

ВЕСТНИК
САРАТОВСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА
2012

№ 2 (66)
Выпуск 2

Научно-технический журнал

Издается с 2003 г.

Выходит один раз в квартал

Июнь 2012 г.

*Журнал включен в перечень ведущих
рецензируемых журналов и научных изданий,
утвержденный президиумом ВАК
Министерства образования и науки РФ,
в которых публикуются основные научные
результаты диссертаций на соискание
ученых степеней доктора и кандидата наук*

Главный редактор

Зам. главного редактора

Ответственный секретарь

д.и.н., профессор И.Р. Плеве

д.т.н., профессор А.А. Сытник

д.ф.-м.н., профессор В.В. Астахов

Редакционный совет: д.т.н. В.И. Волчихин, д.т.н. В.А. Голенков, д.и.н. В.А. Динес,
д.х.н. В. Зеленский (Польша), д.т.н. В.А. Игнатъев, д.т.н. В.В. Калашников, д.т.н. И.А. Новаков,
д.и.н. И.Р. Плеве (председатель), д.т.н. А.Ф. Резчиков, д. социол. н. С.Б. Суровов,
д.т.н. А.А. Сытник (заместитель председателя), д.ф.-м.н. Я. Аврейцевич (Польша),
д.э.н. У. Арнольд (Германия), д.ф.-м.н. Э. Мерсер (Великобритания), д.э.н. Э. де Соузе Феррейра
(Португалия), д.т.н. Т. Чермак (Чехия), д.э.н. Ю.В. Шленов

Редакционная коллегия: д.т.н. В.А. Крысько, д.ф.-м.н. В.В. Астахов, д.х.н. А.В. Гороховский,
д.т.н. В.Н. Лясников, д.ф.-м.н. Л.А. Мельников, д.т.н. Р.З. Аминов, д.т.н. Ю.Г. Иващенко,
д.т.н. А.С. Денисов, д.т.н. А.А. Сытник, д.т.н. А.А. Большаков, д.филос.н. Д.В. Михель,
д.биол.н. Е.И. Тихомирова, д.э.н. А.Н. Плотников, д.и.н. Г.В. Лобачева

Редактор Л.А. Скворцова
Компьютерная верстка Н.В. Лукашовой
Перевод на английский язык А.Х. Аскаровой

Адрес редакции:
Саратов, 410054, ул. Политехническая, 77
Телефон: (845 2) 99-87-39
E-mail: vestnik@sstu.ru
<http://dni.sstu.ru/vestnik.nsf>
Факс: (845 2) 52-53-02

Подписано в печать 25.06.12
Формат 60×84 1/8 Бум. офсет.
Усл. печ. л. 25,5 Уч.-изд. л. 10,8
Тираж 500 экз. Заказ 182
Отпечатано в Издательстве СГТУ,
410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77

Полная электронная версия журнала размещена в системе РИНЦ
в открытом доступе на платформе eLIBRARY.RU

Подписной индекс 18378
(каталог «Газеты. Журналы» на 2-е полугодие 2012 г.)

ISSN 1999-8341

© Саратовский государственный
технический университет, 2012



Scientific Journal

Since 2003

Once in a quarter

June 2012

This journal is included into the list of leading reviewed journals and scientific publications approved by the presidium of Ministry of Education and Sciences of Russian Federation where major scientific thesis's results for academic degree competition for a doctor and a candidate of sciences

Editor-in-chief

Professor I.R. Pleve

Editor-in-chief assistant

Professor A.A. Sytnik

Executive secretary

Professor V.V. Astakhov

Drafting committee: Prof. V.I. Volchihin, Prof. V.A. Golenkov, Prof. V.A. Dines, Prof. V. Zelensky (Poland), Prof. V.A. Ignatyev, Prof. V.V. Kalashnikov, Prof. I.A. Novakov, Prof. I.R. Pleve (Chairman), Prof. A.F. Rezchikov, Prof. A.A. Sytnik (Vice of the Chairman), Prof. S.B. Surovov, Prof. Y. Avreytsevich (Poland), Prof. U. Arnold (Germany), Prof. A. Merser (UK), Prof. E. D'Sousa Ferreira (Portugal), Prof. T. Chermak (Czech Republic), Prof. Y.V. Shlenov

Editorial board: Prof. V.A. Krysko, Prof. V.V. Astakhov, Prof. A.V. Gorokhovski, Prof. V.N. Lyasnikov, Prof. L.A. Melnikov, Prof. R.Z. Aminov, Prof. Yu.G. Ivashchenko, Prof. A.S. Denisov, Prof. A.A. Sytnik, Prof. A.A. Bolshakov, Prof. D.V. Mikhel, Prof. E.I. Tikhomirova, Prof. A.N. Plotnikov, Prof. G.V. Lobacheva

Editor L.A. Skvortsova
Computer-based page-proof N.V. Lukashova
Rendering A.H. Askarova

Editorial office: 77, Politechnicheskaya Street
Saratov, 410054
Russia
Telephone: +8452/99-87-39
E-mail: vestnik@sstu.ru
<http://dni.sstu.ru/vestnik.nsf>
Fax: +8452/52-53-02

Signed for publishing: 25.06.12
Format 60×84 1/8 Paper offset.
Apr. tp. l. 25,5 Acc.-pbl. l. 10,8
Edition 500 psc. Order 182
Printed in publishing house of SSTU,
77, Politechnicheskaya St., Saratov, 410054,
Russia

СОДЕРЖАНИЕ

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Алексеев В.С., Давыдов Д.А. Система автоматического управления сушилкой конденсационного типа с применением термоэлектрических модулей.....	8
Алексеев В.С. Самосогласованная краевая задача тепломассопереноса и термоэлектрического охлаждения.....	11
Антонов И.Н., Пивоваров А.В., Бозриков А.В. Математическое моделирование композиционного материала на основе токопроводящей арматуры.....	16
Артюхов И.И., Земцов А.И., Сошинов А.Г. О подходе к моделированию магнетронного генератора малой мощности.....	20
Архангельский Ю.С., Гришина Е.М., Колесников Е.В. Математическое моделирование социальных последствий в электротехнологии.....	27
Архангельский Ю.С., Гришина Е.М., Колесников Е.В. Социальные аспекты электротехники.....	31
Архангельский Ю.С., Огурцов К.Н. Высокотемпературный нагрев диэлектриков с фазовыми переходами.....	34
Баксаисов Е.И., Степанов С.Ф. Бесплотинная микроГЭС с роторной гидротурбиной для преобразования энергии равнинных рек.....	38
Бочкарев А.О., Давидович М.В., Яфаров Р.К. СВЧ плазменные устройства для плазменной микрообработки пластин большого диаметра в микроэлектронике	40
Голембиовский Ю.М., Костерев А.А. Исследование параллельной работы quarter-bridge инверторов для индукционной плавки металлов.....	49
Гришина Е.М. Расчет установки для СВЧ обработки материалов с различными диэлектрическими свойствами.....	54
Дозоров С.А., Кошелев П.А., Опре В.М., Парамонов С.В., Терещенко В.Н. Трансформаторно-ёмкостный стабилизатор тока.....	59
Долотовский И.В., Ларин Е.А., Долотовская Н.В. Системный анализ эффективности электростанций собственных нужд на предприятиях переработки газа и газового конденсата.....	65
Дунаева Т.Ю. Анализ влияния тарифов на электроэнергию на конкурентоспособность СВЧ электротермических установок.....	74
Коваленко П.В., Коваленко В.В., Степанов С.Ф. Система обеспечения параллельной работы генераторов различной мощности на общую шину постоянного тока.....	76
Коломейцев В.А., Хамидуллин А.Ф., Железов А.А., Ковряков П.В. Исследование диапазонных свойств согласующих переходов ПрВ – ПВТР.....	80
Левин Д.С., Вырыханов Д.А. Расчет и анализ режимов воздушных линий электропередачи с резервной фазой с учетом их пофазно различных распределенных параметров.....	85
Лясников В.Н., Муктаров О.Д. Ионно-лучевая технология наноструктурирования гидроксипатитовых плазмонапыленных покрытий.....	92
Лясников В.Н., Муктаров О.Д. Исследование влияния ионной имплантации азота при создании наномодифицированной поверхности титановых дентальных имплантатов.....	96
Маркин А.В., Нефедов Д.В., Сердобинцев А.А., Суздальцев С.Ю. Влияние высокотемпературного отжига на пленки аморфного гидрогенизированного кремния, полученные в СВЧ плазме.....	102
Мельникова И.П., Лясникова А.В., Лясников В.Н. Технология двойного применения: повышение функциональных характеристик листовых материалов, применяемых в СВЧ-технике и имплантологии.....	108

Менщиков И.А. Математическая модель прогнозирования устойчивости функционирования электромеханических систем.....	113
Митяшин Н.П., Миргородская Е.Е., Радионова М.В., Говорухин П.П. Динамика многочастотного преобразовательного комплекса на основе инверторов напряжения.....	119
Мошкин В.И., Угаров Г.Г. Влияние режимных и конструктивных параметров линейных электромагнитных двигателей на эффективность электромеханического преобразования энергии.....	124
Мошкин В.И., Угаров Г.Г. Энергетическая и динамическая эффективность однообмоточных линейных электромагнитных двигателей с возвратной пружиной.....	129
Муллин В.В., Фурсаев М.А. Оценка скорости перемещения дуги в вакуумных дугогасительных камерах с поперечным магнитным полем.....	135
Огурцов К.Н., Давыдов Д.Д. Высокотемпературные СВЧ электротехнологии.....	138
Павленко И.М., Степанов С.Ф. Особенности электрогенерирующих систем ветроэлектростанций.....	143
Протасова Н.В., Гришина И.П., Таран В.М., Лясникова А.В. Исследование влияния активации поверхности основы дуговым разрядом в процессе напыления на адгезионно-когезионные характеристики плазменного покрытия.....	147
Сандалова Л.А., Анкудинова М.С., Ларин Е.А. Математическая модель и методика расчёта безотказности парогенераторов отопительных парогазовых установок.....	152
Синицына Ж.С. Выращивание монокристаллов в высокотемпературной СВЧ установке без прерывания ростового процесса.....	158
Степанов С.Ф., Коваленко В.В. О введении энергоэкологического показателя для оценки эффективности работы объектов газотранспортной системы страны...	161
Тарисов Р.Ш. Система стабилизации температуры компримированного газа с частотно-регулируемым электроприводом вентиляторов с применением нечеткой логики....	165
Терлова Е.А., Кожевников В.Ю. Активация процесса экстракции растительных масел в СВЧ электромагнитном поле.....	170
Ушаков В.А., Дрогайцев В.С., Крупейников Д.Е. Фреймово-продукционные и логические модели представления знаний в процессах обнаружения и и диагностирования предотказных состояний в технических объектах.....	176
Шаныгин В.Я., Яфаров Р.К. Модификация наноморфологии монокристаллов кремния (100) при СВЧ плазменной обработке различной селективностью.....	183
Ялов С.В., Ларин Е.А. Методические положения оценки экономических рисков при создании утилизационных энергетических контуров ГТУ.....	190
Яфаров Р.К. Использование СВЧ электромагнитного излучения для диагностики плазменных и нейтральных газовых сред.....	195

CONTENTS

POWER ENGINEERING AND ELECTRICAL ENGINEERING

Alekseyev V.S., Davydov D.A. The automatic control system of the dryer of condensing type using of the thermoelectric modules.....	8
Alekseyev V.S. The self-consistent boundary problem of heat and mass transfer and thermoelectric cooling.....	11
Antonov I.N., Pivovarov A.V., Bozrikov A.V. Mathematical modelling of the composite material on the basis of current-carrying armature.....	16
Artyukhov I.I., Zemtsov A.I., Soshinov A.G. About the approach to modelling of the magnetron generator of low power.....	20
Arkhangelskiy Yu.S., Grishina E.M., Kolesnikov E.V. Mathematical modeling social consequence in electrotechnology.....	27
Arkhangelskiy Yu.S., Grishina E.M., Kolesnikov E.V. The social aspects electrical engineers.....	31
Arkhangelskiy Yu.S., Ogurtsov K.N. High-temperature heating of dielectrics with phase transitions.....	34
Baksaisov E.I., Stepanov S.F. The micro-HPP without the dam on the rotor-type hydraulic turbine to convert the energy of lowland rivers.....	37
Bochkarev A.O., Davidovich M.V., Yafarov R.K. The microwave plasma devices for micromachining of plates of big diameter.....	41
Golembiovsky Yu.M., Kosterev A.A. Research of parallel operation of quarter-bridge of inverters for induction melting of metals.....	49
Grishina E.M. Calculation of the installation for microwave frequency processing material with different dielectrics characteristic	55
Dozorov S.A., Koshelev P.A., Opre V.M., Paramonov S.V., Tereshenko V.N. Transformer - capacitive current stabilizer.....	59
Dolotovskiy I.V., Larin E.A., Dolotovskaya N.V. System analysis of efficiency of power plant auxiliary enterprises of gas and gas condensate processing.....	65
Dunaeva T.Yu. Analysis of the influence of tariffs for the electric power on the competitiveness of the electro-thermal microwave plants.....	74
Kovalenko P.V., Kovalenko V.V., Stepanov S.F. System of synchronous control of electric power development in parallel working generators of various powers.....	76
Kolomeitsev V.A., Khamidullin A.Ph., Zhelezov A.A., Kovryakov P.V. Research range of properties matching transitions PRV – PVTR	80
Levin D.S., Virihanov D.A. Compute and analyze regimes of overhead transmission lines with reserv phase of an distributed parameters line.....	85
Lyasnikov V.N., Muktarov O.D. Ion-beam technology nanostructuring hydroxyapatite plasma coating.....	92
Lyasnikov V.N., Muktarov O.D. Investigation of the effect of ion implantation of nitrogen for the establishment of nanomodified surface of titanium dental implants.....	97
Markin A.V., Nefedov D.V., Serdobintsev A.A., Suzdaltsev S. Yu. Influence of high-temperature annealing on amorphous hydrogenated silicon films produced in microwave plasma.....	102
Melnikova I.P., Lyasnikova A.V., Lyasnikov V.N. Dual-use technology: increas functional characteristics of sheet materials used in microwave technology and implantology.....	108
Menshikov I.A. The model mathematical of stability functioning of the electro mechanics systems.....	114
Mityashin N.P., Mirgorodskaya E.E., Radionova M.V., Govorukhin P.P. Dynamic of multifrequency converter complex on the basis of the voltage inverters.....	119

Moshkin V.I., Ugarov G.G. The influence of the operating and construction parameters of the linear electromagnetic motor on the efficiency of electromechanic energy conversation..	124
Moshkin V.I., Ugarov G.G. Power and dynamic efficiency of linear electromagnetic engines with one winding and the returnable spring.....	129
Mullin V.V., Fursaev M.A. Evaluation of arc motion speed in vacuum interrupters using transverse magniic field contacts.....	135
Ogurtsov K.N., Davydov D.D. High-temperature microwave systems	138
Pavlenko I.M., Stepanov S.F. Feature of electrical generation system for wind power stations..	144
Protasova N.V., Grishina I.P., Taran V.M., Lyasnikova A.V. Research the effect of activation substrate by arc discharge during the spraying on adhesion-cohesion characteristics of plasma coatings	147
Sandalova L.A., Ankudinova M.S., Larin E.A. Mathematical model and non-failure operation design procedure steam generators of the heating steam-gas installations.....	152
Sinitsyna J.S. Single-crystal growth in the high microwave installation without interrupting the growth process	158
Stepanov S.F., Kovalenko V.V. About introduction of the power ecological indicator for the assessment of overall performance of objects gas transport system of the country.....	161
Tarisov R.Sh. System of temperature stabilization of compressed gas with variable frequency drives fan using fuzzy logic.....	165
Terlova E.A., Kozhevnikov V.Yu. Activation process of extraction of vegetable oils in the microwave electromagnetic field.....	170
Ushakov V.A., Drogaytsev V.S., Krupeynikov D.E. Frame-productions and logical models of knowledge representation in the process of detecting and diagnosing faults in technical objects.....	176
Shanygin V.Ya., Yafarov R.K. Version of nanomorphology of single crystals silicon (100) at the microwave plasma manufacturing with various selectivity.....	183
Yalov S.V., Larin E.A. Methodical provisions of an assessment of economic risks at creation of utilizatsionny power contours of GTU.....	190
Yafarov R.K. Use of the microwave electromagnetic radiation for diagnostics of plasma and neutral gas environments.....	195

Данный номер журнала посвящен юбилеям двух кафедр СГТУ имени Гагарина Ю.А.: «Электрооборудование промышленных предприятий» (ЭПП) и «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» (АЭУ). В этом году кафедре ЭПП исполняется 50, кафедре АЭУ – 20 лет.

Кафедра ЭПП была создана в соответствии с приказом Министерства высшего и среднего специального образования РСФСР № 511 от 6 июля 1962 г. Первый выпуск специалистов состоялся в 1966 г.

Сегодня России как никогда необходимы перспективные решения по производству, передаче и распределению энергии. Крупнейшей стране мира требуется надежное электроснабжение. Интеллектуальная автоматизация сетей и децентрализованное энергоснабжение, передача электроэнергии на дальние расстояния и энергоэффективные решения для промышленных предприятий – эти и другие задачи решают выпускники и сотрудники кафедры ЭПП.

Большой вклад в решение задач надежности систем электроснабжения внес д.т.н., профессор А.Н. Шаткин, который был заведующим кафедрой ЭПП с 1978 по 1982 г. и с 1993 по 1997 г., который занимался вопросами контроля изоляции в сетях 6(10) кВ. В период с 1982 по 1992 год, когда кафедрой ЭПП заведовал д.т.н., профессор Ю.С. Архангельский, получило развитие направление по СВЧ технологиям. Под руководством д.т.н., профессора Г.Г. Угарова, который заведовал кафедрой ЭПП с 1997 по 2002 г., на протяжении ряда лет проводятся работы по оптимизации конструкций и параметров силовых импульсных электромагнитных систем. В последнее время он со своими учениками активно занимается вопросами эксплуатации воздушных линий электропередач в экстремальных метеорологических условиях.

С 2002 г. заведующим кафедрой ЭПП является д.т.н., профессор И.И. Артюхов. С его приходом на кафедру получила развитие тематика научных исследований, связанная с разработкой и применением преобразовательных устройств различного назначения. Успешными оказались исследования по энергоэффективному управлению электроприводами технологического оборудования на предприятиях нефтегазовой промышленности. Большое внимание уделяется также решению задач по обеспечению электромагнитной совместимости существующего и вновь создаваемого электротехнического оборудования, качеству электрической энергии в системах электроснабжения и компенсации реактивной мощности. В последнее время получила развитие тематика по использованию нетрадиционных источников энергии. Под руководством д.т.н., профессора С.Ф. Степанова на кафедре ЭПП проводятся исследования, направленные на создание и оптимизацию систем электрогенерирования нового поколения, отличающихся от существующих систем уменьшенным расходом топлива, более высокой стабильностью по величине напряжения и частоты при резко переменной нагрузке за счет применения устройств силовой электроники.

История возникновения кафедры АЭУ начинается с конца 80-х гг. XX века, когда ряд директоров саратовских заводов обратились с просьбой начать в Саратовском политехническом институте подготовку специалистов в области электротехнологии, и 15 мая 1992 г. в нашем вузе была открыта кафедра АЭУ. Первый выпуск инженеров по специальности «Электротехнологические установки и системы» состоялся в 1997 г.

Основное направление научных исследований, проводимых на кафедре АЭУ, – СВЧ диэлектрический нагрев (СВЧ электротермия). Работы в области СВЧ диэлектрического нагрева начались в нашей стране и за рубежом в 1950-1960 гг., а в СПИ – в 1968 г. в отраслевой лаборатории электротехнологической кафедры электроники факультета электронной техники и приборостроения. У истоков этих исследований в нашем вузе стояли к.т.н., доцент Ю.С. Архангельский, аспирант В.А. Коломейцев, соискатели ученой степени кандидата технических наук, инженеры Н.Г. Арделян, И. К. Сатаров. В 1980 г. научная работа в области СВЧ электротермии начата на кафедрах ЭПП (Ю.С. Архангельский, Е.В. Колесников, С.В. Тригорлый, Л.Г. Бунин, Т.Н. Шимило), «Теоретические основы электротехники» (В.А. Сосунов, И.И. Артюхов) энергетического факультета. Для преподавателей кафедры АЭУ д.т.н., профессоров Ю.С. Архангельского, Е.В. Колесникова, к.т.н., доцентов К.Н. Огурцова, В.Ю. Кожевникова, Д.А. Давыдова, В.А. Лаврентьева, Т.Ю. Дунаевой, Е.М. Гришиной исследования в области СВЧ электротермии являются приоритетными.

В 2006 г. научная школа СГТУ в составе заслуженного деятеля науки РФ, почетного работника высшей школы РФ, д.т.н., профессора Ю.С. Архангельского, почетного работника высшей школы РФ, д.т.н., профессора И.И. Артюхова; лауреата Государственной премии, д.т.н., профессора М.А. Фурсаева, д.т.н., профессоров В.А. Царева, Г.Г. Угарова, И.Н. Антонова, С.Ф. Степанова, к.т.н., доцентов К.Н. Огурцова, В.Ю. Кожевникова, С.Г. Калгановой, Д.А. Давыдова, И.Б. Яковлевой признана ведущей научной школой России в области инженерных и технических наук.

В данный номер журнала вошли статьи научных коллективов кафедр ЭПП и АЭУ, а также ряда кафедр, которые тесно сотрудничают с ними.

В.С. Алексеев, Д.А. Давыдов

**СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СУШИЛКОЙ
КОНДЕНСАЦИОННОГО ТИПА С ПРИМЕНЕНИЕМ
ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ**

Предлагается вариант структурной схемы системы автоматического управления сушилкой конденсационного типа с применением термоэлектрических модулей, ставятся задачи для ее дальнейшего исследования.

Система управления, сушилка, термоэлектрический модуль, передаточная функция

V.S. Alekseyev, D.A. Davydov

**THE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF THE DRYER OF CONDENSING
TYPE USING OF THE THERMOELECTRIC MODULES**

The article describes the variant of the block diagram of the automatic control system of dryer of condensing type using thermoelectric modules, and sets objectives for further research.

Control system, dryer, thermoelectric module, transfer function

Автоматизация технологического процесса является одной из наиболее сложных задач в технологии, решение которой не всегда приводит к качественному управлению технологическим процессом. Связано это с тем, что при проектировании системы автоматического управления (САУ) какого-либо объекта предусматривают подбор средств автоматизации, составление структурной схемы, выбор и расчет передаточных функций звеньев системы. Трудности связаны также и потому, что зачастую передаточная функция объекта управления неизвестна. Поэтому необходимо при проектировании САУ объекта провести его исследования и определить передаточную функцию и ее параметры.

Рассмотрим следующий технологический процесс – конденсационную сушку материалов с применением термоэлектрических модулей при температуре сушильного агента (воздуха) 18-50 °С. При такой температуре благоприятна сушка лесосеменного сырья, т.к. высокая температура влияет негативно на семена, являющиеся по своей сути биологическими организмами.

Процесс сушки в установках такого типа можно разделить на три стадии: нагрев воздуха до заданной температуры, взаимодействие нагретого воздуха с поверхностью влажного материала и охлаждение воздуха с целью его осушения. Более подробно эти стадии и конструктивное исполнение рассмотрены в [1].

Для обеспечения устойчивой и качественной работы САУ необходимо определить передаточные функции регуляторов РТ1 – РТ4 (рис. 1).

Передаточные функции звеньев системы могут быть описаны следующим образом:

1. В первом приближении можно определить передаточную функцию рабочей камеры сушилки как [2]:

$$W(p) = \frac{k}{\sqrt{P}(1 + \sqrt{P})}; \quad (1)$$
$$P = pN_{\omega};$$

$$k = \frac{c_0 m_0}{\lambda_1 c_1 \rho_1}$$

где N_ω – нормирующий коэффициент по времени, ч; $c_0 m_0$ – тепловая ёмкость влажного материала на 1 м² поверхности теплоизоляции рабочей камеры, Дж/(м²·К); $\lambda_1 c_1 \rho_1$ – коэффициент усвоения теплоизоляции, Дж/(м²·с^{0,5}·К); c_0 – удельная теплоемкость влажного материала, Дж/(кг·К); m_0 – масса влажного тела, приходящегося на 1 м² теплоизоляции, кг/м²; c_1 – удельная теплоемкость теплоизоляции, Дж/(кг·К); λ_1 – коэффициент теплопроводности теплоизоляции, Дж/(кг·ч·К); ρ_1 – плотность теплоизоляции рабочей камеры, кг/м³

Коэффициент k характеризует приращение температуры при единичном тепловом потоке за единицу относительного времени.

2. Конденсационная и нагревательная камеры сушилки представляют собой нелинейные звенья, т.к. в их конструкцию входят нелинейные элементы – термоэлектрические модули. Характерной особенностью термоэлектрического модуля является стабилизация температуры на одной из его сторон с целью его эффективной работы. Поэтому термоэлектрический модуль можно представить в виде нелинейности с зоной ограничения (рис. 2).

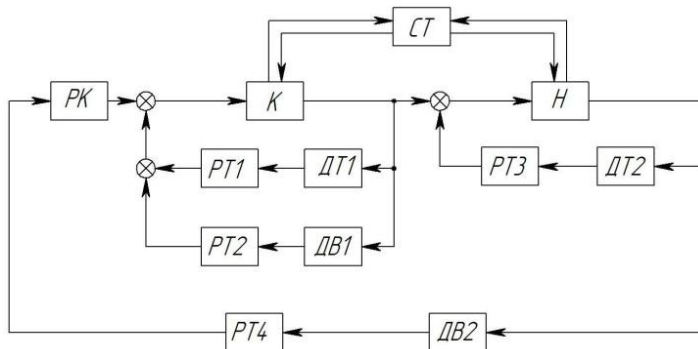


Рис. 1. Структурно-функциональная схема САУ сушилкой конденсационного типа: РК – рабочая камера, К – конденсационная камера; СТ – система стабилизации; Н – нагревательная камера; РТ1 – РТ4 – регуляторы тока; ДТ1, ДТ2 – датчики температуры; ДВ1, ДВ2 – датчики влажности

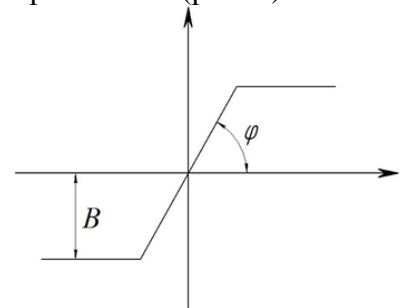


Рис. 2. Нелинейность с зоной ограничения

Передаточная функция нелинейного звена с зоной ограничения при гармонической линеаризации зависит от амплитуды входного сигнала и определяется

$$W(A, p) = \frac{2 \cdot \operatorname{tg} \varphi}{\pi} \left(\arcsin \frac{B}{A \cdot \operatorname{tg} \varphi} \right) + \frac{B}{A \cdot \operatorname{tg} \varphi} \sqrt{1 - \left(\frac{B}{A \cdot \operatorname{tg} \varphi} \right)^2}; \quad (2)$$

$$A \geq \frac{B}{\operatorname{tg} \varphi}, \quad (3)$$

где A – амплитуда входного сигнала.

3. Передаточную функцию системы стабилизации можно представить как передаточную функцию инерционного звена первого порядка, определяемую зависимостью

$$W(p) = \frac{1}{T_n p + 1}, \quad (4)$$

где T_n – постоянная времени, определяемая экспериментально.

4. Передаточная функция датчика температуры (термоэлектрического термометра) при наличии защитного чехла может быть аппроксимирована выражением

$$W(p) = \frac{k_{mn}}{T_{mn} p + 1} e^{-p t_0}. \quad (5)$$

Без защитного чехла датчик практически не обладает запаздыванием и может быть с достаточной точностью представлен в виде инерционного звена первого порядка:

$$W(p) = \frac{k_{mn}}{T_{mn}p + 1}; \quad (6)$$

$$T_{mn} = \frac{cm}{\alpha F}, \quad (7)$$

где k_{mn} – коэффициент передачи; t_0 – время запаздывания; T_{mn} – постоянная времени датчика; c , m , α , F – теплоёмкость, масса, коэффициент теплопередачи и площадь рабочего конца термопары.

5. Передаточная функция датчика влажности (психрометр) может быть определена

$$W(p) = \frac{k_1}{T_c p + 1} \cdot \frac{k_2}{(T_{m1} p + 1)(T_{m2} p + 1)}; \quad (8)$$

$$T_c = \frac{cm}{\alpha F};$$

$$T_{m1} \approx 10T_{m2},$$

где k_1 , k_2 – коэффициенты передачи сухого и мокрого термометров; T_c – постоянная времени сухого термометра; T_{m1} , T_{m2} – постоянные времени мокрого термометра, определяемые по графикам в зависимости от скорости воздуха [3].

6. Передаточные функции регуляторов тока представляют собой пропорциональные звенья:

$$W(p) = k, \quad (9)$$

где k – коэффициент усиления.

Таким образом, главной задачей в исследовании САУ сушилкой конденсационного типа является нахождение коэффициентов усиления регуляторов тока РТ1 – РТ4 и дальнейший синтез регуляторов.

Для эффективной работы САУ также необходимо найти экспериментальным путем параметры передаточных функций системы стабилизации, конденсационной и нагревательной камер.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев В.С. Установка для конденсационной сушки с применением термоэлектрического эффекта Пельтье / В.С. Алексеев // Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов) СЭТТ– 2011: материалы IV Междунар. науч.-практ. конф., г. Москва, 20-23 сентября 2011 г. – М., 2011. – Т. 2. – С. 372-377.
2. Автоматическое управление электротермическими установками: учебник для вузов/ А.М. Кручинин [и др.]; под ред. А.Д. Свенчанского. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 416 с.
3. Берлинер М.А. Измерения влажности / М.А. Берлинер; 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1973. – 400 с.

Алексеев Вадим Сергеевич – аспирант кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Vadim S. Alekseyev – Postgraduate Department of Automated Electrical-Technological Plants and Systems, Gagarin Saratov State Technical University

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

Dmitry A. Davydov –
Ph. D., Associate Professor
Department of Automated Electrical-Technological
Plants and Systems,
Gagarin Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 16.05.12, принята к опубликованию 15.06.12

УДК 621.362.1

В.С. Алексеев

САМОСОГЛАСОВАННАЯ КРАЕВАЯ ЗАДАЧА ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА И ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Описываются процессы, протекающие в установке конденсационного типа для сушки влажных материалов с использованием термоэлектрических модулей.

Сушка, термоэлектрическое охлаждение и нагрев, тепломассоперенос, термоэлектрический модуль, эффект Пельтье

V.S. Alekseyev

THE SELF-CONSISTENT BOUNDARY PROBLEM OF HEAT AND MASS TRANSFER AND THERMOELECTRIC COOLING

The article describes the processes occurring in the drying installation of condensing type for drying wet materials using thermoelectric modules.

Drying, thermoelectric cooling and heating, heat and mass transfer, the thermoelectric module, Peltier effect

В настоящее время сушильная техника продолжает развиваться, появляются новые более усовершенствованные установки. Однако в большинстве случаев их объединяет один общий недостаток – высокая энергоёмкость. Объясняется это зачастую сложностью технологического процесса и конструктивными особенностями установок. Следовательно, в настоящее время актуальными вопросами являются повышение энергоэффективности установок и упрощение их конструкции.

Перспективным направлением в развитии сушильной техники является применение современных тепловых насосов.

Ввиду рециркуляции сушильного агента в таких установках появляется возможность сохранения теплосодержания сушильного агента, а следовательно, снизить затраты энергии на его нагрев до заданной температуры.

Говоря о тепловых насосах, которые имеют различное конструктивное исполнение и принцип действия, стоит остановить свое внимание на термоэлектрических тепловых насосах. Их работа основана на использовании эффекта Пельтье, который возникает при прохождении постоянного электрического тока через спай разнородных полупроводников *p*- и *n*-типа. В зависимости от направления электрического тока этот спай может поглощать или выделять тепло, называемое теплотой Пельтье.

Термоэлектрический тепловой насос можно реализовать на термоэлектрических модулях (ТЭМ) [1].

Тепловой баланс ТЭМ на холодной и горячей сторонах имеет вид

$$Q_1 = Q_{\text{п}} - \frac{1}{2} Q_{\text{дж}} - Q_{\text{т}}, \text{ Вт} \tag{1}$$

$$Q_2 = Q_{\text{п}} + \frac{1}{2} Q_{\text{дж}} - Q_{\text{т}}$$

где Q_1 – холодопроизводительность ТЭМ; $Q_{\text{дж}}$ – джоулева теплота; $Q_{\text{тепл}}$ – теплота, обусловленная теплопроводностью ТЭМ; Q_2 – тепловыделение на горячей стороне ТЭМ.

Подставив известные соотношения, получаем

$$Q_1 = eIT_x - \frac{1}{2} I^2 R - K(T_g - T_x) \tag{2}$$

$$Q_2 = eIT_g + \frac{1}{2} I^2 R - K(T_g - T_x)$$

где T_x и T_g – температуры холодной и горячей сторон ТЭМ, К; I – сила тока, проходящего через ТЭМ, А; R – электрическое сопротивление ТЭМ, Ом; K – теплопроводность ТЭМ, Вт/К.

Термоэлектрический модуль имеет ряд преимуществ: отсутствие движущихся, изнашивающихся частей, отсутствие вибрации и шума; высокая охлаждающая способность на единицу веса и объема – до 150 Вт/г и до 100 Вт/см³; возможность плавного и высокоточного регулирования холодопроизводительности и температурного режима; малая инерционность, быстрый переход из режима охлаждения в режим нагрева; отсутствие рабочих жидкостей и газов; практически неограниченный ресурс работы; произвольная ориентация в пространстве и поле тяжести; устойчивость к динамическим и статическим перегрузкам; экологическая чистота. Главными недостатками ТЭМ являются высокая стоимость и необходимость стабилизации температуры на одной из сторон в зависимости от его применения – нагрева или охлаждения.

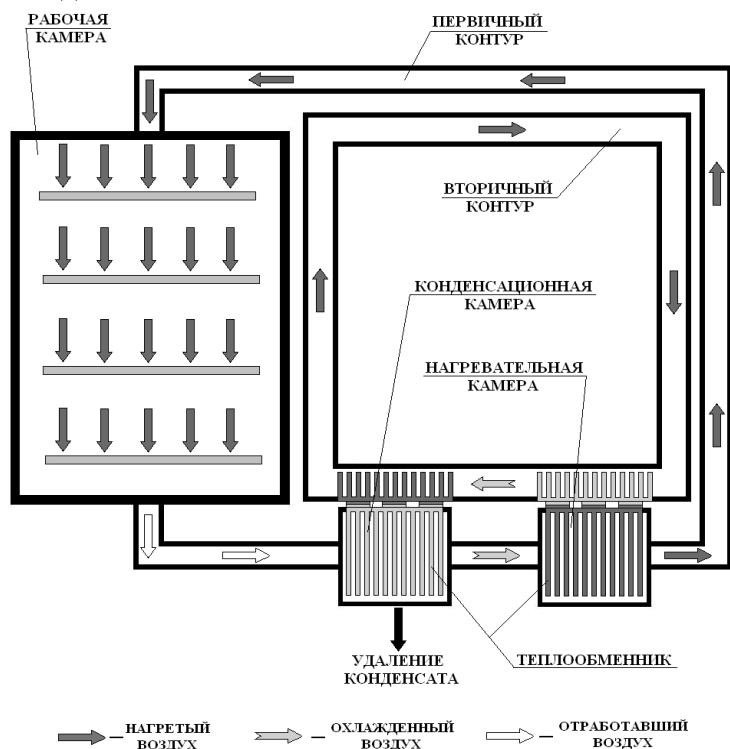


Рис. 1. Схема установки конденсационного типа с применением ТЭМ

Из комбинации ТЭМ можно построить тепловые насосы для нагрева или охлаждения воздуха. Такие тепловые насосы могут применяться в установках для конденсационной сушки влажных материалов [1]. По кратности использования сушильного агента такие установки являются циркуляционными. В них нагретый до температуры сушки воздух взаимодействует с влажным объектом. В дальнейшем воздух, проходя через конденсационную камеру, теряет влагу в результате частичной конденсации. Затем охлажденный воздух попадает в нагревательную камеру, нагревается до заданной температуры и снова попадает в рабочую камеру. Описанный процесс повторяется до тех пор, пока влажный объект не высушится до заданного значения влажности.

Схема такой установки приведена на рис. 1. Нагрев до температу-

ры сушки происходит в нагревательной камере посредством взаимодействия воздуха с начальной температурой и влажностью с нагретой теплообменной поверхностью, присоеди-

ненной к горячим сторонам ТЭМ. Одновременно с нагревом происходит испарение влаги в нагревательной камере. Конденсация влаги (или ее заморозка) из воздуха, контактировавшего с влажным объектом, происходит в конденсационной камере посредством взаимодействия с охлажденной теплообменной поверхностью, которая присоединена к холодным сторонам ТЭМ. Все эти процессы, согласно рис. 2, происходят в первичном контуре установки. Вторичный контур необходим для стабилизации температур на противоположных сторонах ТЭМ конденсационной и нагревательной камер, о которой говорилось ранее.

Рассмотрим процессы тепломассообмена, происходящие в первичном и вторичном контурах установки.

Тепловой баланс при термоэлектрическом нагреве и охлаждении влажного воздуха с происходящими фазовыми превращениями имеют вид (рис. 2), Вт

$$\begin{aligned} Q_{11} + Q_{12} &= Q_{13} \\ Q_{21} - Q_{22} &= Q_{23} \end{aligned} \quad (3)$$

где Q_{11} – теплота, отбираемая от воздуха с целью его охлаждения; Q_{12} – теплота, выделяющаяся при конденсации влаги; Q_{13} – теплота, передаваемая от охлаждаемого воздуха к холодной поверхности стенки; Q_{21} – теплота, сообщаемая воздуху с целью его нагрева; Q_{22} – теплота, поглощаемая при испарении влаги; Q_{23} – теплота, передаваемая от нагреваемого воздуха к горячей поверхности стенки.

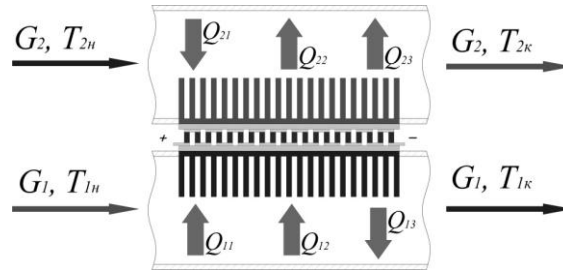


Рис. 2. Тепловой баланс при термоэлектрическом охлаждении (нагреве) воздуха

Выделим элементарный участок dx (рис. 2) и подставим известные соотношения в (4):

$$\begin{aligned} -G_1 c_1 dT_1 + r_1 L_1 dd_1 &= \alpha_1 \langle \epsilon_1 - T_x \rangle \bar{b} dx \\ G_2 c_2 dT_2 - r_2 L_2 dd_2 &= \alpha_2 \langle \epsilon_r - T_2 \rangle \bar{b} dx \end{aligned} \quad (4)$$

где индексы 1 и 2 соответствуют первичному и вторичному контурам установки; G – расход влажного воздуха, кг/с; c – теплоемкость влажного воздуха, Дж/(кг·К); T – температура влажного воздуха, К; r – удельная теплота парообразования (конденсации), Дж/кг; L – расход сухого воздуха, кг/с; d – влагосодержание воздуха, кг вл/кг.сух.возд.; α – коэффициент теплоотдачи с поверхности, Вт/(м²·К); b – ширина камеры, м.

Перепишем уравнения (5) в следующем виде:

$$\begin{aligned} -W_1 \frac{dT_1}{dx} + r_1 L_1 \frac{dd_1}{dx} &= \alpha_1 \langle \epsilon_1 - T_x \rangle \bar{b}; \\ W_2 \frac{dT_2}{dx} - r_2 L_2 \frac{dd_2}{dx} &= \alpha_2 \langle \epsilon_r - T_2 \rangle \bar{b}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $W = Gc$ – полная теплоемкость влажного воздуха в единицу времени, Вт/К.

Поскольку температуры поверхностей выделенного элементарного участка dx можно считать постоянными, уравнения теплового баланса на этих поверхностях (поверхностях термоэлектрического модуля) в стационарных условиях запишутся [2]:

$$\begin{aligned} \alpha_1 \langle \epsilon_1 - T_x \rangle \bar{b} &\stackrel{\approx}{=} ejT_x - \frac{1}{2} j^2 \rho d - \frac{\lambda_T}{d} \langle \epsilon_r - T_x \rangle \bar{b} \\ \alpha_2 \langle \epsilon_r - T_2 \rangle \bar{b} &\stackrel{\approx}{=} ejT_r + \frac{1}{2} j^2 \rho d - \frac{\lambda_T}{d} \langle \epsilon_r - T_x \rangle \bar{b} \end{aligned} \quad (6)$$

где j – плотность тока, протекающего через ТЭМ, A/m^2 ; ρ – удельное электрическое сопротивление ветви ТЭМ, Ом·м; d – высота ветви ТЭМ, м; λ_T – коэффициент теплопроводности ветви ТЭМ, Вт/(м·К).

В уравнения (5) входит параметр d , который, в свою очередь, является функцией двух переменных: относительной влажности воздуха φ и температуры воздуха T [3]:

$$d = f(\varphi, T) \quad (7)$$

Зависимость (7) может быть описана аналитически, вид которой достаточно громоздкий. Поэтому использование данной зависимости в уравнениях (5) приводит к затруднениям при решении данных дифференциальных уравнений. Следовательно, для того, чтобы избежать трудностей в дальнейших расчетах, было бы целесообразным учесть фазовые переходы в уравнениях (5) посредством коэффициентов теплоотдачи с поверхности.

Исходя из вышесказанного, можно записать систему дифференциальных уравнений (8) с граничными условиями (9), описывающих распределение температур воздуха по длине конденсационной и нагревательной камер:

$$\begin{cases} -W_1' \frac{dT_1'}{dx'} = \left[ej'T_x' - 0,5j'^2 \rho d - \frac{\lambda_T}{d} (\Theta_r' - T_x') \right] b'; \\ W_2' \frac{dT_2'}{dx'} = \left[ej'T_r' + 0,5j'^2 \rho d - \frac{\lambda_T}{d} (\Theta_r' - T_x') \right] b'; \\ -W_1'' \frac{dT_1''}{dx''} = \left[ej''T_x'' - 0,5j''^2 \rho d - \frac{\lambda_T}{d} (\Theta_r'' - T_x'') \right] b''; \\ W_2'' \frac{dT_2''}{dx''} = \left[ej''T_x'' + 0,5j''^2 \rho d - \frac{\lambda_T}{d} (\Theta_r'' - T_x'') \right] b'', \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} T_1'(\Theta) &= T_1^H; & T_2'(\Theta) &= T_2^H, \\ T_1''(\Theta) &= T_2'(A'); & T_2''(\Theta) &= T_1'(A'), \end{aligned} \quad (9)$$

где «штрих» и «два штриха» соответствуют конденсационной и нагревательной камерам; T^H – начальная температура воздуха на входе в камеру, К; A – длина камеры, м.

При этом в (8) выполняются следующие равенства:

$$\begin{aligned} W_1' &= W_2'; \\ W_2' &= W_1''. \end{aligned} \quad (10)$$

Уравнения (8) – (9), характеризующие режим работы камер установки при термоэлектрическом охлаждении и нагреве потоков воздуха, справедливы при некоторых допущениях [2]:

- характеристики термоэлементов предполагаем независимыми от температуры;
- коэффициенты теплоотдачи принимаем постоянными по всей площади камеры;
- теплоемкость воздуха считаем независимой от температуры;
- потерями тепла в окружающую среду пренебрегаем.

Процесс сушки объекта в рабочей камере установки описывается уравнениями Лыкова – Михайлова и граничными условиями [4]:

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \\ \frac{\partial u}{\partial t} = a_m \delta \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + a_m \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \end{cases} \quad (11)$$

$$-\lambda \frac{\partial T(\Theta, t)}{\partial x} + \alpha \left[\Theta'' - T(l, t) \right] r \beta \rho_0 (1 - \varepsilon) \left[(l, t) - d \Theta_1'', T_1''(\Theta) \right] = 0; \quad (12)$$

$$a_m \frac{\partial u(l, t)}{\partial x} + a_m \delta \cdot \frac{\partial T(l, t)}{\partial x} + \beta \left[(l, t) - d \Theta_1'', T_1''(\Theta) \right] = 0; \quad (13)$$

$$\frac{\partial T(x, 0)}{\partial t} = \frac{\partial u(x, 0)}{\partial t} = \frac{\partial T(0, t)}{\partial x} = \frac{\partial u(0, t)}{\partial x} = 0; \quad (14)$$

$$T(x, 0) = T_0; \quad u(x, 0) = u_0, \quad (15)$$

где $u = u(x, t)$ и $T = T(x, t)$ – распределение полей влагосодержаний и температур во влажном материале с течением времени; a_m – коэффициент диффузии влаги, $\text{м}^2/\text{с}$; δ – коэффициент термодиффузии влаги, $1/\text{К}$; a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$; ε – коэффициент фазового перехода; r – удельная теплота парообразования, $\text{Дж}/\text{кг}$; c – теплоемкость влажного материала, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; λ – коэффициент теплопроводности влажного материала, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; α – коэффициент теплоотдачи с поверхности влажного материала, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$; T_e – температура воздуха, К ; l – толщина материала, м ; ρ_0 – плотность материала в сухом состоянии, $\text{кг}/\text{м}^3$; β – коэффициент массоотдачи, $\text{м}/\text{с}$; $d_{\phi_1, T_1}^{\text{в}} \left[\frac{\text{кг}}{\text{кг}} \right]$ – влагосодержание воздуха на выходе из нагревательной камеры, $\text{кг вл.}/\text{кг сух. возд.}$; T_0 – начальная температура тела, К ; u_0 – начальное влагосодержание тела, $\text{кг}/\text{кг}$; $T_1^{\text{в}} \left[\frac{\text{К}}{\text{К}} \right]$ – температура воздуха на выходе из нагревательной камеры, К .

Уравнения (11) были записаны при следующих допущениях:

- влажный объект считается полубесконечной пластиной;
- т.к. температура сушки не превышает 50°C , перепадами давления и фазовыми переходами внутри влажного объекта пренебрегаем.

Уравнения (8)-(15) являются самосогласованной краевой задачей тепломассопереноса и термоэлектрического охлаждения (нагрева), описывающей процессы, происходящие в установке конденсационного типа. Данная задача является самосогласованной, т.к. для решения одних уравнений требуется найти решения других уравнений, что наглядно показывают уравнения (9), (12), (13).

Исходя из этой задачи, можно сделать вывод о том, что охлаждение и нагрев воздуха в установке для конденсационной сушки можно регулировать электрическим током, проходящим через ТЭМ и скоростью (расходом) воздуха. Добиваясь оптимальных значений температур, тока, коэффициента теплоотдачи и расхода воздуха, можно будет сделать вывод об энергоэффективности установки. Также тепловой режим установки зависит от конструкции конденсационной и нагревательной камер.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев В.С. Установка для конденсационной сушки с применением термоэлектрического эффекта Пельтье / В.С. Алексеев // Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов) СЭТТ– 2011: материалы IV Междунар. науч.-практ. конф., г. Москва, 20-23 сентября 2011 г. – М., 2011. – Т. 2. – С. 372-377.
2. Каганов М.А. Термоэлектрические тепловые насосы (теоретические основы расчета) / М.А. Каганов, М.Р. Привин. – Л.: Энергия, 1970. – 173 с.
3. Теплотехника: учеб. для вузов / Г.М. Камфер [и др.]; под ред. В.Н. Луканина. – 2-е изд., перераб. – М.: Высш. шк., 2000. – 671 с.
3. Лыков А.В. Теория сушки / А.В. Лыков. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.

Алексеев Вадим Сергеевич –

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

Vadim S. Alekseyev –

Postgraduate Department of Automated Electrical-Technological Plants and Systems, Gagarin Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 14.05.12, принята к опубликованию 13.06.12

УДК 621.365.5

И.Н. Антонов, А.В. Пивоваров, А.В. Бозриков

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПОЗИЦИОННОГО
МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ТОКОПРОВОДЯЩЕЙ АРМАТУРЫ**

Описана возможность создания композиционных материалов на основе полимерной матрицы с электропроводящей арматурой, способных взаимодействовать с электромагнитными полями. Описано возможное использование таких материалов.

Композиционный материал, СВЧ диэлектрический нагрев, токи высокой частоты, полимер, нагрев, клей-расплав

I.N. Antonov, A.V. Pivovarov, A.V. Bozrikov

**MATHEMATICAL MODELLING OF THE COMPOSITE
MATERIAL ON THE BASIS OF CURRENT-CARRYING ARMATURE**

The article describes the possibility of creation of composite materials on the basis of a polymeric matrix with the electrospending armature, capable to cooperate with electromagnetic fields is described. Possible use of such materials is described.

Composite material, the microwave oven dielectric heating, currents of high frequency, polymer, heating, hot melt glue

Объективные потребности развития различных отраслей производства и техники обусловили создание различных новых конструкционных материалов с высокими прочностными характеристиками при минимизации их массы. Это становится возможным при изготовлении композиционных материалов на полимерной основе. За последние годы были достигнуты впечатляющие успехи в программировании свойств таких материалов.

Композиционные материалы обладают комплексом свойств и особенностей, отличающихся от традиционных конструкционных материалов (металлических сплавов) и в совокупности открывающие широкие возможности как для совершенствования существующих конструкций самого разнообразного назначения, так и для разработки новых конструкций и технологических процессов, например, получение теплогидроизоляционных покрытий, клеев-расплавов, клеящих пленок, материалов для создания защитных экранов от различных электромагнитных излучений на основе композитов, обрабатываемых электромагнитным полем высокой частоты (СВЧ электромагнитным полем, индукционным полем), либо взаимодействующих с данными полями.

Одним из основных технологических процессов обработки материалов и изделий является термообработка, в том числе диэлектриков. Термообработку диэлектриков можно осуществлять различными способами, включая СВЧ диэлектрический нагрев.

Хорошо известны технологические преимущества СВЧ диэлектрического нагрева: равномерный по сравнению с другими способами (конвективный, радиационный и контактный) объемный нагрев, скорость и безынерционность нагрева.

Таким образом, преимущества СВЧ диэлектрического и индукционного нагрева дают возможность объёмного разогрева композиционных материалов, имеющих требуемые эксплуатационные характеристики, такие как температура плавления и адгезия на поверхности, тем самым ускоряя процесс образования вязко-текучего состояния композитов.

Установки диэлектрического и индукционного нагрева для обработки создаваемых композиционных материалов должны удовлетворять определённым требованиям: они должны обеспечивать заданный технологический режим термообработки и быть экономически выгодными.

Режимы термообработки в различных технологических процессах могут быть разными, но, как правило, необходим равномерный по объему изделия нагрев с заданной скоростью нарастания температуры.

Таким образом, если вместо традиционных способов нагрева использовать нагрев с помощью энергии СВЧ и ТВЧ, то из-за проникновения волны в глубь объекта происходит преобразование энергии электромагнитных колебаний в тепло не на поверхности, а в его объеме, и потому можно добиться более интенсивного нарастания температуры при большей равномерности нагрева.

В качестве основы создаваемого композиционного материала предлагается взять какой-либо полимер с различными наполнителями или без таковых, обладающий высокими показателями адгезии.

Анализ литературных данных показал, что такой полимер, как, например, битум, не взаимодействует с электромагнитным полем ВЧ и СВЧ. Однако, зная, что СВЧ диэлектрический и индукционный нагрев являются объёмными, можно предположить, что композит будет нагреваться, если в объёме матрицы распределить частицы, взаимодействующие с СВЧ излучением либо с магнитным полем индуктора.

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

Для достижения поставленной цели требуется:

- выбрать матрицу, в качестве матрицы могут быть выбраны диэлектрики с различными эксплуатационными характеристиками в зависимости от назначения создаваемого композиционного материала (битумы, парафин, полиуретан, полиакрилат, натуральные или синтетические смолы);
- выбрать токопроводящую арматуру, в качестве которой предлагается использовать электропроводящий металлический порошок (алюминиевая пудра, железная пудра и т.п.);
- построить математическую модель оптимизации задачи по распределению температурного поля в матрице, созданной из электропроводящих частиц, расположенных равномерно в непроводящей среде;
- провести оптимизацию концентрации и размера электропроводящих частиц наполнителя в непроводящей среде.

Постановка задачи для создания тепловой модели материала с токопроводящей арматурой: среда бесконечна в трёхмерном пространстве. Разместим равномерно электропроводящие шары в электронейтральной не поляризуемой среде. Шары нагреваются переменным магнитным полем (индукционный нагрев) или переменным электрическим полем (СВЧ нагрев). Их температура поддерживается постоянной, и величина этой температуры определяет области плавления среды.

Представим себе частицы в виде шара радиуса R (рис. 1) в бесконечно протяженной среде с температурой T_0 .

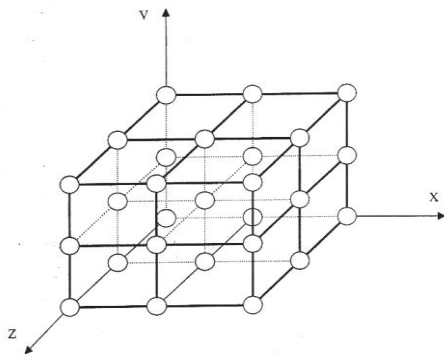


Рис. 1. Матрица из электропроводящих частиц в диэлектрической среде без поляризации

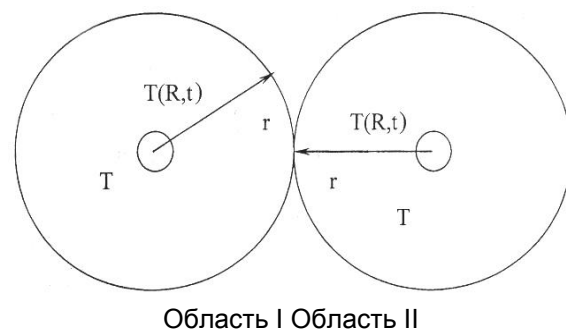


Рис. 2. Распределение температуры в диэлектрической среде

Для начального момента времени $t=0$ пусть температура шара будет $T_1 > T_0$ и поддерживается такой внешним источником. Температуропроводность среды λ , ее удельная теплоёмкость C и плотность ρ .

Выразим температуры в любой точке среды вне сферы для момента времени $t > 0$, определим распределение температуры в среде при $t \rightarrow \infty$ от одной сферы, считая, что они располагаются друг от друга на расстоянии, когда их взаимного, влияния нет или области I и II распространения температур полей не пересекаются (рис. 2).

Распределение температуры T определяется уравнением теплопроводности

$$\nabla^2 T - \frac{1}{\alpha^2} \frac{\partial T}{\partial t} = 0, \tag{1}$$

где $\alpha^2 = \frac{\nu}{c_\rho}$.

