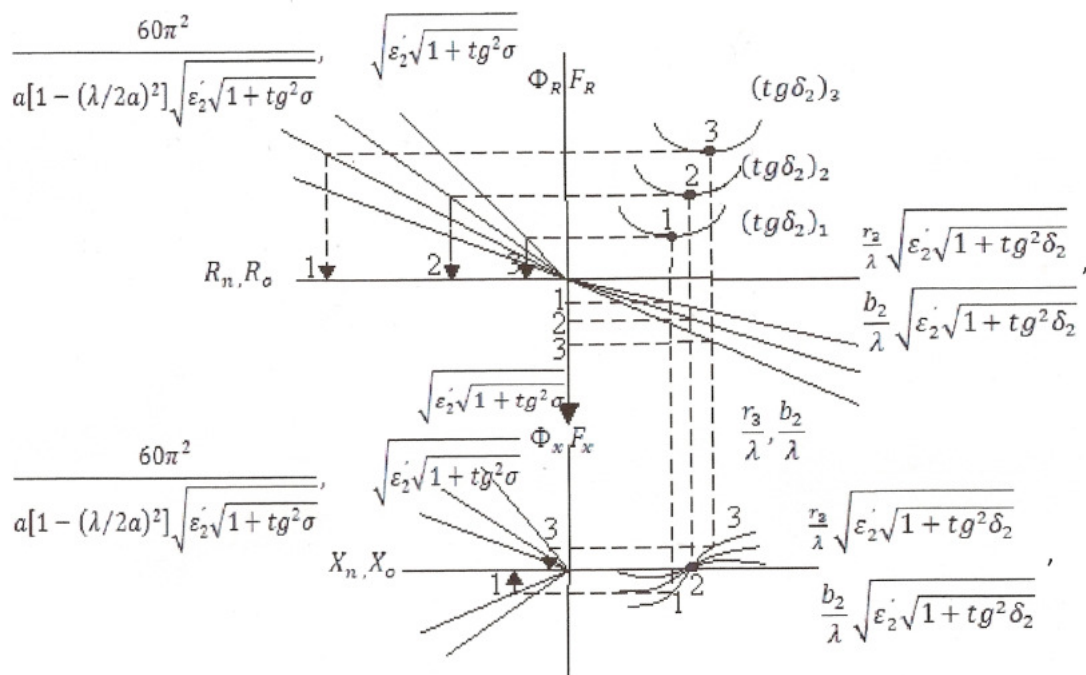


Рис. 4. Номограмма для расчета режима работы КБВ одночастотном режиме

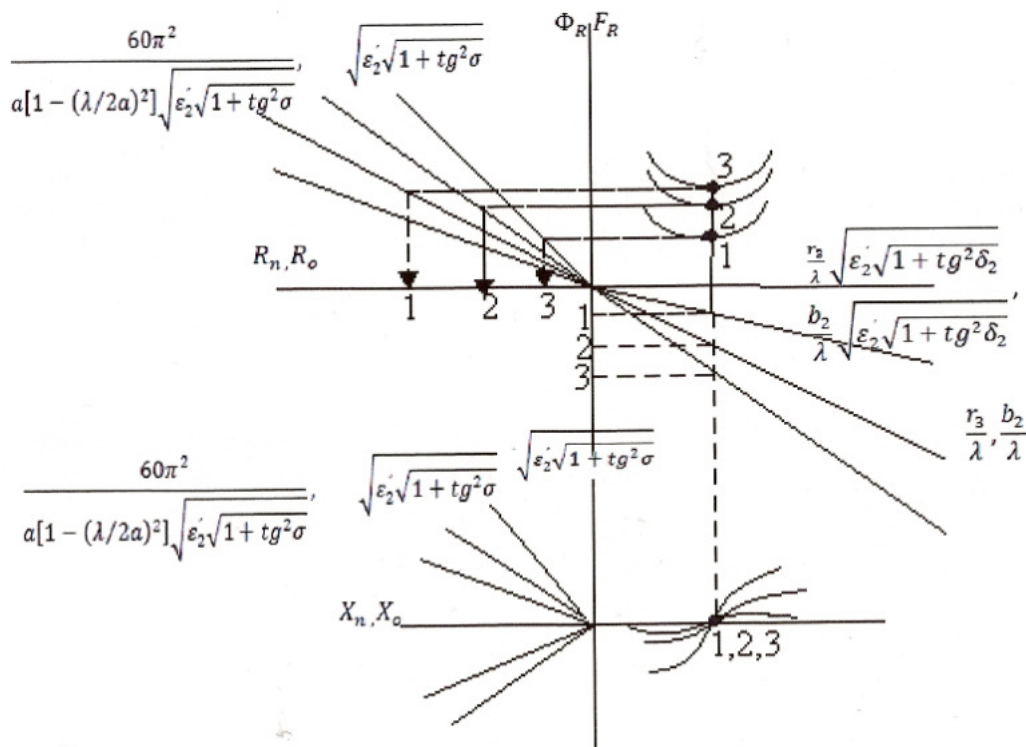


Рис. 5. Номограмма для расчета режима работы КБВ в многочастотном режиме

В многочастотной установке подбором $\lambda(t)$ удается получить $X_n = 0$ (рис.5) во всё время термообработки, но $R_n \neq const$ и, следовательно, $Im Z_{ex} \neq 0$, $P_n \neq P/l$ и

$|L| \neq 0$. В любом случае равномерность (неравномерность) нагрева можно характеризовать величиной

$$\Delta R_n = \frac{R_{nmax} - R_{nmin}}{R_{нсрe}}$$

Для увеличения равномерности в многочастотной установке можно варьировать λ генератора, скорректировав r_3 и b_2 , так, чтобы точки 1,3 сблизить с точкой 2. При этом появится $X_n \neq 0$, и это надо учитывать при расчете профиля КБВ и $P_n(z)$, но в окрестностях точки 2 ($F_x = 0, \Phi_x = 0$) кривизна зависимостей F_x и Φ_x мала и даже при некотором ΔP_n имеем $F_x \approx 0$.

Согласно расчету ΔR_n в многочастотной установке меньше, чем в одночастотной установке, в два раза, скорректированная величина d и b_2 по отношению к их значениям, рассчитанным в одночастотном режиме, в многочастотном режиме дает дополнительный выигрыш в равномерности нагрева до 30%. Тепловые расчеты показали, что на уровне 100°C в КБВ равномерность нагрева составляет в многочастотном режиме $\pm 2^\circ\text{C}$ против $\pm 7^\circ\text{C}$ при $\lambda = \text{const}$ [2]. На рис. 6 приведена зависимость $\lambda(t)$ для термообработки мясного фарша от 20°C до 80°C , если $d = 30\text{ мм}$. Такое изменение частоты СВЧ генератора может быть осуществлено, если управляемый сигнал получать с помощью автоматического измерителя коэффициента стоячей волны по напряжению $K_{свУ}$ рабочей камеры.

Заметим, от характера зависимостей $\epsilon'_2[T(t)]$ и $\text{tg}\delta_2[T(t)]$ зависит, будет ли функция $\lambda(t)$ возрастающей или убывающей. Поскольку волна от СВЧ генератора к КБВ распространяется по прямоугольному волноводу, необходимо обеспечить выбором начального значения $\lambda_{\text{нач}}$ выполнение условия $a \leq \lambda_{\text{кон}} \leq 2a$, где $\lambda_{\text{кон}}$ — длина волны генератора в конце термообработки.

Разумеется в многочастотном режиме при расчете $\lambda(t)$ следует учитывать зависимость ϵ'_2 и $\text{tg}\delta_2$ от частоты.

Что касается КСВ (рис.1 в), то, изменяя в допустимых пределах частоту СВЧ генератора или возбуждая КСВ от двух или нескольких генераторов, работающих на раз-

личных частотах, можно обеспечить возбуждение в резонаторе нескольких собственных видов колебаний, то есть улучшить равномерность термообработки диэлектрика, загруженного в КСВ [5,6].

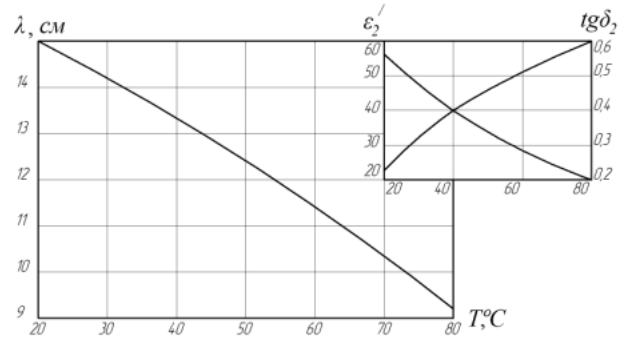


Рис.6. К расчету $\lambda(t)$ для нагрева мясного фарша в КБВ на круглом волноводе

Тот же эффект можно получить при перестройке частоты генератора, что позволяет последовательно возбудить в резонаторе собственные колебания с различным расположением максимумов и минимумов напряженности электрического поля в обрабатываемом диэлектрике.

Возможности, открывающиеся с применением многочастотного режима работы СВЧ генератора, проиллюстрирована в работе [1]. Анализ более чем 4000 резонаторов при $\lambda_0 - \Delta\lambda \leq \lambda \leq \lambda_0 + \Delta\lambda$, где $\lambda_0 = 12,6\text{ см}$, $\Delta\lambda = 0,252\text{ см}$ показал, что при равенстве ребер резонатора характерно небольшое число собственных частот. Значительно больше, до 70-80, собственных частот у резонаторов в виде параллелепипедов. При подборе a, b, c резонаторы имеют сравнительно равномерный спектр частот.

Кроме того, необходимо обеспечить определенные амплитуды каждого из собственных видов колебаний, частота которых лежат в пределах $\lambda_0 \pm \Delta\lambda$. Методика определения этих амплитуд приведена в [7]. Однако эти расчеты могут быть обеспечены, если удастся возбудить соответствующие виды колебаний или обеспечить при возбуждении необходимые амплитуды колебаний.

Наконец, в КЛТ равномерность энергоподвода к обрабатываемому диэлектрику (рис.1г) обеспечивается надлежащим размещением над его поверхностью рупорных излучателей, а сохранение глубины проникновения электромагнитной волны в обрабатываемый диэлектрик δ_E может быть в процессе термообработки достигнуто изменением частоты СВЧ генератора. Действительно, мощность поглощаемая в диэлектрике, равна

$$P_{\text{полг}} = (1 - |\Gamma|^2) P,$$

где P – мощность СВЧ генератора;

$$\Gamma = \frac{Z_{\text{вх}} - Z_0}{Z_{\text{вх}} + Z_0}; Z_0 = 377 \text{ Ом} - \text{характеристическое}$$

сопротивление воздуха; $Z_{\text{вх}}$ – характеристическое сопротивление обрабатываемого диэлектрика, причем $P_{\text{полг}}$ определяет в конечном счете температуру диэлектрика и, как следствие, изменение ε'_2 и $\text{tg } \delta_2$ в процессе обработки, а $Z_{\text{вх}} = Z_{\text{вх}}(\delta_E)$, так как

$$\delta_E = \frac{\lambda}{\pi \sqrt{2\varepsilon' \sqrt{1 + \text{tg}^2 \delta_2} - 1}}. \quad (9)$$

Электродинамическая и тепловая задачи для КЛТ решены, например, в [3], но уже соотношение (9) дает возможность в первом приближении определить закон изменения $\lambda(t)$, при котором $\delta_E = \text{const}$

$$\lambda = (\delta_E)_{\text{начал}} \pi \sqrt{2\varepsilon' \sqrt{1 + \text{tg}^2 \delta} - 1} \quad (10)$$

На рис.7 приведена зависимость $\lambda(T)$, рассчитанная по (10) для мясного фарша, у которого зависимости ε'_2 и $\text{tg} \delta_2$ от температуры приведены на рис.6.

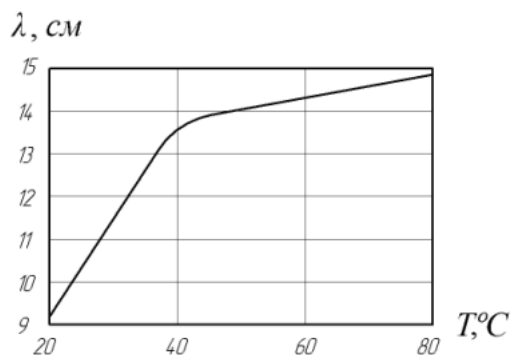


Рис.7. Изменение λ СВЧ генератора от температуры, обеспечивающее $\delta_E = \text{const}$ при обработке мясного фарша

Итак, многочастотные установки СВЧ диэлектрического нагрева позволяют существенно увеличить равномерность нагрева по сравнению с установками, в которых используется одночастотный СВЧ генератор. Особенно перспективно применение таких установок на КБВ и КЛТ. В дальнейшем требуется разработать адекватную проблеме систему автоматического управления СВЧ генератором. Необходимо разработать также технико-экономическую оптимизацию таких установок, определить области наиболее экономически эффективного их применения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Пюшнер Г.** Нагрев энергией сверхвысоких частот / Г. Пюшнер – М: Энергия, 1968. – 311 с.

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

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

4. **Архангельский Ю.С.** Справочная книга по СВЧ электротермии / Ю.С. Ар-

хангельский. – Саратов: Изд-во «Научная книга», 2011. – 506 с.

5. А.с. 411553 (СССР). Устройство для СВЧ нагрева материалов / И.И. Девяткин и др. // Б.Н. – 1974. – № 2

6. **Зусмановский А.С.** Расчет и конструирование прямоугольных резонаторных камер для устройств СВЧ нагрева диэлектриков. 4.1. Выбор оптимальных размеров и способа возбуждения прямоугольных резонаторов / А.С. Зусмановский, Ю.В. Лейбин // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ, 1968. – №2. – С. 72 – 80.

7. Зуемановский А.С. Расчет и конструирование прямоугольных резонаторных камер для устройств СВЧ нагрева диэлектриков. 4. II. Определение спектра амплитуд видов колебаний в прямоугольном ре-

зонаторе для наиболее равномерного нагрева диэлектриков полем СВЧ / А.С. Зуемановский и др. // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ, 1968. – №9. – С.46 – 49.

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

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

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

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

Статья поступила в редакцию 22.01.14, принята к опубликованию 30.03.14

УДК 621.365.5

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ СВЧ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ, СОБРАННОГО НА КАМЕРАХ С БЕГУЩЕЙ ВОЛНОЙ

Е.М. Гришина, Ю.С. Архангельский

TECHNICAL AND ECONOMIC OPTIMIZATION OF MICROWAVE ELECTROTHERMAL EQUIPMENT ASSEMBLED WITH RUNNING WAVE CAMERAS

E.M. Grishina, Yu.S. Arkhangelskiy

Предложено решение задачи технико-экономической оптимизации СВЧ электротермического оборудования, собранного на камерах с бегущей волной.

Ключевые слова: Оптимизация, СВЧ электротермическое оборудование, камера с бегущей волной

The article offers a solution to the problem of technical and economic optimization of microwave electrothermal equipment assembled using cameras with a running wave.

Keywords: optimization, microwave electrothermal equipment, a camera with a running wave

Если СВЧ установка СВЧ электротермического оборудования собрана на каме-

ре с бегущей волной (КБВ), то в ней, как правило, используется один и тот же ис-

точник энергии ($M = 1$) (рис.1 а, б); в случае двойной КБВ может быть два источника энергии ($M = 2$) (рис.1 в, г).

При $M = 1$ технико-экономические расчет СВЧ оборудования на КБВ, работаю-

$$\Delta \mathcal{E} = \mathcal{E}_{\Sigma 2} - \mathcal{E}_{\Sigma 1} = \{ (C_{c1} - C_{c2})(1 - \gamma_n - \gamma_{ндс}) + (C_{\varepsilon 1} - C_{\varepsilon 2})(1 - \gamma_n) + (C_{zn1} - C_{zn2})(1 - \gamma_n + \gamma_{zn}) + (C_{\delta p1} - C_{\delta p2})(1 - \gamma_n) + A_2(K_1 - K_2)[1 + i_{кр} + \gamma_{ум} + (K_{зч} + K_a)(1 - \gamma_y)] \} (1 - \gamma_y) \quad (1)$$

Если $\Delta \mathcal{E} > 0$, то следует выбирать второй вариант СВЧ установки с длиной волны СВЧ генератора λ_2 , а если $\Delta \mathcal{E} < 0$, то с длиной волны λ_1 . Выбранный таким образом вариант принесет большую прибыль при заданной производительности установки.

В соотношении (1) $\mathcal{E}_{\Sigma 1,2}$ - чистая прибыль установок, работающих на генераторах с длиной волны $\lambda_{1,2}$; $C_{c1,2}$, $C_{\varepsilon 1,2}$, $C_{zn1,2}$, $C_{\delta p1,2}$ -

затраты установок с $\lambda_{1,2}$ на сырье, электроэнергию и воду, заработную плату и брак; $K_{1,2}$ - капиталовложение этой установки; $\gamma_n, \gamma_{ндс}, \gamma_{ум}, \gamma_{зч}, \gamma_y, K_{зч}, K_a$ - коэффициенты, учитывающие налог на прибыль, добавленную стоимость, имущество, начисления на зарплату, выплату дивидендов, отчисления на запасные части, амортизационные отчисления; $i_{кр}$ - банковский процент за кредит.

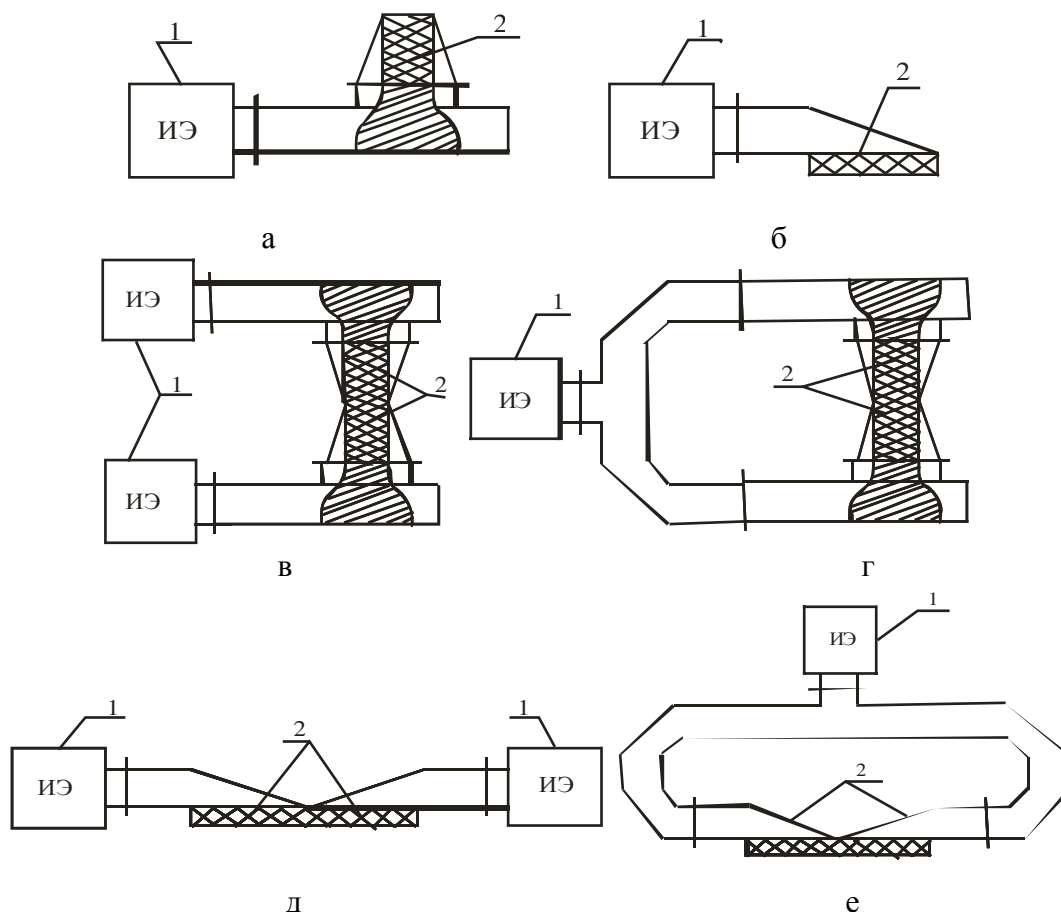


Рис.1. СВЧ установка на КБВ: а, в, г, - на круглом волноводе, б, д, е – на прямоугольном волноводе (1- источник энергии; 2 – обрабатываемый диэлектрик)

Особенностью СВЧ установки на КБВ является возможность работы такой уста-

новки в методическом режиме. В этом случае в $K_{1,2}$ следует учитывать затраты на

транспортные системы, воздуходувки.

Выбор λ проводится по результатам сравнения СВЧ установок по $\Delta \mathcal{E}_{\Sigma}$ на всех разрешенных к применению в СВЧ электротермии частотах СВЧ генераторов.

Особый вопрос – технико-экономическая оптимизация СВЧ установки с двойной КБВ (рис. 1 в-е), когда $M = 1$ или $M = 2$. Выбор одного из этих вариантов можно провести с помощью сравнительного интегрального эффекта, когда

$$\Delta \mathcal{E}_{\Sigma} = \mathcal{E}_{\Sigma_2} - \mathcal{E}_{\Sigma_1} = A(1 - \gamma_y)(K_1 - K_2) \geq 0 \quad (2)$$

где $A = 1 + i_{кр} + \gamma_{им} + (K_{зч} + K_c)(1 - \gamma_n)$;

$$K_1 = 2C_{иэ1} + C_{к1} + C_{тр1} + C_{возд1};$$

$$K_2 = C_{иэ2} + C_{к2} + C_{тр2} + C_{возд2} + C_{трой};$$

1 – КБВ с двумя источниками энергии; 2 – КБВ с одним источником энергии; $C_{к1} = C_{к2}$ – цена двойной рабочей камеры; $C_{тр1} = C_{тр2}$ – цена транспортной системы; $C_{возд1} = C_{возд2}$ – цена воздуходувки; $C_{трой}$ – цена тройника (делителя мощности), так что из (2)

$$\Delta \mathcal{E}_{\Sigma} = 2C_{иэ1} - C_{к2} - C_{трой} \geq 0$$

Если $\Delta \mathcal{E}_{\Sigma} > 0$, то выбор нужно сделать в пользу КБВ с тройником и одним источником энергии, а если $\Delta \mathcal{E}_{\Sigma} < 0$ – в пользу КБВ с двумя источниками.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Архангельский Ю.С.** Элементная база электротермического оборудования /

Ю.С. Архангельский, В.А. Воронкин. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2003. – 212с.

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 Electrotechnical Devices and Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

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

Статья поступила в редакцию 20.02.14, принята к опубликованию 30.03.14

АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ПЛАСТМАССЫ

Л.С. Зимин, А.Г. Сорокин

APPLICATION OF INDUCTION HEATING IN THE PRODUCTION OF PLASTICS

L.S. Zimin, A.G. Sorokin

Методом конечных элементов, реализованным программно, исследованы электромагнитные и тепловые поля в системе «индуктор – цилиндр пластикации – полимерный материал – шнек». Приведены результаты расчета на численной модели. Математическая модель индукционного нагревателя ориентирована на решение задач проектирования индукционных систем для производства пластмассы методом литья.

Ключевые слова: система индукционного нагрева, литьевая машина, полимерный материал, электротепловая модель

Высокие конкурентные требования к качеству готовой продукции делают актуальной проблему создания надежных, высокоэффективных и энергосберегающих установок для производства пластмассы методом литья. Однако использование существующих различных видов нагрева показывает, что они оказываются неэкономичными, малопродуктивными в силу большой тепловой инерции процесса и сдерживают рост производительности технологической линии.

Наиболее интенсивной, экономичной и энергоэффективной является система обогрева индукционными нагревателями.

Рассматриваемый объект представляет собой теплообменный аппарат, состоящий из полого цилиндра пластикации и расположенного внутри него шнека (рис.1.а). Нагрев полимерного материала происходит за счет теплообмена со стенками и шнеком

The method of finite elements was applied for the study of electro-magnetic and thermal fields in the "coil-cylinder mastication-poly-dimensional material-screw" system. The results of the numerical model are provided. The mathematical model of the induction heater is focused on the design of induction systems for the production of plastics by means of the molding methods.

Keywords: induction heating system, polymer material, injection molding machine, electricity model

теплообменного аппарата, в которых индуцируются вихревые токи охватывающим их индуктором.

Были разработаны математические модели электромагнитных и тепловых процессов в сопряженных физически неоднородных средах, что позволило обеспечить качественное описание функционирования всего технологического процесса. Схематичное изображение процесса для разработки электротепловой модели представлено на рис. 1.б.

Здесь q_1 – тепловой поток от стенки цилиндра пластикации в окружающую среду, q_2 – тепловой поток от стенки цилиндра пластикации в полимерный материал, q_3 – тепловой поток от шнека в полимерный материал, h_1 – радиус шнека, h_2 – толщина слоя полимерного материала, h_3 – толщина стенки цилиндра пластикации, L – длина нагреваемого участка и индуктора.

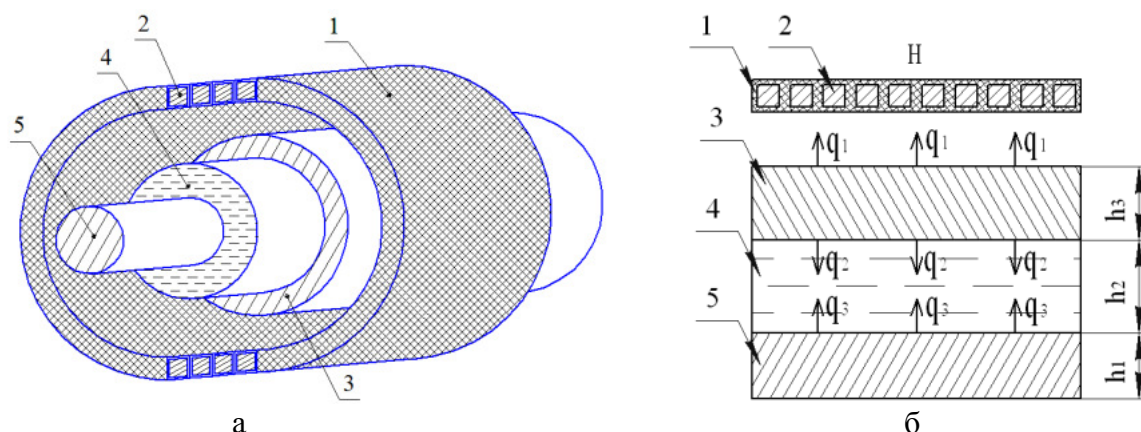


Рис. 1. Применение индукционного нагрева при производстве полимерного материала: а – эскиз теплообменного аппарата, б – электротепловая модель аппарата. 1 – изоляция витков индуктора, 2 – индуктор, 3 – стенка цилиндра пластикации, 4 – слой полимерного материала, 5 – шнек

Следующим этапом исследования является разработка математической модели тепловых процессов в сложной физически неоднородной среде. Характер распределения и удельная плотность мощности внутренних источников теплоты определены в результате решения электромагнитной задачи. Поскольку по длине индуктора не происходит значимых изменений электрических параметров системы, необходимо рассматривать задачу в двумерной постановке. Для решения задачи тепло-массо-переноса в указанной постановке разработаны вычислительный алгоритм и программа, которая содержит два расчетных блока – электрический и тепловой.

Исходными данными для расчета являются:

- конструктивные параметры нагревателя – длина нагревателя, геометрические размеры цилиндра и шнека, материал цилиндра, электро- и теплофизические характеристики цилиндра, толщина тепловой изоляции;

- параметры нагреваемого полимерного материала – теплофизические характеристики, зависимость коэффициента теплопроводности, теплоемкости, вязкости от температуры;

- энергетические параметры – напряжение питания, частота тока;

В результате расчета электромагнитной задачи определяются токи, напряженность и магнитная индукция магнитного поля. Далее рассчитываются функции распределения источников теплоты. В тепловом блоке определяются температуры стенок цилиндра и шнека, распределение температуры по сечению и по длине потока. По результатам тепловых расчетов уточняются теплофизические параметры. Вновь производится электрический, а затем тепловой расчет. Итерационный цикл проводится до тех пор, пока не достигается заданная точность расчета. Алгоритм решения комплексной задачи, включающей расчет электромагнитных источников теплоты, расчет температурных полей с учетом всех нелинейных зависимостей, приведен на рис.2. Предлагаемый совместный алгоритм численного решения электромагнитной и тепловой задачи используется для решения задач оптимизации конструкции и режимов работ индукционных нагревателей.

Расчет электротепловой модели осуществляется с помощью метода конечных элементов, который реализован с помощью пакета ELCUT и FEMLAB, учитывает специфику поставленной задачи и предварительно группирует в области отдельные сегменты, форма которых глобально отображает конфигурацию исследуемой системы (рис. 3).

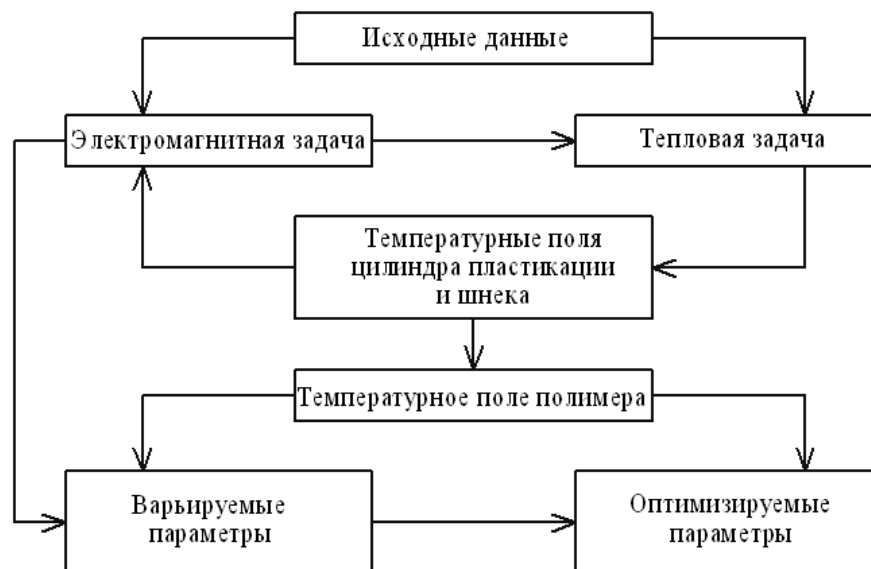


Рис.2. Алгоритм расчета электротеплового поля

Исходным моментом в разработке системы нагрева является формирование заданного температурного распределения. Для этого с помощью программы, построенной на основе метода конечных элементов, составляется геометрическая модель

системы, содержащая все объекты, имеющие тепловой контакт. Следующим шагом является задание условий теплообмена, величины плотности внутренних источников теплоты и времени нагрева.

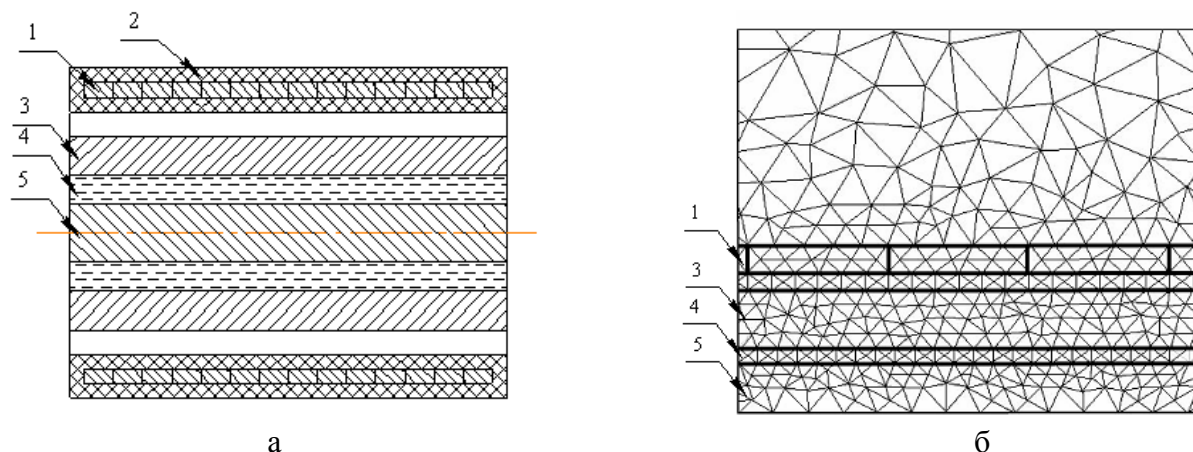


Рис. 3. Конфигурация исследуемой системы: а – расчетная схема установки индукционного нагрева, б - сетка конечных элементов для расчета электромагнитных полей в системе «индуктор – металл - нагреваемый материал»

В ходе моделирования получены решения электромагнитной задачи. Результаты расчета представлены на рис. 4 а: график распределения удельной объемной мощности по длине цилиндра (кривая 1) и шнека (кривая 2), на рис. 4 б: график распределения плотности тока по длине цилиндра

(кривая 1) и шнека (кривая 2).

Анализ приведенных результатов показывает, что перепад температуры при индукционном нагреве по сечению полимерного материала не превышает 3 °С, что является допустимым по технологии изготовления изделий из пластмассы.

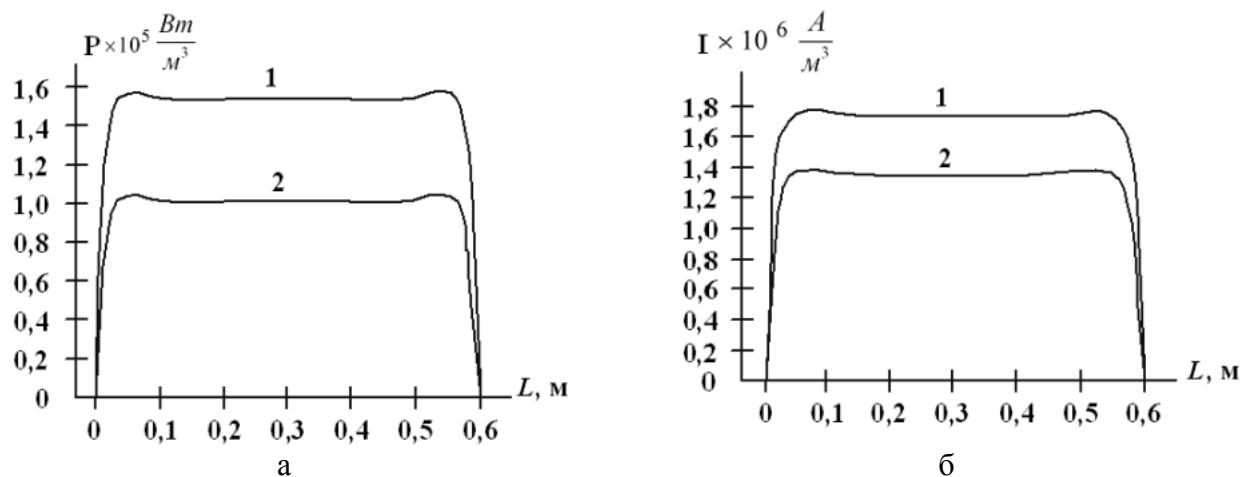


Рис. 4. Решение электромагнитной задачи: а - распределения удельной объемной мощности по цилиндру (кривая 1) и шнеку (кривая 2), б - распределение плотности тока по длине цилиндра (кривая 1) и шнека (кривая 2)

Установка должна быть снабжена системой управления, которая позволит производить контроль температуры в изделии, а также отразить влияние того или иного возмущающего воздействия в виде опре-

деленной программы управления и тем самым существенно повысить эффективность технологии производства изделий из пластмассы методом литья посредством применения систем индукционного нагрева.

Зимин Лев Сергеевич – заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» Самарского государственного технического университета

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

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

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

Статья поступила в редакцию 01.03.14, принята к опубликованию 30.03.14

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ТРЕХФАЗНОМ ИНДУКЦИОННОМ НАГРЕВАТЕЛЕ

А. И. Данилушкин, Д. Н. Пименов, А. Ю. Таймолкин

THE NUMERAL DESIGN OF ELECTRO-THERMAL PROCESSES IN A THREE-PHASE INDUCTION HEATER

A.I. Danilushkin, D.N. Pimenov, A.J. Taymolkin

Процесс индукционного нагрева в трехфазном индукторе с поперечным магнитным полем рассматривается на базе предложенной численной математической модели взаимосвязанных электромагнитных и тепловых полей. Отмечены специфические особенности моделирования, заключающиеся в наличии замкнутой магнитной системы сложной конфигурации, физически неоднородной структуры системы нагрева, наличии нелинейностей при высокотемпературном нагреве ферромагнитных заготовок.

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

Индукционный нагрев является одним из наиболее сложных электротермических процессов и в строгой постановке требует рассмотрения взаимосвязанных явлений разной физической природы. Моделирование процесса индукционного нагрева требует совместного решения электромагнитной задачи для всей системы, внутренней электротепловой задачи и задачи внешнего теплообмена. Для решения этих задач необходимо знание характера электромагнитных и тепловых процессов и средств их количественного описания.

В настоящей работе исследуются электромагнитные и тепловые процессы в системе «трехфазный индуктор вращающегося магнитного поля – цилиндрическая заготовка» с целью качественной и количе-

The process of induction heating in a three-phase inductor with a transversal magnetic field is examined on the basis of the offered numeral mathematical model for associate electromagnetic and thermal fields. Specific features are marked for the design consisting in the presence of the closed magnetic system characterized for a sophisticated configuration, a physically heterogeneous structure of the heating system, and nonlinearities under heating of ferromagnetic preforms at high temperatures.

Key words: induction heating, design, electromagnetic field, heat exchange, temperature

ственной оценки характера распределения внутренних источников теплоты, мощности тепловыделения, температурного распределения по объему заготовки и определения энергетических параметров процесса нагрева. Для создания трехфазного магнитного поля используется конструкция индуктора в форме статора трехфазной асинхронной машины [1]. Реализация такого метода нагрева требует решения ряда задач, связанных с исследованием электромагнитных и тепловых полей системы, разработкой конструкции индуктора, расчетом и выбором оптимальной схемы трехфазной обмотки. Так как индуктор нагревательной установки выполнен в виде статора асинхронной машины, её с некоторым допущением можно рассматривать

как асинхронный двигатель с массивным ротором, работающий в режиме короткого замыкания. Известно, что любая электрическая машина является системой взаимно перемещающихся контуров тока с распределенными параметрами. Наиболее распространенный способ математического моделирования процессов в такой системе – это представление её в виде электрической цепи с сосредоточенными параметрами – схемы замещения. Однако в исследуемом объекте при таком аналитическом расчете некоторые параметры магнитной цепи и схемы замещения не могут претендовать на точность уже по причине большого воздушного зазора между заготовкой и индуктором, так как это не характерно для асинхронных машин. Это в очередной раз подчеркивает неприемлемость аналитического расчета для электромагнитной задачи.

В общем случае процесс нагрева рассматриваемого класса объектов описывается нелинейной взаимосвязанной системой уравнений Максвелла [2] и Фурье [3] соответственно для электромагнитного и теплового полей с соответствующими краевыми условиями:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot}\{\vec{H}\} &= \{J\} + \{J_s\} + \{J_e\} + \left\{\frac{\partial D}{\partial t}\right\}, \\ \operatorname{rot}\{\vec{E}\} &= -\left\{\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\right\}, \\ \operatorname{div}\{\vec{B}\} &= 0, \quad \operatorname{div}\{\vec{D}\} = 4\pi\rho \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} c(r, \theta, x, T) \gamma \frac{\partial T}{\partial t} &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda(r, \theta, x, T) \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \\ &+ \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\lambda(r, \theta, x, T) \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(r, \theta, x, T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + q_v(T). \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь $\{\vec{H}\}$, $\{\vec{B}\}$, $\{\vec{D}\}$ – векторы напряженности электрического и магнитного полей, магнитной и электрической индукции, $\{J_s\}$ – вектор плотности приложенного тока, $\{J_e\}$ – вектор плотности индуцированного тока, ρ – плотность электриче-

ских зарядов, t – время, c , γ , – удельные значения теплоемкости и плотности материала изделия, $T(r, x, t)$ – температурное поле; $\lambda(r, \theta, x, T)$ – компоненты тензора теплопроводности; q_v – удельная мощность тепловыделения; r, θ, x – координаты.

Объемная плотность внутренних источников теплоты, индуцируемых в тепловыделяющем цилиндре, определяется дивергенцией вектора Пойнтинга. $P = -\operatorname{div}[\vec{E}\vec{H}]$.

Основным видом нелинейной среды являются ферромагнитные участки магнитной цепи и стальные конструктивные элементы, для которых связь между индукцией и напряженностью магнитного поля выражается нелинейной зависимостью

$$B = B(H) = \mu(H)H. \quad (3)$$

Остальными нелинейностями в рассматриваемом диапазоне частот при обычно применяемых материалах пренебрегают.

Зависимость $B(H)$ определяется магнитными свойствами среды в бесконечно малом объеме, включающем в себя рассматриваемую точку. Известная неопределенность зависимости $B(H)$ связана с проявлением гистерезиса и наличием частных циклов намагничивания, в связи с чем вектор индукции B зависит не только от H , но и от предыдущего ее изменения в данной точке и от начальной намагниченности.

При решении нелинейных уравнений электромагнитного поля основную кривую намагничивания $B(H)$ аппроксимируют аналитическими выражениями, которые, с одной стороны, должны достаточно точно описывать эту кривую, а с другой – допускать интегрирование системы уравнений поля в удобном для расчетов виде. Наибольшее распространение получила параболическая зависимость $B(H)$. Однако сложная структура исследуемой системы «индуктор – нагреваемое изделие», содержащая ряд конструктивных элементов не-

канонической формы с различными физическими свойствами, не позволяет с достаточной для практики точностью использовать аналитические методы решения.