В сферических координатах T является лишь функцией r , поэтому

$$\nabla^2 = \left(\frac{1}{r} \frac{\partial^2}{\partial t} \right).$$

Решение представим в виде

$$T(r,t) = T_0 + \frac{R}{r} H(r,t), \tag{2}$$

где $H(r,t)$ удовлетворяет уравнению

$$\frac{\partial^2 H}{\alpha r^2} - \frac{1}{\alpha^2} \frac{\partial H}{\partial t} = 0. \tag{3}$$

Граничные условия:

а) $r = R, t > 0, H(R,t) = T_1 - T_0$,

б) $r > R, t = 0, H(r,0) = 0$;

Выразим решение уравнения (3) через функцию Грина

$$G(r,t | r^1, t^1), \tag{4}$$

удовлетворяющее уравнениям

$$\frac{\partial^2 G}{\partial r^{12}} + \frac{1}{\alpha^2} \frac{\partial G}{\partial t^1} = -\delta(r - r^1) \delta(t - t^1), \tag{5}$$

$$G(r,t | r^1, t^1) = 0 \text{ при } t^1 > t \tag{6}$$

$$G(r,t | R, t^1), \tag{7}$$

где $r, r^1 > R$, тогда

$$H(r,t) = \int_0^\infty H(R,t^1) \frac{\partial G(r,t | R,t^1)}{\partial R} dt^1 \tag{8}$$

Вычислим G , для этого рассмотрим функцию G_0 , определенную так, чтобы удовлетворять (5) и (6):

$$G(r - r^1, t - t^1) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(k, t - t^1) e^{jk(r - r^1)} dk. \tag{9}$$

Тогда для уравнения

$$k^2 f + \frac{1}{\alpha^2} \frac{\partial f}{\partial t} = \frac{S(t - t^1)}{2\pi} \tag{10}$$

Решение будет

$$f(k, t - t^1) = \frac{a^2}{2\pi} h(k, t - t^1) e^{-k^2 a^2 (t - t^1)}, \quad (11)$$

$$\text{где } h(t - t^1) = \begin{cases} \text{для } t > t^1 \\ \text{для } t < t^1 \end{cases}$$

Получим

$$G_0 = \frac{a^2}{2\pi} h(t - t^1) \int e^{-k^2 a^2 (t - t^1) + jk(r - r^1)} dk = \frac{ah(t - t^1) e^{-\frac{(r - r^1)^2}{4a^2(t - t^1)}}}{\sqrt{4\pi(t - t^1)}} \quad (12)$$

Вспользуемся методом изображений в электростатике и зададим G в виде

$$G = G_0(r - r^1, t - t^1) - G_0(2R - r - r^1, t - t^1) \quad (13)$$

Тогда уравнения (5)–(7) будут удовлетворяться в области $r, r^1 > R$. Следовательно,

$$\frac{\partial G(r, t | R, t^1)}{2a\sqrt{\pi}(t - t^1)^{\frac{3}{2}}} e^{-\frac{(r - R)^2}{4a^2(t - t^1)}}. \quad (14)$$

Тогда температура определяется выражением

$$T(r, t) = T_0 t \frac{R(T_1 - T_0)}{2ar\sqrt{\pi}} \int_0^1 \frac{e^{-\frac{(r - R)^2}{4a^2(t - t^1)}}}{(t - t^1)^{\frac{3}{2}}} dt^1. \quad (15)$$

При $t \rightarrow \infty$ интеграл стремится к своему предельному значению

$$\int_0^{\infty} e^{-\chi} d\chi = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \quad (16)$$

и поэтому

$$T \rightarrow T_0 + \frac{-(T_1 - T_0)R}{r}. \quad (17)$$

что и следовало ожидать, для статической задачи с граничными условиями $T(R) = T$, и $T(r) = T_0$ при $t \rightarrow \infty$.

Плоскость на оси симметрии между двумя шарами имеет температуру $T_n(r, t)$ плавления среды, она находится на расстоянии r_0 симметрично от центра каждого шара (рис. 3).

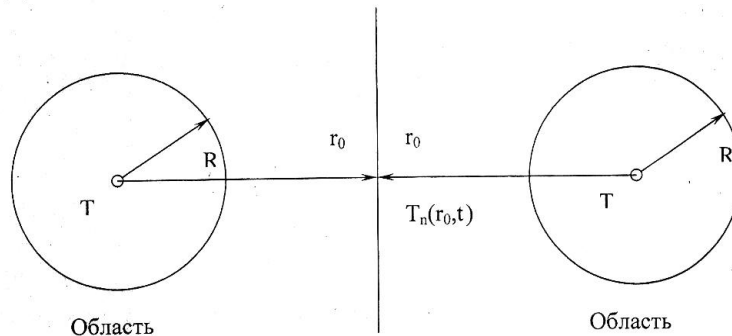


Рис. 3. Плоскость между шарами

Описанная выше математическая модель позволяет оценить распределение частиц в плоскости и в пространстве, оптимизировать расстояние между ними, что позволяет сформировать температурное поле в матрице вплоть до ее плавления. В программной среде ELCUT была построена упрощенная двумерная модель для заданных свойств среды, при этом были использованы результаты математического моделирования (рис. 4).

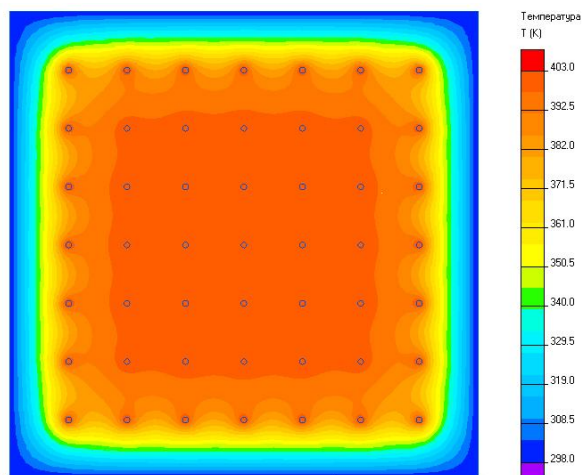


Рис. 4. Распределение температурных полей в композиционной матрице

В настоящее время в лабораторных условиях испытаны композитные материалы, обладающие перечисленными выше свойствами. Построена математическая модель и получены результаты по распределению температурных полей в композитных пленках.

Необходимо провести дополнительные экспериментальные исследования для выработки технических решений при создании установки под необходимый технологический регламент и соответствующий ему композиционный материал.

Проведенный математический анализ поведения температурных полей для сферических частиц дает основание надеяться на оптимизацию и оценку их концентрации в матрице при дальнейшем развитии этой модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. Архангельский Ю.С. Установки сверхвысокочастотного диэлектрического нагрева / Ю.С. Архангельский. – Саратов: СГТУ, 2010. – 279 с.
2. Окресс Э. СВЧ-энергетика / Э. Окресс. – М.: Мир, 1971., Т. 2. – 272 с.
3. Стреттон Дж. А. Электромагнетизм / Дж. А. Стреттон. – М.: ГИТТЛ, 1948. – 540 с.

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

Aleksey V. Bozrikov – Student
Department of Automated Electrical-Technological Plants and Systems,
Gagarin Saratov State Technical University

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

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

Пивоваров Александр Викторович – кандидат физико-математических наук, ведущий специалист по НИОКР ЗАО «ЭкоЗаводСтрой»

Aleksandr V. Pivovarov – Ph.D., Leading Expert on R&D
Joint-Stock Company "EcoZavodStroi"

Статья поступила в редакцию 17.05.12, принята к опубликованию 16.06.12

УДК 621.382

И.И. Артюхов, А.И. Земцов, А.Г. Сошинов

О ПОДХОДЕ К МОДЕЛИРОВАНИЮ МАГНЕТРОННОГО ГЕНЕРАТОРА МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Описывается модель магнетронного генератора малой мощности, которая позволяет исследовать статические и динамические характеристики в различных схемах источников питания.

Магнетронный генератор, математическая модель, источник питания, динамические характеристики

I.I. Artyukhov, A.I. Zemtsov, A.G. Soshinov

ABOUT THE APPROACH TO MODELLING OF THE MAGNETRON GENERATOR OF LOW POWER

The model magnetron generator of low power which allows to investigate static and dynamic characteristics in various schemes of power supplies is described.

Magnetron generator, mathematical model, power supply, dynamic characteristics

Магнетронные генераторы малой мощности (до 1000 Вт) широко применяются в бытовых печах СВЧ нагрева, а также в промышленных электротехнологических установках с распределенным подводом СВЧ энергии. Для питания таких генераторов часто применяется схема, которая показана на рис. 1. Особенностью этой схемы является применение одного силового трансформатора Т с двумя вторичными обмотками для создания цепей накала катода и анодного питания. Первичная обмотка трансформатора подключается к сети через фильтр электромагнитной совместимости (ЭМС) и коммутационное устройство (КУ), которое управляется блоком управления (БУ). Обмотка высокого напряжения и несимметричный удвоитель напряжения на конденсаторе С и диоде VD образуют источник анодного питания магнетрона.

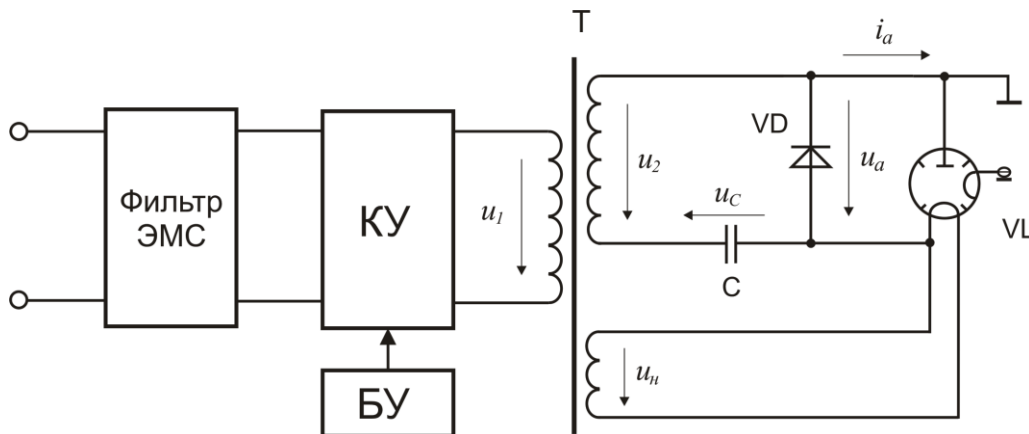


Рис. 1. Схема источника питания магнетронного генератора

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

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

На рис. 2 показаны осциллограммы, полученные при экспериментальном исследовании переходных процессов при пуске магнетрона М105. Схема питания магнетрона была реализована на трансформаторе ТВ-11, емкость конденсатора С составляла 1 мкФ. Запись осциллограмм напряжений и токов осуществлялась цифровым запоминающим осциллографом Fluke 196С, который имеет два гальванически изолированных входа. На вход «А» подавалось напряжение с делителя напряжения, включенного параллельно магнетрону, на вход «В» – с шунта, который соединял анод магнетрона с корпусом источника питания. Через оптический порт интерфейса RS-232 результаты измерения сигналов и растровые изображения экранов передавались на персональный компьютер для последующей обработки с помощью программного обеспечения FlukeView для Windows. Первый столбец на оси ординат осциллограмм относится к напряжению на делителе (показывает напряжение u_a на аноде магнетрона в масштабе 1:100, второй – к напряжению на шунте (показывает анодный ток i_a в масштабе 1 А/В).

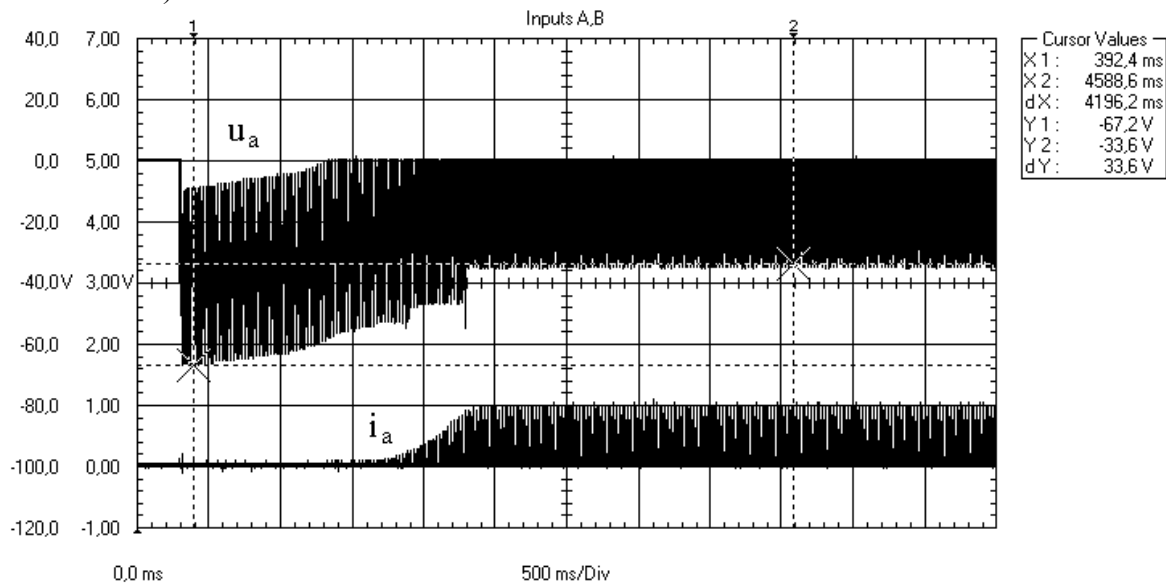


Рис. 2. Осциллограммы переходных процессов при включении источника питания магнетронного генератора

Из осциллограмм видно, что пока термоэмиссия катода не достигнет рабочего режима, источник анодного напряжения работает практически на холостом ходу. Вследствие этого анодное напряжение на первом этапе включения источника достигает удвоенного значения амплитуды напряжения на высоковольтной обмотке трансформатора (6720 В) при входном напряжении 230 В. Затем по мере разогрева катода и увеличения тока его эмиссии происходит возрастание анодного тока и соответствующее снижение анодного напряжения до 3360 В.

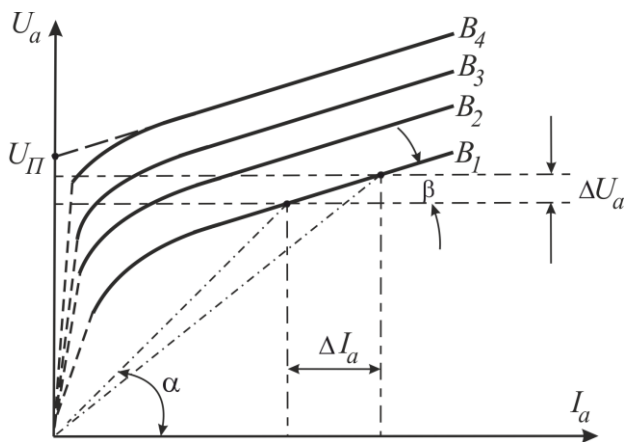


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики магнетрона при различных значениях магнитной индукции: $B_1 < B_2 < B_3 < B_4$

Для расчета параметров схемы на рис.1 и других схем питания магнетронного генератора необходимо иметь математическую модель, которая адекватно описывает электромагнитные процессы в динамических режимах.

При анализе статических режимов магнетронных генераторов обычно используют аппроксимированные вольт-амперные характеристики (ВАХ), представление о которых дает рис. 3.

ВАХ магнетрона имеет круто возрастающий начальный участок, показанный пунктиром на рис. 3. Далее следуют излом и почти горизонтальный участок, который имеет небольшой наклон к оси абсцисс и характеризует работу магнетрона в генераторном режиме.

В области малых анодных напряжений, меньших порогового ($U_a < U_{II}$), условия синхронизма между электронами и ВЧ-полем не выполняются. Поэтому колебания не возникают и ток $I_a = 0$.

Когда анодное напряжение достигнет пороговой величины, происходит самовозбуждение магнетрона и резкое нарастание анодного тока. После этого малое приращение анодного напряжения U_a ведет к тому, что величина тока I_a достигает максимальных значений, определяемых эмиссионной способностью катода [4].

В рамках теории, рассмотренной в [4,5], ВАХ магнетрона должны представлять собой семейство прямых, параллельных оси абсцисс. На практике увеличение тока I_a сопровождается ростом напряжения U_a . Экспериментальное значение порогового напряжения U_{II} определяется экстраполяцией пологой части характеристики до пересечения с осью ординат.

Так как ВАХ магнетрона нелинейная, вводится понятие двух видов внутреннего сопротивления магнетрона: статического R_{cm} и динамического R_d . Статическое сопротивление магнетрона характеризует величину его полного внутреннего сопротивления при постоянном рабочем анодном напряжении U_a . Статическое сопротивление R_{cm} является необходимой характеристикой для расчета источника питания магнетрона. Это сопротивление определяет полный рабочий ток, протекающий через магнетрон при рабочем режиме:

$$R_{cm} = \frac{U_a}{I_a} = tg\alpha. \quad (1)$$

Динамическое сопротивление магнетрона характеризует изменение внутреннего сопротивления магнетрона и определяет колебания рабочего тока при небольших изменениях напряжения ΔU_a :

$$R_d = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} = tg\beta. \quad (2)$$

Значение динамического сопротивления магнетрона необходимо для расчета стабильности источника питания. Значения статического сопротивления магнетрона обычно колеблются в пределах от нескольких сотен до тысяч Ом, а динамического сопротивления – в 6-10 раз меньше.

Необходимо отметить, что существующая модель магнетрона как нагрузки источника питания не учитывает зависимость параметров этой модели от температуры катода. Вместе с тем надежная эмиссионная способность катода достигается в ограниченном интервале температур. Ниже минимально допустимой температуры эмиссия становится недостаточной для получения необходимого уровня выходной мощности. Выше верхней границы происходит быстрое истощение активного компонента эмиттера, что приводит к потере эмиссии. Следовательно, при эксплуатации магнетрона подводимая к накалу мощность должна поддерживаться в заданных пределах.

Для исследования статических и динамических режимов магнетронного генератора малой мощности предлагается модель, схема которой показана на рис. 4.

Модель магнетрона как нагрузка источника питания представляет собой четырехполюсник, на одну пару выводов которого подается анодное напряжение u_a , на другую – напряжение накала катода u_k .

Для источника анодного питания магнетрон может быть представлен схемой замещения, которая включает последовательно соединенные источник противоЭДС, величина которой численно равна пороговому напряжению U_{II} , диод VD , характеризующий односторон-

ную проводимость магнетрона по анодной цепи, а также нелинейный резистор R_a , который моделирует динамическое сопротивление магнетрона.

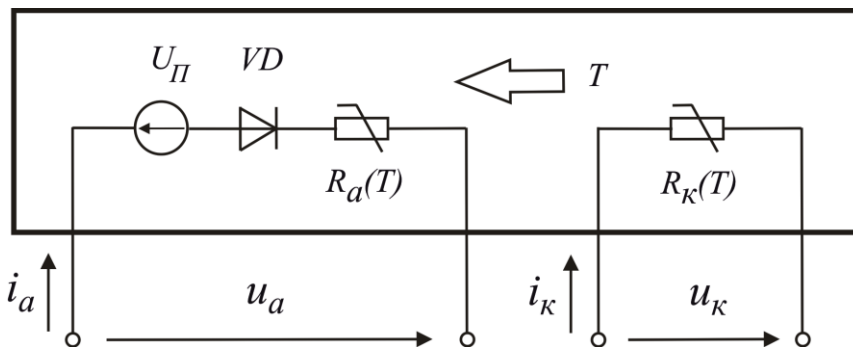


Рис. 4. Модель магнетронного генератора малой мощности

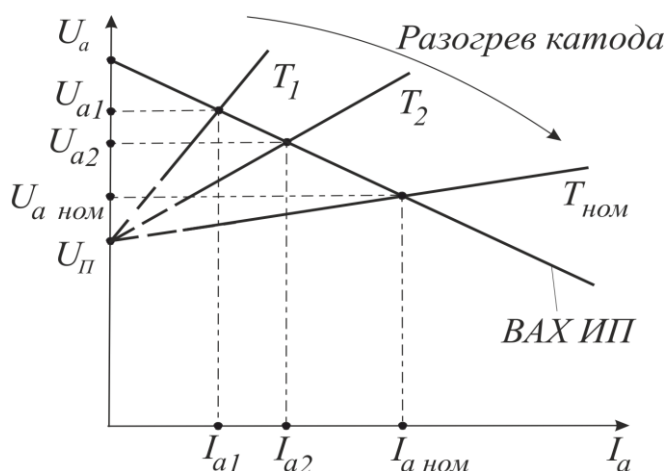


Рис.5. Изменение ВАХ магнетрона в процессе разогрева катода ($T_1 < T_2 < T_{ном}$)

Для источника анодного питания магнетрон может быть представлен схемой замещения, которая включает последовательно соединенные источник противо-ЭДС, величина которой численно равна пороговому напряжению U_{Π} , диод VD , характеризующий одностороннюю проводимость магнетрона по анодной цепи, а также нелинейный резистор R_a , который моделирует динамическое сопротивление магнетрона. При этом выдвигается гипотеза о том, что величина резистора R_a зависит от температуры катода T . Поэтому в процессе пуска магнетронного генератора величина этого резистора изменяется от некоторой максимальной величины при холодном катоде до установившегося значения при рабочей температуре катода. Сказанное поясняет рис. 5, на котором показаны ВАХ магнетрона для различных значений температуры катода и ВАХ источника анодного питания. В процессе разогрева катода сопротивление R_a уменьшается, что приводит к уменьшению наклона ВАХ магнетрона, вследствие чего анодный ток увеличивается, а напряжение на аноде – уменьшается.

Для анодной цепи магнетрона по схеме рис. 4 можно записать следующее уравнение:

$$F \cdot i_a \cdot R_a(T) + U_{\Pi} = u_a, \tag{3}$$

где F – логическая функция, которая равна 1, если выполняются условия генерации магнетрона, и нулю – в противном случае.

Катод в модели на рис. 4 представлен нелинейным резистором, величина которого связана с температурой катода T зависимостью

$$R_k = R_0 \cdot \left[1 + \alpha \left(T - T_0 \right) \right] \tag{4}$$

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

Уравнение для катодной цепи имеет вид

$$u_k = R_k \cdot i_k. \tag{5}$$

Для установления зависимости $R_a(T)$ воспользуемся формулой Ричардсона-Дэшмана для плотности тока термоэлектронной эмиссии

$$j = A \cdot T^2 \exp\left(-\frac{\varphi}{kT}\right), \quad (6)$$

где A – постоянный множитель; T – температура катода по абсолютной шкале Кельвина; φ – работа выхода электронов; k – постоянная Больцмана.

Из осциллограмм на рис. 2 видно, что анодный ток магнетрона начинает интенсивно увеличиваться спустя некоторое время после подачи питающего напряжения. Это происходит после того, как температура катода достигнет определенного значения. Далее ток возрастает по кривой, выражение для которой можно получить из формулы (3) путем перехода к усредненным величинам тока I_a и напряжения U_a :

$$I_a = \frac{U_a - U_{\Pi}}{R_a(T)}. \quad (7)$$

При достижении температуры катода значения $T = T_{ном}$ анодный ток становится равным номинальному значению $I_a = I_{а.ном}$. Этой точке переходного процесса соответствует номинальное значение сопротивления $R_a = R_{а.ном}$ по схеме замещения на рис. 4.

Найдем также величину анодного тока магнетрона для номинального режима с помощью формулы (6) и приравняем ее с величиной тока, рассчитанной по формуле (7). В результате после преобразований получим

$$U_a - U_{\Pi} = R_{а.ном}(T_{ном}) \cdot S \cdot A \cdot T_{ном}^2 \exp\left(-\frac{\varphi}{kT_{ном}}\right), \quad (8)$$

где S – эффективная площадь катода.

Учитывая незначительное изменение анодного напряжения на участке интенсивного возрастания анодного тока, аналогичное выражение можно записать для любой точки этого участка

$$U_a - U_{\Pi} = R_a(T) \cdot S \cdot A \cdot T^2 \exp\left(-\frac{\varphi}{kT}\right). \quad (9)$$

Далее на основании выражений (8) и (9) получим формулу для нахождения эквивалентного анодного сопротивления

$$R_a(T) = R_{а.ном} \left(\frac{T_{ном}}{T}\right)^2 \exp\left(\frac{\varphi \cdot (T_{ном} - T)}{k \cdot T_{ном} \cdot T}\right). \quad (10)$$

Температуру катода можно определить в результате решения дифференциального уравнения теплового баланса

$$cm dT + (\alpha_k + \alpha_u)ST dt = I_k^2 R_k \cdot dt. \quad (11)$$

где c – удельная теплоемкость; m – масса катода; α_k, α_u – соответственно коэффициенты удельных потерь катода и изоляции; I_k – действующее значение тока катода; R_k – сопротивление катода, рассчитываемое по формуле (4).

При расчете тока катода будем считать, что накал катода осуществляется от источника синусоидального напряжения \underline{U}_H , обладающего внутренним активно-индуктивным сопротивлением $\underline{Z}_H = R_H + jX_H$. В этом случае комплекс тока катода определится по формуле

$$\underline{I}_k = \frac{\underline{U}_H}{R_H + R_k + jX_H}. \quad (12)$$

Переходя к действующим значениям величин, получим следующее выражение для тока катода

$$I_k = \frac{U_H}{\sqrt{(R_H + R_k)^2 + X_H^2}}. \quad (13)$$

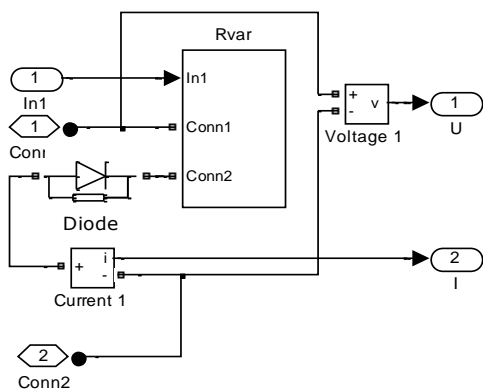


Рис. 6. Схема модели анодной цепи магнетрона

Уравнения (3) – (5), (10), (11) и (13) образуют систему, которая позволяет описать магнетрон как нагрузку источника питания. Полученная таким образом модель магнетрона реализована в среде MATLAB+Simulink и применена для исследования различных схем магнетронных генераторов.

На рис. 6 представлена схема модели анодной цепи магнетрона, оформленная в виде subsystemы «Anod». Элемент модели резистор «Rvar» изменяет свое сопротивление по сигналу управления, приходящему на вход In1 выхода Out4 из модели накальной цепи магнетрона, представленной на рис. 7.

Модель цепи накала, оформленная в подсистему «Nakal», функционирует следующим образом. Элементы «Current Measurement» и «Voltage

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

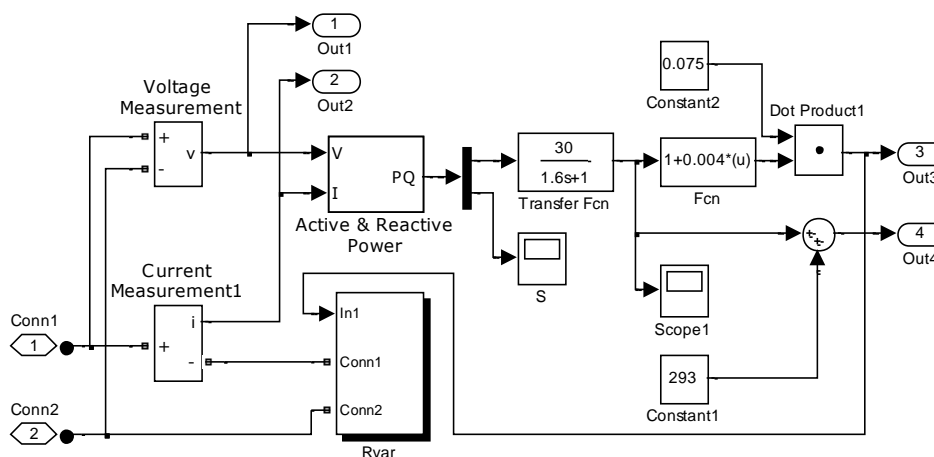


Рис. 7. Схема модели накальной цепи магнетрона

Затем сигнал с блока «Active and Reactive Power» подается в блок «Transfer Fcn», на выходе которого определяется приращение температуры накала. Далее блоки «Fcn», «Constant2» и «Dot Product» вычисляют значение сопротивления накала согласно выражению (2), после чего данный сигнал подается в канал управления блоком «Rvar». Блок «Constant1» задает начальные условия для температуры накала магнетрона.

С помощью модели магнетрона как элемента электротехнической системы проведено исследование переходных процессов в системах электропитания, построенных по различным схемам. Сравнение результатов экспериментального исследования и моделирования показало их хорошую сходимость.

ЛИТЕРАТУРА

1. Артюхов И.И. Магнетронные генераторы для установок СВЧ нагрева: учеб. пособие / И.И. Артюхов, М.А.Фурсаев. – Саратов: СГТУ, 2000. – 48 с.
2. Артюхов И.И. Направления совершенствования мультигенераторных СВЧ электро-технологических установок / И.И. Артюхов, А.И. Земцов // Вестник СГТУ. – 2011. – № 1(54). – Вып. 3. – С. 151-156.
3. Артюхов И.И. Переходные процессы при включении источника питания магнетронного генератора / И.И. Артюхов, А.И. Земцов, А.Г. Сошинов // Вестник СГТУ. – 2010. – № 3 (47). Вып. 2. – С. 59-61.

4. Милованов О.С. Техника сверхвысоких частот / О.С. Милованов, Н.П. Собенин. – М.: Атомиздат, 1980. 464 с.

5. Лебедев И.В. Техника и приборы сверхвысоких частот. Т.П. Электровакуумные приборы СВЧ / под ред. Н.Д. Девяткова. – М.: Высш. шк., 1972. – 376 с.

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

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

Земцов Артем Иванович –
преподаватель кафедры «Электроснабжение
промышленных предприятий» филиала
Самарского государственного технического
университета в г. Сызрани

Artem I. Zemtsov –
Teacher
Department of Power Supply
of Industrial Enterprises Branch of Samara State
Technical University in Syzran

Сошинов Анатолий Григорьевич –
кандидат технических наук, доцент, заведующий
кафедрой «Электроснабжение промышленных
предприятий» Камышинского технологического
института (филиала) Волгоградского
государственного технического университета

Anatoliy G. Soshinov –
PhD, Associate Professor
Head: Department of Power Supply
of Industrial Enterprises
Kamyshin Technological Institute (Branch)
Volograd State Technical University

Статья поступила в редакцию 12.05.12, принята к опубликованию 11.06.12

УДК 621.365.5

Ю.С. Архангельский, Е.М. Гришина, Е.В. Колесников

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОЦИАЛЬНЫХ ПОСЛЕДСТВИЙ В ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

Приведены соотношения для оценки социальных последствий тенденций и вариантов развития бизнеса в электротехнологии.

Социальные последствия, электротехнология, чистый дисконтированный эффект, тариф, варианты развития бизнеса

Yu.S. Arkhangelskiy, E.M. Grishina, E.V. Kolesnikov

MATHEMATICAL MODELING SOCIAL CONSEQUENCE IN ELECTROTECHNOLOGY

The brought correlations for estimation social consequence trend and variant of the development of the business in electrotechnology.

The social consequences, electrotechnological, clean discounts effect, tariff, variants of the development of the business

В условиях рыночной конкуренции при принятии решений на стадии проектирования и прогнозов надо использовать максимально большое число параметров, характеризующих структуру проектируемой установки, ее элементную базу, режим работы, технологические параметры, свойства обрабатываемого объекта, условия эксплуатации, стоимостные характе-

ристики проекта. Такие возможности представляет интегральный за срок службы установки доход [1] (чистый дисконтированный доход [2]).

$$\mathcal{E}_{\Sigma} = \sum_{t=0}^T \left[\sum_{j=1}^n (P_j C_j) + H_t + S_t + M_t - Z_t \right] (1+E)^{-t} + \Phi(1-E)^{-T}, \quad (1)$$

где P_j, C_j – количество j -й продукции и цена единицы j -й продукции, выпущенной на t -м шаге расчета; n – число видов выпускаемой продукции на горизонте расчета $T=t_{сл}$; $t_{сл}$ – срок службы эксплуатации установки; H_t, S_t – стоимостные оценки сопутствующего эффекта в производственной сфере и социального эффекта на t -м шаге расчета; m_t – остаточная стоимость основных фондов производственной инфраструктуры, исключенных из эксплуатации и реализованных на рынке на t -м шаге расчета; Z_t – эксплуатационные издержки на работу установки, включая налоги и платежи, на t -м шаге расчета; E – норма дисконта (определяется финансовой политикой государства и меняется в пределах 0,08 - 0,12 для статично развивающейся экономики); Φ_T – остаточная на момент времени T стоимость основных фондов.

На базе соотношения (1) выполнены, например, системные технико-экономические расчеты применительно к СВЧ электротехнологическим установкам [1, 3-5]. В то же время социальный аспект электротехнологии [6] остается, по сути дела, не исследованным, тогда как исследование социального аспекта такой отрасли, как электротехнология, имеет значение для успешного развития социального государства.

Соотношение, связывающее социально значимые и электротехнологические параметры можно получить следующим образом, воспользовавшись соотношением (1).

Эксплуатационные издержки можно представить в виде

$$Z = C + C_{ин}, \quad (2)$$

где $C = C_c + C_3 + C_{зп} + C_{зч} + C_a + C_{бр}$ – издержки производства; $C_{ин} = C_{пр} + C_{ндс} + C_{им} + C_{ни} + C_{\%} + C_y$ – налоги и платежи; C_c – затраты на сырье; C_3 – затраты на электроэнергию и воду; $C_{зп}$ – затраты на заработную плату; $C_{зч} = \gamma_{зч} K$ – затраты на запасные части (резервирование); $C_a = \gamma_a K$ – амортизационные отчисления; $C_{бр}$ – затраты на брак; $C_{пр} = (ПЦ - C) \gamma_n$ – налог на прибыль; $C_{ндс} = (ПЦ - C) \gamma_{ндс}$ – налог на добавленную стоимость; $C_{им} = \gamma_{им} K$ – налог на имущество; $C_{ни} = \gamma_{ни} K$ – начисления на заработную плату; $C_{ни}$ – затраты на научные исследования; $C_{\%} = \frac{B_{кр}}{t_{кр}} (1 + i_{кр})$ – плата за кредит на время кредита $t_{кр}$ с учетом процентной ставки $i_{кр}$,

$C_y = [(ПЦ - C)(1 - \gamma_n) - (ПЦ - C) \gamma_{ндс} - \gamma_{им} K - \gamma_{зч} C_{зч} - \frac{B_{кр}}{t_{кр}} (1 + i_{кр})] \gamma_y$ – выплаты дивидендов;

$\gamma_n, \gamma_{ндс}, \gamma_{им}$ – коэффициенты, учитывающие налоги на прибыль, на добавленную стоимость, на имущество; γ_y – коэффициент, учитывающий условия участия учредителей в распределении прибыли; $B_{кр} = K$ – банковский кредит; K – капиталовложение в проект; $\gamma_{зч}, \gamma_a$ – коэффициенты, учитывающие доли K , приходящиеся на запасные части (резервирование) и амортизационные отчисления.

Упростим (1) с учетом (2) при следующих предположениях: банковский кредит краткосрочный ($t_{кр} = 1$ год), выдается в начале реализации проекта; установка выпускает один вид продукции ($n=1$); $M=\Phi=N=S=C_{ин}=C_{бр}=0$; установка потребляет только электроэнергию, то есть $C_3=Q_3=T_3$, где Q_3 – расход в год электроэнергии; T_3 – тариф на электроэнергию. Тогда естественно выбрать $T=1$ год и (1) переписывается в виде

$$\mathcal{E}_{\Sigma} = (ПЦ - C_c)(1 - \gamma_n - \gamma_{ндс})(1 - \gamma_y) - Q_3 T_3 (1 - \gamma_n - \gamma_{зч})(1 - \gamma_y) - K[1 + i_{кр} + \gamma_{им} + (\gamma_{зч} + \gamma_a)(1 - \gamma_n)](1 - \gamma_y). \quad (3)$$

Это соотношение связывает социально значимые параметры $\mathcal{E}_{\Sigma}, ПЦ, C_c, \gamma_n, \gamma_{ндс}, \gamma_y, \gamma_{зч}, T_3, K, i_{кр}$. Оно позволяет получить, например, предельно допустимые значения тарифа на электроэнергию T_3 и капиталовложения K . Так, при $\mathcal{E}_{\Sigma} = 0$

$$T_{\text{эmax}} = \frac{(\Pi\Pi - C_c)(1 - \gamma_n - \gamma_{ндс})}{\Phi_y(1 - \gamma_n)} - \frac{C_{3н}(1 - \gamma_n - \gamma_{ндс})}{\Phi_y(1 - \gamma_n)} - \frac{K[1 + \gamma_n + \gamma_{ндс} + (\gamma_{зч} + \gamma_a)(1 - \gamma_n)]}{\Phi_y(1 - \gamma_n)} \quad (4)$$

$$T_{\text{эmax}} = \frac{(\Pi\Pi - C_c)(1 - \gamma_n - \gamma_{ндс}) - Q_3 T_3 (1 - \gamma_n) - C_{3н}(1 - \gamma_n - \gamma_{ндс})}{1 + \gamma_n + \gamma_{ндс} + (\gamma_{зч} + \gamma_a)(1 - \gamma_n)} \quad (5)$$

Соотношения (4) и (5) определяет максимальный тариф на электроэнергию и максимальную стоимость установки, при которых можно в течение года эксплуатации установки вернуть банку кредит, выплатит налоги, заработную плату и дивиденды.

В [4, 5] показано, как соотношение (3) можно использовать для технико-экономической оптимизации элементной базы электротехнологического оборудования с учетом режима реализации заданного технологического процесса. Это же соотношение может быть использовано для оценок социальных последствий наблюдающихся тенденций и возможных вариантов развития бизнеса.

В качестве примера рассмотрим социальные последствия известной тенденции роста тарифа за электроэнергию. Рост T_3 имеет принципиальное значение для бизнеса, основанного на эксплуатации электротехнологического оборудования.

Соотношение (3) объединяет 16 параметров: \mathcal{E}_Σ , Π , Π , C_c , Q_3 , T_3 , $C_{3н}$, K , γ_n , $\gamma_{ндс}$, γ_y , $\gamma_{им}$, $i_{кр}$, $\gamma_{зп}$, γ_a , $\gamma_{зч}$. Подобная ситуация имеет место в теории тепломассопереноса. Так, явление естественной конвекции определяется 10 физическими величинами, входящими в формулу Ньютона. Объединение физических и геометрических параметров задачи в безразмерные комплексы (критерии) позволяет описать теплообмен в условиях естественной конвекции всего 3 критериями – Нуссельта Nu , Грасгофа Gz и Прандтля Pr . Используя эту идею, перепишем соотношение (3) в критериальной форме.

$$\Pi_p = H_{n1} - (C_p H_{n1} + \mathcal{E}_{n2} H_{n2} + 3_n H_{n3} + K_\varepsilon H_{n4}),$$

где $\Pi_p = \frac{\mathcal{E}_\Sigma}{\Pi y} = 1 - \frac{3}{\Pi y}$ – критерий прибыли (по своей структуре и смыслу аналогичен КПД в

энергетике); $C_p = \frac{C_c}{\Pi y}$ – критерий сырья; $\mathcal{E}_n = \frac{Q_3 T_3}{\Pi y}$ – критерий энергии; $3_n = \frac{C_{3н}}{\Pi y}$ – критерий

зарплаты; $K_\varepsilon = \frac{K}{\Pi y}$ – критерий капиталовложения;

$$H_{n1,2,3,4} = \frac{(1 - \gamma_n - \gamma_{ндс})(1 - \gamma_y)}{(1 - \gamma_n)(1 - \gamma_y)} \frac{(1 - \gamma_n - 3_n)(1 - \gamma_y)}{[+ i_{кр} + \gamma_{им} + (\gamma_{зч} + \gamma_a)(1 - \gamma_n)](1 - \gamma_y)}.$$

Отметим, что критерии $H_{n1,2,3,4}$ при конкретных расчетах являются величинами заданными, так как зависит от величин, определённых государственными структурами, банком, решением учредителей предприятия. Их можно считать переменными при исследовании, например, социальных последствий налоговой и банковской политики.

Итак, пусть T_3 из года в год растет, скажем, по линейному закону, то есть

$$(\mathcal{E}n)_n = (\mathcal{E}n)_0 + \frac{Q_3 \Delta T_3}{\Pi y} n,$$

где n – число лет, прошедших с момента, принятого за начало повышения тарифа T_3 ; $(\mathcal{E}n)_0$, $(\mathcal{E}n)_n$ – критерии энергии в первый год и по прошествии n лет; ΔT_3 – рост тарифа в течении года.

Тогда тариф достигает своего максимального значения $T_3 \text{ max}$ через N лет:

$$N = \frac{[(\mathcal{E}n)_N - (\mathcal{E}n)_0] \Pi y}{Q_3 \Delta T_3} \Rightarrow N = \frac{T_3 \text{ max} - T_0}{\Delta T_3}.$$

Если предприниматель все эти N лет не повышал цену единицы продукции $У$, не увольняя работников, не уменьшал им заработную плату, а мероприятия по энергосбережению были им реализованы в прошлые годы, то через N лет он должен прекратить свой биз-

нес и уволить работников, какая-то часть которых пополнит ряды безработных. Кроме того, на рынке не будет N единиц выпускаемой этим предпринимателем продукции.

Рассмотрим вариант, когда предприниматель будет стремиться сохранять прибыль. Он может для этой цели уменьшить затраты на заработную плату (уменьшить работникам месячную заработную плату или уволить часть работников, или уменьшить C_{3n} и одновременно увеличить $У$, или, сохраняя C_{3n} , увеличить $У$.

Пусть критерий энергии $Эн$ растет по (7), но критерий прибыли $Пр = const$ за счет уменьшения критерия зарплаты, скажем по линейному закону

$$(3n)_n = (3n)_0 - \Delta 3n_n,$$

где $\Delta 3n$ – уменьшение затрат на заработную плату в год.

Тогда согласно соотношению (6) $Пр = const$ при

$$\Delta 3n = \frac{Q_э \Delta T_э Hn_2}{P_y Hn_3}.$$

Через N лет согласно соотношению (7) – (10)

$$(3n)_N = (3n)_0 - (Эн)_0 \frac{T_э_{max} - T_э_0}{T_э_0} \frac{Hn_2}{Hn_3},$$

где $(3n)_N$ – критерий зарплаты по прошествии N лет, причем $T_э_{max}$ в (11) рассчитывается по соотношению (4) с учетом его увеличения за счет сокращения за N лет затрат на заработную плату C_{3n} в соответствии с (9)

Если $(3n)_N$ соответствует заработной плате, которую работники считают недостаточной, то вероятны массовые увольнения работников и возникновение проблем в бизнесе предпринимателя.

Аналогичным образом можно оценить социальные последствия роста $T_э$ в том случае, когда предприниматель будет компенсировать уменьшение $Пр$ одновременным увеличением цены единицы продукции $У$ и уменьшением $3n$.

Наконец, если предприниматель несмотря на рост тарифа на электроэнергию $T_э$ захочет сохранить $Пр = const$ или даже увеличить этот критерий, увеличивая цену единицы продукции $У$, сохраняя $C_{3n} = const$, увеличение $У$ будет иметь социальные последствия: массовая реализация этого варианта приводит к подорожанию и технологического оборудования. А это означает, что возрастут цены на комплектующее, необходимые для модернизации технологического оборудования, то есть увеличится критерий $Kв$, что, в свою очередь, приведет к уменьшению критерия прибыли $Пр$.

Выводы

1. Социальный аспект электротехнологии остается пока что не исследованным.
2. Соотношение (3) связывает основные социально значимые параметры.
3. Для оценок социальных последствий тенденций и вариантов развития бизнеса соотношение (3) целесообразно представить в критериальной форме. Это позволяет вдвое уменьшить количество отдельных параметров, учитываемых при проведении оценок.
4. Получены соотношения, позволяющие оценить при известном темпе роста тарифа на электроэнергию и разных вариантах реакции бизнеса на этот рост социальные последствия – снижение заработной платы, увольнение работников и ликвидация производства продукции в энергоемких технологических установках, какими являются электротермические установки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Архангельский Ю.С. СВЧ электротермия / Ю.С. Архангельский. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 1998. – 408 с.
2. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов и их отбору для финансирования: официальное издание. – М.: Госстрой России, Минэкономики РФ, Минфинансов РФ, Госкомпром РФ, 1994. – 98 с.

3. Толстов В.А. Эффективность электротехнических установок / В.А. Толстов, Ю.С. Архангельский. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2000. – 146 с.

4. Колесников Е.В. Проектирование электротехнологических установок/Е.В. Колесников. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2006. – 288 с.

5. Архангельский Ю.С. Техничко-экономические и социальные аспекты электротехнологии / Ю.С. Архангельский // Вестник СГТУ. – 2010. – №3(47). – С. 103-105.

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 Worker of Science of the Russian Federation, Dr. Sc., Professor
Department of Automated Electrical-Technological Plants and Systems,
Gagarin Saratov State Technical University

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 Electrical-Technological Plants and Systems,
Gagarin Saratov State Technical University

Колесников Евгений Владимирович – доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А..

Evgeniy V. Kolesnikov – Dr. Sc., Professor
Department of Automated Electrical-Technological Plants and Systems,
Gagarin Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 14.05.12, принята к опубликованию 13.06.12

УДК 621.365.5

Ю.С. Архангельский, Е.М. Гришина, Е.В. Колесников

СОЦИАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Рассмотрены взаимосвязи электротехники и общества.

Электрический социум, электротехника, высшее образование

Yu.S. Arkhangelskiy, E.M. Grishina, E.V. Kolesnikov

THE SOCIAL ASPECTS ELECTRICAL ENGINEERS

Considered intercoupling electrical engineers and society.

Electric society, electrical engineering, higher education

Электротехника давно стала продуктивной силой развития общества. Крупные электротехнические проекты всегда были социотехническими. Так, план ГОЭЛРО предусматривал существенное увеличение правившего в СССР рабочего класса [1, 2]. Влияние на развитие электротехники социальных процессов изучено меньше.

В этой связи можно говорить о социотехнических системах, вкладывающих в себя социальные и технические части с их экономическими, политическими и нормативно-

правовыми взаимосвязями [3]. Организация и изменения в одной из этих частей обуславливают особенности развития другой части этой системы. Например, централизованное управление ЕЭС ССР было производной от административной системы советской системы. Произошедшие в нашей стране изменения, переход на рыночные отношения с присущей им конкуренцией привели к реструктуризации РАО ЕЭС России. Упадок ответственности и технической культуры в различных отраслях характерны и для электротехники, что привело к крупным авариям в Москве, Санкт-Петербурге с потерей электроснабжения населения, к катастрофе на Саяно-Шушенской ГЭС, лесные пожары в Подмосковье выявили бесхозные, неконтролируемые линии электропередачи.

К сожалению, мы пока не учли молодое поколение специалистов в области электротехники и электроэнергетики прогнозированию развития и проектированию электротехнических систем с учетом процессов в обществе и в электротехническом социуме. При этом под электротехническим социумом понимают среду, в которой осуществляется развитие электротехники, постановка новых социотехнических задач [2], то есть ученых, инженеров, рабочих, предпринимателей, а в широком смысле – все общество в той части, в какой оно обеспечивает развитие и успешную эксплуатацию электротехнических систем и объектов.

Для нас как граждан и преподавателей важны практика и перспективы воспроизводства электротехнического социума. По мнению президента Академии электротехнических наук, члена-корреспондента РАН П.А. Бутырина, можно говорить о трех этапах развития образования в нашей стране [3].

В царской России финансирование образования с 1900 г. по 1913 г. выросло в 2,4 раза, а число студентов – в 4 раза, и даже после революции 1917 г. профессора и преподаватели вузов в основном остались в России. Это сохранило систему электротехнического образования и обеспечило реализацию плана ГОЭЛРО.

В начале советского этапа финансирование образования в 1926-1932 гг. выросло в 9 раз, а число студентов – более чем вдвое. Это обеспечило подготовку инженерного корпуса, решившего задачу создания оборонной промышленности в годы Великой отечественной войны.

На современном этапе финансирование образования весьма умеренное. Вузы постепенно превращаются в организации по оказанию образовательных услуг. После повышения заработной платы в силовых ведомствах зарплата профессорско-преподавательского состава вуза будет в разы меньше зарплаты выпускников военных и полицейских рабочих заведений, а после объявленного повышения зарплаты работникам дошкольных детских учреждений, преподаватели профессиональных училищ заработная плата этой категории служащих сравнится с зарплатой докторов наук, профессоров, кандидатов наук, доцентов и ассистентов. В этих условиях неизбежна деградация преподавательского состава вузов по разным критериям, снижения уровня подготовки выпускников электротехнических специальностей, потеря перспектив инновационного развития электротехники. Кстати, в начале 2011/2012 учебного года Председатель Правительства РФ на встрече с ректорами вузов говорил о недопустимо неравномерном распределении фонда зарплаты по должностной сетке вузов, но пока никаких изменений в этом вопросе не наступило.

Успехи в развитии электротехники сказываются на ментальности общества. Так, план ГОЭЛРО и его реализация увеличили число верящих в научно-технический прогресс и его общественную пользу. Сейчас естественный уход и административное «омоложение» больших групп ученых, преподавателей вузов старшего поколения с коллективными ценностями и приход в социум новых социальных групп с ценностями индивидуализма меняют ментальность социума в целом и электротехнического социума, в частности.

Новые ценности способны породить протестные настроения. Например, в Германии отказались от атомных станций и, следовательно, принятой пока что в мире стратегии развития энергетики. Такие настроения ширятся, особенно после катастрофы АЭС в Японии, имеют они хождения и в России. Можно говорить, что в нашей стране большие системные инновационные электротехнические проекты уступают место несистемным инновационным проектам, например проектам автономного энергоснабжения.

Подготовку новых поколений ученых, преподавателей-электротехников, инженеров в современной России придется осуществлять в рамках принципиально новой организации вуза, его учебного и научного процессов. Имеется в виду бакалаврско-магистерская система образования.

В начале 1990-х ректорский корпус, поддержанный общественностью, энергично возражал против отказа от, по сути дела, немецкой, введенной еще Петром I системы подготовки инженеров и перехода к англо-американской системе подготовки бакалавров и магистров. И это дало результат: было решено использовать обе эти системы. Правда, студенты, обучающиеся в бакалавриате, практически поголовно пользовались правом выбора траектории обучения и переходили на инженерную подготовку. Но затем такие переходы запретили, потом в высшей школе России заменили термин «инженер» на «специалист» и, наконец, было заключено международное соглашение о переходе высшей школы России на англо-американскую систему. Можно строить догадки, почему на этой раз ректорский корпус изменил свое отношение к этой проблеме, хотя отношение общественности, корпуса вузовских преподавателей, похоже, не изменилось. Видимо, и руководители промышленности еще не в полной мере поняли, что к ним через некоторое время придут выпускники вузов не с пятилетним, а с четырехлетним образованием. Хотя нужно признать, ГОС четвертого поколения лучше его предшественника.

Однако оставлена подготовка специалистов (инженеров) по некоторым специальностям с обучением более пяти лет. Это означает признание преимуществ инженерного образования, например инженеры-строители, способные построить здание атомной электростанции, которое устоит при падении на его крышу самолета. Но ведь под этой крышей эксплуатировать атомную установку будут выпускники бакалавриата энергетических факультетов.

Выводы

1. Социальные аспекты электротехники практически не исследованы. Эта тематика нуждается в системном изучении.
2. Система высшего образования воспроизводит электротехнический социум, и от проводимой реформы высшего образования зависит успех заявленного в России инновационного развития.
3. В вузах пока не учат молодое поколение специалистов в области электротехники прогнозировать развитие и проектирование электротехнических систем с учетом процессов в обществе и электротехническом социуме.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бутырин П.А. Электротехника и общество: взаимосвязанное развитие / П.А. Бутырин // Изв. РАН. – Энергетика. – 2008. – № 6.
2. Андреев А.Л. Социология техники: учеб. пособие / А.Л. Андреев, П.А.Бутырин, В.Г. Горохов. – М.: Альфа-М, 2009. – 288 с.
3. Бутырин П.А. Электротехника и общество. Взаимосвязанное и взаимообусловленное развитие / П.А. Бутырин // Воздействие интенсивных потоков энергии на вещество: Международный молодежный конф. – СПб, 2011.

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 Worker of Science of the Russian Federation, Dr. Sc., Professor Department of Automated Electrical-Technological Plants and Systems, Gagarin Saratov State Technical University

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 Electrical-Technological Plants and Systems,
Gagarin Saratov State Technical University

Колесников Евгений Владимирович – доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Evgeniy V. Kolesnikov – Dr. Sc., Professor
Department of Automated Electrical-Technological Plants and Systems,
Gagarin Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 14.05.12, принята к опубликованию 13.06.12

УДК 539.234

Ю.С. Архангельский, К.Н. Огурцов

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ НАГРЕВ ДИЭЛЕКТРИКОВ С ФАЗОВЫМИ ПЕРЕХОДАМИ

Приведена математическая модель и результаты ее численного решения кинетики высокотемпературных процессов нагрева материала с фазовыми переходами.

Математическая модель, высокотемпературный нагрев, диэлектрик, СВЧ энергия

Yu.S. Arkhangel'skiy, K.N. Ogurtsov

HIGH-TEMPERATURE HEATING OF DIELECTRICS WITH PHASE TRANSITIONS

The article presents a mathematical model and the results of the numerical solution of the kinetics of high temperature processes of heating the material with the phase transition.

Mathematical model, high-temperature heating, dielectric, microwave energy

Стремление создать новые материалы и модифицировать уже известные приводит исследователей к созданию новых технологий и к нетрадиционному использованию уже известных. Одним из таких перспективных направлений является использование СВЧ диэлектрического нагрева для реализации высокотемпературных технологий: выращивание кристаллов из расплавов, получение наноматериалов, спекание керамик, получение композиционных и огнеупорных материалов. Эти технологии объединяет необходимость нагрева исходного материала до температур свыше 1000°C , причем нагрев сопровождается фазовыми переходами.

Перспективы использования высокотемпературного СВЧ диэлектрического нагрева сложно переоценить. Например, использование его при выращивании монокристаллов позволит увеличить равномерность распределения температуры в расплаве и затравке, что приведет к уменьшению дефектов в кристалле. Использование энергии СВЧ при получении наноматериалов (ультрадисперсных порошков) позволит повысить производительность в сравнении с другими электрофизическими методами, а отсутствие нагревательных элементов сведет к минимуму количество примесей в наноматериале.

Безусловно, наибольший интерес вызывает вопрос о предельных температурах, достигаемых в СВЧ электротермических установках при заданной мощности серийных генераторов, поскольку именно от этого зависит сфера применения этих установок.

Рассмотрим вариант конструкции высокотемпературной установки с СВЧ энергоподводом (рис. 1). Поскольку СВЧ диэлектрический нагрев позволяет равномерно распределить источники тепловой энергии в нагреваемом объекте, можно считать, что его температура во всех точках одинакова. В отличие от [1], где использовалось жидкостное охлаждение стенок рабочей камеры в рабочей камере, изображенной на рис. 1, присутствует теплоизоляционный слой. Детально рабочая камера и ее основные элементы показаны на рис. 2. Температуру стенок рабочей камеры можно считать не зависящей от координаты из-за высокой теплопроводности металлических стенок. Футеровка выполнена из одного слоя теплоизоляционного кирпича.

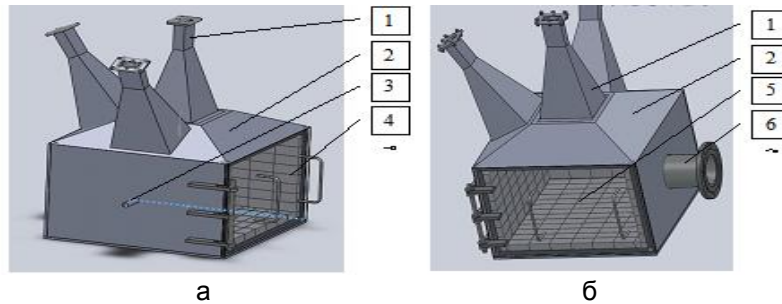


Рис. 1. Общий вид рабочей камеры для высокотемпературного СВЧ нагрева: 1 – рупорная антенна, 2 – рабочая камера, 3 – впускной канал, 4 – дверца рабочей камеры, 5 – футерующий элемент, 6 – выпускной канал

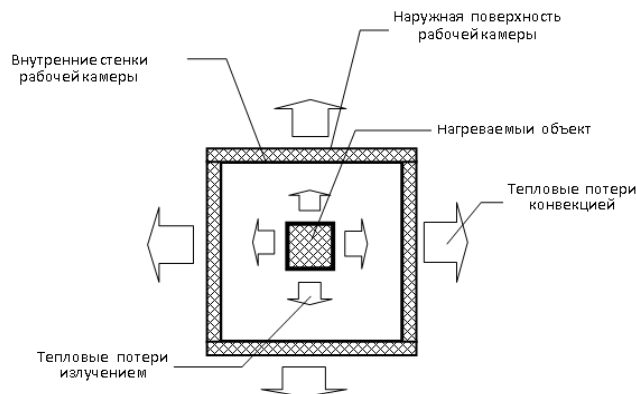


Рис. 2. Рабочая камера и ее основные элементы

Рассмотрим кинетику нагрева, плавления и испарения объекта в рабочей камере с футеровкой.

Мощность СВЧ генератора идет на нагрев объекта и на тепловые потери, большая часть которых осуществляются излучением на стенки камеры [2]

$$c_1 m_1 \frac{dT_1}{d\tau} = P_{ген} - \varepsilon_p C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] S_1. \quad (1)$$

Энергия, излученная нагреваемым объектом, расходуется на нагрев стенок рабочей камеры, нагрев футеровки и на тепловые потери в окружающую среду от внешней поверхности системы охлаждения:

$$c_2 m_2 \frac{dT_2}{d\tau} = \varepsilon_p C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] S_1 - \sum_{i=3}^n c_3 \rho_3 \frac{dT_i}{d\tau} - \alpha \left(T_n - T_0 \right) \mathfrak{S}_3. \quad (2)$$

Теплота, отдаваемая футеровке от внутренних стенок рабочей камеры, расходуется на нагрев футеровки и теплоотдачу в окружающую среду. Разобьем футеровку на $n-2$ слоя, тогда для каждого слоя с индексом i , начиная с $i = 3$ запишем уравнения:

$$\frac{dT_i}{d\tau} = a_i \frac{dT_i^2}{dx^2} \quad 2 < i < n \quad (3)$$

$$\frac{dT_n}{d\tau} = a_i \frac{dT_{n-1}^2}{dx^2} - \alpha_1 \rho_n (T_n - T_0) S_3 \quad i=n \quad (4)$$

В этих уравнениях c_1, c_2, c_3 – удельные теплоемкости нагреваемого материала, стенок рабочей камеры и огнеупора футеровки соответственно; m_1, m_2 – массы нагреваемого материала и стенок рабочей камеры; T_0, T_1, T_2 – температуры воздуха, нагреваемого материала, стенок рабочей камеры; S_1, S_2, S_3 – площади поверхностей нагреваемого материала, стенок внутри рабочей камеры и внешней поверхности футеровки; $\varepsilon_p = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)\phi_{21}}$, $\phi_{21} = \frac{S_1}{S_2}$;

C_0 – постоянная Стефана-Больцмана; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – степень черноты нагреваемого материала и стенок рабочей камеры; ρ_3 – плотность футеровки; α_1 – коэффициенты теплоотдачи конвекцией от поверхности футеровки в окружающую среду. Решая уравнения (1)-(3) методом конечных разностей [3], можно определить T_1, T_2, T_i как функции времени.

Высокотемпературный нагрев может сопровождаться фазовыми переходами: твердая фаза – жидкая, жидкая – газообразная. Такие фазовые переходы наблюдаются при выращивании кристаллов из расплавов и паров, получении наноматериалов из твердого материала конденсационным методом. Переход вещества из одного агрегатного состояния в другое обычно происходит с выделением или поглощением энергии (фазовый переход первого рода), при этом энергия фазового перехода зависит от многих факторов (например, энергия фазового перехода из твердого состояния в жидкое при атмосферном давлении для воды $T_{плавл}=0$ °С составляет $\Delta H=6,013$ кДж/моль, а из жидкого в газообразное $T_{испар}=100$ °С $\Delta H=40,683$ кДж/моль [4]).

При фазовом переходе первого рода температура нагреваемого объекта не изменяется, а подводимая к объекту энергия расходуется на совершение фазового перехода.

Количество теплоты, необходимое для совершения фазового перехода

$$Q = mq, \quad (5)$$

где q – удельная теплота фазового перехода.

Зная q , можно моделировать нагрев материала с учетом фазовых превращений. При заданных значениях теплофизических и геометрических параметрах материалов рабочей камеры, нагреваемого материала, мощности генератора и расхода охлаждающей воды можно найти зависимости температуры нагреваемого объекта, стенок рабочей камеры и воды от времени в процессе нагрева.

На рис. 3-4 приведены зависимости температур объекта, стенок рабочей камеры и распределение температуры по глубине футеровки при следующих условиях:

- мощность СВЧ генератора – 5 кВт;
- масса материала – 1 кг;
- внутренние размеры рабочей камеры – 300×300×300 мм;
- теплоемкость объекта – 1000 Дж/(кг·К);
- толщина футеровки – 25 мм.

На графике зависимости температуры нагреваемого объекта (рис. 3) можно выделить горизонтальные участки, соответствующие моментам плавления и испарения. Данная модель не учитывает изменения объема нагреваемого объекта в процессе нагрева, однако в силу того, что при плавлении изменение объема невелико, а испаренный материал в реальных установках по получению наноматериалов конденсационным методом постоянно откачивается из рабочей камеры результаты этого исследования позволяют определить параметры кинетики получения наноматериалов таким способом.

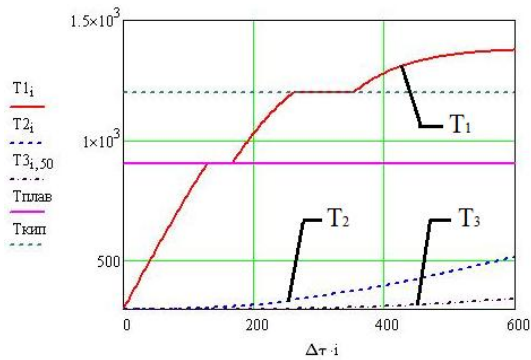


Рис. 3. Изменение температуры объекта (T_1), температуры стенок рабочей камеры (T_2) и температуры центрального слоя футеровки рабочей камеры (T_3)

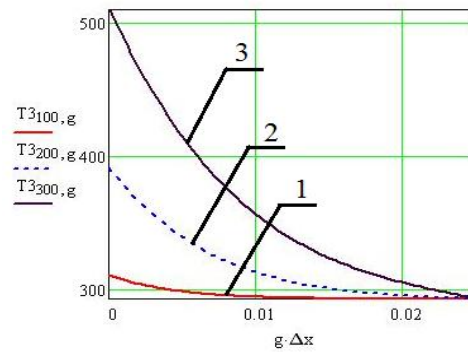


Рис. 4. Распределение температуры по толщине футеровки (1 – через 200 с нагрева, 2 – через 400 с нагрева, 3 – через 600 с нагрева)

Выводы

Таким образом, результаты математического моделирования кинетики нагрева, плавления и испарения исходного материала говорят о возможности реализации в СВЧ электро-термических установках высокотемпературных процессов с фазовыми переходами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Архангельский Ю.С. Математическое моделирование высокотемпературного нагрева диэлектриков с фазовыми переходами / Ю.С. Архангельский, К.Н. Огурцов // Вестник СГТУ. – 2010. – №3(47). – С.117-121.
2. Дульнев Г. Н. Тепло-и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре: учеб. пособие для вузов / Г.Н. Дульнев. – М.: Высш. шк., 1984. – 247 с.
3. Дульнев Г.Н. Применение ЭВМ для решения задач теплообмена: учеб. пособие для теплофизич. и теплоэнергетич. спец. вузов / Г.Н. Дульнев, В.Г. Парфенов, А.В. Сигалов. – М.: Высш. шк., 1990. – 207 с.
4. Физические величины: справочник / А.П. Бабичев [и др.]; под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.

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

Yuri S. Arkhangelskiy – Honoured Worker of Science of the Russian Federation, Dr.Sc., Professor
Department of Automated Electrical-Technological Plants and Systems,
Gagarin Saratov State Technical University

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

Konstantin N. Ogurtsov – Ph.D., Associated Professor
Head: Department of Automated Electrical-Technological Plants and Systems,
Gagarin Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 15.05.12, принята к опубликованию 14.06.12

УДК 621.311

Е.И. Баксаисов, С.Ф. Степанов

**БЕСПЛОТИННАЯ МИКРОГЭС С РОТОРНОЙ ГИДРОТУРБИНОЙ
ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ РАВНИННЫХ РЕК**

Рассматривается возможность применения роторных гидротурбин в бесплотинных микрогидроэлектростанциях, для преобразования энергии течения малых рек без создания дорогостоящих гидротехнических сооружений. Также описывается пример расчета основных гидроэнергетических показателей турбины с помощью ЭВМ. Приведен анализ полученных результатов расчета.

Гидротурбина, микрогидроэлектростанция, мощность, электроснабжение, энергия

E.I. Baksaisov, S.F. Stepanov

**THE MICRO-HPP WITHOUT THE DAM ON THE ROTOR-TYPE HYDRAULIC
TURBINE TO CONVERT THE ENERGY OF LOWLAND RIVERS**

The article considers an opportunity of application of rotary hydraulic turbines in the micro-HPP without dam, to convert the energy of the flow of small rivers without building expensive hydraulic structures. Also describes an example of calculation of the main hydro-energy indices of the turbine with the help of computer. The analysis of the received results of the calculation.

Hydraulic turbines, micro hydro, power, electricity, energy

Наша страна обладает значительными запасами водной энергии речных систем. При этом большое количество населенных пунктов расположено по берегам рек. Поэтому энергию рек можно широко использовать для получения небольших мощностей. Для этого не обязательно возведение сложных и дорогостоящих гидротехнических сооружений. Электроснабжение может осуществляться от бесплотинных микрогидроэлектростанций, не требующих создания статического напора.

Как правило, при проектировании гидротурбинного оборудования малых низконапорных ГЭС основное внимание уделяется не столько получению высоких энергокавитационных показателей турбины, сколько созданию надежного и дешевого оборудования, обеспечивающего заданную мощность. При этом в условиях малых перепадов между верхним и нижним бьефом нет необходимости в обеспечении высоких кавитационных показателей гидротурбины. Эти обстоятельства позволяют отказаться от дорогостоящих автоматизированных поворотно-лопастных конструкций направляющего аппарата и рабочего колеса и использовать сравнительно дешевую автоматизированную систему управления гидроагрегатом. Также в условиях малых низконапорных ГЭС целесообразно применять технологически простые в изготовлении лопастные системы гидротурбин, уменьшая тем самым трудоемкость и стоимость изготовления оборудования. Применение простых и технологичных в изготовлении лопастных систем приводит к некоторому снижению энергетических показателей гидротурбины, однако в каждом конкретном случае необходимо технико-экономическое обоснование конструкции лопастных систем на основе расчетной или экспериментальной оценки их гидравлических характеристик [1].

Существенно ускорить и оптимизировать оценку гидравлических характеристик помогают различные вычислительные комплексы, такие как Flow Vision, Ansys и т.д. Использование ЭВМ позволяет, исходя из математических уравнений, рассчитать поведение исследуемого объекта.

дуемой турбины в тех или иных условиях, которые определяет пользователь. В основу программного комплекса Flow Vision положен метод конечных объемов. Расчетная сетка Flow Vision – декартова, локально адаптивная. Локальная динамическая адаптация начальной сетки производится в соответствии с заданными пользователем критериями. Базовыми в Flow Vision являются уравнения Навье-Стокса и уравнения неразрывности, которые можно записать в компактном тензорном виде:

уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_k)}{\partial x_k} = 0, \tag{1}$$

уравнение Навье-Стокса

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_k \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) = \rho f_i - \frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \frac{\partial \sigma_{ki}}{\partial x_i}. \tag{2}$$

Пакет прикладных программ (ППП) для численного моделирования Flow Vision формально делится на 3 модуля, называемые Препроцессором, Солвером и Постпроцессором. В Препроцессоре строят геометрическую основу задачи – расчетную область, выбирают модели, граничные и начальные условия, а также параметры расчетной сетки и метода решения задачи. Солвер обеспечивает численное решение поставленной задачи. Постпроцессор служит для вывода и представления, прежде всего визуализации полученных в результате расчетов данных.

Расчётная область (рис. 1) создана при помощи внешней программы Solid Works, относящийся к семейству САДов [2]. Средой, в которой ведется расчёт, является вода плотностью $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$, скорость течения $v = 1,4 \text{ м/с}$. Прежде чем приступить к расчету, необходимо задать расчетную сетку во всей расчетной области. В данной задаче мы используем расчётную сетку размерностью $60 \times 60 \times 12$. Результаты расчёта можно выводить в различных удобных формах: изображение распределения давления на поверхности турбины методом цветовой заливки, двумерный график изменения вращающего момента, визуализация векторного поля скорости.

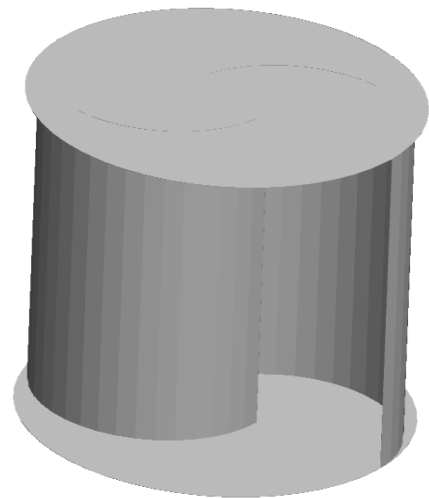


Рис.1. Роторная ортогональная гидротурбина с вертикальной осью вращения

График момента сил, вращающих турбину

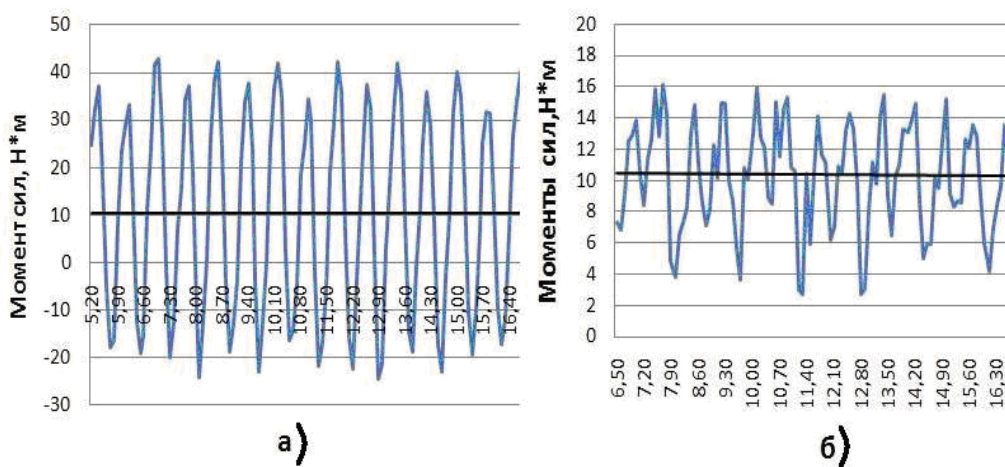


Рис. 2. График изменения момента турбины при вращении: а – график изменения во времени момента вращающих сил гидротурбины; б – график изменения во времени момента вращающих сил гидротурбины поделенной на секции

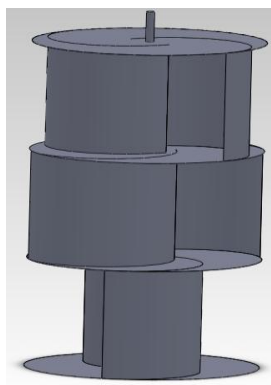


Рис.3. Роторная гидротурбина, состоящая из трех секций

На рис. 2а представлен результат расчета в форме графика зависимости вращающего момента от времени в секундах полученный с помощью Flow Vision. Из графика также видно, что роторная гидротурбина действительно имеет так называемую «мертвую точку» своего положения, когда плоскость, мысленно проведенная через все четыре кромки обеих цилиндрических лопастей, совпадает с направлением течения воды. В этом случае момент гидротурбины имеет наименьшее значение. При большой нагрузке она может даже остановиться.

Одним из способов устранения «мертвой точки» является разделение турбины на три секции двумя промежуточными дисками (рис. 3). Каждая секция смещается относительно двух других на 120° . Моделирование такой турбины с помощью ППП Flow Vision показало, что она не имеет «мертвой точки». Вращение становится более равномерным, уменьшается амплитуда биения.

Анализ полученных результатов свидетельствует о целесообразности применения роторных гидротурбин в бесплотинных микроГЭС. По рис. 2б можно установить среднее значение момента турбины равное $M=10$ Н·м. Расход воды через турбину составил $Q=3,15$ м³/с. Исходя из этого можно определить мощность проектируемой энергоустановки $P=0,6$ кВт. При применении накопителя энергии мощности установки вполне достаточно для электроснабжения одного жилого дома.

ЛИТЕРАТУРА

1. Николаенко Ю.И. Разработка экономичных гидроагрегатов для низконапорных малых гидроэлектростанций / Ю.И. Николаенко, А.В. Тарасов, Г.И. Топаж // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2010. – Т. 12. – № 1(2). – С. 472-475.
2. Применение пакетов прикладных программ при изучении курсов механики жидкости и газа / Т.В. Кондранин, Б.К. Ткаченко, М.В. Березникова, А.В. Евдокимов, А.П. Зуев. – М.: МФТИ, 2005. – 104 с.

Баксаисов Еркен Ибрахимович – ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Erken I. Baksaisov – Assistant
Department of Power Supply of Industrial Enterprises,
Gagarin Saratov State Technical University

Степанов Сергей Федорович – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Sergey F. Stepanov – Dr. Sc., Professor
Department of Power Supply of Industrial Enterprises,
Gagarin Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 16.05.12, принята к опубликованию 15.06.12

УДК 537.331.33

А.О. Бочкарев, М.В. Давидович, Р.К. Яфаров

СВЧ ПЛАЗМЕННЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПЛАЗМЕННОЙ МИКРООБРАБОТКИ ПЛАСТИН БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ

Рассмотрены современные конструкции многомодовых СВЧ плазменных устройств для прецизионной микрообработки пластин большого диаметра в

микроэлектронике. Обозначены дальнейшие перспективы их развития в виде многомодовых СВЧ устройств с соленоидно-мультипольным магнитным управлением и продольно-поперечным вводом энергии.

Микроволновая плазма, электронный циклотронный резонанс, волноводно-резонаторные устройства, микрообработка, интегральные схемы

A.O. Bochkarev, M.V. Davidovich, R.K. Yafarov

THE MICROWAVE PLASMA DEVICES FOR MICROMACHINING OF PLATES OF BIG DIAMETER

Modern designs of multimode microwave of plasma devices for precision micromachining of plates of big diameter in microelectronics are considered. Further prospects of their development in the form of multimode microwave of devices with solenoidal multipole magnetic control and wedge-reed input of energy are designated.

Microwave plasma, electronic cyclotron resonance, waveguide resonator devices, micro-machining, integrated circuits

Введение

Применение СВЧ плазмы для проведения различных процессов вакуумно-плазменной обработки материалов связано с ее уникальными электрофизическими свойствами и особенностями, основными из которых являются [1, 2]:

– широкий диапазон давлений, при которых возможно существование СВЧ газового разряда на основе различных инертных и химически активных плазмообразующих рабочих сред (от 0,01 до 100 Па), который включает рабочие давления всех известных методов вакуумно-плазменной обработки: от газовых разрядов в высокочастотном (ВЧ) электрическом поле на частоте 13,56 МГц до разрядов на постоянном токе. Диапазон рабочих давлений в вакуумно-плазменных системах выбирается не произвольно, а определяется характеристиками электрического разряда, используемого для возбуждения плазмы. Так, при низких давлениях (< 1,0 Па) затруднено существование самостоятельного ВЧ разряда из-за увеличенных потерь заряженных частиц на стенках камеры генерации плазмы. Вакуумирование разряда требует повышения частоты электромагнитного поля вплоть до СВЧ диапазона, а для «удержания» плазмы с целью уменьшения потерь частиц на стенках и повышения эффективности поглощения СВЧ мощности – приложения внешнего магнитного поля (для создания условий электронного циклотронного резонанса (ЭЦР));

– высокие вакуумная чистота СВЧ плазмы за счет отсутствия в ней каких-либо возбуждающих металлических электродов, так как волноводная и резонаторная плазмы являются безэлектродными, а процесс обработки с ее использованием вследствие этого является беспримесным;

– повышение частоты возбуждающего электрического поля способствует увеличению критической плотности электронов плазмы:

$$n_{кр} = 1,24 \cdot 10^4 \cdot f^2 \text{ [см}^{-3}\text{]},$$

где f – частота электромагнитного поля, в МГц. В связи с электронейтральностью плазмы ($n_e = n_i$) это увеличивает степень ее ионизации, которая может достигать 5...7% по сравнению с 10^{-4} % при использовании высокочастотного разряда и позволяет создавать сильноточные источники однократно заряженных положительных ионов, так как ионный ток насыщения, извлекаемый из источника, равен

$$j_i = 0,4en_i \left(\frac{2kT_e}{M} \right)^{1/2},$$

где $j_i = I_i/S$ – плотность ионного тока, I_i – ионный ток, S – сечение выходного отверстия ионного источника, k – постоянная Больцмана, e – заряд электрона, n_i – концентрация ионов невозмущенной плазмы вблизи выходного отверстия, T_e – температура электронного газа, M – масса иона;

– повышение частоты возбуждающего электромагнитного поля до СВЧ диапазона (2450 МГц) значительно увеличивает разрыв между электронной и ионной температурами. Низкая энергия ионов, которая в СВЧ плазме не превышает 20-30 эВ, делает ее «холодной» и снижает тепловое и радиационное воздействие на обрабатываемый материал, обеспечивая тем самым возможность проведения высококачественных (бездефектных) обработок поверхностей и тонких пленок широкого круга полупроводниковых и диэлектрических материалов;

– в отличие от высокочастотного разряда или разряда на постоянном токе в СВЧ плазме в магнитном поле можно управлять ее внутренними параметрами, в частности функцией распределения электронов по энергии. Благодаря этому обеспечивается управление селективностью возбуждения исходных химических реагентов с целью получения материалов с заданными свойствами при минимальных внешних энергозатратах.

В связи с широким диапазоном энергетических и технологических параметров установки, в которых используется плазма СВЧ газового разряда, относятся к многоцелевым. В этих установках с одинаково хорошими результатами можно проводить научные исследования и разработки как процессов безрадиационной очистки и пассивации поверхностей различных полупроводниковых материалов с целью улучшения их электронных свойств, прецизионного глубокосубмикронного сухого травления с управляемыми селективностью и анизотропностью полупроводниковых и диэлектрических структур на основе кремния, углерода и их соединений, а также полупроводниковых соединений АЗВ5 и др., используемых для создания сверхбольших и сверхскоростных интегральных схем, светоизлучающих и других устройств опто-, микро- и нанoeлектроники, так и процессов низкотемпературного осаждения высококачественных туннельно-тонких покрытий и наносистем с заданными электрофизическими свойствами с использованием как традиционных механизмов вакуумно плазменной конденсации из паровой фазы, так и явлений самоорганизации, например, с обеспечением кинетических преимуществ для получения нанокompозитных алмазографитовых, алмазоуглеводородных и других материалов для специальных применений в строительстве, архитектуре, энергетике, других областях науки и техники.

В последние годы конструкции ЭЦР источников плазмы и многозарядных ионов были усовершенствованы, и сейчас хорошо известно, как их сделать. Однако далеко недостаточно изучены физические процессы, лежащие в основе их действия. Одной из причин этого являются многообразие и сложная взаимосвязь параметров плазмы и конструктивных особенностей источников, а также трудности проведения прямых измерений. Другой причиной, привлекающей внимание разработчиков к проблеме создания высокоэффективных источников СВЧ плазмы, является ужесточение требований к технологическим процессам, связанным с ее применением. На сегодняшний день важными требованиями к современным системам плазменной обработки являются наряду с постоянным ужесточением требований к качеству обработки повышение эффективности, производительности и размера обрабатываемой поверхности подложки, на которых обеспечивался бы сверхгрупповой характер обработки без снижения степени прецизионности обработки. На первый взгляд, это представляется чисто технической проблемой. Однако ее решение из-за высокой сложности экспериментальных реализаций не является тривиальным, тем более если это относится к волноводным СВЧ электродинамическим системам во внешнем магнитном поле, для которых экспериментальный путь решения проблемы, связанный с обеспечением высоких энергетической эффективности и однородности плазмы на больших площадях обрабатываемых подложек, является весьма сложным и дорогим. Понимание этого

заставляет разработчиков современного СВЧ плазменного оборудования обращаться к разработке теоретических моделей управления плазменными средами в ограниченных объемах, определению степени совместимости технологических требований и поиску путей наиболее оптимального решения проблемы.

1. Многомодовые СВЧ плазменные устройства

Для плазменной микрообработки пластин большого диаметра с использованием СВЧ электромагнитного излучения наибольшее распространение получили многомодовые устройства. Одномодовые СВЧ плазменные устройства на основе ЭЦР с соленоидными катушками для формирования продольного магнитного поля обладают наибольшей простотой и высокой энергетической эффективностью процесса с КПД 90...95%. Однако работа на низшем типе волны в круглом волноводе на частоте 2450 МГц ограничивает поперечное сечение плазменного пучка и диаметр обрабатываемых пластин величиной до 100 мм. В связи с этим при увеличении диаметра пластин целесообразно было бы использовать генераторы электромагнитного излучения с меньшей частотой (например, 915 МГц). В этом случае необходимы меньшие магнитные поля для ЭЦР. Однако при этом уменьшаются критическая плотность электронов плазмы и производительность обработки при низких давлениях. Поэтому получила развитие тенденция увеличения диаметра волноводных камер генерации плазмы, в которых реализуется многомодовый режим передачи энергии.

Важное значение для повышения производительности и равномерности СВЧ плазменной обработки в многомодовых реакторах имеет рациональный выбор типа используемой для генерации плазмы электромагнитной волны. Структура электрических полей в такой электромагнитной волне должна обеспечивать, с одной стороны, создание скрещенных электрических и внешних стационарных магнитных полей для реализации ЭЦР, а с другой – создание такого распределения интенсивности ионизации плазмы по сечению реактора, при котором в наилучшей степени выполнялись бы указанные требования к процессу.

Многомодовые СВЧ плазменные устройства с большим поперечным сечением (диаметром 20...30 см и более) можно разделить на три основных типа [3]:

- волноводные СВЧ плазменные устройства с соленоидными катушками;
- перестраиваемые резонаторные СВЧ плазменные устройства с радиальным неоднородным магнитным полем;
- мультипольные СВЧ плазменные устройства на принципе распределенного ЭЦР.

Типичная схема многомодового волноводного ЭЦР источника плазмы с соленоидными катушками для обработки пластин диаметром до 150 мм, приведена на рис. 1. Ограниченность применения таких источников для обработки изделий большого диаметра связана с необходимостью увеличения габаритов и веса магнитной системы, что влияет на стоимость установки. Эта проблема отсутствует в случае применения резонаторных камер и мультипольных источников СВЧ плазмы [2-4].

Получение больших объемов однородной плазмы в резонаторах осуществляется в регулируемом многомодовом режиме с радиально неоднородным магнитным полем, создаваемым системой постоянных магнитов для удержания пристеночной плазмы (рис. 2). Так как при работе с низкими давлениями рабочих газов требуются высокооборотные резонаторные камеры, осуществляется их подстройка с помощью внешних согласующих устройств. Так же как в волноводной камере, в этом случае могут быть получены высокая степень ионизации и плотность плазмы, превышающие критическую для данной рабочей частоты более чем в 100 раз. Высокооборотные резонаторные камеры позволяют создавать в зоне разряда более сильные электрические поля, чем волноводы, и эффективно поддерживать разряд при низких давлениях без использования внешнего магнитного поля. Недостатком настраиваемых резонаторов является наличие скользящих контактов в основной линии согласующих устройств.

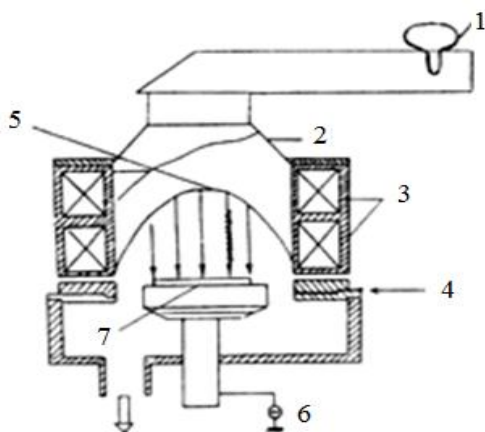


Рис.1. Схема многомодового волноводного ЭЦР источника: 1 – СВЧ генератор; 2 – круглый волновод; 3 – электромагнит; 4 – линия напуска газа; 5 – кварцевый колпак; 6 – источник постоянного или ВЧ напряжения; 7 – обрабатываемая пластина

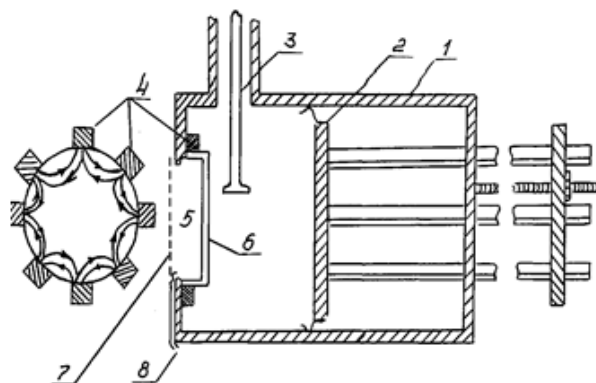


Рис. 2. Схема резонаторной камеры: 1 – цилиндрическая камера; 2 – короткозамыкающий шлейф; 3 – коаксиальный ввод; 4 – постоянные магниты; 5 – разрядная зона; 6 – кварцевый колпак; 7 – ионно оптическая система; 8 – линия напуска газа

В мультипольных источниках удержание СВЧ плазмы осуществляется постоянными магнитами, окружающими реакционную камеру с чередованием противоположных полюсов (рис. 3). Плотность магнитного потока быстро уменьшается от 0,1 Тл в центре плоскости каждого полюса магнита до нескольких десятых мТл на расстоянии нескольких сантиметров от него. В центральной части плазмы магнитное поле отсутствует. Передача СВЧ энергии в плазму осуществляется по стержневым антеннам, расположенных в нескольких миллиметрах над плоскостью каждого полюса магнита. СВЧ мощность к антеннам поступает от отдельных генераторов или от одного генератора по отдельным линиям передачи. По данным [4] плотность плазмы в многополюсных источниках с распределенным ЭЦР ниже, чем в волноводных камерах с ЭЦР и не превышает $1,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$, а спад ее от максимума, находящегося в центре ловушки, к ее краям достигает 20%. Существуют оптимальные размеры камер, при которых возможно достижение заданной равномерности.

Для наращивания объема однородной плазмы могут использоваться несколько ЭЦР источников, работающих на общую камеру, которая снабжена системой постоянных магнитов, предотвращающих попадание продуктов плазмохимической реакции на стенки камеры (рис. 4) [5].

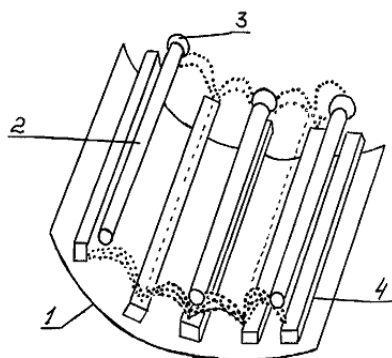


Рис. 3. Схема мультипольного СВЧ плазменного источника с распределенным ЭЦР: 1 – стенка реактора; 2 – антенна; 3 – коаксиальный ввод; 4 – постоянный магнит

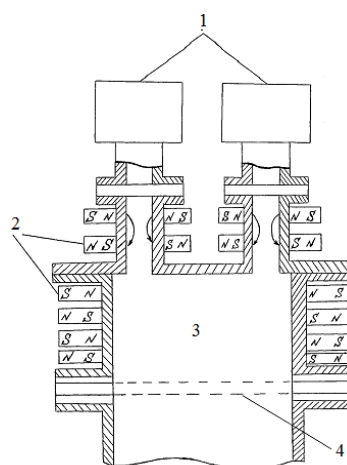


Рис. 4. Схема многоствольного ЭЦР источника с мультипольными магнитными системами: 1 – СВЧ генератор; 2 – постоянные магниты; 3 – разрядная зона; 4 – ионно-оптическая система

Резонаторные и мультипольные СВЧ плазменные источники, обладая преимуществом в компактности при создании однородной плазмы, имеют общий недостаток, который

состоит в отсутствии гибкого управления параметрами плазменного пучка за счет изменения распределения продольного магнитного поля, которое характерно для волноводных камер с соленоидом. Кроме того, отсутствие продольных магнитных полей обуславливает низкие токи на обрабатываемые пластины. Это требует создания адекватных ионно-оптических систем с управлением внешним электрическим полем, трудности изготовления и эксплуатации которых возрастают с увеличением площади плазменных пучков.

2. СВЧ плазменные устройства с продольно-поперечным вводом энергии

Перспективным направлением развития конструкций СВЧ плазменных устройств для обработки материалов на сверхбольших подложках (10-12 дюймов и более) являются многомодовые устройства с соленоидно-мультипольным магнитным управлением и продольно-поперечным вводом энергии [6,7]. Схема и внешний вид устройства приведены на рис. 5 и 6.

Внутренний диаметр многомодового реактора составляет 330 мм. В нем наряду с традиционным продольным возбуждением СВЧ поля в многомодовой камере 2 используется способ распределенного возбуждения мод электромагнитного поля. В этом случае многоступенчатый переход 1 служит для согласования традиционного сосредоточенного ввода СВЧ мощности P_1 с многомодовой камерой 2, в которой размещена обрабатываемая пластина 3. Для распределенного возбуждения многомодовых колебаний используется отдельный волноводный канал 4, опоясывающий камеру 2, который содержит штыри связи 5 для возбуждения в реакторе мод пристеночного типа H_{m1p} с $m = 5 \dots 10$. Вводы энергии могут осуществляться от одного или двух генераторов электромагнитного излучения, причем в последнем случае они могут иметь различные частотные диапазоны. При использовании одного генератора разделение каналов подачи энергии производится делителем мощности.

Регулировкой величин продольной и поперечной распределенной мощности достигается выравнивание плотности плазмы по сечению реактора, что обеспечивает высокие равномерность и производительность обработки пластин большого диаметра.

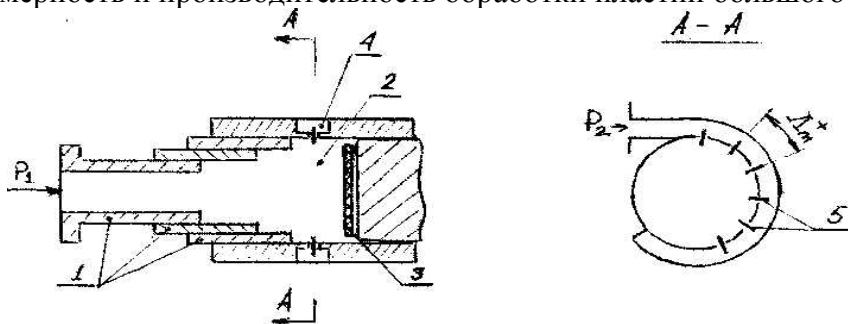


Рис. 5. Схема многомодового ЭЦР СВЧ реактора с продольно-поперечным вводом энергии: 1 – многоступенчатый переход; 2 – многомодовый реактор; 3 – обрабатываемая пластина; 4 – прямоугольный волновод для поперечного ввода СВЧ энергии; 5 – штыри связи

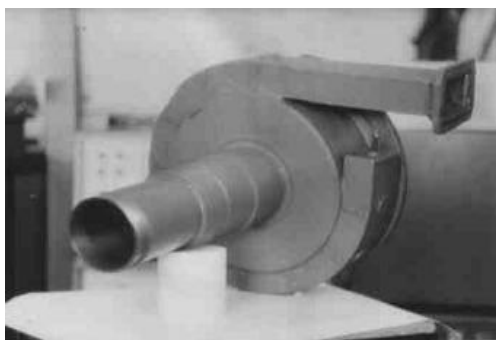


Рис. 6. Внешний вид ЭЦР СВЧ реактора с продольно-поперечным вводом энергии

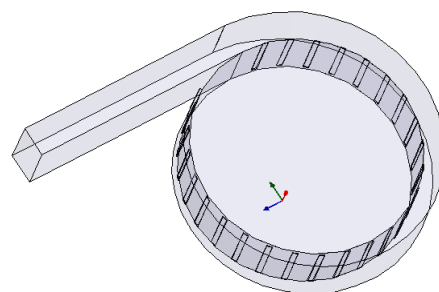


Рис. 7. Схема волноводно-резонаторного СВЧ реактора с переменной высотой узкой стенки волновода для распределенного бокового ввода энергии

Дальнейшим развитием плазменных ЭЦР СВЧ реакторов с продольно-поперечным вводом микроволновой мощности являются конструкции с опоясывающим волноводом, имеющим переменную высоту узкой стенки. Применение такой конструкции позволяет улучшить равномерность ввода СВЧ энергии по периметру реактора. Это достигается за счет сохранения неизменной мощности, вводимой через отверстия связи вдоль всей длины опоясывающего волновода (рис. 7).

Расчёт геометрических размеров отверстий связи и опоясывающего волновода таких реакторов производится из условия равенства волнового сопротивления подводящих участков волноводной линии сумме волновых сопротивлений прилегающих расходящихся каналов излучения при условии, что все отверстия связи согласованы с нагрузкой и не связаны между собой. В одномодовом приближении (мода H_{10}) отверстия связи на эквивалентной схеме могут быть представлены активными сопротивлениями, включенными последовательно, величина каждого из которых рассчитывается по формуле

$$Z_{\text{н}} = \frac{\pi b' \lambda_z}{2a' \lambda}$$

где b' и a' – ширина (размер отверстия связи вдоль оси волновода) и длина отверстия связи (для определённости считаем что $a' = \text{const} = 85$ мм), соответственно, λ_z – длина продольной волны, λ – длина волны в свободном пространстве, μ и ε – магнитная и диэлектрическая проницаемость вещества, заполняющая отверстие.

Так как

$$\frac{\lambda_z}{\lambda} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\pi}{a'k}\right)^2}},$$

то последнее выражение можно записать в виде

$$Z_{\text{н}} = \frac{\pi b'}{2a'} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\pi}{a'k}\right)^2}} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}},$$

где $k = 2\pi/\lambda$ – волновой вектор.

Для трёх отверстий связи, изображённых на рис. 8, имеющих размеры a' , b_n' , где $n=1, 2, 3$, можно записать следующую систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\pi b}{2a} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\pi}{ak}\right)^2}} = \frac{\pi b'_1}{2a'_1} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\pi}{a'_1 k}\right)^2}} + \frac{\pi b_1}{2a} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\pi}{ak}\right)^2}} \\ \frac{\pi b_1}{2a} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\pi}{ak}\right)^2}} = \frac{\pi b'_2}{2a'_2} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\pi}{a'_2 k}\right)^2}} + \frac{\pi b_2}{2a} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\pi}{ak}\right)^2}} \\ \frac{\pi b_2}{2a} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\pi}{ak}\right)^2}} = \frac{\pi b'_3}{2a'_3} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\pi}{a'_3 k}\right)^2}} \end{array} \right.$$

В этой системе уравнений левые части представляют собой волновые сопротивления прилегающих отрезков подводящего волновода, а правые – представляют собой суммы волновых сопротивлений ответвлений в отверстие связи и следующий за ним участок передающего волновода.

Так как волновые сопротивления всех отверстий связи считаем одинаковыми, волновое сопротивление каждого из них может быть выражено через волновое сопротивление подводящего волновода в виде

$$Z_n = \frac{1}{N} \frac{\pi b}{2a} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\pi}{ak}\right)^2}},$$

где b и a – высота и ширина подводящего отрезка волновода (45×90 мм), N – число отверстий связи, которое определяется диаметром СВЧ реактора и обрабатываемой пластины.

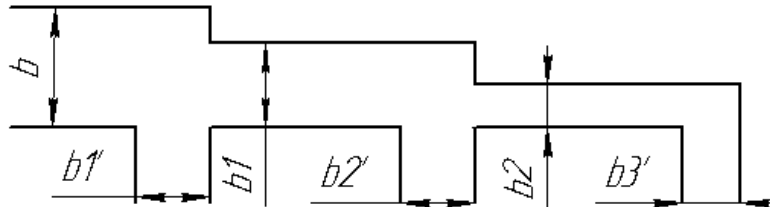


Рис. 8. Схема участка опоясывающего волновода с переменным сечением узкой стенки с тремя последовательными отверстиями связи

Таким образом, представляется возможным рассчитать неизвестную ширину отверстия связи b' из следующего соотношения:

$$\frac{\pi b'_n}{2a'_n} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\pi}{a'_n k}\right)^2}} = \frac{1}{N} \frac{\pi b}{2a} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\pi}{ak}\right)^2}},$$

$$b'_n = \frac{b}{N} \frac{a'}{a} \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{\pi}{a'k}\right)^2}{1 - \left(\frac{\pi}{ak}\right)^2}}.$$

Для обработки пластин диаметром 300 мм в СВЧ реакторе диаметром 330 мм, по периметру которого при частоте задающего генератора 2450 МГц укладываются семь длин волн, при расстоянии между отверстиями связи, равном $\lambda/4$, их количество может составить 25. В этом случае расчет по приведенным формулам дает значение поперечного размера отверстия связи b' , равное 1.91 мм.

Для расчёта высот подводящих отрезков волноводов b_n из приведенной системы уравнений можно получить следующее выражение:

$$b_n = \frac{N - n}{N} \frac{ab'}{a'} \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{\pi}{ak}\right)^2}{1 - \left(\frac{\pi}{a'k}\right)^2}}$$

На рис. 9 приведен соответствующий график изменения высот подводящих отрезков опоясывающего волновода от его длины на боковой стенке цилиндрического реактора.

На рис. 10 в качестве иллюстрации приведено распределение напряженностей электрических полей в СВЧ реакторе с переменной высотой узкой стенки опоясывающего волновода. Можно видеть, что максимальные напряженности электрических полей концентрируются по периметру реактора, позволяя, тем самым, совместно с центральным волноводным вводом на основном типе волн оптимизировать распределение электрических полей в реакторе и существенно улучшать однородность плазменной обработки пластин большого диаметра в микроэлектронике.

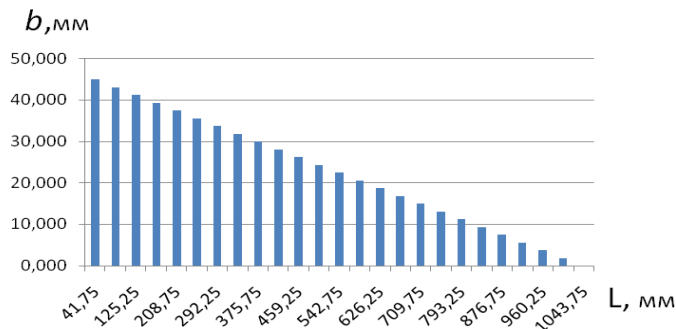


Рис. 9. График изменения высот подводящих отрезков опоясывающего волновода в зависимости от его длины на боковой стенке реактора



Рис. 10. Распределение напряженностей электрических полей в СВЧ реакторе с переменной высотой узкой стенки опоясывающего волновода

В настоящее время на основе СВЧ плазменных устройств созданы ионные источники различной конструкции и назначения: от низкоэнергетической ионной очистки, травления, пассивации и низкотемпературного окисления полупроводников до сильноточных (порядка ампер) источников для ионной имплантации [8-10]. В связи с отсутствием накаливаемых катодов эти типы СВЧ источников позволяют получать стабильные пучки химически активных ионов с током до 200 мА в течение длительного времени эксплуатации при давлениях плазмообразующих газов ниже 0,1 Па. Использование распределенного ЭЦР в ионных источниках, кроме высокой плотности тока (до 3 мА/см² в случае аргона), позволяет получать ионные пучки большого сечения и высокой однородности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Яфаров Р.К. Физика СВЧ вакуумно-плазменных нанотехнологий / Р.К. Яфаров. – М.: Физматлит, 2009. – 216 с.
2. Гуляев Ю.В. Микроволновое ЭЦР вакуумно-плазменное воздействие на конденсированные среды в микроэлектронике (физика процессов, оборудование, технология) / Ю.В. Гуляев, Р.К. Яфаров // Зарубежная электронная техника. – 1997. – №1. – С.77-120.
3. Яфаров Р.К. Перспективы создания источников СВЧ-плазмы / Р.К. Яфаров // Электронная промышленность. – 1992. – №1. – С.8-12.
4. Мультипольный источник СВЧ-плазмы с возбуждением по методу распределенного электронного циклотронного резонанса: концепция и характеристики / Пиню [и др.] // Приборы для научных исследований. – 1988. – №7. – С.56-60.
5. Europ. Pat. Applic. 0286132 A2.УС: Н01У37/32. Plasma generating apparatus. // Nakamata Y., Natasui Kakichi, Kurosawa Yn.et all. – Publ.08.04.88.
6. Гуляев Ю.В. Диффузионная модель газового СВЧ-разряда в магнитном поле с распределенным вводом энергии / Ю.В. Гуляев, И.Д. Черкасов, Р.К. Яфаров // ДАН. – 1998. – Т.358. – №3. – С.333-336.
7. Пат. РФ №2120681 Устройство для микроволновой вакуумно-плазменной с электронно-циклотронным резонансом обработки конденсированных сред / Яфаров Р.К. От 20.10.98.
8. Физика и технология источников ионов: пер. с англ. / под ред. Я. Брауна. – М.: Мир, 1998. – 495 с.
9. Габович М.Д. Физика и техника плазменных источников ионов / М.Д. Габович. – М.: Атомиздат, 1972. – 304 с.
10. Форрестер А.Т. Интенсивные ионные пучки / А.Т. Форрестер. – М.: Мир, 1992. – 354 с.

Бочкарев Алексей Олегович – аспирант кафедры «Электротехника и электроника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Aleksey O. Bochkarev – Postgraduate Department Electrotechnics and Electronics, Gagarin Saratov State Technical University

Давидович Михаил Владимирович –
доктор физико-математических наук, профессор
кафедры «Радиотехника и электродинамика»
Саратовского государственного университета
им. Н.Г. Чернышевского

Mikhail V. Davidovich –
Dr. Sc., Professor
Department of Radiotechnics and Electrodynamics,
Chernyshevsky Saratov State University

Яфаров Равиль Кяшшафович –
доктор технических наук, профессор кафедры
«Автоматизированные электротехнологические
установки и системы» Саратовского
государственного технического университета
имени Гагарина Ю.А.

Ravil K. Yafarov –
Dr. Sc., Professor
Department of Automated Electrical-Technological
Plants and Systems,
Gagarin Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 17.05.12, принята к опубликованию 16.06.12

УДК 621.365.5

Ю.М. Голембиовский, А.А. Костерев

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ QUARTER-BRIDGE ИНВЕРТОРОВ ДЛЯ ИНДУКЦИОННОЙ ПЛАВКИ МЕТАЛЛОВ

Приведены результаты расчетов на компьютерной модели токов, напряжений и мощности, отдаваемой одноключевым (quarter-bridge) инвертором в процессе индукционной плавки металлов, позволившие обосновать целесообразность применения многомодульного источника питания индукционной печи. Описана структура трехмодульной системы питания и приведены кривые, поясняющие динамику электромагнитных процессов при изменении режимов работы модулей.

Инвертор, индукционная плавка, система питания

Yu.M. Golembiovsky, A.A. Kosterev

RESEARCH OF PARALLEL OPERATION OF QUARTER-BRIDGE OF INVERTERS FOR INDUCTION MELTING OF METALS

Results of calculations on computer model of currents, tension and the capacity given by one-key (quarter-bridge) by the inverter in the course of induction melting of metals, allowed to justify feasibility of use of the multimodular power supply of the induction furnace are given. The structure of three-building block system of a supply is described and the curves explaining dynamics of electromagnetic processes in case of change of operation modes of modules are given.

Inverter, induction melting, supply system

Введение

Параллельная работа группы вентильных преобразователей частоты на общую нагрузку привлекает внимание специалистов по ряду причин. Во-первых, создаются предпосылки для унификации изделий преобразовательной техники; во-вторых, включение отдельных преобразовательных модулей на параллельную работу позволяет оперативно адаптировать структуру всего преобразовательного комплекса к изменяющимся параметрам нагрузки путем включения-выключения модулей или изменения режимов их работы с целью минимизации потерь электро-энергии и увеличения ресурса работоспособности силовых элементов; в-третьих, повышается

«живучесть» всей системы локального электроснабжения, поскольку выход из строя какого-либо модуля не приводит к аварии всей системы, а лишь к снижению генерируемой мощности; наконец, в-четвертых, существенно снижаются затраты на резервирование, если таковое требуется для обеспечения высокой надежности системы электроснабжения.

Различные аспекты организации параллельной работы преобразовательных модулей неоднократно обсуждались на страницах научных изданий. В [1-12] сформулированы основные проблемы организации параллельной работы автономных инверторов тока (АИТ):

- обеспечение равномерной нагрузки параллельно работающих преобразователей в установившихся и переходных режимах;
- обеспечение адаптации структуры системы электроснабжения к изменяющимся параметрам нагрузки по критерию минимизации потерь электроэнергии и экономии ресурса работоспособности вентилях.

В этих и ряде других работ предложены и рассмотрены схемотехнические решения АИТ, позволяющих оперативно изменять функции параллельно работающих преобразовательных модулей, переводя их из режима генерации активной мощности в режим генерации реактивной мощности и обратно.

В [8-10] задача организации параллельной работы автономных инверторов тока решается применительно к системам индукционного нагрева металлов. Рассмотрены различные способы обеспечения равномерной загрузки АИТ:

- регулирование напряжения звена постоянного тока;
- изменение фазового сдвига выходных напряжений отдельных АИТ.

Не касаясь обсуждения вопросов эффективности применения того или иного способа организации параллельной работы преобразователей частоты, обратим внимание лишь на то, что во всех перечисленных работах преобразовательные модули строятся на основе трехфазных или однофазных мостовых схем. В то же время в последние годы появились высоковольтные мощные однооперационные тиристоры, в связи с чем усилился интерес к одноключевым схемам резонансных АИТ (quarter-bridge) и их использованию в системах индукционного нагрева металлов.

1. Одноключевой преобразователь

На рис. 1 представлена модель quarter-bridge-модуля в системе компьютерного моделирования PSIM 9 demo, которая в общем случае содержит:

- управляемый выпрямитель (УВ);
- индуктивный фильтр (L_{ϕ});
- одноключевой инвертор (И);
- коммутирующие емкости ($C_k, C_{и}$),
- индуктор (Инд).

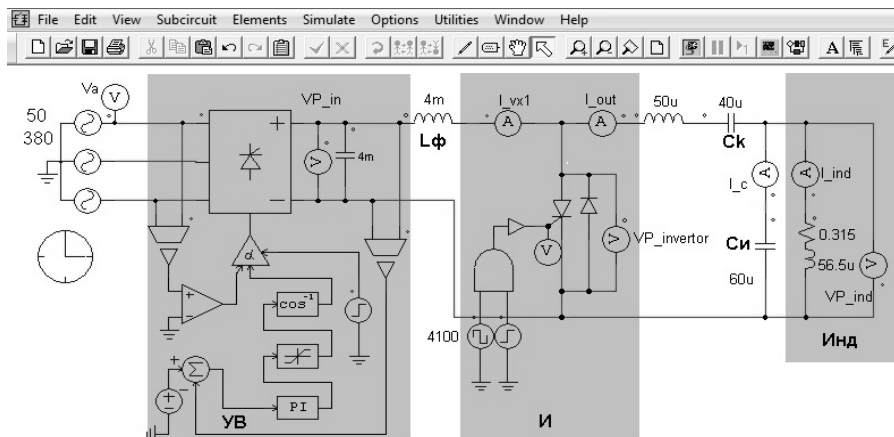


Рис. 1. Одноключевой инверторный модуль

Параметры элементов модуля показаны на самой модели и обеспечивают резонансный режим работы во всем диапазоне изменения параметров индуктора в процессе плавки.

На вход УВ подается переменное трехфазное напряжение 380 В промышленной частоты 50 Гц. На выходе возникает выпрямленное напряжение амплитудой до 515 В, которую можно регулировать, используя систему управления. Емкостной фильтр сглаживает пульсации напряжения. Одноключевой инвертор состоит из полупроводникового элемента или цепочки последовательно соединенных элементов (в данном случае с неполным управлением – тиристора), шунтированных обратными диодами. Для компенсации реактивной составляющей мощности используется конденсаторная батарея. И, наконец, весь инверторный модуль нагружен на индуктор с изменяющимися электрофизическими параметрами.

2. Изменение параметров индукционной печи в процессе плавки

Идея применения многомодульного преобразовательного комплекса с изменяющейся в процессе плавки структурой базируется на [11, 12], в которых впервые представлены теоретические зависимости основных параметров индуктора (резонансной частоты, эквивалентного активного сопротивления и индуктивности, напряжения, тока и мощности, отбираемой индукционной печью) от температуры нагреваемого тела для режимов постоянного тока в индукторе ($I_{\text{инд}}=\text{const}$), постоянного напряжения ($U_{\text{инд}}=\text{const}$) и постоянной мощности в индукторе ($P_{\text{инд}}=\text{const}$). Несмотря на то, что указанные зависимости носят, скорее, качественный, чем количественный характер (поскольку построены в предположении о нагреваемом теле как о сплошном цилиндре), они дают явное представление о характере изменения параметров индуктора в процессе плавки, и могут быть использованы для оценки диапазона изменения требований к паспортным параметрам ключевых элементов источников питания индукционных установок.

Выполненные расчеты показали, что наиболее широко изменяется в процессе индукционного нагрева величина отдаваемого инвертором тока в режиме постоянной мощности, потребляемой индуктором. На рис. 2 представлены зависимости резонансной частоты ω , эквивалентного активного сопротивления R_3 и индуктивности L_3 в режиме $P_{\text{инд}}=\text{const}$ для стандартной печи с параметрами:

- диаметр индуктора (D) – 0,54 м;
- длина индуктора (l) – 0,56 м;
- число витков (W) – 14;
- удельное сопротивление металла (ρ) – $0,098 \cdot 10^{-6}$ Ом·м;
- величина зазора (h) – 0,031 м.

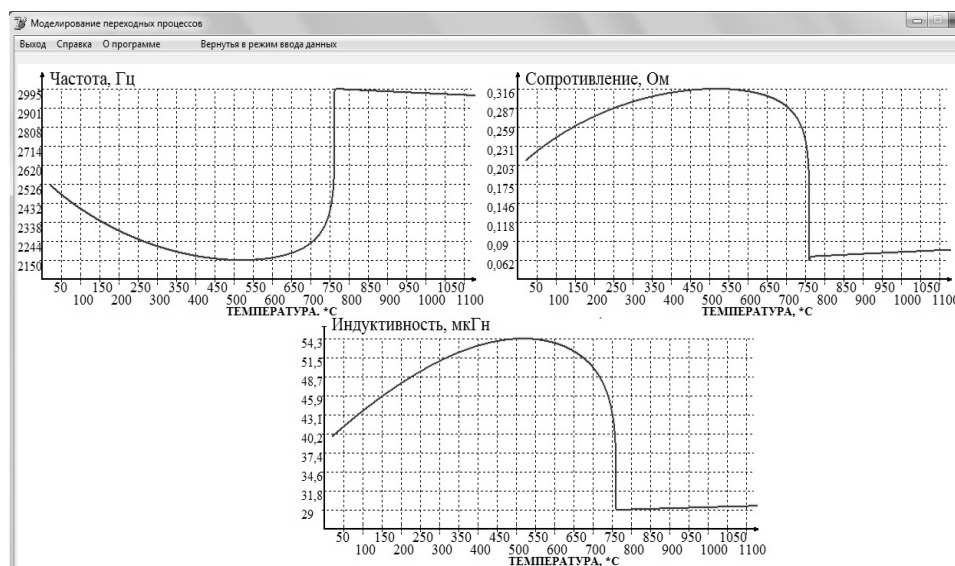


Рис. 2. Зависимости резонансной частоты (ω_p), активного сопротивления (R_3) и индуктивности (L_3) индуктора от температуры нагрева металла

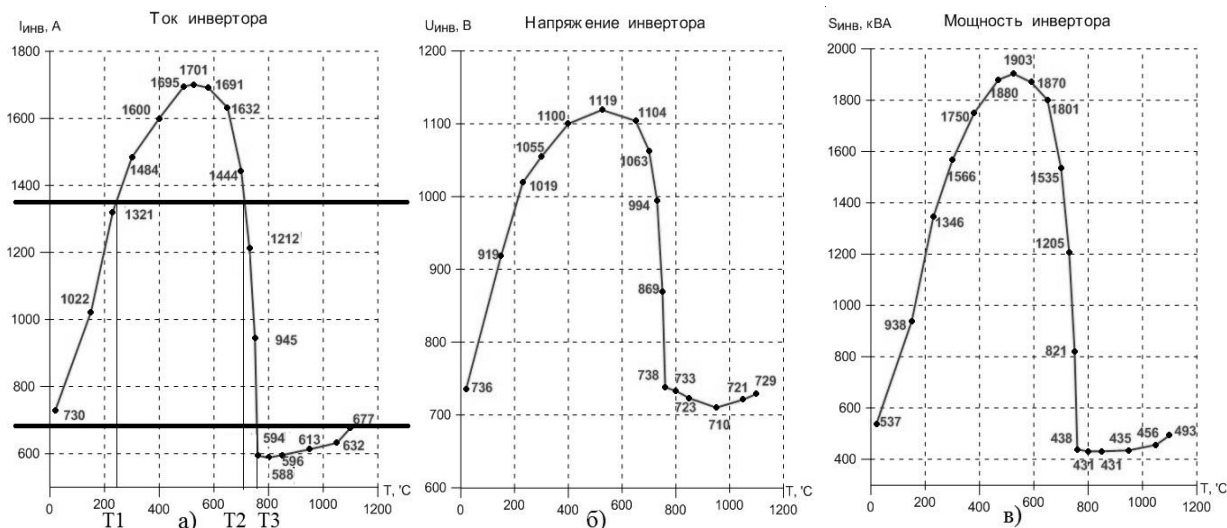


Рис. 3. Зависимости I_{инв}(а), U_{инв}(б), S_{инв}(в) от температуры нагреваемого тела для режима P_{инд}=const

Полученные зависимости позволили рассчитать и построить графики (рис. 3) изменения выходного тока инвертора, напряжения и отдаваемой мощности в процессе плавки для модели, показанной на рис. 1.