Численный расчет электромагнитных полей в сложной составной структуре тел, содержащей ферромагнитные участки магнитной цепи, стальные конструктивные элементы и ферромагнитную загрузку, производился с помощью программного комплекса ELCUT 5.7 Professional [4].

Расчет производился в два этапа. На первом этапе электромагнитная задача решалась как задача нестационарного магнитного поля, которая позволяет рассчитывать поле, возбужденное токами произвольной формы и анализировать переходные процессы. В качестве исходных данных вводятся: свойства сред, источники поля, распределенные и сосредоточенные токи, кривые намагничивания ферромагнитных материалов, граничные условия и др. Основными расчетными параметрами являются изменяющиеся во времени магнитный потенциал, магнитная индукция, напряженность поля, токи, энергия магнитного поля, силы Лоренца, моменты, собственные и взаимные индуктивности и потокосцепление.

Задача расчета нестационарного магнитного поля представляет собой общий случай расчета магнитного и электрического полей, вызванных переменными токами (синусоидальные, импульсные и др.), постоянными магнитами или внешним магнитным полем в линейной и нелинейной (ферромагнитной) среде с учетом вихревых токов (поверхностный эффект). Формулировка задачи может быть получена из уравнений Максвелла для векторного магнитного потенциала A и скалярного электрического потенциала U :

$$\operatorname{rot}(\mu^{-1} \cdot \operatorname{rot} A) = j + \operatorname{rot} H \quad (4)$$

$$j = g \cdot \operatorname{grad} U - g \cdot \partial A / \partial t \quad (5)$$

где E - вектор напряженности электрического поля, μ^{-1} - тензор, обратный тензору магнитной проницаемости, g - электропроводность.

В соответствии с уравнением (5) полный ток в проводнике может рассматриваться как сумма стороннего тока, вызванного приложенным извне напряжением, и вихревого тока, индуцированного переменным магнитным полем

$$j = j_{\text{стор.}} - j_{\text{вихр.}},$$

где $j_{\text{стор.}} = -g \cdot \operatorname{grad} U$, $j_{\text{вихр.}} = -g \cdot \partial A / \partial t$

Решение задачи с применением МКЭ состоит из следующих основных этапов:

- 1) создание геометрии модели, пригодной для МКЭ;
- 2) разбиение модели на сетку конечных элементов;
- 3) приложение к модели граничных условий;
- 4) присвоение имени и задание свойств блоков модели;
- 5) численное решение системы уравнений;
- 6) анализ результатов.

Этапы 1, 2, 3, 4 относятся к предпроцессорной стадии, этап 5 – к процессорной стадии, этап 6 – к постпроцессорной стадии.

Построенная на первом этапе геометрическая модель делится на конечные элементы достаточно простой формы. Этот процесс является одним из самых трудоемких, сложных и важных этапов, так как предопределяет время решения задачи, а также закладывает уже на начальном этапе некоторую погрешность.

Второй и третий этапы решения задачи представляют собой ввод исходных данных – физических свойств используемых материалов, задание граничных условий, исходя из реальных, и т.д. ELCUT позволяет использовать нелинейные материалы с магнитной проницаемостью, зависящей от интенсивности магнитного поля. В этом приближении используется специально модифицированная кривая намагничивания ферромагнитного материала. Автоматический пересчет кривой намагничивания $B(H)$ выполняется с таким расчетом, чтобы сохранялась средняя энергия магнитного поля за период. Редактор кривой намагничивания для данного типа задач показывает

одновременно исходную и пересчитанную кривые.

Решение поставленной задачи расчета электромагнитных и тепловых полей осуществляется поэтапно.

На первом этапе производится расчет геометрических и электрических параметров индуктора. Расчет геометрических параметров проводится исходя из требований минимального расхода материала, электрических – по условию ограничения допустимой плотности тока.

Вторым этапом проводится решение электромагнитной задачи.

Результатом решения электромагнитной задачи является количественное распределение объемной мощности тепловыделения по объему заготовки. Для осуществления взаимосвязи из электромагнитной задачи объемная мощность тепловыделения передается в тепловую в качестве источников теплоты.

Процесс решения тепловой задачи включает в себя также стандартные процедуры построения геометрической модели (геометрия рассматриваемой области для заготовки в тепловой задаче идентична геометрии модели электромагнитной задачи для удобства и точности задания источников теплоты), построение сетки конечных элементов, решение задачи, получение и анализ результатов.

Итогом решения тепловой задачи для заготовки являются температурные распределения по сечению, градиенты распределения температуры.

Особенностью решения электромагнитной и тепловой задач является необходимость учитывать зависимость магнитной проницаемости материала заготовки от температуры. Осуществить реализацию этой зависимости в автоматическом режиме в используемом пакете ELCUT невозможно, поэтому решение тепловой задачи для загрузки проводится итерационно – с пересчетом распределения объемных источников тепловыделения по мере прогрева слоев заготовки выше точки магнитных превращений и задании полученной картины в качестве источников для тепловой

задачи. Таким образом осуществляется последовательный расчет электромагнитных и тепловых полей с обменом информацией в виде аппроксимирующих выражений для распределений температуры (внутренних источников тепловыделения).

Итерации проводятся до получения заданной технологией температуры поверхности заготовки $|T_{нов} - T_{зад}| \leq \epsilon_{доп}$ с учетом ограничения, накладываемого технологией на разность температур по сечению $T_{нов} - T_{ц} \leq \Delta T_{доп}$.

По достижении результатов, отвечающих технологическим условиям нагрева, проводится расчет тепловой задачи для остальных элементов системы индукционного нагрева – магнитопровода, обмотки и футеровки.

Процесс решения состоит из аналогичных для вышерассмотренных задач этапов: построение геометрической модели, разбиение её на конечные элементы, решение, получение и анализ результатов, проверка полученных результатов по условиям максимально допустимых температур магнитопровода и изоляции обмотки индуктора.

При условии соблюдения всех накладываемых ограничений и выполнения всех технологических требований полученные результаты считаются удовлетворительными и расчет заканчивается. Ниже приводятся некоторые результаты расчета электромагнитных и тепловых параметров для одной реализации процесса нагрева ферромагнитной заготовки.

Тепловая задача для заготовки представляет собой нелинейную задачу нестационарной теплопередачи. Геометрическая модель заготовки выбрана плоской и соответствует геометрии электромагнитной задачи.

Разбиение на блоки производилось таким образом, чтобы возможно было перенести данные из электромагнитной задачи. В качестве источников теплоты задавалась объемная плотность тепловыделения, что соответствует объемным источникам теплоты внутри каждого блока.

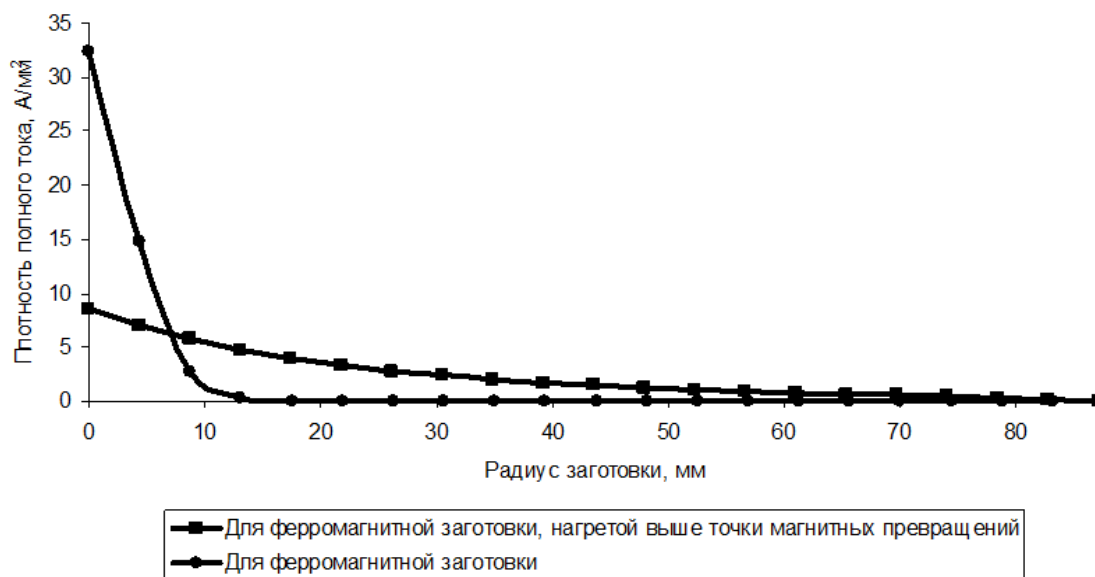


Рис. 1. Распределения плотности полного тока по радиусу заготовки

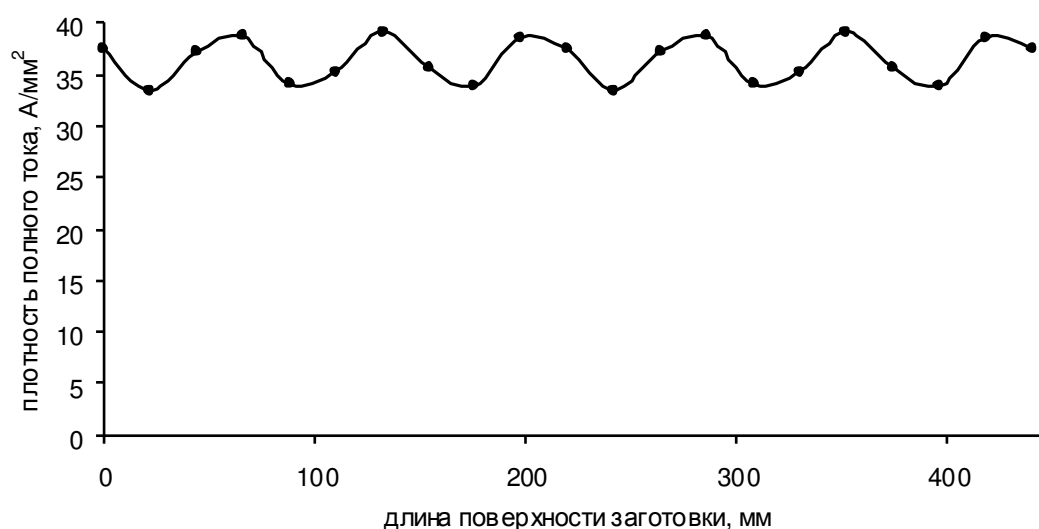


Рис.2. График распределения плотности полного тока на поверхности заготовки в среднем сечении

В качестве граничного условия на поверхности заготовки задавалась радиация с коэффициентом поглощения поверхности $\beta = 0,66$ и начальной температурой 293 К. Шаг интегрирования составил 1 секунду.

Результаты решения задачи представлены на рисунках 3, 4.

Неравномерность температурного распределения по окружности заготовки (рис.4) наблюдается только на расстоянии от поверхности, соответствующем глубине проникновения тока в металл. С приближением к центру изотермы принимают вид концентрических окружностей с центром, совпадающим с осью симметрии заготовки.

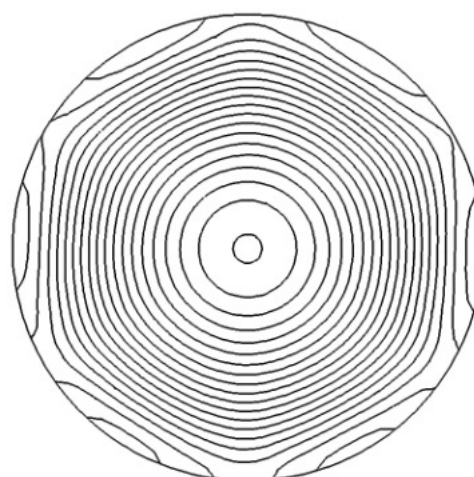


Рис. 3. Изотермы теплового поля в сечении заготовки

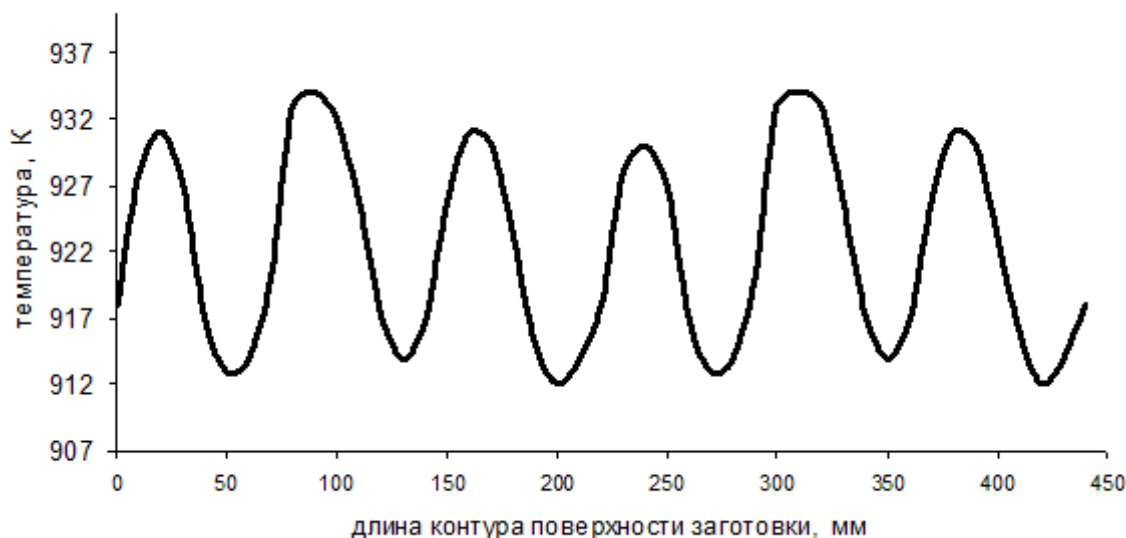


Рис.4. Распределение температуры на поверхности заготовки в среднем сечении

Характер кривой распределения температуры по контуру поверхности заготовки (рис. 4) соответствует характеру распределения источников внутреннего тепловыделения, приведенному на рис. 3, и объясняется различной мощностью нагрева под индуктирующим проводом и под зубцом магнитопровода.

Расчеты показывают, что для нормального

функционирования нагревателя необходимо предусмотреть принудительное охлаждение катушки индуктора и магнитопровода. При принудительном охлаждении катушки индуктора температура наружной поверхности футеровки составляет 256°С, температура изоляции катушки — 90°С, что обеспечивает нормальную долговую эксплуатацию установки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Данилушкин А.И. Моделирование температурного поля трехфазного индукционного нагревателя с вращающимся магнитным полем / А.И. Данилушкин, В.А. Данилушкин, Е.А. Никитина // Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки», 2010. – Вып. № 2 (26) – С. 140–147.

2. Вайнберг А.М. Индукционные пла-

вильные печи / А.М. Вайнберг –М.: Энергия, 1967. – 415 с.

3. Лыков А.В. Тепломассообмен / А.В. Лыков -М.: Энергия, 1978. –480 с.

4. ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Руководство пользователя. Версия 5.7. С-Пб.: Производственный кооператив TOP, 2009.

Данилушкин Александр Иванович – доктор технических наук, профессор Самарского государственного технического университета

Пименов Данил Николаевич – аспирант Самарского государственного технического университета

Таймолкин Антон Юрьевич – студент Самарского государственного технического университета

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

Danil N. Pimenov – Postgraduate, Samara State Technical University

Anton J. Taymolkin – Undergraduate, Samara State Technical University

Статья поступила в редакцию 01.03.14, принята к опубликованию 30.03.14

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ НА БАЗЕ ЧИСЛЕННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ИНДУКЦИОННОГО ДИСКРЕТНО-НЕПРЕРЫВНОГО НАГРЕВА

В.А. Данилушкин, С.А. Зубарев, Я.М. Ошкин

A STUDY OF ELECTROMAGNETIC AND THERMAL FIELDS IN DISCRETE-AND-CONTINUOUS MODELING OF INDUCTION HEATING USING A NUMERICAL MATHE- MATICAL MODEL

V.A. Danilushkin, S.A. Zubarev, Ya.M. Oshkin

В статье представлены результаты численного моделирования процесса индукционного дискретно-непрерывного нагрева ферромагнитных заготовок под пластическую деформацию. На базе численной модели процесса индукционного нагрева выполнено исследование взаимосвязанных электромагнитных и температурных полей в системе «индукционный нагреватель – столб ферромагнитных дискретно перемещающихся заготовок».

Ключевые слова: индукционный нагрев, моделирование, теплопроводность

При нагреве заготовок в индукторе дискретно-непрерывного действия темп выдачи мерных заготовок определяется производительностью деформирующего оборудования.

Для малогабаритных заготовок диаметром 18÷40 мм длина индуктора существенно больше длины одной заготовки, и время прохождения заготовок через индуктор оказывается значительно больше периода выдачи.

В этом случае процесс индукционного нагрева можно представить как нагрев непрерывно движущейся через индуктор с определенной скоростью v заготовки.

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

The paper presents the numerical simulation results for the process of discrete-and -continuous induction heating of ferromagnetic billets under plastic deformation. The numerical model of the induction heating process is used to study interconnected electromagnetic and thermal fields in the "induction heater - discretely moving pile of ferromagnetic billets" system.

Keywords: induction heating, modeling, thermal conductivity

$$\operatorname{rot}\{\vec{H}\} = \sigma \vec{E}; \operatorname{rot}\{\vec{E}\} = \left\{ \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right\}; \operatorname{div}\{\vec{B}\} = 0;$$

$$\operatorname{div}\{\vec{E}\} = 0 \quad (1)$$

$$c(T) \gamma \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda(T) \operatorname{grad} T) -$$

$$- c(T) \gamma \cdot v \frac{\partial T}{\partial x} + \operatorname{div}[\vec{E} \vec{H}] \quad (2)$$

где $\{\vec{H}\}$, $\{\vec{E}\}$, $\{\vec{B}\}$ - векторы напряженности магнитного, электрического полей и магнитной индукции; σ - удельная электропроводимость; T - температура; t - время; $\lambda(T)$ - удельная теплопроводность; $c(T)$ - удельная теплоемкость; γ - плотность нагреваемого металла. Объемная плотность внутренних источников теплоты, индуцируемых в металле, определяется дивергенцией вектора Пойнтинга $\Pi = -\operatorname{div}[\vec{E} \vec{H}]$.

Система уравнений (1)–(2) дополняется граничными условиями для электромагнитной задачи: используются условия равенства функции нулю на бесконечно удаленной границе S_1 (ГУ1) и условие симметрии на осевой линии S_2 , которое заключается в равенстве нулю производной от функции (ГУ2).

Особенностью расчёта параметров индукционных нагревателей является сложный характер взаимосвязанных электро- и теплофизических процессов, ярко выраженная неравномерность пространственного распределения внутренних источников теплоты, индуцируемых электромагнитным полем индуктора, зависимость мощности внутреннего тепловыделения от электрофизических свойств материала нагреваемых заготовок. В связи с этим для создания методики расчета оптимальных конструктивных и режимных параметров индукционной установки в работе рассматривается численная математическая модель, учитывающая специфические особенности распределения внутренних источников теплоты по длине нагревателя, а также существенные нелинейности, обусловленные потерей магнитных свойств металла при переходе через точку Кюри.

В индукционном нагревателе непрерывного действия одновременно находятся N заготовок, перемещающихся дискретно. Температурное поле каждой цилиндрической заготовки при нагреве ее внутренними источниками теплоты по мере её перемещения через нагреватель описывается уравнением теплопроводности (2). В процессе моделирования теплового состояния заготовок тепловые потери на разных этапах нагрева учитываются граничными условиями второго или третьего рода.

Анализ электромагнитных полей проводится на основе уравнений Максвелла. Математическая модель электромагнитных процессов в устройствах индукционного нагрева при нагреве цилиндрических заготовок может быть сформулирована без

существенных погрешностей с учетом следующих допущений:

1. Пространственная конфигурация системы позволяет ограничиться рассмотрением двумерной осесимметричной области $(r - 0 - x)$, где индукция $\vec{B}$ и напряженность $\vec{H}$ магнитного поля имеют две составляющие по r , x , а плотность тока сторонних источников $\vec{J}$, магнитный векторный потенциал $\vec{A}$, и напряженность электрического поля $\vec{E}$ направлены строго по касательным к окружностям, центрированным на оси индукционной системы;

2. Поле принимается квазистационарным. Под этим понимается отсутствие запаздывания электромагнитной волны в воздухе. Это допущение позволяет пренебречь токами смещения по сравнению с токами в проводниках;

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

Нелинейная зависимость магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля $\mu_a(H)$ в ферромагнитных областях определяется итерационным алгоритмом многократного решения результирующей системы уравнений. На начальном этапе задается значение $\mu_a = \text{const}$ по всей области ферромагнитных элементов, потом вычисляются характеристики поля. Такой прием позволяет корректировать магнитную проницаемость μ_a внутри каждого ферромагнитного элемента на следующей стадии расчета в зависимости от значения температуры в каждой области. Для полной сходимости процесса достаточно от 3 до 5 итераций.

Для практического использования предлагаемого алгоритма решения электромагнитной задачи в работе применяется программный пакет ELCUT [3], который при некоторых допущениях позволяет решать нелинейные задачи гармонического анализа. Так, при значительном превышении длины индуктора по отношению к диаметру, что имеет место для исследуе-

мых систем, можно не учитывать влияние краевых эффектов на торцах индуктора.

Исходными данными для расчета являются параметры нагреваемой загрузки – радиус загрузки, темп выдачи нагретых заготовок, массив табличных значений зависимостей удельного сопротивления от температуры, теплоемкости, коэффициента теплопроводности; табличные значения зависимостей относительной магнитной проницаемости загрузки от напряженности магнитного поля, зависимость тепловых потерь от температуры.

Ниже приводятся результаты расчета электромагнитных полей в установившемся режиме дискретно–непрерывного нагрева ферромагнитной загрузки до температуры пластической деформации. На

рис.1 представлен график распределения поверхностной плотности тока по длине загрузки, на рис.2 приведены графики распределения плотности тока по радиусу загрузки в различных сечениях по длине.

На основе результатов электромагнитного анализа проводится тепловой расчет. Предложенная численная математическая модель тепловых процессов в нелинейной реализации позволяет получить полную картину температурного поля на всех позициях при движении металла через индуктор. Использование численного метода позволяет достаточно точно рассчитать тепловое состояние загрузки на каждой позиции.

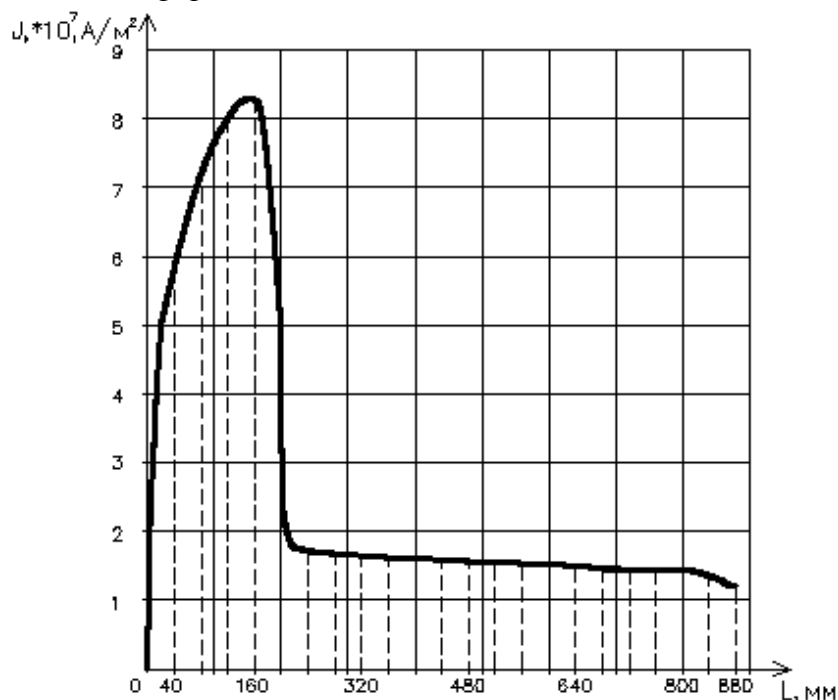


Рис. 1. График распределения плотности полного тока по длине загрузки в установившемся режиме

Исследуемая в численных расчетах математическая модель процесса нагрева перемещающейся дискретно цилиндриче-

ской загрузки внутренними источниками теплоты для каждого шага дискретности имеет вид

$$\frac{\partial T(r, t, x)}{\partial t} = a(T) \left[\frac{\partial^2 T(r, t, x)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r, t, x)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T(r, t, x)}{\partial x^2} \right] + \frac{1}{c(T)\gamma} W(r, x, t, \xi(T)) \quad (3)$$

Решение тепловой задачи выполнено методом конечных элементов, который дает возможность достаточно точно учиты-

вать все нелинейности путем изменения всех нелинейных величин с каждым шагом по времени.

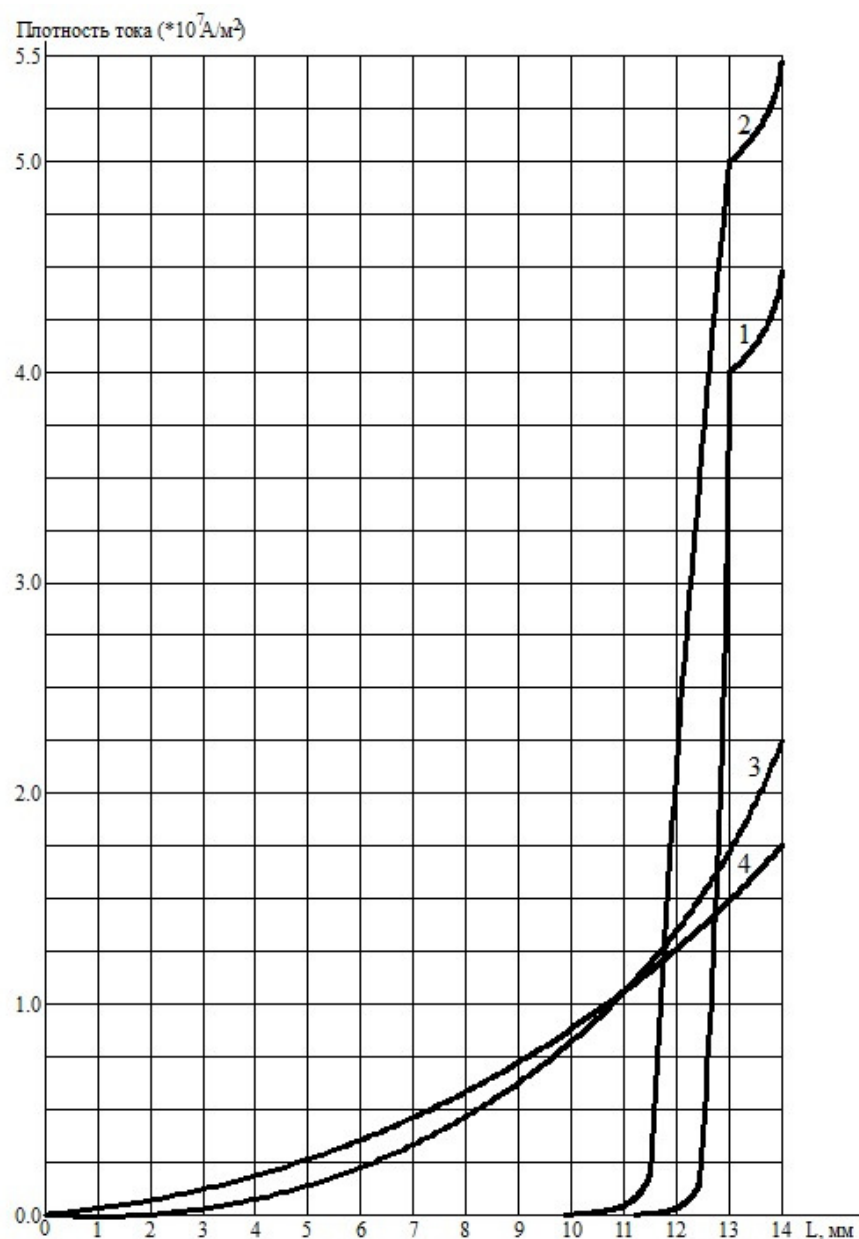


Рис. 2. Распределение плотности тока по радиусу в установившемся режиме: 1 – на расстоянии 0,05 м от входа; 2 – на расстоянии 0,12 м; 3 – на расстоянии 0,4 м; 4 – на расстоянии 0,8 м от входа в индуктор

Геометрическая модель тепловой задачи полностью повторяет модель электромагнитной задачи, источником теплоты является мощность тепловыделения в заготовках.

Так как нагреваемое тело является ферромагнитным, необходимо учитывать переход его через точку магнитных превращений. Используемый программный пакет не позволяет отразить зависимость магнитной проницаемости среды от температуры, поэтому решение задачи производится итерационно, заготовка рассматри-

вается как многослойное тело, по мере прогрева цилиндра пересчитывается распределение внутренних источников теплоты и полученные данные переносятся в задачу теплового расчета для загрузки.

После проверки результатов на соответствие накладываемых ограничений решение задачи нагрева для системы «индуктор-загрузка» считается законченным. Заключительным этапом расчета является определение интегральных параметров системы – расчет и выбор числа витков и сечения трубки индуктора в соответствии с

выбранным напряжением источника питания и расчет системы охлаждения.

В исследуемой индукционной нагревательной установке процесс моделирования происходит поэтапно. Вначале производится расчет температурных полей в каждой заготовке. В процессе расчета свойства металла цилиндрической загрузки, такие, как удельная проводимость, теплоем-

кость, теплопроводность задаются в соответствии с изменяющейся на каждом интервале постоянства температурой. На рис. 3 приводятся результаты расчета тепловых полей в установившемся режиме работы индукционного нагревателя дискретно-непрерывного действия с учетом реального распределения источников тепла, полученных при решении электромагнитной задачи.

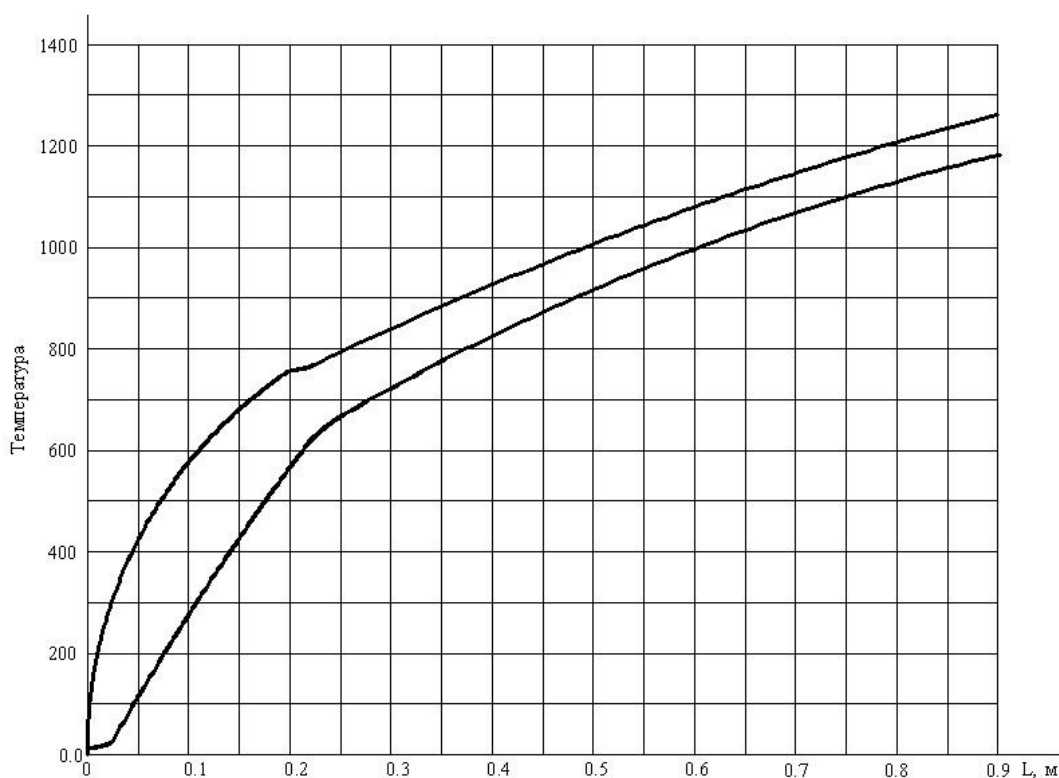


Рис. 3. Распределение температуры по длине загрузки в установившемся режиме

Как показывают результаты расчета установившегося режима, участок загрузки с ферромагнитными заготовками составляет примерно пятую часть от всей загрузки. Анализ графиков электромагнитных характеристик позволяет сделать вывод о том, что переход из ферромагнитного состояния металла в немагнитное по всему сечению загрузки происходит на участке, равном одной четвертой длины индуктора от входа в нагреватель. Анализ температурных полей в установившемся режиме

показывает, что в процессе нагрева температурный перепад по радиусу заготовки не превышает предельно допустимого уровня и составляет на участке с ферромагнитной загрузкой не более 250 °C., а на участке с немагнитной загрузкой – не более 100 °C. Полученные результаты позволяют говорить о возможности сокращения длины индукционной системы путем выхода на предельные значения температурных перепадов по сечению загрузки в процессе нагрева.

ЛИТЕРАТУРА

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

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

3. ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Руководство

пользователя. Версия 5.7. С-Пб.: Производственный кооператив ТОР, 2009.

Данилушкин Василий Александрович – кандидат технических наук, доцент Самарского государственного технического университета

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

Зубарев Сергей Александрович – аспирант Самарского государственного технического университета

Sergey A. Zubarev – Postgraduate, Samara State Technical University

Ошкин Ярослав Михайлович – аспирант Самарского государственного технического университета

Yaroslav M. Oshkin – Postgraduate, Samara State Technical University

Статья поступила в редакцию 01.03.14, принята к опубликованию 30.03.14

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

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

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

УДК 343.983

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ
ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗМЕНЕННЫХ ИЛИ УНИЧТОЖЕННЫХ
МАРКИРОВОЧНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

В.М. Райгородский

**USING ELECTROCHEMICAL METHOD FOR RESTORATION
OF CHANGED OR DESTROYED MARKED INDICATIONS**

V.M. Raigorodskii

Статья посвящена оптимизации метода электролитического травления применительно к процессу восстановления измененных или уничтоженных маркировочных обозначений

Ключевые слова: электролит, электролитическое травление, маркировочные обозначения, восстановление маркировочных обозначений

Необходимость в восстановлении измененных и уничтоженных маркировочных обозначений возникает при расследовании различных категорий преступлений: краж транспортных средств, антиквариата, незаконного приобретения оружия, орденов, подделки пробирных клейм на изделиях из драгоценных металлах, подделки маркировочных обозначений на пломбировочных запирающих устройствах и пр.

Результат и качество восстановления во многом определяется способом нанесения маркировочных обозначений.

Нанесение знаков на изделиях производят одним из следующих способов:

– штамповкой, которая в свою очередь подразделяется на механическую (с помощью матрицы и пуансона) и ручную (с помощью клейма, удар по которому наносят молотком или кувалдой);

– гравированием, которое может быть

The article considers optimization of the method applied to the electrolytic etching process for the restoration of changed or destroyed marked indications.

Keywords: electrolyte, electrolytic etching, marked indications, restoration of marked indications

электрическим, лазерным, механическим или ручным с помощью штихеля.

Помимо указанных способов нанесение знаков может производиться отливкой, травлением, вырезанием, выжиганием.

Удаление знаков на изделиях производят, как правило, механическим воздействием на материал в месте расположения маркировки на всю глубину рельефа обозначения. При этом происходит выравнивание поверхности изделия в месте нанесения маркировки. Чаще всего удаление обозначений производят шлифовкой наждачным кругом, напильником, наждачной бумагой, абразивным камнем. Реже используют зубила, ножовки или другие предметы с острой режущей кромкой. Удаление маркировочных обозначений может также осуществляться на токарных, фрезерных, строгальных и других станках, а также с помощью гравировальных инст-

рументов. Удаление может производиться высверливанием маркировочных обозначений с последующей заливкой отверстий легкоплавкими сплавами и шлифовкой поверхности. Удаление маркировочных обозначений может производиться также с помощью химического травления. В этом случае в месте расположения маркировки наблюдается плавное изменение рельефа, имеющее вид углубления на поверхности изделия.

Восстановление удаленных маркировочных обозначений возможно лишь в тех случаях, когда при их нанесении происходит изменение каких-либо физико-механических или иных свойств материала: остаточных напряжений (деформаций) кристаллической структуры, растворимости, остаточного намагничивания, плотности, электропроводности и т.д.

Важно отметить, что для успешного восстановления маркировочных обозначений на изделиях эти изменения должны наблюдаться в структуре материала не только в местах нанесения знаков, но и в нижележащих слоях, которые остаются на изделии после удаления верхнего слоя материала с обозначением. Нижележащие слои при этом несут информацию, необходимую для восстановления обозначений, поскольку изменение структуры материала в них обуславливает наличие "скрытых" изображений маркировочных знаков.

Качество восстановленного изображения будет зависеть от толщины информативного слоя, степени структурных либо иных изменений в нем и толщины удаленного слоя материала. Чем больше толщина удаленного слоя, тем более расплывчатыми, неотчетливыми, слабо различимыми будут контуры восстановленных обозначений. Толщина удаленного слоя, при которой изображение не будет восстановлено вовсе, зависит от способа нанесения знаков и типа исследуемого материала.

При нанесении знаков методом штамповки происходит деформация материала изделия, уплотнение его участков и возникновение остаточных напряжений. Деформация материала сопровождается из-

мельчением отдельных кристаллитов, значительными искажениями (деформацией) кристаллической решетки.

При использовании электрического или лазерного гравирования изменение структуры материала происходит под воздействием высокой температуры, создаваемой в месте воздействия. Для электрического гравирования таким воздействием является искровой разряд между электродом и материалом изделия, для лазерного гравирования – излучение лазера, создающего мощное тепловое воздействие (тепловой удар), приводящий к значительным нарушениям структуры материала. Воздействие лазера может приводить к поверхностному упрочнению материала вследствие дробления зерен, разрушения их границ (созданию наклепанного слоя). Для деформированных материалов лазерное воздействие может явиться следствием чрезмерного роста зерен (рекристаллизации). В любом случае оно является причиной возникновения значительных изменений структуры материала в слоях, расположенных ниже маркировочных обозначений.

Методы восстановления знаков на металлических изделиях можно разделить на три большие группы [1 - 3]: физические, химические, электрохимические.

К физическим методам относят различные варианты дефектоскопии: гамма или рентгеновской, инфракрасной, вихретоковой. Получение изображения знаков на экране при использовании дефектоскопических методов обусловлено различной интенсивностью излучения, прошедшего в местах с измененной вследствие набивки знаков структурой материала и в ненарушенных слоях.

К физическим относят также магнитопорошковый метод (магнитной суспензии). Метод применим только к ферромагнитным материалам и основан на фиксировании с помощью мелких ферромагнитных частиц различий в намагниченности насыщения образца, возникающей вследствие деформаций кристаллической решетки в местах набивки знаков.

Указанные методы являются неразрушающими, т.е. в результате проведения процесса восстановления образец остается в неизменном виде. Во многих случаях это обстоятельство является определяющим при выборе метода восстановления.

К частично разрушающим относят метод ионного травления, основанный на выбивании ионов из исследуемого материала при его бомбардировке ионами или электронами с высокой энергией. Эмиссия ионов происходит в первую очередь с участков, имеющих нарушения кристаллического строения, возникающих, в частности, при набивке маркировочных обозначений. Выявление обозначений происходит благодаря различию в скоростях распыления материала деформированной и недеформированной областей.

Химический и электрохимический методы основаны на растворении поверхностного слоя материала. При этом в первую очередь удаление материала происходит в тех местах, где имеются нарушения кристаллического строения, возникшие в том числе и при нанесении маркировочных обозначений. Увеличение скорости растворения материала в местах с деформированной кристаллической решеткой обусловлено как нарушением химических связей между атомами в данных областях, так и подбором специальных, так называемых селективных травящих растворов и электролитов.

Оба эти метода достаточно близки как по механизму действия на исследуемый материал, так и по способам реализации. Следует отметить, что процесс электролитического восстановления незаслуженно редко используется экспертами, проводящими данный вид экспертиз и исследований. В то же время нами установлено, что электролитическое травление позволяет изменять скорость процесса, ускоряя при необходимости удаление материала посредством увеличения величины протекающего тока.

Зачастую необходимо уменьшить скорость процесса. Если этого не сделать, велика вероятность удаления восстановлен-

ных обозначений. Кроме того, чрезмерная скорость травления может привести к излишне развитой поверхности образца. Образуемые при этом неровности могут значительно снизить контраст восстановленных обозначений вплоть до состояния, когда их практически невозможно будет зафиксировать. Регулировкой тока и подбором электролитов в том числе изменением концентрации веществ, входящих в их состав, возможно оптимизировать процесс, который становится более воспроизводимым и регулируемым.

Большинство авторов [2, 4] рекомендуют в качестве источников электрического напряжения для электролитического травления любые маломощные источники постоянного напряжения 3 - 12 В, позволяющие обеспечить силу тока 0,2 – 0,5 А, в том числе обычные батарейки. Наши исследования показали, что даже для источников, стабилизированных по току и напряжению и рассчитанных на силу тока до 2 А, происходит значительное «подсаживание» напряжения питания, что значительно замедляет процесс электролитического травления, делает его неуправляемым. Из этого следует, что лабораторный источник напряжения должен иметь предел по току 10 - 15 А. Для этих целей неплохо подходит автомобильная аккумуляторная батарея, особенно при выявлении номеров на деталях автомобиля.

Электрохимический метод восстановления, как и химический, основан на различии в скоростях растворения участков металла, в которых произошли структурные изменения, и остального объема, в котором эти изменения отсутствуют. Растворение металла в этом случае происходит под действием электрического тока в растворе электролита. Процесс электролитического травления может осуществляться несколькими способами:

- погружением изделия в ванну с электролитом. При этом анодом является само изделие, а в качестве катода используют пластину из нейтрального к действию электролита металла, например свинца.

Электроды располагают параллельно на расстоянии 3–6 мм друг от друга;

- изготовлением ванночки из пластилина, воска, стеарина и т.д. непосредственно на изделии, служащем анодом. Катод в виде проволоочки располагается параллельно восстанавливаемой поверхности на расстоянии 3 – 5 мм от нее;

- путем контакта участка, на котором проводится восстановление, с ватным тампоном, смоченным в электролите. Анодом в этом случае служит изделие, а катодом - пинцет, зажимающий ватный тампон и равномернодвигаемый вдоль поверхности. К пинцету при этом необходимо приложить отрицательный потенциал, а к изделию - положительный. В процессе электролитического травления необходимо следить за тем, чтобы движение тампона по поверхности изделия было плавным, без рывков, тампон должен быть постоянно обильно смочен электролитом. Быстрое высыхание тампона, наличие потрескивания при его движении указывают на необходимость уменьшения силы тока. Оптимальной считается такая сила тока, при которой наблюдается слабое "кипение" электролита в месте контакта тампона с поверхностью изделия, характеризующееся выделением пузырьков газа. Отсутствие этих признаков указывает на необходимость увеличения силы тока при проведении процесса.

При реализации первого способа перед проведением процесса необходимо изоли-

ровать поверхность изделия, на которой не должна протекать реакция, с помощью материалов, нейтральных к действию электролита, например, расплавленного воска, стеарина, парафина, наносимых кисточкой или окунанием изделия. Можно для этого использовать различные лаки, клеи, растворы полимеров в органических растворителях, например целлулоида в ацетоне.

Электролитическое травление с целью восстановления измененных и уничтоженных обозначений было реализовано нами для металлов, используемых для изготовления блоков двигателей транспортных средств, а именно, серого чугуна и алюминиевого сплава АЛ-4 (см рис. 1-4).

В литературе отсутствуют данные о составе травителей и электролитов для чугуна; для изделий из стали литературные источники рекомендуют в качестве электролитов 2 – 4 % растворы поваренной соли, либо 1% раствор серной кислоты [4, 5]. Наши эксперименты с указанными электролитами не дали положительных результатов - отсутствовало растворение материала. Увеличение концентрации исходных веществ приводило к образованию темных пленок, не позволяющих произвести визуальную или фотографическую фиксацию выявленных маркировочных обозначений (рис. 2).

Аналогичные результаты были получены для других электролитов основными компонентами которых были азотная и серная кислоты.

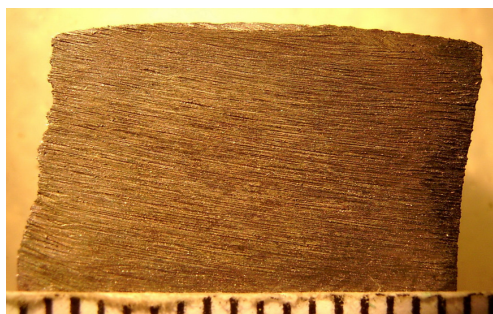


Рис. 1. Исходный образец фрагмента блока двигателя ВАЗ-2106 из серого чугуна, подготовленный к процессу восстановления маркировочных обозначений

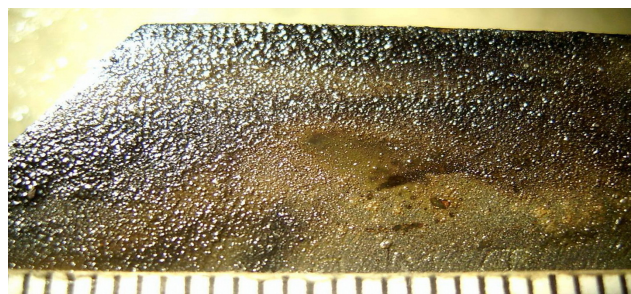


Рис. 2. Результат восстановления маркировочных обозначений (отрицательный) на образце из серого чугуна при использовании в качестве электролита 5 %-ного раствора азотной кислоты в этиловом спирте.

Указанные обстоятельства явились основанием для проведения работы по оптимизации состава электролитов для данных сплавов. В результате этой работы нами было установлено, что для серого чугуна положительные результаты могут быть получены при использовании электролита следующего состава:

Сернокислая медь – 1 г.

Желатин – 1 г.
Серная кислота (конц.) – 10 мл.
Вода дистиллированная – 500 мл.

Процесс травления в этом случае сопровождается осаждением пленки меди на поверхности образца, которая, с одной стороны, препятствует окислению, с другой – повышает контраст выявленных штрихов (рис. 3).



Рис. 3. Результат восстановления маркировочных обозначений на образце, выпиленном из блока двигателя ВАЗ-2106 (серый чугун) при использовании электролита на основе сернокислой меди, серной кислоты и желатина

Не менее важна оптимизация процесса электролитического травления для сплавов на основе алюминия. Большинство литературных источников [2 - 4] рекомендуют в этом случае травители и электролиты на основе едких щелочей КОН или NaOH. Проведенные нами эксперименты показали, что их использование также зачастую приводило к образованию темных пленок, которые невозможно было удалить смыванием дистиллированной водой или этиловым спиртом. Причиной появления подобных пленок на алюминии, также как и на сером чугуне, вероятно, является образование плохо растворимых окислов темного цвета.

Для алюминиевых сплавов образование подобных пленок напрямую связано с содержанием легирующих примесей на основе Mg и Mn.

Увеличение их содержания в сплаве почти наверняка приводило к потемнению площадки с маркировочными обозначениями при использовании едких щелочей.

Для сплава АЛ-4 содержание Mg и Mn относительно невелико, поэтому возможно использовать электролиты на основе КОН или NaOH в ограниченном диапазоне концентраций от 15 % до 45 %. Следует отметить, что результаты в этом случае не будут воспроизводимыми; на некоторых образцах или на отдельных частях одного образца возможно появление темных пленок.

Наилучшие по качеству и воспроизводимости результаты для сплава АЛ-4 были получены при использовании в качестве электролита 30 % водного раствора соляной кислоты (рис. 4).



Рис. 4. Результат восстановления маркировочных обозначений на образце, выпиленном из блока двигателя ГАЗ-3102 (сплав АЛ-4), при использовании в качестве электролита 30 %-ного водного раствора соляной кислоты

ЛИТЕРАТУРА

1. **Райгородский В.М.** Экспертиза восстановления измененных и уничтоженных маркировочных обозначений: Учебное пособие / В.М. Райгородский, В.Н. Хрусталев, С.А. Ермолаев – Саратов: СЮИ МВД России, 1999. – 72 с.

2. **Устинов С.Н.** Восстановление уничтоженных рельефных изображений на металлах, полимерах и дереве / С.Н. Устинов, В.М. Струков // Экспертная практика, 1989. – № 27. – С. 35- 45.

3. **Поль К.Д.** Естественнаучная кри-

миналистика. (Опыт применения научно-технических средств при расследовании отдельных видов преступлений) / Пер. с нем / К.Д. Поль – М., 1985. - 320 с.

4. **Борисов А.П.** Выявление удаленных знаков на металлических и некоторых неметаллических предметах: Практическое руководство / А.П. Борисов, Г.А. Скобелева – М., 1960. - 62 с.

5. **Митричев Л.С.** Исследование маркировочных данных автотранспортных средств: Учебное пособие / Л.С. Митричев и др. – М., 1995. - 78 с.

Райгородский Владимир Михайлович – к.ф.-м.н., доцент Саратовского государственного аграрного университета им. Н.И. Вавилова

Vladimir M. Raigorodskii - PhD, Associate Professor, Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov.

Статья поступила в редакцию 05.03.14, принята к опубликованию 30.03.14

УДК 621.314.58

**ИМПУЛЬСНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ ДЛЯ
ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК
НА ОСНОВЕ ТРАНСФОРМАТОРНО-ЁМКОСТНОГО
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ**

П. А. Кошелев, В. М. Опре, С. В. Парамонов,
А. О. Темников, А. А. Цариашвили

**THE PULSE POWER SUPPLY FOR ELECTROTECHNOLOGICAL
INSTALLATIONS ON TO BASIS OF THE TRANSFORMER
AND CAPACITOR CONVERTER**

P. A. Koshelev, To V. M. Opre, S. V. Paramonov,
A. O. Temnikov, A. A. Tsariashvili

В статье описан стабилизатор тока для электротехнологий, применяемых в современном производстве и в проектировании новых устройств, способный работать как в непрерывном, так и в импульсном режиме, имеющий высокую надёжность, радиационную устойчивость.

Основа силовой части стабилизатора представляет собой предложенный авторами параметрический источник тока: трансформаторно-ёмкостный преобразователь.

Ключевые слова: параметрический стабилизатор тока, колебательный контур, математическая модель

The article considers the current stabilizer for electrotechnologies applied in the present-day production and design of new devices capable to work both in the continuous and pulse modes, which maintain high reliability and radiation stability.

According to the authors, the basis of the power component of the stabilizer represents a parametrical source of current, such as the transformer and capacitor converter.

Keywords: parametrical stabilizer of current, oscillatory contour, mathematical model

В электротехнологиях (ЭТ) применяются как непрерывный, так и импульсный режимы источника питания (ИП), формирующего постоянный ток, однополярные или знакопеременные импульсные токи (ИЗТ).

К таким технологиям относятся: электроэрозионная обработка (ЭЭО) металлов [1], электрохимическая дезактивация (ЭХДА) поверхности металла [2,3,4], кон-

тактная сварка, лазерные технологии и многие другие.

Обзор литературы и патентный поиск позволяют классифицировать по группам схемные построения ИП постоянного и импульсного токов для ЭТ.

К первой группе схемных решений ИП для ЭТ можно отнести выпрямители, питающиеся от промышленной сети с тиристорным регулятором на первичной сторо-

не силового (согласующего) трансформатора (СТ).

Тиристоры включаются встречно-параллельно в фазы первичных обмоток СТ.

Ко второй группе относятся ИП, в которых ток технологической нагрузки регулируется вентильным преобразователем на вторичной стороне СТ, питающегося от промышленной сети с системой импульсно-фазового управления.

Это самая обширная группа ИП для ЭТ. Сюда относятся отечественные неревверсивные и реверсивные выпрямительные агрегаты типа ВАК, ВАКР, тиристорные преобразователи серии Т (ТЕ, ТЕР, ТВ, ТВР).

Кроме того, к этой группе можно отнести ИП, основу которых составляет неуправляемый выпрямитель с тиристорным коммутатором на выходе, использующим естественную коммутацию тириستоров за счет прерывистого тока.

В третью группу схемных решений, формирующих ИЗТ с регулируемыми временными параметрами импульсов, значительно меньшими периода напряжения промышленной частоты, входят ИП, имеющие в своей основе один или два неуправляемых выпрямителя и тиристорно-конденсаторный генератор импульсов с принудительной коммутацией тиристоров.

Четвертую группу составляют схемы, также имеющие в своей основе трансформатор, питающийся от промышленной сети и реостатно-диодную или реостатно-тиристорную схему на вторичной стороне, позволяющую формировать регулируемые с помощью реостатов импульсы тока прямой и обратной полярности.

Пятую группу образуют схемы, имеющие в своем составе трансформатор, выпрямитель, регулируемый однополярный или двухполярный стабилизатор напряжения и коммутатор направления тока нагрузки. Коммутатор может быть выполнен на основе тириستоров или транзисторов.

Шестую группу составляют схемы ИП, формирующие импульсные токи с помощью колебательных контуров. Подобные схемы включают в себя сетевой трансфор-

матор, выпрямитель, LC - колебательный контур, управляемые или неуправляемые вентили.

Реактивный элемент колебательного контура включается параллельно нагрузке и, в зависимости от схемы силовой части ИП и алгоритма работы системы управления, формирует в нагрузке импульсный однонаправленный или знакопеременный ток.

Седьмая группа схемных решений ИП строится на основе промежуточного преобразователя электрической энергии на повышенной частоте. Применение в схеме ИП промежуточного преобразовательного звена повышенной частоты (ПЗПЧ) дает возможность согласовать параметры питающей сети и нагрузки с помощью трансформатора, работающего на частоте звукового или ультразвукового диапазона.

Применение в ИП ПЗПЧ позволяет снизить массу и габариты его элементов, повысить коэффициент мощности, расширить технологические возможности установки за счет достаточно простого регулирования выходных параметров ИП, формировать на выходе ИП необходимые для данного процесса виды токов (постоянный, импульсный и импульсный знакопеременный и их значения).

Рассмотрим процесс электроэрозионной обработки (рис. 1).

Под электрической эрозией токопроводящих материалов понимается разрушение поверхности материала под воздействием импульсов электрического тока.

Процесс ЭЭО представляет собой разрушение металла или иного токопроводящего материала в результате локального воздействия кратковременных электрических разрядов между двумя электродами, один из которых является обрабатываемой деталью, а другой - электродом-инструментом (ЭИ). Под воздействием высоких температур в зоне разряда происходит нагрев, расплавление и частичное испарение металла.

Для получения высокой температуры в ограниченной области малого объема необходима большая концентрация энергии.

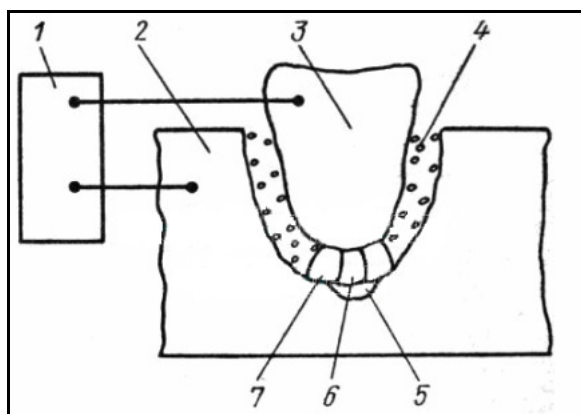


Рис.1. Схема ЭЭО

Достижение этой цели осуществляется использованием импульсного напряжения, а ЭЭО осуществляется в жидкой среде, которая заполняет зазор между электродами, называемый межэлектродным промежутком (МЭП), или межэлектродным зазором.

Ввиду того, что любая гладкая поверхность имеет свой макро- или микрорельеф, между двумя электродами всегда найдутся две точки, расстояние между которыми будет меньше, чем между другими точками поверхностей электродов.

При подключении к электродам источника напряжения между электродами начинает протекать ток и возникает электрическое поле, напряженность которого между близлежащими точками электродов будет достигать наибольшего значения. Под воздействием электрического поля в зоне наибольшего напряжения происходит ионизация рабочей среды с образованием канала повышенной проводимости, т. е. нарушается электрическая прочность рабочей среды и между этими двумя близлежащими точками происходит пробой МЭП. Между точками, в которых произошел пробой рабочей среды, образуется канал с высокой электрической проводимостью.

Сечение канала разряда мало, а его расширению препятствует магнитное поле, которое сжимает канал. Ту же роль выполняет и рабочая среда, окружающая канал разряда.

Длина канала разряда и его диаметр очень малы и поэтому плотность энергии в нем достигает больших величин, а температура в этом локальном объеме - десятков

тысяч градусов. В точках, в которых разрядный канал опирается на электроды, происходит оплавление и испарение материала с поверхности электродов. Рабочая среда, окружающая канал разряда, под воздействием высоких температур разлагается и испаряется. Все эти процессы происходят в очень малые отрезки времени и с выделением больших энергий, поэтому они носят динамичный взрывной характер.

Под действием сил, развивающихся в канале разряда, жидкий и парообразный материал выбрасывается из зоны разряда в рабочую среду, окружающую его, и застывает в ней с образованием отдельных частиц. В месте действия импульса тока на поверхности электродов появляются лунки, образовавшиеся вследствие удаления импульсным разрядом какого-то количества материала. Таким образом, осуществляется электрическая эрозия токопроводящего материала, показанная на примере действия одного импульса, с образованием одной эрозионной лунки. После прекращения действия импульсного разряда напряжение на электродах падает. Начинается процесс деионизации рабочей среды, т. е. нейтрализация заряженных частиц, и электрическая прочность рабочей среды восстанавливается. МЭП готов для нового прохождения очередного разряда.

Если на электроды от генератора периодически поступает импульсное электрическое напряжение, то процесс будет повторяться. При этом каждый новый импульсный разряд будет происходить в том месте, где расстояние между электродами минимально.

Если пауза между импульсными разрядами достаточна для деионизации рабочей среды, т. е. для восстановления электрической прочности, то процесс будет повторяться с образованием новых эрозионных лунок на поверхности электродов; этим и обуславливается электроэрозионный съем материала, т. е. ЭЭО. Описанный процесс представлен на рис. 1. Импульсное напряжение генератора 1 прикладывается к электродам 2 и 3.

При достижении напряжения определенной величины происходит электрический пробой рабочей среды, находящейся в межэлектродном пространстве, с образованием канала разряда 6. Благодаря высокой концентрации тепловой энергии материал в точке разряда 5 плавится и испаряется, рабочая среда испаряется и окружает канал разряда газообразными продуктами распада 7 (газовым пузырем). В результате развивающихся в канале разряда и газовом пузыре значительных динамических сил, капли расплавленного материала (металла) 4 выбрасываются за пределы зоны разряда в рабочую среду, окружающую электроды, и застывают в ней, образуя каплеобразные частицы. В дальнейшем эти частицы выносятся течением рабочей среды из МЭП.

Количество тепловой энергии, выделяющейся на каждом из электродов при импульсном электрическом разряде, неодинаково; также различно и количество снимаемого материала с поверхности каждого из электродов. Масса расплавленного и удаленного материала с электрода зависит от ряда факторов. К ним относятся: теплофизические свойства материалов, из которых изготовлены электроды (температура кипения, плавления, теплопроводность и теплостойкость); параметры рабочего импульса; полярность подключенных электродов.

Следует подбирать такое соотношение теплофизических свойств материала электродов и параметров импульса, при которых электрическая эрозия одного из электродов будет преобладать.

Эрозия ЭИ нежелательна, так как под ее воздействием в процессе работы изменяются его геометрические размеры, что, в свою очередь, оказывает существенное влияние на точность ЭЭО. Поэтому следует создать условия, при которых эрозия ЭИ была бы значительно меньше, чем эрозия обрабатываемой заготовки. Решают эту задачу, например, использованием импульсов, у которых ток не изменяет своего направления в течение всей длительности импульса. Такие импульсы называются униполярными.

Рассмотрим процесс электрохимической дезактивации.

Обладая рядом преимуществ по сравнению с химической или механической очисткой, электрохимическая поверхностная очистка и полирование применяются для целей ЭХДА металлических деталей реакторного и вспомогательного оборудования АЭС, производимой как в ходе плановых ремонтно-восстановительных работ, так и в ходе аварийных работ. Как один из перспективных методов дезактивации ЭХДА интенсивно развивается в отечественной и зарубежной практике.

Процессы ЭЭО и ЭХДА сходны, но ЭХДА имеет и свои специфические особенности, связанные со следующими факторами.

1. Невозможность погружения в электрохимическую ванну крупногабаритных деталей и узлов, входящих в состав оборудования АЭС.

2. Ограниченность объемов, в которых размещается оборудование АЭС подлежащее дезактивации в ходе плановых или аварийных работ.

3. Наряду с требованием качественной и производительной дезактивации к процессу ЭХДА предъявляется требование повышения чистоты поверхности и уменьшения вероятности появления локализованной коррозии (питтинги, чешуйки, трещины).

4. Важным условием ведения процесса ЭХДА является радиационная устойчивость электрооборудования.

5. Применение ограниченного числа видов и составов электролитов, что связано с особенностями ЭХДА, как процесса электрохимического полирования и с особенностями последующей переработки жидких радиоактивных отходов.

Требование повышенного качества поверхности и высокой производительности может быть выполнено при переходе от традиционных режимов на постоянном токе к нестационарным режимам электролиза с использованием источников импульсного однонаправленного тока.

Импульсные режимы ЭЭО и ЭХДА

электролиза позволяют заметно интенсифицировать электрохимические процессы, обеспечить обрабатываемой поверхности характеристики, труднодостижимые в классических режимах на постоянном токе.

Принцип действия трансформаторно-ёмкостного преобразователя (ТЕП) и методика расчёта его основных элементов приведены в [5, 6].

Недостаток индуктивно-ёмкостных преобразователей, в том числе ТЕП, – значительные масса и габариты установок, питающихся от промышленной сети переменного тока.

На подвижных объектах (подводных и надводных кораблях) имеется сеть с параметрами ~ 200 В, 400 Гц. Упомянутые выше показатели оказываются вполне приемлемыми и, если объект снабжён ядерным реактором, регулярно проводимый процесс ЭХДА не вызывает проблем.

На рис. 2 приведена упрощённая принципиальная схема трёхфазного ТЕП, на рис. 3 – результаты моделирования импульсного режима ТЕП, на рис. 4 – эскиз трансформатора, рассчитанного по разработанными авторами программам.

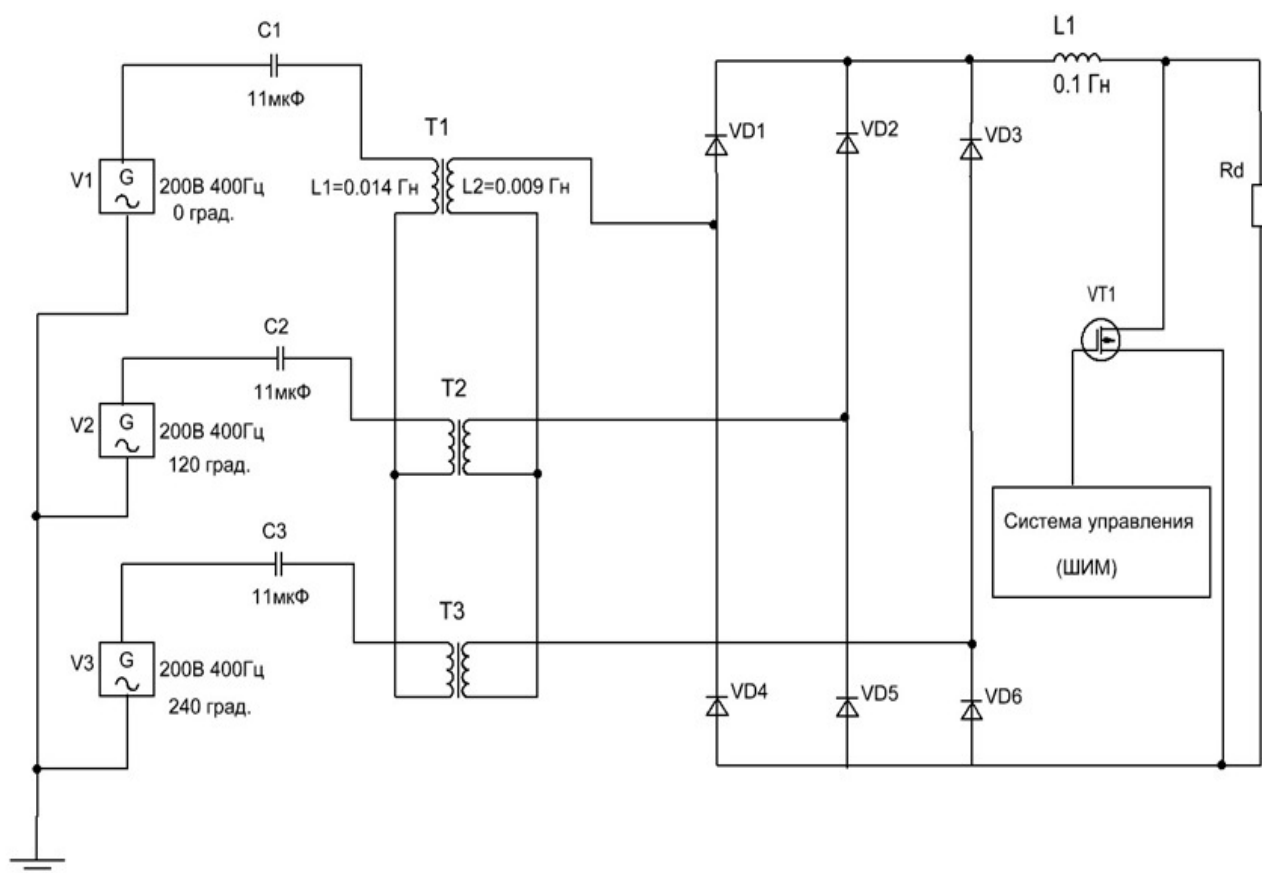


Рис. 2. Упрощённая принципиальная схема трёхфазного ТЕП

Моделирование проводилось в программах MICROCAP 9.0, MALAB 7.11. Результаты совпадают.

Активная составляющая сопротивления нагрузки R_d по рис. 2 изменялась от 0,1 до 10 Ом с шагом 3 Ом. Коэффициент заполнения импульсов 0,5.

Параметры снабберных цепей, включённых параллельно с полупроводниковыми приборами: ёмкость $C_{sb} = 10^{-7}$ Ф, активное сопротивление $R_{sb} = 10$ Ом.

Принцип работы и расчёт элементов ТЕП приведён в [5,6].

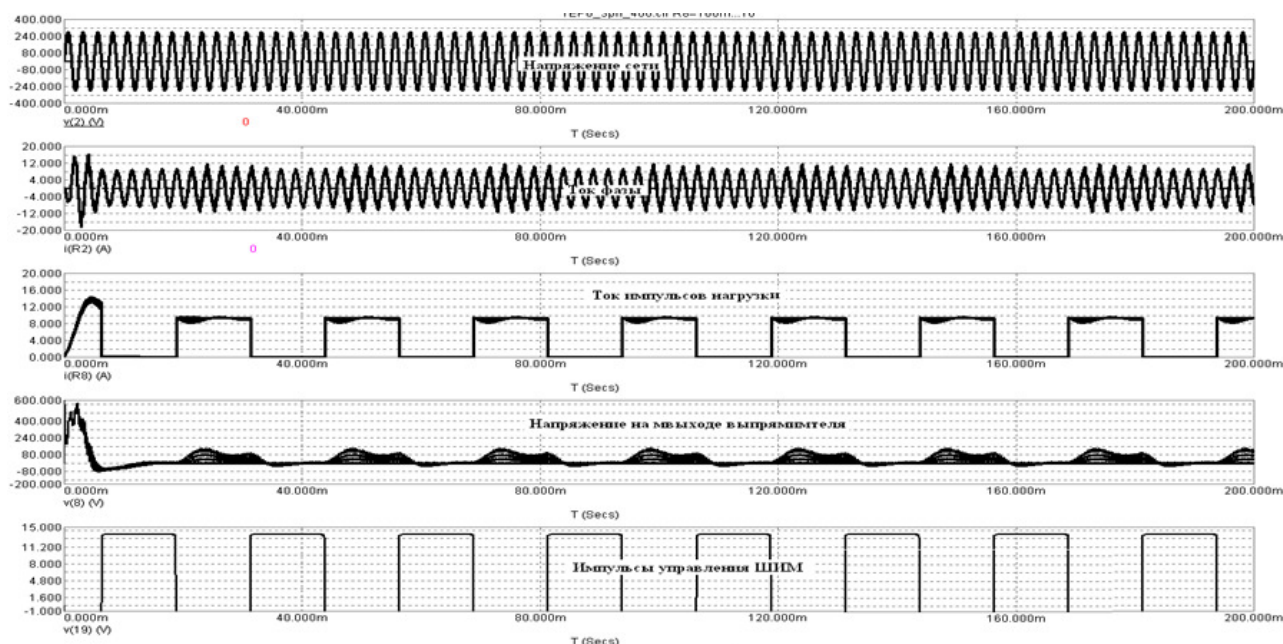


Рис. 3. Результаты моделирования импульсного режима ТЕП

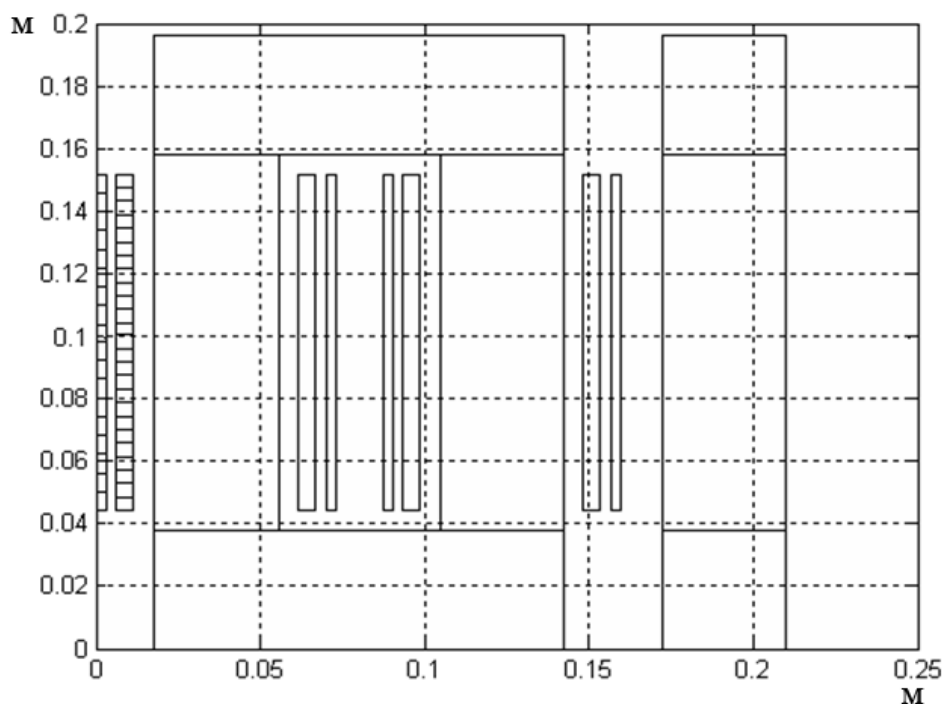


Рис.4. Эскиз трансформатора, рассчитанного по разработанными авторами программ

% Ввод исходных данных в пакете MATLAB

LC0=0.12; % Длина стержня, м
 LCA=0.15; % Длина ярма, м
 A=0.03; % Толщина магнитопровода, м
 B=0.03; % Ширина магнитопровода, м
 RO=1.7e-8; % Удельное сопротивление провода, Ом*м
 M0=4*pi*10^(-7); % Магнитная постоянная, Гн/м
 MR=1000; % Относительная магнитная проницаемость

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

FR=400;	% Частота, сети, Гц
P=5000 ;	% Активная мощность нагрузки, Вт
R=5;	% Активное. сопротивление нагрузки, Ом
BM=1.5;	% Допустимая магнитная индукция, Тл
DH0=1e-5;	% Размер немагнитного зазора, м
Twr=1;	% Относительная продолжительность работы
Di0=0.005;	% Толщина изоляции магнитопровода, м
Di1=0.0002;	% Толщина изоляции 1 обмотки, м
Di2=0.0005;	% Толщина изоляции 2 обмотки, м
DH1=0.001;	% Ширина воздушного канала стержень-1 обмотка, м
DH2=0.003;	% Ширина воздушного канала 1 - 2 обмотки, м
P0=15;	% Удельная мощность потерь в магнитопроводе, Вт/кг % (для материала 3425, толщина листа 0,08 мм).
Di12=0.003;	% Толщина изоляции между 1 и 2 обмотками, м
Gam=8900;	% Плотность материала обмоток, кг/м ³
Gaf=7800;	% Плотность материала магнитопровода, кг/м ³
E=282;	% Амплитуда напряжения питающей сети, В
Dmax=3;	% Допустимая плотность тока, А/мм ²
LD= 0.9*LC0;	% Размер для размещения обмотки на стержне

Таблица 1

Результат расчёта элементов ТЕП

Активная мощность нагрузки P (Вт)	5000
Активное сопротивление нагрузки R (Ом)	5
Частота (основная гармоника) FR (Гц)	400
Количество витков первичной обмотки W1	84
Количество витков вторичной обмотки W2	66
Размер немагнитного зазора (м)	1e-005
Индуктивность намагничивания Lm (Гн)	0.014
Индуктивность 2 обмотки L2 (Гн)	0.009
Площадь "кольца" рассеяния SQ (м ²)	0.0037
Индуктивность рассеяния Ls (Гн)	0.00026
Ёмкость резонансного контура (Ф)	11e-005
Ток холостого хода (А)	8
Магнитная индукция Bm (Тл)	1.52
К П Д (ЕТА)	0.98
Сопротивление 1 обмотки R1 (Ом)	0.023
Сопротивление 2 обмотки R2 (Ом)	0.026
Длина провода 1 обмотки lw1(м)	11
Длина провода 2 обмотки lw2(м)	14
Общая мощность активных потерь Psum (Вт)	99.4
Диаметр провода 1 обмотки D1 (м)	0.003
Диаметр провода 2 обмотки D2 (м)	0.004
Толщина магнитопровода А (м)	0.03
Ширина магнитопровода В (м)	0.03
Ср. длина магнитопровода В (м)	0.54
Масса обмоток Qm (кг)	2.23
Масса магнитопровода Qf (кг)	3.8
Масса трансформатора QT (кг)	6.0
Длина стержня LC0 (м)	0.12
Длина ярма LCA (м)	0.15
Площадь сечения стержня Sc (м ²)	0.0009

Итак, в статье рассмотрен стабилизатор тока для электротехнологий, применяемых в современном производстве, способный работать как в непрерывном, так и в импульсном режиме. Основа силовой части стабилизатора представляет собой

предложенный авторами параметрический источник тока: трансформаторно-ёмкостный преобразователь. Требуемые для конкретной технологии электрические режимы обеспечиваются расчётом элементов ТЭП и параметрами системы управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Немилов Е.Ф.** Электроэрозионная обработка металлов / Е.Ф. Немилов - М., «Машиностроение», 1983. - 160 с.

2. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки / Г.А. Амитан, И.Е. Бейеупов, Ю.М. Барон и др.; Под общ. ред. В.А.Волосатова.- Л.:Машиностроение,1988.-719с.

3. **Ампелогова Н.И.** Дезактивация в ядерной энергетике / Н.И. Ампелогова, Ю.М. Симановский, А.А. Трапезников; под ред. В.М.Седова - М.: Энергоиздат, 1982. - 256 с.

4. Развитие методов электрохимической

дезактивации в ядерной энергетике / Н.И.Ампелогова, Р.В.Балуков, С.В.Бондарев и др. - М.: ЦНИИ

5. Пат. РФ № 93597 / Богачев В.С., Кошелев П.А., Опре В.М., Парамонов С.В. Индуктивно-ёмкостный преобразователь. Оpubл. 27.11.2009 г. Заявка № 2009143543.

6. **Кошелев П.А.** Трансформаторно-ёмкостный стабилизатор тока / С.А. Дозоров, П.А. Кошелев, В.М. Опре, С.В. Парамонов, В.Н. Терещенко // Вестник Саратовского гос. технического университета, 2012. – № 2 (66). – Вып. 2. – С. 59-64.

Кошелев Пётр Александрович – доктор технических наук, профессор Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета («ЛЭТИ»).

Опре Виктор Михайлович – доктор технических наук, профессор Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета («ЛЭТИ»).

Парамонов Сергей Владимирович – кандидат технических наук, доцент Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета («ЛЭТИ»).

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

Цариашвили Александр Андреевич - бакалавр, инженер ОАО «Концерн «Океан-Прибор»» г. Санкт-Петербург.

Peter A. Koshelev – Dr. Sc., Professor at St. Petersburg State Electrotechnical University

Victor M. Opre – Dr. Sc., Professor at St. Petersburg State Electrotechnical University

Sergei V. Paramonov – PhD, Assistant Professor at St. Petersburg State Electrotechnical University ..

Anatoly O. Temnikov – BEng., Production Manager at JSC FEDAL, Saint-Petersburg

Alexander A. Tsariashvili – BEng., Engineer at JSC “Okean-Pribor” Concern, Saint-Petersburg.

Статья поступила в редакцию 05.03.14, принята к опубликованию 30.03.14

ОСНОВНЫЕ ФОРМЫ СТИМУЛИРОВАНИЯ ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В ЦЕЛЯХ ЭФФЕКТИВНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ СТРАТЕГИИ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

А.Г. Заикин, А.Н. Плотников

BASIC INCENTIVES FOR INNOVATION ACTIVITIES TO EFFECTIVELY IMPLEMENT THE ENERGY SAVING STRATEGY

A.G. Zaikin, A.N. Plotnikov

Статья посвящена описанию различных форм стимулирования инновационной деятельности с целью реализации стратегии энергосбережения.

Ключевые слова: *стратегия, энергосбережение, энергоэффективность, инновационная деятельность*

The article is devoted to the description of various forms of stimulating innovative activities aimed at implementation of the energy saving strategy.

Key words: *strategy, energy saving, energy efficiency, innovative activity*

Исследованию проблем инновационного развития в промышленности с целью повышения эффективности использования энергетических ресурсов посвящены труды российских ученых: Ю.С. Архангельского, И.А. Башмакова, В.В. Бушуева, В.Б. Жузе, Ю.М. Когана, Е.А. Ларина, С.Н. Никифорова, А.И. Попова, В.А. Устинова и ряда других.

К настоящему времени детально проработаны вопросы структуризации инновационного процесса, целеполагания ресурсо- и энергосбережения, его финансового, инфраструктурного и информационного обеспечения. При этом проблема стимулирования инновационной деятельности с целью реализации стратегии энергосбережения требует особой проработки для обеспечения конкурентоспособности предприятий в условиях современной экономики.

Любое инновационное преобразование предприятия непременно затрагивает энергетическое хозяйство через изменение топливно-энергетического баланса, либо через модификацию способа и режима использования топливно-энергетических

ресурсов. Чем радикальнее технологическое преобразование основного производства, тем в большей степени нуждается в адаптации энергетический блок предприятия. Однако инновационные стратегии предприятия в разной степени пригодны для совмещения с энергосберегающими проектами.

Надо признать, что реализуемая на предприятии политика энергосбережения и повышения энергоэффективности производства оказывает влияние на принимаемую инновационную стратегию. Всякая попытка локально предпочесть энергосбережение чревата не только потерей эффективности, а и разрушением воспроизводственного процесса - финансовой несостоятельностью предприятия. Соответственно, управление процессом энергосбережения, меры стимулирования энергосбережения должны питаться не столько прямым результатом энергосбережения, сколько полным эффектом производственной деятельности стратегических партнеров, включая и перераспределенный дополнительный народнохозяйственный эффект, вклад предприятия в национальный

доход (дополнительную прибыль региона). Полный эффект энергосбережения (включая косвенные его последствия у стратегических партнеров) может составлять от 130 до 250 % прямого эффекта энергосбережения, поэтому так важно обеспечить участие партнеров в программе реализации инновационной стратегии повышения энергоэффективности предприятия.

Исчисление дополнительного народнохозяйственного (регионального) эффекта, обеспеченного предприятием, затруднительно, но усредненные статистические показатели доказывают в целом высокую бюджетную эффективность участия государства в стимулировании интенсивного развития производства.

Инновационные процессы все более определяют генеральную линию перспективного развития предприятия и поэтому находятся под контролем и воздействием государства. Государство широко применяет различные меры стимулирования инновационной деятельности в малом и среднем бизнесе: законодательные, финансовые, налоговые, имущественные механизмы стимулирования и поддержки малых предприятий, специализирующихся в осуществлении научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок (НИОКР).

К настоящему времени созданы научные основы, разработаны технологии и опытно-промышленные образцы оборудования и материалов, включая: модельный ряд когенерационных установок (минитеплоэлектроцентрали) модульного типа; энергосберегающие и экологически безопасные осветительные приборы нового поколения на светодиодах и безртутных газоразрядных лампах; технологические основы оперативной диагностики электротехнического оборудования; технологические основы элементов системы теплоснабжения нового поколения, обеспечивающие существенное снижение энергетических потерь; технологические решения по улавливанию и захоронению углекислого газа с использованием современных технологий сжигания топлива; опытно-

промышленное производство энергетических установок на топливных элементах (твердополимерных и твердооксидных) для автономной, резервной, аварийной энергетики и транспортных средств; технологии и оборудование для использования низкопотенциальных геотермальных ресурсов.

Наряду с технологическими новшествами широко используются возможности организационного, консультационного и научно-технического взаимодействия крупных предприятий, высших учебных заведений и исследовательских центров с малыми инновационными предприятиями в целях ускоренной реализации новых разработок и их дальнейшей успешной коммерциализации.

В целях эффективной реализации стратегии энергосбережения на уровне государства используются следующие основные формы стимулирования инновационной деятельности: создание специальных национальных программ конкурсной поддержки малых инновационных предприятий, работающих по государственной научно-технической тематике; прямое финансирование инновационных проектов (субсидии, займы), которое достигают 50 % расходов на создание новой продукции и технологий; предоставление государственных ссуд, в том числе беспроцентных; дотации из бюджета; деятельность фондов внедрения инноваций с учетом возможного риска; деятельность инвестиционных и венчурных фондов для финансирования инновационных проектов; безвозмездные ссуды, (до 50% затрат) на внедрение новшеств; снижение государственных пошлин для индивидуальных изобретателей; отсрочка уплаты пошлин или освобождение от них, если изобретение касается экономии энергии; предоставление ряда льгот и преференций малым инновационным предприятиям на базе НИИ, университетов; бесплатные ведение делопроизводства, услуги патентных поверенных по заявкам индивидуальных изобретателей.

Значимым финансовым инструментом поддержки малых инновационных пред-

приятий являются государственные заказы на поставки и контракты от правительственных организаций на проведение НИОКР.