Анализ полученных кривых рис. 3 позволяет сделать следующие выводы:

1. Полная мощность на выходе quarter-bridge инвертора, которая определяет класс тиристора по току и напряжению, изменяется от начала плавки и до точки Кюри в 2,5–3 раза.

2. Наибольшее амплитудное значение напряжения на тиристоре соответствует температуре 525°C. Именно это значение определяет класс тиристора по напряжению.

3. Поскольку при параллельном соединении модулей инверторные ключи находятся под одним и тем же напряжением, отсутствует возможность управлять данным параметром при оперативном изменении количества параллельно включенных инверторов. Это означает, что оперативная адаптация структуры преобразовательного комплекса к изменяющимся параметрам нагрузки возможна только путем изменения суммарного номинального тока включаемых на параллельную работу инверторных модулей.

4. Величина отдаваемого инверторным модулем тока (рис. 3а) в процессе плавки изменяется в три раза. Поэтому минимальная комплектация quarter-bridge комплекса должна

включать три модуля мощностью $\frac{\sum_{i=1}^3 P_{iном}}{3}$ каждый. Тогда в диапазонах температур $0 \div T_1$,

$T_2 \div T_3$ должны работать два модуля, в диапазоне $T_1 \div T_2$ – три модуля, и при $T > T_3$ достаточно для питания индуктора мощности одного инвертора.

3. Трехмодульный преобразовательный комплекс

Структурная схема трехмодульного quarter-bridge комплекса представлена на рис. 4. Комплекс включает трансформаторы для гальванической развязки входной цепи и цепи нагрузки, три модуля управляемых выпрямителей УВ1..УВ3 с соответствующими блоками управления БУВ1..БУВ3, индуктивные фильтры, три модуля quarter-bridge инверторов И1..И3, управляемых каждый своим блоком управления, батарею коммутирующих конденсаторов и непосредственно индуктор.

Оперативная перестройка структуры заключается в своевременном отключении/включении одного из модулей в зависимости от величины тока, отдаваемого комплексом в нагрузку. На рис. 5 приведены осциллограммы токов и напряжений на индукторе и на инверторных модулях в момент отключения одного из них.

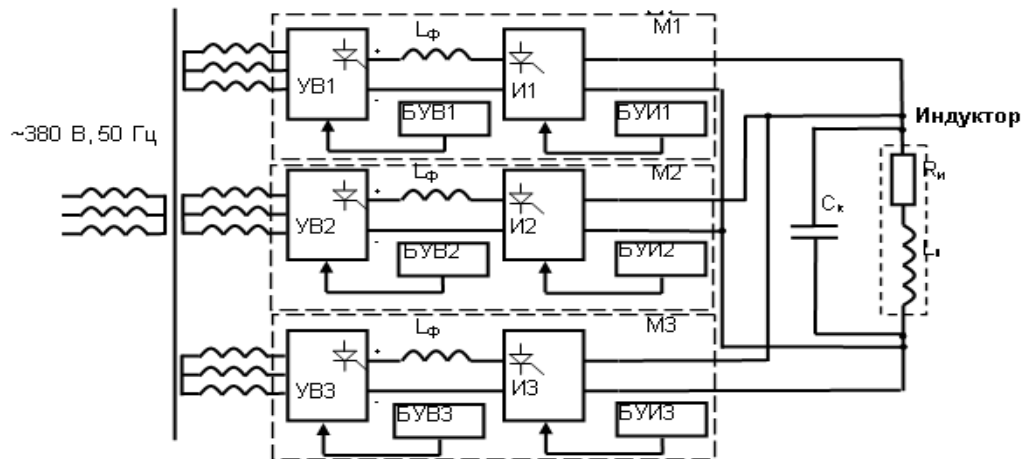


Рис. 4. Структурная схема трехмодульного quarter-bridge инвертора

Как видно из рисунка, в ходе отключения первого модуля (I_{inv1}) амплитуды тока ($I_{inductor}$) и напряжения ($V_{inductor}$) после кратковременного спада приняли прежние значения, в то время как отдаваемый остальными модулями (I_{inv2}) ток в индуктор возрос. То есть оставшееся в работе модули распределили между собой нагрузку, тем самым повышая КПД работы устройства. Следует отметить, что в ходе данного процесса критических перегрузок по току и напряжению в силовых элементах не наблюдается.

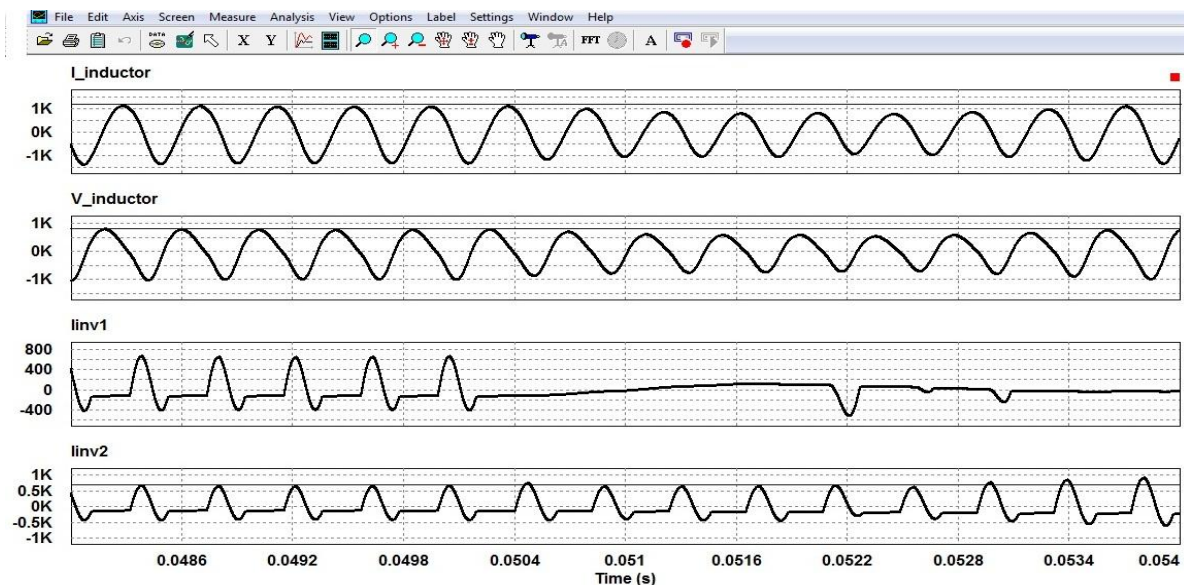


Рис. 5. Осциллограммы электромагнитных процессов

В связи с вышесказанным справедливо встает вопрос равномерности распределения нагрузки между параллельно работающими инверторами в условиях невозможности создания полностью идентичных модулей. Данная задача возлагается на систему управления, которая должна оперативно решать поставленные задачи.

Вопросы управления комплексом будут освещены в последующих публикациях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Адамия Г.Г. Распределение нагрузок между параллельно работающими инверторами / Г.Г. Адамия, П.Г. Билинкис, В.А. Чванов // Электротехническая промышленность. Преобразовательная техника. – 1971. – №17. – С. 15-18.
2. Адамия Г.Г. Принципы построения систем содержащих параллельно работающие автономные инверторы / Г.Г. Адамия, В.А. Чванов // Материалы семинара по кибернетике. – Ч. 1. Динамика систем управления. – Кишинев: Штинница, 1975. – С. 22–25.

3. Артюхов И.И. Тиристорные преобразователи частоты с перестраиваемой структурой / И.И. Артюхов, Ю.Б. Томашевский, В.А. Серветник // Вопросы преобразовательной техники и частотного электропривода: межвуз. науч. сб. – Саратов: Сарат. политехн. ин-т, 1985. – С. 47-53.

4. Голембиовский Ю.М. Управление комплексом тиристорных преобразователей частоты на базе автономных инверторов тока с перестраиваемой структурой / Ю.М. Голембиовский, Г.Э. Суманев, Ю.Б. Томашевский // Силовая электроника в решении проблем ресурсо- и энергосбережения: сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. – Крым, Алушта, 1996. – С. 65–66.

5. Кантер И.И. Система централизованного электроснабжения на базе параллельно работающих преобразователей частоты / И.И. Кантер, Ю.Б. Томашевский, Ю.М. Голембиовский // Электричество. – 1991. – №1. – С. 39-47.

6. Резчиков А.Ф. Адаптивные системы электроснабжения – основа электроэнергетики будущего / А.Ф. Резчиков, Ю.М. Голембиовский // Вестник СГТУ. – 2008. – №1(31). – Вып. 2. – С. 9-13.

7. Резчиков А.Ф. Повышение управляемости и компьютеризация систем электроснабжения как важнейшее направление экономии энергии в промышленности / А.Ф. Резчиков, Ю.М. Голембиовский, Ю.А. Аветисян // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2008. – №4. – С. 32-36.

8. Смородинов В.В. Параллельная работа ТПЧ для индукционного нагрева / В.В. Смородинов, В.И. Беркович // Труды УАИ. – Уфа, 1973. – Вып. 48. – Сб. 3.

9. Васильев А.С. Параллельная работа преобразователей в электротермии / А.С. Васильев, С.Г. Гуревич, Ю.П. Качан // Электротехника, 1976. №8. С. 44–48.

10. Климов В. Организация параллельной работы источников питания переменного тока / В. Климов // Силовая электроника. – 2008. – №2. – С. 68-72.

11. Владимиров С.Н. Особенности индукционного нагрева ферромагнитных сталей при различных режимах работы преобразователя частоты / С.Н. Владимиров, С.К. Земан, А.В. Осипов, В.П. Толстов // Известия вузов. – Электромеханика. – 2004. – №1. – С. 50-54.

12. Земан С.К. Исследование зависимостей характеристик резонансного контура от конструктивных и электрических параметров системы «индуктор-нагреваемый объект» / С.К. Зеeman, А.В. Осипов, М.С. Сахаров // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т.310. – №1. – С. 197-202.

Голембиовский Юрий Мичиславович – доктор технических наук, профессор кафедры «Системотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Yuri M. Golembiovsky – Dr. Sc., Professor
Department Systems Engineering,
Gagarin Saratov State Technical University

Костерев Андрей Александрович – аспирант кафедры «Системотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Andrey A. Kosterov – Postgraduate
Department of Systems Engineering,
Gagarin Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 18.05.12, принята к опубликованию 17.06.12

УДК 621.365.5

Е.М. Гришина

РАСЧЕТ УСТАНОВКИ ДЛЯ СВЧ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ С РАЗЛИЧНЫМИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

Приведены соотношения для расчета установки для СВЧ обработки материалов с различными диэлектрическими свойствами.

СВЧ электротехнологическая установка, модификация, полимеры, энергетическая эффективность, согласующий элемент

E.M. Grishina

CALCULATION OF THE INSTALLATION FOR MICROWAVE FREQUENCY PROCESSING MATERIAL WITH DIFFERENT DIELECTRICS CHARACTERISTIC

Brought correlations for calculation of the installation for SVCH processing material with different dielectrics characteristic.

Microwave frequency electrotechnological installation, modification, polymers, energy efficiency, matching element

СВЧ электротехнологические установки (СВЧ ЭТУ), в которых с помощью энергии СВЧ электромагнитных колебаний осуществляется модификация диэлектриков, могут быть теплового действия (СВЧ ЭТУ ТД) и нетеплового действия (СВЧ ЭТУ НД).

СВЧ ЭТУ ТД предназначены для термообработки диэлектриков [1, 2].

СВЧ ЭТУ НД представляют собой принципиально новый класс СВЧ ЭТУ, в которых обрабатываемые диэлектрики приобретают новые свойства уже при кратковременном пребывании в СВЧ электромагнитном поле, при котором отсутствует заметный нагрев диэлектриков [3].

При нетепловой модификации объект практически не нагревается из-за малого тангенса диэлектрических потерь $tg\delta$ и малого времени СВЧ воздействия. По этой причине для СВЧ ЭТУ НД приходится решать задачу рассеяния нерастроченной СВЧ энергии электромагнитных колебаний. Так, прошедшую через модифицируемый объект энергию СВЧ электромагнитных волны можно рассеять в калориметрической согласованной нагрузке, включенной на выходе приемного рупора, расположенного за модифицируемым объектом. Как правило, нагретая в калориметрической нагрузке проточная вода, каким-либо способом не используется. В таком случае энергетический КПД СВЧ ЭТУ НД крайне мал. Увеличения энергетической эффективности такой установки можно достичь, если вместо калориметрической нагрузки приемного рупора использовать рабочую камеру, которая реализует другой технологический процесс – термообработку диэлектрика. Такие установки в [4] принято называть комбинированными СВЧ ЭТУ для обработки различных материалов.

Комбинированная СВЧ ЭТУ (рис. 1) содержит источники СВЧ-энергии и соединенную с ними через линии передачи и излучатели СВЧ-энергии камеру с размещенным в ней блоком загрузки-выгрузки материала, предназначенную для модифицирующей СВЧ-обработки полимерного материала с низким тангенсом угла диэлектрических потерь. Через приемные рупоры СВЧ-энергии, установленные напротив излучателей СВЧ-энергии линии передачи, СВЧ-энергия поступает в дополнительную камеру, снабженную блоком загрузки-выгрузки, установленную параллельно основной камере и предназначенную для термообработки материалов с большим тангенсом угла диэлектрических потерь.

Недостатками установки являются отсутствие согласующего элемента между излучателями СВЧ-энергии и материалом с малым тангенсом угла диэлектрических потерь, устраняющего отражение в сторону источников СВЧ-энергии части СВЧ-мощности, поступающей в камеру, и тем самым увеличивающего энергетическую эффективность, а также высокая металлоемкость и значительные габариты за счет использования дополнительной камеры.

Для устранения вышеперечисленных недостатков [5] предложен следующий вариант компоновки установки (рис. 2).

В установке для СВЧ-обработки материалов с различными диэлектрическими свойствами содержится один источник СВЧ энергии, излучатель СВЧ-энергии, связанный с источ-

ником СВЧ-энергии посредством линии передачи, СВЧ-камера с размещенными в ней двумя блоками загрузки-выгрузки обрабатываемых материалов, связанная с излучателем СВЧ-энергии, содержит один дополнительный блок загрузки-выгрузки обрабатываемого материала, расположенный в рабочей камере, согласующий элемент, выполненный в виде радиопрозрачного диэлектрика, расположенного в рабочей камере между излучателем СВЧ-энергии и первым по направлению распространения СВЧ-волны блоком загрузки-выгрузки обрабатываемого материала, при этом блоки загрузки-выгрузки обрабатываемого материала расположены перпендикулярно направлению распространения СВЧ-волны.

Расчет установки включает определение входных сопротивлений линий передач с помощью теории длинных линий [6], а также нахождение диэлектрической проницаемости диэлектрика, из которого сделан согласующий элемент, его длину.

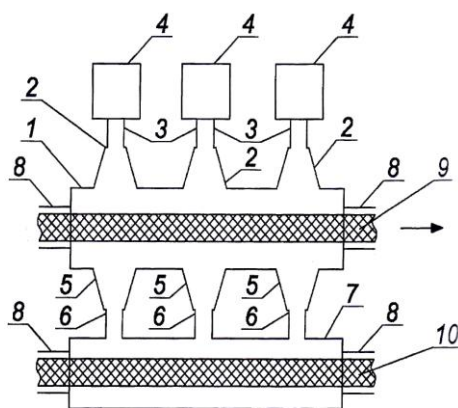


Рис. 1. Комбинированная СВЧ электротехнологическая установка:
 1 – рабочая камера для тепловой модификации; 2, 5 – рупорные антенны; 3, 6 – линии передач; 8 – блок загрузки-выгрузки материалов; 10, 11 – обрабатываемый материал

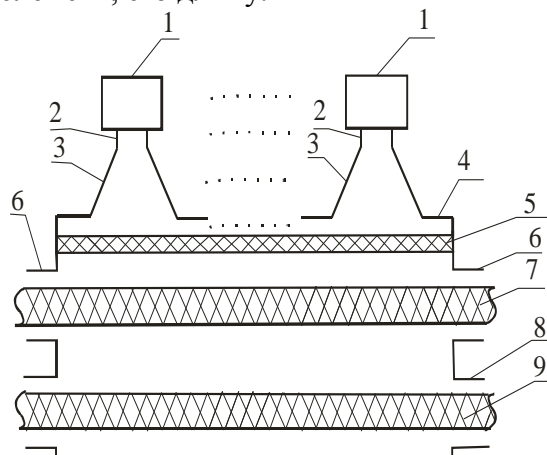


Рис. 2. Установка для СВЧ-обработки материалов с различными диэлектрическими свойствами: 1 – источник энергии; 2 – линии передачи; 3 – излучатели; 4 – рабочая камера; 5 – согласующий элемент; 6, 8 – блоки загрузки-выгрузки; 7 – модифицируемый полимерный материал с малым тангенсом угла диэлектрических потерь; 9 – диэлектрический материал с большим тангенсом угла диэлектрических потерь

Традиционно в СВЧ электротермии принято считать, что от излучателя к обрабатываемому диэлектрику распространяется плоская электромагнитная волна. Обычно рупорный излучатель хорошо согласован с линией передачи, связывающей его с СВЧ генератором источника энергии СВЧ ЭТУ и с воздушным пространством с характеристическим сопротивлением $Z_{ОВ}$, падая на обрабатываемый диэлектрик с диэлектрическими свойствами $\epsilon'_д$ и $tg\delta_д$ и характеристическим сопротивлением $Z_{Од}$ равным

$$Z_{Од1} = \frac{Z_{ОВ1}}{\sqrt{\epsilon'_д}} \quad (1)$$

Входное сопротивление отрезка длинной линии, представляющий собой слой воздуха толщиной $l_{В}$, короткозамкнутый на конце, равно

$$Z_{ВХВ1} = jZ_{ОВ}tg\beta l_{В1}, \quad (2)$$

где $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$ – фазовая постоянная коэффициента распространения в слое воздуха; λ – длина волны СВЧ генератора; $l_{В1}$ – толщина воздушного слоя.

Это сопротивление является нагрузкой для отрезка длинной линии, представляющей собой подложку (транспортную систему). Тогда входное сопротивление этого отрезка, если, как обычно, подложка без потерь, равно

$$Z_{ВХ тл1} = Z_{0 тл1} \frac{Z_{ВХ В1} + jZ_{0 тл1}tg\beta_{ тл1}l_{ тл1}}{Z_{0 тл1} + jZ_{ВХ В1}tg\beta_{ тл1}l_{ тл1}}, \quad (3)$$

где

$$Z_{0\text{тл1}} = \frac{377}{\sqrt{\varepsilon'_{\text{тл1}}}}, \quad (4)$$

$\varepsilon'_{\text{тл1}}$ – относительная диэлектрическая проницаемость материала подложки; $Z_{\text{вх в1}}$ определяется по (2); $\beta_{\text{тл1}}$ – фазовая постоянная коэффициента распространения в подложке:

$$\beta_{\text{тл1}} = \frac{2\pi\sqrt{\varepsilon'_{\text{тл1}}}}{\lambda}, \quad (5)$$

где $l_{\text{тл1}}$ – толщина слоя подложки.

В свою очередь, $Z_{\text{вх тл1}}$ является нагрузкой отрезка длинной линии, представляющей собой обрабатываемый диэлектрик. На входе этого слоя

$$Z_{\text{н1}} = Z_{0\text{д2}} \frac{Z_{\text{вх тл1}} + jZ_{0\text{д2}} \text{th} \gamma_2 d_2}{Z_{0\text{д2}} + jZ_{\text{вх тл1}} \text{th} \gamma_2 d_2} = R_{\text{н1}} + jX_{\text{н1}}, \quad (6)$$

где

$$Z_{0\text{д2}} = \frac{377}{\sqrt{\varepsilon'_{\text{д2}} (1 - j \text{tg}^2 \delta_{\text{д2}})}}, \quad (7)$$

$\varepsilon'_{\text{д2}}$ и $\text{tg} \delta_{\text{д2}}$ – относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь второго модифицируемого объекта; $\gamma_2 = \alpha_2 + j\beta_2$ – постоянная распространения во втором модифицированном объекте; α_2 – постоянная затухания:

$$\alpha_2 = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon'_{\text{д2}}} \sqrt{\frac{1}{2} (1 + \text{tg}^2 \delta_{\text{д2}} - 1)}, \quad (8)$$

β_2 – фазовая постоянная:

$$\beta_2 = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon'_{\text{д2}}} \sqrt{\frac{1}{2} (1 + \text{tg}^2 \delta_{\text{д2}} + 1)}, \quad (9)$$

d_2 – толщина слоя второго модифицированного объекта; $Z_{\text{вх тл1}}$ определяется соотношением (3), $R_{\text{н1}}$ и $X_{\text{н1}}$ – активная и реактивная составляющие $Z_{\text{н1}}$.

На расстоянии l от поверхности первого обрабатываемого объекта входное сопротивление на входе воздуха для плоской волны, идущей от рупорного излучателя, равно

$$Z_{\text{вх в1}} = Z_{0\text{в1}} \frac{Z_{\text{н1}} + jZ_{0\text{в1}} \text{tg} \beta l_{\text{в1}}}{Z_{0\text{в1}} + jZ_{\text{н1}} \text{tg} \beta l_{\text{в1}}} = \text{Re} Z_{\text{вх в1}} + j \text{Im} Z_{\text{вх в1}}, \quad (10)$$

Далее аналогично (3) рассчитываем входное сопротивление на входе во вторую транспортную ленту $Z_{\text{вх тл2}}$ и сопротивление нагрузки $Z_{\text{н2}}$

$$Z_{\text{вх тл2}} = Z_{0\text{тл2}} \frac{Z_{\text{вх в1}} + jZ_{0\text{тл2}} \text{tg} \beta_{\text{тл2}} l_{\text{тл2}}}{Z_{0\text{тл2}} + jZ_{\text{вх в1}} \text{tg} \beta_{\text{тл2}} l_{\text{тл2}}}, \quad (11)$$

$$Z_{0\text{тл2}} = \frac{377}{\sqrt{\varepsilon'_{\text{тл2}}}},$$

$$Z_{\text{н2}} = Z_{0\text{д2}} \frac{Z_{\text{вх тл2}} + jZ_{0\text{д2}} \text{th} \gamma_2 d_2}{Z_{0\text{д2}} + jZ_{\text{вх тл2}} \text{th} \gamma_2 d_2} = R_{\text{н2}} + jX_{\text{н2}}. \quad (12)$$

Поскольку согласующий слой используется для согласования чисто активных сопротивлений, рассчитаем отрезок линии, заполненный воздухом, на входе которого входное сопротивление чисто активное, т.е. $X_{\text{н}} = 0$, $R_{\text{н}} \neq 377$ Ом

$$Z_{\text{вх л2}} = Z_{0\text{х}} \frac{Z_{\text{н1}} + Z_{\text{н2}} + jZ_{0\text{х}} \text{tg} \beta l_{\text{в}}}{Z_{0\text{х}} + j \sqrt{\varepsilon'_{\text{н1}} + Z_{\text{н2}}} \text{tg} \beta l_{\text{в}}}, \quad (13)$$

где $Z_{0\text{х}} = 377$ Ом.

Варьируя значением $l_{\text{п}}$, подбираем её так, чтобы $\text{Im}Z_{\text{вх.л}} = 0$.

Входное сопротивление в четвертьволновом слое рассчитывается по формуле

$$Z_{0\lambda/4} = \sqrt{Z_{0\text{x}} Z_{\text{вх.л}}}, \quad (14)$$

где $Z_{0\text{x}} = 377 \text{ Ом}$, $Z_{\text{вх.л}} = \text{Re}Z_{\text{вх.л}}$.

Но в (14) $Z_{0\lambda/4}$ равно

$$Z_{0\lambda/4} = \frac{377}{\sqrt{\varepsilon'_{\text{п}}}}. \quad (15)$$

Тогда из (15) с учетом (14) диэлектрическая проницаемость согласующего слоя равна

$$\varepsilon'_{\text{п}} = \frac{377}{\sqrt{Z_{0\text{x}} \text{Re} Z_{\text{вх.л}}}} = \sqrt{\frac{377}{\text{Re} Z_{\text{вх.л}}}}, \quad (16)$$

при этом длина $l_{\text{п}}$ равна

$$l_{\text{п}} = \frac{\lambda}{4} = \frac{\lambda}{4\sqrt{\varepsilon'_{\text{п}}}}, \quad (17)$$

где $\varepsilon'_{\text{п}}$ определяется по (16).

Коэффициент отражения $|\Gamma|$ определяется по соотношению

$$|\Gamma| = \left| \frac{\text{Re} Z_{\text{вх.л}} - Z_{0\text{в}}}{\text{Re} Z_{\text{вх.л}} + Z_{0\text{в}}} \right|. \quad (18)$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Архангельский Ю.С. Установки диэлектрического нагрева. СВЧ установки: учебное пособие / Ю.С. Архангельский. – Саратов: СГТУ, 2003. – 344 с.
2. Архангельский Ю.С. СВЧ электротермия / Ю.С. Архангельский. – Саратов: СГТУ, 1998. – 408 с.
3. Гришина Е.М. Рабочая камера СВЧ ЭТУ для нетепловой модификации тканей с полимерной нитью / Е.М. Гришина, С.Г. Калганова // Вестник СГТУ. – 2006. – № 4(19). – Вып.4. – С. 125-129.
4. Комбинированная установка для СВЧ обработки различных материалов: пат. 86373 Рос. Федерация: МПК(2006.01) Н 05 В 6/64 / Ю.С. Архангельский [и др.]. – № 2009100389/22; заявл. 11.01.2009; опубл. 27.08.2009, Бюл. №24.
5. Установка для СВЧ-обработки материалов с различными диэлектрическими свойствами. / Ю.С. Архангельский, Е.М. Гришина. Патент на полезную модель (РФ)110891. Приоритет от 16 июня 2011 г.
6. Основы теории цепей: учебник для вузов / Г.В. Зевеке [и др.]. – 4-е изд., перераб. – М.: Энергия, 1975. – 752 с.

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

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

Статья поступила в редакцию 14.05.12, принята к опубликованию 13.06.12

УДК 621.314.58

С.А. Дозоров, П.А. Кошелев, В.М. Опре, С.В. Парамонов, В.Н. Терещенко**ТРАНСФОРМАТОРНО - ЁМКОСТНЫЙ СТАБИЛИЗАТОР ТОКА**

Предлагается схема, описывается методика расчёта элементов параметрического стабилизатора тока. Разработаны математические модели стабилизатора, использующие символьные и численные преобразования. Приведены иллюстрации, подтверждающие эффективность технических решений.

Параметрический стабилизатор тока, колебательный контур, математическая модель

S.A. Dozorov, P.A. Koshelev, V.M. Opre, S.V. Paramonov, V.N. Tereshenko**TRANSFORMER - CAPACITIVE CURRENT STABILIZER**

It is proposed scheme, explains the methodology of calculation of elements of the parametric stabilizer of a current. Mathematical models of the stabilizer, using symbolic and numeric conversion. Are illustrations, confirming the effectiveness of the technical solutions.

Parametric current stabilizer, oscillatory circuit, mathematical model

Из всего многообразия источников стабильного тока, как переменного, так и постоянного, наибольшая надёжность и простота свойственны параметрическим стабилизаторам тока (ПСТ).

Как правило, в их основе заложен последовательный колебательный контур, сопротивления которого содержат индуктивную, ёмкостную и активную составляющие.

Классическим примером ПСТ может служить схема Бушера [1] и её модификации.

Недостатком этих схем является наличие входного дросселя, который должен обеспечивать заданный ток при сохранении линейности ПСТ, настройку (совместно с ёмкостью колебательного контура) на частоту питающей сети и при мощностях единицы десятки кВт существенное увеличение массы, габаритов и стоимости установки.

Авторами предложена схема ПСТ, в которой в качестве индуктивности колебательного контура используется эквивалентная индуктивность трансформатора [2].

При проектировании элементов ПСТ необходимо выполнить следующие условия:

– совпадение резонансной частоты контура с частотой питающей сети;

– равенство номинального тока нагрузки заданному значению;

– для сохранения линейного режима работы трансформатора значение магнитной индукции не должно превышать допустимого, поскольку при изменении активного сопротивления нагрузки изменяется добротность контура.

При расчёте может быть принята одна из приведенных ниже схем замещения (рис. 1).

Расчёт проводился операторным методом с использованием программы символьных преобразований MAPLE 9.5 с последующим экспортом данных в пакет MATLAB [3].

На рис. 1 а представлена естественная схема ПСТ, на рис. 1 б приведен ПСТ с Г-образной схемой замещения трансформатора. Матрицы операторных сопротивлений $Z1$ и $Z2$ соответственно, вектор изображений задающих ЭДС $J(1)$.

$$Z2 = \begin{bmatrix} r1 + \frac{1}{pC} + p(Lm) & -pLm \\ -pLm & pLm + R1 \end{bmatrix}; \quad (1)$$

$$Z1 = \begin{bmatrix} r1 + \frac{1}{pC} + p(Ls1 + Lm) & -pM \\ -pM & p(Ls2 + Lm) + R \end{bmatrix};$$

$$J = \begin{bmatrix} \frac{Um\omega}{p^2 + \omega^2} & 0 \end{bmatrix}.$$

Здесь Um – амплитуда синусоидального напряжения сети, В, ω – частота, 1/с.

Вектор I изображений контурных токов получается в результате решения матричного уравнения (2):

$$I = Z^{-1} \cdot J. \tag{2}$$

На рис. 1 в – одноконтурная схема замещения с последовательными эквивалентными активным сопротивлением Rek и индуктивностью Lek (3).

$$Lek = \frac{Lm \cdot R^2}{R^2 + \omega^2 \cdot Lm^2} \quad ReK = r1 + \frac{\omega^2 \cdot R \cdot Lm^2}{R^2 + \omega^2 \cdot Lm^2} \tag{3}$$

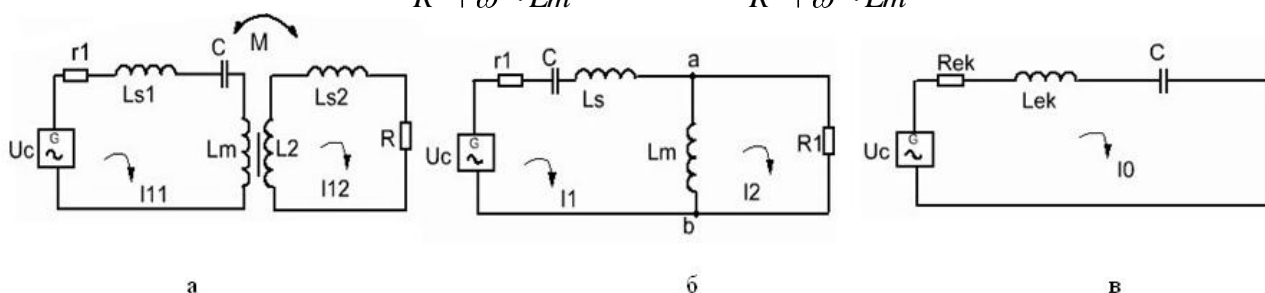


Рис. 1. Схемы замещения ПСТ

Далее производится переход к оригиналам токов (оператор invlaplace) и визуализация результата.

Пример.

На рис. 2 показан процесс установления тока нагрузки по параметрам ПСТ, предварительно настроенным на частоту сети 400 Гц и действующее значение тока нагрузки 20 А. Методика настройки будет приведена ниже. Для всех трёх схем сигналы идентичны.

Параметры ПСТ: $r1=0,02$ Ом; $R=8$ Ом; $Lm=0,0022$ Гн; $\omega=2\pi \cdot 400$ 1/с; $C=72,1$ мкФ; $W1=23$; $W2=34$; $L2=(W2/W1)^2 \cdot Lm$ Гн; $M = 0,95 \cdot \sqrt{Lm \cdot L2}$ Гн; $Ls=83$ мкГн; $Um=282$ В.

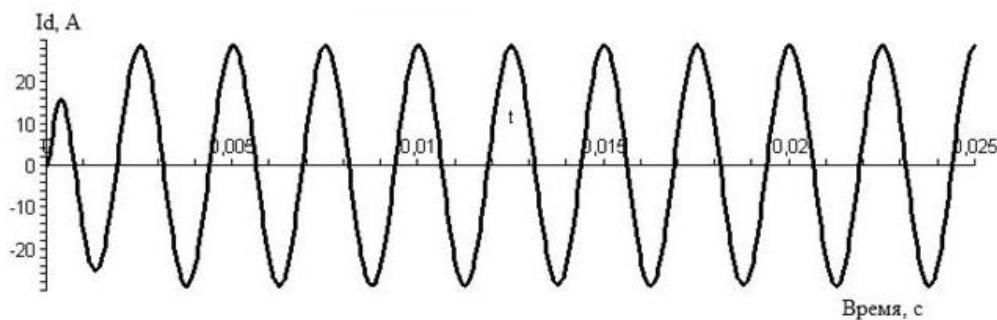


Рис. 2. Установление тока нагрузки

Предварительный расчёт и настройка элементов ПСТ.

Целью данного этапа является предварительное нахождение основных электрических и геометрических параметров проектируемого изделия и передача их значений в программу MATLAB для дальнейшей обработки, моделирования, оптимизации и тестирования решения с применением численных методов анализа и синтеза.

Расчёт включает последовательность операций в символьных выражениях.

Применяемые формулы соответствуют известным положениям электротехники. Приводятся и комментируются некоторые из них, в том числе специфические для данной задачи.

Геометрический параметр трансформатора ScS0 – произведение площадей поперечного сечения магнитопровода и окна для заполнения обмотками, м⁴.

$$ScS0 = \frac{P}{den}, \quad (4)$$

где $den = \varphi \cdot f \cdot k_c \cdot k_0 \cdot \text{deltad} \cdot B_{mm} \cdot \text{etat}$, P – активная мощность нагрузки, Вт, φ – коэффициент распределения токов, k_0 – коэффициент заполнения окна, deltad – допустимая плотность тока в обмотках, А/м², B_{mm} – допустимая магнитная индукция, Тл, etat – предполагаемый КПД трансформатора, k_c – коэффициент заполнения магнитопровода, f – частота сети, Гц.

После ряда символьных преобразований выводится выражение для ёмкости конденсатора контура C (5) и добротности контура Q (6):

$$C = \frac{4}{f^2 \cdot \pi^2 \cdot \mu_{ie} \cdot W1^2 \left(\frac{P}{den}\right)^{1/4}}. \quad (5)$$

$$Q = \frac{\pi \cdot \mu_{ie} \cdot W1^2 \sqrt{f \sqrt{\frac{P}{den}}}}{8 \cdot R1}. \quad (6)$$

Здесь μ_{ie} – эквивалентная магнитная проницаемость, Гн/м, $W1$ – количество витков 1 обмотки, $R1$ – активное сопротивление нагрузки, Ом.

Дальнейшие преобразования позволяют найти выражение для $W1$ (7), обеспечивающее допустимое значение магнитной индукции B_{mm} .

$$W1 = \frac{16 \cdot B_{mm} \cdot \mu_{ie} / den}{\mu_{ie} \cdot I_0}. \quad (7)$$

Здесь I_0 – ток холостого хода, А.

Далее могут быть подставлены числовые значения исходных данных (табл. 1).

В этом примере ПСТ рассчитывается для материала магнитопровода: сталь 3425 с толщиной ленты 0,5 мм.

Таблица 1

Обозн.	Наименование параметра	Ед. изм.	Значение
P	Номинальная мощность нагрузки	Вт	5000
Id	Ток нагрузки	А	25
mur	Относительная магнитная проницаемость	-	1000
k0	Коэффициент заполнения окна обмотками	-	0.5
kc	Коэффициент заполнения магнитным материалом	-	0.95
deltad	Допустимая плотность тока	А/м ²	3*10 ⁶
etat	Предполагаемый КПД	-	0.95
dzet	Размер немагнитного зазора	м	10 ⁻⁵
φ	Коэффициент распределения токов 1 и 2 обмоток	-	0.5
Gam	Плотность материала обмоток	кг/м ³	8900
Gaf	Плотность материала магнитопровода	кг/м ³	7800
Um	Амплитуда напряжения сети	В	282
Bmm	Предельная магнитная индукция	Тл	1.5

Результаты сведены в табл. 2 вместе с данными уточнённого расчёта.

Уточнённый расчёт элементов ПСТ

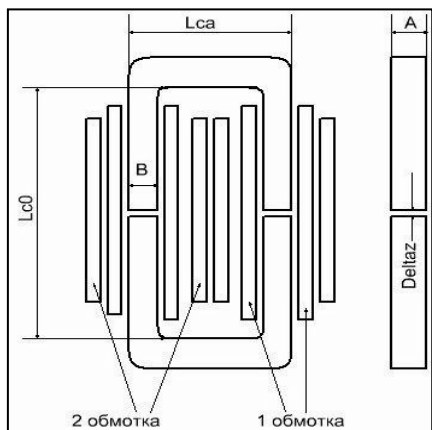


Рис. 3. Основные элементы трансформатора

Дальнейшие действия производились в программном пакете MATLAB 7.11 на основании данных предварительного расчёта. Поскольку для достоверного определения параметров ПСТ необходимы полные данные о конструкции трансформатора, в программе осуществляются следующие операции:

- уточняются геометрические параметры магнитопровода, вычисляются размеры проводов обмоток;
- имитируется процесс укладки витков с учётом изоляции проводов, магнитопровода, межслоевой изоляции, размеров воздушных каналов для охлаждения, размера немагнитного зазора (рис. 3), вычерчивается эскиз изделия.

Таблица 2

Обозначения, размерность, значение (уточнённые)	Предварительный расчёт
Кол. витков первичной обмотки 23	32
Напряжение (ампл.) 1 обмотки, В 282	282
Кол. витков вторичной обмотки 34	16
Средняя длина маг. силовой линии (м) 0.95	0.96
Кол. слоев первичной обмотки 1	-
Кол. слоев вторичной обмотки 1	-
Индуктивность намагничивания (Гн) 0.0022	0.0023
Индуктивность рассеяния (мкГн) 83	-
КПД 0.955	-
Длина провода 1 обмотки (м) 7	-
Длина провода 2 обмотки (м) 8	-
Общая мощность активных потерь (Вт) 227	-
Диаметр провода 1 обмотки (м) 0.005	0.0043
Диаметр провода 2 обмотки (м) 0.0033	0.003
Масса обмоток (кг) 1.5261	-
Масса магнитопровода (кг) 18.72	26
Масса трансформатора (кг) 20.5	-
Площадь сечения магнитопровода (м ²) 0.0025	0.0036
Сопротивление 1 обмотки (Ом) 0.008	-
Сопротивление 2 обмотки (Ом) 0.017	-
Ток 1 обмотки (источника) (А) 57.9	-
Ток 2 обмотки (А) 25	25
Ток ХХ (А) 52	52.3
Резонансная ёмкость (мкФ) 72.1	69
Активная мощность (Вт) 5250	5000
Полная мощность (ВА) 17390	-
Активное сопротивление нагрузки (Ом) 8	8

Для многих систем электропитания, в частности в лазерной технике, источник должен обеспечить стабильный постоянный ток.

Ток ПСТ мало зависит от сопротивления нагрузки, но критичен к колебаниям напряжения сети.

Для компенсации таких колебаний должен быть применён управляемый преобразователь, например, широтно-импульсный модулятор (ШИМ). Поскольку в источнике тока разрывы в цепи нагрузки недопустимы, используется транзисторный ключ (элемент 8 на рис. 5), замыкающий ток выпрямителя (элемент 4 на рис. 5).

Моделирование в системе MATLAB SIMULINK POWER SYSTEMS показало эффективность такого решения.

Ниже приведены результаты модельных экспериментов при изменении активного сопротивления R от 1 до 15 Ом и колебаниях сетевого напряжения в пределах $+10...-15\%$.

Уставка значения тока нагрузки $I_d=20$ А.

1. U сети = 240 В, $R=1$, $I_d=21,8$ А.
2. U сети = 310 В, $R=1$, $I_d=22,1$ А.
3. U сети = 240 В, $R=5$, $I_d=19,1$ А.
4. U сети = 310 В, $R=5$, $I_d=20,3$ А.
5. U сети = 240 В, $R=15$, $I_d=22,0$ А.
6. U сети = 310 В, $R=15$, $I_d=22,05$ А.

На рис. 4 показан процесс установления тока на уровне 10 А и управляющее напряжение (сигнал на выходе корректирующего устройства 22, рис. 5).

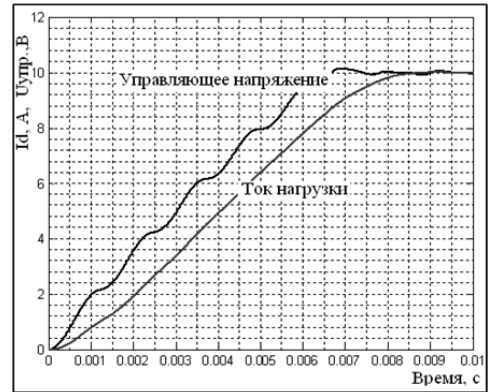


Рис. 4. Ток нагрузки и управляющий сигнал

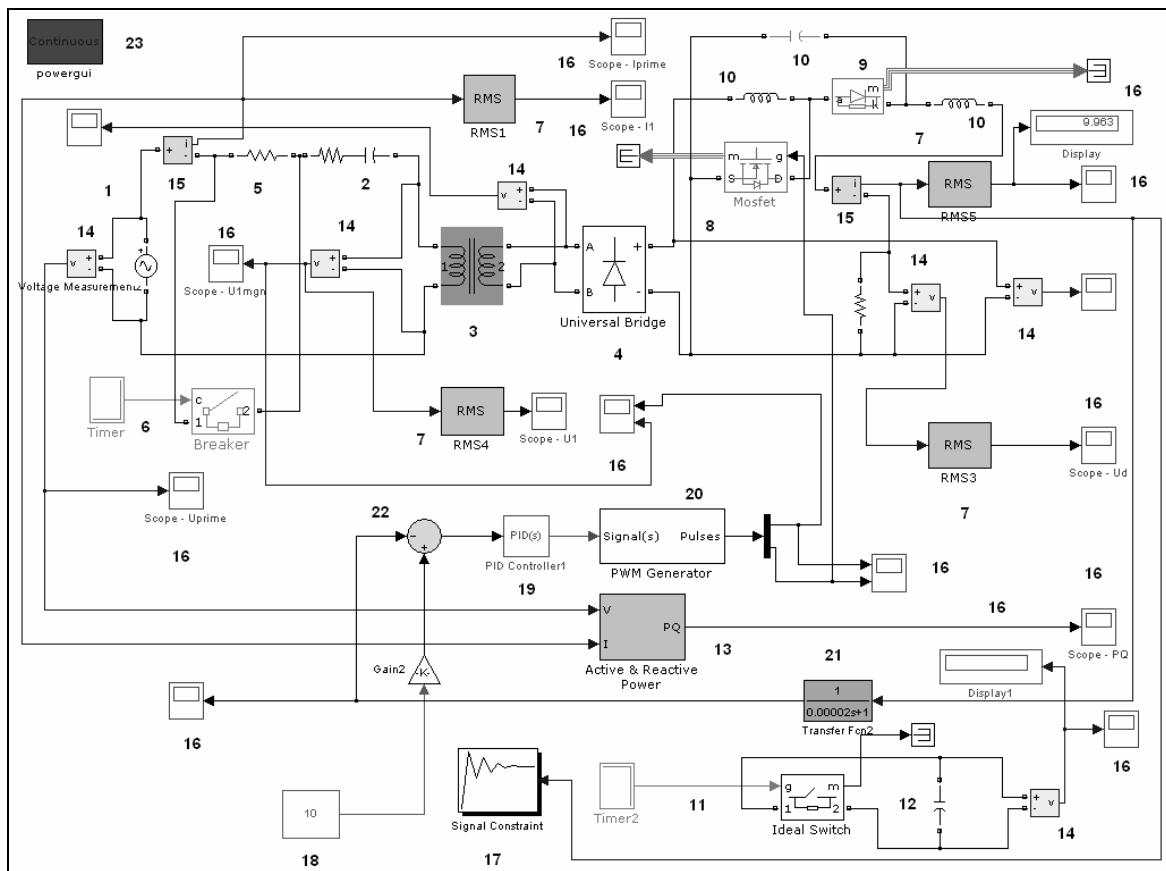


Рис. 5. Структура модели

Структура модели в системе MATLAB SIMULINK POWER SYSTEMS показана на рис. 5 для активно-индуктивной нагрузки с возможностью моделирования процесса заряда конденсатора ёмкостного накопителя.

Подключение ПСТ к ёмкости накопителя $C_n = 1000$ мкФ производилось в момент времени 0,1 с (элементы 11, 12 на рис. 5). Элементы блока 6 обеспечивают плавное включение ПСТ. В течение 0,01 с последовательно с ёмкостью резонансного контура включается резистор с сопротивлением 5 Ом. Напряжение на конденсаторе U_c нарастает от 0 до 1000 В в течение времени $t=0,1$ с.

График зависимости $U_c(t)$ – прямая линия, поэтому здесь не приводится.

Основные элементы на рис. 5.

1. Питающая сеть. 2. Ёмкость резонансного контура с учётом потерь. 3. Трансформатор. 4. Выпрямитель. 5. Ограничивающий резистор. 6. Пусковое устройство. 7. Блоки вычисления действующего значения сигнала. 8. Транзисторный ключ. 9. Диод. 10. Элементы фильтра. 11. Зарядное устройство. 12. Конденсатор накопителя. 13. Блок вычисления активной и реактивной мощности. 14. Измерители напряжения. 15. Измерители тока. 16. Приборы наблюдения и вывода информации в рабочую область. 17. Блок оптимизации. 18. Задатчик тока. 19. ПИД контроллер. 20. Генератор ШИМ сигнала. 21. Корректирующее устройство. 22. Схема сравнения (сумматор). 23. Графический интерфейс пользователя.

Блок 17 служит для настройки параметров выбранных элементов динамической системы для получения заданной реакции.

В данном случае блок 17 используется для вычисления оптимизированных параметров ПИД контроллера, а именно, коэффициентов передачи параллельных каналов: пропорционального k_p , интегрирующего k_i , дифференцирующего k_d .

Оптимизация заключается в минимизации целевой функции, в качестве которой выбрана разность между текущим значением реакции (тока нагрузки) и заданным (постоянный ток, в этом случае 10 А).

В результате работы блока 17 получены значения: $k_p=10200$; $k_i=0.29$; $k_d=1.04$.

Выводы

1. Показаны достоинства предложенного устройства по сравнению с известными ПСТ.
2. Разработан комплект программ в символьных и численных математических средах, позволяющий пользователю оперативно решать задачи проектирования ПСТ.
3. Модельные эксперименты доказали верность выбранных технических решений и методик.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белостоцкий Б.Р. Основы лазерной техники / Б.Р. Белостоцкий, Ю.В. Любавский, В.М. Овчинников. – М.: Сов. радио, 1972.
2. Пат. РФ № 77517. Индуктивно-ёмкостный преобразователь / И.В. Саенко, В.М. Опре, А.А. Новик, П.А. Кошелев, С.В. Парамонов, С.А. Дозоров. Опубл. 20.10.2008.
3. Кошелев П.А. Моделирование электронных устройств в символьных и матричных математических вычислительных средах / П.А. Кошелев, С.В. Парамонов, С.Н. Пшенкин // Exponenta pro: Математика в приложениях. – 2004. – № 3-4. – С. 146-152.

Дозоров Сергей Анатольевич – аспирант кафедры «Электротехнологическая и преобразовательная техника» Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета (СПбГЭТУ («ЛЭТИ»))

Sergey A. Dozorov – Postgraduate Department of Electrical-Technological and Converter Equipment St. Petersburg State Electrotechnical University (St. PbSETU (“LETI”))

Кошелёв Пётр Александрович –
доктор технических наук, профессор кафедры
«Электротехнологическая и преобразовательная
техника» Санкт-Петербургского государственного
электротехнического университета (СПбГЭТУ
(«ЛЭТИ»))

Peter A. Koshelev –
Dr. Sc., Professor
Department of Electrical-Technological
and Converter Equipment
St. Petersburg State Electrotechnical
University (St. PbSETU (“LETI”))

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

Victor M. Opre –
Dr. Sc., Professor
Department of Electrical-Technological
and Converter Equipment
St. Petersburg State Electrotechnical
University (St. PbSETU (“LETI”))

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

Sergei V. Paramonov –
PhD, Associate Professor
Department of Electrical-Technological
and Converter Equipment
St. Petersburg State Electrotechnical
University (St. PbSETU (“LETI”))

Терещенко Владимир Николаевич –
Начальник лаборатории «ОАО «НТЦ
«Завод Ленинец»

Vladimir N. Tereshchenko –
Chief of Laboratory “JSC NTTs Lenincts plant”

Статья поступила в редакцию 16.05.12, принята к опубликованию 15.06.12

УДК 658.261:658.264:621.365

И.В. Долотовский, Е.А. Ларин, Н.В. Долотовская

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ СОБСТВЕННЫХ НУЖД НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ПЕРЕРАБОТКИ ГАЗА И ГАЗОВОГО КОНДЕНСАТА

Рассмотрены основы системного анализа эффективности технических решений по выработке электрической и тепловой энергии на предприятиях переработки газа и газового конденсата в собственных генерирующих источниках. Приведены схема интегрированного источника энерговодоснабжения и результаты комплексной оценки его эффективности на действующем предприятии.

Автономный источник энерговодоснабжения, предприятие переработки газа и газового конденсата, системный анализ, эффективность

I.V. Dolotovskiy, E.A. Larin, N.V. Dolotovskaya

SYSTEM ANALYSIS OF EFFICIENCY OF POWER PLANT AUXILIARY ENTERPRISES OF GAS AND GAS CONDENSATE PROCESSING

Basics of system effectiveness analysis of technical solutions to produce electricity and heat at the enterprises of gas and gas condensate processing in own generation sources. Provides integrated circuit source of energy supply and the results of complex assessment of its effectiveness at the operating company.

Autonomous source of energy and water supply, gas and gas condensate processing, system analysis, effectiveness

Увеличение тарифов на внешнюю электроэнергию и снижение уровня надежности систем энергоснабжения РАО «ЕЭС России» обусловили необходимость развития собственной энергетической базы предприятий газовой промышленности и разработки высокоэффективных автономных источников энергоснабжения. В соответствии с Концепцией развития энергетики ОАО «Газпром» [1, 2], где определены основные принципы использования автономных энергоисточников, отраслевыми организациями разработаны нормативно-технические документы [3], определяющие требования к этим объектам по надежности [4], устойчивости режимов эксплуатации [5], общей экономической эффективности [6–8]. Хотя в программу поэтапного перевода на энергоснабжение от собственных генерирующих источников включены все объекты газовой промышленности, в настоящее время она активно реализуется только на газодобывающих предприятиях (ГДП) и объектах газотранспортной системы (ГТС) – наиболее крупных потребителях электроэнергии, где внедрение электростанций собственных нужд (ЭСН) позволяет получить максимальный интегральный эффект.

Предприятия по переработке газа и газового конденсата (ППГиГК) наряду с общими с объектами ГДП и ГТС факторами, определяющими технико-экономическую схему развития энергетического хозяйства на базе ЭСН и его взаимодействие с внешними системами энергообеспечения, характеризуются рядом особенностей генерации и потребления энергоносителей, обусловленных спецификой технологических процессов основных производств и режимов эксплуатации оборудования.

Все объекты газовой отрасли предъявляют следующие общие требования к создаваемым ЭСН:

- высокая надежность обеспечения электроэнергией технологических потребителей, большая часть которых относится к особой и первой категории электроприемников;
- высокоэффективная работа ЭСН на всех этапах жизненного цикла технологического объекта, начиная со строительства и заканчивая выводом из эксплуатации;
- максимальная интеграция с действующими энерготехнологическими установками с организацией замкнутых технологических циклов генерации и потребления топливно-энергетических ресурсов (ТЭР);
- интеграция автоматизированных систем управления ЭСН с системой управления технологическими процессами (несмотря на то, что объекты автономной энергетики на предприятиях газовой промышленности относятся к вспомогательному производству, обслуживающему основные технологические процессы, и не реализующему продукцию сторонним потребителям).

К специфическим особенностям ППГиГК, отличающим их от других объектов газовой отрасли, относятся следующие факторы:

- большая доля в удельном энергопотреблении топливного газа и тепловой энергии: в среднем на технологические процессы расходуется около 48 % газа и 36 % теплоты от общего потребления энергоресурсов;
- тепловая энергия на всех ППГиГК вырабатывается в собственных теплогенерирующих установках (в производственной котельной или котлах-утилизаторах);
- практически весь топливный газ расходуется на выработку теплоты в технологических печах (нагрев потоков) или котельных агрегатах (генерация пара);
- основное количество тепловой энергии в виде пара получают за счет утилизации теплоты, выделяющейся при переработке сырья (в котлах-утилизаторах за технологическими печами или энерготехнологических агрегатах);
- собственные аварийные источники электроснабжения в непрерывном режиме работы могут выработать до 15 % потребляемой электроэнергии;
- в балансе первичных энергоносителей на долю газа приходится около 80 % (с учетом расхода газа на выработку пара в котельных агрегатах), на долю электроэнергии – 20% потребляемых ТЭР;

- в балансе топливного газа до 30 % от общего топливопотребления составляют технологические полупродукты и горючие отходы;
- большая доля в удельном потреблении электрической энергии и топливного газа вспомогательных производств водоснабжения, утилизации отходов и водоотведения: до 10 и 20 % соответственно;
- эксплуатация альтернативных вариантов привода нагнетательного оборудования (компрессоров, воздуходувок, насосов).

Эти факторы обусловили необходимость разработки ЭСН ППГиГК на базе газотурбинных агрегатов (ГТУ) с комбинированной выработкой теплоты и электроэнергии (когенерацией), максимальным использованием вторичных энергетических ресурсов, в том числе горючих отходов, сжигаемых в факельных системах, минимизацией водопотребления от внешнего источника и водоотведения (положительное решение о выдаче патента на полезную модель по заявке №2012109097/06 от 11.03.2012). Принципиальная схема ЭСН типа ПГУ-ТЭЦ, интегрированной с технологической системой и внутрипроизводственными источниками генерации ТЭР, приведена на рис. 1. В технологической системе в установках преобразования сырья в продукцию отдельным блоком (УТН) выделено оборудование, где осуществляется нагрев или испарение технологических потоков за счет теплоты уходящих дымовых газов. Установки нейтрализации / обезвреживания отходов (УНО) включают комплекс аппаратов, обеспечивающих утилизацию горючих отходов и очистку сточных вод с получением водяного конденсата, используемого в качестве питательной воды котлу-утилизаторов и паровых котлов автономного энергоисточника – ЭСН. В [9] приведено одно из возможных технических решений по комбинированию УТН и УНО для технологического процесса регенерации абсорбентов, входящего в структуру всех ППГиГК.

Системный анализ эффективности ЭСН на ППГиГК выполнен в соответствии с разработанной нами общей концепцией исследования эффективности энергетического комплекса сложно структурированных объектов [10].