Государственные контракты обязательно предусматривают важные, мобилизующие исполнителя требования: получение необходимых результатов по решению научно-технической проблемы в течение определенного срока; предоставление заказчиком необходимого исполнителю кредитования на весь период выполнения работ; гарантии заказчика на приобретение будущих результатов работы исполнителя.

Наиболее эффективной и распространенной в последние десятилетия частной формой интенсификации инновационной деятельности в условиях рыночной экономики является венчурное финансирование инновационных проектов с привлечением частного капитала к взаимодействию с предпринимателями, обладающими организационным и интеллектуальным потенциалом с целью получения значительной прибыли от реализации многообещающих инновационных идей путем предоставления определенных денежных средств в обмен на долю в уставном капитале нового предприятия.

Условия успеха и динамичного развития венчурного инвестирования: высокий коммерческий потенциал научно-технических разработок, осуществляемых малыми инновационными производственно-технологическими компаниями; наличие профессиональных менеджеров, оценивающих перспективу развития данного направления и осуществляющих связь между капиталом и его практическим применением; существование свободного рынка депонированного капитала институциональных инвесторов; развитый рынок ценных бумаг, позволяющий реализовать финансовые технологии входа и выхода из инвестиционного проекта; высокая ёмкость и платежеспособность потребительских рынков инновационной продукции.

Из косвенных методов регулирования инновационной активности наиболее значимыми представляются: налоговое сти-

мулирование; стимулирование через амортизационную политику; бюджетные дотации компаниям, осваивающим новые виды продукции.

Повышение удельного веса льгот, обеспечивающих благоприятный инновационный климат, позволяет шире и целенаправленнее использовать бюджетные средства. Важно, что такие льготы предоставляются не авансом, а в качестве поощрения за реальную инновацию, не разработчикам новшества, а предприятиям и инвесторам.

Не случайно в ряде стран стимулы превышают инвестиции. Например, в Австралии налоговая льгота составляет 150 % инвестиций, в Бельгии – 110 %.

Амортизационная политика - установление повышенных нормативов снижения (списания) стоимости капитальных и нематериальных активов и порядка отнесения их на производственные затраты понижает величину прибыли и, соответственно, налога.

За рубежом все шире стали применяться нормативные ограничители – предельные сроки эксплуатации оборудования или использования технологий. Ограничители устанавливаются в отдельных случаях и для потребителей устаревшей техники. Эти вненалоговые методы сочетают директивное (по срокам) и экономическое (по стоимости) стимулирование технического перевооружения предприятия.

Важно различать техническое перевооружение и структурную перестройку.

Если целью стимулирования является техническое перевооружение всех предприятий и общая активизация применения инноваций, то достаточно использовать общие (универсальные) методы.

Если же ставится задача структурной перестройки и повышения конкурентоспособности реальных секторов экономики с выходом предприятия в перспективе на мировой рынок, то методы стимулирования должны учитывать приоритеты государства, использовать особый механизм целенаправленного воздействия.

Сочетание общего и специфического – главная особенность стратегии предприятия. В целом система стимулирования инновационных подходов к повышению энергоэффективности должна способствовать общей активизации инновационной деятельности, обеспечению структурной перестройки и повышению конкурентоспособности предприятий.

Анализ сложившейся практики повышения энергоэффективности предприятия показывает, что достижение максимального экономического эффекта при реализации энергосберегающих мероприятий со значительным народнохозяйственным эффектом возможно только при внедрении комплексных систем учета и регулирования энергопотребления и требует при соблюдении единого стратегического подхода в подборе индивидуальных технических решений, выбора менее затратных, целесообразных с точки зрения глобального экономического результата мер.

Таким образом, в рамках единой стратегии страны и намеченных предприятиями стратегических целей руководителю предстоит максимально полно использовать специфические особенности конкретно решаемых на предприятии задач энергосбережения наилучшим из трёх тактических приемов: использование универсаль-

ных (типовых), технологически и технически обеспеченных мероприятий энергосбережения; реализация комплексной программы развития в составе стратегических партнеров; инновационное преобразование основного производства с принципиально более высокой энергоэффективностью, заложенной в новой технологии.

С позиции программно-целевого подхода долговременная программа инновационных преобразований должна содержать количественно определенные цели, системные ограничения, поименованных заказчиков и исполнителей, обеспечиваться необходимыми ресурсами и механизмом взаимодействия участников, стимулирующим их заинтересованное и согласованное достижение целей программы, в том числе Государственной программы РФ "Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 г."

В расширенном понимании взаимодействие допускает участие исполнителей и внешних агентов, оказывающих содействие (противодействие) программе или испытывающих на себе косвенное влияние ее последствий. Только в таком составе можно комплексно обеспечить реализацию и оценить полный результат и эффект выполнения программы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Государственная программа РФ "Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 г." Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 декабря 2010 г. N 2446-р [Электронный ресурс] - Режим доступа:

<http://www.rg.ru/2011/01/25/energoberejenie-site-dok.html>

2. **Голиченко О. Г.** Национальная инновационная система России: состояние и пути развития. / О. Г. Голиченко. - М. : Наука, 2006.

3. **Ларин Е. А.** Энергетические обследования / Е. А. Ларин // Инновации+Паблицити. - 2010. - № 2. - С. 16-21.

4. **Мишин Ю.М.** Организационно-экономический механизм повышения энергоэффективности предприятия в условиях реформирования рынка электроэнергии РФ: на примере ОАО «Лесопромышленная холдинговая компания "Братский лесопромышленный комплекс» : диссертация кандидата экономических наук : 08.00.05 -2008 -149 с.

5. Основные формы стимулирования инновационной деятельности [Электронный ресурс]-Режим доступа: <http://www.innovbusiness.ru/NewsAM/NewsAMShow.asp?ID=14674>

6. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 28 августа 2003 г. N 1234-р

(Собрание законодательства Российской Федерации, 2003, n 36, ст. 3531)

7. Федеральный закон Российской Федерации от 23 ноября 2009 г. № 261-ФЗ "Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении из-

менений в отдельные законодательные акты Российской Федерации".

8. Энергетическая стратегия России на период до 2030 г. Принята Правительством РФ 13 ноября 2009 г. № 1715-р

Заикин Андрей Георгиевич – директор ООО «Торговый дом «Техногазппарат

Andrew G. Zaikin – Director: LLC Trading House" Tehnogazaparat"

Плотников Анатолий Николаевич - д.э.н., профессор, заведующий кафедрой «Прикладная экономика и управление инновациями» Саратовского государственного технического университета им. Гагарина Ю.А.

Anatoly N. Plotnikov - Dr. Sc., Professor, Head: Department of Applied Economics and Innovation Management, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 12.03.14, принята к опубликованию 30.03.14

К СВЕДЕНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

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

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 621.318.3

ОСНОВНЫЕ РАЗМЕРЫ И ИХ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ИМПУЛЬСНОГО ЛИНЕЙНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров

DIMENSIONS AND THEIR RELATIONS TO THE MAGNETIC SYSTEM OF PULSE LINEAR ELECTROMAGNETIC MOTOR

V.I. Moshkin, G.G. Ugarov

Предложено решение задачи по определению основных размеров и их соотношений для магнитных систем импульсного линейного электромагнитного двигателя (ЛЭМД), используемого в приводе технологического оборудования, исходя из максимума интегральной работы на единицу объема двигателя, что позволит облегчить расчет импульсного ЛЭМД на ранних этапах его проектирования.

Ключевые слова: импульсный линейный электромагнитный двигатель, интегральная работа, магнитная индукция, радиус якоря, обмотка возбуждения

Использование в составе силового электромагнитного привода цилиндрических импульсных линейных электромагнитных двигателей (ЛЭМД) с комбинированным якорем и двумя рабочими зазорами вызывает необходимость обоснования рациональных размеров двигателей и их конструктивных элементов, разработки методики их расчета.

Выявление рациональных размеров и их соотношений для магнитной системы импульсного ЛЭМД позволит при проектировании таких двигателей обеспечить наилучшие энергетические и динамические показатели приводимых ими машин для импульсных технологий.

Известные положения расчета учитывали

The article presents the solution to the problem of defining the basic parameters and their relationship to the magnetic system of pulse linear electromagnetic motor used for the process equipment drives. The problem solving algorithm is based on the maximum of integrated work per unit of the engine volume which helps to facilitate the calculations of pulse linear electromagnetic motor at the early stages of the design process.

Keywords: pulse linear electromagnetic engines, integrated work, a magnetic induction, anchor radius, an excitation winding

соотношения геометрических параметров двигателя без привязки к конфигурации его магнитной системы. Однако к настоящему времени появились новые: двухзазорные магнитные системы цилиндрической структуры с направляющим корпусом, который может быть выполнен как неферромагнитным (НФНК), так и ферромагнитным (ФНК). Эти новые магнитные системы позволяют создавать импульсные ЛЭМД со значительно более высокими удельными энергетическими показателями [1].

Цель статьи – установить основные размеры и их соотношения для импульсных ЛЭМД с новыми магнитными системами. В основу расчета этих размеров и их

соотношений положено определение величины магнитной энергии, преобразуемой в магнитной системе за цикл в механическую работу. Преобразование магнитной энергии происходит в соответствии с реальным магнитным циклом в координатах «потокосцепление – ток», с учётом продолжительности включения ПВ и температуры τ перегрева обмотки возбуждения.

Сохраняя используемый в [3,6] подход, проведем обоснование рациональных значений длины обмотки и радиуса якоря ЛЭМД, обеспечивающих при заданном тепловом режиме обмотки наибольшую интегральную работу двигателя при наименьшем объеме его активных материалов. Расчетные конструктивные схемы магнитных систем ЛЭМД приведены на рис. 1 а,б.

Для пользования выбранным критерием оценки выразим интегральную работу $A_{\text{и}}$ ЛЭМД и объем его активных материалов $V_{\text{д}}$ через электромагнитные нагрузки и геометрические параметры магнитной системы, принимая те же допущения, что и в работах [5-7].

Между обмоткой возбуждения и промышленной сетью включено устройство питания и управления (УПУ), с помощью которого во время движения якоря регулируется ток обмотки, а его эквивалентное значение I_{τ} соответствует допустимому превышению температуры. В результате реализуется магнитный цикл, изображённый на рис. 2, причём $I_{\tau} = I_{\text{МАКС}}/k_a$, где k_a – коэффициент амплитуды; $I_{\text{МАКС}}$ – максимальное значение тока обмотки.

Интегральная работа ЛЭМД определяется из его магнитного цикла (рис. 2):

$$A_{\text{и}} = \Psi_{\tau} I_{\tau} - \int_0^{\Psi_{\tau}} Id\Psi - 0,5 \Psi_{\text{Н}} I_{\tau} = \frac{I_{\text{МАКС}} \cdot \Psi_{\tau}}{k_a} \times \\ \times \left[1 - \frac{k_a \int_0^{\Psi_{\tau}} Id\Psi}{\Psi_{\tau} I_{\text{МАКС}}} \right] - 0,5 \frac{I_{\text{МАКС}} \Psi_{\text{Н}}}{k_a} \quad (1)$$

где $\Psi_{\tau}, \Psi_{\text{Н}}$ – потокосцепления импульсного ЛЭМД, соответствующие зазорам для

рассматриваемых крайних положений якоря и для тока I_{τ} .

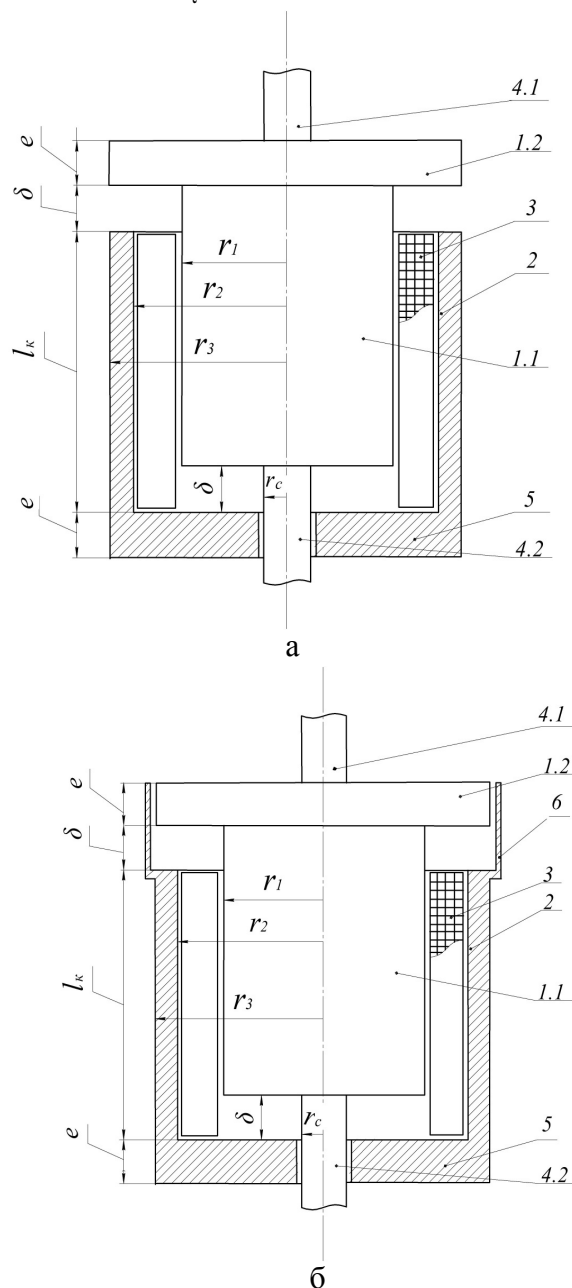


Рис. 1. Расчетные конструктивные схемы магнитных систем импульсного ЛЭМД с неферромагнитным (а) и ферромагнитным (б) направляющим корпусом: 1 – якорь (1.1 – втяжная часть, 1.2 – притягивающаяся часть); 2 – статор (ядро); 3 – обмотка возбуждения; 4 – направляющий стержень (4.1 – верхний, 4.2 – нижний); 5 – фланец; 6 – направляющий корпус

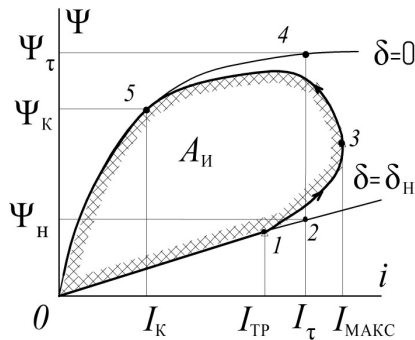


Рис. 2. Магнитный цикл работы импульсного ЛЭМД

Введем относительные величины согласно [3,6], приняв за базисные величины радиус r_1 втяжной части якоря (рис.1) и значение магнитной индукции $B_B = 1$ Тл: $B/B_B = B_*$; $\Psi/\Psi_B = \Psi_*$; $H/H_B = H_*$; $I/I_B = I_*$; $e/r_1 = e_*$ и т. д., где B , H – значения индукции и напряжённости магнитного поля в магнитопроводе. Тогда (1) с учетом этих соотношений примет вид:

$$A_{и} = \Psi_B I_{\tau*} I_B \left[\Psi_{\tau*} \left(1 - \frac{\int_0^{\Psi_{\tau*}} I_* d\Psi_*}{\Psi_{\tau*} I_{\tau*}} \right) - 0,5 \Psi_{н*} \right],$$

а заменив $I_{\tau*} = \frac{I_{МАКС*}}{k_a}$; $\Psi_{\tau*} \approx \Psi_{МАКС*}$;

$B_{\kappa*} = B_{\tau*}$; $I_{\tau*} = H_{\tau*} = \frac{H_{МАКС*}}{k_a}$, получим:

$$A_{и} = \Psi_B \frac{I_{МАКС*}}{k_a} I_B \times \left[\Psi_{\tau*} \left(1 - \frac{\int_0^{\Psi_{\tau*}} I_* d\Psi_*}{\Psi_{\tau*} I_{МАКС*}} \right) - 0,5 \Psi_{н*} \right]. \quad (2)$$

Выразим входящие в (2) базисные и относительные величины через параметры ЛЭМД. Для этого из закона полного тока при зазоре $\delta = 0$ при одинаковых сечениях якоря и статора получим значение тока $I = 2\ell_K H / w = 2\gamma r_1 H / w$. Тогда базисные величины будут

$$\Psi_B = B_B \pi_1^2 w; H_B = B_B / \mu_0; I_B = 2\gamma r_1 B_B / (w \mu_0), \quad (3)$$

где w – число витков обмотки; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Тогда относительные ток и потокоосцепление будут равны между собой

$$I_* = H_*, \Psi_* = B_*. \quad (4)$$

Представив (2) с учетом (3), (4) и аппроксимируя кривую намагничивания стали полиномом вида

$H = \alpha B_* + \beta \cdot B_*^5 + \zeta B_*^9$ [3,6], получим

$$A_{и} = 2B_B^2 \pi_1^3 \gamma \mu_0^{-1} \cdot \frac{I_{МАКС*}}{k_a} \times [B_{\tau*} (1 - q) - 0,5 \Psi_{н*}] \quad (5)$$

$$q = k_a \left(\int_0^{B_{\tau*}} H_* dB_* \right) / (B_{\tau*} H_{МАКС*}) = \frac{0,5k_a (\alpha + \beta B_{\tau*}^4 / 3 + \zeta B_{\tau*}^8 / 5)}{\alpha + \beta B_{\tau*}^4 + \zeta B_{\tau*}^8}; \quad (6)$$

где $B_{\tau*}, H_{\tau*} = H_{МАКС*} / k_a$ – относительные значения индукции и напряжённости магнитопровода при $\delta = 0$, соответствующие току I_{τ} ; α ; β ; ζ – размерные коэффициенты аппроксимации.

Используя уравнение теплового баланса Ньютона-Рихмана [3,6], определим допустимый относительный ток с учетом продолжительности включения ПВ

$$I_{\tau} = \frac{\sqrt{K_T k_{3M} \tau S_{ОХЛ} S_{ОК} / (\Pi \Pi \cdot \rho_{\tau} \ell_{ср})}}{w I_B}, \quad (7)$$

где k_{3M} , K_T – коэффициенты заполнения и теплоотдачи (эквивалентный) обмотки; $S_{ОХЛ}, S_{ОК}$ – поверхность охлаждения импульсного ЛЭМД и сечение окна намотки; ρ_{τ} – удельное сопротивление материала провода при превышении температуры τ ; $\ell_{ср}$ – средняя длина витка.

Уравнение (5) имеет такую же структуру, что и основное расчетное уравнение для других типов электрических машин [8]. Оно позволяет при фиксированных значениях B_{τ} , r_1 , γ , ПВ, I_{τ} , τ оценить размеры импульсного ЛЭМД по величине удельной интегральной работы. Выразим

$S_{\text{охл}}$, $S_{\text{ок}}$, $\ell_{\text{ср}}$ через геометрические параметры магнитной системы (рис. 1 а, б)

$$\begin{aligned} S_{\text{охл}} &= 2\pi r_1^2 \alpha' [y \cdot (x+1) + x^2 - 1]; \\ S_{\text{ок}} &= r_1^2 y(x-1); \quad \ell_{\text{ср}} = \pi r_1 \cdot (x+1) \end{aligned} \quad (8)$$

где α' – эмпирический коэффициент, учитывающий условия теплоотдачи, $\alpha' = 0,9...2,4$ (согласно [3,5]). Тогда выражение (5) с учетом (3), (7) и (8) будет иметь окончательный вид:

$$A_{\text{и}} = \pi r_1^{7/2} y B_{\text{б}} a_1 b_1 [B_{\tau^*}(1-q) - 0,5\psi_{\text{н}^*}] \quad (9)$$

$$a_1 = \sqrt{2K_{\text{т}} k_{3\text{м}} \tau \alpha' / (\text{ПВ} \rho_{\tau})};$$

$$b_1 = \sqrt{(x-1)[1 + (x-1)/y]}. \quad (10)$$

С учетом сечения провода $S_{\text{пр}} = S_{\text{ок}} \cdot k_{3\text{м}} / w$, а также выражений (7) и (8) получим допустимую плотность тока j_{τ} в обмотке возбуждения:

$$j_{\tau} = a_1 b_1 / (k_{3\text{м}}(x-1)\sqrt{r_1}) \quad (11)$$

и выразим интегральную работу импульсного ЛЭМД через его геометрические параметры и электромагнитные нагрузки

$$\begin{aligned} A_{\text{и}} &= \pi r_1^4 B_{\text{б}} j_{\tau} y(x-1) \times \\ &\times k_{3\text{м}} [B_{\tau^*}(1-q) - 0,5\psi_{\text{н}^*}] \end{aligned} \quad (12)$$

Анализ (9) и (12) показывает, что интегральная работа в значительной степени определяется радиусом якоря, например, с ростом последнего увеличиваются поверхности взаимодействия и объем рабочих зазоров импульсного ЛЭМД.

Объем активных материалов двигателя [3]

$$V_{\text{д}} = \pi r_1^3 \cdot (x_2 + 1)(y + 2e_*) \quad (13)$$

Тогда для $e_* = 0,5$ получим интегральную работу импульсного ЛЭМД на единицу объема в виде критерия оценки Γ_v :

$$\begin{aligned} \Gamma_v &= \frac{A_{\text{и}}}{V_{\text{д}}} = \frac{\sqrt{r_1} B_{\text{б}} a_1 (B_{\tau^*}(1-q) - 0,5\psi_{\text{н}^*})}{(x^2 + 1)(1 + 1/y)} \times \\ &\times \sqrt{(x-1)[1 + (x-1)/y]} \end{aligned} \quad (14)$$

Для анализа оптимальной геометрии удобно использовать следующее безразмерное выражение удельной интегральной работы

$$\Gamma_v / k' = \frac{\sqrt{(x-1)(1 + (x-1)/y)}}{(x^2 + 1)(1 + 1/y)}, \quad (15)$$

полученное делением (14) на

$$k' = \sqrt{r_1} B_{\text{б}} a_1 (B_{\tau^*}(1-q) - 0,5\psi_{\text{н}^*})$$

На рис. 3 а, б представлены семейства зависимостей (15) при $y = \text{const}$ и при $x = \text{const}$.

Анализ (15) показывает, что максимум критерия Γ_v / k' при $r_1 = \text{const}$ соответствует диапазону $x = 1,6...1,8$ при $y = 2...5$, что согласуются с результатами [3,6].

При изменении параметра x от 1,4 до 3,5 максимум критерия Γ_v относительно длины y обмотки существует при ее сравнительно больших значениях: с ростом длины обмотки удельная интегральная работа монотонно возрастает, приближаясь к своему пределу, зависящему от параметра x . Такое изменение критерия $\Gamma_v(y)$ при $x = \text{const}$ обусловлено тем, что объем активных материалов в своем росте опережает интегральную работу, а именно: объем $V_{\text{д}}$ согласно (13) растет линейно относительно длины y , а работа $A_{\text{и}}$ согласно (9)...(12) – в степени, несколько меньшей единицы. Интенсивность роста удельной интегральной работы в зависимости от y в диапазоне $x = 1,4...3,5$ различна (рис. 3 б). Для меньших значений x рост критерия Γ_v существенно замедляется при $y > 3...4$, а для значений x , близких к 2,5...3,5, – резко замедляется уже при $y > 1...1,5$.

При изменении параметра x от 3,5 и выше относительно длины y существуют слабо выраженные максимумы Γ_v , которые с ростом x проявляются сильнее и смещаются в сторону меньших значений y . Результаты анализа Γ_v по (14) относительно длины обмотки подтверждаются экспериментальными исследованиями, полученными в [9].

Для анализа критерия Γ_v в зависимости от радиуса r_1 представим (14) в безразмерной форме.

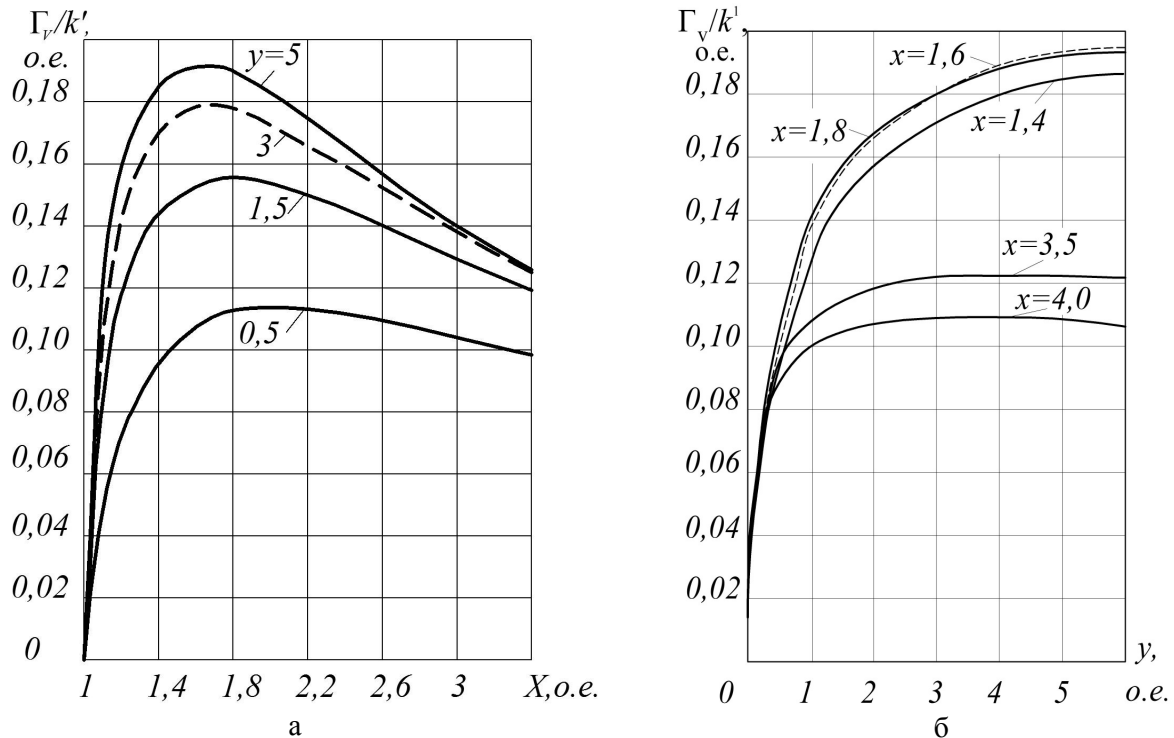


Рис. 3. Зависимость удельной интегральной работы от отношения радиусов x якоря и относительной длины y обмотки при размере фланца $e_* = 0,5$ при $y = \text{const}$ (а) и при $x = \text{const}$ (б)

Приняв за аргумент отношение $r_1 = r_1 / r_{1Б}$, где $r_{1Б}$ – базисное значение радиуса якоря, получим:

$$\frac{\Gamma_v}{k''} = \frac{\sqrt{r_1} \cdot \sqrt{(x-1)(1+(x-1)/y)}}{(x^2+1)(1+1/y)}, \quad (16)$$

где $k'' = k' / \sqrt{r_1 / r_{1Б}}$.

На рис. 4 представлены зависимости удельной интегральной работы (16) при $y = \text{const}$ и $x = 1,5$ [7].

Из анализа рис. 4 следует, что для отношения $x = 1,5$ удельная интегральная работа увеличивается как с ростом радиуса якоря, так и с ростом длины обмотки. Это означает, что более крупные ЛЭМД обладают лучшими удельными энергетическими показателями, что согласуется с теорией электрических машин. Интенсивность роста критерия $\Gamma_v(r_{1*})$ при $y > 3$ замедляется.

Используя (9) или (12), определим соответственно базисный размер электромагнитного двигателя:

$$r_1 = \sqrt[3]{\left(\frac{A_{И}}{\pi y B_{\text{Б}} a_1 b_1 [B_{\tau*}(1-q) - 0,5 \Psi_{H*}] } \right)^2}, \quad (17)$$

$$r_1 = \sqrt[3]{\frac{A_{И}}{\pi y B_{\text{Б}} j_{\tau} k_{3М} (x-1) [B_{\tau*}(1-q) - 0,5 \Psi_{H*}]}}. \quad (18)$$

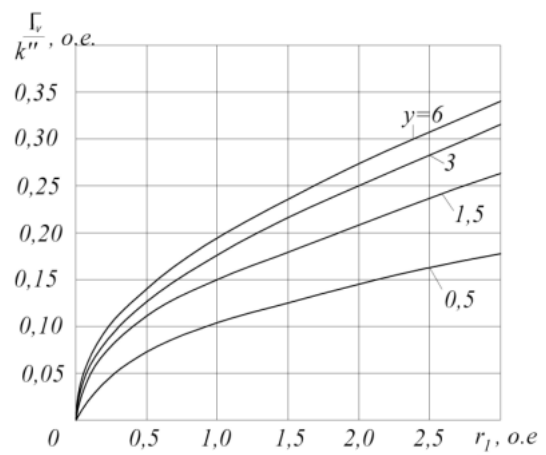


Рис. 4. Зависимости удельной интегральной работы от относительного радиуса якоря при $x = 1,5$ о.е. и $y = \text{const}$

Как показали исследования, для данного типа импульсных ЛЭМД относительное значение начального потокосцепления Ψ_{H*} зависит от конструкции магнитной системы, в частности, от материала направляющего корпуса. Так, для импульсного ЛЭМД с НФНК и устройством удержания

якоря (УУЯ) оно изменяется в диапазоне $\Psi_{H*} = 0,12 \dots 0,17$ [10], а для импульсного ЛЭМД с ФНК будет выше и составлять ориентировочно $\Psi_{H*} = 0,4 \dots 0,5$.

Таким образом, критерий Γ_V при указанных оптимальных значениях параметра x не имеет выраженного оптимума по относительной длине, обмотки. Следовательно, пользоваться выражениями (17) и (18) для нахождения базисного размера радиуса r_1 якоря в отрыве от длины обмотки нельзя из-за их неопределённости. Стремясь избежать этого и учитывая, что интегральная работа задается при проектировании, зафиксируем ее в выбранном критерии $A_{и}/V_{д}$, наложив тем самым на него дополнительное ограничение.

Длина обмотки, определяя максимальный рабочий ход якоря ЛЭМД, входит, как показано выше, в выражения для интегральной работы, поверхности охлаждения и наряду с другими параметрами двигателя обуславливает его тепловой режим. Определим длину обмотки из условия заданных превышения температуры и интегральной работы ЛЭМД при минимальном объеме его активных материалов. Из (9) получим

$$y = -\frac{x-1}{2} + \sqrt{\left(\frac{x-1}{2}\right)^2 + \frac{c}{r_1^7(x-1)}}, \quad (19)$$

$$r_{1\text{опт}} = \sqrt[7]{c \cdot \frac{3 \cdot (x-2) - (x-1)^2 + \left(1 - \frac{x-1}{2}\right) \sqrt{9\left(1 - \frac{x-1}{2}\right)^2 + 7\left(\frac{x-1}{2}\right)^2}}{15(x-1)^3(2-x)}} \quad (22)$$

$$y_{\text{опт}} = \left(\frac{x-1}{2}\right) - 1 + \sqrt{1 + \frac{12-6x}{3(x-2) - (x-1)^2 + \left(1 - \frac{x-1}{2}\right) \sqrt{9\left(1 - \frac{x-1}{2}\right)^2 + 7\left(\frac{x-1}{2}\right)^2}}}. \quad (23)$$

Для установленных выше рациональных значений параметра x относительная длина магнитной системы импульсного

где

$$\begin{aligned} c &= (A_{и} / \pi B_B a_1 b_1)^2, \\ b_2 &= B_{т*}(1-q) - 0,5 \Psi_{H*}. \end{aligned} \quad (20)$$

Подставив выражение (19) в формулу для нахождения объема активных материалов двигателя (13) для относительного значения размера фланца $e_* = 0,5$, получим:

$$V_{д} = \pi(x^2 + 1)\left(r_1^3 - \frac{x-1}{2} r_1^3 + \sqrt{r_1^6 \left(\frac{x-1}{2}\right)^2 + \frac{c}{r_1(x-1)}}\right). \quad (21)$$

Исследуем функцию $V_{д}$ по выражению (21) на минимум, для чего определим производную

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_{д}}{\partial r_1} &= \pi(x^2 + 1)(3r_1^3 - 3r_1^3 \cdot \left(\frac{x-1}{2}\right) + \\ &+ \frac{6r_1^5 \cdot \left(\frac{x-1}{2}\right)^2 - \frac{c}{r_1^2 \cdot (x-1)}}{2 \cdot \sqrt{r_1^6 \cdot \left(\frac{x-1}{2}\right)^2 + \frac{c}{r_1(x-1)}}) \end{aligned}$$

и приравняв правую часть полученного уравнения к нулю, решим его относительно радиуса якоря и получим оптимальное значение основного размера, оптимальное значение относительной длины примет вид

ЛЭМД, рассчитанная по (23), соответствует $y_{\text{опт}} = 2,96 \dots 4,04$ (табл. 1).

Таблица 1

Результаты расчета относительной длины обмотки

x , о.е.	1,6	1,7	1,8	1,9
$y_{\text{опт}}$, о.е.	4,04	3,76	2,96	3,24

С целью экономии обмоточного материала длину обмотки рекомендуется выбирать несколько меньше оптимальных значений, то есть в диапазоне $y = 2,9...3,3$.

Следует отметить, что реализованная на практике гамма импульсных ЛЭМД для прессового оборудования рассматриваемого типа согласно [3] имеет относительную длину обмотки, которая варьируется от 2,7 до 3,15.

В результате выражения (22) и (23) при принятых допущениях позволяют для заданных электромагнитных нагрузок, интегральной работы, кривой намагничивания материала магнитопровода и индукции его насыщения, значений x и других параметров получить оптимальные значения радиуса якоря и длины обмотки, при кото-

рых импульсный ЛЭМД будет иметь минимальный объем активных материалов.

Если плотность тока не задана, то приняв для b_1 по (10) значение относительной длины обмотки $y = 3$, определим расчетный радиус якоря по формуле (17):

$$r_1 = \sqrt[3]{\left(\frac{A_{\text{и}}}{3\pi B_{\text{в}} \cdot a_1 \cdot b_1 \cdot b_2}\right)^2}. \quad (24)$$

Полученные выражения (22)...(24) при принятых выше допущениях позволяют получить значения радиуса якоря и длины обмотки, при которых импульсный ЛЭМД будет иметь минимальный объем активных материалов при заданных тепловом режиме и продолжительности включения, что облегчит расчет импульсного ЛЭМД на ранних этапах его проектирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Угаров Г.Г.** Импульсные линейные электромагнитные двигатели / В.И. Мошкин, В.Ю. Нейман, Г.Г. Угаров – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2010. – 220 с.

2. **Казаков Л.А.** Оптимальные соотношения размеров магнитопровода силовых электромагнитов постоянного тока / Л.А. Казаков, В.Ю. Кончаловский //Электричество. 1964. – №10. – С.23-26.

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

4. **Куросов А.В.** Наивыгоднейшие соотношения основных геометрических размеров электромагнитов постоянного тока / А.В. Куросов //Изв. ТПИ. – Томск: Изд-во ТПИ, 1969, – Т.160. – С.56-62.

5. **Львицын А.В.** Оптимальная геометрия и методика расчета приводных цилиндрических электромагнитов постоянного тока с притягивающимся якорем. /

А.В. Львицын, Н.П. Ряшенцев, Г.Г. Угаров, В.В. Шамаро // Ненормальные режимы и борьба с ними в электрических системах.– Саратов: Изд-во СПИ, 1977.– Вып.1.– С.120-126.

6. **Федонин В.Н.** Определение оптимальных геометрических соотношений цилиндрических электромагнитов с двумя рабочими зазорами. / В.Н. Федонин, Г.Г. Угаров, А.В. Львицын, В.Ю. Кожевников //Электрификация сельскохозяйственного производства.– Саратов: СПИ, 1979.–Вып. 124. – С. 77 - 85.

7. **Мошкин В.И.** К выбору основных базисных размеров линейных электромагнитных двигателей / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров //Известия ВолгГТУ. – Волгоград: Изд-во ВолгГТУ, 2011. – №8(81). – С.108-111.

8. **Бут Д.А.** Бесконтактные электрические машины: Учебное пособие для вузов / Д.А. Бут – М.: Высш. шк., 1990. – 415с.

9. Кудряш И.А. К выбору длины обмотки линейных электромагнитных двигателей с комбинированным якорем и двумя рабочими воздушными зазорами / И.А. Кудряш, М.А. Терехин, Г.Г. Угаров // Электромагнитные импульсные системы. – Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1989. – С.89-93.

10. Львицын А.В. Исследование энергетических характеристик приводных силовых электромагнитов цилиндрической структуры одного веса / А.В. Львицын, Г.Г. Угаров, В.Н. Федонин // Ненормальные режимы и борьба с ними в электрических системах. – Саратов, 1978. – Вып.2. – С.21-24.

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

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

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 20.02.14, принята к опубликованию 30.03.14

УДК 621.333.2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ТЕПЛООВОГО СТАРЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ПРИВОДНОГО ДВИГАТЕЛЯ ВЕНТИЛЯТОРА ЭЛЕКТРОВОЗА

А.С. Куренков, Ю.И. Попов, О.О. Соколов, В.П. Смирнов,
А.С. Космодамианский, С.И. Баташов

THERMAL AGING INTENSITY OF THE MOTOR DRIVING INSULATION IN THE ELECTRIC LOCOMOTIVE FAN

A.S. Kurenkov, Yu.I. Popov, O.O. Sokolov, V.P. Smirnov,
A.S. Kosmodamiansky, S.I. Batashov

Для охлаждения тягового двигателя электровоза применяются мотор - вентиляторы (МВ). В качестве привода вентилятора используются трехфазный асинхронный двигатель. Отказы МВ составляют более 5 % неисправностей электровозов. Основной причиной отказов, в большинстве случаев, является снижение напряжения питания, приводя-

Motor-fans are utilized to cool traction motors of electric locomotives. A three-phase asynchronous motor is used for the drive of the fan. Failures in motor-fans make up more than 5 % of the total number of electric locomotive failures. In most cases the main cause for failures is the voltage drop leading to an increase in currents in certain phases of stator windings by more

щее к увеличению токов в отдельных фазах статорных обмоток более чем в 1,5 раза по сравнению с номинальным.

Ключевые слова: приводной асинхронный двигатель вентилятора, снижение напряжения питания, тепловое старение изоляции.

Во время движения поездов по равнинным элементам пути при напряжениях контактной сети $U_{\text{к}} \approx 29$ кВ, а также нередко имеющим место снижением $U_{\text{к}}$ до 19 кВ и менее, токи приводных двигателей вентиляторов возрастают в 1,5 и более раза. Это приводит к интенсивному тепловому старению изоляции статоров, выплавлению роторов, повреждению подшипниковых узлов вследствие повышенного нагрева.

В настоящее время отсутствуют методы определения величины нагрева, скорости и интенсивности старения изоляции асинхронных двигателей, при снижении величины напряжения контактной сети ниже допустимых значений и повреждении симметрирующих конденсаторов, что сказывается на надежности асинхронного двигателя (АД).

Расчет теплового износа изоляции электродвигателя вентилятора при снижении напряжения в контактной сети выполняется в следующей последовательности.

Определяется номинальное эффективное напряжение вспомогательной обмотки тягового трансформатора $\sigma_{\text{н}}$, т.е. его значение при номинальном напряжении на токоприемнике и холостом ходе трансформатора [1]. Для асинхронных машин обычно это напряжение принимают примерно на 5% выше номинального, т.е. оно составляет в относительных единицах 1,05 (например, на электровазе ВЛ60), однако может отличаться от этого значения (на электровазах ВЛ80Т оно равно 1,043). Эффективное напряжение АД электроваза ВЛ85 при следовании в четном направлении с грузовым поездом по перегонам, на которых наблюдалось снижение напряже-

than 1.5 times compared to the nominal.

Keywords: drive induction motor fan, voltage drop, thermal aging of the insulation.

ния на токоприемнике ниже допустимых значений

$$\sigma = \sigma_{\text{н}} U_{\text{з}} / U_{\text{эн}} - \Delta \sigma_0 - \Delta \sigma \quad (1)$$

где $U_{\text{з}}$ и $U_{\text{эн}}$ – текущее и номинальное действующее напряжение на токоприемнике; $\Delta \sigma_0 = 0,01$ – потеря ЭДС холостого хода от тяговой нагрузки при движении по равнинным перегонам; $\Delta \sigma = 0,04$ – потеря напряжения от тока нагрузки вспомогательных цепей. Тогда при $U_{\text{з}}$, равном 19 кВ $\sigma = 0,75$.

В соответствии с рис. 1. первая гармоника $\sigma_1 = \sigma K_{U1} = 0,75 \cdot 0,94 = 0,7$.

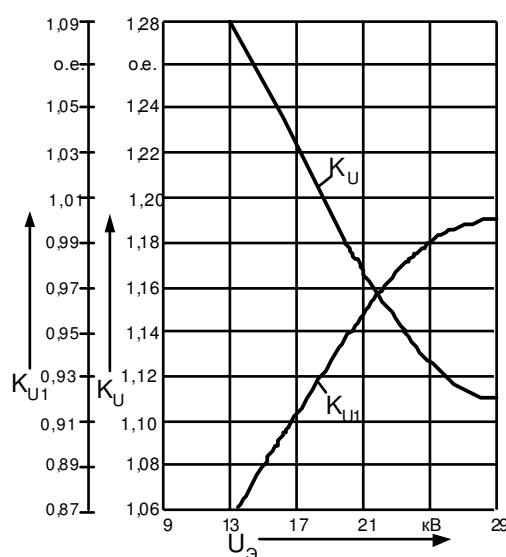


Рис. 1. Зависимости коэффициентов формы кривой напряжения K_U и первой гармоники K_{U1} от действующего напряжения на токоприемнике $U_{\text{з}}$

Таким образом, при номинальном напряжении $U_{\text{н}} = 380$ В первая гармоника напряжения вспомогательных машин

$$U_1 = U_{\text{н}} \sigma_1.$$

Рассчитаем превышение температуры обмотки статора электродвигателя АНЭ225 электроваза ВЛ 85. В начале определяется постоянная времени нагревания электродвигателя

$$T = \frac{C_M G_M \tau_M + C_{ст} G_{ст} \tau_{ст}}{\Delta P_n},$$

где C_M - удельная теплоемкость меди; G_M - масса меди; τ_M - превышение температуры меди в номинальном режиме работы; $C_{ст}$ - удельная теплоемкость стали; $G_{ст}$ - масса стали; $\tau_{ст}$ - превышение температуры стали в номинальном режиме работы; ΔP_n - номинальные потери мощности в электродвигателе, причем

$$\Delta P_n = \frac{P_{2н}}{\eta_n} - P_{2н}.$$

Здесь $P_{2н}$ - номинальная мощность на валу электродвигателя; η_n - номинальный коэффициент полезного действия.

Установившееся превышение температуры [2]

$$\tau_y = \tau_n \cdot \frac{a + k^2}{a + 1 - \alpha \cdot \tau_n \cdot (k^2 - 1)},$$

где $\tau_n = \tau_M$ - номинальное превышение температуры; α - температурный коэффициент сопротивления материала проводника; $a = \Delta P_{с.н.} / \Delta P_{м.н.}$ - коэффициент потерь ($\Delta P_{с.н.}$ и $\Delta P_{м.н.}$ - номинальные потери соответственно в стали и меди электродвигателя); k^2 - кратность тока, при этом

$$k^2 = \frac{\left(R_1 + \frac{R_2}{S_n}\right)^2 + (x_1 + x_2)^2}{\left(R_1 + \frac{R_2}{S}\right)^2 + (x_1 + x_2)^2}. \quad (2)$$

Здесь R_1, R_2, x_1, x_2 - параметры схемы замещения АД; S - скольжение, причем

$$S = \frac{S_n}{K_U^2}, \quad (3)$$

где $S_n = 4,5$ - номинальное скольжение; $K_U = U_i / U_n$ - кратность напряжения на зажимах электродвигателя.

Превышение температуры

$$\tau = \tau_y \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) + \tau_{нач} \cdot e^{-\frac{t}{T}}. \quad (4)$$

Зная значения установившегося превышения температуры изоляции и температуры окружающей среды можно найти срок службы изоляции

$$D = D_n e^{B\left(\frac{1}{\Theta} - \frac{1}{\Theta_n}\right)}. \quad (5)$$

где $D_n = 20000$ - номинальный срок службы изоляции при номинальном перегреве, ч; Θ, Θ_n - текущее и номинальное значение температуры изоляции, °К.

Скорости износа изоляции находятся из отношения $\varepsilon = D_n / D$. Результаты расчетов D в зависимости от напряжения питания при мощности на валу 45 кВт приведены на рис. 2.

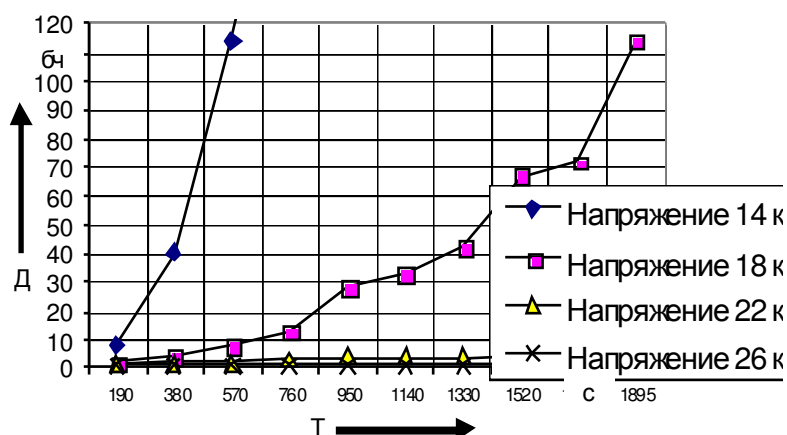


Рис. 2. Интенсивность износа изоляции статорной обмотки двигателя АНЭ225 привода вентилятора при выходной мощности 45 кВт

Анализ данных об интенсивности износа изоляции, полученных по приведенной методике, указывает на необходимость применения температурного контроля для

всех МВ и в первую очередь, имеющих наибольшую нагрузку, а также применения контроля увлажненности и старения изоляции статорных обмоток.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Некрасов О.А.** Вспомогательные машины электровозов переменного тока / О.А. Некрасов, А.М. Рупштейн – М.: Транспорт, 1988. – 223 с.
2. **Овчаров В.В.** Эксплуатационные режи-

мы работы и непрерывная диагностика электрических машин в сельскохозяйственном производстве / В.В. Овчаров – Киев: УСХА, 1990. – 168 с.

Попов Юрий Иванович – аспирант кафедры «Тяговый подвижной состав» Московского государственного университета путей сообщения, начальник проектно-конструкторского бюро департамента локомотивного хозяйства ОАО «Российские железные дороги»

Куренков Алексей Семенович – аспирант кафедры «Тяговый подвижной состав» Московского государственного университета путей сообщения, главный инженер проектно-конструкторского бюро департамента локомотивного хозяйства ОАО «Российские железные дороги»

Соколов Олег Олегович – аспирант кафедры «Тяговый подвижной состав» Московского государственного университета путей сообщения, ассистент кафедры «Тяговый подвижной состав» Московского государственного университета путей сообщения

Смирнов Валентин Петрович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Тяговый подвижной состав» Московского государственного университета путей сообщения

Космодамианский Андрей Сергеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Тяговый подвижной состав» Московского государственного университета путей сообщения

Баташов Сергей Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Тяговый подвижной состав» Московского государственного университета путей сообщения

Yuri I. Popov – Postgraduate at the Department of Railway Traction Equipment, Moscow State University of Railway Engineering, Director: Design Bureau at the Department of Locomotive Fleet of JSC «Russian Railways»

Alexey S. Kurenkov – Postgraduate at the Department of Railway Traction Equipment, Moscow State University of Railway Engineering, Chief Engineer of the Design Bureau at the Department of Locomotive Fleet of JSC «Russian Railways»

Oleg O. Sokolov – Postgraduate at the Department Railway Traction Equipment, Assistant Lecturer at the Department of Traction Electrical Equipment, Moscow State University of Railway Engineering

Valentin P. Smirnov – Dr.Sc., Professor, Department of Railway Traction Equipment, Moscow State University of Railway Engineering

Andrey S. Kosmodamiansky – Dr.Sc., Professor, Head: Department of Railway Traction Equipment, Moscow State University of Railway Engineering

Batashov Sergey Ivanovich – PhD, Associate Professor at the Department of Railway Traction Equipment, Moscow State University of Railway Engineering

Статья поступила в редакцию 04.03.14, принята к опубликованию 30.03.14

РАСЧЕТ ТЕПЛОВОГО СТАРЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОВОЗОВ

А.С. Куренков, Ю.И. Попов, О.О. Соколов, В.П. Смирнов,
А.С. Космодамианский, С.И. Баташов

CALCULATING THERMAL AGING OF INSULATION IN TRACTION ELECTRIC MOTORS OF ELECTRIC LOCOMOTIVES

A.S. Kurenkov, Yu.I. Popov, O.O. Sokolov, V.P. Smirnov,
A.S. Kosmodamiansky, S.I. Batashov

Анализ надежности оборудования электровозов показывает, что на долю тяговых электрических двигателей (ТЭД) приходится более одной пятой всех отказов. Использование электровоза с вышедшим из строя хотя бы одним двигателем запрещено. Две трети неисправности ТЭД вызваны пробоями изоляции обмоток.

Ключевые слова: тяговый электродвигатель, перегрузка по силе тока, интенсивность вентиляции, тепловое старение изоляции якоря.

Отказы электровозов Восточного региона значительно превышают среднесетевые. Пониженная надежность электровозов приводит к задержкам поездов, срывам передач вагонов на соседние железные дороги и снижению безопасности движения поездов.

В связи с этим выполнен анализ надежности электровозов Восточного региона, и выявлены пути решения проблемы обеспечения требуемого уровня надежности предельно нагруженного оборудования электровоза. Анализ показал, что на предельно нагруженное оборудование – выпрямительно-инверторные преобразователи (ВИП), сглаживающие реакторы (СР), тяговые двигатели и асинхронные вспомогательные машины, приходится более половины отказов электровозов. Выявлено определяющее влияние теплового фактора

Reliability analysis of equipment for electric locomotives shows that the number of failures in electric traction motors accounts for more than one-fifth of the total number of failures. Using locomotives with at least one engine out of order is prohibited. Two-thirds of faults in electric traction motors is caused by breakdowns in the winding insulation.

Keywords: traction electric motor, overloading the power supply, ventilation intensity, thermal aging of insulation anchors.

(величины и скорости нарастания температуры в элементах электрооборудования) на надежность электровозов. При ведении поездов повышенной массы по многочисленным протяженным (от 10 до 25 км) подъемам повышенной крутизны (до 17,5%) с кривыми критического радиуса (до 290 м) токи ВИП, СР, ТЭД нередко превышают соответственно в 1,3; 1,4; 1,5 раза номинальные значения. В условиях движения по подъемам с ограниченной скоростью, пониженного напряжения контактной сети при вынужденной пачечной отправке поездов, уменьшенной по различным причинам интенсивности вентиляции это вызывает ускоренное старение изоляции СР, ТЭД и электронных приборов ВИП вследствие превышения предельно допустимой температуры и скорости нагрева. Если на равнинных и равнинно - холмистых участ-

ках железных дорог доля теплового износа изоляции ТЭД составляет 30-40% износа, то при работе на ПЖД с токами более номинального режима доля теплового износа становится преобладающей и составляет 80-90% износа изоляции при токах, равных 1,4-1,5 номинального тока.

Таким образом, среди различных факторов, определяющих срок службы изоляции тяговых электродвигателей, одним из основных является тепловое старение.

При анализе эксплуатационных режимов электровозов Восточного региона особое значение приобретают методы расчета скорости теплового старения электрической изоляции и определение срока ее службы.

Существующий метод определения температуры якорной обмотки ТЭД (Правила тяговых расчетов для поездной работы.: М. Транспорт, 1985) позволяет определить нагрев в номинальных условиях эксплуатации. Он разработан из предположения неизменности постоянной времени нагревания ТЭД и наличия зависимости величины длительного перегрева от тока двигателя. Метод не учитывает снижение теплопроводности изоляции из-за старения в процессе эксплуатации, загрязнения изоляции, уменьшение интенсивности вентиляции, наблюдаемое в эксплуатации, позволяет определить скорость и величину старения изоляции.

Используя метод определения теплового старения асинхронных двигателей, основанный на зависимости скорости химических реакций изоляции от температуры Вант-Гоффа и Аррениуса [1, 2], можно якорь ТЭД с точки зрения его нагрева рассматривать как систему двух тел – обмотки и стали (рис. 1). Тела 1 и 2 (обмотка и сталь) обладают теплоемкостью C_1 и C_2 и связаны между собой тепловой проводимостью Λ_{12} , а с окружающей средой – Λ_1 и Λ_2 . В теле 1 выделяются потери P_1 , в теле 2 – P_2 . Предполагается, что теплоемкость и тепловая проводимость не зависят от температуры, теплоемкость окружающей среды C_{cp} равна бесконечности, температура окружающей среды ϑ_{cp} постоянна.

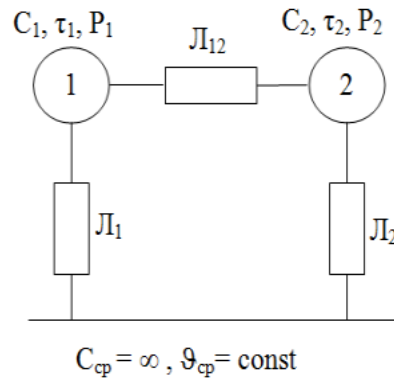


Рис. 1. Тепловая схема замещения якоря ТЭД

Тогда уравнения теплового баланса для каждого тела обмотки (тело 1) и стали (тело 2)

$$P_{10}(1 + \alpha\tau_1)dt = C_1 d\tau_1 + \Lambda_1 \tau_1 dt + \Lambda_{12}(\tau_1 - \tau_2)dt; \quad (1)$$

$$P_2 dt + \Lambda_{12}(\tau_1 - \tau_2)dt = C_2 d\tau_2 + \Lambda_2 \tau_2 dt, \quad (2)$$

где τ_1 и τ_2 – превышения температуры соответственно обмотки и стали над температурой окружающей среды, °С; α – температурный коэффициент сопротивления материала проводника обмотки, 1/°С.

Решение системы уравнений дает установившееся превышение температуры обмотки якоря

$$\tau_y = \frac{\tau_n + \tau_k(\kappa_i^2 - 1)}{1 - \alpha\tau_k(\kappa_i^2 - 1)}. \quad (3)$$

где τ_n и τ_k – превышение температуры обмотки в номинальном режиме и в опыте короткого замыкания; $\kappa_i = I_i / I_n$.

В номинальном режиме

$$\tau_n = (\Delta P_{c.n} + \Delta P_{m.n}) / A, \quad (4)$$

где $\Delta P_{c.n}$ и $\Delta P_{m.n}$ – номинальные потери соответственно в стали и меди якоря ТЭД, Вт; A – эквивалентная теплоотдача обмотки, Дж/с·°С.

В опыте короткого замыкания

$$\tau_k = \Delta P_{m.n} / A. \quad (5)$$

Из совместного решения уравнений (4) и (5)

$$\tau_k = \tau_n / (1 + a), \quad (6)$$

где $a = \Delta P_{c.n} / \Delta P_{m.n}$.

После подстановки выражения (6) в уравнение (3)

$$\tau_y = \tau_n \frac{a + \kappa_i^2}{a + 1 - \alpha \tau_n (\kappa_i^2 - 1)}. \quad (7)$$

После замены реальной кривой нагрева обмотки якоря тягового двигателя эквивалентной кривой уравнение нагрева обмотки

$$\tau = \tau_{1y} (1 - e^{-\frac{t}{T}}) + \tau_{нач} e^{-\frac{t}{T}}, \quad (8)$$

где $\tau_{нач}$ - начальное значение превышения температуры обмотки якоря, °C; T - эквивалентная постоянная времени нагрева якоря ТЭД, с; t - текущее время, с.

Тепловой износ изоляции якоря ТЭД на i -м участке

$$E_i = \int_0^{t_i} e^{B \left(\frac{1}{\theta_n \tau_{yi} (1 - e^{-t/T}) + \tau_{i-1} e^{-t/T} + \vartheta_{cp} + 273} \right)} dt, \quad (9)$$

где ϑ_{cp} - средняя температура окружающей среды, °C; θ_n - номинальная температура нагрева изоляции, °K; B - коэффициент, характеризующий интенсивность теплового старения изоляции.

Суммарный тепловой износ изоляции якоря тягового двигателя

$$E_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n E_i. \quad (10)$$

Дополнительный износ изоляции якоря ТЭД при перегрузках и (или) снижении расхода охлаждающего воздуха

$$E_{\partial} = \int_0^{t_n} e^{B \left(\frac{1}{\theta_n \tau_y \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) + \tau_n e^{-\frac{t}{T}} + \vartheta_{cp} + 273} \right)} dt +$$

$$+ \int_0^{5T} e^{B \left(\frac{1}{\theta_n \tau_n \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) + \tau_m e^{-\frac{t}{T}} + \vartheta_{cp} + 273} \right)} dt -$$

$$-(t_n + 5T) e^{B \left(\frac{1}{\theta_n \tau_n + \vartheta_{cp} + 273} \right)}, \quad (11)$$

где t_n или $t_{с.р.в}$ - время работы ТЭД при перегрузке и (или) снижении расхода воздуха; τ_y - установившееся превышение температуры якорной обмотки при перегрузке и (или) снижении расхода охлаждающего воздуха; T или $T_{с.р.в}$ - постоянная времени нагревания якоря при номинальной вентиляции или снижении расхода воздуха.

Максимальное превышение температуры

$$\tau_m = \tau_y (1 - e^{-\frac{t_n}{T}}) + \tau_n e^{-\frac{t_n}{T}}. \quad (12)$$

Предложенный метод позволяет определять скорость и величину теплового старения изоляции якоря ТЭД из-за перегрузок, вызванных необоснованным завышением массы поезда на одну движущую ось, а также этот метод дает возможность количественно оценить тепловое старение при снижении интенсивности вентиляции вследствие обрыва вала вентилятора, повреждения крепления вентиляторного колеса на валу, при обратном направлении вращения вентиляторов и повреждении воздухопроводов. Результаты расчетов старения изоляции ТЭД, по предлагаемой методике, указывают на необходимость непрерывного определения степени увлажнения изоляции обмоток ТЭД, ввода системы температурного контроля обмоток двигателей, а также технологии эксплуатации и ремонта, обеспечивающих требуемый уровень надежности ТЭД.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гольдберг О.Д. Переходные процессы в электрических машинах и аппаратах и вопросы их проектирования: Уч. пособ. для вузов / О.Д. Гольдберг, О.Б. Буль, И.С. Свириденко; Подред. Гольдберга О.Д. - М.: Высш. шк., 2001. - 512 с.

2. Овчаров В.В. Эксплуатационные режимы работы и непрерывная диагностика электрических машин в сельскохозяйственном производстве / В.В. Овчаров - Киев: УСХА, 1990. - 168 с.

Попов Юрий Иванович – аспирант кафедры «Тяговый подвижной состав» Московского государственного университета путей сообщения, начальник проектно-конструкторского бюро департамента локомотивного хозяйства ОАО «Российские железные дороги»

Куренков Алексей Семенович – аспирант кафедры «Тяговый подвижной состав» Московского государственного университета путей сообщения, главный инженер проектно-конструкторского бюро департамента локомотивного хозяйства ОАО «Российские железные дороги»

Соколов Олег Олегович – аспирант кафедры «Тяговый подвижной состав» Московского государственного университета путей сообщения, ассистент кафедры «Тяговый подвижной состав» Московского государственного университета путей сообщения

Смирнов Валентин Петрович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Тяговый подвижной состав» Московского государственного университета путей сообщения

Космодамианский Андрей Сергеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Тяговый подвижной состав» Московского государственного университета путей сообщения

Баташов Сергей Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Тяговый подвижной состав» Московского государственного университета путей сообщения

Yuri I. Popov – Postgraduate at the Department Railway Traction Equipment, Moscow State University of Railway Engineering, Director: Design Bureau at the Department of Railway Traction Equipment of JSC «Russian Railways»

Alexey S. Kurenkov - Postgraduate at the Department Railway Traction Equipment, Moscow State University of Railway Engineering, Chief Engineer: Design Bureau of the Department of Railway Traction Equipment of JSC «Russian Railways»

Oleg O. Sokolov - Postgraduate at the Department Railway Traction Equipment, Moscow State University of Railway Engineering, Assistant Lecturer at the Department of Railway Traction Equipment, Moscow State University of Railway Engineering

Valentin P. Smirnov – Dr.Sc., Professor, Department of Railway Traction Equipment, Moscow State University of Railway Engineering

Andrey S. Kosmodamiansky – Dr. Sc., Professor, Head: Department of Railway Traction Equipment, Moscow State University of Railway Engineering

Sergey I. Batashov – PhD, Associate Professor at the Department of Railway Traction Equipment, Moscow State University of Railway Engineering

Статья поступила в редакцию 04.03.14, принята к опубликованию 30.03.14

ИМПУЛЬСНЫЕ ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРИВОДЫ В ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯХ

В.И. Мошкин, О.В. Вдовина, Г.Г. Угаров

PULSED ELECTROMAGNETIC LINEAR ACTUATORS FOR ENERGY SAVING ELECTROTECHNOLOGIES

V.I. Moshkin, O.V. Vdovina, G.G. Ugarov

В статье рассматривается перспективность импульсных линейных электромагнитных приводов как одного из элементов сварочно – наплавочного оборудования, предназначенного для изготовления деталей и изделий на основе плазменных процессов.

Ключевые слова: формообразование, наплавка, плазменно – дуговой процесс, линейный электромагнитный привод

Среди широкой номенклатуры деталей приборостроения, машиностроительного производства доминируют мелкоразмерные детали, отличающиеся низким значением коэффициента использования металла (КИМ $\approx 0,2...0,5$) и объемом жидкой ванны, наводимой дугой или плазменной струей [1]. Примером являются изделия с тонким рельефом, сложным профилем, с различного рода утолщениями, выступами, гравюрами штампов и режущего инструмента, электрические скользящие контакты, детали художественного и медицинского назначения, шестерни, рейки.

Для их изготовления перспективны технологии, базирующиеся на применении универсальных, гибких, легко перенастраиваемых способов формообразования на основе плазменных (дуговых) процессов.

В основе этих технологий лежит концепция производства мелкоразмерных деталей непосредственно из расплава на основе синтеза процессов дозирования обработанных порций металла с внешним воздействием в ходе его нанесения плазменно – дуговыми разрядами.

The article discusses the prospects of utilizing a pulsed electromagnetic actuator as a component of the welding-and-surfacing equipment needed for manufacturing parts and products on the basis of plasma processes.

Keywords: forming, welding, plasma - arc process, linear electromagnetic actuator

Отсутствие средств технического оснащения, а также стесненные условия их применения при дуговых и плазменных процессах придают проблемный характер их реализации.

Одной из актуальных задач в обозначенном направлении является создание оборудования для генерирования и ввода в технологический объект энергии внешнего воздействия в виде механической энергии. С этой целью анализировались, разрабатывались и использовались различные виды приборов [2]. Наиболее предпочтительными для применения в данной области неоднократно признавались импульсные линейные электромагнитные приводы, ввиду их конструктивной простоты, надежности, хороших массо - габаритных характеристик, высокой управляемости выходными механическими параметрами (усилием, частотой, энергией воздействия различного характера) в соответствии с технологическими параметрами обрабатываемого объекта (температурой, структурой металла и т.д.) [1, 3].

Импульсные линейные электромагнитные

приводы широко апробированы в различных областях в виде ударных машин, прессового оборудования, устройств вибрационного и виброударного действия. Использование таких приводов в плазменно – дуговых технологиях менее известно, но открывают для них новую перспективу, так как они не требуют значительных развиваемых усилий и энергии воздействия, ввиду вязко – пластичного состояния технологического объекта в момент его обработки.

В настоящей работе обосновывается перспективность применения импульсных линейных электромагнитных приводов в обозначенных технологиях как одного из элементов сварочно – наплавочного оборудования, предназначенного как для мелкосерийного, так и массового производства деталей и изделий.

Линейный электромагнитный двигатель (ЛЭМД) как средство внешнего воздействия в дуговых (плазменных) технологиях обладает широким спектром кинема-

тических признаков (линейный, возвратно – поступательный), а так же динамических признаков (ударный, вибрационный, вибро – ударный).

Для оценки эффективности применения импульсных линейных электромагнитных приводов в электротехнологиях необходимо определить его основные параметры: величину перемещения формообразующего инструмента, максимальное усилие, механическую работу, частоту ходов.

Эти показатели относятся к энергетическому каналу ЛЭМД, как менее изученному в современной электромеханике. В то же время информационный канал привода с ЛЭМД способен удовлетворить все требования термомеханического состояния технологического объекта на всех фазах его обработки.

Рассмотрим конструктивно – технологическую схему наплавки с пуансонным вытеснением (рис. 1 а) и низкочастотной вибрацией (рис. 1 б).

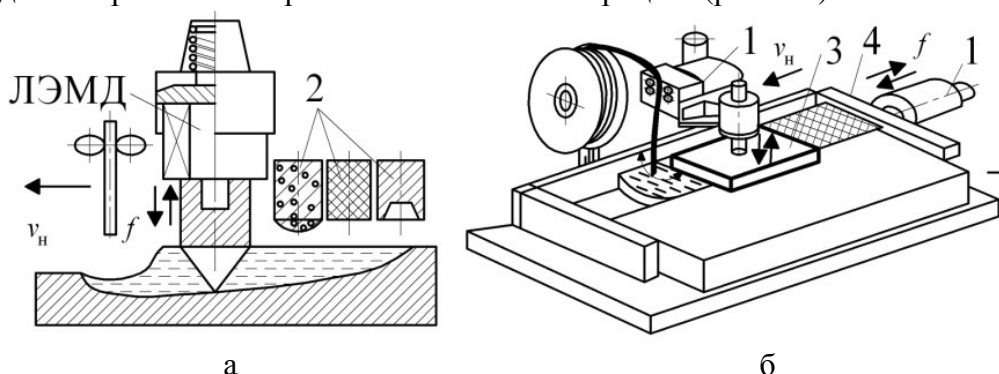


Рис. 1. Наплавка с пуансонным вытеснением (а): 1 – ЛЭМД; 2 – пуансон и низкочастотной вибрацией (б) с приводами от ЛЭМД: 1- механизм подачи электродной проволоки; 2 – ЛЭМД с вибрирующей стенкой; 3 - ЛЭМД с вибрирующей пластинкой; 4 - наплавленный металл

Для определения основных параметров и формы силовой характеристики двигателя проведем расчет сил сопротивления сталей Ст0, 12Х18Н9, У10А и др. деформированию при операциях "осадка" $F_{\text{ос}}$ и "вытяжка" $F_{\text{вы}}$:

$$P_o = \sigma^{\wedge} \exp \left[- \frac{6Q}{c\gamma\sqrt{4\pi at}} \exp \left(- \frac{R^2}{4at} \right) \right] \times \left(1 + \frac{d}{6(\ell_1 - \ell)} - \frac{(\ell_1 - \ell)^2}{3d^2} \right); \quad (1)$$

$$P_e = \sigma^{\wedge} \exp \left[- \frac{6Q}{c\gamma\sqrt{4\pi at}} \exp \left(- \frac{R^2}{4at} \right) \right] \times \left(1 + \frac{\ell_o}{3(\ell_1 - \ell)} \right), \quad (2)$$

где $\sigma^{\wedge}$ - первоначальная прочность металла; ν - коэффициент, характеризующий долю теплоты, идущую на нагрев металла; t – время теплового воздействия; Q – эффективная тепловая мощность нагрева изделия сварочной дугой; c - теплоемкость расплава; γ - плотность расплава; a - ко-

коэффициент теплопроводности; R - расстояние от источника теплоты до точки с координатами x, y, z ; ℓ - глубина проникновения пуансона; d - диаметр заготовки; ℓ_1 - высота заготовки; ℓ_o - ширина пуансона.

Анализ полученных зависимостей свидетельствует, что сопротивление жидкого металла деформированию составляет $25H$ при температуре $1886^\circ C$ и при выполнении операций "осадка" и "вытяжка" величина сопротивления деформированию в зависимости от глубины проникновения пуансона изменяется незначительно - на глубине 6 мм возрастает соответственно на 10 и 1,5%. Сопротивление деформированию в зависимости от типа сталей при температуре $600^\circ C$ составляет $350...1600H$.

Проведенные исследования позволили определить основные параметры двигателя: максимальное усилие $F = 500...2000H$, величина перемещения рабочего органа

$\delta = 0,5...50mm$, интегральная механическая работа $A_u = 10...15Дж$, частота ходов $f = 1...5Гц$, объем двигателя $V = (1...2) \cdot 10^7 mm^3$.

Использование пуансонного вытеснение металла, наложение низкочастотных колебаний и одиночных ударов на расплав позволяют воспроизводить тонкий рельеф формообразующего элемента ($15..25 мкм$), снизить величину наплавочного радиуса (с $10...15 mm$ до $1,5...2,0 mm$), уменьшить припуск (в $3...5$ раз), сократить выход металла в стружку при получении периодического профиля.

Дальнейшим развитием совмещенных методов наплавки и формообразования явилась разработка принципа безотходной обработки металла резанием [1]. Структурная схема технологического процесса терморезания металла с применением ЛЭМД показана на рис. 2.

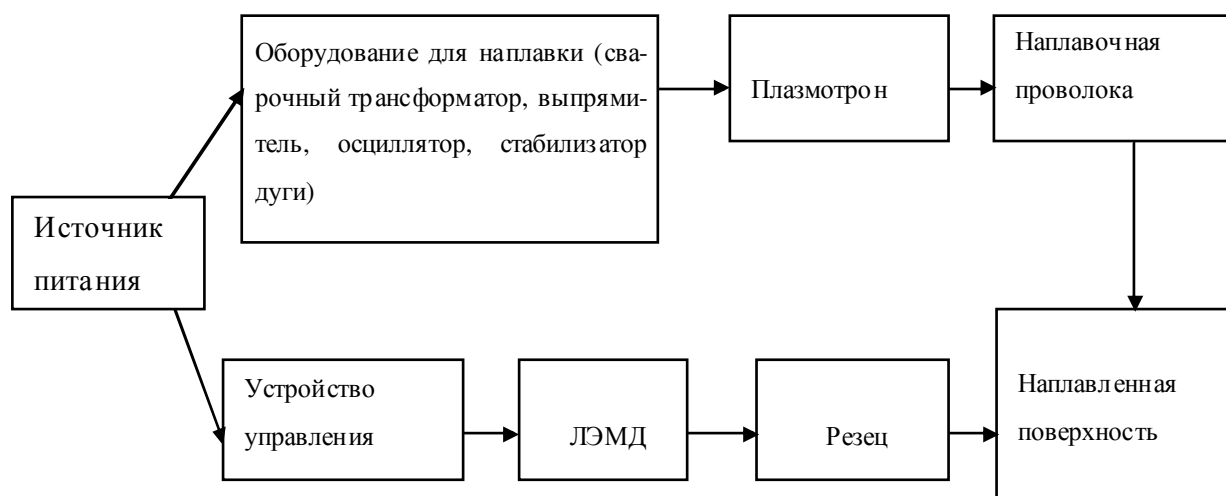


Рис. 2. Структурная схема технологического процесса терморезания металла

Конструктивно – технологическая схема обработки металла по принципу циклического терморезания с приводом от ЛЭМД показана на рис. 3.

В этой технологии резец выполняет три функции: снимает стружку, сопровождает ее и затем направляет в ванну для повторного переплава теплотой, аккумулированной в ванне расплава.

Разработанный способ терморезания металла в ходе его применения позволяет обрабатывать слои с высокой твердостью (до $50...60 HRC$) с заданным уровнем шероховатости ($R_z = 10...20 мкм$) при снижении сил резания в $2...4$ раза по сравнению с традиционными способами, повысить стойкость рабочего инструмента в $3...5$ раз.

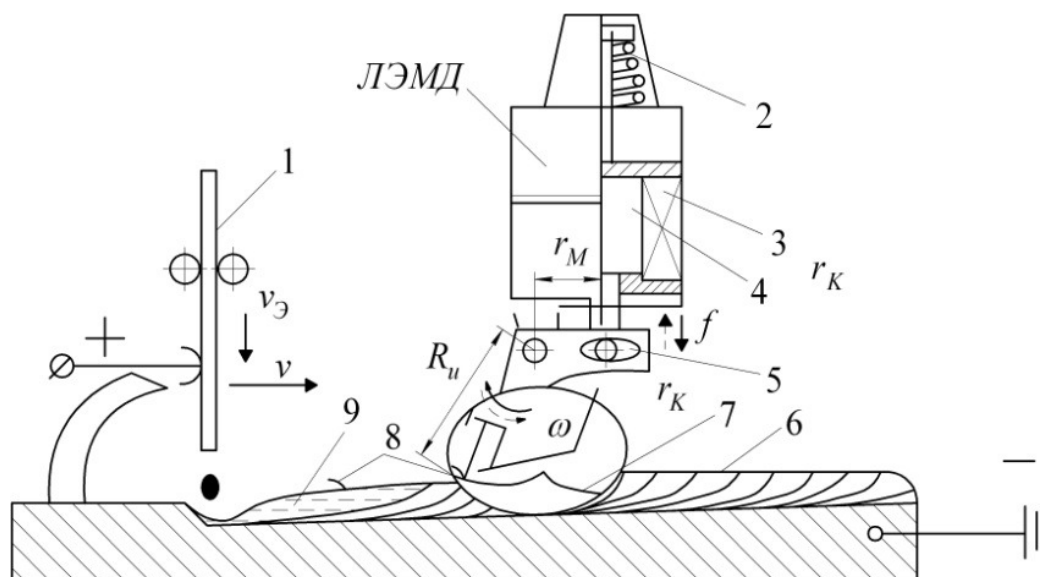


Рис. 3. Схема обработки по принципу циклического терморезания с приводом от ЛЭМД: 1 – электрод; 2 – пружина возврата якоря; 3 – обмотка; 4 – якорь; 5 – резец; 6 – обработанная поверхность; 7 – поверхность резания; 8 – стружка; 9 – сварочная ванна; $v_э$, v_n – скорость подачи электрода и наплавки, соответственно; f , ω – усилие и частота возвратно-поступательно-качательного движения; r_k – радиус кривизны

Итак, использование импульсных механических воздействий, создаваемых линейным электромагнитным приводом в наплавочных процессах, выявили возможность управлять структурой, твердостью и физико – механическими свойствами ме-

талла, а также однородностью и равномерностью их распределения за счет применения факторов технологического внешнего воздействия, получить детали при высоком коэффициенте использования металла.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Казаков Ю.Н.** Формообразование и свойства деталей при дуговых процессах с внешним воздействием / Ю.Н. Казаков, В.В. Хорев, Г.Г. Угаров и др. – Саратов: СГТУ, 2007. – 328 с.
2. **Мошкин В.И.** Импульсные линейные электромагнитные двигатели / В.И. Мош-

- кин, В.Ю. Нейман, Г.Г. Угаров. – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2010. – 220 с.
3. **Вдовина О.В.** Технология локального вытеснения металла инструментом с приводом линейного электромагнитного двигателя: Дисс: ... канд. техн. наук. – Саратов: СГТУ, 2002. 139 с.

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

Вдовина Ольга Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Угаров Геннадий Григорьевич – доктор

Vladimir I. Moshkin - Ph.D., Associate Professor, Head: Department of Energy Engineering and Metal Technology, Kurgan State University

Olga V. Vdovina - Ph.D., Associate Professor, Department of Power Supply for Industrial Enterprises, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Gennady G. Ugarov – Dr.Sc., Professor,

технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Department of Power Supply for Industrial Enterprises, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 20.02.14, принята к опубликованию 30.03.14

УДК 621.318.3

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ДИНАМИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ТОКОВ И ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КООРДИНАТ ОБОБЩЕННОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭНЕРГИИ

Д.А. Вырыханов, Г.Г. Угаров

AN ALGORITHM FOR CALCULATING DYNAMIC CHARACTERISTICS OF A GENERALIZED ELECTROMECHANICAL ENERGY CONVERTER

D.A. Vyryhanov, G.G. Ugarov

Предложен алгоритм расчета динамических зависимостей токов и пространственных координат в процессе работы обобщенного электромеханического преобразователя энергии, представленного в виде неограниченного числа магнитосвязанных электрических контуров обмоток возбуждения магнитного поля преобразователя.

Ключевые слова: электромеханическое преобразование энергии, магнитная мощность, механическая мощность, электродвижущая сила, электрический контур.

Современное развитие электромеханических преобразователей энергии направлено на увеличение количества электрических контуров возбуждения в них магнитного поля, а также на увеличение степеней свободы перемещения рабочих органов преобразователей. В общем случае электромеханический преобразователь энергии можно рассматривать как систему магнитосвязанных электрических контуров с множеством степеней их свободного перемещения друг относительно друга. Из-

An algorithm for calculating dynamic dependencies of currents and spatial coordinates of the in-process generalized electromechanical energy converter is presented in the form of an unlimited number of electrical circuits magnetic coupling used for excitation of the magnetic field in the converter.

Keywords: electromechanical energy conversion, magnetic power, mechanical power, electromotive force, the electric circuit.

вестные математические модели [1 - 3], описывающие динамику электромеханического преобразования, строятся на основе положений электротехники с применением законов Кирхгофа:

$$\begin{aligned} u_1 &= i_1 \cdot R_1 + \frac{d\psi_1}{dt} \\ u_2 &= i_2 \cdot R_2 + \frac{d\psi_2}{dt} \\ &\dots \\ u_n &= i_n \cdot R_n + \frac{d\psi_n}{dt} \end{aligned} \quad (1)$$

где u_j , $j \in (1..n)$ - напряжение сторонней ЭДС, питающей j -тый электрический контур; n - количество рассматриваемых электрических контуров; i_j , $j \in (1..n)$ - электрический ток, протекающий в j -том контуре; $\frac{d\psi_j}{dt}$, $j \in (1..n)$ - производная по времени t потокосцепления j -того контура; R_j , $j \in (1..n)$ - активное сопротивление j -того электрического контура.

Система уравнений (1) параметрически связана с системой уравнений, описывающей механическое состояние рассматриваемого преобразователя. В общем случае при рассмотрении p подвижных масс, на которые воздействуют электромагнитные усилия от n электрических контуров, их механическое состояние описывается выражениями:

$$\begin{aligned} m_1 \cdot \frac{d^2 \bar{x}_1}{dt^2} &= \bar{F}_{\text{маг.1}} - \bar{F}_{\text{сопр.1}}, \\ m_2 \cdot \frac{d^2 \bar{x}_2}{dt^2} &= \bar{F}_{\text{маг.2}} - \bar{F}_{\text{сопр.2}}, \\ &\dots \\ m_p \cdot \frac{d^2 \bar{x}_p}{dt^2} &= \bar{F}_{\text{маг.p}} - \bar{F}_{\text{сопр.p}} \end{aligned} \quad (2)$$

где m_j , $\bar{x}_j$ $j \in (1..p)$ - масса и вектор механической координаты j -того подвижного элемента машины; $\bar{F}_{\text{маг.j}}$, $\bar{F}_{\text{сопр.j}}$ $j \in (1..p)$ - векторы суммарных электромагнитных усилий и сил сопротивления движению, действующих на j -тый подвижный элемент машины.

Аналитическое решение систем уравнений (1), (2) невозможно вследствие нелинейности характеристик магнитных взаимосвязей между контурами. Эти системы уравнений не позволяют определить аналитическое выражение для механической мощности, развиваемой в процессе электромеханического преобразования энергии, выраженной непосредственно через присутствующие в электрических контурах противо-ЭДС. Это приводит к уве-

личению времени машинного расчета динамических показателей электромеханического преобразования энергии, что наиболее критично в системах электропривода реального времени. В настоящей работе предлагается алгоритм расчета динамических характеристик процесса электромеханического преобразования энергии в обобщенном электромеханическом преобразователе, отличающийся от известных наличием аналитических выражений мощности преобразования механической и магнитной видов энергий.

Закон сохранения энергии для электро-механического преобразования можно представить в виде

$$\frac{dW_{\text{эл.маг.j}}}{dt} = \frac{dW_{\text{маг.j}}}{dt} + \frac{dW_{\text{мех.j}}}{dt}, \quad (3)$$

где $W_{\text{эл.маг.j}}$, $j \in (1..n)$ - энергия взаимодействия j -того контура электромеханического преобразователя с внешней электрической системой; $W_{\text{маг.j}}$, $j \in (1..n)$ - магнитная энергия, связанная с током, протекающим в рассматриваемом j -том контуре, и его потокосцеплением; $W_{\text{мех.j}}$, $j \in (1..n)$ - механическая энергия, преобразуемая посредством взаимодействия рассматриваемого j -того электрического контура.

Мощность взаимодействия j -того электрического контура с внешней электрической системой можно представить в виде

$$\frac{dW_{\text{эл.маг.j}}}{dt} = i_j \cdot \frac{d\psi_j}{dt}, \quad (4)$$

где $\frac{d\psi_j}{dt}$, $j \in (1..n)$ - производная по времени t от потокосцепления, связанного с обмоткой формирующей j -тый контур, определяющая величину противо-ЭДС, наблюдаемую на данной обмотке в процессе энергопреобразования.

По аналогии с (4) величины производных от магнитной и механической энергий

в правой части выражения (3) можно представить в виде [4, 5]:

$$\begin{aligned}\frac{dW_{\text{маг},j}}{dt} &= i_j \cdot \frac{d\psi_{\text{маг},j}}{dt}, \\ \frac{dW_{\text{мех},j}}{dt} &= i_j \cdot \frac{d\psi_{\text{мех},j}}{dt},\end{aligned}\quad (5)$$

где $d\psi_{\text{маг},j}/dt$, $d\psi_{\text{мех},j}/dt$, $j \in (1...n)$ - производные от величин потокоцеплений, определяющих соответственно магнитную и механическую мощности согласно (5).

В [4, 5] обосновано представление производной от магнитной энергии в виде:

$$\begin{aligned}\frac{dW_{\text{маг},j}}{dt} &= \frac{di_{\text{маг},j}}{dt} \cdot \frac{\partial W_{\text{маг},j}}{\partial i} + \frac{d\psi_{\text{маг},j}}{dt} \cdot \frac{\partial W_{\text{маг},j}}{\partial \psi} = \\ &= \frac{1}{2} \psi_{\text{маг},j} \cdot \frac{di_{\text{маг},j}}{dt} + \frac{1}{2} i_{\text{маг},j} \cdot \frac{d\psi_{\text{маг},j}}{dt},\end{aligned}\quad (6)$$

где $di_{\text{маг},j}$, $j \in (1...n)$ - дифференциал тока определяющий магнитную мощность развиваемую в процессе электромеханического преобразования.