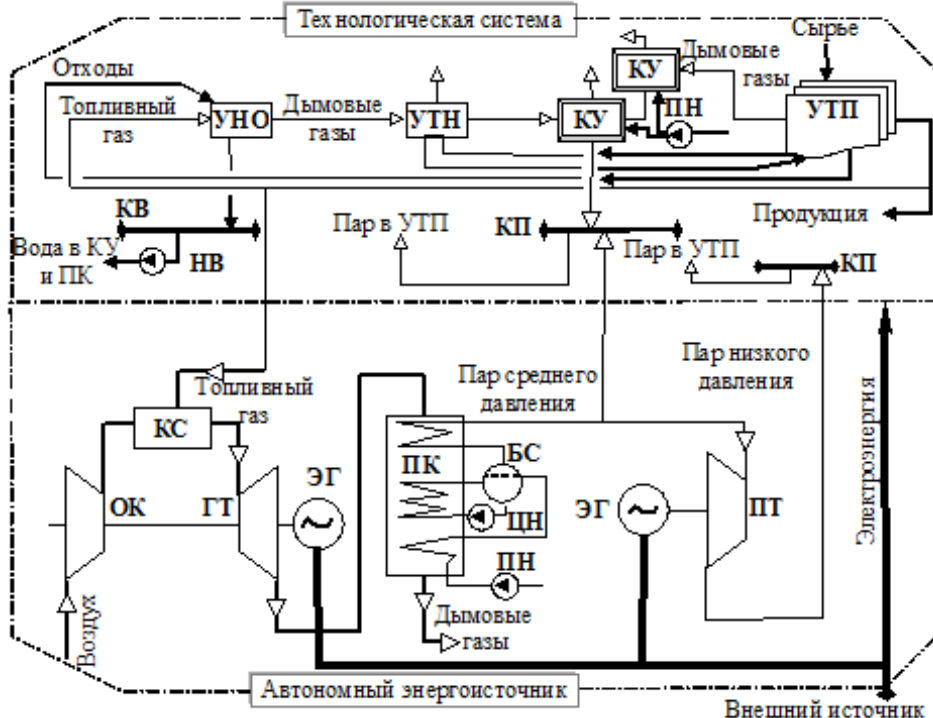


Рис. 1. Принципиальная схема системы энергоснабжения с автономным энергоисточником

Установки: УТП – технологического превращения сырья; УНО – нейтрализации отходов; УТН – технологического нагрева; КУ – котел-утилизатор; ПН, ЦН, НВ – насосы: питательный, циркуляционный и очищенной воды; КВ, КП – коллекторы воды и пара; ОК – осевой компрессор; ГТ, ПТ – газовая и паровая турбины; КС – камера сгорания; ЭГ – электрогенератор; ПК – паровой котел; БС – барабан-сепаратор

В качестве обобщенного критерия оптимальности структуры и параметров ЭСН ППГиГК принимаем так называемую функцию «полезности» $\langle U \rangle$, включающую ранжированные по степени значимости показатели технико-экономической, энергетической, технологической эффективности

$$U = \sum \alpha_i \cdot \bar{u}_i, \quad (1)$$

где \bar{u}_i – относительное значение i -го показателя эффективности, равное отношению технико-экономической энергетической, технологической характеристики к максимальному или минимальному значению этого показателя в рассматриваемой группе альтернатив объекта; α_i – коэффициенты рангов частных критериев эффективности.

Технико-экономическая эффективность варианта автономного энергообеспечения и технические решения по его структуре и режимам эксплуатации оцениваются по значениям сравнительного интегрального социально-экономического эффекта $\langle Z_\Sigma \rangle$ или чистого дисконтированного дохода (ЧДД) и дисконтированному сроку окупаемости инвестиций $\langle C_{ок} \rangle$. Максимум интегрального эффекта достигается при достижении оптимального значения вектора оптимизирующих переменных \bar{Y} , соответствующего оптимальной структуре ЭСН ППГиГК и оптимальным режимам его эксплуатации

$$\Delta Z_\Sigma = \sum_{\tau=0}^T \langle Z_\tau^{np} + \Delta Z_\tau^n + \Delta Z_\tau^h + \Delta Z_\tau^c \rangle \langle + E \rangle^{-\tau} + \Delta \Phi_T \cdot \langle + E \rangle^{-T} \xrightarrow{Y \rightarrow opt} \max, \quad (2)$$

где ΔZ_τ^{np} , ΔZ_τ^n – соответственно, экономия затрат на ППГиГК при производстве и потреблении электрической и тепловой энергии, водоснабжении и водоотведении в τ -й год эксплуатации; ΔZ_τ^h – стоимостная оценка эффекта при сравнении вариантов энерго- и водообеспечения от сторонних и собственных источников, отличающихся уровнем надежности технологических потребителей в τ -й год; ΔZ_τ^c – стоимостная оценка социального эффекта в τ -й год сравниваемых вариантов; $\Delta \Phi_T$ – разность остаточной стоимости основных фондов вариантов на конец расчетного периода времени T ; E – норматив приведения затрат и эффектов к единому времени.

Дополнительным условием эффективности ЭСН является требование достижения показателя надежности по обеспечению электроэнергией не менее чем в действующей системе.

Для обеспечения заданных показателей надежности электроснабжения от собственного источника требуются дополнительные затраты, определяемые суммой

$$\Delta Z^h = \sum_{i=1}^k \langle k_i^* - b_i \rangle N_i \cdot \tau_p \cdot C_m + \langle k_a \cdot \tau_{пл} - \tau_p \rangle \langle C_p \cdot C_{mp} - b \cdot C_m \rangle N_p + Z_p^n, \quad (3)$$

где k_i^* , b_i – удельный расход топлива i -й установкой мощностью N_i в режиме работы на пониженной и номинальной частоте соответственно; τ_p – время запаздывания ввода резервной установки в случае отказа основного источника электроснабжения; k_a – коэффициент аварийности обеспечивающей установках; $\tau_{пл}$ – плановое число работы обеспечивающей установки в году; b_p , b – удельные расходы топлива на выработку электроэнергии в резервной и обеспечивающей установке; C_{mp} , C_m – стоимость топлива, расходуемого резервной и обеспечивающей установками; Z_p^n – топливная составляющая затрат на пуск-останов резервного оборудования.

При расчете эффективности инвестиционного проекта сооружения ЭСН на ППГиГК определяется также срок окупаемости – минимальный временной интервал (от начала осуществления проекта), за пределами которого интегральный эффект становится и в дальнейшем остается неотрицательным. Иначе – это период, начиная с которого первоначальные вложения и другие затраты, связанные с инвестиционным проектом, покрываются суммарными результатами его осуществления.

Энергетическая системная эффективность ЭСН на ППГиГК определяется как разность абсолютных расходов топлива на выработку определенных количеств электроэнергии и теплоты при раздельном производстве электроэнергии в энергосистеме $B_{\text{сис}}$ и технологического пара в котельной $B_{\text{кот}}$ и комбинированном способе их производства на ТЭЦ $B_{\text{ТЭЦ}}$

$$\Delta B_{\text{ЭК}} = B_{\text{сис}} + B_{\text{кот}} - B_{\text{ТЭЦ}} \quad (4)$$

Величина $B_{\text{сис}}$ определяется как

$$B_{\text{сис}} = B_{\text{КЭС}} = \mathcal{E}_{\text{выр}} / (\eta_{\text{э}}^{\text{КЭС}} \cdot Q_{\text{Н}}^{\text{P}}) \quad (5)$$

а величина $B_{\text{кот}}$ по формуле

$$B_{\text{кот}} = Q_{\text{выр}} / (\eta_{\text{кот}} \cdot Q_{\text{Н}}^{\text{P}}) \quad (6)$$

где $\eta_{\text{э}}^{\text{КЭС}}$, $\eta_{\text{кот}}$ – соответственно электрический КПД КЭС и КПД котельной. В качестве КЭС при сравнении вариантов принят вариант конденсационной ПГУ на природном газе с электрическим КПД 48-52% при среднесистемном КПД производства электроэнергии не выше 37,8%.

Суммарный расход топлива на ЭСН ППГиГК на комбинированную выработку электроэнергии $\mathcal{E}_{\text{выр}}$ и технологического пара $Q_{\text{выр}}$ определяется расходом топлива в камеру сгорания ГТУ, а относительная экономия топлива в системе теплоэнергоснабжения – отношением $\Delta\beta = \Delta B_{\text{ЭК}} / B_{\text{ТЭЦ}}$.

В качестве **энерготехнологических показателей эффективности** ЭСН на ППГиГК с утилизацией отходов и нейтрализацией стоков приняты **коэффициенты рационализации** топливно-энергетического и водного балансов K_{pi} при сопоставлении с вариантом обеспечения этими ресурсами от внешних источников.

Коэффициент рационализации топливно-энергетического баланса $K_{\text{рТЭБ}}$ характеризует возможности его совершенствования за счет использования вторичных энергоресурсов и сокращения удельного приведенного потребления ТЭР от внешних источников

$$K_{\text{рТЭБ}} = 1 - (E_{\text{ЭСН}} / E_{\text{б}}) \quad (7)$$

где $E_{\text{ЭСН}}$, $E_{\text{б}}$ – приведенные удельные энергоемкости ППГиГК для сравниваемых вариантов энергообеспечения: от ЭСН и от внешнего источника (базового).

Аналогичным образом коэффициенты рационализации водопотребления $K_{\text{рW}}$ и водоотведения $K_{\text{рS}}$ характеризуют возможности организации замкнутых циклов с максимальной утилизацией сточных вод

$$K_{\text{рW}} = 1 - (W_{\text{ЭСН}} / W_{\text{б}}) \quad (8)$$

$$K_{\text{рS}} = 1 - (S_{\text{ЭСН}} / S_{\text{б}}) \quad (9)$$

где $W_{\text{ЭСН}}$, $S_{\text{ЭСН}}$, $W_{\text{б}}$, $S_{\text{б}}$ – удельное водопотребление и водоотведение для сравниваемых вариантов системы.

Для расчета коэффициентов α_i в зависимости (1) использован метод анализа иерархий [10]: составлена матрица парных сравнений пяти критериев эффективности ЭСН в структуре ППГиГК (коэффициентов рационализации балансов K_{pi} , ΔZ_{Σ} , $\overline{ЧДД}$, $T_{\text{ок}}$). В результате получены следующие значения коэффициентов рангов частных критериев эффективности:

$$\alpha_{K_{\text{рТЭБ}}} = 0,417; \alpha_{K_{\text{рW}}} = 0,263; \alpha_{K_{\text{рS}}} = 0,160; \alpha_{\overline{ЧДД}} = 0,097; \alpha_{T_{\text{ок}}} = -0,062.$$

После подстановки α_i в зависимость (1) получаем выражение для функции «полезности» вариантов ЭСН ППГиГК:

$$U = 0,417 \cdot \overline{K}_{\text{рТЭБ}} + 0,263 \cdot \overline{K}_{\text{рW}} + 0,16 \cdot \overline{K}_{\text{рS}} + 0,097 \cdot \overline{ЧДД} - 0,062 \cdot \overline{T}_{\text{ок}}.$$

Технические решения по аппаратурному оформлению ЭСН и режимам эксплуатации оборудования зависят от технологической топологии ППГиГК и требуют соответствующих

расчетов, адаптированных к конкретным условиям жизненного цикла предприятия, с использованием специально разработанного информационно-аналитического обеспечения [11], содержащего совокупность расчетно-информационных блоков, программных модулей и реляционную базу данных [12].

Разработанные теоретические положения оценки эффективности ЭСН на ППГиГК были реализованы для обоснования модернизации энергетического комплекса предприятия по переработке высокосернистой газоконденсатной смеси – Астраханского газоперерабатывающего завода (АГПЗ). Варианты ЭСН (ПГУ-ТЭЦ) оценивались как по частным критериям эффективности и функции «полезности», так и по величине абсолютной и относительной экономии топлива.

Варианты отличаются составом тепло- электрогенерирующего оборудования автономного энергоисточника:

1 – 3 турбины GT8C2 Alstom, 3 котла КУ-93, 3 турбины К-6-2,4;

2 – 2 турбины V-64.3A SIEMENS, 2 котла КУ-120, 2 турбины К-6-2,4;

3 – 4 турбины GTX-100 Alstom, 4 котла КУ-60, 2 турбины К-6-2,4.

Показатели абсолютной и относительной экономии топлива для этих вариантов ЭСН приведены ниже.

Вариант ЭСН	1	2	3
Годовая экономия топлива в системе ¹⁾ , $\Delta B_{\text{эк}}$, тыс. т у. т./год	54,1 (119,7)	69,6 (123,2)	39,2 (104,1)
Относительная экономия в системе	0,115 (0,255)	0,178 (0,316)	0,082 (0,217)

¹⁾ – данные по экономии топлива соответствуют вариантам выработки электроэнергии в системе: ПГУ конденсационного типа (раздельный способ со среднесистемным КПД)

Основные показатели эффективности инвестиционного проекта создания и функционирования ЭСН типа ПГУ-ТЭЦ в структуре АГПЗ для различных вариантов состава оборудования приведены в таблице.

Показатели эффективности вариантов ЭСН

Показатель, единица измерения	Варианты ПГУ-ТЭЦ		
	1	2	3
Мощность, МВт			
–электрическая	186	152	184
–тепловая	161	161	161
Удельный расход топлива на выработку энергии			
– электрической, т у. т./МВт·ч	0,161	0,148	0,165
– тепловой, т у. т./ГДж	0,045	0,042	0,046
Коэффициент рационализации:			
– энергопотребления $K_{pTЭБ}$	0,255	0,316	0,217
– водопотребления K_{pW}	0,916	0,912	0,902
– водоотведения K_{pS}	0,974	0,973	0,970
Интегральный эффект ΔZ_{Σ} (ДД), млн. руб. (за 10 лет)	5946,808	4805,669	5857,002
Срок окупаемости, $T_{\text{ок}}$, лет	7,8	10,2	8,5
Функция «полезности» U	0,553	0,509	0,522

Сопоставительный анализ приведенных в таблице технико-экономических показателей трех вариантов позволяет сделать вывод о целесообразности внедрения в структуру энергетического комплекса АГПЗ ЭСН типа ПГУ-ТЭЦ с составом оборудования первого варианта.

Оценка устойчивости решений по внедрению ЭСН типа ПГУ-ТЭЦ на ППГиГК в условиях неопределенности исходной технико-экономической информации выполнена по основным критериям – интегральному эффекту и дисконтированному сроку окупаемости. В качестве факторов, влияющих на принятые критерии эффективности, приняты тарифы на тепловую и электрическую энергию, цена газа, капитальные затраты на сооружение автономного источника (рис. 2).

Показатели проекта существенно зависят от цен на энергоносители, в меньшей степени – от изменения капитальных вложений. Так, из рис. 2 а видно, что увеличение затрат в строительство ЭСН на 10% приводит к снижению ЧДД не более чем на 5–6%. Вместе с тем рост тарифа на выработанную (потребляемую) электроэнергию приводит к росту этого показателя в 1,75–2,05 раза. В меньшей степени на величину ЧДД оказывает влияние неопределенность информации по тарифу на тепловую энергию.

Из рис. 2 б видно влияние неопределенности в исходной информации на расчетное значение дисконтированного срока окупаемости инвестиций в строительство ЭСН типа ПГУ-ТЭЦ при реконструкции энергетического комплекса ППГиГК. Следует отметить, что значение дисконтированного срока окупаемости определено от начала реализации проекта (от момента начала строительства). Определяющее влияние на величину срока окупаемости оказывают стоимость используемого топлива и тарифы на электрическую и тепловую энергию.

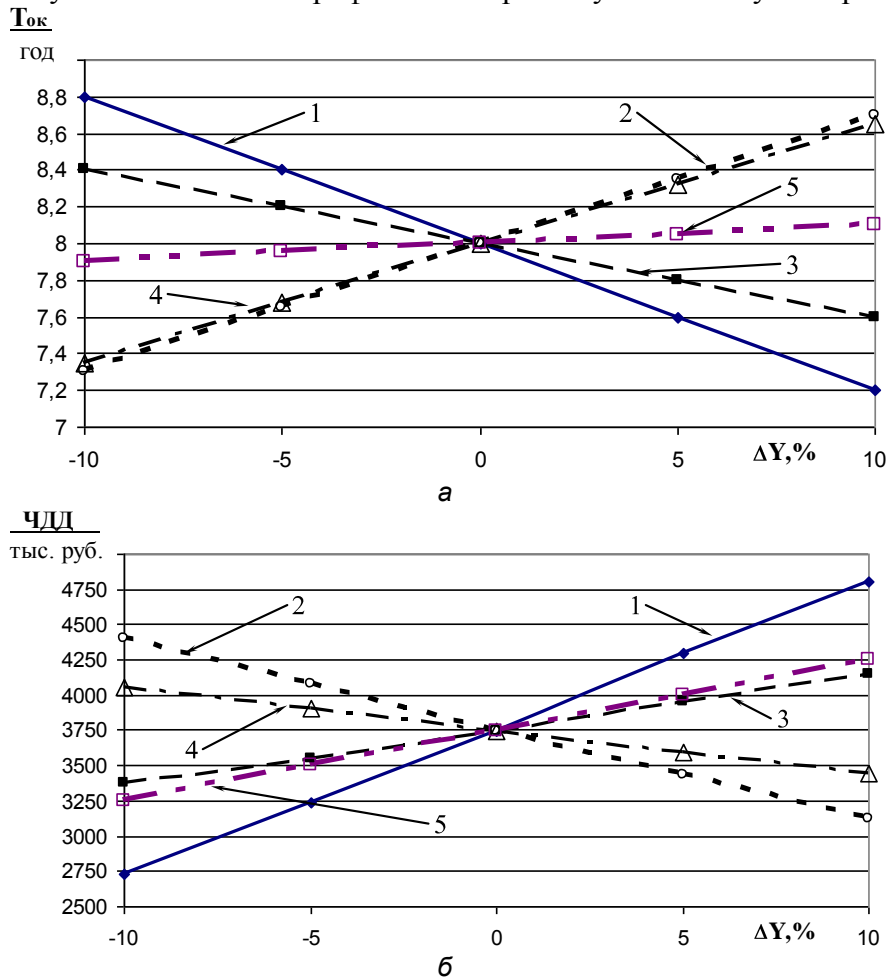


Рис. 2. Зависимости показателей проекта от изменения влияющих факторов: 1, 3 – тариф на электроэнергию и тепловую энергию; 2 – цена топливного газа; 4 – инвестиции; 5 – суммарно факторы 1–4

Для предлагаемого проекта ЭСН типа ПГУ-ТЭЦ на ППГиГК проведен анализ изменения коэффициентов чувствительности рассчитываемых показателей эффективности к изменению отдельных технико-экономических факторов

$$\alpha_z = \frac{\partial Z}{Z} \cdot \frac{Y}{\partial Y},$$

где Z – критерий эффективности; Y – фактор, влияющий на его значение.

Абсолютное значение α_z определяет уровень влияния фактора на показатель эффективности, а знак – направление этого влияния. Отрицательные значения α_z характеризуют положительное влияние изменение фактора на изменение критерия эффективности.

Значения коэффициентов чувствительности ЧДД и дисконтированного срока окупаемости инвестиций по отношению к изменению цен на топливо, тарифов на электрическую и тепловую энергию, капитальным вложениям в строительство ЭСН, приведены ниже.

	$\alpha_{\text{ЧДД}}$	$\alpha_{\text{Ток}}$
Тариф на электроэнергию	4,172	-1,234
Тариф на тепловую энергию	0,936	-0,289
Цена топлива	-2,515	0,849
Инвестиции	-1,251	0,701
Суммарно все факторы	1,342	-0,108

Из приведенных данных следует, что наибольшие абсолютные значения коэффициентов чувствительности характерны для тарифа на электроэнергию и цены топлива.

Выводы

1. Для энергетического комплекса предприятий по переработке газа и газового конденсата разработана методика схемно-параметрического анализа эффективности автономного источника энергообеспечения.

2. На основании оценки факторов, определяющих технико-экономическую схему развития энергетического хозяйства предприятий по переработке газа и газового конденсата, разработана альтернативная структура энергетического комплекса с автономным источником электрической и тепловой энергии, интегрированным с технологической системой и обеспечивающая максимальное использование вторичных энергоресурсов и утилизацию отходов.

3. С использованием разработанного информационно-аналитического обеспечения выполнена оценка эффективности альтернативных вариантов автономного энергоисточника типа ПГУ-ТЭЦ для Астраханского газоперерабатывающего завода.

4. Определена технико-экономическая, энергетическая и технологическая эффективность ПГУ-ТЭЦ с газотурбинными агрегатами GT8C2 фирмы ALSTOM, котлами-утилизаторами КУ-93 и паровыми турбинами К-6-2,4, а также выявлено влияние основных технико-экономических факторов на показатели экономической эффективности. Срок окупаемости инвестиций в создание ПГУ-ТЭЦ в структуре энергетического комплекса предприятия составляет 8–9 лет.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белоусенко И.В. Концепция развития энергетики ОАО «Газпром» на основе применения собственных электростанций / И.В. Белоусенко, А.М. Хозин, Е.В. Кристовский // Газовая промышленность. – 2000. – № 5. – С. 6-8.

2. Белоусенко И.В. Основные направления концепции развития энергетики ОАО «Газпром» на основе применения собственных электростанций и энергоустановок / И.В. Белоусенко // Изв. РАН. Энергетика. – 2001. – №5. – С. 54-63.

3. Лезнов, В.Б. Реализация программы создания электростанций нового поколения / В.Б. Лезнов, В.Г. Шептуцолов, И.А. Трегубов // Газовая промышленность. – 2000. – № 5. – С. 10-11.
4. Белоусенко, И.В. Исследование и технико-экономическая оценка надежности электростанций собственных нужд / И.В. Белоусенко, С.В. Голубев, М.Д. Дильман, Л.С. Попырин // Газовая промышленность. – 2002. – № 11. – С. 62-64.
5. Суднов С.В. Устойчивость электростанций собственных нужд малой мощности / С.В. Суднов, В.Б. Лезнов // Газовая промышленность. – 2000. – № 5. – С. 12-13.
6. Майзель В.И. Оценка экономической эффективности сооружения ЭСН / В.И. Майзель, Г.М. Бирюкова // Газовая промышленность. – 2000. – № 5. – С. 21-22.
7. Загоринский Э.Е. Комплексная оценка экономической эффективности применения электростанций собственных нужд различных типов: материалы НТС ОАО «Газпром». Т. II / Э.Е. Загоринский. – М.: ИРЦ Газпром, 2001. – С. 60-62.
8. Майзель В.И. Экономическая эффективность объектов автономной энергетики / В.И. Майзель // Газовая промышленность. – 2002. – № 12. – С. 51-53.
9. Пат. на полезную модель № 114424 РФ, МПК В01D 53/96, В01D 53/26. Установка регенерации абсорбента с термической утилизацией горючих отходов / Долотовский И.В., Ленькова А.В. – № 2011148186/05; заявл. 25.11.2011; опубл. 27.03.2012, Бюл. № 9. – 2 с.
10. Концепция системного анализа и многокритериальной оценки эффективности энергетического комплекса предприятий добычи и переработки углеводородного сырья / И.В. Долотовский, Е.А. Ларин, Н.В. Долотовская // Вестник СГТУ. – 2011. – №1 (54). Вып. 3. – С. 187-192.
11. Пат. №63537 РФ, МПК G 06 Q 10/00; G 07 C 3/14. Система автоматизированного учета и планирования на предприятии / Е.А. Ларин, Н.В. Долотовская, И.В. Долотовский // Открытия. Изобретения. 2007. № 15.
12. Система «Энергоресурс»: программа для ЭВМ № 2010615353 / Е.А. Ларин, И.В. Долотовский, Н.В. Долотовская. – №2010613798; заявл. 29.06.10; зарегистр. 20.08.10.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (ГК 14. 740.11.0107).

Долотовский Игорь Владимирович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник проблемной научно-исследовательской лаборатории теплоэнергетических установок электростанций и систем энергоснабжения кафедры «Теплоэнергетика» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Igor V. Dolotovskiy – Ph. D., Senior Research Assistant
Problematic Research Laboratory of Heat-power Engineering Installations and Systems Power Supply Department of Heat-Power Engineering, Gagarin Saratov State Technical University

Ларин Евгений Александрович – кандидат технических наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Evgeny A. Larin – Ph. D., Professor
Department of Heat-Power Engineering, Gagarin Saratov State Technical University

Долотовская Надежда Васильевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная теплотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Nadezhda V. Dolotovskaya – Ph. D., Associate Professor
Department of Industrial Heat Engineering, Gagarin Saratov State Technical University

Т.Ю. Дунаева

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТАРИФОВ НА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ
НА КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬ СВЧ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИХ
УСТАНОВОК**

Представлен сравнительный анализ влияние тарифов на электроэнергию на конкурентоспособность СВЧ пастеризатора жидкостей в потоке с комбинированным (СВЧ и ЭК) энергоподводом и СВЧ сушилки зернопродуктов методического типа с альтернативными установками.

СВЧ пастеризатор молока, СВЧ зерносушилка, сравнительный интегральный эффект, тариф на электроэнергию, повышение экономической эффективности

T.Yu. Dunaeva

**ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF TARIFFS FOR THE ELECTRIC POWER
ON THE COMPETITIVENESS OF THE ELECTRO-THERMAL MICROWAVE
PLANTS**

The paper presents a comparative analysis of the influence of tariffs for the electric power on the competitiveness of the microwave pasteurizer liquids in the flow with combined power supply and microwave grain products dryers with alternatives-owned plants.

Microwave milk pasteurizer, microwave grain dryer, comparative integral effect, the tariff for the electric power, increase of economic efficiency

В последние годы учеными саратовской научной школы электротермии ведутся активные исследования в области экономической эффективности СВЧ электротехнологических установок. Уже доказано, что СВЧ электротермические установки успешно конкурируют на рынке с установками с иными способами энергоподвода. Однако эти установки являются достаточно энергоемкими, и до сих пор не исследовано влияние изменения тарифа на электроэнергию на их конкурентоспособность.

На наш взгляд, наиболее интересным представляется определение влияние тарифов на электроэнергию для СВЧ установок, доказавших оправданность своего использования по сравнению с альтернативными – пастеризаторов и сушилок сельскохозяйственной продукции.

В представленной работе проведен сравнительный анализ экономической эффективности таких установок при тарифах, ценах и налоговых ставках на уровне 2011 года. Также учтен предполагаемый уровень инфляции, озвученный Правительством РФ на ближайшие годы. Сопоставление проведено с помощью целевой функции, которая представляет собой сравнительный интегральный эффект [1]:

$$\Delta \mathcal{E}_{\Sigma} = \mathcal{E}_{\Sigma 2} - \mathcal{E}_{\Sigma 1}, \quad (1)$$

где $\mathcal{E}_{\Sigma 2}$, $\mathcal{E}_{\Sigma 1}$ – интегральные эффекты, полученные предприятием при реализации каждого из вариантов.

В качестве объектов сравнения выбраны СВЧ и трубчатые пастеризаторы молока, уже продающиеся на российском рынке. Производительность пастеризаторов – 200 000 л/год, что вполне соответствует производительности небольшого хозяйства. Тариф на электроэнергию принят 3,76 руб/кВтч – утвержденный тариф для промышленных потребителей Саратовской области в 2011 году. Также был проведен анализ сравнительного интегрального эффекта для этих установок при повышении тарифа на электроэнергию на 20%, что составит 4,51 руб/кВтч. Результаты сравнения представлены на рис. 1.

Как видим, СВЧ пастеризатор на интервале в 2 года немного проигрывает паровому. Такая ситуация типична для СВЧ электротермических установок, для которых характерны завышенные цены на элементную базу, и, следовательно, высокий уровень капиталовложений. Из рис. 1 также видно, что изменение тарифа на электроэнергию на 20% практически не влияет на итоговый сравнительный интегральный эффект.

Для повышения экономической эффективности СВЧ установок по сравнению с альтернативными можно предложить, например, использовать в СВЧ установках не мощные магнетроны, работающие на несколько рупорных излучателей, а маломощные, работающие каждый на свою рупорную антенну [2]. Это уменьшает общие затраты на СВЧ установку и расходы на замену магнетронов, выработавших свой срок службы. Уже неоднократно обсуждалась проблема завышенных цен на элементную базу промышленных СВЧ установок и причины ее возникновения. Согласование интересов производителей элементной базы и фирм, выпускающих СВЧ установки, позволило бы решить эту проблему.

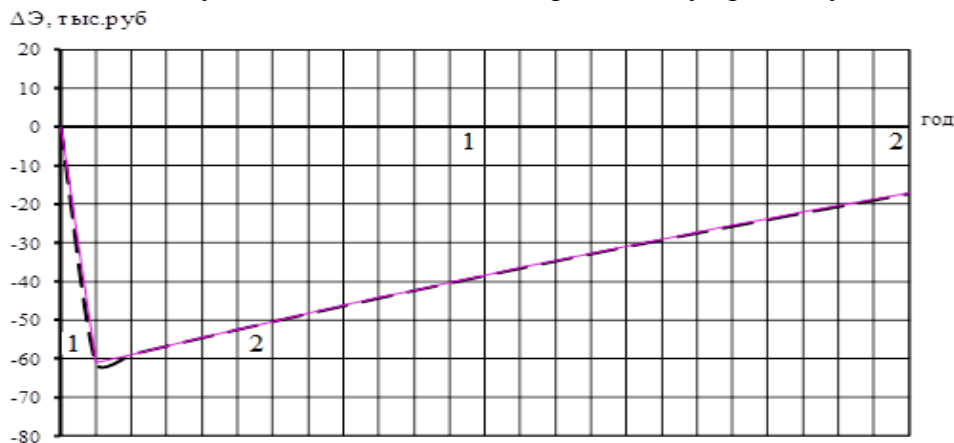


Рис. 1. Сравнительный интегральный эффект СВЧ и трубчатого пастеризаторов: 1 – СВЧ и трубчатый пастеризатор при производительности 200 000 л/год и тарифе на электроэнергию 3,76 руб./кВт·ч, 2 – СВЧ и трубчатый пастеризатор при производительности 200 000 л/год и тарифе на электроэнергию 4,51 руб./кВт·ч

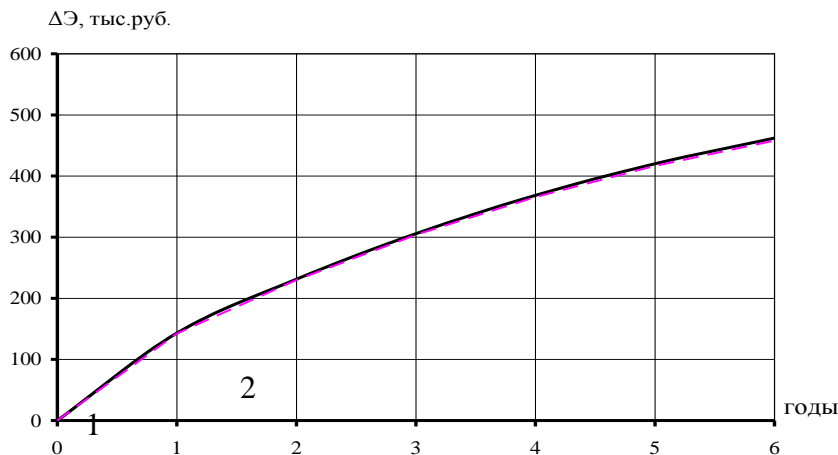


Рис. 2. Расчет сравнительного экономического эффекта от применения СВЧ и тепловой сушилок зерна: 1 – тариф на электроэнергию 3,76 руб./кВт·ч; 2 – тариф на электроэнергию 4,51 руб./кВт·ч

Для другого технологического процесса – сушки зернопродуктов ситуация аналогична (рис. 2). Для сравнения были выбраны СВЧ суш илка зерна методического типа и барабанная сушилка с дизельным теплогенератором, который представляется наиболее приемлемым для небольшого хозяйства. Производительность обеих установок принята равной 1500 т/год по готовой продукции. Здесь СВЧ сушилка более выгодна по сравнению с теплотехнологической, и изменение тарифа на электроэнергию практически не влияет на сравнительный интегральный эффект обеих установок.

Таким образом, можно сделать вывод, что, несмотря на высокую энергоёмкость СВЧ электротермических установок, изменение тарифа на электроэнергию почти не влияет на их конкурентоспособность. Учитывая высокий уровень инфляции в нашей стране, рост цен не только на энергоносители, но и на остальные составляющие интегрального эффекта, разумнее было бы вести речь не столько о снижении их энергоёмкости, сколько о снижении цен на эти установки и повышении их надёжности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Толстов В.А. Эффективность электротехнологических установок / В.А. Толстов, Ю.С.Архангельский. – Саратов: СГТУ, 2000.
2. Архангельский Ю.С. Технические и организационные мероприятия, повышающие эффективность СВЧ установки на стадии эксплуатации / Ю.С. Архангельский, Т.Ю. Дунаева, Е.Н Зарайская // Успехи современной электротехнологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. / СГТУ. – Саратов, 2009. – С.49-53.
3. Дунаева Т.Ю. Проблемы повышения конкурентоспособности СВЧ электротехнологических установок / Т. Ю. Дунаева // Энергетика в современном мире : сб. материалов V Междунар. науч.-практ. конф., Чита, 15-16 ноября 2011 г. / ЗабГУ. – Чита, 2011. – С. 89-92.

Дунаева Татьяна Юрьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Tatyana Yu. Dunaeva – Ph. D., Associate Professor
Department of Automated Electrical-Technological Plants and Systems,
Gagarin Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 18.06.12, принята к опубликованию 17.05.12

УДК 621.314

П.В. Коваленко, В.В. Коваленко, С.Ф. Степанов

СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ГЕНЕРАТОРОВ РАЗЛИЧНОЙ МОЩНОСТИ НА ОБЩУЮ ШИНУ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Предлагается модель обеспечения синхронного управления выпрямителями в комплексе трех параллельно работающих генераторов различной мощности, структурная схема управления, размещение датчиков опорных величин для осуществления оценки и получения управляющего сигнала.

Параллельно работающие генераторы, структурная схема управления

P.V. Kovalenko, V.V. Kovalenko, S.F. Stepanov

SYSTEM OF SYNCHRONOUS CONTROL OF ELECTRIC POWER DEVELOPMENT IN PARALLEL WORKING GENERATORS OF VARIOUS POWERS

The model of ensuring synchronous control by rectifiers in a complex of three in parallel working generators of various powers, the block diagram of management, placement of sensors of basic sizes for implementation of an assessment and receiving an operating signal is offered.

Parallel working generators, the block diagram of control

Подключение генераторов автономных систем электроснабжения к сети промышленной частоты осуществляется через промежуточное звено, которым обычно является преобразователь частоты на полупроводниковых элементах. На рис. 1 изображена структурная схема электрогенерирующего комплекса, состоящего из трех генераторов G_1 - G_3 с различными мощностью и скоростью вращения вала ротора и преобразователя частоты, состоящий из трех выпрямителей V_1 - V_3 и одного инвертора I_1 . Каждый генератор имеет свое выпрямительное устройство V_1 - V_3 . Суммирование мощностей генераторов осуществляется на общей шине постоянного тока.

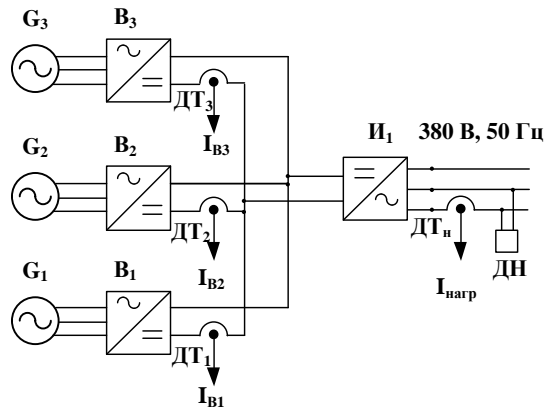


Рис. 1. Структурная схема электрогенерирующего комплекса с датчиками тока и напряжения

Ввиду того, что нагрузка носит изменяющийся во времени характер, необходимо обеспечить одинаковые условия работы генераторов по загрузке во всех режимах работы. При отсутствии возможности регулирования мощности на уровне генерации (например, при использовании в качестве генераторов синхронных машин на постоянных магнитах) изменение величины генерируемого тока возможно на уровне выпрямления и инвертирования. В таком случае в целях осуществления регулирования передаваемой мощности и обеспечения требуемой величины напряжения необходимо иметь управляемые выпрямители на тиристорах, позволяющие осуществлять необходимую коррекцию выходных параметров автономной электростанции на уровне преобразователя частоты. При этом необходимо обеспечить заданное значение выходного напряжения электрогенерирующего комплекса при соответствующем распределении нагрузки между параллельно работающими генераторами различной мощности. Для этих целей разработана схема формирования управляющих сигналов выпрямителями в комплексе трех параллельно работающих генераторов различной мощности. Структурная схема представлена на рис.2..

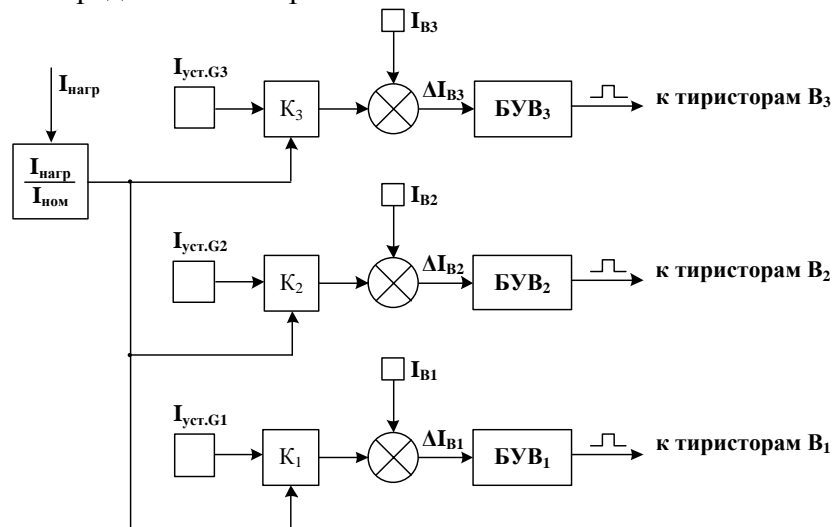


Рис. 2. Структура управления выпрямителями по току нагрузки

Каждый выпрямитель имеет индивидуальный блок управления (БУВ), входной сигнал которого формируется по определенному алгоритму.

Управляющие воздействия на выходные величины выпрямителей V_1, V_2, V_3 осуществляется посредством сигнала обратной связи, в качестве которого используется величина тока нагрузки, получаемая с выхода датчика тока, который установлен на выходе инвертора. Сигнал с датчика тока $ДТ_N$ передается на блок деления, где он делится на сигнал соответствующий номинальному току генерируемого электроустановкой: выходной сигнал блока деления пропорционален отношению тока нагрузки к номинальному току (коэффициент загрузки). Сигнал с блока деления поступает на умножители, в которых формируются сигналы, кратные величине номинального тока генератора на коэффициент загрузки. Для получения информации о величине выработанного тока каждым генератором I_{B1}, I_{B2}, I_{B3} в выходные цепи выпрямителей подключены датчики тока $ДТ_1 - ДТ_3$. Сигналы с умножителей поступают на блоки сравнения, в которых определяется отклонение величины вырабатываемого тока генераторов от требуемого по условиям нагрузки. С выхода каждого блока сравнения на блок управления выпрямителей поступает сигнал о величине отклонения тока нагрузки от номинального. В свою очередь, блоки управления выпрямителями формируют импульсы управления, которые передаются на управляемые электроды тиристоров и отпирая их в нужные моменты времени. Процесс формирования управляющих сигнала одинаков для всех трех генераторов, процентное распределение величины генерируемой мощности каждым генератором сохраняется при любой величине нагрузки (например, при номинальной мощности генераторов – 60, 30, 10 кВт это соотношение 6:3:1. При необходимости обеспечить нагрузку в 50 кВт генераторы будут загружены на 30, 15 и 5 кВт соответственно). Таким образом, коэффициент загрузки всех генераторов одинаков и при изменении генерируемой мощности изменяется синхронно для всех генераторов пропорционально своей номинальной мощности.

Однако в случае отсутствия нагрузки на выводах инвертора коэффициент загрузки будет равен нулю, и тем самым блоки управления выпрямителями не будут формировать сигнал на отпирание тиристоров и, следовательно, на выходе выпрямителей величины тока и напряжения обратятся в ноль. Последнее недопустимо для интегрирования электроустановки в действующую сеть с заданными параметрами напряжения и частоты. Поэтому необходимо обеспечить на выходе инвертора требуемую величину напряжения во всех режимах, в том числе и на холостом ходу. Для этих целей предлагается к блоку управления выпрямителя 1 подключить канал стабилизации выходного напряжения, структурная схема которого изображена на рис. 3.

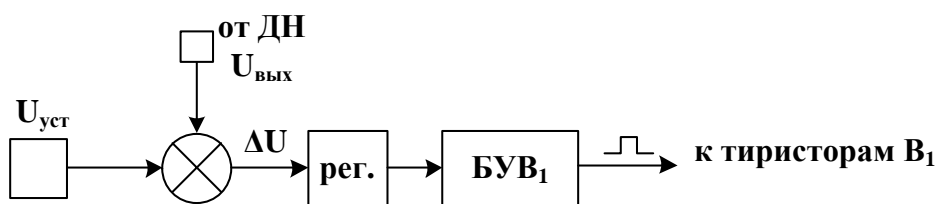


Рис. 3. Структурная схема канала стабилизации выходного напряжения инвертора

$U_{уст}$ – величина опорного напряжения, которая формируется задатчиком.

При снижении нагрузки система управления выпрямителями будет снижать величину тока и напряжения по рассмотренной выше схеме (рис. 2). Информация о величине напряжения на выходе инвертора поступает от датчика напряжения ДН на блок сравнения, в котором она сравнивается с величиной опорного напряжения $U_{уст}$. Сигнал с блока сравнения поступает через регулятор на блок управления выпрямителем 1, который формирует управляющий сигнал, необходимый для поддержания напряжения на необходимом уровне, независимо от величины нагрузки. В регуляторе сигнал рассогласования величины напряжения усиливается для повышения чувствительности блока управления. В качестве регуляторов по соотношению удобства управления, простоты конструкции и выходных характеристик наиболее приемлемым является ПИ-регулятор, обеспечивающий нулевую статическую ошибку регулиро-

вания (исключается отклонение регулирования) и имеющий малую чувствительность к шумам в канале измерения, а также простой в настройке параметров (всего 2 – коэффициент усиления и время интегрирования). Если система не испытывает внешних возмущений, регулируемая величина стабилизируется на заданном значении: пропорциональная составляющая равна нулю, а интегральная составляющая полностью обеспечит выходной сигнал.

Итоговая структура модели электрогенерирующего комплекса из трех параллельно работающих генераторов различной мощности с размещением датчиков опорных величин для осуществления оценки и получения управляющих сигналов изображена на рис. 4. Данная структура служит основой для построения и анализа математической модели в программном комплексе MatLab с пакетом приложений Simulink.

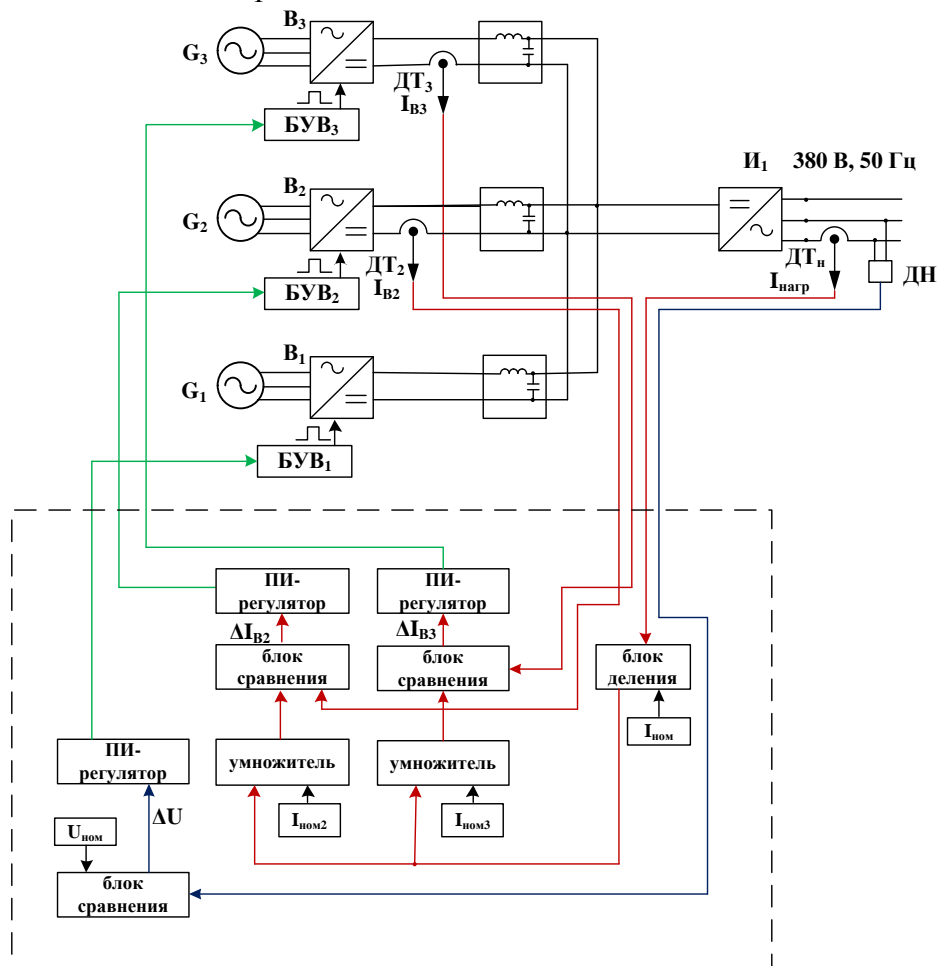


Рис. 4. Структурная схема формирования управляющих сигналов выпрямителей

Предлагаемый подход формирования управляющих воздействий может быть реализован в электрогенерирующих комплексах с любым количеством генераторов различной мощности и скоростей вращения роторов. При этом для стабилизации напряжения достаточно управления одного из выпрямителей по величине вырабатываемого напряжения, подключенных к наиболее мощному генератору. Управление остальными выпрямителями будет осуществляться синхронно пропорционально номинальной мощности подключенных к ним генераторов. Таким образом, не требуется дополнительных запусков и остановов генераторов при изменении нагрузки и создания дополнительных устройств коммутации и системы управления коммутацией силовых цепей.

Вывод

Разработана оригинальная модель управления выпрямителями в комплексе трех генераторов различной мощности, работающих параллельно на общую шину постоянного тока, которая может быть использована для дальнейших исследований переходных процессов

сложных электротехнических комплексов в различных режимах и при иных заданных параметрах в программном комплексе MatLab с пакетом приложений Simulink.

ЛИТЕРАТУРА

1. Левин А.В. Автономные системы электроснабжения / А.В. Левин, Н.Н. Лаптев // Энергетика. – 2003. – № 1(9). – С.12 –14.
2. Степанов, С.Ф. Автономные источники электропитания локальных систем электроснабжения / С.Ф. Степанов, В.В. Курдя, И.И. Артюхова // Анализ, синтез и управление в сложных системах: сб. науч. тр. – Саратов: СГТУ, 2006. – С.16 – 23.
3. Артюхов И.И. Автономная система электроснабжения с перестраиваемой структурой / И.И. Артюхов, С.Ф. Степанов, А.В. Коротков, Н.В. Погодин // Проблемы электроэнергетики: межвуз. науч. сб. – Саратов: СГТУ, 2004. – С.9 – 14.

Коваленко Павел Валерьевич – магистр техники и технологии по направлению «Электроэнергетика» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Pavel V. Kovalenko – Master of technical and technology in the direction "Power industry" Gagarin Saratov State Technical University

Коваленко Василина Васильевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Vasilina V. Kovalenko – Ph. D., Associate Professor Department of Power Supply of Industrial Enterprises, Gagarin Saratov State Technical University

Степанов Сергей Федорович – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Sergey F. Stepanov – Dr. Sc., Professor Department of Power Supply of Industrial Enterprises, Gagarin Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 14.05.12, принята к опубликованию 13.06.12

УДК 621.372

В.А. Коломейцев, А.Ф. Хамидуллин, А.А. Железов, П.В. Ковряков

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИАПАЗОННЫХ СВОЙСТВ СОГЛАСУЮЩИХ ПЕРЕХОДОВ ПРВ – ПВТР

Проведен комплексный анализ диапазонных свойств согласующих переходов. Установлено, что только переход с нелинейным изменением как внешней, так и внутренней геометрии обеспечивает полосу пропускания во всем доминантном диапазоне длин волн прямоугольного волновода.

Волновод сложного сечения, стандартный волновод, прямой волновод, согласующий переход, геометрия перехода

V.A. Kolomeitsev, A.Ph. Khamidullin, A.A. Zhelezov, P.V. Kovryakov

RESEARCH RANGE OF PROPERTIES MATCHING TRANSITIONS PRV – PVTR

The article provides a comprehensive analysis of the range of properties matching transitions. Found that only the transition from the non-linear change in both ex-

ternal and internal geometry provides the bandwidth around the dominant wavelengths of rectangular waveguide.

Waveguide cross-section of complex, standard waveguide, waveguide line, matching transition, geometry of the transition

В настоящее время процесс возбуждения рабочих камер на основе волноводов сложного поперечного сечения (ВСС) является актуальной задачей при создании конвейерных СВЧ нагревательных установок равномерного нагрева материала [1]. Основной проблемой при проектировании СВЧ нагревательных установок равномерного нагрева на основе ВСС является обеспечение неотражающей передачи СВЧ мощности в рабочую камеру от генератора, выход которого выполнен на отрезке стандартного (прямоугольного) волновода. Данная задача может быть решена путем создания плавных согласующих линейных и нелинейных переходов между стандартным волноводом (СВ) и ВСС (волновод с Т-ребром).

Расчет согласующего перехода СВ-ВСС для СВЧ нагревательных установок равномерного нагрева материала конвейерного типа базируется на решении внутренней краевой задачи электродинамики (ВКЗЭ) для полых ВСС. Комплексный анализ электродинамических свойств и структуры электромагнитного поля для данных волноводов позволяет решить обратную задачу электродинамики и определить геометрию согласующего перехода. Данная задача решается графоаналитическим методом.

Общими требованиями, предъявляемыми к согласующему переходу СВ-ВСС, являются: плавное изменение волнового сопротивления в направлении распространения волны, что позволяет практически исключить отражение СВЧ мощности по длине нерегулярной волноводной линии; при вариации продольной геометрии в системе не должны возникать высшие типы волн, поскольку равномерную термообработку материала в СВЧ нагревательных установках на основе ВСС возможно провести лишь в одномодовом режиме; при изменении геометрии емкостного зазора по длине нерегулярного ВСС должна обеспечиваться электрическая прочность в волноводе при заданной входной мощности в каждом поперечном сечении. Имеются и принципиальные отличия в требованиях, предъявляемых к согласующему переходу СВ-ВСС при использовании их в СВЧ нагревательных установках с равномерным нагревом. Так, согласующий переход должен обеспечивать направленную передачу СВЧ мощности в рабочую камеру на доминантной волне, то есть продольное изменение геометрии перехода не должно приводить не только к возникновению высших типов волн, но и к отсечке сигнала на заданной рабочей длине волны ($\lambda_{c1} < \lambda_0 < \lambda_{c0}$).

Поскольку согласующий переход представляет собой отрезок полого нерегулярного волновода, то расчет геометрии перехода основывается на исследовании критических длин волн основного и первого высшего типов волн в зависимости от изменения размеров поперечного сечения ВСС. Расчет структуры электромагнитного поля в каждом поперечном сечении согласующего перехода позволяет однозначно определить изменение волнового сопротивления линии в направлении распространения электромагнитной волны, при этом оптимизация геометрии согласующего перехода определяется минимальным отражением мощности на доминантной волне.

В основе расчета, как отмечалось выше, лежат кривые зависимости критических длин волн основного (λ_{c0}) и первого высшего (λ_{c1}) типов волн от геометрических параметров по-

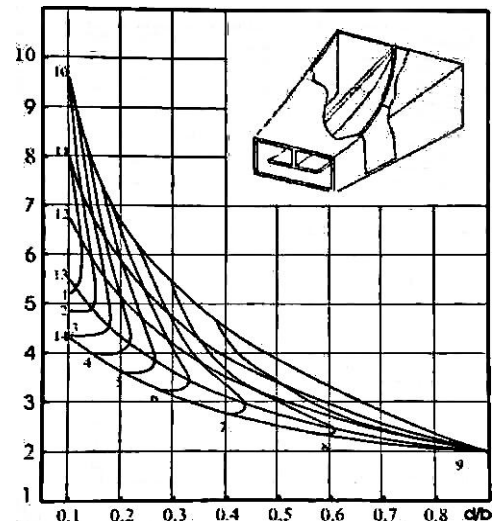


Рис. 1. Номограмма графоаналитического расчета плавных согласующих переходов ПрВ - ПВТР

перечного сечения волновода. Методику расчета геометрии плавных согласующих переходов СВ-ВСС рассмотрим на примере сочленения прямоугольного волновода (ПрВ) с ПВТР. На рис. 1 приведена номограмма, на основе которой графоаналитическим методом рассчитывается геометрия согласующего перехода, исходя из требований, предъявляемых к переходу ПрВ-ПВТР для конкретного технологического процесса термообработки.

Номограмма синтеза плавных переходов с ПрВ на ПВТР $\lambda_{c0}/a, \lambda_{c1}/a$.

Номограмма содержит кривые зависимости λ_{c0}/a и ξ от геометрических параметров поперечного сечения волновода $t/a, d/b$ при $b/a = 0,5$. При этом считается, что толщина Т-ребра достаточно мала по сравнению с размером широкой стенки волновода - $l/a < 0,1$ и не оказывает существенного влияния на электродинамические свойства ПВТР. Заметим, что использование кривых $\xi = \lambda_{c0}/\lambda_{c1}$ в номограмме, а не λ_{c1}/a продиктовано удобством графоаналитического синтеза согласующего перехода ПрВ-ПВТР.

В данной номограмме Приведены результаты решения ВКЗЭ необходимые для построения переходов, отвечающих всем требованиям, предъявляемым к ним, при использовании в СВЧ нагревательных установках с равномерным нагревом. Расчет собственных электродинамических параметров $\lambda_{c0}/a, \xi$ проведен при изменении основополагающих геометрических параметров поперечного сечения волновода в пределах $0 \leq t/a \leq 8; 0,1 \leq d/b \leq 1; 2 \leq \xi \leq 11$. Необходимо отметить, что приведенная на рис. 1 номограмма может быть использована также для расчета элементов и узлов техники СВЧ на основе ПВТР и оценки эффективности использования данного волновода в СВЧ нагревательных системах применительно к Конкретному технологическому процессу термообработки [2, 3].

В данной работе рассматриваются свойства переходов ПрВ - ПВТР при линейном изменении не только внешней геометрии перехода, но и внутренней геометрии (рис. 2). На рис. 2 в приведены значения критических длин волн основного и первого высшего типов волн по длине согласующего перехода ПрВ – ПВТР. Как следует из приведенных на рис. 2 в зависимости $\lambda_{c0}(z), \lambda_{c1}(z)$, в данных переходах происходит уменьшение полосы пропускания перехода, которое существенно зависит от поперечного сечения ПВТР.

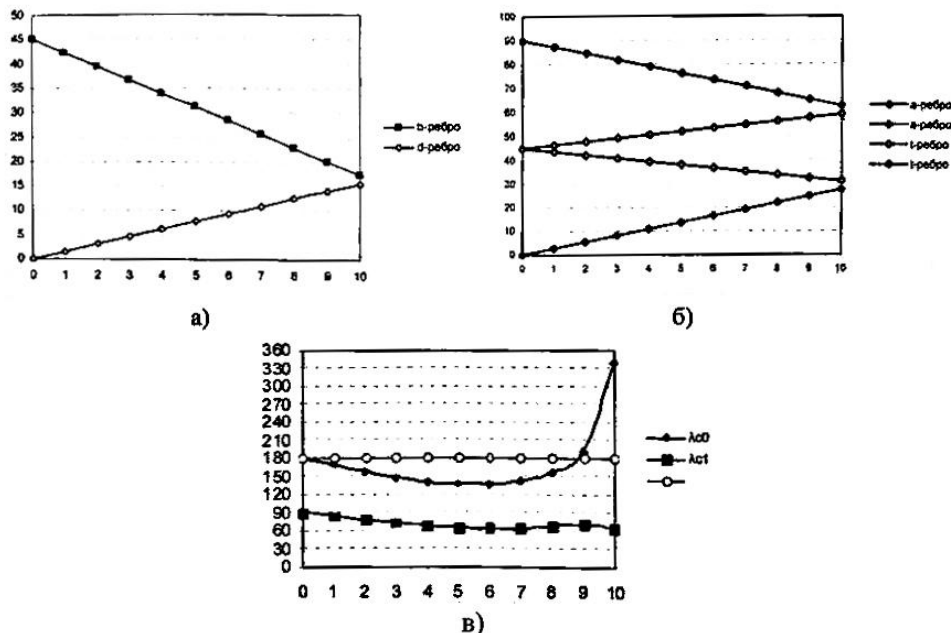


Рис. 2. Линейный переход ПрВ-ПВТР: а) размер узкой стенки b и высота Т-ребра; б) размер широкой стенки a и ширина Т-ребра l , в) полоса пропускания

Основным преимуществом линейного согласующего перехода ПрВ-ПВТР перед другими согласующими переходами является простота изготовления и максимально плавное изменение волнового сопротивления по длине перехода. Существенным недостатком при этом являются уменьшение диапазона длин волн одномодовой передачи СВЧ мощности по сравнению с доминантным диапазоном стандартного волновода, что снижает их потенци-

альные возможности при использовании в устройствах и системах СВЧ техники. Таким образом, обеспечение полосы пропускания согласующего перехода ПрВ - ПВТР во всем доминантном диапазоне длин волн необходимо использовать нелинейные согласующие переходы.