Аналогично, величину механической мощности можно представить в виде:

$$\begin{aligned}\frac{dW_{\text{мех},j}}{dt} &= \frac{di_{\text{мех},j}}{dt} \cdot \frac{\partial W_{\text{мех},j}}{\partial i} + \frac{d\psi_{\text{мех},j}}{dt} \cdot \frac{\partial W_{\text{мех},j}}{\partial \psi} = \\ &= \frac{1}{2} \psi_{\text{мех},j} \cdot \frac{di_{\text{мех},j}}{dt} + \frac{1}{2} i_{\text{мех},j} \cdot \frac{d\psi_{\text{мех},j}}{dt}\end{aligned}\quad (7)$$

На основании положений [4, 5], учитывая нелинейность статических характеристик намагничивания магнитопровода электромеханического преобразователя можно записать выражения для производных потокоцепления и тока в рассматриваемом j -том контуре магнитосвязанном с контуром k в виде:

$$\begin{aligned}\frac{d\psi_{jk}}{dt} &= \frac{d\psi_{\text{маг},jk}}{dt} + \frac{d\psi_{\text{мех},jk}}{dt}, \\ \frac{di_{jk}}{dt} &= \left(\frac{di_{\text{маг},jk}}{dt} - \frac{di_{\text{мех},jk}}{dt} \right) \cdot \frac{2}{1 + \frac{M_{\text{дуф},jk}}{M_{jk}}} - \frac{di_{\text{мех},jk}}{dt},\end{aligned}\quad (8)$$

где $M_{jk} = \psi_j / i_k$, $j, k \in (1...n)$ - мгновенная индуктивность j -того контура току, протекающему в контуре k ;

$M_{\text{дуф},jk} = d\psi_j / di_k$, $j, k \in (1...n)$ - динамическая индуктивность рассматриваемого j -того контура току, протекающему в контуре k .

Интегрирование выражений (8) позволяет определить динамическую зависимость токов, протекающих в n магнитосвязанных контурах, а также связанных с ними потокоцеплений. Выражения (8) получены в условиях нелинейности магнитных свойств магнитопровода электрической машины. Последующее сложение составляющих приращений токов и потокоцеплений, полученных согласно (8) при взаимодействии j -того контура со всеми контурами $k \in (1...n)$, позволит определить реальные приращения токов и потокоцеплений в рассматриваемом j -том контуре.

На основании представленной математической модели предлагается следующий алгоритм определения магнитных и механических составляющих приращения токов и потокоцеплений, входящих в (8):

1. Расчет токов в j -том контуре производится методом наложения, при котором реально протекающий ток определяется как сумма токов, сформированных присутствующими в контуре всеми источниками ЭДС. Электрическое состояние j -того контура определяется следующей системой уравнений:

$$i_j = I_{\text{уем},j} - i_{j1} - i_{j2} - \dots - i_{jn},$$

$$\frac{d(M_{j1} \cdot i_1)}{dt} = R_j \cdot i_{j1},$$

$$\frac{d(M_{j2} \cdot i_2)}{dt} = R_j \cdot i_{j2}, \quad (9)$$

$$\frac{d(M_{jn} \cdot i_n)}{dt} = R_j \cdot i_{jn},$$

где $j \in (1...n)$, $I_{\text{уем},j} = u_j / R_j$ - установившееся значение тока в j -том контуре;

$I_{уст,j} = u_j / R_j$ - установившееся значение тока в j -том контуре под действием внешнего напряжения питания u_j , $j \in (1..n)$.

2. Определяются механические мощности, развиваемые при движении p рассматриваемых подвижных элементов машины и механические приращения токов в j -том электрическом контуре. При этом на произвольный подвижный элемент машины в общем случае действует сумма электромагнитных усилий от n рассматриваемых электрических контуров:

$$F_{маг,j} = F_{маг,j1} + F_{маг,j2} + \dots + F_{маг,jn}, \quad (10)$$

где $j \in (1..n)$; составляющие электромагнитного усилия определяются согласно выражений [6]:

$$\begin{cases} F_{маг,jk} = \frac{1}{2} \cdot i_j^2 \cdot \frac{\partial M_{jk}}{\partial x_e} & \text{при } j = k, \\ F_{маг,jk} = i_j \cdot i_k \cdot \frac{\partial M_{jk}}{\partial x_e} & \text{при } j \neq k, \end{cases} \quad (11)$$

где $j, k \in (1..n)$, $e \in (1..p)$.

Допуская, что все электромагнитные усилия являются однонаправленными, полная механическая мощность, развиваемая j -тым электрическим контуром, определяется согласно выражения:

$$\frac{dW_{мех,j}}{dt} = \left(F_{маг,j} - \frac{F_{маг,j}}{F_{маг,сум,k}} F_{сomp,k} \right) \frac{dx_k}{dt}, \quad (12)$$

где $j \in (1..n)$, $k \in (1..p)$; $F_{маг,сум,k}$ - электромагнитное усилие, действующее на k -тый подвижный элемент машины. Отношение $0 \leq \frac{F_{маг,j}}{F_{маг,сум,k}} \leq 1$ определяет вклад

каждого j -того контура в механическую мощность, связанную с движением k -того подвижного элемента машины.

Подставляя (10) в (12), получим выражение механической мощности, развиваемой электромеханическим взаимодействием j -того контура в виде:

$$\begin{aligned} \frac{dW_{мех,j}}{dt} = & \left[\left(F_{маг,j1} - \frac{F_{маг,j1}}{F_{маг,сум,k}} F_{сomp,k} \right) + \right. \\ & + \left(F_{маг,j2} - \frac{F_{маг,j2}}{F_{маг,сум,k}} F_{сomp,k} \right) + \dots \\ & \left. + \left(F_{маг,jn} - \frac{F_{маг,jn}}{F_{маг,сум,k}} F_{сomp,k} \right) \right] \frac{dx_k}{dt}. \end{aligned} \quad (13)$$

Учитывая, что при произвольном количестве n магнитосвязанных контуров в общем случае величина $d\psi_{мех,j}/dt$, $j \in (1..n)$ (5) определится в виде суммы потокоцеплений, формируемых в j -том контуре от токов, протекающих во всех магнитосвязанных с ним контурах

$$\frac{d\psi_{мех,j}}{dt} = \frac{d\psi_{мех,j1}}{dt} + \frac{d\psi_{мех,j2}}{dt} + \dots + \frac{d\psi_{мех,jn}}{dt}, \quad (14)$$

для каждого рассматриваемого j -того контура приращение механической составляющей тока будет определяться из выражения:

$$\frac{di_{мех,j}}{dt} = \frac{di_{мех,j1}}{dt} + \frac{di_{мех,j2}}{dt} + \dots + \frac{di_{мех,jn}}{dt}, \quad (15)$$

где

$$\begin{aligned} \frac{di_{мех,j1}}{dt} = & \frac{F_{маг,j1} - \frac{F_{маг,j1}}{F_{маг,сум,k}} F_{сomp,k}}{i_j \cdot M_{j1} \cdot m_k} \times \\ & \times \int_0^t (F_{маг,сум,k} - F_{сomp,k}) \cdot dt, \\ \frac{di_{мех,j2}}{dt} = & \frac{F_{маг,j2} - \frac{F_{маг,j2}}{F_{маг,сум,k}} F_{сomp,k}}{i_j \cdot M_{j2} \cdot m_k} \times \\ & \times \int_0^t (F_{маг,сум,k} - F_{сomp,k}) \cdot dt, \\ & \dots \\ \frac{di_{мех,jn}}{dt} = & \frac{F_{маг,jn} - \frac{F_{маг,jn}}{F_{маг,сум,k}} F_{сomp,k}}{i_j \cdot M_{jn} \cdot m_k} \times \\ & \times \int_0^t (F_{маг,сум,k} - F_{сomp,k}) \cdot dt, \end{aligned} \quad (16)$$

3. Для определения магнитной составляющей приращения тока (6) из (9) при

условии отсутствия механической мощности [4, 5] магнитное приращение тока в j -том контуре определяется в виде:

$$\frac{di_{маг,j}}{dt} = \frac{di_{маг,j1}}{dt} + \frac{di_{маг,j2}}{dt} + \dots + \frac{di_{маг,jn}}{dt}, \quad (17)$$

где

$$\begin{aligned} \frac{di_{маг,j1}}{dt} &= \frac{M_{j1}}{R_j} \cdot \frac{d^2 i_1}{dt^2}, \\ \frac{di_{маг,j2}}{dt} &= \frac{M_{j2}}{R_j} \cdot \frac{d^2 i_2}{dt^2}, \\ \frac{di_{маг,jn}}{dt} &= \frac{\dots M_{jn}}{R_j} \cdot \frac{d^2 i_n}{dt^2}. \end{aligned} \quad (18)$$

Здесь $j \in (1 \dots n)$.

4. Производная тока, протекающая в j -том контуре, имеет вид

$$\frac{di_j}{dt} = \frac{di_{j1}}{dt} + \frac{di_{j2}}{dt} + \dots + \frac{di_{jk}}{dt}, \quad (19)$$

где $\frac{di_{jk}}{dt}$, $k \in (1 \dots n)$ - определяется согласно (8).

Возможность использования метода наложения при вычислении тока в произвольном контуре согласно (19) определяется тем, что нелинейность магнитных характеристик стали магнитопровода в выражениях (8), предварительно сложению (наложению) составляющих (19) учитываются коэффициентами

$$\frac{2}{1 + \frac{M_{\text{дуф},jk}}{M_{jk}}}, \quad j, k \in (1 \dots n)$$

в (8) для каждого отдельного контурного тока i_j , $j \in (1 \dots n)$. При линейных свойствах магнитных материалов, формирующих магнитопровод электромеханического

преобразователя, то есть в случае равенства $M_{jk} = M_{\text{дуф},jk}$, данный коэффициент становится равным единице и получаются выражения, соответствующие полученным в [4].

5. Приращения пространственных координат определяются выражением:

$$\frac{d\bar{x}_j}{dt} = \int_0^t \frac{\bar{F}_{\text{уаз.сум},j} - \bar{F}_{\text{сопр},j}}{m_j} \cdot dt, \quad j \in (1 \dots p). \quad (20)$$

Итак, определение магнитной и механической мощностей в виде выражений (5) позволяет выделить магнитную (6) и механическую (7) мощности в процессе ее электромеханического преобразования. На основании данного разделения становится возможным получить аналитические выражения для производных токов (19) произвольного количества электромеханически связанных контуров в наиболее общем виде с учетом нелинейных свойств магнитных материалов.

Реализация предложенного алгоритма расчета динамических зависимостей токов и пространственных координат в процессе работы обобщенного электромеханического преобразователя энергии позволит снизить затраты времени расчета микроконтроллерных систем управления сложными электромеханическими преобразователями с множественными магнитосвязанными контурами.

Численное интегрирование зависимостей (19), (20) может лежать в основе исследования динамики рабочих процессов

электромеханических преобразователей энергии различного рода (асинхронных, синхронных, постоянного тока и реактивных) в целях оптимизации их конструкции по энергетическим показателям.

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

4. **Вырыханов Д.А.** Анализ мощностных и энергетических структур линейного электромагнитного двигателя / Д. А. Вырыханов, Г. Г. Угаров // Проблемы электроэнергетики : межвуз. науч. сб. / СГТУ. – Саратов, 2004. – С. 192 – 198.

5. **Вырыханов Д.А.** Математическая модель процесса электромеханического

преобразования энергии / Д.А. Вырыханов, Г.Г. Угаров // Вопросы электротехнологии : науч. техн. журнал / – Саратов, СГТУ, 2013. – №1. – С. 61 – 64.

6. **Абрамкин Ю. В.** Теория и расчет пондеромоторных и электродвижущих сил и преобразования энергии в электромагнитном поле / Ю. В. Абрамкин. – М. : Изд-во МЭИ, 1997. – 208с.

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 28.01.14, принята к опубликованию 30.03.14

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

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

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

УДК 621.37, 621.365

РАСЧЁТ СВЧ РЕАКТОРА ПЛАЗМЫ ДЛЯ ОСАЖДЕНИЯ ОДНОРОДНЫХ ПО ПОВЕРХНОСТИ ТОНКИХ ПЛЁНОК В МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКЕ

А.О. Бочкарёв, Б.К. Сивяков

CALCULATION OF THE MICROWAVE PLASMA REACTOR FOR PRECIPITATION OF UNIFORM THIN FILMS IN MICRO - AND NANOELECTRONICS

A.O. Bochkarev, B.K. Sivyakov

Предлагается расчёт отверстий связи распределённого источника СВЧ мощности в виде опоясывающего волновода с переменной высотой узкой стенки для бокового возбуждения плазмы в реакторе для нужд нанoeлектроники.

Ключевые слова: волноводно-резонаторные устройства, микрообработка, микроволновая плазма, электронный циклотронный резонанс

Для равномерного возбуждения плазмы по объёму цилиндрической камеры [1] в установке СВЧ плазменной обработки материала с электронно - циклотронным резонансом плазмы предлагается конструкция опоясывающего волновода с переменной высотой узкой стенки, подводящего СВЧ энергию с боков цилиндрической камеры (рис. 1). С целью согласования генератора и для равномерной подачи энергии через отверстия связи в камеру возбуждения плазмы необходимо определить геометрические размеры отверстий связи и опоясывающего волновода.

Предполагаются следующие приближения, заложенные в модель:

– представление отверстий в виде эквивалентов отрезков прямоугольного волно-

This article describes the calculation of holes distributed coupling microwave power source in the form of zoster waveguide with variable height narrow walls for lateral excitation of the plasma in the reactor for the needs of nanoelectronics.

Keywords: Waveguide resonator devices, micromachining, micro plasma, electron cyclotron resonance

вода, которые согласованы с нагрузкой и не связаны между собой;

– распространение в волноводе волны типа H_{10} .

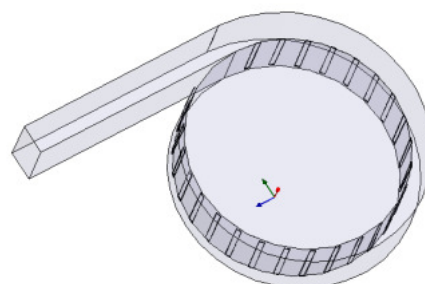


Рис.1. Схема волноводно-резонаторного СВЧ реактора с переменной высотой узкой стенки волновода для распределенного бокового ввода энергии

В этом случае на эквивалентной схеме отверстия будут представлены активными сопротивлениями, включенными последовательно, величина которых рассчитывается по формуле

$$Z_n = \frac{\pi b \lambda_z}{2a \lambda} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}, \quad (1)$$

где b и a – высота и ширина отверстия связи, λ_z – длина продольной волны, λ – длина волны в свободном пространстве, μ и ε – магнитная и диэлектрическая проницаемость вещества, заполняющего отверстие, или

$$Z_n = \frac{\pi b}{2a} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\pi}{ak}\right)^2}} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}, \quad (2)$$

так как

$$\frac{\lambda_z}{\lambda} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\pi}{ak}\right)^2}}; \quad (3)$$

$$k = \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon \mu} = \frac{2\pi}{\lambda}; \quad (4)$$

$$\omega = 2\pi \nu, \quad (5)$$

где ν – частота колебаний.

Для отсутствия отражения от отверстия связи необходимо, чтобы волновое сопротивление подводящей линии равнялось суммам волновых сопротивлений расходящихся при условии, что все отверстия связи согласованы.



Рис.2. Схема участка опоясывающего волновода с переменным сечением узкой стенки с тремя последовательными отверстиями связи

Для трёх отверстий связи, изображённых на рис. 2, имеющих известные размеры, имеется возможность рассчитать размеры передающих линий, составив следующую систему уравнений математической модели:

$$\begin{aligned} \frac{\pi b}{2a} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\pi}{ak}\right)^2}} &= \frac{\pi b'_1}{2a'_1} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\pi}{a'_1 k}\right)^2}} + \\ &+ \frac{\pi b_1}{2a} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\pi}{ak}\right)^2}}, \\ \frac{\pi b_1}{2a} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\pi}{ak}\right)^2}} &= \frac{\pi b'_2}{2a'_2} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\pi}{a'_2 k}\right)^2}} + \\ &+ \frac{\pi b_2}{2a} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\pi}{ak}\right)^2}}, \\ \frac{\pi b_2}{2a} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\pi}{ak}\right)^2}} &= \frac{\pi b'_3}{2a'_3} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\pi}{a'_3 k}\right)^2}}. \end{aligned} \quad (6)$$

Если все отверстия связи равны между собой, то их волновые сопротивления также должно быть равным

$$Z_n = \frac{1}{N} \frac{\pi b}{2a} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\pi}{ak}\right)^2}}, \quad (7)$$

где N – число отверстий связи.

Если известно число отверстий, размеры подводящего волновода, длина отверстия связи, то можно рассчитать ширину отверстия связи по формуле.

$$\frac{\pi b'_n}{2a'_n} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\pi}{a'_n k}\right)^2}} = \frac{\pi b}{N 2a} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\pi}{ak}\right)^2}}, \quad (8)$$

откуда

$$b'_n = \frac{b a'}{N a} \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{\pi}{a'_n k}\right)^2}{1 - \left(\frac{\pi}{ak}\right)^2}}, \quad (9)$$

где a'_n – длина отверстия, a – ширина подводящего волновода, b – высота подводящего волновода, b'_n – ширина отверстия.

Высота передающей линии b_n рассчитывалась по формуле

$$b_n = (N - n) \frac{ab'}{a'} \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{\pi}{ak}\right)^2}{1 - \left(\frac{\pi}{a'k}\right)^2}} \quad (10)$$

Таким образом, получена математическая модель согласованной подводящей линии, позволяющая обеспечить равномерное горение плазмы.

По этой модели были проведены расчеты ширины отверстия связи. Для частоты 2450 МГц, волновода с размерами 90×45 мм, 26 отверстий длиной 85 мм ширина отверстия $b'_{26} = 1.54$ мм.

Значение высоты передающей линии от номера отверстия представлено на рис.3.

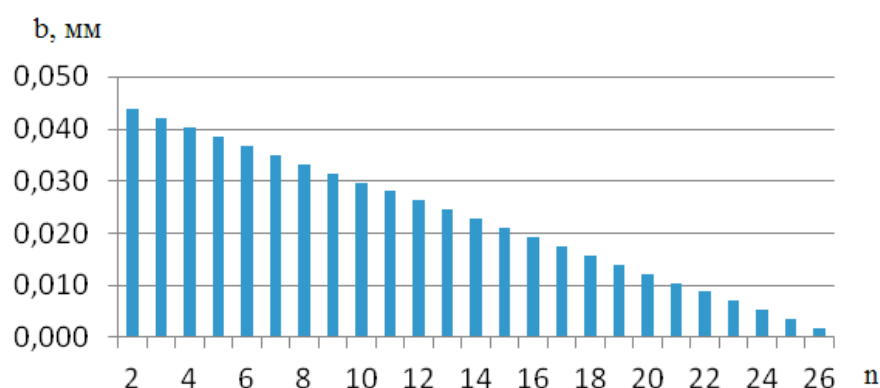


Рис. 3. Значение высоты волновода над соответствующим отверстием связи

Для нахождения нормированного напряжения на отверстиях связи необходимо вычислить матрицу рассеяния для эквивалентного тройника. Матрица рассеяния находилась из условия реактивности тройника (отсутствие активных потерь) и известных значений S_{11} , S_{22} , S_{33} [2], после этого по известному значению нормированного напряжения на входе тройника определяются нормированные напряжения

на выходе отверстий связи. Для делителя мощности на 26 отверстий связи, которые располагаются на расстоянии четверти длины волны и имеют размер 85×1.54 мм в начальный момент времени найдены нормированные значения напряженности, приведенные в табл. 1. Так как отверстия связи располагаются на расстоянии четверти длины волны, то через каждые четверть отверстия значения напряжения повторяются.

Таблица 1

Нормированное значение напряжения волны в в приближении длинной линии на отверстиях связи в нулевой момент времени

Порядковый номер отверстия	1	2	3	4
Нормированное значение напряжения в приближении длинной линии на отверстии связи в нулевой момент времени	-0,196i	-0,196	0,196i	0,196

Порядковый номер отверстия	5	6	7	8
Нормированное значение напряжения в приближении длинной линии на отверстии связи в нулевой момент времени	-0,196i	-0,196	0,196i	0,196

Таким образом, разработана математическая модель согласованной подводящей линии для равномерного возбуждения плазмы в реакторе и проведен расчет параметров линии. В дальнейшем следует построить более полную модель, включающую подводящую линию и, собственно, реактор с плазмой. Полученные результаты позволяют выбрать начальные параметры всей конструкции для её последующей оптимизации.

Конечная цель всей работы создание плазменного реактора с равномерным возбуждением плазмы для осаждения алмазоподобных пленок на кремниевые пластины больших размеров до 330 мм в диаметре. Это позволит повысить производительность оборудования и снизить себестоимость изделий микро- и нанoeлектроники.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Сивяков Б.К.** Математическое моделирование сверхвысокочастотных кольцевых резонаторов электротехнологических установок / Б.К. Сивяков, Ю.П. Слаповская // Вестник Саратовского государственного технического университета, 2010. – №3(45). – С. 162 – 170.

2. **Фельдштейн А.Л.** Синтез четырёхполюсников и восьмиполюсников на СВЧ. / А.Л. Фельдштейн, Л.Р. Явич - М.: Связь, 1965 – 352 с.

3. **Яфаров Р.К.** Физика СВЧ вакуумно-плазменных нанотехнологий. / Р.К. Яфаров. – М.: Физматлит, 2009. – 216 с.

Бочкарев Алексей Олегович - аспирант кафедры “Электротехника и электроника” Саратовского государственного технического Университета имени Гагарина Ю.А.

Сивяков Борис Константинович - доктор технических наук, профессор кафедры “Электротехника и электроника” Саратовского государственного технического Университета имени Гагарина Ю.А.

Alexei O. Bochkarev – Postgraduate at the Department of Electrical Engineering and Electronics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Boris K. Sivyakov – Dr.Sc., Professor, Department of Electrical Engineering and Electronics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 12.03.14, принята к опубликованию 30.03.14

К СВЕДЕНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

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

ИЗЛУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН КОЛЕБЛЮЩЕЙСЯ ДИСЛОКАЦИЕЙ В ЩЕЛОЧНО-ГАЛОИДНОМ КРИСТАЛЛЕ

С.Г. Гестрин, Е.В. Щукина

EMISSION OF ELECTROMAGNETIC WAVES OSCILLATING DISLOCATIONS IN ALKALI HALIDE CRYSTALS

S.G. Gestrin, E.V. Schukina

В статье исследовано излучение колебаний заряженных дислокаций в щелочно-галогидном кристалле. Получены выражения для интенсивности излучения в случаях, когда к кристаллу приложены внешнее электрическое поле или механическое напряжение, при наличии в кристалле одного и двух типов подвижных точечных дефектов.

Ключевые слова: дислокация, щелочногалогидный кристалл.

The article examines radiation fluctuations of charged dislocations in alkali-halide crystals. Expressions are obtained for the cases of radiation intensity when an external electric field or mechanical stress are applied to the crystal in the presence of one or two types of mobile point crystal defects.

Key words: dislocation, alkali-halide crystals.

Как известно, движение дислокаций в кристаллах сопровождается излучением электромагнитных и акустических волн. Изучение электромагнитного и акустического излучения деформируемого кристалла в ряде случаев позволяет сделать важные выводы о динамике дефектов кристаллической структуры.

Различные механизмы возникновения электромагнитного излучения были рассмотрены в работах [1,2]. В работе [3] было рассмотрено переходное излучение при прохождении заряженной краевой дислокацией границы раздела между областями щелочногалогидного кристалл (ЩГК) с различными диэлектрическими проницаемостями. Было получено выражение для полной энергии излучения деформируемого кристалла.

В ЩГК заряженная краевая дислокация окружена экранирующим облаком точечных дефектов. Под влиянием внешних механических и электрических сил, приложенных к кристаллу, происходит смещение дислокации относительно облака. Так,

в работах [4,5] были рассчитаны дипольный момент кристалла и разность потенциалов, возникающая между гранями кристалла, в случае дислокационного аналога эффекта Холла и эффекта Нернста - Эттингсхаузена.

Настоящая работа посвящена исследованию излучения колебаний заряженных дислокаций в ЩГК. В работе получены выражения для интенсивности излучения в случаях, когда к кристаллу приложено внешнее электрическое поле или механическое напряжение, при наличии в кристалле одного и двух типов подвижных точечных дефектов.

Рассмотрим ЩГК, в котором заряженная дислокация, окруженная облаком точечных дефектов, ориентирована вдоль оси Y и колеблется под действием внешнего переменного механического напряжения или электрического поля вдоль оси X . Таким образом, дипольный момент системы дислокации - облако изменяется с течением времени $\sim \exp(i\alpha t)$.

Будем рассматривать излучение кристалла с дислокациями на больших расстояниях от кристалла (в волновой зоне), когда для дипольного излучения справедливы соотношения:

$$\vec{H} = \frac{1}{c^2 R} \left[\ddot{\vec{p}}, \vec{n} \right], \quad (1)$$

$$\vec{E} = \frac{1}{c^2 R} \left[\ddot{\vec{p}}, \vec{n} \right] \vec{n}, \quad (2)$$

где $\vec{H}$ и $\vec{E}$ – напряженности электрического и магнитного полей, c – скорость света, R – расстояние от кристалла до точки наблюдения, $\vec{p}$ – дипольный момент кристалла, $\vec{n}$ – единичный вектор, направленный от кристалла к точки наблюдения [6]. При этом интенсивность дипольного излучения определяется соотношением:

$$\bar{I} = \frac{2|\ddot{\vec{p}}|^2}{3c^3} \dots \quad (3)$$

Рассмотрим теперь ситуацию, когда к кристаллу приложено внешнее механическое напряжение $\sim \exp(i\omega t)$ и дислокация совершает колебания с частотой ω .

В этом случае линеаризованная система уравнений, описывающая систему заряженная дислокация – экранирующее облако точечных дефектов [4,5], имеет вид:

$$\frac{\partial n'}{\partial t} - (D\Delta n' + n_0 b q \Delta \psi) = 0, \quad (4)$$

$$\Delta \psi = -\frac{4\pi q}{\epsilon} n' - \frac{4\pi}{\epsilon} \sigma_D \delta(x - x_0 \exp(i\omega t)) \delta(y), \quad (5)$$

где δ – функция соответствует дислокации, колеблющейся с амплитудой x_0 , ϵ – диэлектрическая проницаемость кристалла, σ_D – плотность заряда на дислокации, D – коэффициент диффузии, q – заряд точечных дефектов, n_0 – равновесное значение концентрации точечных дефектов, n' – отклонение концентрации точечных дефектов от равновесного значения, ψ – потенциал электрического поля.

Перейдем в систему координат, совершающую колебания вместе с дислока-

цией, тогда в (4) $\partial n' / \partial t$ заменятся на комбинацию

$$\frac{\partial n'}{\partial t} \rightarrow \frac{\partial n'}{\partial t} - i\omega x_0 \exp(i\omega t) \frac{\partial n'}{\partial x}. \quad (6)$$

Подставляя (5) и (6) в (4), и, проводя линеаризацию полученного соотношения, находим выражение

$$\frac{\partial n''}{\partial t} + \chi^2 D n'' - D \Delta n'' = i\omega x_0 \exp(i\omega t) \frac{\partial n'_0}{\partial x}, \quad (7)$$

в котором:

$$n' = n'_0 + n'', \quad n'_0 = -n_0 \frac{2q\sigma}{\epsilon k_B T} K_0(\chi r), \quad (8)$$

где $\chi^2 \equiv 4\pi q^2 n_0 / \epsilon k_B T = 1/r_D^2$, T – температура, r_D – радиус Дебая.

Перейдем в уравнении (8) от функции n'' к другой функции $\tilde{n}$ заменой $n'' = \tilde{n} \cos \varphi \exp(i\omega t)$:

$$\frac{\partial^2 \tilde{n}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tilde{n}}{\partial r} - \tilde{n} \left[\left(\chi^2 + i \frac{\omega}{D} \right) + \frac{1}{r^2} \right] = A K_1(\chi r),$$

$$A \equiv -\frac{2i\omega x_0 q \sigma_D n_0 \chi}{\epsilon k_B T D}. \quad (9)$$

Решение (9), удовлетворяющее условию $\tilde{n} \rightarrow 0$ при $r \rightarrow 0$, имеет вид

$$\tilde{n} = \frac{2x_0 q \sigma_D n_0}{\epsilon k_B T} (\chi K_1(\chi r) - \tilde{\chi} K_1(\tilde{\chi} r)),$$

$$\tilde{\chi} \equiv \sqrt{\chi^2 + \frac{i\omega}{D}}. \quad (10)$$

Вычислим дипольный момент единицы длины системы дислокация – облако, для чего воспользуемся соотношением:

$$P_{ед.дл.} = q \int_0^\infty \int_0^{2\pi} n'' r^2 \cos \varphi dr. \quad (11)$$

Из (10) и (11) находим:

$$P_{ед.дл.} = \frac{i\omega x_0 \sigma_D}{D(\chi^2 + (i\omega/D))} \exp i\omega t. \quad (12)$$

Заметим, что значение x_0 в (12), зависит от величины приложенного сдвигового напряжения [7,8]:

$$x_0 = \frac{bS_0}{-m\omega^2 + i(m/\tau)\omega + k + (\sigma_D^2 \chi^2 / \varepsilon) \ln(\tilde{\chi}/\chi)}, \quad (13)$$

где S_0 - амплитуда приложенного сдвига, m - эффективная масса единицы, длины дислокации, m/τ - коэффициент вязкости, $k = \pi G b^2 / (1 - \nu)^2 l^2$, ν - коэффициент Пуассона, G - модуль упругости, l - длина сегмента. Дифференцируя (12) два раза по времени и подставляя полученный результат в (3), найдем интенсивность излучения системы дислокация - облако.

Если к кристаллу, содержащему покоящуюся дислокацию, приложено переменное электрическое поле $E = E_0 \exp(i\omega t)$, то, как показывают вычисления, аналогичные проведенным выше, дипольный момент единицы длины системы дислокация - облако определяется соотношением

$$P_{ед.дл.} = -\frac{\sigma_D}{\chi^2 + (i\omega/D)} \frac{qE_0}{k_B T} \exp(i\alpha t). \quad (14)$$

Рассмотрим случай, когда кристалл, содержащий один тип подвижных точечных дефектов, помещен во внешнее переменное электрическое поле $E = E_0 \exp(i\alpha t)$. В этом случае дипольный момент кристалла задается выражением:

$$\vec{P} = -\frac{\sigma_D N V}{\chi^2 + (i\omega/D)} \frac{qE_0}{k_B T} \exp(i\alpha t) \vec{e}_x. \quad (15)$$

Выделим в (15) действительную часть выражения

$$\begin{aligned} \text{Re } \vec{P} &= -\sigma_D N V \frac{qE_0}{k_B T} \frac{\sin(\omega t + \varphi)}{\sqrt{\chi^4 + (\omega^2/D^2)}} \vec{e}_x, \\ \sin \varphi &= \chi^2 / \sqrt{\chi^4 + (\omega^2/D^2)}. \end{aligned} \quad (16)$$

Подставляем (16) в (3) и получаем

$$\bar{I} = \frac{N^2 V^2 E_0^2}{3c^3} \cdot \left(\frac{\sigma_D q}{k_B T} \right)^2 \cdot \frac{\omega^4}{\chi^4 + (\omega^2/D^2)}. \quad (17)$$

Оценим интенсивность дипольного излучения кристалла при $E \sim 1$ СГСЭ, $\omega \sim 6 \times 10^8 \text{ с}^{-1}$, $N = 10^{13} \text{ см}^{-2}$, $V = 1 \text{ см}^3$, $q = 4,8 \times 10^{-10}$ СГСЭ, $\sigma = 7 \times 10^{-3}$ СГСЭ/см, $n_0 = 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $c = 3 \times 10^{10} \text{ см/с}$, $\varepsilon = 9$, $T = 300^\circ \text{K}$, $D \approx 0,2 \times 10^{-7} \text{ см}^2/\text{с}$ (кристалл LiF при $T \approx 300^\circ \text{K}$). Подставляя данные значения параметров в (3), получаем $\bar{I} \approx 1,17 \text{ эрг/с}$, что сравнимо с результатами для механизма излучения, рассмотренного в [2].

Таким образом, в работе получены выражения для дипольных моментов, а также интенсивности дипольного излучения системы дислокация - экранирующее облако точечных дефектов, совершающей малые колебания под воздействием приложенных к щелочно-галогидному кристаллу периодически изменяющихся механических напряжений, или внешних электрических полей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Косевич А.М. Теория кристаллической решетки / А.М. Косевич - Харьков: Высшая школа, 1988. - 303с.
2. Чишко К.А. Излучение электромагнитных волн краевыми дислокациями, движущимися в ионных кристаллах / К.А.

Чишко, О.В. Чаркина // ФТТ, 1996. - Т.38. - №9. - С.2775-2786.

3. Гестрин С.Г. Переходное излучение движущихся заряженных дислокаций в щелочно-галогидных кристаллах / С.Г. Гестрин, А.Н. Сальников, Е.В. Струлева //

Известия ВУЗов. Физика, 2002. – №8. – С.35-38.

4. **Гестрин С.Г.** Дислокационный аналог поперечного эффекта Нернста – Эттингсхаузена в ионных кристаллах / С.Г. Гестрин, А.Н. Сальников, Е.В. Струлева // Известия ВУЗов. Физика, 1996. – №1. – С.80-82.

5. **Гестрин С.Г.** Дислокационный аналог эффекта Холла в ионных кристаллах / С.Г. Гестрин // Физ. низ. темп., 1991. – Т.17, – №8. – С.1030-1033.

Гестрин Сергей Геннадьевич - доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Физика» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Щукина Елена Вячеславовна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Физика» Саратовского государственного технического университета им. Гагарина Ю.А.

6. **Ландау Л.Д.** // Электродинамика сплошных сред / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц // Теоретическая физика.- М: Наука, 1982. – Т.VIII – 622с.

7. **Tanibayashi M.** Behavior of charged dislocation in ionic crystals with electric field applied / M. Tanibayashi, T. Tsuda // J. Phys. Soc. Japan, 1981. – V.50. – №6. – P.2054-2062.

8. **Tanibayashi M.** Behavior of charged dislocation in ionic crystals with electric field applied II / M. Tanibayashi, T. Tsuda // J. Phys. Soc. Japan, 1982. – V.51. – №1. – P.244-246.

Sergey G. Gestrin - Dr.Sc., Professor at the Department of Physics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Elena V. Schukina – PhD, Associate Professor at the Department of Physics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 12.03.14, принята к опубликованию 30.03.14

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

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

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 621.3; 621.9

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ АДАПТИВНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ПЛАЗМЕННЫМ ПРОЦЕССОМ ПОЛУЧЕНИЯ ПОРИСТЫХ ПОКРЫТИЙ

В.М. Таран, А.В. Лясникова, В.Н. Лясников,
О.А. Дударева, О.А. Маркелова

DEVELOPMENT OF AN AUTOMATED SYSTEM FOR ADAPTIVE DESIGN AND CONTROL OF POROUS PLASMA SPRAY COATING

V.M. Taran, A.V. Lyasnikova, V.N. Lyasnikov,
O.A. Dudareva, O.A. Markelova

Наиболее перспективной технологией, позволяющей создавать на поверхностях изделий электронной техники и медицины пористые покрытия, является технология плазменного напыления. Важным условием повышения качества пористых покрытий является автоматизация технологического процесса их нанесения. В работе рассматриваются вопросы разработки адаптивной системы управления применительно к процессам плазменного нанесения пористых покрытий на поверхности изделий электронной техники и медицины.

Ключевые слова: плазменное напыление, адаптивная система, автоматизация, пористость

Создание материалов для электронной техники и медицины связано с применением современных технологий, среди которых к наиболее перспективным можно отнести нанотехнологии и плазменные методы обработки материалов [1]. Эти технологии позволяют создавать на поверхностях изделий пористые покрытия, которые выполняют одновременно функции емкости и транспортного средства для актив-

Plasma spraying technology is currently one of the most promising technologies used in porous coating of electronic and medical devices. An important condition for improving the quality of porous coatings is to automate the coating process. The article examines the development of an adaptive control system of plasma spray coating for electronic and medical equipment.

Key words: Plasma spraying, an adaptive control system, automation, porosity

ных субстанций, обеспечивающих улучшение функциональных характеристик готовых изделий [1].

Важным условием повышения качества пористых покрытий является автоматизация технологического процесса их плазменного нанесения. На современном уровне развития автоматизации технологических процессов наиболее прогрессивной тенденцией является создание адаптивной

системы управления на базе компьютерной техники [1].

В настоящей работе рассматриваются вопросы разработки адаптивной системы управления применительно к процессам плазменного нанесения пористых покры-

тий на поверхности имплантируемых изделий.

Структурно-функциональная организация адаптивного метода управления технологическим процессом плазменного напыления пористых покрытий приведена на рис.1.

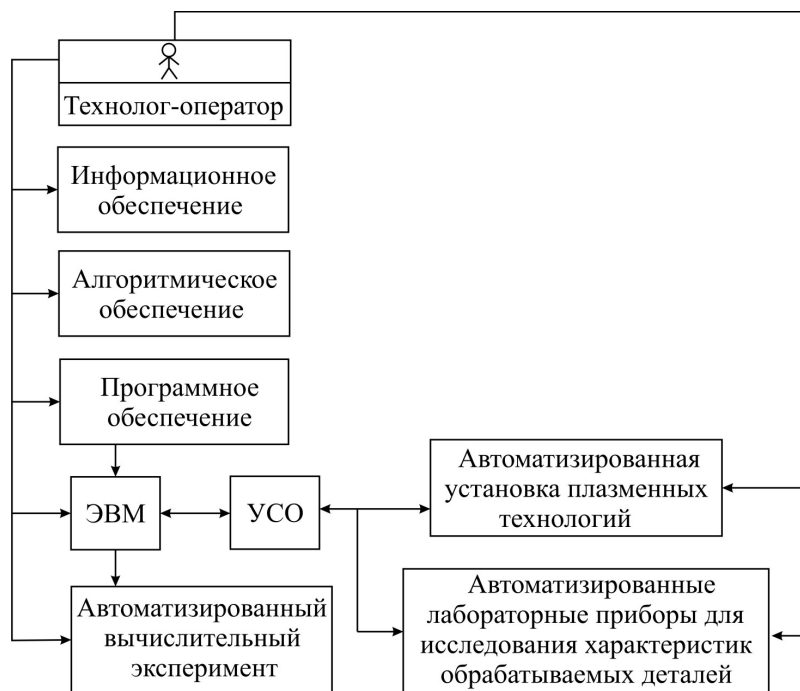


Рис.1. Структурно-функциональная организация адаптивного метода проектирования и управления технологическим процессом плазменного напыления и контроля свойств покрытий

В предложенной адаптивной системе управления технолог-оператор посредством компьютерной системы осуществляет на одном рабочем месте в реальном масштабе времени процесс проектирования пористых покрытий, их напыление на автоматизированной установке и контроль свойств при помощи автоматизированных лабораторных приборов.

Процесс адаптивного проектирования пористых покрытий реализован как автоматизированный вычислительный эксперимент на базе компьютерной системы, которая содержит набор алгоритмов (моделей знаний), предназначенных для создания некоторой внутренней структуры пористого покрытия с заданными свойствами. Плазменные покрытия формируются из огромного числа напыленных частиц в результате их укладки друг на друга и

сложных физико-химических процессов взаимодействующих материалов [1,2].

Внутренняя структура плазменных покрытий отличается большой сложностью, что обусловлено разнообразием форм, размеров и взаимным расположением твердых частиц и пор покрытий.

Основным структурным образованием плазменного покрытия является твердый каркас из напыленных частиц порошка. В каркасе покрытия содержатся макропоры, которые образуются вследствие плотной упаковки твердых частиц порошка. Кроме макропор каркас покрытия содержит также наноканалы, которые образуются внутри объема напыленных частиц вследствие особенностей кристаллизации материала этих частиц в условиях больших градиентов температурного и деформационных полей [2].

Каркас покрытия, структурированный макропорами и наноканалами, представляет собой сложную гидравлическую систему, в которой макропоры могут являться емкостью для длительного хранения жидкого активного вещества, а наноканалы обеспечивают транспортировку жидкого вещества за счет капиллярных явлений.

В связи с этим предлагаемая адаптивная система управления включает набор алгоритмов, позволяющих прогнозировать технологические условия формирования плазменных покрытий с заданными свойствами пористых образований (табл. 1).

Таблица 1
Алгоритмы прогнозирования свойств плазменных покрытий

Обозначение	Функциональное назначение	Источник информации
A1	Выбор типа покрытия	[2]
A2	Выбор технологической структуры для плазменного покрытия	[1]
A3	Определение дисперсности напыленных частиц	[1]
A4	Определение пористости плазменного покрытия	[2]
A5	Определение адгезионной прочности плазменных покрытий	[1]
A6	Определение когезионной прочности напыленных покрытий	[5]
A7	Расчет времени заполнения пористого покрытия жидким веществом	в печати
A8	Расчет количества пор и капилляров в пористом покрытии	[1]
A9	Расчет интенсивности перемещения вещества из объема покрытия в контактную зону	[1]

Общая методика разработки алгоритмов прогнозирования свойств плазменных покрытий основана на следующих положениях:

1. На основе изучения физических закономерностей процесса формирования плазменных покрытий устанавливаются корреляционные взаимосвязи между технологическими условиями напыления и свойствами пористых покрытий, в частности, их пористости и прочности.

2. Предполагается, что покрытия формируются из огромного числа частиц, напыленных плазменным методом, в результате их укладки и взаимодействия с основой и друг с другом.

Проводится статическое моделирование (метод Монте-Карло), в результате которого реальная структура покрытия заменяется эквивалентной структурой (некоторой статической системой), усредненные характеристики которой с определенной степенью точности совпадают с характеристиками реальных покрытий.

3. На основе экспертных оценок формируются шкалы физических величин, участвующие в статическом моделировании. Предполагается, что физические величины являются случайными величинами с нормальным законом распределения.

4. Осуществляется «розыгрыш» на ЭВМ значений физических величин при помощи генераторов случайных чисел.

В результате компьютерного моделирования по методу Монте-Карло определяются прогнозирующие свойства пористого покрытия. Пример блок-схемы алгоритма «розыгрыша» на ЭВМ случайных величин для расчета времени заполнения пор лекарственным веществом приведен на рис. 2.

Автоматизация технологического процесса плазменного напыления покрытий является важнейшим условием повышения качества обрабатываемых изделий. Для автоматизации процесса плазменного напыления покрытий требуется комплекс сложных технических устройств, которые в системе автоматического управления должны быть представлены как исполни-

тельные механизмы, выполняющие технологические операции, и датчики, контролирующие исполнение этих операций.

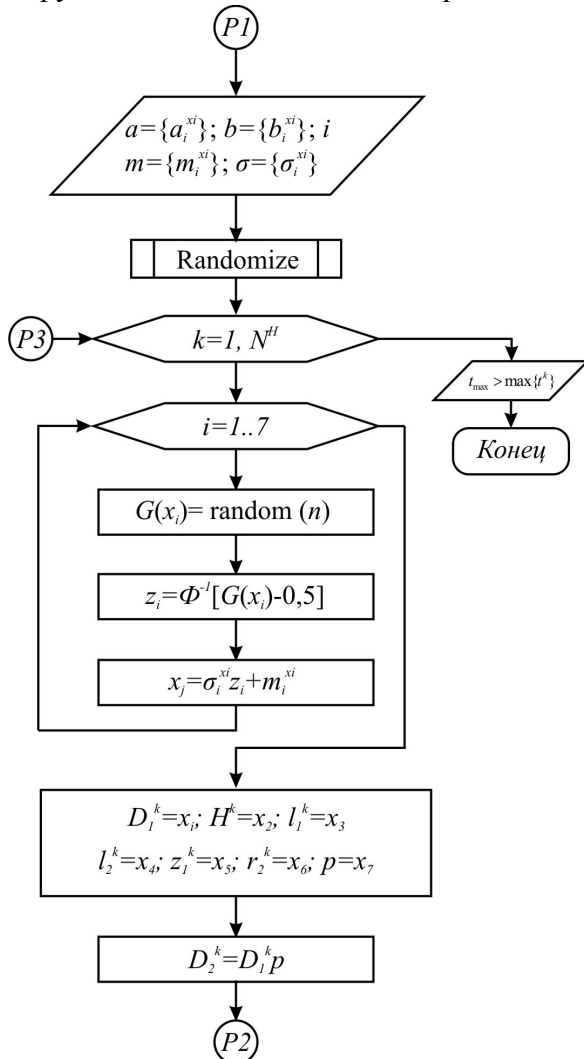


Рис. 2. Блок-схема алгоритма «розыгрыша» на ЭВМ случайных величин для расчета времени заполнения пор лекарственным веществом

Анализ технологии плазменного напыления покрытий показывает, что для получения качественного покрытия требуется поддерживать на заранее установленных оптимальных условиях определенные факторы, которые определяют режим напыления покрытия.

К наиболее существенным факторам режима напыления можно отнести такие факторы, как устойчивость работы плазмотрона и порошкового питателя, расход плазмообразующего газа, величину тока плазмотрона, дистанцию между плазмотроном и обрабатываемым изделием. Важ-

ным фактором является также стабильная работа кинематической схемы установки.

Плазмотрон является одним из основных технических устройств технического комплекса плазменного напыления. Основная функция плазмотрона состоит в генерации плазменной струи для ускорения и нагрева напыляемого порошка. Плазменная струя образуется в результате продувания плазмообразующего газа через дуговой разряд, возбуждаемый между катодом и соплом – анодом плазмотрона [3]. Для образования плазменной струи и подачи в нее напыленного порошка применяется система питания плазмотрона, в состав которой входят: газовая система, система охлаждения, система электропитания и система подачи порошка.

Неустойчивая работа плазмотрона существенно ухудшает нагрев порошка, что резко снижает качество покрытия. При этом основным фактором неустойчивой работы плазмотрона является нарушение равномерного (точнее, близкого к равномерному) движения дугового разряда внутри сопла – анода. Если дуговой разряд перемещается неравномерно или устанавливается неподвижно в какой-либо области сопла, то это неизбежно приводит к ухудшению устойчивости работы плазмотрона или даже выхода его из строя. К сожалению, обеспечить устойчивую работу плазмотрона средствами автоматики достаточно сложно. Более рациональный подход состоит в комплектовании плазменной установки двумя взаимозаменяемыми плазмотронами с возможностью использования одного из них по мере ухудшения характеристик другого. Важным условием устойчивой работы плазмотрона является стабилизация параметров питающих систем плазмотрона.

В связи с этим схема автоматизации систем питания плазмотрона (рис. 3) содержит датчики, исполнительные механизмы и компьютерную систему управления для стабилизации параметров.

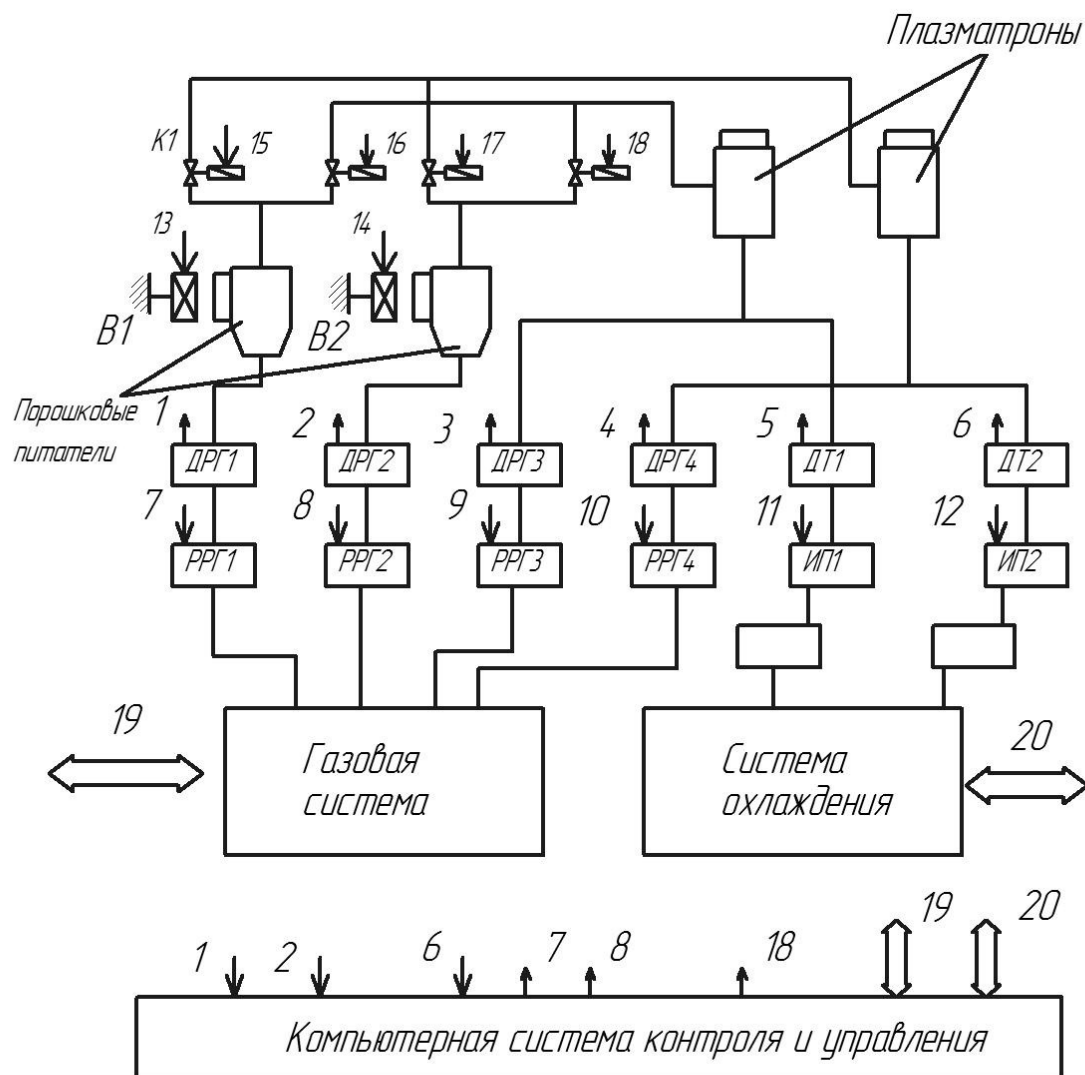


Рис.3. Схема компьютерного управления системами питания плазматрона: К1...К4 – электромагнитные клапаны; В1, В2 – вибропреобразователи; ДРГ1...ДРГ4 – датчики расхода газа; РРГ1...РРГ4 – регуляторы расхода газа; ДТ1, ДТ2 – датчики тока плазматронов; ИП1, ИП2 – источники электропитания плазматронов

Отличительная особенность разработанной автоматизированной системы управления по сравнению с традиционными системами управления установками плазменного напыления покрытий в том, что система выполнена в виде адаптивного регулятора, который содержит набор алгоритмов, позволяющих оптимизировать процесс напыления покрытий при изменениях технологических условий. В основу функционирования адаптивного регулятора заложены следующие положения:

- в процессе разработки технологического процесса формируется множество алгоритмов управления в зависимости от особенностей протекания технологического процесса;

- с помощью блока датчиков происходит автоматическое распознавание особенностей протекания технологического процесса;

- с помощью операторов математической логики среди набора стандартных текущих ситуаций выбирается наиболее близкая текущей;

- произвести выбор алгоритма.

Адаптивный регулятор технически реализован на базе компьютерной системы, которая содержит набор программ, взаимосвязанных в логическую трехуровневую иерархическую сеть управляющих алгоритмов (рис. 4). Перечень управляющих алгоритмов и их функциональное назначение представлены в табл. 2.

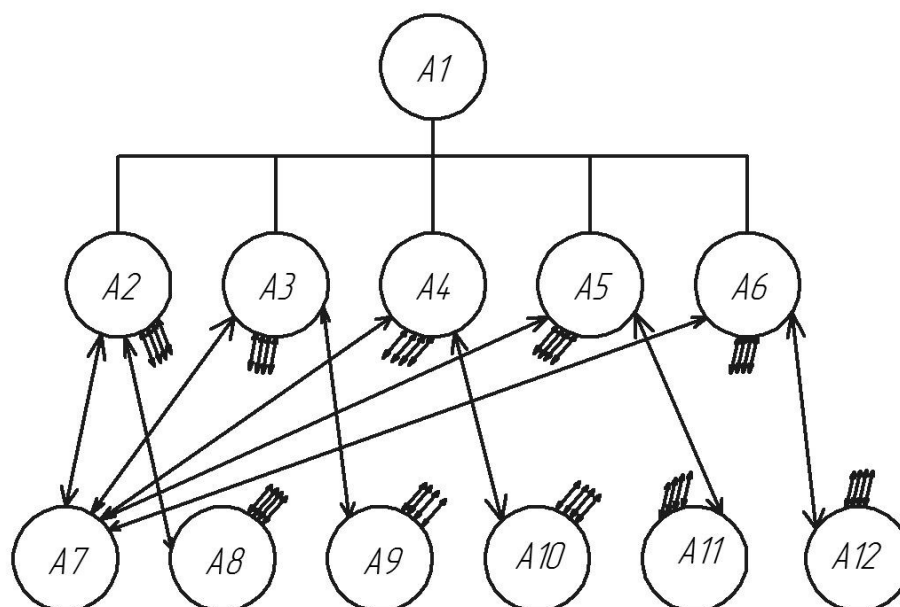


Рис.4. Логическая сеть управляющих алгоритмов

 Таблица 2
 Перечень управляющих алгоритмов
 адаптивного регулятора

Условное обозначение	Функциональное назначение алгоритма
A1	Логическое управление технологическим процессом
A2...A6	Алгоритмы проведения испытаний методом дисперсионного анализа
A7...A8	Алгоритмы управления исполнительными механизмами

Исследования медико-биологических свойств имплантатов представляют собой длительный и непрерывный процесс, который может проходить в течение часов, недель, месяцев и более.

В процессе испытаний необходимо производить сбор данных от измерительных устройств, а также осуществлять обработку этих данных математическими методами. Очевидно, что автоматизация про-

цесса испытаний позволяет существенно облегчить труд людей, участвующих в испытаниях, а также повысить их производительность. Необходимость автоматизации различных процессов, а также стремление работников (особенно молодых людей) выполнять квалифицированную работу.

Для проведения длительных испытаний имплантатов на их биосовместимость предлагается использовать автоматизированный комплекс технических средств.

Автоматизированный комплекс (рис.5) включает карусельную установку для размещения на ней кювет с различными типами лекарственных веществ, электронные весы для взвешивания имплантатов по заданной программе в процессе испытаний, емкость с заменителем живой ткани, манипулятор для автоматизации процесса транспортировки имплантатов на различные испытательные позиции, информационно-измерительный комплекс. Информационно-измерительный комплекс реализован на базе компьютерной системы, которая содержит набор программ взаимосвязанных в логическую трехуровневую иерархическую сеть алгоритмов (рис.6). Перечень алгоритмов и их функциональное назначение представлено в табл. 3.

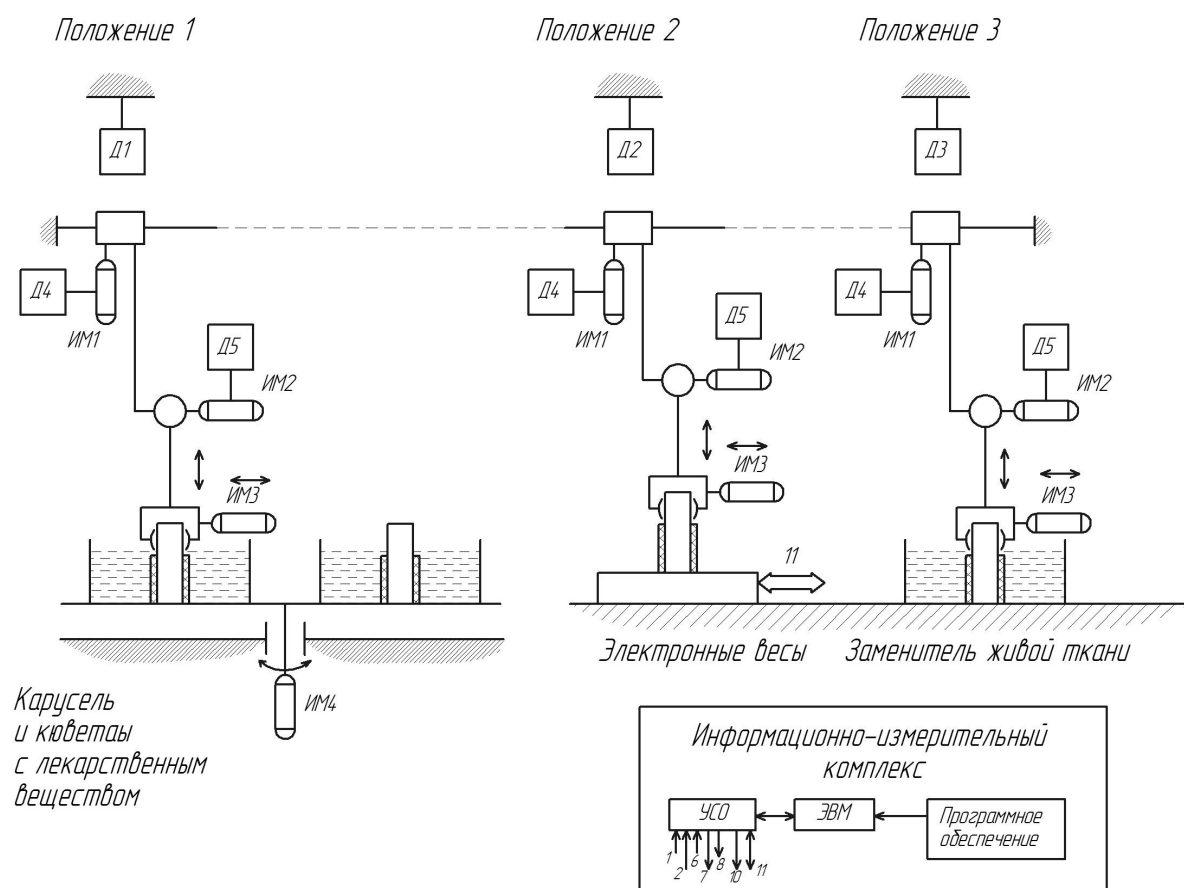


Рис.5. Схема автоматизированного комплекса для испытаний свойств покрытия стоматологического эндопротеза: Д1...Д5 – датчики позиционирования звеньев манипулятора; Д6 – датчик идентификации кювет с лекарственным веществом; ИМ1...ИМ4 – исполнительные механизмы; УСО – устройство сопряжения датчиков и исполнительных механизмов с ЭВМ; 1...10 – сигналы датчиков и исполнительных механизмов; 11 – сигналы управления и контроля электронных весов

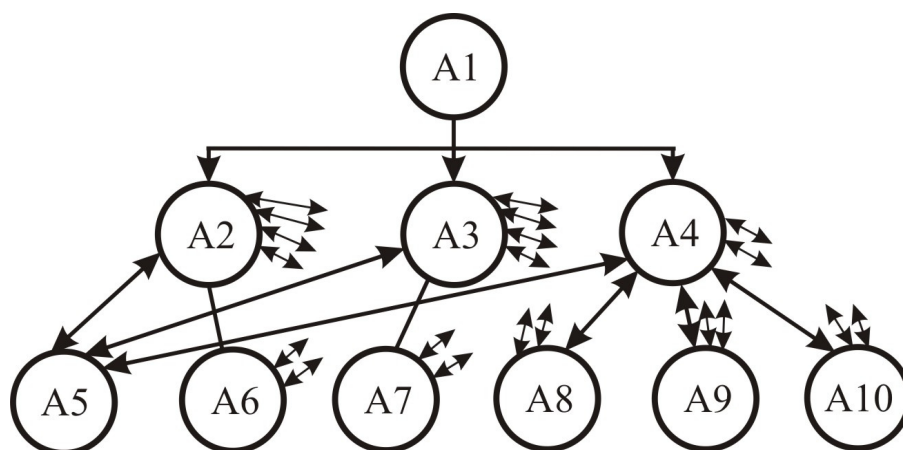


Рис. 6. Логическая сеть управляющих алгоритмов

Назначение алгоритма А1 состоит в логическом управлении последовательностью технологического цикла испытаний. Обобщенная математическая формула алгоритма А1 может быть представлена логическим выражением:

ЕСЛИ < Технологические условия испытаний > ТО < Управляющее воздействие >
 < Технологические условия испытаний >
 задаются в процессе разработки методики испытаний конкретных видов эндопротезов.

Таблица 3
Перечень алгоритмов информационно-управляющего комплекса

Условное обозначение	Функциональное назначение
A1	Логическое управление последовательностью технологического цикла испытаний
A2	Алгоритмы проведения экспериментальных исследований: по методике дисперсионного анализа; по методике корреляционного анализа; по методике планирования эксперимента
A3	
A4	
A5...A10	Алгоритмы управления исполнительными механизмами и считывание показаний датчиков

Алгоритмы A2...A4 реализуют процедуры проведения экспериментальных исследований на основе использования статистических методов анализа экспериментальных данных [3].

Алгоритмы A5...A10 предназначены для управления исполнительными механизмами и считывания показателей датчиков. Управление исполнительными механизмами решается путем описания каждого устройства математической моделью конечного автомата [4].

Использование разработанного комплекса в производстве современных имплантатов, в том числе дентальных, позволит значительно повысить качество изготавливаемых изделий, повысить производительность и условия труда обслуживающего персонала.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Протасова Н.В.** Технологическое объединение качества плазменных покрытий на основе применения комбинированных физико-технических методов активации поверхности / Н.В. Протасова, В.М. Таран, А.В. Лясникова и др. – М.: Спецкнига, 2012 – 350 с.

2. **Таран В.М.** Моделирование наноконструированных покрытий эндопротезов медицинского назначения методом статистических испытаний / В.М. Таран, А.В. Лясникова // Нанотехника, 2010. – №3 (23). – С. 82-85.

3. **Таран В.М.** Проектирование электроплазменных технологий и автоматизированного оборудования / В.М. Таран,

С.М. Лисовский, А.В. Лясникова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 256 с.

4. Системы оцувствления и адаптивные промышленные роботы /В.Б. Брагин, Ю.Г. Войлов, Ю.Д. Жаботинский и др.; под ред. Е.П. Попова, В.В. Ключева. М.: Машиностроение, 1985. – 256 с.

5. **Таран В.М.** Автоматизация измерения прочности сцепления покрытия с основой применительно к изделиям сетчатой структуры / В.М. Таран, А.В. Лясникова, Р.С. Великанов // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2010. - № 3 (48). - С. 90-94.

Таран Владимир Маркович – доктор технических наук, профессор кафедры «Биотехнические и медицинские аппараты и системы» СГТУ имени Гагарина Ю.А.

Vladimir M. Taran – Dr.Sc., Professor at the Department of Biotechnical and Medical Equipment and Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Лясникова Александра Владимировна – доктор технических наук, заведующая кафедрой «Биотехнические и медицинские аппараты и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Лясников Владимир Николаевич – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Физическое материаловедение и технология новых материалов» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Дударева Олеся Александровна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Биотехнические и медицинские аппараты и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Маркелова Ольга Анатольевна – аспирант кафедры «Биотехнические и медицинские аппараты и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Aleksandra V. Lyasnikova – Dr. Sc., Head: Department of Biotechnical and Medical Equipment and Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Vladimir N. Lyasnikov – Dr. Sc., Head: Department of Material Physics, New Materials and Technologies, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Olesya A. Dudareva – PhD, Associate Professor at the Department of Biotechnical and Medical Equipment and Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Olga A. Markelova – Postgraduate at the Department of Biotechnical and Medical Equipment and Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 10.02.14, принята к опубликованию 30.03.14



СОЦИАЛЬНЫЙ АСПЕКТ

УДК 621.365.5

ПОДГОТОВКА НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ КАДРОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО СОЦИУМА

Ю.С. Архангельский, Е.М. Гришина

TRAINING ACADEMIC AND ENGINEERING STAFF MEMBERS FOR ELECTRICAL ENGINEERING COMMUNITY

Yu.S. Arkhangelskiy, E.M. Grishina

Рассматриваются вопросы подготовки инженеров, бакалавров, магистров, кандидатов и докторов технических наук в области электротехники.

Ключевые слова: *электрический социум, подготовка кадров, инженеры, бакалавры, магистры, кандидаты и доктора технических наук*

Под электротехническим социумом понимают среду, в которой осуществляется развитие электротехники, постановка новых социотехнических задач, то есть ученые, инженеры, рабочие, предприниматели, а в широком смысле – все общество в той части, в какой оно обеспечивает развитие и эксплуатацию электротехнических систем и объектов [1]. Воспроизводство электротехнического социума – профессиональная задача преподавателей высшей школы [2].

В начале 1990-х годов в РФ было предложено перейти от системы подготовки инженеров к системе подготовки бакалавров и магистров [3]. Ректорский корпус и общественность не поддержали этот переход, и было решено использовать обе эти системы. В дальнейшем термин «инженер» заменили на термин «специалист», было заключено международное соглашение о переходе высшей школы России на англо-американскую систему подготовки бака-

The article considers the issues of training engineers, bachelors, masters, Candidates of Science and Doctors of Science in Electrical Engineering.

Keywords: *electrical engineering community, training, engineers, bachelor's, masters, and doctoral candidates in technical sciences*

лавров и магистров, и после затянувшейся на годы разработки нового поколения Государственных образовательных стандартов в 2011г. вузы России принимали заявления абитуриентов только на подготовку бакалавров. Однако по некоторым специальностям была оставлена подготовка инженеров со сроком обучения более пяти лет, что, на наш взгляд, означает признание преимуществ инженерного образования для работы в отдельных отраслях хозяйства страны.

В 2013/2014 учебном году, например, в Саратовском государственном техническом университете имени Гагарина Ю.А. продолжается подготовка электриков по специальности 140605(180500) «Электротехнологические установки и системы» и 100400 (140211) «Электроснабжение» (инженерная подготовка), а также подготовка бакалавров по направлению 1400400.062 «Электроэнергетика и электротехника» по профилям «Электротехно-

логические установки и системы» и «Электроснабжение». Сравнительный анализ учебных планов, по которым идет обучение этих студентов, приведен в табл.1.

Время подготовки бакалавра в годах на 20% меньше, чем время подготовки инженера, однако время аудиторных занятий бакалавра меньше только на 10,3% за счет увеличения числа недель в семестре с 17 до 18. Общее время подготовки бакалавра (без учета занятий по курсу «Физическая культура», учебной и прочей практики) даже больше времени подготовки инженера благодаря увеличению времени на самостоятельную работу (СРС) на 20,4%. Однако, на наш взгляд, подготовка бакалавра весьма уступает подготовке инженера:

- во-первых, упомянутые 10,3% - величина немаленькая;

- во-вторых, опросы студентов-электриков показали, что многие из них СРС не уделяют должного внимания (рис.1);

- в-третьих, время учебной и другой практики при подготовке бакалавра меньше, чем при подготовке инженера, на 34,5%, в то время как 72,7% опрошенных студентов-электриков считают, что им не хватает практических навыков;

- в-четвертых, при подготовке бакалавров студенты выполняют на 38,1% (43,8%) меньше курсовых проектов и работ;

- в-пятых, в цикле математических и естественно-научных дисциплин учебных планов подготовки бакалавров существенно меньше часов, чем в учебных планах подготовки инженеров по математике – на 43,4%, химии – на 28%, информатике – на 16%.

- в-шестых, дисциплины специализации «Печи сопротивления», «Дуговые печи и установки специального нагрева», «Индукционные и ВЧ установки», «СВЧ ЭТУ» с объемом аудиторных занятий 289 час с 2 курсовыми проектами и курсовой работой в учебном плане подготовки инженера по специальности «Электротехнологические установки и системы» в учебном плане подготовки бакалавра по одноименному профилю заменены на два курса по выбору с объемом аудиторных занятий 135 часов,

без курсовых проектов и с 2 курсовыми работами, что на 53,3% меньше.

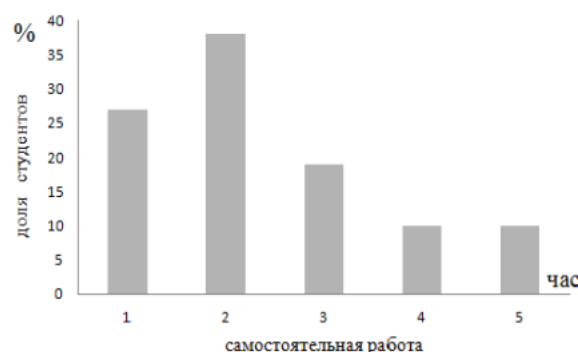


Рис.1. Результаты опроса студентов-электриков о их затратах времени на самостоятельную работу

Разумеется, при естественном замещении опытных инженеров – электриков бакалаврами произойдет существенное снижение уровня профессиональной подготовки ядра электротехнического социума, что весьма опасно, учитывая распространение электротехнических процессов и систем в жизни современного социума.

Вуз может повысить подготовку бакалавров путем:

- существенной переработки учебно-методического обеспечения;

- глубокой модернизации имеющихся и разрабатываемых новых учебных лабораторий;

- мотивации преподавателей на выполнение этой большой дополнительной работы.

Однако радикальным решением проблемы обеспечения уровня профессиональной подготовки бакалавров, соответствующего современным требованиям электротехнического социума, было бы создание широкой сети центров, курсов и тому подобное, автономных или в вузах, в которых бакалавры – электрики по собственной инициативе или по заказам их работодателей на платной основе могли бы получить необходимую им индивидуальную подготовку. Пока что, по-видимому, работодатели в полной мере не оценили появление на рынке труда бакалавров – молодых специалистов нового для нашей страны типа.

Что касается подготовки магистров, то здесь хорошо известна крупная проблема: студенты, обучающиеся в магистратуре, начинают работать на постоянной основе и, ссылаясь на это, систематически пропускают аудиторные занятия, не уделяют должного внимания научной работе, в результате чего страдает качество магистерских диссертаций.

Решение этой проблемы возможно одним из двух способов:

- требование безусловного соблюдения студентами Устава вуза относительно обязательного посещения занятий с принятием административных мер к нарушителям Устава;

- переход в магистратуре на дистанционное обучение.

Нерешительность, затягивание с решением этой проблемы пагубно отразится на электротехническом социуме.

Таблица 1
Сравнительный анализ учебных планов подготовки инженеров и бакалавров

Цикл	Подготовка	Часы							Физическая культура	Учебные и иные практики	Часы ауд. занятий в неделю	Число кур. проектов, работ, расчетно-графических работ
		Всего	Лекции	Коллоквиум	Лаб. работы	Прак. занятия	Ауд. занятия.	СРС				
1	Инж.	1392	255	-	-	408	663	729	408	660	25,8	21(16)
	Бак.	1080	110	16	-	396	522	558				
2	Инж.	2222	561	-	238	323	1122	1100				
	Бак.	1980	349	38	144	387	918	1062				
3	Инж.	3790	1275	-	697	187	2159	1631				
	Бак.	4644	792	135	702	468	2097	2547				
Итого	Инж.	7404	2091	-	935	918	3944	3460	72	432	22	13(9)
	Бак.	7704	1251	189	846	1251	3537	4167	-82,4	-34,5	-11,8	-38,1(-43,8)
А, %		+4,1	-40,2	-	-9,5	+36,3	-10,3	+20,4				

Примечания: 1 – гуманитарные и социально-экономические дисциплины; 2 – математические и естественно-научные дисциплины; 3 – общеобразовательные дисциплины, дисциплины специальности, дисциплины специализации (подготовка инженеров); профессиональные дисциплины (подготовка бакалавров); всего – объем учебных часов без дисциплины «Физическая культура», учебных, производственных и иных практик; СРС – самостоятельная работа студентов;

$A = \left(\frac{\text{число бакалавр. подгот.}}{\text{число инженер. подгот.}} - 100 \right) \%$; в графе «число курсовых проектов, работ, расчетно-графических работ» указано их число в учебных планах специальности и профиля «Электротехнологические установки и системы», а в скобках – специальности и профиля «Электроснабжение».

Наконец, подготовка научных кадров сейчас целиком зависит, во-первых, от идущей реформы аттестации научных кадров и, во-вторых, проводимой в вузах кадровой политики. Ликвидация докторантуры, уменьшение количества диссертаци-

онных советов затруднит и, возможно, сократит количество защит докторских диссертаций. Включение в программу учебы в аспирантуре обязательных аудиторных занятий превращает аспирантуру в третью ступень системы «бакалавр-магистр-

аспирантура». Это удлинит подготовку кандидатской диссертации, может привести к потере у молодежи интереса к аспирантуре и, как результат, к сокращению на кафедрах и в научных институтах количества кандидатов наук.

Это будет означать, что в вузах России станет нельзя оценивать научно-педагогический потенциал кафедр (вузов) по доле преподавателей с учеными степенями. В вузах должна будет установиться иная форма оценки научной квалификации преподавателей.

Можно согласиться с изложенными в [1] сценариями развития электротехнического образования в России. Первый – авторы работы [1] назвали его критическим, предполагает, что через 3-5 лет в связи с массовым уходом профессоров и доцентов старшего возраста начнется падение уровня преподавания (на наш взгляд этот процесс уже начался). Положение спасет не-

медленное и существенное повышение зарплаты. Тогда к преподавательской работе подтянется молодежь и за ближайшие 3-5 лет старшие коллеги смогут передать им свой научный и педагогический опыт. Второй сценарий – катастрофический, когда при сохранении уровня оплаты труда преподавателей через 3-5 лет будет потеряно качественное электротехническое образование.

В этой связи отметим, что, мы уверены, нельзя, как это часто делается, оценивать научно-педагогический уровень кафедры (вуза) по среднему возрасту преподавателей. Он из года в год растет, а стабилизация среднего возраста может быть достигнута только за счет текучки кадров, что значительно хуже высокого среднего возраста, так как при текучке кадров не приходится говорить о научных и педагогических школах, передаче опыта, наследовании традиций.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Андреев А.Л.** Социология техники /А.Л. Андреев, П.А. Бутырин, В.Г. Горохов. – М.: Альфа – М; ИНФРА-М, 2009. – 228с.

2. **Бутырин П.А.** Есть ли будущее у электротехнического образования и науки России / П.А. Бутырин // Энергоэксперт,

2008. - №3. – С.38-41.

3. **Архангельский Ю.С.** Социальные аспекты электротехники/ Ю.С. Архангельский, Е.М. Гришина, Е.В. Колесников // Вестник СГТУ, 2012. - №2(66). – Вып.2. – С.31-34.

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 13.01.14, принята к опубликованию 30.03.14

ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЗАОЧНОГО И ЗАОЧНОГО СОКРАЩЕННОГО ОБУЧЕНИЯ СТУДЕНТОВ СПЕЦИАЛЬНОСТИ «ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И СИСТЕМЫ» И НАПРАВЛЕНИЯ «ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА»

Т.Ю. Дунаева

KEY ISSUES OF PROVIDING CORRESPONDENCE EDUCATION AND CORRESPONDENCE EDUCATION WITH REDUCED PROGRAM TO LEARNERS ENROLLED IN THE PROGRAMMES "ELECTROTECHNOLOGY UNITS AND SYSTEMS" AND "ELECTRICITY AND ELECTRICAL ENGINEERING"

T.Yu. Dunaeva

Показаны основные проблемы, с которыми сталкиваются студенты и преподаватели при реализации заочного и заочного сокращенного обучения по специальности ЭТС и направления ЭЛЭТ

Ключевые слова: заочное обучение, профессиональное образование, проблемы заочного обучения

The article deals with the basic challenges facing the teachers providing correspondence study courses, including correspondence education with reduced program for students enrolled in such programs as "Electrotechnology Units and Systems" and "Electricity and Electrical Engineering".

Key words: correspondence study, vocational education, correspondence education problems

Заочная форма обучения в нашей стране всегда была не менее востребована среди студентов, чем очная. Такая система была и продолжает оставаться важным источником получения высшего образования. В СГТУ имени Гагарина Ю.А. на энергетическом факультете реализуются две формы заочного обучения бакалавров направления «Электроэнергетика и электротехника»: традиционная заочная со сроком обучения 5 лет и заочная сокращенная для студентов, имеющих профильное среднее профессиональное образование, со сроком обучения 3 года 10 месяцев [1]. Кроме того, завершают свое обучение студенты-специалисты заочной и заочной сокращенной формы обучения по специальности «Электротехнологические установки и системы».

Считается, что за последний десяток лет в различных вузах поток желающих

учиться заочно снизился вследствие неблагоприятной демографической ситуации в стране, а также увеличившегося количества бюджетных мест на очном обучении. Однако достаточно высокий конкурс на бюджетные места и большой набор (например, в 2013 году на направление «Электроэнергетика и электротехника» было зачислено больше 60 человек на заочную сокращенную и около 30 человек за заочную форму) показывает высокую востребованность данного направления обучения. Такая популярность обусловлена развитой энергетической отраслью в регионе и высокой конкуренцией на рынке труда.

Заочное обучение предназначено для тех студентов, которые по какой-либо причине не имеют возможности учиться очно. Как правило, это люди, уже имеющие одно образование (начальное или среднее профессиональное, высшее либо

незаконченное высшее), имеющие постоянную работу.

Согласно Государственному образовательному стандарту, общее число учебных часов по учебным дисциплинам специальности или направления одинаково и для очников, и для заочников. Студентам-заочникам, получившим высшее образование, выдаются дипломы единого образца и присваиваются общеустановленные квалификации.

Основной принцип заочного обучения заключается в сочетании очного обучения в период сессии и самостоятельного освоения учебного материала в течение семестра [2]. Усвоение учебного материала характеризуется цикличностью. Сначала (во время установочных лекций) студенты получают базовые знания и изучают учебную литературу, затем (в процессе самостоятельного обучения) они должны освоить учебный материал, приобрести необходимые компетенции, после чего (во время экзаменационной сессии) осуществляется контроль усвоенных знаний. Показателем качества усвоенных знаний и приобретенных компетенций служат в первую очередь выполненные контрольные, лабораторные, практические и курсовые работы. Именно они призваны показать эффективность самостоятельной работы студента. При этом установочные и контрольные занятия заметно разделены по времени (обычно несколько месяцев). Кроме того, заочное обучение в СГТУ имени Гагарина Ю.А. проводится по единому для всех учащихся образовательному плану, в установленные общие сроки сдачи контрольных и курсовых работ.

Для очной и заочной формы обучения учебные материалы, как правило, рекомендуются одни и те же. Кроме того, для заочников разработаны методические указания к самостоятельной работе по учебным дисциплинам, дополнительный материал к учебно-методическим комплексам. Всё более широкое распространение получают информационно-коммуникационные технологии обучения (например, активно

используется информационная образовательная среда) [3].

К достоинствам заочного обучения относятся:

- возможность учиться параллельно с работой, то есть студент, не прерывая своей основной деятельности, может повысить свой профессиональный уровень, приобрести дополнительную профессию, что дает возможность дальнейшего карьерного роста;

- при совмещении работы с учебой студент получает возможность соотносить теорию с практикой, дополняя одно другим;

- одновременный охват большого числа студентов;

- отсутствие «привязки» к месту проживания;

- разный возрастной уровень студентов (от выпускников школы до людей предпенсионного возраста);

- отсутствие ограничений на одновременное обучение в нескольких вузах (студент в праве одновременно осваивать более одной специальности);

- удобное распределение времени на самостоятельное обучение (студент может выбрать время, когда ему удобно заниматься самостоятельно, он не связан вузовским расписанием);

- оплата заочного обучения значительно ниже очного, при этом выпускник-заочник получает такой же диплом о высшем образовании, как и очник;

- удобная форма обучения для тех, кто стремится получить второе и последующие высшие образования.

Однако наряду с преимуществами заочная форма обучения имеет и проблемы, характерные почти для всех вузов, реализующих программы заочного обучения:

- отсутствие контакта между преподавателем и студентом в период между сессиями, что значительно затрудняет получение консультации при решении учебных задач;

- требуется определенный навык самостоятельного освоения знаний, поэтому выпускникам школ и переведенным с оч-

ного обучения студентам, не имеющим подобных навыков, учиться по заочной форме особенно тяжело;

- недостаточное количество лабораторных и практических работ;

- недостаточное количество адаптированной для заочной формы обучения литературы, учебников и учебных пособий (заочникам нужны специфические учебники, способные заменить отсутствующего преподавателя);

- недостаточный контроль результатов обучения со стороны преподавателей, обусловленный в первую очередь недостаточным количеством часов работы с заочниками;

- нет отсрочки от призыва в армию, в результате чего многие студенты, призванные в армию на первом курсе, после возвращения сложнее входят в режим учебного процесса, а часто отчисляются;

- зачастую абитуриенты-заочники имеют низкий уровень школьных знаний по базовым дисциплинам.

В образовательных программах электротехнических направлений и специальностей имеются сложные для изучения естественно-научные, общепрофессиональные и специальные дисциплины, которые требуют солидных базовых знаний, умений и навыков. Например, курс высшей математики достаточно объемный, включает большой набор новых понятий, требует знания элементов общей и элементарной математики. Практика обучения студентов-заочников показывает, что на младших курсах высок процент неуспевающих студентов именно по высшей математике. Одна из причин — низкая готовность студентов к освоению этой дисциплины, основы которой были заложены в школе или техникуме, однако к моменту поступления на первый курс были основательно забыты. Без хорошего усвоения математики студенту сложно освоить такие базовые общепрофессиональные дисциплины, как «Теоретические основы электротехники», «Теория электронагрева», «Электроника». А на дисциплинах этого цикла базируются специальные дисциплины, такие как

«Электротехнологические установки и системы», «Печи сопротивления», «СВЧ электротехнологические установки и системы» и др. В результате качество освоения студентами знаний по специальности или выбранному профилю с трудом дотягивает до удовлетворительного уровня.

Такая же ситуация и на сокращенной заочной форме обучения, предназначенной для выпускников профильных техникумов и колледжей. Ни для кого не секрет, что в колледжи часто идут выпускники школ, которые не в состоянии учиться в 10-11 классах и в дальнейшем поступить на очное отделение вуза. В результате низкий базовый уровень знаний таких студентов приводит к проблеме качества освоения учебных дисциплин в вузе.

Давно говорится о повышении качества образования, однако, как показывает практика, возможность изучать материал самостоятельно в удобное время, совмещая учебу с зарабатыванием денег, зачастую приводит к тому, что у студента-заочника на учебу не остается времени. К сожалению, лишь немногие студенты обладают навыками рациональной организации своего учебного процесса.

Отдельного упоминания заслуживает сложившийся у студентов стереотип «образование платное — значит учиться необязательно, преподаватели обязаны ставить оценки, ведь это оплачено». Такая позиция приводит к тому, что студенты не считают нужным приходить на занятия, пользоваться информационно-образовательной средой, самостоятельно изучать учебный материал, а иногда бывают случаи, когда студенты не знают названия дисциплин, которые они изучают. Контрольные и курсовые работы списывают друг у друга или находят решение в Интернете. Как следствие — большое количество отчислений на первом и втором курсах.

В последнее время активно ведутся разговоры о внедрении дистанционного обучения, показываются преимущества такой организации образования. В Поволжском регионе есть вузы, реализующие такие программы. Однако, как показывает

наш опыт, за такую форму обучения чаще высказываются студенты-заочники, отчисленные за неуспеваемость. Привлекательность этой формы обучения самими студентами объясняют следующим образом: «И ездить в вуз не надо, и диплом выдадут. Главное – платить вовремя». Процесс обучения при этом не упоминается. Поэтому, на наш взгляд, внедрение дистанционного обучения требует тщательной подготовки, разработки принципиально новых методик взаимодействия преподавателей и студентов, учебных материалов, нормативной базы и т.п.