Рассмотрим нелинейные согласующие переходы ПрВ - ПВТР.

По характеру изменения геометрических параметров в направлении распространения волны нелинейные переходы ПрВ - ПВТР можно разделить на три группы:

- 1) переход с нелинейным изменением внутренней геометрии Т-ребра и линейным изменением внешней геометрии (рис. 3);
- 2) переход с линейным изменением внутренней геометрии Т-ребра и нелинейным изменением внешней геометрии (рис. 4);
- 3) переход с нелинейным изменением как внешней, так и внутренней геометрии (рис. 5).

На рис. 3-5 приведены кривые зависимости $\lambda_{c0}/a(z)$ и $\lambda_{c1}/a(z)$ нелинейных переходов с прямоугольного волновода (сечение 90×45 мм) на ПВТР (сечение $30 \times 15,5$ мм при $t/a=0,8$, $d/b=0,1$ при $b/a = 0,5$).

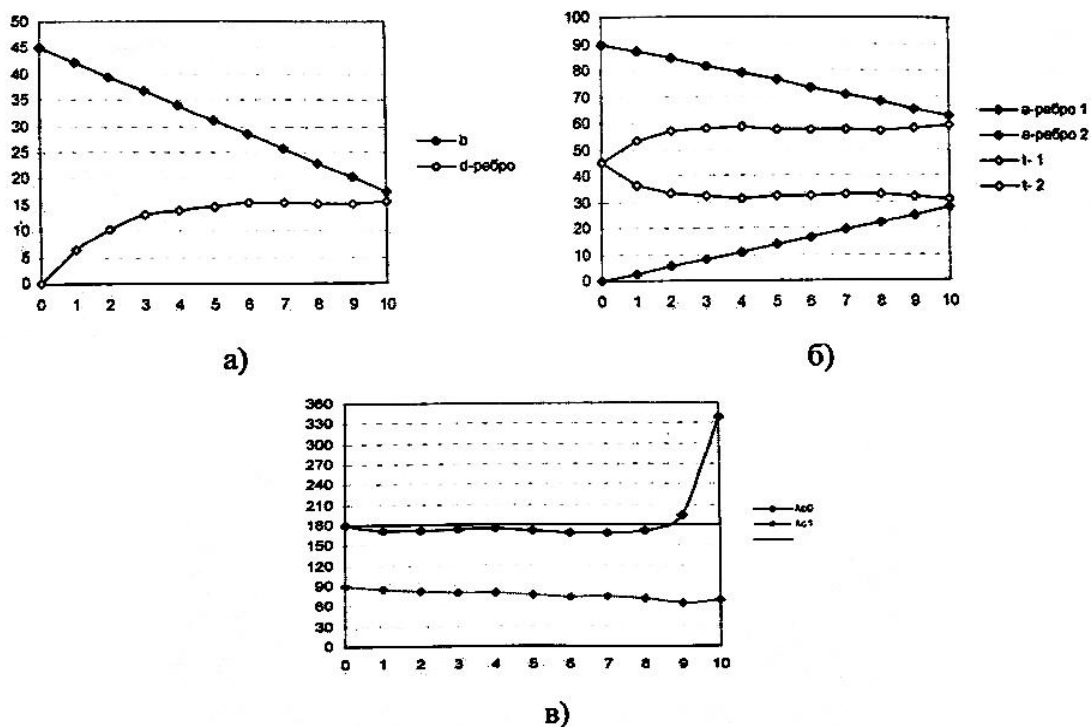


Рис. 3. Переход ПрВ-ПВТР с нелинейным изменением внутренней геометрии Т-ребра и линейным изменением внешней геометрии: а) размер узкой стенки b и высота Т-ребра; б) размер широкой стенки a и ширина Т-ребра t , в) полоса пропускания

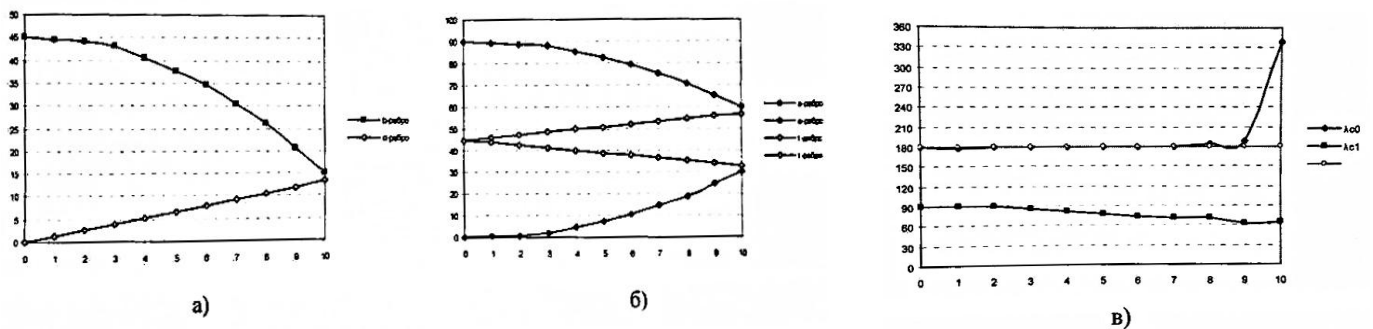


Рис. 4. Переход ПрВ-ПВТР с линейным изменением внутренней геометрии Т-ребра и нелинейным изменением внешней геометрии: а) размер узкой стенки b и высота Т-ребра; б) размер широкой стенки a и ширина Т-ребра t , в) полоса пропускания

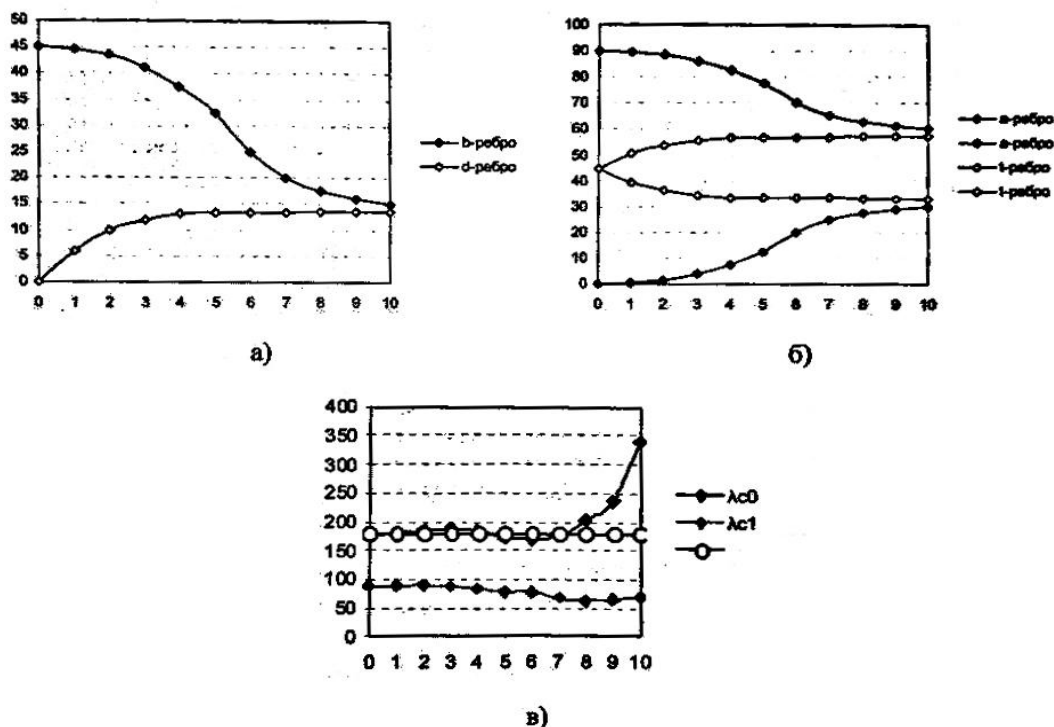


Рис. 5. Переход ПрВ-ПВТР с нелинейным изменением внутренней геометрии Т-ребра и нелинейным изменением внешней геометрии:
 а) размер узкой стенки b и высота Т-ребра; б) размер широкой стенки a и ширина Т-ребра, t в) полоса пропускания

Как следует из иллюстрационного материала, приведенного на рис. 3, согласующие переходы с линейным изменением внешнего профиля перехода и нелинейным изменением геометрии Т-выступа обеспечивают прохождение СВЧ мощности во всем доминантном диапазоне длин волн прямоугольного волновода. Однако у данных переходов наблюдается достаточно быстрое шмемемме профиля Т-ребра во входной части перехода в направлении распространения волны, что приводит к разному изменению волнового сопротивления Z_0 и соответственно к увеличению уровня отраженной мощности. Однако существенным преимуществом данного типа переходов является удобство их изготовления.

Лучшими электродинамическими свойствами обладают согласующие переходы с линейным изменением профиля Т-ребра и нелинейным изменением внешней геометрии (рис. 4). Единственным недостатком данных переходов является сложность изготовления внешнего профиля перехода. Однако это наиболее удобный с точки зрения эксплуатационных возможностей в технике и энергетике СВЧ переход. Еще более сложный с точки зрения изготовления является согласующий переход с нелинейным изменением внешней геометрии перехода и нелинейным изменением геометрии Т-ребра. Однако его потенциальные возможности выше, чем у переходов первых двух типов, что позволяет обеспечить неотражающую передачу СВЧ мощности во всем доминантном диапазоне длин волн прямоугольного волновода.

Необходимо отметить, что использование нелинейных переходов данного типа во многом определяется размерами входного сечения рабочей камеры СВЧ нагревательной установки на прямоугольном волноводе с Т-ребром.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коломейцев В.А. Взаимодействие электромагнитных волн с поглощающими средами и специальные СВЧ-системы равномерного нагрева: дис...д-ра техн. наук: 05.12.21 / СГТУ. – Саратов, 1999. – 439 с.
2. Перспективы использования прямоугольного канального волновода с Т-ребром / В.А. Коломейцев [и др.] // Антенно-фидерные устройства, системы и средства радиосвязи: сб. трудов III Междунар. науч.-техн. конф. – Воронеж, 1997. – Т.2. – С. 270 - 277.

3. Коломейцев В. А. Электродинамические и тепловые характеристики СВЧ нагревательной камеры на основе сочлененного прямоугольного волновода с двумя Т-ребрами / В.А. Коломейцев, В.В. Комаров // Применение СВЧ энергии в технологических процессах и научных исследованиях: сб. трудов Всесоюз. VI науч.-практ. конф. – Саратов, 1991. – С. 161-163.

Коломейцев Вячеслав Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры «Радиотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Vyacheslav A. Kolomeitsev – Dr. Sc., Professor
Department of Radiotechnics,
Gagarin Saratov State Technical University

Хамидуллин Артур Фарухович – аспирант кафедры «Радиотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Artur Ph. Khamidullin – Postgraduate
Department of Radiotechnics,
Gagarin Saratov State Technical University

Железов Антон Анатольевич – студент кафедры «Радиотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Anton A. Zhelezov – Student
Department of Radiotechnics,
Gagarin Saratov State Technical University

Ковряков Павел Валерьевич – аспирант кафедры «Радиотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Pavel V. Kovryakov – Postgraduate
Department of Radiotechnics,
Gagarin Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 19.05.12, принята к опубликованию 18.06.12

УДК 621.311.019.3

Д.С. Левин, Д.А. Вырыханов

РАСЧЕТ И АНАЛИЗ РЕЖИМОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С РЕЗЕРВНОЙ ФАЗОЙ С УЧЕТОМ ИХ ПОФАЗНО РАЗЛИЧНЫХ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ

Рассмотрены особенности расчета режимов воздушных линий электропередачи (ВЛЭП) с резервной фазой исходя из характеристик проводов и их геометрического расположения, используя метод зеркальных изображений. Приведены результаты расчета режимов при параллельном включении резервной фазы с рабочим проводом линии.

Резервная фаза, метод зеркальных изображений, воздушная линия электропередачи

D.S. Levin, D.A. Virikhanov

COMPUTE AND ANALYZE REGIMES OF OVERHEAD TRANSMISSION LINES WITH RESERVE PHASE OF AN DISTRIBUTED PARAMETERS LINE

The article presents analyze of the computes regimes of overhead transmission lines with reserve phase from its conductor characteristics and tower geometry, using the concept of image conductors. The results of the calculations regimes of power lines, when we use reserve phase in parallel with a working wire are given there.

Reserve phase, concept of image conductors, overhead transmission line

Рассмотрим схему замещения трехфазной воздушной линии электропередачи (ВЛЭП), представляющей собой пространственно распределенный объект, состоящий из трех прямолинейных параллельных проводов (рис. 1).

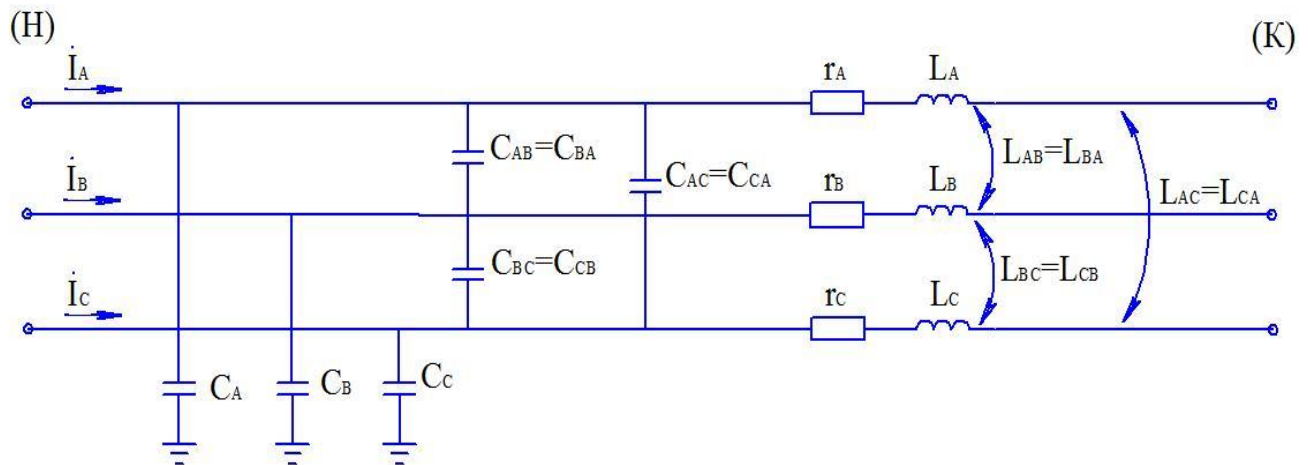


Рис. 1. Схема замещения трехфазной ВЛЭП

где r_i – активное сопротивление провода i ; L_i – собственная индуктивность фазного провода i ; M_{ij} – взаимная индуктивность между соседними фазными проводами i и j ; C_i – фазная емкость провода i ; C_{ij} – взаимная емкость соседних проводов i и j

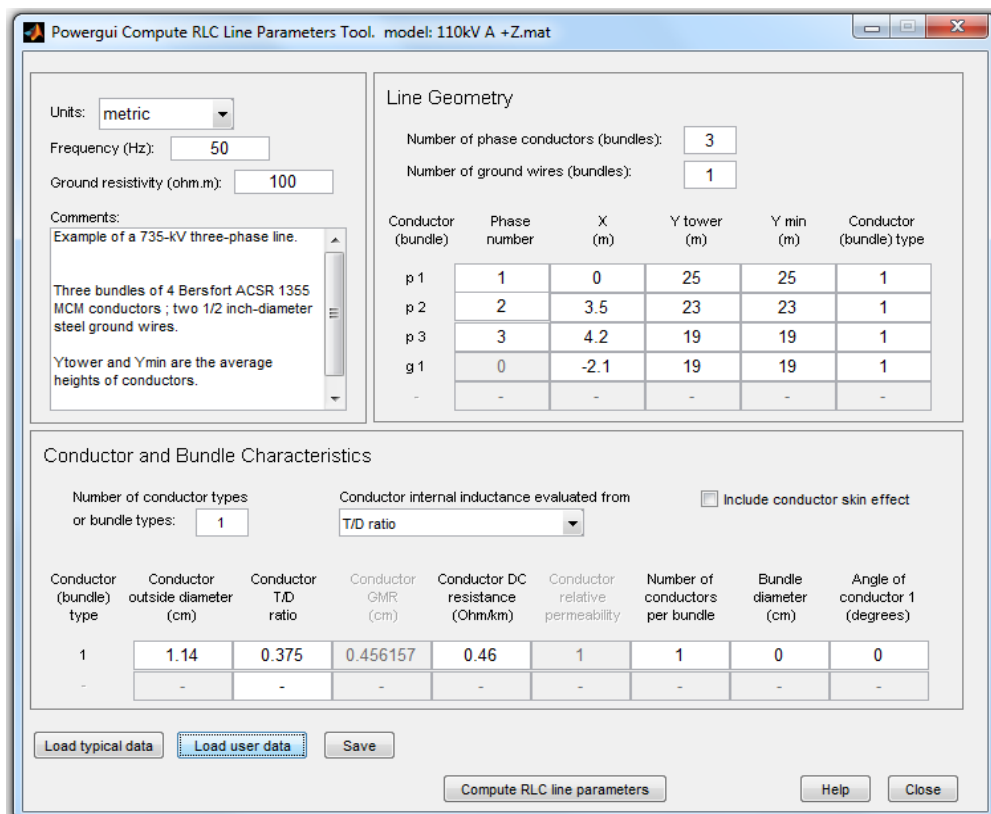


Рис. 2. Командное окно инструмента Compute RLC Line Parameters

В командном окне инструмента Compute RLC Line Parameters блока Powergui прикладной программы Simulink программного пакета Matlab, задаются параметры ВЛЭП (рис. 2):

- номинальное напряжение ВЛ,
- частота,

- координаты фаз и грозотросов,
- диаметр провода,
- активное сопротивление фаз,
- число проводников в фазе,
- удельное сопротивление земли,
- наличие скин эффекта.

После задания параметров линии программа вычисляет матрицы активных сопротивлений, индуктивностей и емкостей необходимые для моделирования несимметричной трехфазной линии

$$\begin{pmatrix} r_A & - & - \\ - & r_A & - \\ - & - & r_A \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} L_A & L_{AB} & L_{AC} \\ L_{BA} & L_B & L_{BC} \\ L_{CA} & L_{CB} & L_C \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} C_A & C_{AB} & C_{AC} \\ C_{BA} & C_B & C_{BC} \\ C_{CA} & C_{CB} & C_C \end{pmatrix};$$

Активное сопротивление трехфазной ЛЭП

Удельные погонные активные сопротивления проводов линии $r_a=r_b=r_c=r_{np}$ (Ом/км) берутся из справочника, например [1, табл. П1.9]. Активное сопротивление земли, обуславливающее потери активной мощности от протекающего в земле тока, определяется по формуле [3]

$$R_3 \approx \pi^2 f \cdot 10^{-4}, \quad (1)$$

Тогда удельное активное сопротивление контура провод-земля определяется выражением

$$r_i = r_{np} + R_3, \quad (2)$$

При вычислении индуктивности и емкости линии используется метод зеркальных изображений, когда рабочие провода линии зеркально (в геометрическом смысле) отображаются относительно земли, создавая фиктивные провода, которые расположены на таком же расстоянии под землей, что и провода линии над землей. Такой способ представления линии дает возможность вместо системы «провода линии – земля» рассматривать систему «провода линии – фиктивные зеркальные провода». На рис. 3 изображен пример трехфазной линии и ее зеркальное отображение относительно земли [2].

Индуктивность трехфазной ЛЭП

Собственная удельная индуктивность фазы линии L_i (Гн/км) вычисляется по выражению

$$L_i = L_{вт} + L_{вн} + \Delta L_{ii'}, \quad (3)$$

где $L_{вт}$ – внутренняя индуктивность провода, $L_{вн}$ – внешняя индуктивность провода, $\Delta L_{ii'}$ – индуктивность контура провод земля.

Внешняя индуктивность провода $L_{вн}$ обусловлена магнитным потоком, замыкающимся по поверхности провода, определяется формулой [3]

$$L_{вн} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{ii'}}{r_{np}}, \quad (4)$$

где r_{np} – радиус фазного провода, м; μ_0 – магнитная постоянная.

Если рассматривается линия с расщепленной фазой, то вместо r_{np} вводится понятие эквивалентного радиуса провода $r_{np}^{эжв}$ [1]

$$r_{np}^{эжв} = \sqrt[n]{r_{np} \cdot a^{(n-1)}}, \quad (5)$$

где a – среднее геометрическое расстояние между проводами одной фазы, см; n – количество проводов в фазе.

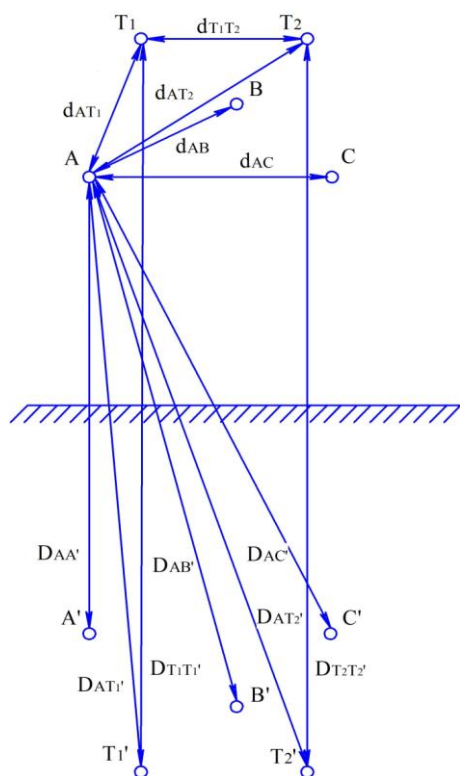


Рис. 3. Трехфазная линия и ее зеркальное отображение:
 $D_{ii'}$ – расстояние между проводом i и его зеркальным отображением i' , м;
 D_{ij} – расстояние между проводом i и зеркальным отображением провода j , м;
 d_{ij} – расстояние между проводами i и j , м

Чтобы учесть магнитный поток, замыкающийся внутри провода, когда магнитная проницаемость провода $\mu \neq \mu_0$, добавляется внутренняя индуктивность провода $L_{вт}$, определяемая по выражению [4].

$$L_{вт} = \frac{\mu}{8\pi}, \quad (6)$$

где μ – абсолютная магнитная проницаемость материала провода (для цветных металлов $\mu = 1$).

Чтобы учесть влияние сопротивления земли, необходимо добавить поправку ΔL_{ii} [5]

$$\Delta L_{ii} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_3}{r_{пр}}, \quad (7)$$

где D_3 – глубина залегания фиктивного обратного провода [5].

$$D_3 = \frac{6593}{\sqrt{f\gamma}}, \quad (8)$$

где f – частота тока; γ – удельная проводимость земли ($\gamma = 10^{-4}$ См/см – проводимость сырой земли, $\gamma = 10^{-5}$ См/см – проводимость сухой земли).

Удельная взаимная индуктивность двух проводов линии M_{ij} (Гн/км) определяется по формуле [3]

$$M_{ij} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{ij}}{d_{ij}} + \Delta M_{ij}, \quad (9)$$

Поправка, учитывающая воздействие земли ΔM_{ij} , определяется по формуле [5]

$$\Delta M_{ij} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_3}{d_{ij}}, \quad (10)$$

Емкость трехфазной ЛЭП

Удельная емкость линии C (Ф/км) вычисляется через потенциальные коэффициенты α

$$[C] = [\alpha]^{-1}, \quad (11)$$

Собственные α_{ii} и α_{ij} взаимные потенциальные коэффициенты равны [2]:

$$\alpha_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \lg \frac{D_{ii}}{r_{пр}}, \quad (12)$$

$$\alpha_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \lg \frac{D_{ij}}{d_{ij}}, \quad (13)$$

На линиях 110 кВ и выше, как правило, в качестве средства грозозащиты используются грозотросы. Грозотросы могут быть разбиты на участки, изолированные от опор, один конец которых заземляется, а на другом оставляют искровой промежуток. При таком исполнении грозотросы не влияют на сопротивление линии. Возможен случай, когда грозотрос заземляется непосредственно на каждой опоре, тогда его рассматриваем как дополнительный независимый провод, индуктивность и емкость которого рассчитаются аналогично фазным проводам.

Влияние тросов учитывается добавлением индуктивностей и потенциальных коэффициентов тросов, тогда матрицы индуктивностей и потенциальных коэффициентов примут вид (для случая использования двух грозотросов)

$$\begin{pmatrix} L_A & L_{AB} & L_{AC} & L_{AT_1} & L_{AT_2} \\ L_{AB} & L_B & L_{BC} & L_{BT_1} & L_{BT_2} \\ L_{AC} & L_{BC} & L_C & L_{CT_1} & L_{CT_2} \\ L_{AT_1} & L_{BT_1} & L_{CT_1} & L_{T_1} & L_{T_1T_2} \\ L_{AT_2} & L_{BT_2} & L_{CT_2} & L_{T_1T_2} & L_{T_2} \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} \alpha_A & \alpha_{AB} & \alpha_{AC} & \alpha_{AT_1} & \alpha_{AT_2} \\ \alpha_{AB} & \alpha_B & \alpha_{BC} & \alpha_{BT_1} & \alpha_{BT_2} \\ \alpha_{AC} & \alpha_{BC} & \alpha_C & \alpha_{CT_1} & \alpha_{CT_2} \\ \alpha_{AT_1} & \alpha_{BT_1} & \alpha_{CT_1} & \alpha_{T_1} & \alpha_{T_1T_2} \\ \alpha_{AT_2} & \alpha_{BT_2} & \alpha_{CT_2} & \alpha_{T_1T_2} & \alpha_{T_2} \end{pmatrix}, \quad (14)$$

Наличие тросов уменьшает индуктивность и увеличивает емкость линии.

Аналогичным образом составляются матрицы для случая многоцепной линии путем добавления в матрицы индуктивностей и емкостей соответствующих индуктивностей и потенциальных коэффициентов проводов.

При симметричном питании фазное напряжение U_{ni} фазы i в начале линии выражается через линейное напряжение U_L .

$$U_{ni} = \frac{U_L}{\sqrt{3}}, \quad (15)$$

Потеря напряжения ΔU_i в фазе i линии определяется по формуле

$$\Delta U_i = I_{ni} \cdot Z_i, \quad (16)$$

где $Z_i = \sqrt{r_i^2 + (\omega L_i - \frac{1}{\omega C_i})^2}$ – полное сопротивление фазы i .

Напряжение в конце фазы i линии

$$U_{ki} = U_{ni} - \Delta U_i, \quad (17)$$

Фазный ток I_{ni} фазы i в начале линии определяется исходя из передаваемой мощности линии $P_{ЛЭП}$

$$I_{ni} = \frac{P_{ЛЭП}/3}{U_{ni}}, \quad (18)$$

Потеря активной мощности ΔP_i в фазе i линии определяется по формуле

$$\Delta P_i = I_{ni}^2 \cdot r_i, \quad (19)$$

Фазный ток I_{ki} фазы i в конце линии находится по формуле

$$I_{ki} = \frac{\frac{P_{ЛЭП}}{3} - \Delta P_i}{U_{ki}}, \quad (20)$$

Коэффициент несимметрии по обратной последовательности k_{2U} определяется по формуле

$$k_{2U} = \frac{U_2}{U_{НОМ}} \cdot 100\%, \quad (21)$$

где $U_2 = \frac{U_{Ак} + a^2 \cdot U_{Вк} + a \cdot U_{Ск}}{3}$ – напряжение по обратной последовательности; $a = e^{j\varphi}$ – оператор поворота; $\varphi = \frac{2\pi}{3}$ – угол поворота.

Рассмотрим случай повышения пропускной способности линии при параллельном включении резервной фазы, с одним из фазных проводов. При этом система фазный провод-грозотрос будет заменена эквивалентным проводом-грозотросом, имеющим вдвое меньшее активное сопротивление, эквивалентный радиус которого, согласно формуле (5),

$$r_{\text{пр,тр}}^{\text{экв}} = \sqrt{r_{\text{пр}} \cdot d_{\text{пр,тр}}} \quad (22)$$

где $d_{\text{пр,тр}}$ – расстояние между фазой и тросом.

Вычисленные матрицы сопротивлений линии 110 кВ с проводом АС-70 в нормальном режиме и при параллельном включении грозотроса с фазой А приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры режима эксплуатации ВЛ 110 кВ с фазой провод-грозотрос

Нормальный режим	Режим: фаза А – резервная фаза
Resistance matrix R matrix (ohm/km): 0.46 - - - 0.46 - - - 0.46	Resistance matrix R matrix (ohm/km): 0.46 - - - 0.46 - - - 0.46
Inductance matrix L matrix (H/km·10 ⁻³): 2.1149 0.62305 0.67763 0.62305 2.0565 0.73819 0.67763 0.73819 2.1324	Inductance matrix L matrix (H/km·10 ⁻³): 1.7990 1.0791 1.0186 1.0791 2.4508 1.0929 1.0186 1.0929 2.4512
Capacitance matrix C matrix (F/km·10 ⁻⁹): 6.9277 -0.85517 -0.98355 -0.85517 7.1338 -0.14137 -0.98355 -0.14137 7.0595	Capacitance matrix C matrix (F/km·10 ⁻⁹): 11.201 -2.4391 -1.8305 -2.4391 7.1931 -1.3541 -1.8305 -1.3541 7.0900

Вычисление параметров других фаз при параллельном включении резервной фазы - грозотроса с фазным проводом производится аналогично. Параметры режимов эксплуатации одноцепной линии при параллельном включении резервной фазы – грозотроса с фазными проводами представлены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры режимов эксплуатации ВЛ 110 кВ с фазой провод-грозотрос

Варианты исполнения ВЛ 110кВ	Режимы эксплуатации ВЛ	Фаза	Напряжения и токи, коэффициент несимметрии в начале линии			Напряжения, токи, коэффициент несимметрии, потеря напряжения и мощности в конце линии				
			U _{н*} , кВ	I _н , А	K _{Н2У} , %	U _{к*} , кВ	I _к , А	K _{к2У} , %	ΔU, %	ΔP, %
ВЛ традиционного исполнения	Нормальный режим	А	63,11	187,80	0,067	50,7375	188,693	0,2955	19,49	11,544
		В	63,33	194,42		52,2719	194,4		17,41	
		С	63,56	195,47		52,5508	195,437		17,34	

Окончание табл. 2

ВЛ с резервной фазой	Резервная фаза включена вместе с фазой А	A	63,05	200,71	0,097	54,3844	202,256	0,1300	13,64	5,647
		B	63,69	199,91		53,6612	199,566		15,79	
		C	63,31	199,40		53,627	199,439		15,25	
	Резервная фаза включена вместе с фазой В	A	63,04	187,22	0,085	50,6057	188,203	0,9749	19,57	7,484
		B	63,32	212,19		57,0415	212,138		9,89	
		C	63,60	200,31		53,7422	199,868		15,52	
	Резервная фаза включена вместе с фазой С	A	63,04	187,13	0,092	50,5759	188,092	0,9796	19,62	4,770
		B	63,65	200,24		53,7969	200,071		15,51	
		C	63,32	212,23		57,0428	212,143		9,89	

* – Указаны фазные значения напряжения

Анализ расчетов режимов трехфазной воздушной линии с использованием резервной фазы в качестве дополнительного провода показал, что при такой эксплуатации одноцепных линий напряжением 110 кВ параметры режимов не выходят за установленные нормы качества напряжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Герасименко А.А. Передача и распределение электрической энергии / А.А. Герасименко, В.Т. Федин. – Красноярск: Издательские проекты, 2006. – 720 с.
2. Dommel H. Electromagnetic Transients Program Reference Manual (EMTP Theory Book) / H. Dommel, 1986.
3. Крючков И.П. Переходные процессы в электроэнергетических системах / И.П. Крючков, В.А. Старшинов, Ю.П. Гусев, М.В. Пиаторов. – М.: ИД МЭИ, 2009. – 416 с.
4. Калантаров П.Л. Расчет индуктивностей / П.Л. Калантаров, Л.А. Цейтлин. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.
5. Лосев С. Б. Вычисление электрических величин в несимметричных режимах электрических систем / С. Б. Лосев, А. Б. Чернин. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 528 с.

Левин Дмитрий Сергеевич – аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Dmitriy S. Levin – Postgraduate Department of Power Supply of Industrial Enterprises, Gagarin Saratov State Technical University

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

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

Статья поступила в редакцию 18.05.12, принята к опубликованию 17.06.12

В.Н. Лясников, О.Д. Муктаров

ИОННО-ЛУЧЕВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЯ ГИДРОКСИАПАТИТОВЫХ ПЛАЗМОНАПЫЛЕННЫХ ПОКРЫТИЙ

Представлены результаты экспериментальной работы по синтезу углеродсодержащих фрагментов на поверхности плазмонапыленных покрытий внутрикостных имплантатов, методом ионно-лучевого облучения. Исследована микроструктура поверхности спектроскопическими и электронно-микроскопическими методами. Рассмотрено оборудование для напыления и облучения биосовместимого покрытия.

Имплантат, биокерамическое покрытие, плазма, ионно-лучевая технология

V.N. Lyasnikov, O.D. Muktarov

ION-BEAM TECHNOLOGY NANOSTRUCTURING HYDROXYAPATITE PLASMA COATING

The results of experimental studies on the synthesis of carbon-containing fragments on the surface plasma coating implants by ion-beam irradiation. The microstructure and surface spectroscopic electron microscopy methods. We consider the equipment for spraying and exposure the biocompatible coating.

Implant, bioceramic coatings, plasma, ion beam technology

Актуальность. Сегодня во всем мире идет активный поиск материалов, пригодных для введения в организм человека с целью диагностики, лечения или замены каких-либо органов и тканей. В частности, очень высока потребность в дентальных имплантатах [1-3]. За последние десятилетия создан широкий спектр материалов, достаточно хорошо отвечающих таким требованиям – это металлы, полимеры, стеклопластики, керамика, различные композиты [4-5]. Особый интерес у медиков вызывают керамические материалы, близкие по своему химическому составу к природной костной ткани. Это керамика на основе кальций-фосфорных соединений, в первую очередь гидроксиапатита $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ (ГА) – материала, по химическому и фазовому составу аналогичного минеральной компоненте костной ткани [6]. Гидроксиапатит (ГА) известен как наиболее устойчивый к резорбции внеклеточными жидкостями организма ортофосфат кальция, является основной минеральной составляющей костной ткани, зубной эмали и дентина. ГА играет важнейшую роль во многих физиологических процессах, происходящих в организме человека [4,6].

Одним из важных требований, предъявляемых к биокерамике, является необходимость иметь достаточно большую открытую пористость, поры должны быть взаимосвязанными для обеспечения биологических потоков и достаточно крупными для обеспечения жизнедеятельности остеобластов, строящих костную ткань [4]. Полагают, что минимальный размер открытых пор должен быть не менее 50 мкм. Керамика должна быть достаточно прочной, способной выдерживать нагрузки в период процесса формирования новой костной ткани, и медленно резорбируемой во времени, сохраняя свою структуру и свойства, по крайней мере, в течение 2-3 месяцев периода остеоинтеграции. Известным методом формирования ГА покрытий, нашедшим коммерческое применение, является плазменное напыление [7]. Среди существующих методов нанесения гидроксиапатитных покрытий на металлические подложки, обеспечивающих высокий уровень связывания с костью, для клинического применения метод плазменного напыления считается наиболее приемлемым и практичным.

В представленной работе ионно-лучевая технология использована для усиления стабильности биофункциональных свойств гидроксиапатита. Данный метод модификации основан на бомбардировке поверхности плазмонапыленной биокерамики потоком высокоэнергетических ионов в камере с высоким вакуумом [9, 14]. При этой бомбардировке ионы выбивают атомы и электроны из основной цепи плазмонапыленного ГА, а также возбуждают фоновые энергетические уровни. Как результат, бомбардированная область керамики становится насыщенной структурными дефектами: несвязанными ионами и электронами; свободными радикалами. Эти процессы происходят в тонком поверхностном слое керамики (50-150 нм), образуя поверхность с высокой концентрацией структурных дефектов. Данные активные частицы и группы вызывают цыпочку свободно-радикальных реакция, которые формируют новые стабильные структуры. При вынесении модифицированной керамики на воздух, активное участие в свободно-радикальных реакциях принимает кислород воздуха. В результате поверхностный слой керамики становится сильно карбонизированным и окисленным с высокой концентрацией межмолекулярных сшивок и высокой химической активностью. Данный слой имеет гарантированную адгезию к керамике, поскольку синтезирован из него же.

Для получения, формирования и ускорения ионных пучков, легирующих веществ используют ионно-лучевые установки (рис. 1), которые различаются по конструкции входящих в них систем, типу применяемых камер, значению генерируемого ионного тока и максимальной энергии ионов.

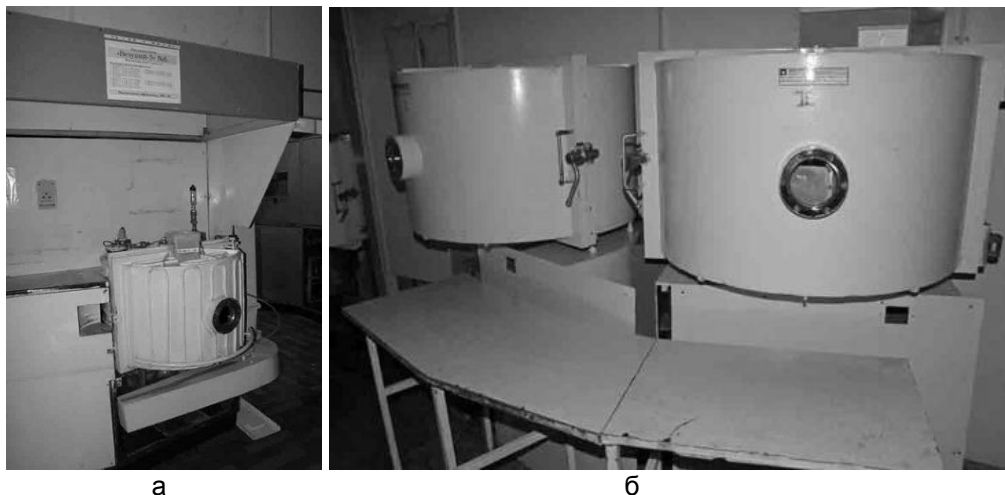


Рис. 1. Установки ионно-лучевого легирования: а – «Везувий-5», б – «Везувий - 3». Вид со стороны приемной камеры

Ионы образуются в разрядной камере ионного источника за счет ионизации паров рабочего вещества в дуговом разряде и вытягиваются из нее при помощи вытягивающего электрода. Дуговой разряд в источнике происходит в поперечном магнитном поле, создаваемом постоянным магнитом самого источника. Вытягивающийся из источника ионный пучок попадает в электромагнит масс-сепаратора, где происходит разделение ионов по массам.

Материалы и методика исследования. Плазмонапыленные покрытия гидроксиапатита используемые в исследовании были получены на металлических пластинах титана марки ВТ1-0 (ГОСТ 19807-91) размером 10×10×2 мм. Плазменное напыление проводили на экспериментальной полуавтоматической установке ВРЕС 744.3227.001 (рис. 2) на воздухе, транспортирующий и плазмообразующий газ – аргон при расходе 1-3 л/мин и 20-40 л/мин, соответственно. Перед напылением образцы были обработаны частицами оксида алюминия с помощью пескоструйного аппарата «Чайка-20». Напыляли порошки титана ПТС (ТУ 14-22-57-92) и синтетического гидроксиапатита, подаваемые инжекционно-вибрационным питателем типа Э1974 [8]. Частицы калибровались по размеру на ситах с ячейками 40 и 70 мкм, последовательно. Перед напылением порошки просушивались в сушильном шкафу при температуре 80 °С в течение 1 часа.

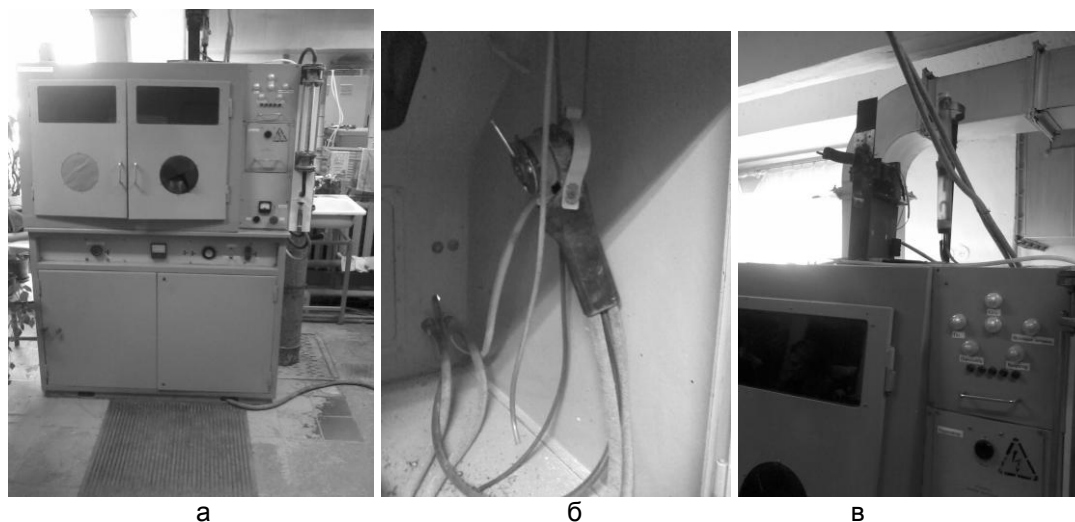


Рис. 2. Установка плазменного напыления: а – общий вид, б – плазмоторн, в – инъекционно-вибрационный питатель тип Э1974

Покрyтия титана и гидроксипатита напыляли в струе аргона при токе плазменной дуги 500-550 А, напряжении 30 В с дистанцией напыления, варьируемой в пределах 40-130 мм. Толщина покрытий 150-170 мкм, измерение проводили с помощью цифрового микрометра марки МКЦ0-25.

Далее образцы закрепляли на съемных металлических пластинах с помощью фоторезистора послужившего клеевой основой, и сушились в печи при $t = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 10 мин. Облучение проводилось с помощью установки «Везувий-5» (рис. 1а), в вакууме при давлении $4 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст., плотностью тока ионного луча составляла ~ 10 мкА/см², при этом ток катода составлял – 4 А, ток магнита – 5 мА, вытягивающий ток – 12 мкА, ускоряющее напряжение – 110 кВ, ток дуги – 0,1 А. Выполнены три серии экспериментов, отличающихся временем обработки и дозами облучения образцов (таблица).

Условия облучения азотом в плазмонапыленные покрытия

Система	Ускоряющее напряжение, кВ	Температура поверхности образцов, К	Длительность имплантации, мин	Доза облучения, мкКл/см ²
ГАП – N	110	330	2	1000
ГАП – N	110	330	5	2000
ГАП – N	110	330	7	3000

Изменения структуры в модифицированных плазмонапыленных покрытиях изучались при помощи растровой электронной микроскопии (РЭМ) марки MIRA II LMU фирмы TESCAN при ускоряющем напряжении 30 кВ и инфракрасной (ИК) спектроскопии на спектрометре Nicolet-6700 с приставкой НПО (нарушенное полное отражение) в интервале 4500-550 см⁻¹.

Результаты и их обсуждения. На рис. 3, представлены изображения поверхности плазмонапыленных покрытий до и после облучения ускоренными ионами азота. Поверхность плазмонапыленных покрытий гидроксипатита до облучения (рис. 3 а, б) имеют пористую неоднородную морфологическую структуру со сферическими частицами размером от 5 до 50 мкм. При увеличении кадра (рис. 3 б) наблюдаются трещины в покрытии.

Эффект модификации поверхности наблюдается по изменению морфологии поверхности, на рис. 2 в, г. Если поверхность необработанного плазмонапыленного покрытия имеет достаточно гладкую форму, то после модификации поверхность приобретает заметно шероховатый вид рис. 2 г.

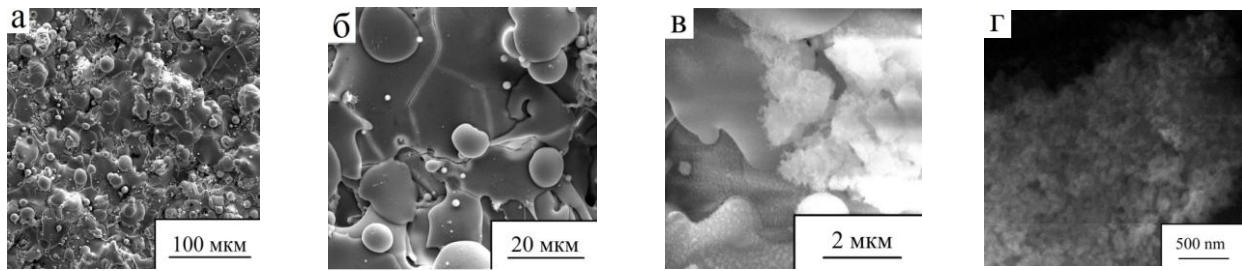


Рис. 2. Изображения РЭМ: а, б – до облучения; в, г – после модификации ионами азота с дозой $\Phi=3000$ мкКл/см²

Модифицированный слой гидроксиапатита достаточно тонкий. Спектр ИК НПО поверхности модифицированного ГА показан на рис. 3. В представленных экспериментальных ИК-спектрах плазмонапыленного ГА наблюдаются линии характеристических валентных колебаний PO_4^{3-} – интенсивная полоса антисимметричных валентных колебаний ν_3 с максимумами 1020 см^{-1} , а также структурированная полоса деформационных плоскостного и внеплоскостного колебаний PO_4^{3-} δ (O-P-O) с максимумами 547 см^{-1} , 580 см^{-1} , и 608 см^{-1} (рис. 3а).

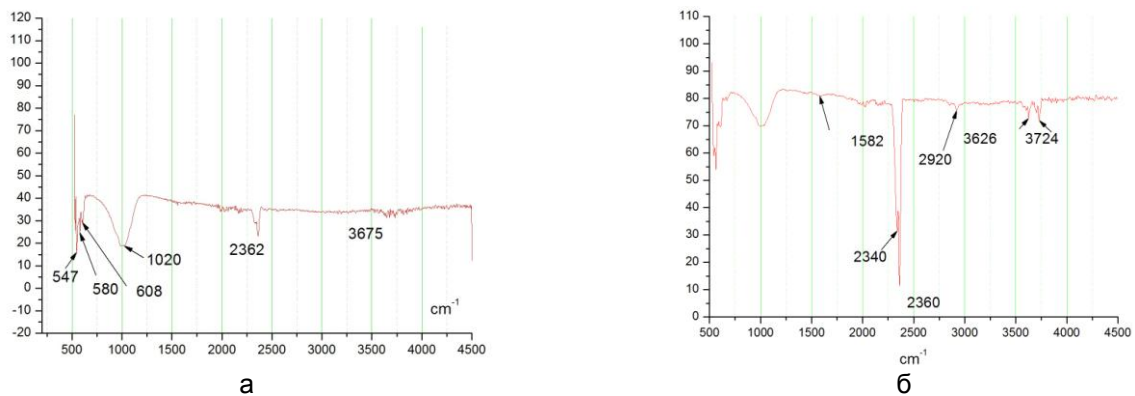


Рис. 3. ИК-спектры ГА: а) не облученный ГА; б) ГА облученный с дозой $\Phi = 3000$ мкКл/см²

Также в плазмонапыленных покрытиях наблюдается слабая линия с частотой 3675 см^{-1} , которая относится к валентному колебанию O-H- группы гидроксиапатита, и слабая линия с частотой 2362 см^{-1} – колебания функциональных групп CO_2 .

В облученном покрытии наблюдается разница в положении максимумов. Заметно увеличиваются слабые колебания CO_2 в области 2340 см^{-1} и 2360 см^{-1} , уменьшается широкая полоса в области валентных колебаний PO_4^{3-} с максимумом 1020 см^{-1} . Процесс вызван выбиванием атомов (ионов) фосфора из ГА при ионно-лучевой обработке, в результате поверхностный слой насыщается углеродом, образующимся в результате свободно-радикальных реакций с участием атмосферного кислорода, который приводит к образованию кислородсодержащих групп типа карбональных.

Данные исследования показали, что модификация структуры поверхностного слоя плазмонапыленного ГА вызывает изменения в морфологии покрытий, заметно увеличивает шероховатость, вызывает появление специфической химической активности. Присутствие свободных радикалов, неопределенных углеродных и кислородсодержащих групп дает возможность о предположительном увеличении биоактивных характеристик плазмонапыленных гидроксиапатитовых покрытий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стоматологические имплантаты. Исследование. Разработка. Производство. Применение / А.В. [и др.]. – Саратов: СГТУ, 2006. – 254 с.

2. Лясников В.Н. Плазменное напыление в электронике и биомедицинской технике: учеб. пособие для студ. физ.-техн. спец. / В. Н. Лясников, Н. В. Протасова; Саратов. гос. техн. ун-т. – Саратов: СГТУ, 2010. – 285 с.
3. Исследование структуры биокерамических покрытий, полученных плазменным напылением гидроксипатита синтетического и биологического происхождения / В.Н. Лясников [и др.] // Медицинская техника. – 2011. – №4 (268). – С. 5-14.
4. Протасова Н.В. Биомедицинские и физико-механические критерии создания высокоэффективной дентальной биотехнической системы «кость-имплантат» / Н.В. Протасова, К.Г. Бутовский, В.Н. Лясников // Клиническая имплантология и стоматология. – 2000. – №3-4(13-14). – С. 111-113.
5. Применение плазменного напыления в производстве имплантатов для стоматологии / В. Н. Лясников [и др.]. – Саратов: СГТУ, 1993. – 40 с.
6. Применение специальных покрытий в изделиях медицинского назначения: учеб. пособие / А.В. Лясникова [и др.]. – Саратов: СГТУ, 2010. – 272 с.
7. Калита В.И. Физика и химия формирования биоинертных и биоактивных поверхностей на имплантатах. Обзор // Физика и химия обработки материалов, 2000. – №5. – С. 28 - 45.
8. Электроплазменное напыление в производстве внутрикостных имплантатов / А.В. Лясникова [и др.]. – Саратов: СГТУ, 2006. – 200 с.
9. Гаврилов Н.В. Модификация полимерных пленок ПЭ, ПТФЭ, ПК, ПИ импульсными ионными пучками / Н.В. Гаврилов [и др.] // Химическая физика и мезоскопия. – 1999. – №1. – Т.1. – С. 39-47.
10. Kondyurin A. Ion beam treatment of polymers / A. Kondyurin, M. Bilek. – Oxford: Elsevier, 2008.

Лясников Владимир Николаевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Физическое материаловедение и технологии новых материалов» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Vladimir N. Lyasnikov – Dr. Sc., Professor
Head: Department of Physical Materials and Technologies of New Materials,
Gagarin Saratov State Technical University

Муктаров Орынгали Джулдгалиевич – аспирант кафедры «Физическое материаловедение и технологии новых материалов» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Oryngali D. Muktarov – Postgraduate
Department of Physical Materials and Technologies of New Materials,
Gagarin Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 16.05.12, принята к опубликованию 15.06.12

УДК 621.38

В.Н. Лясников, О.Д. Муктаров

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ АЗОТА ПРИ СОЗДАНИИ НАНОМОДИФИЦИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНОВЫХ ДЕНТАЛЬНЫХ ИМПЛАНТАТОВ

Представлены результаты экспериментальной работы по наноразмерному синтезу нитридных систем методом ионной имплантации в титановый сплав марки ВТ 1-0, исследованы процессы модификации поверхностного слоя спектроскопическими и электронно-микроскопическими методами.

Ионно-лучевое облучение, нитрид титана, имплантат

V.N. Lyasnikov, O.D. Muktarov

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF ION IMPLANTATION OF NITROGEN FOR THE ESTABLISHMENT OF NANOMODIFIED SURFACE OF TITANIUM DENTAL IMPLANTS

There are of results of synthesis nitrous systems experiments by ion-beam technology method. Titanium fusion VT1-0 was used. Investigations of surface layer modification process by spectrographic and electro-microscopic methods was provided.

Ion-beam irradiation, nitrous titanium, implant

Актуальность. Улучшение качества жизни и, в первую очередь, здоровья населения является первоочередной задачей мирового сообщества. Объем рынка изделий хирургической ортопедии увеличивается с каждым годом, в связи с чем одной из актуальных проблем являются разработка и совершенствование имплантационных материалов и конструкций нового поколения, заменяющих поврежденные костные участки и системы [1-3]. Основным требованием к таким материалам является их быстрая адаптация в организме человека путем взаимодействия с костными тканями и значительно более длительный срок службы по сравнению с существующими материалами, что позволит избежать повторных операций [2, 4, 5].

Сложность проблемы состоит в том, что ни один из современных материалов, используемых для изготовления имплантатов, не обладает всеми свойствами костной ткани. Имплантационные материалы нового поколения должны обладать высокой поверхностной твердостью и прочностью на сжатие и растяжение, высокой износо- и коррозионной стойкостью, низким модулем упругости, а также минимальной концентрацией токсичных атомов легирующих элементов на контактной поверхности изделий и отсутствием возможности вывода в растворы и ткани живых организмов [4-6]. Одним из способов улучшения этих свойств является формирование защитно-упрочняющих покрытий методом ионно-лучевой технологии, являющееся эффективным методом повышения характеристик материалов посредством изменения элементного состава и структурно-фазового состояния поверхностных слоев металлов, позволяющим получать градиентно-слоевую структуру с плавным изменением фазового состояния по глубине модифицированных приповерхностных слоев без резких границ между ними. В настоящее время одним из наиболее перспективных направлений ионной имплантации является формирование в поверхностных слоях нитридных систем, характеризующихся аномальными физико-механическими свойствами [1].

Цель исследований. Целью исследований являлось исследование процесса модификации микроструктуры, микротрещин поверхностных слоев титана марки VT1-0 в зависимости от условий ионно-лучевого облучения, реализованной на установке «Везувий – 5».

Материалы и методика исследований. Облучение проводилось ионами азота плоских металлических образцов из титана марки VT 1-0, размером $10 \times 10 \times 2$ мм, полированных вручную по традиционной методике, после полировки образцы подвергались кипячению в растворе изопропилового спирта (ГОСТ 9805-84) и в растворе четыреххлористого углерода (ГОСТ 4-8) в течение 2-5 мин в каждом растворе. Далее образцы закрепляли на съемных металлических пластинах с помощью фоторезистора послужившего клеевой основой, и сушились в печи при $t = 150$ °С в течение 10 мин. Облучение проводилось в вакууме при давлении $4 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст. плотностью тока ионного луча составляла ~ 10 мкА/см², при этом ток катода составлял – 4 А, ток магнита – 5 мА, вытягивающий ток – 12 мкА, ускоряющее напряжение – 110 кВ, ток дуги – 0,1 А. Выполнено пять серии экспериментов, отличающихся временем обработки и дозами облучения образцов (таблица).

Современные ионно-лучевые установки состоят из ионного источника, ускоряющей системы, масс-сепаратора, устройства сканирования ионного пучка, системы источников пи-

тания, приемной камеры вакуумной системы (рис. 1 а), устройства контроля и управления технологическим процессом (рис. 1 б).

Условия ионно-лучевого облучения азота в титан («Везувий-5»)

Система	Ускоряющее напряжение, кВ	Температура поверхности образцов, К	Длительность имплантации, мин	Доза облучения, мкКл/см ²
Ti – N	110	330	2	1000
Ti – N	110	330	5	2000
Ti – N	110	330	7	3000
Ti – N	110	330	12	5000
Ti – N	110	330	25	10000

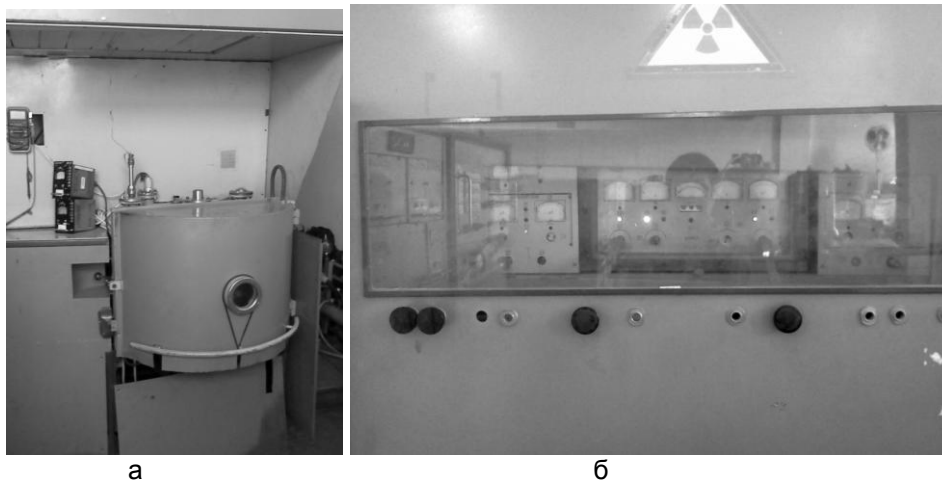


Рис.1. Установка ионно-лучевого легирования «Везувий-5»: а – приемная камера; б – устройство контроля и управления технологическим процессом

В процессе имплантации происходит разогрев мишени ионным пучком. Была сделана оценки равновесной температуры образца по известной формуле [8]:

$$T_{\infty} = \left(\frac{P}{2A\sigma\varepsilon} + T_0^4 \right)^{\frac{1}{4}},$$

где P – мощность, A – площадь облучаемой поверхности, σ – постоянная Стефана-Больцмана излучения черного тела ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2} \text{ К}^{-4}$), ε – излучательная способность поверхности образца (для титана $\varepsilon = 0,75$), T_0 – температура окружающей среды. Сделанные оценки показали, что даже в режимах имплантации ($E = 110 \text{ кэВ}$, $\Phi = 10000 \text{ мкКл/см}^2$) образец может нагреваться до 80°C , а арматура коллекторного устройства находится при комнатной температуре 20°C . Эти оценки сделаны без учета теплоотвода элементами конструкции коллекторного устройства, на самом деле разогрев образцов был еще меньше.

Изменения структуры в титане изучались при помощи электронной микроскопии (РЭМ), инфракрасной (ИК) спектроскопии и спектроскопии комбинационного рассеивания (КР). В приведенных исследованиях использовался растровый электронный микроскоп марки MIRA II LMU фирмы TESCAN при ускоряющем напряжении 30 кВ, инфракрасные спектры записывались на спектрометре Nicolet-6700 с приставкой НПО (нарушенное полное отражение) в интервале $4500\text{-}550 \text{ см}^{-1}$. Исследования спектров комбинационного рассеивания проводились на спектрометре фирмы NT-MDT с использованием лазерного излучения с длиной волны $\lambda=473 \text{ нм}$. Спектр регистрировался в области основных колебаний $100\text{-}4000 \text{ см}^{-1}$ от отраженного сфокусированного лазерного луча с размером пятна $d \approx 10 \text{ мкм}$. Области для проведения регистрации выбирались визуально без полного сканирования поверхности.

Результаты и их обсуждение. Эффект модификации поверхности после облучения визуально не наблюдается. На рис. 2 представлены изображения поверхности образцов, полученные с помощью РЭМ до и после облучения ускоренными ионами. Титан в необлучен-

ном состоянии после механических работ имеет различные виды поверхностных дефектов, в том числе и микротрещины, на рис. 2 а выборочно представлена микротрещина размером $\sim 10 \times 4$ мкм. Такие микротрещины наблюдаются на всем участке полированного титана в виде отдельных борозд. После облучения поверхности титана наблюдается изменение поверхности микротрещин. На рис. 1 б видно, что имплантация азота при комнатной температуре приводит к «залечиванию» микротрещин титана при относительно небольших дозах от 1000 до 3000 мкКл/см², с увеличением дозы облучения до 10000 мкКл/см² наблюдается полное «залечивание» микротрещин (см. рис. 1 в).

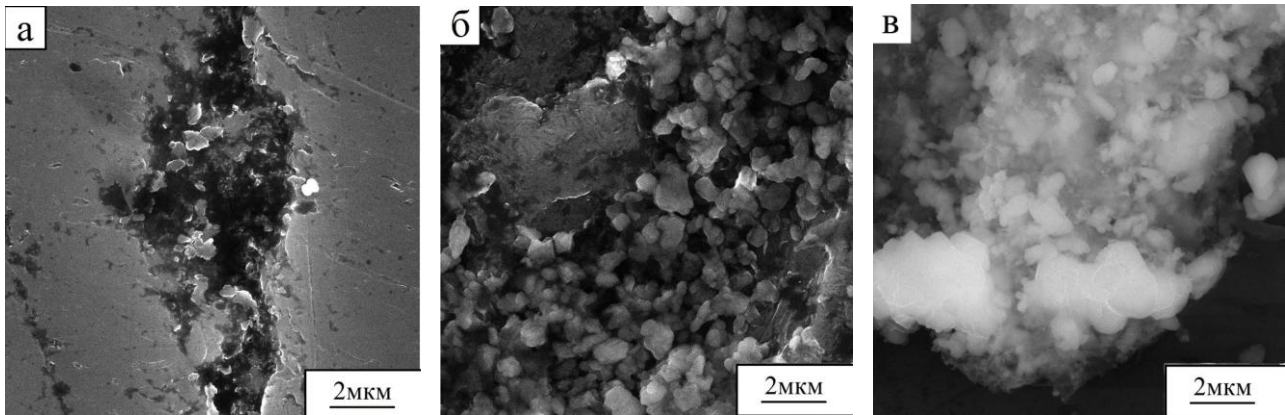


Рис. 2. Изображения поверхности образцов, полученные с помощью РЭМ: а – титан без облучения; б – титан, облученный с дозой азота $\Phi=1000$ мкКл/см²; в – титан, облученный с дозой азота $\Phi=10000$ мкКл/см²

Эффект модификации поверхности облученного титана наблюдается в спектрах комбинационного рассеяния. Из представленных спектрограмм (рис. 3) облученного титана с различной дозой от 3000 до 10000 мкКл/см², видно, что с увеличением дозы облучения происходит рост новой фазы.

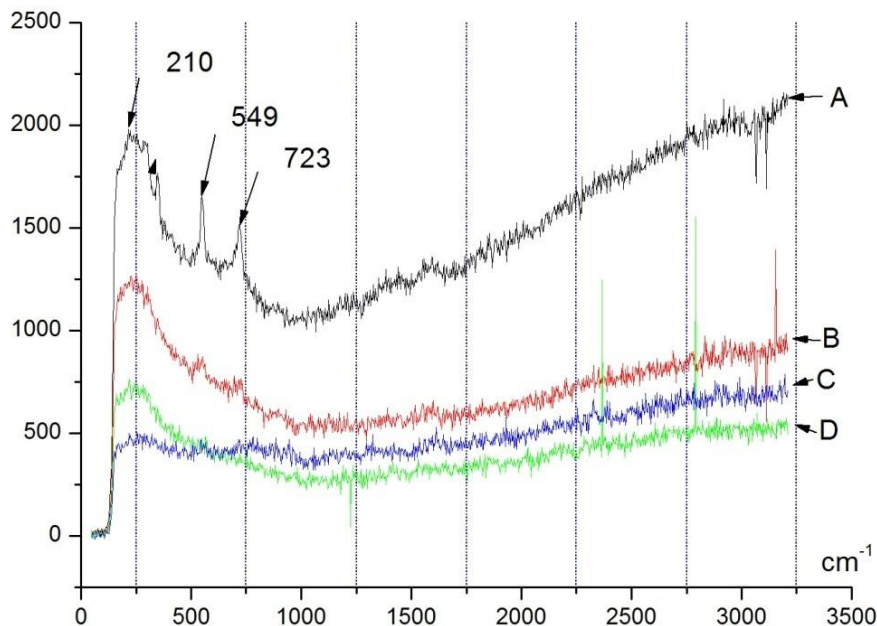


Рис. 3. КР-спектры облученного азотом титана: А – титан с дозой облучения $\Phi = 10000$ мкКл/см², В – титан с дозой облучения $\Phi = 7000$ мкКл/см², С – титан с дозой облучения $\Phi = 5000$ мкКл/см², D – титан с дозой облучения $\Phi = 3000$ мкКл/см²

Начиная с дозы 7000 мкКл/см² (линия В) появляются выраженные спектральные пики полос в области 549 и 723 см⁻¹ из литературных данных [10] данные области отнесены к нитриду титана, особенно интенсивны данные пики при дозе облучения 10000 мкКл/см² (ли-

ния А). Известно, что нитрид представляет собой фазу внедрения с широкой областью гомогенности, кристаллы с кубической гранецентрированной решеткой, подобной NaCl, обладают высокой твердостью ($H_{\mu}=1994\pm 137$ кг/мм²) и термодинамической устойчивостью.

Преобразования в твердых телах при ионном облучении носят неравновесный характер в силу генерации радиационных дефектов, большой амплитуды колебаний атомов в пиках смещения, локальных напряжений, генерации акустических и нелинейных волн и т.д. Это существенно ограничивает возможности применения классических теорий фазовых превращений, особенно при низких температурах [9].

Изменения структуры поверхностного слоя после облучения титана также зафиксированы в инфракрасных спектрах Фурье. По инфракрасным спектрам поглощения изучают строение молекул различных органических (и неорганических) веществ с относительно короткими молекулами. По числу и положению пиков в инфракрасных спектрах поглощения можно судить о природе вещества, а по интенсивности полос поглощения – о количестве вещества.

Представленные инфракрасные спектры (рис. 4) показывают влияние азота на молекулярный состав поверхностного слоя титана. По спектру необлученного титана (рис. 4 а) видна яркая полоса в области 506 см⁻¹, которая идентифицирует титан, и слабо выраженный пик в области 2360 см⁻¹ отвечающий колебаниям адсорбированного СО₂ газа на поверхности. В инфракрасных спектрах облученных образцов титана (рис. 4 б) с дозой облучения 7000 мкКл/см², при которой начинается рост нитридных фаз наблюдаются сильный пик линий в области 2360 и 2925 см⁻¹, эти линии отвечают колебаниям СО₂ и С-Н. Кроме линий колебаний молекул СО₂ и С-Н, наблюдаются линии в области 1500 и 1800 см⁻¹, эти линии отвечают колебаниям С = О, С = N, С = С связей в кислородсодержащих группах. Также видны линии в области 3650 и 3850 см⁻¹, отвечающие колебаниям N - Н и О - Н. Поверхностный механизм наноразмерного синтеза связан с полимеризацией углеродсодержащих фрагментов, введенных в вакуумную камеру на поверхность имплантируемого слоя.

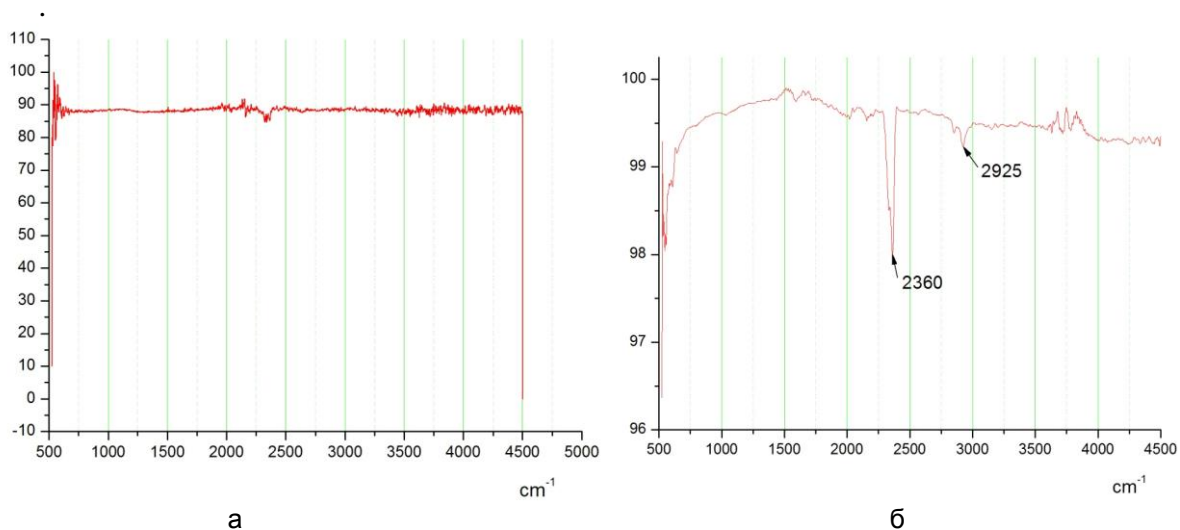


Рис. 4. Инфракрасные спектры Фурье: а – титан до облучения марки ВТ1-0, б – титан с дозой облучения $\Phi = 7000$ мкКл/см²

В инфракрасных спектрах облученных образцов титана меньшими дозами от 1000 до 3000 мкКл/см² (рис. 5), при которых происходит «залечивание» микротрещин титана, характер полос в сравнении с дозой 7000 мкКл/см² изменяется по интенсивности полос. Начиная с дозы от 2000 мкКл/см², наблюдается появление пиков в области 2925 см⁻¹ отвечают колебаниям С-Н связей (рис. 5, линия В) и становится более выраженной при дозе 3000 мкКл/см². Очевидно, что для не очень больших доз ионов ионно-лучевая обработка сопровождается хорошо изученным процессом накопления радиационных дефектов, стимулирующим растя-

жение, увеличение энергии и возможную переориентацию химических связей вблизи дефектов и повышение химической активности материала. Устойчивость атомной структуры понижается, создаются предпосылки для ее перехода в новое состояние.

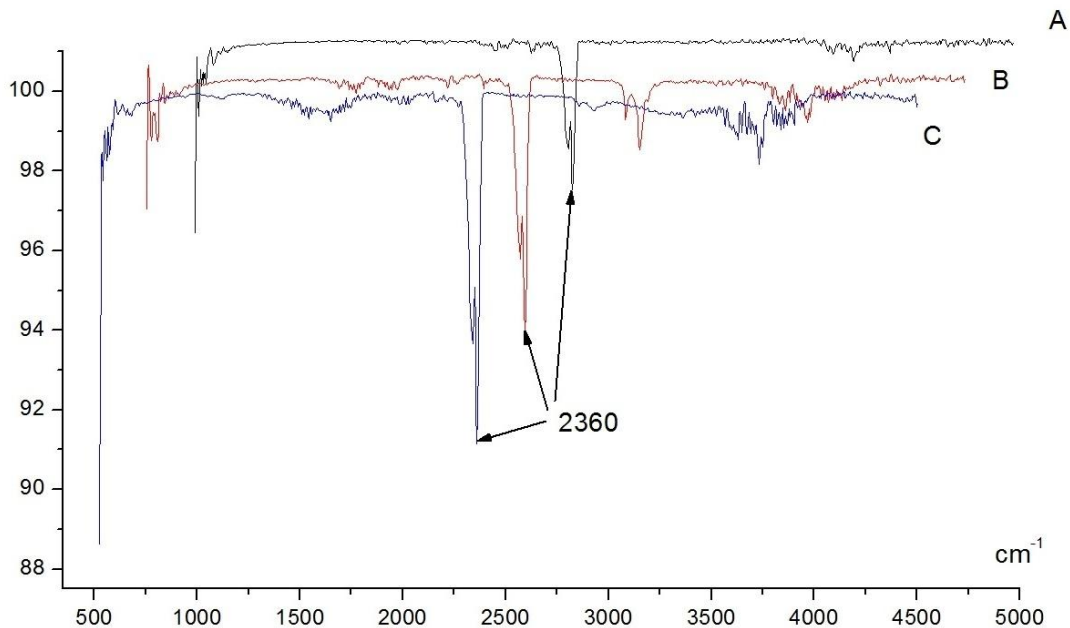


Рис. 5. ИК-спектры облученного азотом титана: А – титан с дозой облучения $\Phi = 1000 \text{ мкКл/см}^2$, В – титан с дозой облучения $\Phi = 3000 \text{ мкКл/см}^2$, С – титан с дозой облучения $\Phi = 2000 \text{ мкКл/см}^2$

Таким образом, данные исследования показали, что в процессе имплантации доз химически активной примеси виде азота от 2000-3000 мкКл/см^2 в титановом сплаве ВТ1-0 формируется двухслойная структура «пассивирующая полимерная пленка – имплантированный материал» концентрация дефектов в которой достаточна для заметного изменения объемных свойств. Дальнейшее увеличение дозы до значения 10000 мкКл/см^2 приводит к значительным структурным нарушениям, поверхность титана образует рост нитридной фазы, происходит «залечивание» микротрещин, показано, что после ионно-лучевой обработки поверхность титана становится насыщенной углерод-углеродными группами, кислородсодержащими группами карбоксильными, а также свободными радикалами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стоматологические имплантаты. Исследование. Разработка. Производство. Применение / А.В. Лясникова [и др.]. – Саратов: СГТУ, 2006. – 254 с.
2. Лясников В.Н. Плазменное напыление в электронике и биомедицинской технике: учеб. пособие для студ. физ.-техн. спец. / В. Н. Лясников, Н. В. Протасова; Саратов. гос. техн. ун-т. – Саратов: СГТУ, 2010. – 285 с.
3. Исследование структуры биокерамических покрытий, полученных плазменным напылением гидроксиапатита синтетического и биологического происхождения / В.Н. Лясников [и др.] // Медицинская техника. – 2011. – №4 (268). – С. 5-14.
4. Протасова Н.В. Биомедицинские и физико-механические критерии создания высокоэффективной дентальной биотехнической системы «кость-имплантат» / Н.В. Протасова, К.Г. Бутовский, В.Н. Лясников // Клиническая имплантология и стоматология. – 2000. – №3-4(13-14). – С. 111-113.
5. Применение плазменного напыления в производстве имплантатов для стоматологии / В. Н. Лясников [и др.]. – Саратов: СГТУ, 1993. – 40 с.
6. Применение специальных покрытий в изделиях медицинского назначения: учеб. пособие / А.В. Лясникова [и др.]. – Саратов: СГТУ, 2010. – 272 с.

7. Дроздов А.Ю. Атомные механизмы развития микротрещины в титане при одноосном растяжении после ионной имплантации / А.Ю. Дроздов, М.А. Баранов, В.Я. Баянкин // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – Серия: Физика твердого тела. – 2003. – № 1. – С. 111-118.

8. Риссел Х. Ионная имплантация / Х. Риссел, И. Руге. – М.: Энергия, 1975. – 97 с.

9. Тетельбаум Д.И. 50 лет исследований в НИФТИ ННГУ в области физических проблем ионной имплантации // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2010. – № 5 (2). – С. 250–259.

10. M. Kakati, B. Bora, S. Sarma, B.J. Saikia, T. Shripathi, U. Deshpande, Aditi Dubey, G. Ghosh, A.K. Das // Vacuum. – 2008. – № 82. – P. 833–841.

Лясников Владимир Николаевич –
доктор технических наук, профессор, заведующий
кафедрой «Физическое материаловедение
и технологии новых материалов»
Саратовского государственного
технического университета
имени Гагарина Ю.А.

Vladimir N. Lyasnikov –
Dr. Sc., Professor
Head: Department of Physical Materials and
Technologies of New Materials,
Gagarin Saratov State Technical University

Муктаров Орынгали Джулдгалиевич –
аспирант кафедры «Физическое материаловедение
и технологии новых материалов» Саратовского
государственного технического университета
имени Гагарина Ю.А.

Oryngali D. Muktarov –
Postgraduate
Department of Physical Materials and Technologies
of New Materials,
Gagarin Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 16.05.12, принята к опубликованию 15.05.12

УДК 539.234

А.В. Маркин, Д.В. Нефедов, А.А. Сердобинцев, С.Ю. Суздальцев

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОТЖИГА НА ПЛЕНКИ АМОРФНОГО ГИДРОГЕНИЗИРОВАННОГО КРЕМНИЯ, ПОЛУЧЕННЫЕ В СВЧ ПЛАЗМЕ

Приведены результаты исследования спектров комбинационного рассеяния света для тонких пленок аморфного гидрогенизированного кремния подвернутых высокотемпературному отжигу. Показано изменение степени кристалличности образцов с увеличением температуры отжига. Рассмотрены причины изменения кристалличности пленок.

Нанокристаллиты кремния, аморфный гидрогенизированный кремний, комбинационное рассеяние света, высокотемпературный отжиг

A.V. Markin, D.V. Nefedov, A.A. Serdobintsev, S. Yu. Suzdaltsev

INFLUENCE OF HIGH-TEMPERATURE ANNEALING ON AMORPHOUS HYDROGENATED SILICON FILMS PRODUCED IN MICROWAVE PLASMA

The results of researching the Raman scattering spectra of the amorphous hydrogenated silicon thin films influenced of the high-temperature annealing are consid-

ered. The changing of crystallinity degree by increasing of temperature is shown. The reasons of changes in the crystallinity of the films are observed.

Silicon nanocrystallites, amorphous hydrogenated silicon, Raman scattering, high-temperature annealing

Введение. С тех пор, как была открыта фотолюминесценция пористого кремния в видимой области спектра при комнатной температуре [1], кремниевые кристаллиты стали объектом пристального внимания в первую очередь ввиду того, что они обладают люминесцентными свойствами и представляют интерес для применений в оптоэлектронике. Пожалуй, наиболее интересными и перспективными феноменами являются обнаружение оптического усиления в структурах с нанокристаллитами кремния (nc-Si) [2], применение nc-Si в устройствах энергонезависимой памяти [3] и солнечных элементах третьего поколения [4]. Нанокристаллиты кремния с размерами 2-5 нм, как правило, демонстрируют высокую эффективность люминесценции, что выгодно отличает их от объемного монокристаллического кремния, для которого, вследствие непрямозонности данного полупроводника, вероятность излучательной рекомбинации носителей заряда мала. Однако, несмотря на большие усилия по разработке кремниевых светоизлучающих диодов, их эффективность явно недостаточна для практических применений. Одной из причин является то, что инжекция носителей заряда в структурах nc-Si/диэлектрик затруднена из-за разброса размеров нанокристаллов и неоптимальности их концентрации в активном слое.

Несмотря на то, что для создания структур с высокой концентрацией люминесцирующих кремниевых нанокластеров используют различные методы с последующим высокотемпературным отжигом (ВО) [5, 6] мало внимания уделено процессам, происходящим в тонких слоях аморфного гидрогенизированного кремния под действием высокотемпературного отжига и практически не рассмотрена возможность формирования кристаллитов кремния в таких условиях. Поэтому основной задачей данной работы явилось исследование фазового состава пленок аморфного гидрогенизированного кремния до и после их высокотемпературного отжига.

Методика эксперимента. Синтез образцов осуществлялся методом разложения моносилана (SiH_4) в СВЧ плазме газового разряда низкого давления во внешнем магнитом поле. Согласно [7,8], пленки, получаемые при плазменном разложении моносилана, являются гидрогенизированными. ИК- спектроскопия исходной пленки показала наличие гидридных групп, характерных для гидрогенизированных кремниевых пленок [9]. Осаждение пленок аморфного гидрогенизированного кремния производилось на подложки из монокристаллического кремния (КЭФ-5 <111>) и поликора (корундовая керамика Al_2O_3 ВК-100-1) по известной технологии, изложенной в [10]. Выбор материала подложек определялся тем, что монокремний – это наиболее распространенный материал современной электроники, а поликор, не смотря на то, что используется реже, не имеет рамановских пиков в области $450\text{--}570\text{ см}^{-1}$ и не мешает исследовать спектры кремниевых пленок в области характерной как для аморфной фазы, так и для кристаллической.

Параметры технологического процесса осаждения пленок были аналогичны указанным в [11], а именно температура подложки T_s составляла 200°C , потенциал подложкодержателя $U = -200\text{ В}$, давление плазмообразующего газа $P = 0,1\text{ Па}$, мощность СВЧ излучения $W = 375\text{ Вт}$, толщина пленок фиксировалась в пределах 200 нм . Последующий высокотемпературный отжиг производился в вакуумной установке ВУП-4, при температурах 1000 и 1200°C в течение 10 мин с остаточным давлением $P \leq 4 \cdot 10^{-3}\text{ Па}$.

Одним из методов, который был впервые применен для анализа nc-Si еще в [12, 13], является рамановская спектроскопия (спектроскопия комбинационного рассеяния света, КРС), которая обладает рядом таких достоинств, как простота, экспрессность и локальность. По этой причине рамановская спектроскопия является одним из наиболее часто используемых методов исследования, применяемых для обнаружения нанокристаллитов, а также определения их размеров и концентрации в пленках смешанного фазового состава [14, 15]. В

представляемой работе измерение спектров комбинационного рассеяния отожженных и неотожженных образцов на монокристаллическом кремнии и поликоре проводилось с использованием зондовой нанолaborатории Ntegra Spectra (НТ-МДТ) со встроенным спектрометром комбинационного рассеяния. В качестве детектирующего устройства применяли CCD камеру (Andore) со стабилизированной температурой $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$. Источником возбуждения служил твердотельный лазер с длиной волны 473 нм (Cobolt Blues 50) и мощностью генерируемого оптического излучения 35 мВт . При регистрации спектров мощность возбуждающего излучения меняли нейтральными ослабляющими фильтрами, вплоть до величины $0,035\text{ мВт}$. Процесс измерения состоял в следующем. Лазерный луч минимальной мощности фокусировали на поверхности образца и регистрировали спектр комбинационного рассеяния. Достаточное для получения сигнала приемлемой интенсивности время экспозиции составило 60 с для всех образцов.

Результаты и их обсуждение. В соответствии с описанной выше методикой были получены спектры образцов аморфного кремния. Типичные рамановские спектры образцов на монокристаллической кремниевой и поликоревой подложках представлены на рис. 1.

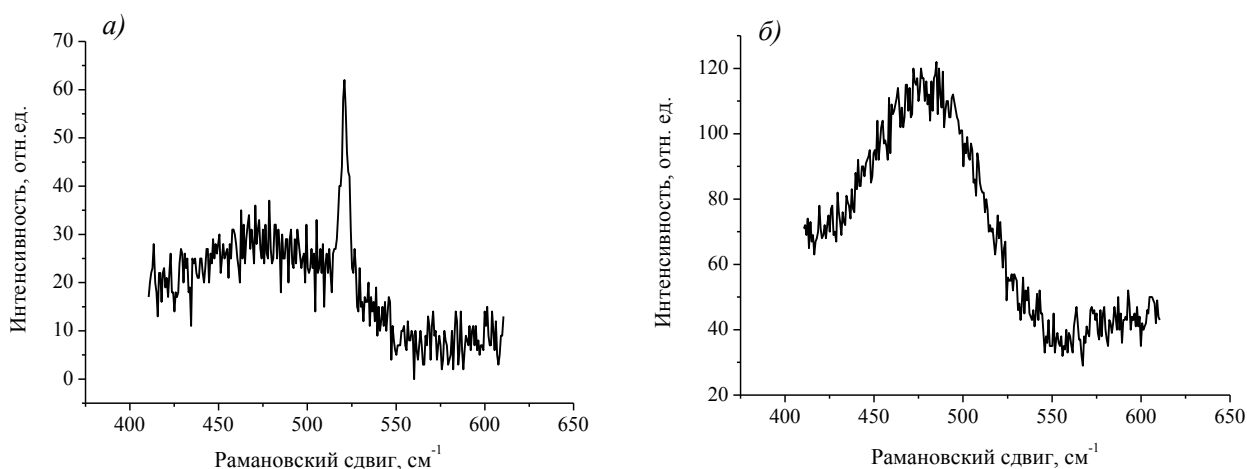


Рис. 1. Спектры КРС образцов аморфного кремния: а) на кремниевой монокристаллической подложке; б) на поликоревой подложке

Как видно из рис. 1 а, на спектре присутствуют два характерных для кремния пика в областях 480 и 520 см^{-1} , соответствующих аморфной и кристаллической фазам. Пик кристаллической фазы (520 см^{-1}) на Si подложках четко выражен как на спектрах отожженных, так и на спектрах неотожженных образцов, поскольку его появление обусловлено откликом от монокристаллической подложки. Нами обнаружено, что после высокотемпературного отжига образцов изменяется интенсивность рамановского рассеивания в областях 480 и 520 см^{-1} так, что соотношение высот между ними уменьшается с ростом температуры отжига, причем преимущественно за счет снижения пика 520 см^{-1} . На рис. 2 представлена зависимость отношения их интенсивностей от температуры отжига.

Мы считаем, что причиной изменения отношения I_{520}/I_{480} является снижение степени кристаллическости подложки на глубине проникновения лазера. Как известно, реальные поверхности, даже хорошо упорядоченные поверхности монокристаллов, содержат различные дефекты (ступени, изломы, кластеры вакансий и т.д.). Если диффузия атомов простирается на расстояния, превышающие среднее расстояние между этими дефектами, то на коэффициент диффузии будут влиять захват или генерация подвижных частиц в этих местах, и тогда имеет место диффузия массопереноса. В этом случае число подвижных частиц зависит от температуры. Согласно [16], значение коэффициента диффузии кремния в кремнии, в диапазоне температур $700\text{--}1300\text{ }^{\circ}\text{C}$, составляет $1,81 \cdot 10^4\text{ см}^2/\text{с}$. То есть с ростом температуры ВО, увеличивается расстояние, на которое могут перемещаться подвижные частицы, однако, данные частицы могут стать неподвижными при захвате дефектами или при встраивании в

поверхностную фазу [17]. Таким образом, экспериментально обнаруженное нами выравнивание амплитуд аморфного и кристаллического пиков (480 и 520 см^{-1}), обусловленное ослаблением отражения от кристаллической подложки, может быть объяснено аморфизацией поверхностного слоя монокристалла кремния из-за взаимной диффузии атомов кремния при ВО. В таком случае степень кристалличности подложки на глубине проникновения зондирующего лазерного излучения снижается, что и вызывает уменьшение соотношения I_{520}/I_{480} .

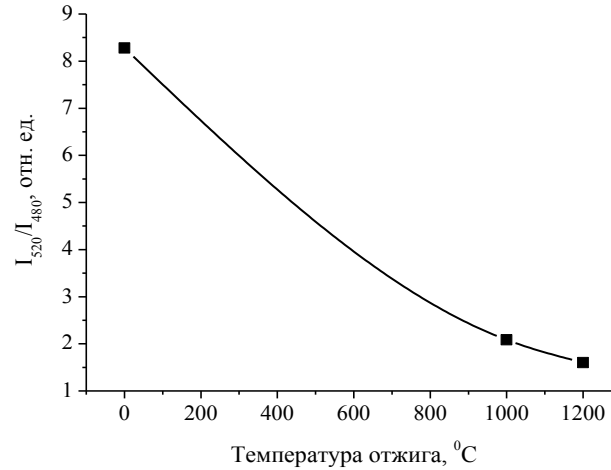


Рис. 2. Зависимость отношения интенсивностей пиков рамановского рассеивания аморфной (I_{480}) и кристаллической (I_{520}) фазы в пленках аморфного кремния на монокристаллических кремниевых подложках от температуры отжига

Тем не менее на соотношение интенсивностей I_{520}/I_{480} оказывает влияние не только изменение амплитуды пика кристаллической фазы от подложки, но и изменение интенсивности для пика в области 480 см^{-1} . Например, за счёт появления кристаллической фазы кремния в результате рекристаллизации аморфной пленки при отжиге. Изменения, произошедшие в рамановских спектрах аморфных гидрогенизированных кремниевых пленок, нанесенных на подложки из монокремния и поликремния, в процессе их отжига, представлены на рис. 3. При анализе полученных данных учитывалось, что исходные неотожженные пленки, осажденные на обоих типах подложек, являются аморфными и гидрогенизированными. Необходимо отметить, что пик аморфной фазы у пленок на подложках из монокремния находится на 482 см^{-1} (рис. 3 б) [18], это ближе к значениям «идеального» монокристаллического кремния (520 см^{-1}), чем у пленок на подложках из поликремния – 473 см^{-1} . Кроме того, ширина пика $470\text{--}480 \text{ см}^{-1}$, замеряемая на половине его высоты (методика WFHM), для пленок на монокремнии меньше, нежели для пленок на поликремнии (см. рис. 3 а).

В связи с этим структура пленок на монокремнии более упорядочена. То есть экспериментально обнаружено, что пленки аморфного гидрогенизированного кремния на подложках из монокристаллического кремния, полученные разложением моносилана в СВЧ плазме, имеют более плотную структуру (малые межатомные расстояния) по сравнению с теми же пленками, полученными на поликремнии. Кроме того, нами выявлено, что отжиг пленок при 1000°C характеризуется сдвигом пика аморфного кремния в область меньших волновых чисел (рис. 3 б). Это говорит о недостаточности такого значения температуры для кристаллизации в исследованных пленках, поскольку кристаллизация, напротив, должна приводить к сдвигу в сторону больших волновых чисел. Мы полагаем, что показанное на рис. 3 б смещение пика обусловлено резким снижением вклада рамановского рассеяния от коротких связей водород-кремний из-за реконструкции структуры пленки в результате эффузии водорода [19], причем без сегрегации избыточного кремния. Это объясняется тем, что водород в кремнии при температурах ниже 350°C находится в связанном состоянии, насыщая оборванные связи [20], а при температурах выше 350°C происходит эффузия водорода из пленок с последующим образованием оборванных связей [8, 21]. То есть короткие связи водород-кремний – разупорядочивающий фактор. Следовательно, эффузия водорода должна приводить к упорядочиванию структуры пленки.

дочиванию материала. В нашем случае такое упорядочивание находит экспериментальное подтверждение, поскольку четко прослеживается сужение ширины пика аморфного кремния (рис. 3 а) после отжига.

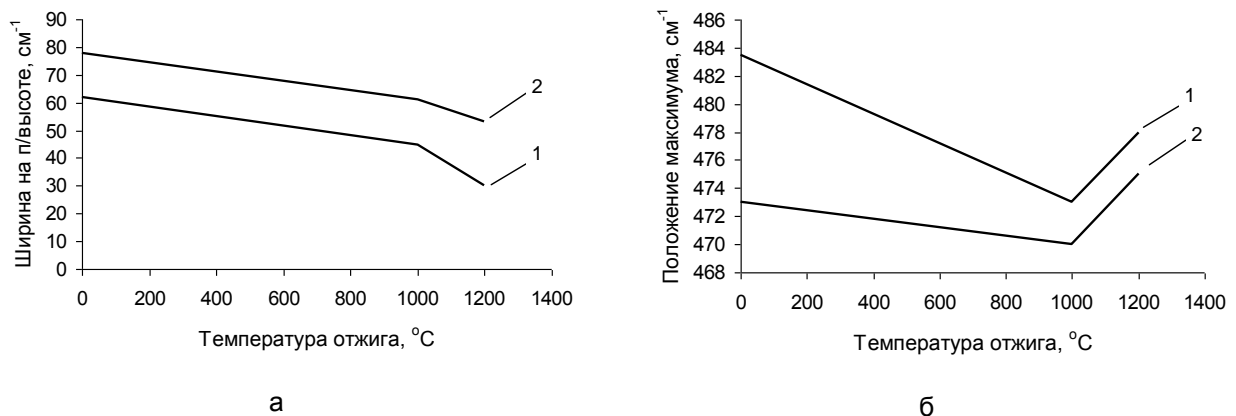


Рис. 3. Зависимости ширины пика на половине высоты в области 480 см^{-1} (а) и положения максимума (б) от температуры отжига: 1 – образцы на монокремнии, 2 – на поликремне. Мощность возбуждающего лазерного излучения составляла $0,35 \text{ мВт}$

Дальнейший отжиг полученных нами пленок при еще большей температуре (1200°C) привел к обратному смещению пиков аморфного кремния в область больших волновых чисел. Это характеризует начало этапа кристаллизации материала, несмотря на то, что нам не удалось обнаружить серии выраженных рамановских пиков в диапазоне $500\text{-}520 \text{ см}^{-1}$, которые однозначно характеризуют появление наноразмерного кристаллического кремния в значительном количестве. При исследовании отожженных тонких аморфных пленок это объясняется [22] большим разбросом величин получившихся нанокристаллитов и существенным вкладом в рамановский спектр рассеивания от аморфной оболочкой [15, 23], которой покрыт нанокристаллит.

Выводы. В результате проведенных исследований показано, что пленки аморфного гидрогенизированного кремния, полученные в СВЧ плазме из моносилана на подложках из монокристаллического кремния, имеют более плотную структуру по сравнению с теми же пленками, полученными на поликремне. Высокотемпературный отжиг в вакууме приводит к реконструкции пленки аморфного гидрогенизированного кремния на начальной стадии в результате эффузии водорода, а при температуре 1200°C за счет кристаллизации избыточного кремния. Полученные в результате отжига кристаллиты характеризуются значительным разбросом величин.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере, программа «У.М.Н.И.К.».

ЛИТЕРАТУРА

1. Canham L.T. Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafers / L.T. Canham // Appl. Phys. Lett. v. 57. 1990. P. 1046-1048.
2. Ruan J. Stimulated emission in nanocrystalline silicon superlattices / J. Ruan, P.M. Fauchet, L. Dal Negro, M. Cazzanelli, L. Pavesi // Appl. Phys. Lett. v. 83. 2003. N 26. P. 5479-5481.
3. Huang S. Quantum confinement energy in nanocrystalline silicon dots from high-frequency conductance measurement / S. Huang, S. Banerjee, R.T. Tung, S. Oda // J. Appl. Phys. v. 94 2003. N 11. P. 7261-7265.
4. Green M.A. Third generation photovoltaics / M.A. Green. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006. 160 p.
5. Zacharias M. Size-controlled highly luminescent silicon nanocrystals: SiO/SiO₂ superlattice approach / M. Zacharias et al. // Appl. Phys. Lett. v. 80. 2002. P. 661-663.

6. Takagi H. Quantum size effects on photoluminescence in ultrathin Si particles / H. Takagi, H. Ogawa, Y. Yanazaki, A. Lsnizaki, and T. Nakagiri // *Appl. Phys. Lett.* v.56. 1990. P. 2379-2380.
7. Джоунопулос Дж. Физика гидрогенизированного аморфного кремния. Вып. 1. Физические свойства, методы получения и применение / под ред. Дж. Джоунопулоса, Дж. Люковски; пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 453 с.
8. Бродски М. Аморфные полупроводники / под ред. М. Бродски; пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 419 с.
9. Нефедов Д.В. Получение и исследование свойств наноразмерных пленочных структур на основе аморфного кремния и его соединений: дис... канд. техн. наук / Д.В. Нефедов. – Саратов, 2008. – 140 с.
10. Влияние режима синтеза в неравновесной плазме СВЧ газового разряда на фундаментальные свойства наноразмерного пленочного кремния и его соединений / Д.В. Нефедов [и др.] // *Вестник СГТУ.* – 2007. – №4 (29). – Вып. 2. – С. 121-128.
11. Нефедов Д.В. Исследование влияния режимов получения пленок аморфного кремния на оптическую ширину запрещенной зоны / Д.В. Нефедов, А.А. Сердобинцев // *Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы: труды IX Междунар. конф.* / УлГУ. – Ульяновск, 2007. – С. 216.
12. Richter H. The one phonon Raman spectrum in microcrystalline silicon / H. Richter, Z.P. Wang, L. Ley // *Sol. Stat. Comm.* v. 39. 1981. P. 625-629.
13. Campbel H. The effect of microcrystal size and shape on the one phonon Raman spectra of crystalline semiconductors / H. Campbel, P. M. Fauchet // *Solid State Comm.* v. 58. 1986. P. 739-743.
14. Wu X. L. Raman scattering of alternating nanocrystalline silicon/amorphous silicon multilayers / X. L. Wu, G. G. Siu, S. Tong // *Appl. Phys. Lett.* V.69. 1996. N 4. P. 523-525.
15. Hernández S. Silicon nanocluster crystallization in SiO_x films studied by Raman scattering / S. Hernández, A. Martínez, P. Pellegrino // *J. Appl. Phys.* 104, 044304 (2008).
16. Бургер Р. Основы технологии кремниевых интегральных схем. Окисление, диффузия, эпитаксия / под ред. Р. Бургера и Р. Донована; пер. с англ. – М.: Мир, 1969. – 452 с.
17. Введение в физику поверхности / К. Оура [и др.]. – М.: Наука, 2006. – 490 с.
18. Нефедов Д.В. Особенности кристаллизации аморфных пленок кремния, подвергнутых высокотемпературному отжигу / Д.В. Нефедов, А.А. Сердобинцев, А.В. Маркин // *Вторая школа молодых ученых по физике наноструктурированных и кристаллических материалов: конспекты лекций и тезисы докладов* / ННГУ им. Н.И. Лобачевского. – Н.Новгород, 2011. – С. 118-119.
19. Качурин Г.А. О формировании нанокристаллитов кремния при отжиге слоев SiO₂, имплантированных ионами Si / Г.А. Качурин, С.Г. Яновская, В.А. Володин // *Физика и техника полупроводников.* Т. 36. 2002. – Вып. 6. – С. 685-689.
20. Тыщенко И.Е. Особенности фотолюминесценции в структурах кремний-на изоляторе, имплантированных ионами водорода / И.Е. Тыщенко, К.С. Журавлев, А.Б. Талочкин, В.П. Попов // *Физика и техника полупроводников.* Т. 40. 2006. – Вып. 4. – С. 426-432.
21. Денисов В.Н. Рамановское рассеяние в гидрогенизированных аморфных кремниевых пленках / В.Н. Денисов [и др.] // *Журнал прикладной спектроскопии.* Т. 55. – 1991. – №4. – С. 640-644.
22. Казанский А.Г. Особенности фотоэлектрических и оптических свойств пленок аморфного гидрогенизированного кремния, полученных плазмохимическим осаждением из смеси моносилана с водородом / А.Г. Казанский [и др.] // *Физика и техника полупроводников.* Т. 45. 2011. – Вып. 4. – С. 518-523.

23. Debajyoti D. Photoluminescent silicon quantum dots in core/shell configuration: synthesis by low temperature and spontaneous plasma processing / D. Debajyoti and S. Arup // Nanotechnology 22 (2011) 055601 (9pp).

Маркин Алексей Викторович – инженер лаборатории Наноструктур и микрокапсул Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского

Aleksey V. Markin – Engineer
Laboratory of Nanostructures and Microcapsules, Chernyshevsky Saratov State University

Нефедов Денис Владимирович – кандидат технических наук, исполнитель НИР ООО «НП «ТЭСО», г. Саратов

Denis V. Nefedov – Ph. D., Performer of Research Company «TESO», Saratov

Сердобинцев Алексей Александрович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Материаловедение, технология и управление качеством» Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского

Aleksey A. Serdobintsev – Ph. D., Associate Professor
Department of Science of Materials, Technology and Management of Quality, Chernyshevsky Saratov State University

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

Sergey Yu. Suzdaltsev – Ph. D., Associate Professor
Department of Automated Electrical-Technological Plants and Systems, Gagarin Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 14.05.12, принята к опубликованию 13.06.12

УДК 621.3.029.6; 616.089.843

И.П. Мельникова, А.В. Лясникова, В.Н. Лясников

ТЕХНОЛОГИЯ ДВОЙНОГО ПРИМЕНЕНИЯ: ПОВЫШЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В СВЧ-ТЕХНИКЕ И ИМПЛАНТОЛОГИИ

Показано, что для изготовления из листовых материалов изделий различного назначения, обладающих антиэмиссионными свойствами и биосовместимостью, возможно применение единой технологии выбора режима отжига. Предложена методика отработки температуры отжига и критерии оценки структуры и свойств листовых материалов для изготовления сеток электронных приборов и медицинских имплантатов.

Сетки электронных пушек, имплантаты, гафний, внутренние напряжения, структурная устойчивость, рентгенограммы по Лауэ, метод Эриксона

I.P. Melnikova, A.V. Lyasnikova, V.N. Lyasnikov

DUAL-USE TECHNOLOGY: INCREASES FUNCTIONAL CHARACTERISTICS OF SHEET MATERIALS USED IN MICROWAVE TECHNOLOGY AND IMPLANTOLOGY

It is shown that for the manufacture of sheet metal products for various purposes, with anti-emission properties and biocompatibility may use a single technology of selection annealing conditions. We offer the technique of working out the annealing temperature and the criteria for assessing the structure and properties sheet materials for the manufacture of electronic devices and medical implants.

Grid of cathode-grid units, implants, hafnium, internal stresses, structural stability, X-ray by Laue, Ericksen method

При разработке СВЧ приборов с сеточным управлением повышенной выходной мощности одной из сложных задач является выбор материала для изготовления теневого и управляющей сеток. Катоды таких приборов имеют высокую рабочую температуру (~1100 °С ярк.), высокую скорость испарения активного вещества, значительное газоотделение из материалов катода и интенсивный перенос активного вещества с катода на теньевую и управляющую сетки. В результате изменений физико-механических свойств материала сеток в процессе срока службы и их тепловых деформаций пушка теряет управление по сеткам [1-3]. Известно, что для изготовления сеток электродов применяют титан, цирконий [4] и гафний [3,5]. Все эти материалы обладают хорошими антиэмиссионными свойствами и должны обладать формоустойчивостью при работе катодов электронных пушек.

Биоинертные материалы широко применяются для изготовления имплантатов различного назначения, так как они вызывают слабое или клинически невыраженное раздражение прилежащих к имплантату тканей и их заживление происходит обычным способом [6,7]. К биоинертным металлическим материалам относятся титан, цирконий, тантал. Тантал отличается наилучшими характеристиками коррозионной стойкости и биосовместимости благодаря свойствам поверхностной пленки оксида Ta_2O_5 и несмотря на его высокую стоимость, он активно применяется для изготовления нейрохирургических и других видов имплантатов, требующих высоких показателей биосовместимости при невысоких механических свойствах. Танталовая пряжа служит для замещения мышечной ткани, танталовыми скрепками соединяют кровеносные сосуды во время хирургических операций, нити из этого материала используют для замены сухожилий и даже нервных волокон. Достаточная прочность тантала (35 кг/мм^2) и высокая твердость (HV 140) сочетаются со значительным относительным удлинением ($\delta \sim 28\%$).

Тантал, цирконий и их аналог гафний хорошо поддаются механической обработке, легко штампуются, прокатываются в тончайшие листы и через фильеры вытягиваются в нити. При разработке технологий подготовки этих материалов к изготовлению изделий следует учитывать, что они имеют высокую рыночную стоимость [3,7].

Деформированные (в состоянии поставки) листы при обработке давлением для придания изделиям необходимой формы проявляют упругие свойства и отпружинивают. Более того, при работе сеток электронных пушек внутренние напряжения могут привести к поводкам и нарушению геометрических размеров конструкции. Для повышения надежности материала при изготовлении изделия и его эксплуатации он должен обладать структурной устойчивостью, что может быть достигнуто правильно проведенной термической обработкой.

Исследование структуры, механических и технологических свойств металлических листовых материалов проведено на примере гафния. Гафний является аналогом тантала, также отжигается в вакууме не ниже $6,65 \times 10^{-3}$ Па. Таким образом, целью настоящей работы явился выбор на примере гафния критериев оценки оптимального режима отжига листовых коррозионностойких металлических материалов, применяемых в электронной технике и медицине.

Хорошее сочетание прочности, пластичности и формоустойчивости деформированным танталу, цирконию, гафнию придает отжиг на структуру первичной рекристаллизации. При такой обработке структура материала мелкозернистая, равномерная с малоугловыми границами зерен.

Как показали многочисленные исследования, одна и та же партия материала может содержать неоднородные по структуре листы, которые имеют разную температуру первич-

ной рекристаллизации. Поэтому применение единой, однажды установленной температуры отжига к любому листу при изготовлении изделий электронной техники и медицинских имплантатов может привести к нежелательным последствиям. В процессе их изготовления может попасть недоотоженный материал с внутренними напряжениями или пережженный материал с пониженными значениями прочности и пластичности.

В ходе исследований фольга испытывалась на растяжение по ГОСТ 11701-66, при рабочей длине образца 60×10^{-3} м, расчетной длине 40×10^{-3} м, скорости передвижения подвижного захвата разрывной машины 10 мм/мин и на выдавливание сферической лунки по методу Эриксона (ГОСТ 10510-80) пуансоном диаметром 8×10^{-3} м.

Структура фольги исследовалась трудоемким металлографическим методом с применением электротравления в сложных электролитах на основе плавиковой и уксусной кислот. Трудности металлографического анализа заключаются в выявлении структуры материала в шлифах с применением химических реактивов, так как рассматриваемые материалы относятся к коррозионностойким и практически не поддаются травлению.

Применение электротравления образцов, залитых в эпоксидную смолу с выводом медного электрода, кроме трудоемкости процесса, характеризовалось близостью режимов травления и электрополировки, что также затрудняло процесс выявления структуры листа.

Поэтому в основном структуру листовых образцов в исходном и деформированном состояниях изучали рентгеноструктурным методом путем съемки лауэграмм в $\text{CuK}\alpha$ излучении. Для анализа структуры гафния после отжига при различных значениях вакуума применяли рентгеноструктурный анализ дифрактограмм.

В процессе работы были исследованы два листа гафния, толщиной 0,1 мм в состоянии поставки и отожженном в вакууме не хуже $6,65 \times 10^{-3}$ Па.

Механические и технологические свойства листов гафния толщиной 0,1 мм из одной партии в исходном и отожженном состоянии приведены в табл. 1.

Таблица 1
Свойства листов гафния (№1 и №2) толщиной 0,1 мм

Состояние и свойства материала		Без отжига (деформированное состояние)		Режим отжига в вакууме не хуже $6,65 \times 10^{-3}$ Па			
				950 ⁰ С 60 мин		1100 ⁰ С 60 мин	
		№1	№2	№1	№2	№1	№2
Механические свойства	Предел прочности $\sigma_{в}$, кг/мм ²	72,9	78,6	43,8	50,3	37,7	47,9
	Относительное удлинение, δ , %	2,7	2,1	9,7	16,0	10,0	22,9
Технологиче- ские свойства	Глубина вытяжки, $h_{\varphi 8 \text{ мм}}$, мм	0,90	0,57	1,81	2,24	1,25	2,79
	Твердость, HV	280	-	195	-	200	-

Из табл. 1 видно, что листы №1 и №2 отличаются, как по сочетанию прочности и пластичности, так и по влиянию температуры на их механические и технологические свойства.

Температура отжига для изготовления изделий из этих листов с применением деформирования, например вытяжкой, для придания им необходимой формы, у листа №1 должна быть 950⁰ С, а у листа №2 – 1100⁰ С.

Как показано выше, выбор режима отжига целесообразно выполнять, используя контроль структуры образцов в исходном (деформированном) состоянии и после контрольных отжигов при температурах, в данном случае, для гафния при 950, 1100 и 1200 °С в течение 60 минут рентгеноструктурным методом по Лауэ (съемкой эпиграмм) от листового образца размером 20×20 мм. На рис. 1 приведены эпиграммы от листа №1, из которых легко определяется необходимая температура отжига. Эпиграмма деформированного материала представляет собой размытые сплошные линии. После первичной рекристаллизации при 950 °С эпиграмма состоит из тонких колец, покрытых мелкими рефлексами от многочисленных мелких зерен.

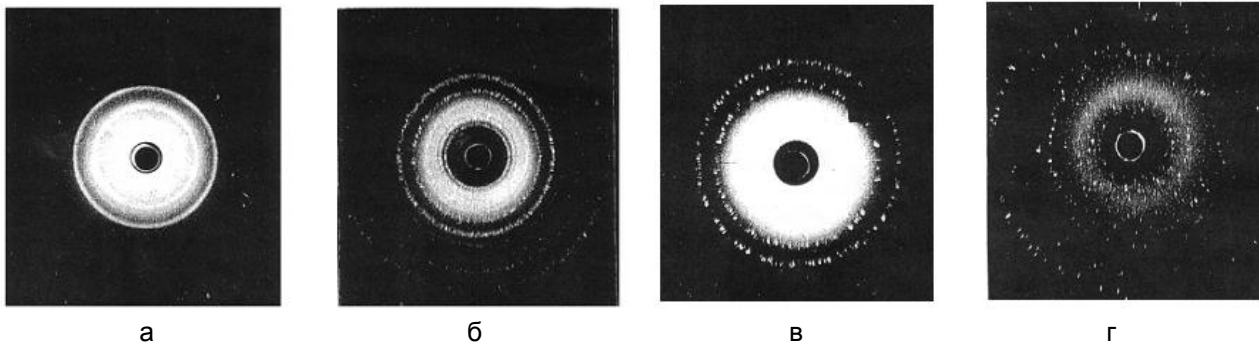


Рис. 1. Структура образцов гафния: а – в деформированном состоянии; б – после отжига при 950 °С; в – после отжига при 1100 °С; г – после отжига при 1200 °С

С повышением температуры до 1100 °С рефлексы становятся реже и крупнее, что соответствует укрупнению зерна. Отжиг при температуре 1200 °С приводит к собирательной рекристаллизации, зерно листа становится более 50 мкм, что соответственно приведет к падению прочности и пластичности материала.

На рис. 2а приведена структура теневой сетки из гафния после электроотравления с величиной зерна ~12÷15 мкм (увеличение 440[×]), а на рис. 2б структура пережженного материала хирургической скрепки с величиной зерна 70÷100 мкм (увеличение 120[×]).

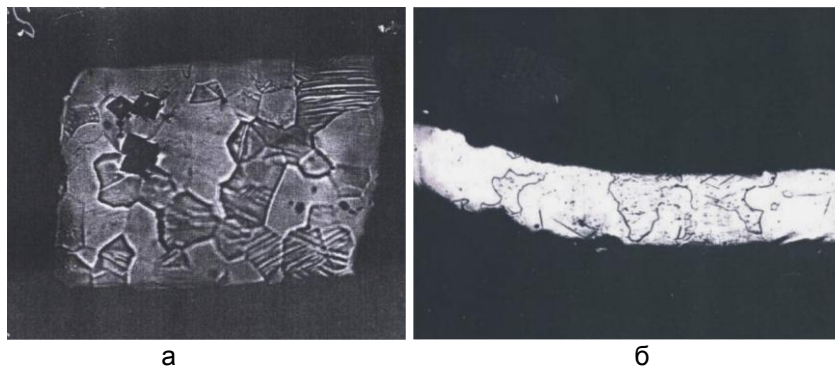


Рис. 2. Микроструктура образцов из гафния толщиной 0,1 мм
а – после отжига при 950 °С ($D_3 \sim 15$ мкм), 440[×]; б – после отжига при 1200 °С ($D_3 \sim 100$ мкм), 120[×]

В результате рентгеноструктурного анализа установлено, что в исходных (деформированных) образцах гафния после отжига в вакууме $6,65 \times 10^{-3}$ Па образуется карбид гафния (табл. 2). Для повышения вакуума в области отжигаемого материала можно плотно завернуть прилегающие друг к другу образцы в предварительно отожженную фольгу из тантала. Эта фольга толщиной 20-50 мкм отжигается в вакууме не хуже $6,65 \times 10^{-3}$ Па при температуре 1200 °С в течение 30 минут. Фольга плотно облегает детали, поглощает остаточные газы печи. Как видно из табл. 2, после такого отжига вакуум в зоне деталей повышается, и линии карбида гафния практически исчезают.

Рентгеноструктурный анализ влияния вакуума при отжиге на фазовый состав гафния

Марка материала	Толщина образца $h \times 10^{-3}$, м	Режим отжига	$6,65 \times 10^{-3}$ Па		$6,65 \times 10^{-4} - 1,33 \times 10^{-4}$ Па	
			Межплоскостные расстояния, $d, \text{Å}$	Фазовый состав	Межплоскостные расстояния, $d, \text{Å}$	Фазовый состав
ГФИ-1	0,3	950 ⁰ С 30 мин	2,81	Hf	2,81	Hf
			2,77		2,76	
2,54	2,53					
2,43	2,43					
1,87	1,86					
1,60	1,60					
1,44	1,44					
1,35	1,35					
1,27	1,27					
1,15	1,15					
			2,67	HfC	2,67	HfC
			2,32			
			1,64			
			1,39			
			1,36			

Выводы

1. При изготовлении сеток электродов электронных приборов СВЧ из листовых материалов (тантала, циркония, гафния) целесообразно использовать предварительно отожженный материал. При этом следует подбирать температуру отжига для каждого листа из партии материала, что является основным критерием подготовки его структуры. Материал для медицинских имплантатов следует подготавливать аналогичным образом.