Итак, назрела необходимость поднять заочное обучение на новый качественный уровень, позволяющий готовить высококвалифицированных специалистов, способных работать в новых экономических реалиях нашей страны. Заочная форма обучения будет востребована и в дальнейшем, однако необходимо совершенствование содержания учебного процесса. Необ-

ходимы специальные учебные и учебно-методические материалы для заочников, иная система взаимоотношений между студентами и преподавателями, каждый студент должен иметь возможность задать все интересующие его вопросы и получить на них квалифицированный ответ. Необходимо более плотное взаимодействие предприятий и учебных заведений, что даст возможность формировать группы обучения непосредственно из сотрудников предприятия. Это дает возможность строить изучение учебной программы исходя из потребностей предприятия.

Для повышения качества заочного образования, на наш взгляд, очень важны изменения в общественном сознании. Необходимо, чтобы абитуриенты, поступающие в вуз, подходили к процессу обучения ответственно и осознанно. Необходимо изменить сложившееся в обществе отношение к высшему образованию в целом и к его заочной форме в частности.

ЛИТЕРАТУРА

1. <http://www.sstu.ru/node/655>
2. **Староверова Н.А.** Проблемы заочного обучения в сфере профессионального образования <http://research-journal.org/featured/pedagogy/problemy-zaochnogo-obucheniya-v-sfere-pr/>
3. Информационно-образовательная среда СГТУ. <http://www.sstu.ru/ios>
4. **Дружилов С.А.** «Пилим сук на котором сидим» (Проблемы сегодняшнего заочного и очно-заочного платного высшего профессионального образования). <http://econf.rae.ru/article/6576>
5. **Авдеюк О.А. и др.** К проблеме адаптации в вузе студентов заочной формы обучения. <http://www.vash-psiholog.info/sotsios/20757-k-probleme-adaptacii-v-vuze-studentov-zaochnoj-formy-obucheniya.html>
6. **Ломако А.В.** Проблемы и пути повышения качества подготовки в вузе студентов заочной формы обучения. http://www.sbmt.bsu.by/Data_RUS/ContentBlocks/01116/Lomako.pdf

Дунаева Татьяна Юрьевна - кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Tatiana Yu. Dunaeva - Ph.D., Associate Professor, Department of Automated Electrotechnological Plants and Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 12.03.14, принята к опубликованию 30.03.14

ЛЕТОПИСЬ

СТАНОВЛЕНИЕ АКАДЕМИЧЕСКОЙ НАУКИ В ОБЛАСТИ РАДИОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ В САРАТОВЕ



С именем Юрия Васильевича Гуляева связано становление и развитие в Саратове академической науки. Он один из организаторов и бессменный руководитель Саратовского научного центра РАН с 1981 года. При его активном участии образовались творческие коллективы в Саратовском государственном университете и Саратовском политехническом институте, а также на предприятиях «Алмаз», «Контакт» и ЦНИИИА по исследованиям в области акустоэлектроники, акустооптики и магнитоэлектроники. Юрий Васильевич Гуляев – академик РАН, директор Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, член Президиума РАН. Он дважды лауреат Государственной премии СССР (1974, 1984 гг) и дважды лауреат Государственной премии Российской Федерации (1993, 2006 гг).

В конце семидесятых годов прошедшего столетия Президиум АН СССР принял решение о создании в Саратове нескольких научных организаций АН СССР для проведения фундаментальных исследований в области естественных и общественных наук. Это решение, на мой взгляд, для научного направления радиофизики и электроники основывалось на успехах саратовских ученых, работающих как в вузах, так и в коллективах большого числа отраслевых НИИ и КБ. Ученые Саратовского госуниверситета весьма плодотворно сотрудничали с НИИ и КБ Министерства электронной промышленности, а ученые Саратовского политехнического института еще и с заводами и КБ Министерства авиационной промышленности и Министерства среднего машиностроения СССР.

Впервые я встретился с Юрием Васильевичем Гуляевым в 1979 году, когда он в составе представительной делегации от Президиума Академии наук знакомился с научным потенциалом Саратова. К этому

времени Юрий Васильевич уже в течение десятка лет тесно взаимодействовал с учеными СГУ им. Н.Г. Чернышевского и НИИ «Алмаз», где проводились исследования в области акустоэлектроники. Гостей возглавлял первый вице-президент АН СССР дважды Герой Социалистического Труда директор ИРЭ АН СССР академик В.А. Котельников, а его правой рукой и был молодой доктор наук и молодой член-корреспондент АН СССР Ю.В. Гуляев (Ю.В. Гуляев был избран членом-корреспондентом АН СССР 15 марта 1979 года в возрасте сорока трех лет). Он был заместителем директора ИРЭ АН СССР и имел большой опыт участия в становлении филиала ИРЭ в г. Фрязино. Ознакомив делегацию с вузами и отраслевыми НИИ, саратовские обком КПСС и облисполком провели встречу членов делегации с саратовскими учеными в актовом зале Дома политпросвещения. Мне запомнилось выступление вице-президента АН СССР академика Ю.А. Овчинникова. Выступая

очень эмоционально, как бы оправдывая свою необыкновенную внешнюю схожесть с Владимиром Маяковским, Юрий Анатольевич, указывая в направлении рядом стоящего здания, на котором метровыми буквами сияло приветствие «Слава советской науке!», говорил:

– Нет советской науки, нет саратовской науки, есть мировая наука, на результаты которой и следует ориентироваться!

Я внутренне соглашался с таким широким подходом к оценке научных результатов, испытывая легкую обиду за критику лозунга, которым гордился как итогом огромных усилий страны по обеспечению научных исследований высокого уровня.

Юрий Васильевич Гуляев, будучи человеком необычайно общительным и доброжелательным, на мой вопрос, знаком ли он лично с тем или иным ученым, активно работающим в области радиоэлектроники, часто отвечал:

– Да, это мой друг и коллега.

У Юрия Васильевича и в Саратове сложились доверительные, откровенные отношения со многими ответственными работниками обкома и облисполкома. Во время неформальных встреч Юрий Васильевич подчеркивал, что в период выбора карьеры колебался между стезей ученого и политика, и при обсуждении трудностей экономики развитого социализма сетовал, что теория коммунизма нуждается в принципиальных уточнениях. Он называл это «нелинейной теорией коммунизма» и выражал готовность принять участие в работе в этом направлении.

В конце 1979 года АН СССР приняла решение о создании в Саратове первых научных учреждений Академии наук: Института социально-экономических проблем развития агропромышленного комплекса (ИСЭПАПК) и Института биологии и физиологии растений и микроорганизмов (ИБФРМ), а также филиала ИРЭ и отдела СКБ ИРЭ, ставших в дальнейшем основой Саратовского научного центра АН СССР, главой которого был назначен Ю.В. Гуляев.

Помимо руководства СНЦ Юрий Ва-

сильевич добровольно возложил на себя обязанности научного руководителя филиала и активно приступил к формированию тематики исследований, структуры филиала и подбору ученых, которые могли бы возглавить будущие лаборатории. Мне было предложено занять должность руководителя филиала и, используя довольно обширные связи с выпускниками Саратовского политехнического института и Саратовского государственного университета, занимавшими руководящие посты в промышленности и органах управления города и области, обеспечить быстрое становление филиала.

Сам же Юрий Васильевич буквально на следующий год после начала деятельности филиала привлек потенциал ИРЭ для решения хозяйственных задач Саратовской области. Одной из главных проблем повышения эффективности сельского хозяйства Саратовского Заволжья была мелиорация (под орошение было отведено около 500 тысяч га плодородных земель). ИРЭ и его СКБ выделили для Саратова разработанный ими радиометр для дистанционного измерения влажности почвы, который был установлен на самолет АН-2 Саратовского авиаотряда и успешно несколько лет использовался для оперативного создания карт состояния орошаемых земель Саратовской области, что было в то время очень актуально.

Несмотря на то, что штаты лабораторий филиала были укомплектованы, научная тематика утверждена, проводить полнокровные исследования процессов в полупроводниковых, пьезоэлектрических и магнитоактивных средах было невозможно, так как помещения, которые занимал филиал на правах аренды у организации «Саратовнефтегаз», были абсолютно не приспособлены для соответствующих технологий, и ни областное руководство, ни Академия наук радикально изменить ситуацию не могли.

Надежды на дальнейшее развитие филиала все возлагали теперь уже на молодого академика Ю.В. Гуляева (избран академиком 26 декабря 1984 года). Юрий Ва-

Сильевич надежды полностью оправдал. Филиал был включен в Государственную программу по развитию элементной базы вычислительной техники, и в соответствии с программой при активной и помощи руководства Саратовской области в 1993 году был сдан в эксплуатацию инженерно-лабораторный корпус филиала, спроектированный для размещения сложных устройств и установок, реализующих технологические процессы для получения объектов микро- и нанoeлектроники для изучения их фундаментальных свойств.

Развившийся системный кризис 90-х годов, приведший к резкому ухудшению положения науки, отбросивший наукоемкие отрасли на позиции аутсайдеров, не позволил использовать комплекс по прямому назначению. Но имеющаяся недвижимость позволила просуществовать в лихое время на «доходы от имущества», сдавая в аренду временно не используемые площади, и тем самым сохранить научный коллектив и технологический потенциал.

В настоящее время академик Ю.В. Гуляев, много лет являясь членом Президиума РАН, продолжает активно стимулировать дальнейшее развитие научных исследований мирового уровня в области нанoeлектроники и нанотехнологий в Саратове.

8 февраля 2012 года в День российской науки в Саратовском национальном исследовательском университете им. Н.Г. Чернышевского открылась лаборатория «Метаматериалы». Ее появление в университете стало возможным благодаря выигранному конкурсу мегагрантов Прави-

тельства Российской Федерации для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых страны (руководитель мегагранта по направлению «Радиоэлектроника» - ученик Ю.В. Гуляева член-корреспондент РАН С.А. Никитов). На средства гранта в лабораторию закупаются новейшие установки, некоторые из них являются уникальными и выпущены в единичных экземплярах. Новые метаматериалы, то есть среды с новыми необычными свойствами, аналогов которых зачастую в природе нет, могут быть применены во многих сферах жизни, например, позволят создавать суперсовременные системы медицинской диагностики или интегральные микросхемы высокой функциональной сложности.

Символично, что новая лаборатория расположена на месте научно-исследовательского института механики и физики СГУ, успешно работавшего в советское время (в недрах НИИ МФ СГУ более полувека назад я выполнил и защитил дипломную работу). Выступавшие на церемонии открытия лаборатории академик Ю.В. Гуляев, ректор СГУ профессор Л.Ю. Коссович и министр промышленности и энергетики Саратовской области С.М. Лисовский выразили уверенность в том, что лаборатория «Метаматериалы» – значимая структура, достойная своего великого предшественника, будет способствовать интеграции систем производства, науки и образования.

Руководитель Саратовского филиала ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН в 1980-2005 гг.,
кандидат технических наук

Г.Т. Казаков

«ФИЗИКИ» И «ЛИРИКИ» МНОГО ЛЕТ СПУСТЯ

Беседа с А.А. Понукалиным



А.А. Понукалин – профессор кафедры «Психология» СГТУ имени Гагарина Ю.А., доктор социологических наук, кандидат психологических наук, профессор психологии и акнологии, Почетный работник высшего профессионального образования РФ. Закончил физический факультет СГУ имени Н.Г. Чернышевского по специальности «Радиофизика» и аспирантуру Института психологии АН СССР по специальности «Психология труда, инженерная психология». Член научного совета при президиуме РАН РФ по комплексным проблемам евразийской экономической интеграции, модернизации, конкурентоспособности.

«В.Э.»

Алексей Алексеевич!... «Физики» и «лирики»... Помните?... Пятидесятые – шестидесятые годы. Знаменитое противопоставление «физиков» и «лириков»... Строчка поэта Слуцкого: «Что-то физики в почете, что-то лирики в загоне».

А.А.П. Давно это было. Тогда «лирики» должны были быть идеологами и формировать общественное сознание в рамках постулатов материалистической философии строителей коммунизма. В те времена «лириками» становились представители так называемой творческой интеллигенции. Они, как правило, стремились выйти за границы «дозволенного» в силу психологических особенностей своей личности, что осуждалось, тогда как корректные, среди которых были и истинные таланты, имели большие привилегии. «Физики» же – материалисты по своей личностной природе и на них строилось материальное благополучие страны.

«В.Э.» Вы физик, а стали «лириком». Как это случилось?

А.А.П. Деление людей на «физиков» и «лириков» никак не связано с их специальностью. Причина – особенность мышления. Я не перешел из «физиков» в «лирики». Просто я всегда был предрасполо-

жен заниматься как точными, так и гуманитарными науками. С детства увлекался радиолубительством, что определило выбор специальности. Однако удалось поступить на физфак СГУ благодаря подготовленности по русскому языку и литературе в первую очередь, затем и по математике.

«В.Э.» Я знаю еще «физиков», ставших «лириками». Но не могу назвать ни одного «лирика», ставшего «физиком».

А.А.П. «Лирику» стать «физиком» не возможно, потому что обучение «физика» формирует у него особенное мышление, задатки которого должны быть врожденными. Если человек «лирик», у него этих задатков нет. К тому же «лирик», как правило, благополучен в своей сфере, занимается естественными или техническими науками в порядке самообразования «лирик» не будет.

А вот «физиков», ставших «лириками», немало. Например, есть у меня в Москве друг – Е.А. Наумов, профессор, академик РАЕН. Он получил техническое образование, защитил диссертацию по математическим проблемам технических наук, стал известным экономистом, баснописцем, наследником И.А. Крылова. Он является членом Союза писателей, Союза художников, прекрасно поёт, играет на духовом

инструменте дудук, занимаясь на самом высоком уровне научной организацией инновационных процессов на Евразийском пространстве.

«В.Э.» Как Вам работается среди «лириков»? В повседневной рабочей обстановке они чем-то отличаются от «физиков»?

А.А.П. Среди них я чувствую себя комфортно, впрочем так же, как и среди «физиков», поскольку хорошо понимаю и тех, и других. В повседневной обстановке все «лирики» - профессионалы, следовательно, обладают схожими личностными качествами.

«В.Э.» Было время, когда «физики» доминировали в социуме. Молодые люди хотели стать «физиками». Сейчас картина иная.

А.А.П. В те годы в нашей стране шло восстановление промышленности после Великой отечественной войны. Шла «холодная война» с Западом, и потому большое внимание уделялось развитию оборонных отраслей промышленности. Работа в промышленности была престижной, она позволяла добиться личного благополучия. Родители понимали это и подсказывали детям, что тем надо стать «физиками». Значительную роль играла и пропаганда в сфере художественного творчества (например, фильм «Девять дней одного года», в котором физики предстали как высокоинтеллектуальные личности, превосходящие не «физиков»).

В начале 90-х годов в нашей стране произошли принципиальные изменения. Неимоверно возросла роль денег. Примерами для молодых людей стали те, кто быстро разбогател. Большинство из них были «лириками». Молодежи хотелось повторить их успех. Зачем тратить время на изучение сложных естественных и технических наук? В конце 90-х в одном из лицеев Саратова я изучал настроение молодежи. Кем хотели стать молодые люди? Экономистами, юристами, психологами, иногда – программистами, причём независимо от предрасположенности к базовым типам

профессий, что сплошь и рядом происходит и сегодня.

«В.Э.» Сейчас промышленности нужны «физики». Об этом говорят, пишут, но молодежь по-прежнему хочет стать «лириками».

А.А.П. Сказывается инерция общественного сознания. Да и физику изучать сложнее. На изменение ситуации требуется время. Тем не менее, тенденция обусловлена и другой причиной. Сказывается влияние массового бессознательного: люди начинают чувствовать, что дальнейший технический прогресс, увеличивающий ускорение материального потребления и производства, лишает человека перспективы в силу надвигающегося коллапса. В массовом сознании возникает, пока ещё не очень явно, вопрос – что же такое человек как явление природы и в чём его смысл?

«В.Э.» В начале 90-х политехнические институты получили статус технических университетов. Таким образом, были созданы условия для решения сразу трех задач. Во-первых, в условиях рынка образовательных услуг бывшие политехнические институты стали готовить специалистов в области гуманитарных и социально-экономических наук, а это отвечало возросшему желанию молодежи стать «лириками». Во-вторых, это повысило качество гуманитарного компонента образования «физиков». В-третьих, коммерциализация высшего образования дала вузам возможность увеличить доход за счет платной составляющей обучения «лириков». Но прошли годы, и сейчас в технических университетах кластеры гуманитарных и технических направлений практически сравнялись. Не пора ли отказаться от слова «технический» в названиях вузов?

А.А.П. Но тогда в одном городе окажется два университета. Между ними начнется конкуренция, которая может перейти в борьбу за своё существование.

«В.Э.» Она уже идет. В технических и классических университетах сейчас много одинаковых направлений.

А.А.П. По моему представлению классические университеты должны готовить

научные кадры. Другие университеты должны быть профильными, но – университетами, поскольку сегодня актуально формирование личности специалиста, что возможно на базе гуманитарных дисциплин. Поэтому название «технический университет» должно остаться. Если в городе два вуза будут именоваться университетами, неминуемо они сольются под эгидой более успешного. Преподаватели поглощенного вуза, скорее всего, отнесутся к такому слиянию негативно, и это скажется на подготовке кадров.

«В.Э.» Сейчас мы видим укрепление позиции церкви. Церковь обозначила свой интерес к образовательному процессу в школах и вузах. Как вы считаете, можно ли говорить о процессе слиянии церкви и государства? Как вы относитесь к строительству церковных храмов на территории вузов?

А.А.П. Во всякой благополучной стране роль консолидирующего народ фактора выполняет идеология, образующая смысл жизни и её перспективу. Идеология советского времени позволяла нивелировать деструктивное влияние националистической консолидации многочисленных народов Союза. В 90-е годы, утвердилась идеология денег. Церковь сейчас выполняет социально-духовную функцию носителя идеологии, позволяющей в определённой мере поддерживать устойчивость российского общества. Государство в целях самосохранения заинтересовано в этом, однако слияния быть не может, поскольку для большинства людей ценности светского общества являются основополагающими в силу особенностей общества производства-потребления.

«В.Э.» Спасибо, Алексей Алексеевич, за беседу.



ДИНАСТИЯ ГРЯЗЕВЫХ – ГРИШИНЫХ



Сергей Гришин – ученик 4 класса МОУ СОШ № 77 г. Саратова, правнук доктора химических наук, профессора Н.Н. Грязева (1921-1975гг.), проректора по научной работе (1960-1965гг), заведующего кафедрой «Химия» (1965-1973гг.) Саратовского политехнического института, внук руководителя отделения технического обеспечения аудиторного фонда Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. М.Н. Грязева, внук В.Г. Гришиной, работавшей доцентом на кафедре «Организация перевозок на транспорте» автомеханического факультета Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Родители Сергея Н.В. Гришин и Е.М. Гришина окончили Саратовский государственный технический университет. Екатерина Михайловна – кандидат технических наук, доцент

кафедры «Автоматизированные электротехно-логические установки и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

С. Гришин со второго класса активно участвует в школьных, районных и городских научно-исследовательских конференциях. В третьем и в четвертом классах его доклады завоевали первые места. Так, на школьной научно-практической конференции 2013/2014 учебного года «Первые ступени» в секции «Окружающий мир» (3-4 классы) Сергей Гришин выступил с обстоятельным докладом «Изучение состава красок и приготовление их в домашних условиях».

В школе на уроках изобразительного искусства мы рисуем разными красками: акварелью, гуашью. Эти краски можно купить в любом магазине канцелярских товаров. Современные художники так и поступают. Но где же художники брали краски давным-давно, когда не было магазинов и их не изготавливали на заводах? Мне стало интересно, из чего раньше изготавливали краски. Смогу ли я сам изготовить краски?

В настоящее время краски делают из химических элементов. Можно ли изготовить экологически чистые краски?

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ:

Краски;

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ:

Узнать, как появились краски, из каких веществ состоят краски и можно ли в домашних условиях изготовить краски.

ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ:

- ознакомиться с научно-популярной, учебной литературой по теме исследования;
- изучить, из каких веществ состоят краски, рецептуры их приготовления;

- провести эксперимент: изготовить краски самостоятельно в домашних условиях;
- сравнить качества красок, приготовленных в домашних условиях и купленных в магазине;
- нарисовать рисунок из полученных красок.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ:

- метод зрительного восприятия информации (работа с познавательной литературой, с компьютером, наблюдение);
- метод передачи информации с помощью практической деятельности;
- метод эксперимента.

ГИПОТЕЗА:

Я предполагаю, что краски можно изготовить самостоятельно в домашних условиях, но они будут отличаться от магазинных.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ:

Работа может быть использована на уроках изобразительного искусства, внеклассной работе, для написания рефератов и в качестве дополнительного материала для "любопытных".

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1.1. ИСТОРИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ КРАСОК

История красок началась, наверное, вместе с появлением человека. Са-мым древним художником, создавшим рисунки и картины, был пещерный житель.



Пещерные художники рисовали на стенах яркими, сочными красками.

Где же они их взяли?

Самой первой краской была глина. Глина бывает разная - желтая, красная, зеленоватая, белая



Красителями, которыми пользовались пещерные художники, были химические вещества, залегающие в земле (окись железа всех оттенков — от светло-желтого до ярко-оранжевого), и марганец (металлический элемент). Эти вещества измельчались в мелкую пудру и смешивались с жиром (возможно, с животным салом).

Так появились первые краски. Ими и

рисовал древний человек диких животных, которых он видел вокруг себя.

Цветные изображения животных, датированные примерно 30 000—10 000 лет назад до н.э., были обнаружены на стенах пещер Южной Франции и Испании. Многие из этих рисунков удивительно хорошо сохранились, потому что в эти пещеры не было доступа в течение многих веков.

Самые великолепные рисунки находятся в Пещере Ласкау во Франции.

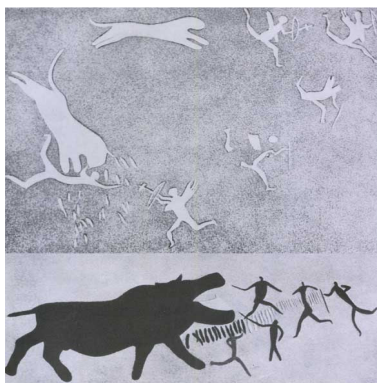
Немного позже была «открыта» новая краска — охра, которая часто встречалась в природе в виде глины или рассыпающихся в пыль комочков. Она была разного цвета: желтая, коричневая, красноватая.

Для придания рисункам более ярких цветов использовали наши далекие предки и красную киноварь, и оранжевый сурик.

Угольки, копоть и сажа давали краску черного цвета.

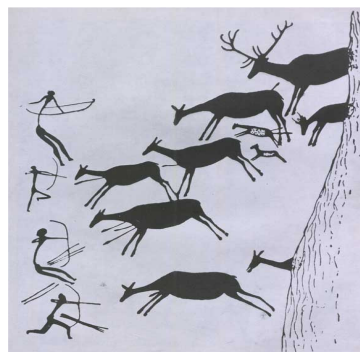
Шли тысячелетия. Человеку понадобились другие краски, более стойкие и яркие. Такие, которыми можно было бы разрисовывать щиты, выделанные кожи, раскрашивать головные уборы и оружие, а затем и первые ткани.

Желтую краску научились вырабатывать из коры барбариса, ольхи, молочая и шелковицы.



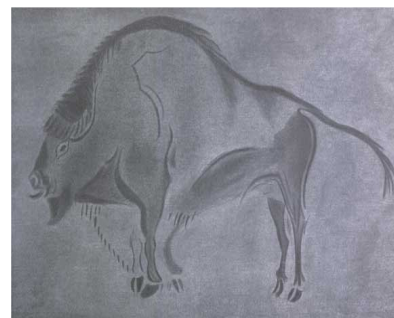
Сцены охоты

Наскальные росписи бушменов
(Южная Африка).
15—14 вв. до н. э.



Охота на оленей

Живопись в пещере
Испании. Мезолит



Бизон

Живописное изображение в
Альтамирской пещере
(Испания). Эпоха Мадлен

Коричневую - из отвара луковой шелухи, оболочки грецких орехов, коры дуба, листьев хны.

Для получения красного цвета пригодились некоторые ягоды.

Словом, у каждой из красок, которыми сегодня пользуются и взрослые, и дети, есть своя длинная и удивительная история.

Так, если хорошие краски добывались с большим трудом и стоили очень дорого,

то почему же сейчас красок сколько угодно и стоят они совсем дешево?

Химия. Теперь краски получают из каменноугольной смолы и других веществ. Оказалось, что в черном каменном угле можно разыскать все цветовое богатство матушки-природы. От старинных красок сегодня сохранились лишь звучные названия да удивительные истории.

1.2 СОСТАВ КРАСОК

Краска - материал, служащий для придания цвета.

Краски состоят из пигмента и связующего вещества.

Пигмент — это сухой краситель. Мир вокруг нас разноцветен.

Древние художники отыскивали материал для красок прямо под ногами. Красящие вещества (пигменты) на протяжении веков использовались практически одни и те же. Из красной и желтой глины, тонко ее растерев, можно получить красный и желтый краситель или, как говорят художники, пигмент. Пигмент черный даёт уголь, белый - мел, лазорево - голубой или зелёный дают малахит и ла-

зурит. Зелёный пигмент дают и окиси металлов.

Сухой краситель не может держаться на холсте, поэтому нужно связующее вещество, которое склеивает, связывает частички сухого красителя в единую цветную массу — краску. Художники брали то, что было под рукой: масло, мед, яйцо, клей, воск. Чем ближе друг к другу частички пигмента, тем гуще краска. Густоту краски можно определить, если взглянуть, как растекается капля меда, яйца, долго-сохнущая капля масла, которая даже не соединяется с водой, а при высыхании оставляет жирный след.



Название красок	Масло	Яйцо	Вода	Клей
Акварель			+	+
Гуашь			+	+
Масляная	+			+
Темпера		+		

Разные связующие вещества дают разные краски с разными названиями.

Клей входит в состав акварели и гуаши. Акварель – легкая, полупрозрачная краска,

которая требует разбавления водой. Само название говорит об этом.

Масло входит в состав масляных красок, они самые прочные и ложатся на бумагу жирными мазками. Хранятся они в тюбиках и разбавляются растворителем – керосином или скипидаром.

Одна из древних живописных техник – темпера. Это краски, замешанные на яйце, иногда их называют «яичные краски». Более двух тысяч лет назад темперу получали, смешивая пигмент с яичным желтком, а пятьсот-восемьсот лет тому назад – с яичным белком, к которому одновременно добавляли фиговый сок, мед или другие неизвестные нам вещества.

Таким образом, я выяснил, что краски состоят из пигмента и связующего вещества. Пигмент – это сухой краситель, в качестве которого можно использовать уголь, глину, землю, малахит, лазурит, мел. В качестве связующего вещества можно использовать воду, клей, масло, яйцо, мед.

1.3 ПРОЦЕСС ПРИГОТОВЛЕНИЯ КРАСОК

В настоящее время почти все краски делают в лабораториях и на заводах из химических веществ. Поэтому некоторые краски даже ядовиты, например, красная киноварь из ртути. Фиолетовые краски могут делать из персиковых косточек или из виноградных шкурок. Поэтому я решил попробовать сделать экологически чистые краски в домашних условиях.

Проанализировав литературу и статьи в Интернете, можно описать, как готовятся краски. Сначала ищут сырье. Это может быть уголь, мел, глина, зерна кофе, луковая шелуха. Сырье нужно очистить от посторонних примесей. Затем материалы необходимо измельчить до порошка.

Из луковой шелухи можно приготовить отвар.

Сырье можно измельчить в домашних условиях. Старинные художники растирали порошок в ступке пестиком. Полученный порошок и есть пигмент.

Затем пигмент нужно смешать со связующим веществом. В качестве связующего вещества можно использовать яйцо, масло, воду, клей, мёд. Краску нужно хорошо промешать, чтобы не было комочков. Получившуюся краску можно использовать для рисования.

Выяснив состав красок, узнав о процессе приготовления красок, я понял, что смогу сделать некоторые краски сам.

2. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

2.1 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для проведения экспериментов мне надо было раздобыть природные пигменты и связующие вещества. В моем распоряжении оказались мел, уголь, вода, подсолнечное масло, мука, соль и пищевые красители.

Я составил план трех экспериментов.

ПЛАН ЭКСПЕРИМЕНТА 1

1. Измельчить уголь в порошок.
2. Просеять порошок.
3. Смешать уголь с водой.

ПЛАН ЭКСПЕРИМЕНТА 2

1. Измельчить мел в порошок.
2. Просеять порошок.
3. Смешать мел с водой или яйцом

ПЛАН ЭКСПЕРИМЕНТА 3

С помощью миксера смешать следующие ингредиенты:

- 500 грамм муки;
- 6 столовых ложек поваренной соли;
- 2 столовые ложки подсолнечного масла.

В качестве красящего пигмента добавить пищевые красители.

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ МОИХ ДЕЙСТВИЙ



В итоге я получил



2.2 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Теперь я знаю, из чего состоят краски. Приготовить некоторые краски можно в домашних условиях. Полученные мною краски отличались друг от друга по консистенции и качествам.

1. Уголь с водой дал краску черного оттенка, она легко набиралась на кисточку и оставляла на бумаге черный след, быстро высыхала.

2. Мел с водой дал краску белого цвета, которая легко набиралась на кисточку, быстро высыхала.

3. Мел с яйцом дал краску желто-белого цвета, которая легко набиралась на

кисточку, но долго высыхала.

Полученные краски имеют **преимущества и недостатки**:

Краски из мела и угля - экологически чистые, бесплатные, имеют естественные цвета, но трудоемкие, нет ярких цветов, неудобны в хранении и недолговечные.

Краски, полученные из муки, соли, подсолнечного масла и пищевых красителей - экологически чистые, имеют естественные цвета, яркие, но трудоемкие, не удобны в хранении и недолговечны.

Кроме этого, я нарисовал красками собственного приготовления рисунки.



ВЫВОДЫ:

1. История красок началась вместе с появлением человека.

2. Краски для рисования состоят из пигмента и связующего вещества.

3. Изначально в качестве пигмента использовали глину, уголь, мел.

4. В качестве связующего вещества использовали яйца, масло, воду, воск.

5. Сейчас краски изготавливают в лабораториях и на заводах из химических элементов.

6. В ходе экспериментов мне удалось получить краски разных цветов и оттенков и нарисовать рисунки.

Одной из задач начального образования в средних образовательных школах является развитие творческих способностей школьников. Для этой цели, в частности, начиная с первого класса в школе № 77 г. Саратова ежегодно проводятся научные

конференции, на которых школьники выступают с докладами с использованием современной информационной техники. По итогам таких конференций комиссия из учителей школы определяет победителей, все участники конференции получают сер-

тифиаты, а занявшие 1,2,3 места – дипломы. Школьник, занявший 1 место, участвует в районной научной конференции, победитель которой далее выступает со своим докладом на городской научной конференции.

Опыт проведения подобной внеклассной работы показал, что школьники с большим интересом подготавливают доклады и охотно участвуют в научных конференциях. Мы считаем эту форму вне-

классной работы начальным вкладом в подготовку детей к выбору в дальнейшем своего жизненного пути. Первый опыт публичных выступлений в дальнейшем полезен каждому и пригодится, например, при поступлении и дальнейшей учебе в вузе.

Педагогический состав школы №77 намерен продолжать и развивать опыт и практику ранней ориентации учащихся на активную, творческую деятельность.

Преподаватель начальных классов МОУ СОШ № 77 г. Саратова

Л.А. Махова

Школа № 77 г. Саратова основана в 1966 году, имеет давние и глубокие традиции, которыми всегда славилось российское образование.

Особенностью школы является гуманистический и дифференцированный подход к различным категориям обучающихся, что дает им равные шансы для развития своих индивидуальных способностей и творчества.

Наряду с общеобразовательными классами в школе существуют классы физико-математического, социально-экономического, химико-биологического, историко-правового, оборонно-спортивного профилей.

В школе имеются также:

- три группы продленного дня для учащихся начальной школы, одна из которых специализируется на изучении теории и практики парусного спорта.
- досуг школьников организуют руководители спортивных секций: волейбола, баскетбола, туризма и скалолазания, каратэ, мини-футбола, кружков: вокального, хорового, спортивных балльных танцев, художественного, декоративно-прикладного и др..
- школа сотрудничает с Детско-юношеским центром Фрунзенского района, с детской библиотекой № 30 и библиотекой № 25, областным детским экологическим центром.

Накоплен опыт работы по профилактике асоциальных явлений.

Школа является инициатором и организатором, базой для проведения общественно-значимых мероприятий:

- муниципальные научно-практические конференции «Первые ступени»
- городские соревнования по турмногоборью, всероссийский проект «Мини-футбол в школу», районные соревнования по пожарно-прикладным видам спорта, «Зарница»,
- традиционные мероприятия для жителей микрорайона «Праздник улицы Шелковичной», встречи с ветеранами педагогического труда.

ЕВГЕНИЙ ЮРЬЕВИЧ АЛЬТШУЛЕР



Евгений Юрьевич Альтшулер родился в 1955 году в Саратове. Окончил с отличием факультет электронной техники и приборостроения Саратовского политехнического института в 1978 г. и физический факультет Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского в 1980 г. Работал в НИИ «Волна» НПО «Алмаз» Саратова с 1978 по 1992г. Научные труды в области электровакуумных и полупроводниковых СВЧ приборов, математического моделирования в задачах радиофизики и электроники. В 1991 году защитил кандидатскую диссертацию по специальности «Радиофизика». В 2010 году успешно защитил докторскую диссертацию. Доктор физико-математических наук.

Длительное время работал доцентом, затем профессором на кафедре «Общая физика» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

С приходом на постоянную работу в СГТУ имени Гагарина Ю.А. профессор Альтшулер Е.Ю. активно подключился к участию в инновационно-производственной деятельности университета. С апреля 2011 года по август 2013 года он возглавлял отдел сопровождения инновационной деятельности управления инновационными процессами СГТУ имени Гагарина Ю.А.

Евгений Юрьевич вел большую работу с ведущими производственными предприятиями г. Саратова и других регионов, а также с учредителями РАН. Лично знал многих руководителей предприятий и научных учреждений и пользовался у них заслуженным авторитетом. Это способствовало развитию прочных и взаимовыгодных связей технического университета с данными предприятиями и учреждениями. Принимал активное участие в подготовке

и подписании договоров о сотрудничестве между университетом и предприятиями.

С целью активизации инновационной деятельности Е.Ю. Альтшулер вел хозяйственные работы в области электроники и СВЧ техники в ОНТП «Волга-техника» СГТУ имени Гагарина Ю.А. Стремясь к практической реализации научных разработок, без отрыва от научно-педагогической и административной деятельности, стал директором Инженерингового Центра (ИЦ) «Дельта» технопарка.

Под его руководством и при его личном участии в ИЦ «Дельта» выполнялись, следующие инновационные проекты:

- с ОАО НПП «Алмаз» «Контроль параметров МПФС современных СВЧ приборов, анализ причин несимметричности распределения магнитной индукции кольцевых магнитов и их высокой неоднородности по магнитным параметрам и опреде-

ление путей снижения указанных дефектов до приемлемого уровня».

- с ОАО НПП «Ника-СВЧ» – «Моделирование широкополосных линий задержки сантиметрового диапазона»

- с ОАО «Тантал» – «Компьютерное моделирование и научное сопровождение разработки приборов СВЧ на среднем уровне мощности».

Как организатор продвижения на рынок и в производство инновационных достижений университета Евгений Юрьевич

принимал участие в различных выставках, форумах, салонах по инновациям, в работе круглых столов. Активно содействовал расширению связей СГТУ имени Гагарина Ю.А. с ТПП Саратовской области.

За годы совместной работы с Евгением Юрьевичем в управлении инновационными процессами мы неоднократно убеждались в его высоких человеческих качествах, отзывчивости, научной эрудиции и деловом подходе к выполняемым проектам и поручениям.

Руководитель ОНПП «Волга-Техника» СГТУ имени Гагарина Ю.А.,
кандидат технических наук, доцент А.А. Коваль

доктор технических наук, профессор В.С. Попов

Евгений Юрьевич Альтшулер начал свою научную деятельность в теоретическом отделе НИИ «Волна», занимаясь теорией вакуумных приборов, в частности, ЛБВ. Это помогло ему в дальнейшем наладить связь университетской науки с предприятиями электронной отрасли Саратова. В конце 80-х годов под руководством профессора Льва Израилевича Каца он занялся теорией полупроводниковых приборов, занимаясь такими сложными ее вопросами, как полупроводниковая плазма в сильном электромагнитном поле. Кандидатскую диссертацию Евгений Юрьевич защитил 16 октября 1991г. в СГУ. Его докторская диссертация была посвящена анализу взаимодействия полупроводниковых структур в волноводах при сильных электромагнитных полях. В ней получен ряд интересных и важных результатов, в частности, нелинейные эффекты с ограничением мощности прошедшей волны в тонких полупроводниковых элементах в прямоугольном и диэлектрическом волноводах. Они имеют важное значение для теории полупроводниковых приборов. Несколько

лет он работал доцентом в СГУ. Затем, уже во время работы в СГТУ наряду с преподавательской деятельностью Евгений Юрьевич развернул обширную научно-исследовательскую работу с основными предприятиями Саратова. Этот период его деятельности стал заметным вкладом в развитие саратовской школы электроники. Налаживание взаимодействия между учеными было основной характерной чертой Евгения Юрьевича как ученого и организатора науки в Саратове. Здесь ему, пожалуй, не было равных по части умения находить и обобщать информацию, а также поддерживать коммуникации между различными людьми. У Евгения Юрьевича были большие преподавательские способности. Обладая феноменальной памятью, он мог читать курсы практически по любому разделу физики, используя при этом опыт, полученный при общении с производством. Следует отметить его лекторскую и иную работу в области пропаганды науки, в том числе и в рамках Российского общества «Знание».

Доктор физико-математических наук, профессор М.В. Давидович

Впервые фамилию Альтшулер я услышал, когда учился на физическом фа-

культете Саратовского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского:

Юрий Григорьевич Альтшулер читал нам лекции по курсу «Вакуумная техника»... Прошли годы, и вот уже мои лекции по курсу «Электронно-лучевые приборы» слушает Евгений Юрьевич Альтшулер. Он был одним из лучших студентов и успешно окончил Саратовский политехнический институт, а затем и СГУ имени Н.Г. Чернышевского. Я знаю лишь двоих, имеющих два высших образования... Прошли еще годы, и уже доктор физико-математических наук Е.Ю. Альтшулер читает лекции по физике студентам Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Последние годы мы с ним регулярно общались. Евгений Юрьевич был неизменно деликатным, внимательным и общительным человеком. Казалось, он знаком со всеми научными работниками в Саратове, Москве, Санкт-Петербурге, Сама-

ре, Казани, в Сибири, работающими в области физики, радиофизики, электроники, электротехники, электротехнологии...

Прошло полгода со дня гибели Е.Ю. Альтшулера, а мне все кажется, что вот сейчас из толпы студентов в университетском коридоре появится Евгений Юрьевич и со своей характерной скромной улыбкой, как обычно, тихо скажет: «Здравствуйте, Юрий Сергеевич! Ну как дела?»... С весны прошлого года мы с Е.Ю. Альтшулером обсуждали тему новых исследований в области СВЧ электротехнологии. Он очень заинтересовался открывающимися здесь перспективами. Мы договорились, кого пригласим участвовать в этой работе, решили начать ее предстоящей осенью... Не довелось... Тема с ее перспективами есть, коллеги, заинтересованные темой, есть, а Евгения Юрьевича больше нет.

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.

Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН



Инициатором создания в Саратове филиала Института радиотехники и электроники АН СССР был в то время заместитель директора ИРЭ АН СССР, член-корреспондент АН СССР Юрий Васильевич Гуляев. Саратовский филиал ИРЭ АН СССР был организован в соответствии с Решением Государственного комитета по науке и технике от 02.09.79г. №49, а также Постановлением Президиума АН СССР №1209 от 15.11.79г.

Приказ директора ИРЭ о создании филиала ИРЭ в Саратове был подписан академиком Владимиром Александровичем Котельниковым 25 марта 1980 года.

Изначально филиал располагался в Саратове на ул. Сакко и Ванцетти, 21, а с окончанием строительства инженерно-лабораторного корпуса в 1992 году институт переехал по адресу: г. Саратов, ул. Зеленая, 38.

Неоценимую помощь в вопросах кадрового обеспечения оказали ведущие саратовские вузы: Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского и Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.

Первым директором Саратовского филиала ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН стал к.т.н. Г. Т. Казаков. Решения научно-организационных, кадровых и многих других вопросов и проблем легли на его плечи. Все эти проблемы были решены, и уже к 1988 году в филиале работало около двухсот человек. Среди сотрудников филиала было много молодых ученых, и по сей день Саратовский филиал является наиболее молодым подразделением ИРЭ им. В.А.Котельникова.

Научные исследования, выполняемые в Саратовском филиале ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН соответствуют «Основным направлениям фундаментальных исследований», утвержденным Президентом РАН 01.07.2003 года, и закреплены в Уставе Саратовского филиала ИРЭ РАН им. В.А. Котельникова:

- Физика магнитных явлений, магнитные материалы и наноструктуры;
- Физика полупроводников;
- Физика твердотельных наноструктур, мезоскопика;
- Вакуумная и плазменная электроника;
- Вакуумная микро- и нанoeлектроника, СВЧ электроника;
- Волоконная оптика и оптическая связь;
- Разработка методов и средств генерации и приема излучения в терагерцевом диапазоне;
- Физика нелинейных волн и нелинейная динамика;
- Акустика, в том числе. нелинейная и низкочастотная, акустоэлектроника, развитие методов акустической диагностики природных сред;
- Биомедицинская радиоэлектроника.