2. Целесообразно при выборе режима отжига материала использовать испытания его в деформированном состоянии и после контрольных отжигов на вытяжку сферической лунки по Эриксену и использовать контроль структуры этих же образцов рентгеноструктурным анализом по методу Лауэ.

3. Отжиг в вакууме сеток электродов электровакуумных приборов и заготовок имплантатов целесообразно выполнять, используя физическую защиту поверхности этих деталей путем их уплотнения и обертки в предварительно тщательно отожженную танталовую фольгу.

Работа ведется в рамках выполнения государственных заданий вузам в части проведения научно-исследовательских работ на 2012 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Vorozheikin V.G., Kozlov V.U. // Fourth JEEE International Vacuum Electron Sources Conferences. – Saratov, Russia, July 15-19, 2002. – P. 330.

2. Катодно-сеточные узлы для приборов с низковольтным управлением / Ж.Н. Бабанов [и др.] // Электронные приборы и устройства СВЧ: материалы науч.-техн. конф., посвящ. 50-летию ФГУП «НПП «Алмаз». – Саратов: СГУ, 2007. – С. 140-146.

3. Мельникова И.П. Исследование физических причин, ограничивающих долговечность и эмиссионную способность катодных и катодно-сеточных узлов, и возможность

улучшения этих параметров в электровакуумных приборах СВЧ: дис. ... канд. физ.-мат. наук / И.П. Мельникова. – Саратов: СГТУ, 1997. – 246 с.

4. Пат. № 4096406, США, МКИ НОJ 1/46

5. Григорьев Ю.А. Электронно-оптические системы с сеточным управлением / Ю.А. Григорьев, Б.С. Правдин, В.И. Шестеркин // Обзоры по электронной технике. Электроника СВЧ. Сер. 1: Моск. обл., г. Фрязино. – 1987. – Вып. №7(1264).

6. Лясникова А.В. Биосовместимые материалы и покрытия нового поколения: особенности получения, наноструктурирование, исследование свойств, перспективы клинического применения / А.В. Лясникова, Т.Г. Дмитриенко. – Саратов: Научная книга, 2011. – 220 с.

7. Лясников В.Н. Материалы и покрытия в медицинской практике / В.Н. Лясников, А.В. Лясникова, Т.Г. Дмитриенко. – Саратов: Научная книга, 2011. – 300 с.

Мельникова Ираида Прокопьевна –

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Биотехнические и медицинские аппараты и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Iraida P. Melnikova –

Ph. D., Associate Professor
Department of Biotechnical and Medical Devices and Systems,
Gagarin Saratov State Technical University

Лясникова Александра Владимировна –

доктор технических наук, заведующая кафедрой «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 Devices and Systems,
Gagarin Saratov State Technical University

Лясников Владимир Николаевич –

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Физическое материаловедение и технология новых материалов» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Vladimir N. Lyasnikov –

Dr. Sc., Professor
Head: Department of Physical Materials and Technologies of New Materials
Gagarin Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 17.05.12, принята к опубликованию 16.06.12

УДК 681. 171. 5

И.А. Менщиков

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Представлены результаты исследования научно-технической проблемы повышения качества прогнозирования и управления электромеханическими системами обеспечения безопасности движения на железнодорожном транспорте. Проблемы обеспечения безопасности движения предлагается решать посредством совершенствования структуры известных систем технической диагностики и разработки математических моделей прогнозирования и управления устойчивости функционирования электромеханических систем.

Электромеханическая система, устойчивость функционирования, безопасность движения

I.A. Menshikov

THE MODEL MATHEMATICAL OF STABILITY FUNCTIONING OF THE ELECTRO MECHANICS SYSTEMS

Results of research of scientific and technical problem of upgrading of prognostication and management by the electro mechanics systems of providing of safety of motion on a railway transport is presented. The problems of providing of safety of motion it is suggested to work out by means of perfection of structure of the known systems of technical diagnostics and development of mathematical models of prognostication and management of stability of functioning electro mechanics.

Electromechanical system, stability of functioning, traffic safety

Процесс функционирования электромеханических систем обеспечения безопасности движения на железнодорожном транспорте (ЭМСОБД) относится, как правило, к числу локально-стационарных процессов. Свойства ЭМСОБД изменяются со временем и контролируемые параметры процесса остаются постоянными лишь на конечных временных интервалах, поэтому алгоритмы идентификации должны отслеживать эти изменения, что является важной причиной использования методов рекуррентной идентификации в модели управления и прогнозирования устойчивости функционирования ЭМСОБД (рис. 1).

Переходный процесс пуска электропривода можно описать векторным дифференциальным уравнением в форме Ланжевена с аддитивным белым шумом, запись которого в непрерывном виде имеет вид

$$W^* = f(\cos \varphi, n, T_M, T_{\text{я}}, \nu, P)t \int \xi(t), \quad (1)$$

где W^* – полная производная вектора качества переходного процесса пуска электропривода во времени t ; f – векторная функция векторных аргументов $(\cos \varphi, n, T_M, T_{\text{я}}, \nu)$ и скалярная аргумента времени t ; $\xi(t)$ – q -мерный случайный процесс белого шума с нулевым математическим ожиданием [1].

Решение задачи прогнозирования и управления процессом пуска электропривода при ее теоретической постановке в форме (1) состоит в поиске ряда классов функции f математических моделей, ее реализующих, позволяющих осуществить решение задач обеспечения безопасности движения поездов, повышения показателей надежности и работоспособности ЭМСОБД.

Линейная модель изменения параметров контроля ЭМСОБД представляет собой суперпозицию массивов полиномов нулевого $W_0(t) = 1$ и первого $W_0(t) = t - t_0$ – порядков, взятых с весами W_0 и b , соответственно. Она имеет вид

$$W(t) = W_0 + b(t - t_0), \quad (2)$$

или, подставляя значения (1) в (2), получим систему уравнений:

$$W(t) = \begin{cases} n(t) = n_0 + b(t - t_0) \\ \cos \varphi(t) = \cos \varphi_0 + b(t - t_0) \\ T_M(t) = T_{M0} + b(t - t_0) \\ T_{\text{я}}(t) = T_{\text{я}0} + b(t - t_0) \\ \nu(t) = \nu_0 + b(t - t_0) \\ P(t) = P_0 + b(t - t_0) \end{cases} . \quad (3)$$

Коэффициенты модели W_0 и b характеризуют изменение параметров контроля в момент времени $t - t_0$ и изменение неизвестных коэффициентов регрессии b полинома $W(t)$, соответственно.

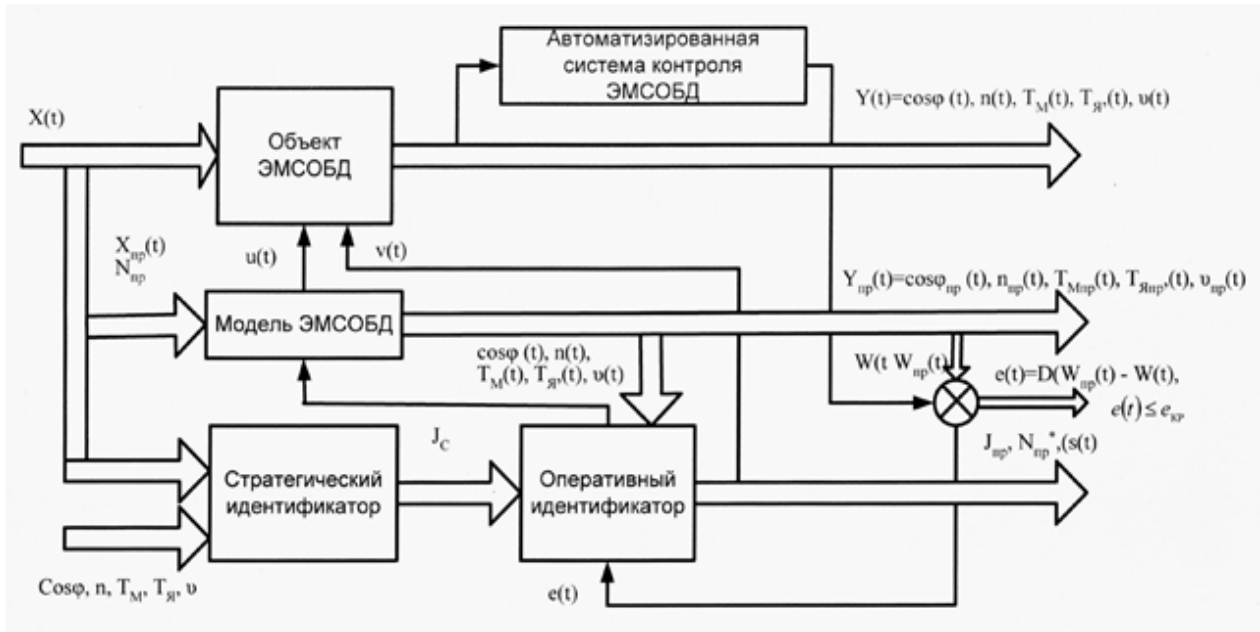


Рис. 1. Функциональная схема модели управления и прогнозирования устойчивости электромеханических систем

Оценки коэффициентов идентификационной теоретической модели вычисляются по экспериментальным результатам наблюдений, представленных последовательностью значений изменения параметров в дискретные моменты времени. Их оптимальные значения определяются условиями минимума квадратичного функционала, представляющего собой сумму квадратов отклонений результатов наблюдений от принятой теоретической модели:

$$F = \sum_{i=1}^n \left[v_i - w_0 - b(t - t_0) \right]^2 \tag{4}$$

Подставляя в (4) значения (3), получим

$$F = \begin{cases} \sum_{i=1}^n [n_i - n_0 - b(t - t_0)]^2 \\ \sum_{i=1}^n [\cos \varphi_i - \cos \varphi_0 - b(t - t_0)]^2 \\ \sum_{i=1}^n [T_{Mi} - T_{M0} - b(t - t_0)]^2 \\ \sum_{i=1}^n [T_{Яi} - T_{Я0} - b(t - t_0)]^2 \\ \sum_{i=1}^n [v_i - v_0 - b(t - t_0)]^2 \\ \sum_{i=1}^n [P_i - P_0 - b(t - t_0)]^2 \end{cases} \tag{5}$$

Условия равенства нулю производных $\frac{\partial U}{\partial W} = 0, \frac{\partial U}{\partial b} = 0$ приводят к системе линейных алгебраических уравнений для вычисления коэффициентов модели:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n [W_i - W_0^{(n)} - b(t - t_0^{(n)})] = 0 \\ \sum_{i=1}^n [W_i - W_0^{(n)} - b(t - t_0^{(n)})] = (t_i - t_0^{(n)}) \end{cases} \tag{6}$$

В системе уравнений (6) коэффициенты модели зависят от объема выборки n . В канонической форме записи система уравнений (6) примет вид

$$\begin{cases} W_0^{(n)} \cdot n + \sum_{i=1}^n (t - t_0^{(n)}) = \sum_{i=1}^n W_i \\ W_0^{(n)} \sum_{i=1}^n (t_i - t_0^{(n)}) + b^n (t - t_0^{(n)})^2 = \sum_{i=1}^n W_i (t_i - t_0^{(n)}) \end{cases} \quad (7)$$

Для центрирования аргумента перенесем начало отсчета времени $t_0^{(n)}$ в центр выборки. Перенос начало отсчета в центр выборки обращает в ноль второй член первого уравнения и первый второго каждого параметра $\sum_{i=1}^n (t - t_0^{(n)}) = 0$.

Матрица системы уравнений получает диагональный вид, и система распадается на два независимых уравнения для вычислений искомых коэффициентов линейной модели:

$$\begin{cases} W_0^{(n)} = \frac{\sum_{i=1}^n W_i}{n} \\ b^{(n)} = \frac{\sum_{i=1}^n W_i (t_i - t_0^{(n)})}{(t_i - t_0^{(n)})^2} \end{cases} \quad (8)$$

Абсцисса центра выборки является средним значением выборки отсчетов времени:

$$t_0^{(n)} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n}$$

С учетом условий ортогональности система уравнений (6) может быть представлена в виде

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n (W_i - W_0^{(n)}) = 0 \\ \sum_{i=1}^n [W_i - W_0^{(n)} - b(t - t_0^{(n)})] \cdot (t - t_0^{(n)}) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

Левую часть первого уравнения (9) разложим в ряд Тейлора:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n (W_i - W_0^{(n)}) - (W_0^{(n)} - W_0^{(n-1)}) \cdot n = 0 \\ \sum_{i=1}^n [W_i - W_0^{(n)} - b(t - t_0^{(n)})] \cdot (t - t_0^{(n)}) = 0 \end{cases}$$

Решив систему уравнений относительно $W_0^n = W_0^{n-1}$ и выполнив преобразования, получим систему уравнений в рекуррентном виде:

$$W_0^n = W_0^{n-1} + \frac{\sum_{i=1}^n (W_i - W_0^{(n-1)})}{n}, \quad (10)$$

где $\sum_{i=1}^n (W_i - W_0^{(n-1)}) = \sum_{i=1}^{n-1} (W_i - W_0^{(n-1)}) + W_n - W_0^{(n-1)}$,

Правая часть $\sum_{i=1}^{n-1} (W_i - W_0^{(n-1)}) = 0$, т.к. является средним значением для выборки объемом $(n-1)$ отсчетов выбранных контролируемых параметров переходного процесса пуска электропривода.

В результате преобразования (10) получаем рекуррентное соотношение, удобное для вычисления неизвестного коэффициента:

$$W_0^n = W_0^{(n-1)} + \frac{W_n - W_0^{(n-1)}}{n}. \quad (11)$$

Левую часть второго уравнения системы (9) разложим в ряд Тейлора при условии $W_0^n = W_0^{(n-1)}$, $b^n = b^{(n-1)}$:

$$\sum [W_i - W_0^{(n-1)} - b^{(n-1)}(t_i - t_0^n)] \cdot (t_i - t_0^n) - (b^n - b^{(n-1)}) \sum_{i=1}^n (t_i - t_0^n)^2 = 0.$$

Решая уравнение относительно искомой величины b^n , получаем рекуррентное соотношение

$$b^n = \frac{b^{(n-1)} + \sum_{i=1}^n (W_i - W_0^{(n-1)} - b^{(n-1)}(t_i - t_0^n))(t_i - t_0^n)}{\sum_{i=1}^n (t_i - t_0^n)^2}. \quad (12)$$

После преобразований соотношение (12) приобретает удобный вид для вычисления искомой величины:

$$b^n = \frac{b^{(n-1)} + (W_n - W_0^{(n-1)} - b^{(n-1)}(t_n - t_0^{(n-1)})) \cdot (t_i - t_0^n)}{\sum_{i=1}^n (t_i - t_0^n)^2}. \quad (13)$$

Прогнозирование устойчивости функционирования ЭМСОБД заключается в вычислении новых значений коэффициентов W_0^n и b^n объемом n отсчетов и поправочного коэффициента, который определяется разностью между вновь поступившим отсчетом и прогнозируемым значением, вычисленным по значениям коэффициентов модели на предыдущем шаге вычислений. В случае их совпадения поправка равна нулю и оценка сохраняет свое прежнее значение.

Прогноз момента нарушения устойчивости функционирования ЭМСОБД или времени технического обслуживания можно получить из соотношения

$$t_{ог} = t_0 + \frac{W_p - W_0^n}{b^n}, \quad (14)$$

где W_p – расчетные значения коэффициентов регрессии выбранных параметров контроля:

$$W_p = \begin{cases} n_p = 2399 - 760 \cdot I \\ \cos \varphi_p = 2,373 - 1,013 \cdot I \\ T_p = 0,35 - 7,2 \cdot 10^{-3} \cdot I \\ T_T = 0,147 - 0,064 \cdot I \\ v_p = 251,714 - 110,4 \cdot I \\ P_p = 2,373 - 1,013 \cdot I \end{cases}.$$

Применение данной модели позволит прогнозировать динамику изменения параметров контроля в течение длительного времени, что снижает влияние случайных факторов на устойчивость функционирования ЭМСОБД и повышает безопасность движения поездов, при этом повышаются показатели надежности и улучшаются условия труда [2].

Анализируя полученные протекания процесса моделирования устойчивости функционирования ЭМСОБД (рис. 2) можно сделать важные заключения о техническом состоянии ЭМСОБД и установлении соответствия между состоянием наблюдаемых параметров контроля $W_n(t)$ и состоянием прогнозируемых параметров $W_0^n(t)$.

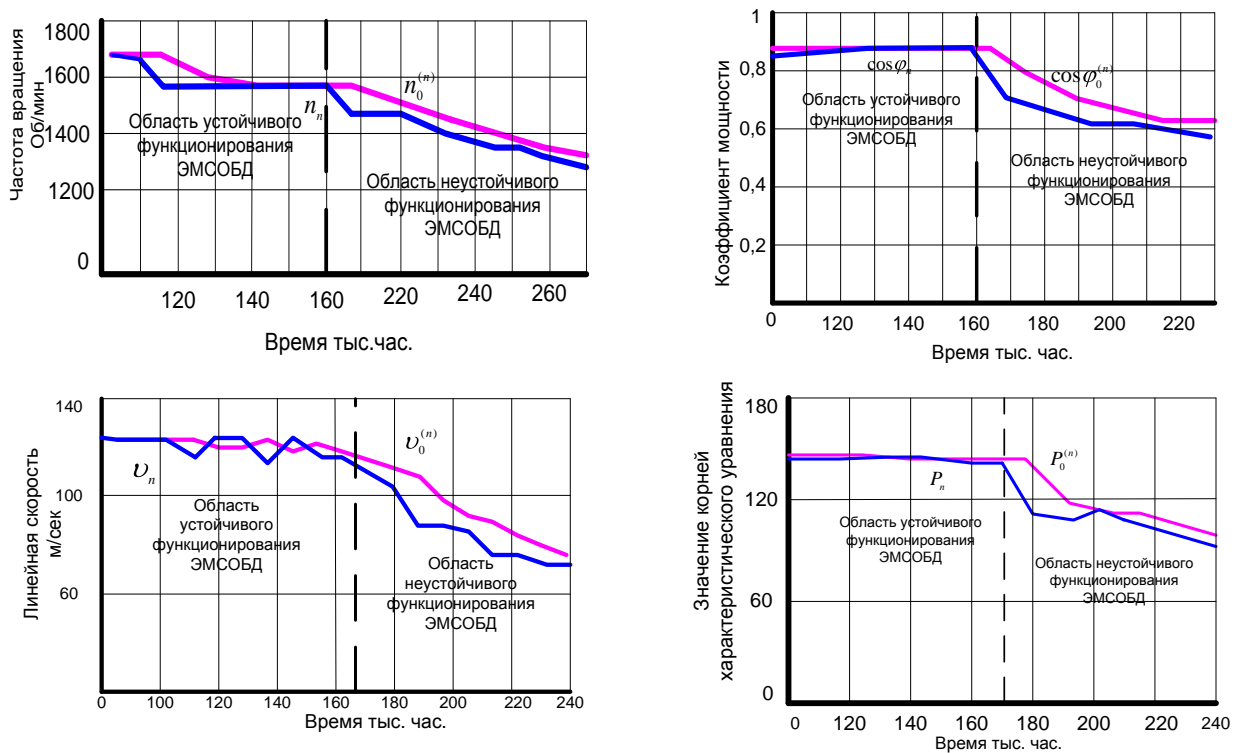


Рис. 2. Графики изменения значений параметров контроля по выборочным данным

Среднее значение совокупности выборок \bar{W} определяют по формуле

$$\bar{W}_y = \frac{\sum_{i=1}^n W_y(t)}{n_y}, \quad \bar{W}_n = \frac{\sum_{i=1}^n W_n(t)}{n_n}. \tag{15}$$

Среднеквадратичное отклонение каждой из выборок

$$S_y^2 = \frac{1}{n_y - 1} \cdot \sum_{i=1}^n (W_y(t) - \bar{W}_y)^2, \quad S_n^2 = \frac{1}{n_n - 1} \cdot \sum_{i=1}^n (W_n(t) - \bar{W}_n)^2. \tag{16}$$

Оценить значения параметров контроля можно с помощью критерия Стьюдента

$$|t| = \frac{|\bar{W}_y - \bar{W}_n|}{\sqrt{\frac{(n_y - 1) \cdot S_y^2 + (n_n - 1) \cdot S_n^2}{n_y + n_n - 2} \cdot \left(\frac{1}{n_y} + \frac{1}{n_n}\right)}}. \tag{17}$$

Различие значений параметров контроля признаются существенными (неслучайными), если

$$|t| \geq t_c(P_d),$$

где $t_c(P_d)$ – коэффициент Стьюдента для числа степеней свободы $n_y + n_n - 2$ и доверительной вероятности P_d .

Для обнаружения неслучайных отклонений значений контролируемых параметров необходимо их непрерывно измерять с помощью датчиков за периоды T_y (устойчивого функционирования ЭМСОБД), и T_n (неустойчивого функционирования ЭМСОБД). Составляются совокупность n_y значений объема параметров контроля W за период, соответствующий устойчивому функционированию ЭМСОБД, и совокупность n_n значений за отрезок времени соответствующий неустойчивому функционированию ЭМСОБД.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гольдберг О.Д. Переходные процессы в электрических машинах и аппаратах и вопросы их проектирования / О.Д. Гольдберг, О.Б. Буль, И.С. Свириденко. – М.: Высш. шк., 2001. – 512 с.
2. Менщиков И.А. Автоматизация контроля технического состояния стрелочных электроприводов: дис. ... канд. техн. наук / И.А. Менщиков. – М., 2005. – 199 с.

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

Igor A. Menshikov –
Ph. D., Associate Professor
Department of Power Supply of Industrial
Enterprises,
Gagarin Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 18.05.12, принята к опубликованию 17.06.12

УДК 621.314.572

Н.П. Митяшин, Е.Е. Миргородская, М.В. Радионова, П.П. Говорухин

ДИНАМИКА МНОГОЧАСТОТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА НА ОСНОВЕ ИНВЕРТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ

Описываются математическая модель многочастотного преобразователя частоты на основе инверторов напряжения. Приводятся результаты исследования динамики преобразователя, полученные корневым методом. Модель предназначена для синтеза системы стабилизации выходного напряжения звена постоянного тока преобразователя, адаптивной по отношению к нагрузке.

Преобразователи частоты, автономные инверторы напряжения, динамическая модель, корневой годограф, электроснабжение на повышенных частотах, стабилизация выходного напряжения

N.P. Mityashin, E.E. Mirgorodskaya, M.V. Radionova, P.P. Govorukhin

DYNAMIC OF MULTIFREQUENCY CONVERTER COMPLEX ON THE BASIS OF THE VOLTAGE INVERTERS

Mathematical model of dynamic of multifrequency converter on the basis of the voltage inverters is described. Results of research, brought with the help of the root method, are represented. A model is intended for the synthesis of the system of output voltage stabilizing, adaptive in relation to loading.

Converters of frequency, system of stabilization of the output voltage, independent inverters of voltage, matrix logarithm, dynamics, electrosupply of a shop group of electric motors on the high frequency

Постановка задачи

На предприятиях подшипниковой промышленности возникает задача организации электроснабжения на нескольких повышенных частотах. Обычно используется схема электроснабжения многочастотного электропривода, в которой между сетью промышленной частоты 50 Гц и каждым двигателем включается индивидуальный преобразователь частоты.

Каждый преобразователь выполняется по схеме «управляемый выпрямитель – инвертор», т.е. с явным звеном постоянного тока.

Учитывая, что регулирование по частоте и напряжению осуществимо непосредственно в инверторе, можно предложить схему, в которой инверторы питаются от общего мощного источника постоянного напряжения (управляемого выпрямителя УВ или неуправляемого выпрямителя с управляемым импульсным преобразователем постоянного тока на выходе). Преимущества такого варианта – упрощенные схемы преобразователей, уменьшение числа систем управления и соответствующее удешевление всей системы. Такой комплекс можно назвать многочастотным преобразователем с промежуточной сетью постоянного тока (МП с ПСПТ).

В такой системе повышенным требованиям по качеству электроэнергии и надежности функционирования должна удовлетворять промежуточная сеть постоянного тока. Здесь звено постоянного тока (ЗПТ) нагружено на несколько автономных инверторов, работающих на разных частотах. Поэтому можно ожидать возникновение взаимного влияния сетей выходных частот. Таким образом, остро стоит проблема стабилизации напряжения на выходе ЗПТ, для решения которой необходимо иметь адекватные математические модели инверторов и всего комплекса в целом. Задачей настоящей статьи как раз состоит в построении таких моделей и их исследовании.

Методы решения

При построении модели МП с ПСПТ учтем, что в таком преобразователе в качестве инверторов целесообразно использовать инверторы напряжения (ИН), поскольку они обладают жесткой внешней характеристикой. Это означает, что единственным возмущающим воздействием для системы стабилизации выходного напряжения инверторов является нестабильность питающей сети частоты 50 Гц. Таким образом, достаточно заставить напряжение на выходе общего ЗПТ, что резко сокращает не только число выпрямителей, но и число систем стабилизации. При применении инверторов тока такое сокращение было бы невозможным.

При моделировании ИН можно воспользоваться методикой, разработанной в работе [1]. Однако приходится учитывать, что получаемые этим методом модели являются дискретными с периодом квантования, пропорциональным частоте каждого инвертора в отдельности. Поэтому прямое использование этих аналитических моделей при анализе и синтезе системы стабилизации напряжения преобразовательного комплекса оказывается затруднительным. В [2] описывается методика построения непрерывной динамической модели преобразователя частоты на основе ИН при управлении по каналу постоянного тока. Идея замены дискретной модели на непрерывную заключается в переходе от значений переменных состояния, фиксируемых в моменты коммутаций рабочих вентилях, к огибающим этих значений, удовлетворяющим системе дифференциальных уравнений (ДУ), матрица которой связана с матрицей дискретной модели через матричный логарифм.

Однако для исследования динамики многочастотного преобразователя необходимо модернизировать эту модель. Это связано с тем, что эта модель представляет собой ДУ для огибающих начальных значений токов нагрузки на интервалах симметрии инвертора, тогда как для моделирования МП необходимо иметь систему уравнений относительно токов, потребляемых ИН от фильтра звена постоянного тока. В силу значительной инерционности фильтра достаточно получить систему уравнений относительно средних за интервал симметрии значений входных токов инвертора. Это связано также со следующим обстоятельством.

Влияние инверторов на работу звена постоянного тока осуществляется суммарным током, потребляемым всеми ИН от конденсатора фильтра. При этом кривая входного тока каждого инвертора формируется отрезками фазных токов нагрузки, которые на любом интервале повторяют со знаком «минус» расчетную кривую тока первой фазы инвертора на первом интервале. Поэтому огибающая кривой тока, потребляемого ИН, достаточно точно аппроксимируется ступенчатой кривой, образованной средними за интервал значениями расчетного тока первой фазы, взятых со знаком «минус».

Воспользуемся общим видом дискретной модели ИН из [2]:

$$\vec{x}_{n+1} = D\vec{x}_n + \vec{d}u_n. \quad (1)$$

Напомним, что \vec{x}_n и \vec{x}_{n+1} есть начальные значение расчетного вектора $\vec{x}^*(t)$ на n -м и $n+1$ -м интервалах.

Получим аналогичную формулу, связывающую средние за интервал симметрии значения переменных состояния инвертора. Для этого запишем выражение для мгновенных значений вектора $\vec{x}^*(t)$ на n -м интервале:

$$\vec{x}^*(t) = e^{At} \vec{x}_n + \left(e^{At} - E \right) A^{-1} \vec{b} u \quad (2)$$

Здесь мы учли, что вектор \vec{x}_n есть начальное значение вектора $\vec{x}^*(t)$ на этом интервале, а входное напряжение u изменяется достаточно медленно.

Для среднего значения \vec{z}_n вектора $\vec{x}^*(t)$ на n -м интервале имеем

$$\vec{z}_n = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \vec{x}^*(t) dt.$$

Интегрируя (2), получим

$$\vec{z}_n = \frac{1}{\tau} A^{-1} \left(e^{A\tau} - E \right) \vec{x}_n + \left(\frac{1}{\tau} A^{-1} \left(e^{A\tau} - E \right) \int_0^\tau E \right) A^{-1} \vec{b} u.$$

Введем обозначения

$$W = \frac{1}{\tau} A^{-1} \left(e^{A\tau} - E \right); \quad \vec{r} = \left(e^{A\tau} - E \right) A^{-1} \vec{b}.$$

В результате получаем связь между начальным и средним значением вектора переменных состояния инвертора на n -м интервале:

$$\vec{z}_n = W\vec{x}_n + \vec{r}u. \quad (3)$$

Аналогичное соотношение справедливо и для следующего интервала:

$$\vec{z}_{n+1} = W\vec{x}_{n+1} + \vec{r}u. \quad (4)$$

Из (3)

$$\vec{x}_n = W^{-1} \left(\vec{z}_n - \vec{r}u \right).$$

Подставляя эту формулу в (1), получим

$$\vec{x}_{n+1} = DW^{-1}\vec{z}_n - DW^{-1}\vec{r}u + \vec{d}u$$

Наконец, подставив эту формулу в (4) и приведя подобные члены, находим

$$\vec{z}_{n+1} = WDW^{-1}\vec{z}_n + \left(E - WDW^{-1} \right) \vec{r} + W\vec{d}u.$$

Введя обозначения

$$Q = WDW^{-1}; \quad \vec{q} = \left(E - Q \right) \vec{r} + W\vec{d} \quad (5)$$

для средних за интервал значений вектора переменных состояния, получим соотношение, аналогичное (1)

$$\vec{z}_{n+1} = Q\vec{z}_n + \vec{q}u. \quad (6)$$

Построим теперь непрерывную модель вида

$$\dot{\vec{y}} = S\vec{y} + \vec{f}u \quad (7)$$

для дискретной модели (6), для чего воспользуемся методикой, изложенной в [2]. В результате получим

$$S = \frac{1}{\tau} \ln \left(Q \right) \approx \frac{1}{\tau} W \ln \left(Q \right) W^{-1} = W \begin{bmatrix} \frac{\pi}{3\sqrt{3}\tau} - \frac{R}{L} & \frac{2\pi}{3\sqrt{3}\tau} \\ -\frac{2\pi}{3\sqrt{3}\tau} & -\frac{\pi}{3\sqrt{3}\tau} - \frac{R}{L} \end{bmatrix} W^{-1}; \quad \vec{f} = S \left(Q - E \right) \vec{q}. \quad (8)$$

Используя модель (7) с матрично-векторными параметрами (8), построим динамическую модель. Для каждого ИН уравнение (7) примет вид

$$\dot{\vec{y}}^k = S^k \vec{y}^k + \vec{f}^k u. \quad (9)$$

Здесь верхний индекс k обозначает номер инвертора. Общее число ИН обозначим через n .

В векторном виде такую модель будем искать в виде

$$\dot{\vec{X}} = \Xi \vec{X} + \vec{\eta} V, \quad (10)$$

где V – напряжение на выходе ЗПТ и на входе фильтра низкой частоты, который считаем выполненным как Γ -образная LC-цепь. При этом векторы \vec{X} и $\vec{\eta}$ имеют вид

$$\vec{X} = \text{column} \left[i_0, i_{11}, i_{12}, \dots, i_{k1}, i_{k2}, \dots, i_{n1}, i_{n2} \right];$$

$$\vec{\eta} = \text{column} \left[1/L_d, 0, 0, \dots, 0, 0, \dots, 0, 0 \right].$$

Здесь u – напряжение на емкости фильтра, которое фигурирует в правой части формул (1), (2) для каждого ИН, включенного на выходе фильтра. Далее i_0 – ток индуктивности фильтра; i_{k1}, i_{k2} – средние за соответствующий интервал значения токов первой и второй фаз нагрузки k -го инвертора, т.е. компоненты вектора \vec{y}^k . Обозначим также параметры фильтра: L_d, C – индуктивность и емкость, R_d – активное сопротивление реактора фильтра.

С учетом структуры LC-фильтра и способа подключения к нему ИН запишем уравнения для напряжения u и тока i_0

$$C \frac{du}{dt} = i_0 - i_{d1} - i_{d2} - \dots - i_{dk} - \dots - i_{dn} = i_0 + i_{11} + i_{21} + \dots + i_{k1} + \dots + i_{n1}; \quad (11)$$

$$L \frac{di_0}{dt} + R_d i_0 = V - u. \quad (12)$$

Здесь учтено, что входной ток k -го инвертора i_{dk} , как указывалось ранее, равен току i_{k1} , взятому с обратным знаком.

Используя уравнения (6)-(12), получим вид матрицы Ξ модели (10). Она имеет блочную структуру:

$$\Xi = \begin{bmatrix} A_\phi & \Gamma & \dots & \Gamma & \dots & \Gamma \\ A_\phi^1 & S^1 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_\phi^k & 0 & \dots & S^k & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_\phi^n & 0 & \dots & 0 & \dots & S^n \end{bmatrix}, \quad (13)$$

в которой каждый блок имеет размерность 2×2 , причем

$$A_\phi = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{C} \\ -\frac{1}{L_d} & -\frac{R_d}{L_d} \end{bmatrix}; \quad \Gamma = \begin{bmatrix} \frac{1}{C} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad (14)$$

$$S^k = W^k \begin{bmatrix} \frac{\pi}{3\sqrt{3}\tau_k} - \frac{R_k}{L_k} & \frac{2\pi}{3\sqrt{3}\tau_k} \\ \frac{2\pi}{3\sqrt{3}\tau_k} & -\frac{\pi}{3\sqrt{3}\tau_k} - \frac{R_k}{L_k} \end{bmatrix} \left(\vec{y}^k \right); \quad A_\phi^k = \begin{bmatrix} f_1^k & 0 \\ f_2^k & 0 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Здесь R_k, L_k – параметры нагрузки, τ_k – интервал, т.е. шестая часть периода выходной частоты, f_1^k, f_2^k – координаты вектора \vec{f}^k k -го инвертора.

Уравнение (10) с учетом (13) – (15) представляет непрерывную динамическую модель многочастотного преобразователя частоты.

Результаты и выводы

Некоторые результаты исследований построенной модели для случая двухчастотного преобразователя приведены на рис. 1, 2. Годографы собственных значений (СЗ) матрицы Ξ , определяющих динамические свойства преобразователя, приведены на рис. 1. Движение СЗ здесь определяется изменением модуля сопротивления нагрузки первого инвертора $Z1$ от 0.1 Ом до 10 Ом при фиксированном модуле сопротивления нагрузки второго инвертора $Z2=1$ Ом (годограф слева) и, наоборот, изменением модуля сопротивления нагрузки второго инвертора $Z2$ от 0.1 Ом до 10 Ом при фиксированном модуле сопротивления нагрузки второго инвертора $Z1=1$ Ом (годограф справа). При этом фиксированы параметры фильтра остальные $L=500$ мкГн, $C=400$ мкФ и частоты инверторов $\omega_1=200$ Гц, $\omega_2=400$ Гц.

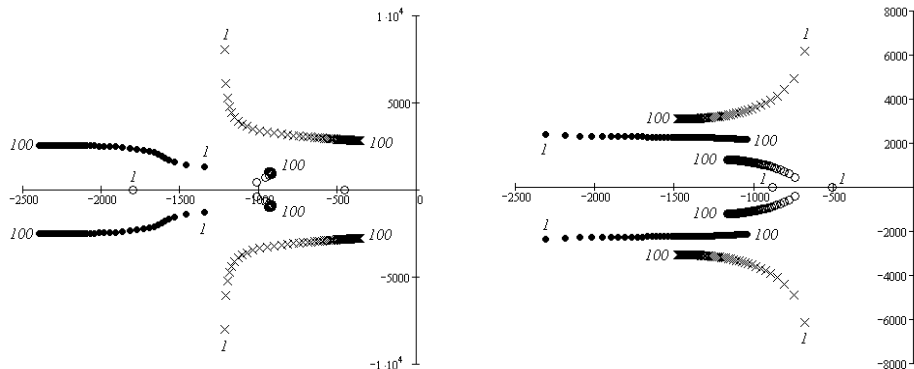


Рис. 1. Годографы СЗ матрицы Ξ при раздельном изменении модулей сопротивлений нагрузок инверторов от 0.1 Ом (отмечено цифрой 1) до 10 Ом (отмечено цифрой 100)

На основании этих исследований построены зависимости колебательности и времени переходного процесса при регулировании выходных напряжений МП от модулей сопротивлений нагрузок первого и второго инвертора (рис. 2).

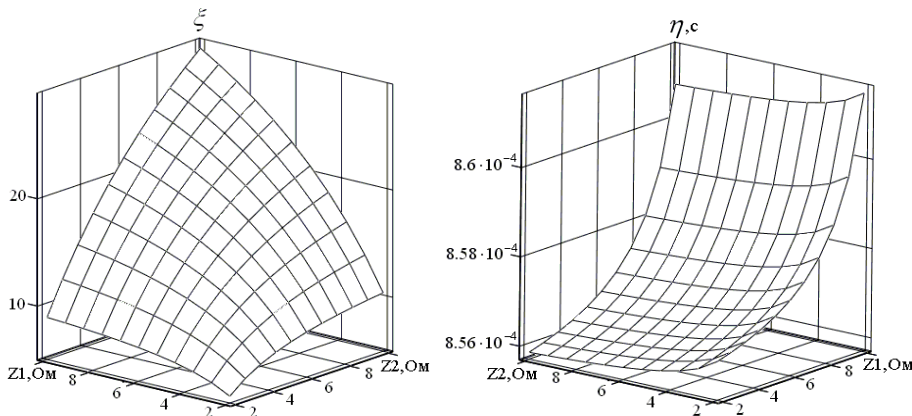


Рис. 2. Зависимости колебательности ξ и времени переходного процесса η от величины нагрузки первого и второго инвертора

Анализ результатов исследования позволяет сделать вывод о сильной зависимости динамики многочастотного преобразователя от величины и характера нагрузки. Таким образом, системы стабилизации и регулирования многочастотных преобразователей должны строиться как адаптивные по отношению к изменению нагрузки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Миргородская Е.Е. Оценка динамических свойств автономных инверторов тока по спектру матрицы дискретной модели / Е.Е. Миргородская // Проблемы электроэнергетики: сб. науч. тр. – Саратов: СГТУ, 2010. – С. 68-74.

2. Митяшин Н.П. Непрерывная динамическая модель преобразовательного комплекса на основе инвертора напряжения / Н.П. Митяшин, Ю.Б. Томашевский, М.В. Радионова // Вестник СГТУ. – 2011. №4(59). – Вып. 1. – С. 199-203.

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

Nikita P. Mityashin –
Dr. Sc., Professor
Department of Power Supply of Industrial Enterprises,
Gagarin Saratov State Technical University

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

Ekaterina E. Mirgorodskaya –
Assistant
Department of System Engineering,
Gagarin Saratov State Technical University

Радионова Мария Валентиновна –
аспирантка кафедры «Системотехника»
Саратовского государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Maria V. Radionova –
Postgraduate
Department of System Engineering,
Gagarin Saratov State Technical University

Говорухин Павел Павлович –
студент 4 курса кафедры «Системотехника»
Саратовского государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Pavel P. Govorukhin –
Student
Department of System Engineering,
Gagarin Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 14.05.12, принята к опубликованию 13.06.12

УДК 621.318.3

В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМНЫХ И КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ

Рассмотрены условия энергопреобразования в линейных электромагнитных двигателях на основе магнитных циклов. Установлено влияние режимных и конструктивных факторов на основные энергетические показатели двигателей.

Линейный электромагнитный двигатель, энергопреобразование, показатели эффективности преобразования магнитной энергии

V.I. Moshkin, G.G. Ugarov

THE INFLUENCE OF THE OPERATING AND CONSTRUCTION PARAMETERS OF THE LINEAR ELECTROMAGNETIC MOTOR ON THE EFFICIENCY OF ELECTROMECHANIC ENERGY CONVERSION

The conditions of energy conversion in the linear electromagnetic motor based on the magnetic cycle are analyzed. The influence of the operating and construction parameters on the core energy motor indicators is found.

Linear electromagnetic motor, energy conversion, indicators of efficiency of magnetic energy conversion

Задачи повышения удельных энергетических показателей импульсных линейных электромагнитных двигателей (ЛЭМД) тесно связаны с условиями эффективного энергопреобразования в них, которые позволят обосновать рациональные режимы работы двигателя, его конструктивные параметры. В настоящей статье рассматривается один из подходов к решению этих задач. При этом основное внимание уделяется не особенностям конструкции ЛЭМД, а общим закономерностям, присущим всем импульсным электромеханическим преобразователям (ЭМП) электромагнитного типа.

Анализ рабочих процессов ЛЭМД показывает, что их энергетические показатели во многом определяются конфигурацией магнитного цикла [4]. Исследование условий энергопреобразования и режимов работы указанных преобразователей [1, 3, 4] позволило выявить пять элементарных магнитных циклов с различными соотношениями магнитных и механических энергий (рис. 1 а-д).

При анализе энергопреобразования примем в виде допущения, что магнитная цепь ЭМП не насыщена и не имеет внутренних потерь и потоков рассеяния.

Эти циклы при движении якоря ЛЭМД из положения, соответствующего начальному рабочему зазору, в положение, соответствующее конечному рабочему зазору, можно определить через начальные и конечные значения токов I_n , I_k , и потокосцеплений ψ_n , ψ_k следующим образом:

$$I_n = I_k = const, \psi_n < \psi_k; I_n > I_k, \psi_n = \psi_k = const$$

$$I_n < I_k, \psi_n < \psi_k; I_n > I_k, \psi_n < \psi_k; I_n > I_k, \psi_n > \psi_k.$$

Исследуем влияние кратностей изменения индуктивности m и тока k , определяемых конструкцией магнитной системы и режимом работы преобразователя, на энергетические характеристики магнитных циклов, обозначив

$$m = \frac{L_k}{L_n}, k = \frac{I_n}{I_k}, \quad (1)$$

где L_n, L_k – начальное и конечное значения статической индуктивности ЭМП.

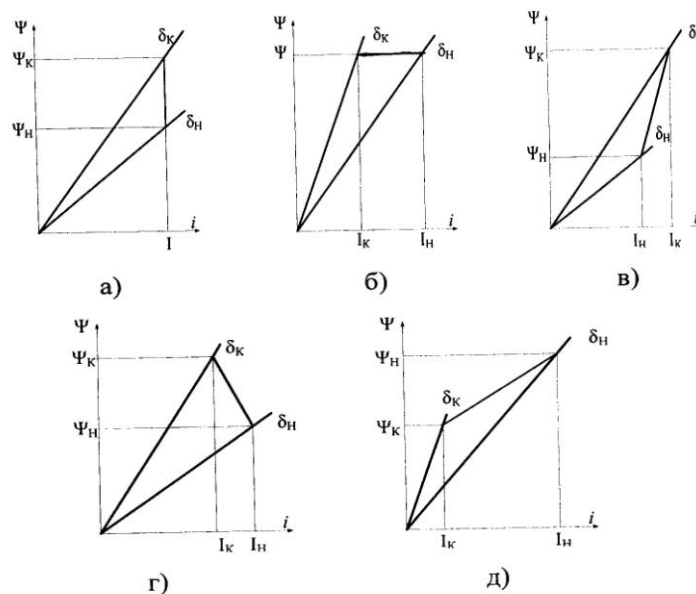


Рис. 1. Элементарные магнитные циклы при ненасыщенной магнитной цепи ЭМП

В качестве энергетических критериев магнитных циклов примем следующие: механическую работу $A_{мех}$, совершаемую при движении якоря за цикл и равную магнитной энергии, которая затрачивается на преодоление сил сопротивления движению и ускорение якоря; остаточную магнитную энергию $W_{мо}$, запасенную в магнитной системе преобразователя по-

сле окончания движения якоря; магнитный КПД η_m , представляющий собой отношение механической работы ко всей магнитной энергии цикла W_{mag} за исключением энергии, возвращенной при движении якоря в управляемый источник в виде обратного потока W_{mp} ; коэффициент эффективности цикла η_u , представляющий отношение механической работы A_{mex} к механической работе предельного магнитного цикла; коэффициент остаточной магнитной энергии k_0 , представляющий отношение остаточной магнитной энергии к магнитной энергии цикла:

$$A_{mex} = W_{mag} - W_{mo} - W_{mp}; \quad (2)$$

$$W_{mo} = \int_0^{\psi} id\psi, \quad W_{mp} = \int_{\psi_k}^{\psi_n} id\psi; \quad (3)$$

$$\eta_m = \frac{A_{mex}}{A_{mex} + W_{mo}}; \quad (4)$$

$$\eta_u = \frac{A_{mex}}{A_{\Pi}}, \quad A_n = I_m \cdot \psi_m; \quad (5)$$

$$k_0 = \frac{W_{mo}}{A_{mex} + W_{mo}}. \quad (6)$$

Нетрудно заметить, что критерии k_0 и η_m связаны соотношением

$$k_0 = 1 - \eta_m.$$

Для магнитных циклов, изображенных на рис. 1 а-д, с учетом принятых допущений известным графическим способом получены расчетные выражения для принятых критериев по (2)...(6), представленные в таблице через начальные и конечные токи, индуктивности и их кратности k, m .

Энергетические характеристики элементарных магнитных циклов электромеханических преобразователей электромагнитного типа при ненасыщенной магнитной цепи

Изображение магнитного цикла	Особенности цикла	Механическая работа, A_{mex}	Остаточная магнитная энергия, W_{mo}	Магнитный КПД, η_m	Коэффициент эффективности цикла, η_u	Коэффициент остаточной магнитной энергии, k_0
Рис. 1 а	$I_n = I_k = I$ $\psi_n < \psi_k$ $m > k = 1$	$0,5 \cdot I^2 \cdot L_n \cdot (m - 1)$	$0,5 \cdot I^2 \cdot L_n \cdot m$	$\frac{1}{1 + \frac{1}{1 - \frac{1}{m}}}$	$0,5 \cdot (1 - \frac{1}{m})$	$\frac{1}{(2 - \frac{1}{m})}$
Рис. 1 б	$I_n > I_k$ $\psi_n = \psi_k = \psi$ $m = k > 1$	$0,5 \cdot I^2 \cdot L_n \cdot (m - 1)$	$\frac{0,5 \cdot I^2 \cdot L_n \cdot m}{k^2}$	$1 - \frac{1}{m}$	$0,5 \cdot (1 - \frac{1}{m})$	$\frac{1}{m}$
Рис. 1 в	$I_n < I_k$ $\psi_n < \psi_k$ $m > 1 > k > 0$	$\frac{0,5 \cdot I^2 \cdot L_n \cdot (m - 1)}{k}$	$\frac{0,5 \cdot I^2 \cdot L_n \cdot m}{k^2}$	$\frac{1}{1 + \frac{1}{k - \frac{k}{m}}}$	$0,5 \cdot k \cdot (1 - \frac{1}{m})$	$\frac{1}{1 + k \cdot (1 - \frac{1}{m})}$
Рис. 1 г	$I_n > I_k$ $\psi_n < \psi_k$ $m > k > 1$	$\frac{0,5 \cdot I^2 \cdot L_n \cdot (m - 1)}{k}$	$\frac{0,5 \cdot I^2 \cdot L_n \cdot m}{k^2}$	$\frac{1}{1 + \frac{1}{k - \frac{k}{m}}}$	$0,5 \cdot (1 - \frac{1}{m})$	$\frac{1}{1 + k \cdot (1 - \frac{1}{m})}$
Рис. 1 д	$I_n > I_k$ $\psi_n > \psi_k$ $k > m > 1$	$\frac{0,5 \cdot I^2 \cdot L_n \cdot (m - 1)}{k}$	$\frac{0,5 \cdot I^2 \cdot L_n \cdot m}{k^2}$	$\frac{1}{1 + \frac{1}{k - \frac{k}{m}}}$	$0,5 \cdot \frac{m - 1}{k}$	$\frac{1}{1 + k \cdot (1 - \frac{1}{m})}$

Анализ полученных выражений $A_{mex}, \eta_m, \eta_u, k_o$ показывает, что значения этих показателей определяются начальными и конечными значениями токов, индуктивностей. Значение W_{mo} определяется конечными значениями индуктивностей и токов. Выражения механической работы, остаточной магнитной энергии, магнитного КПД, коэффициента остаточной магнитной энергии для магнитных циклов, изображенных на рис. 1 в-д, одинаковы и могут в обобщенной форме выступать в качестве соответствующих критериев магнитных циклов. При учете особенностей цикла от обобщенной формы легко перейти к выражению для конкретного элементарного магнитного цикла.

Сравним магнитные циклы, изображенные на рис. 1, по основным энергетическим критериям. Для этого из таблицы выразим в обобщенном виде механическую работу для любого цикла

$$A_{mex} = \frac{0,5 \cdot I_n^2 \cdot L_n \cdot (m-1)}{k} \quad (7)$$

и представим ее в относительной форме $A = \frac{A_{mex}}{W_{mn}}$, приняв за базисное значение величину начальной магнитной энергии $W_{mn} = 0,5 \cdot I_n^2 \cdot L_n$ и одинаковый ток трогания, равный I_n . Тогда (7) примет вид

$$A = \frac{m-1}{k} \quad (8)$$

Откуда следует, что механическая работа преобразователя определяется как режимными (параметр k и ток трогания I_n), так и конструктивными (параметр m и рабочий ход якоря) параметрами.

Анализ (7) и (8) при $k=const$ показывает, что механически работа ЭМП линейно возрастает с увеличением кратности изменения индуктивности. Значит, для повышения механической работы и энергии удара ЛЭМД рекомендуется использовать наибольшую кратность m , реализуя ее, например, за счет повышенного рабочего хода и конструкции магнитной системы с двумя и более рабочими зазорами (5).

Оценим влияние начальной L_n и конечной L_k индуктивностей на значения механической работы, магнитного КПД и коэффициента эффективности элементарных магнитных циклов, по которым работают ЭМП электромагнитного типа. Для этих циклов представим согласно соотношению (8) и таблице обобщенные выражения относительной механической работы и магнитного КПД, а также соответствующие значения η_u . Выразим частные производные от A и η_m по соответствующим индуктивностям и сравним их.

$$\frac{\partial A}{\partial L_k} = \frac{1}{k \cdot L_n}, \quad (9)$$

$$\left| \frac{\partial A}{\partial L_n} \right| = \frac{L_k}{k \cdot L_n^2} = m \cdot \frac{\partial A}{\partial L_k}, \quad (10)$$

$$\left| \frac{\partial \eta_m}{\partial L_k} \right| = \frac{\frac{L_n}{k}}{\left(L_k - L_n - \frac{L_k}{k} \right)^2}, \quad (11)$$

$$\frac{\partial \eta_m}{\partial L_n} = \frac{\frac{L_k}{k}}{\left(L_k - L_n - \frac{L_k}{k} \right)^2} = m \cdot \frac{\partial \eta_m}{\partial L_k}. \quad (12)$$

Значения производных $\frac{\partial \eta_{\psi}}{\partial L_{\kappa}}$ и $\frac{\partial \eta_{\psi}}{\partial L_{\eta}}$ для элементарных циклов различны, однако для них справедливо соотношение, аналогичное (10) и (12):

$$\frac{\partial \eta_{\psi}}{\partial L_{\eta}} = m \cdot \frac{\partial \eta_{\psi}}{\partial L_{\kappa}} . \quad (13)$$

Из анализа (9) ... (13) следует, что влияние индуктивностей L_{κ} и L_{η} на значения A_* , η_{ψ} и η_m различно. Так как в выражениях (10), (12), и (13) величина кратности изменения индуктивности m всегда больше единицы, то

$$\frac{\partial A_*}{\partial L_{\eta}} > \frac{\partial A_*}{\partial L_{\kappa}}, \frac{\partial \eta_m}{\partial L_{\eta}} > \frac{\partial \eta_m}{\partial L_{\kappa}}, \frac{\partial \eta_{\psi}}{\partial L_{\eta}} > \frac{\partial \eta_{\psi}}{\partial L_{\kappa}} .$$

Значит, изменение величины начальной индуктивности в большей степени на величины механической работы, магнитного КПД и коэффициента эффективности цикла ЛЭМД, чем конечной, причем это влияние пропорционально m . Следовательно, для повышения удельных энергетических показателей ЛЭМД и роста критериев A_* , η_{ψ} и η_m следует стремиться к росту числа рабочих воздушных зазоров и увеличивать при этом кратность изменения индуктивности m как за счет уменьшения потоков рассеяния и величины начальной индуктивности, так и за счет уменьшения остаточной магнитной энергии W_{mo} [5]. Для конкретной конструкции магнитной системы ЛЭМД необходимо полнее использовать рабочий ход якоря как за счет уменьшения конечного рабочего зазора до значения, близкого к нулю, так и за счет увеличения начального рабочего зазора до величины, обусловленной длиной обмотки. Потоки рассеяния при номинальном рабочем зазоре ЛЭМД определяют запас магнитной энергии $W_{mн}$ и зависят от типа магнитных систем двигателей и в некоторых из них могут быть полезно использованы.

Рассмотрим условия рационального использования электромагнитной энергии рабочих зазоров в ЭМП. С учетом соотношений, полученных для механической работы в таблице, представим правую часть выражения для магнитной энергии $W_{mag} = A_{Mex} + W_{mo}$ в виде

$$W_{mag} = 0,5 \cdot I_{\eta} \cdot I_{\kappa} \cdot (L_{\kappa} - L_{\eta}) + \int_0^{\psi_{\kappa}} id\psi .$$

Интегрируя по частям второе слагаемое полученного выражения, представим его в виде

$$W_{mag} = 0,5 \cdot I_{\eta} \cdot I_{\kappa} \cdot (L_{\kappa} - L_{\eta}) + I_{\eta} \cdot \psi_{\kappa} + \int_{I_{\kappa}}^0 \psi di .$$

Для бесконечно малого интервала времени dt последнее уравнение примет вид, совпадающий с полученным в [1]:

$$W_{mag} = 0,5 \cdot I_{\eta} \cdot I_{\kappa} \cdot dL + \Delta\psi di . \quad (14)$$

Из (14) следует, что для рационального использования магнитной энергии рабочих зазоров целесообразно исключить или хотя бы снизить ее обратный поток. Он обусловлен вторым слагаемым в (14) и возникает при $di < 0$ в случае, когда электрическая связь обмотки двигателя с источником существует. Такой режим соответствует работе ЭВМ по циклам, изображенным на рис. 1 б, г, д. Как показано в [2], свойственная этим циклам рекуперация магнитной энергии в источник сопровождается потерями энергии и свидетельствует о невозможности полезного использования этой части энергии, так как возврат энергии в источник не является целью двигательного режима.

Выводы

Предложены критерии эффективности процессов электромеханического преобразования энергии в ЛЭМД и определены значения этих критериев.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ряшенцев Н.П. Введение в теорию энергопреобразования электромагнитных машин / Н.П. Ряшенцев, А.Н. Мирошниченко. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1987. – 160 с.
2. Мошкин В.И. Специальные режимы линейных электромагнитных двигателей / В.И. Мошкин, А.П. Моисеев, Г.Г. Угаров // Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Саратов, 2010. – С. 23-28.
3. Мошкин В.И. Анализ элементарных магнитных циклов электромеханических преобразователей электромагнитного типа / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров. – М., 1986. – 16 с. – Деп. в ИнформЭлектро, № 416-ЭТ.
4. Ряшенцев Н.П. Теория, расчет и конструирование электромагнитных машин ударного действия / Н.П. Ряшенцев, Е.М. Тимошенко, А.В. Фролов. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1987. – 260 с.
5. Угаров Г.Г. Принципы повышения удельных силовых и энергетических показателей импульсных линейных электромагнитных двигателей / Г.Г. Угаров // Импульсные линейные электромагнитные двигатели. – Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1991. – С. 43-50.

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

Vladimir I. Moshkin –
Ph. D.
Head: Department of Power and Technology of Metals, 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 of Industrial Enterprises,
Gagarin Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 15.05.12, принята к опубликованию 14.06.12

УДК 621.318.3

В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ И ДИНАМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОДНООБМОТОЧНЫХ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ВОЗВРАТНОЙ ПРУЖИНОЙ

На основе соотношений принципа взаимности получены и проанализированы энергетические и динамические параметры однообмоточных ЛЭМД с возвратной пружиной и установлено, что производительность и ударная мощность машины, построенной по такой конструктивной схеме, ограничены продолжительностью холостого хода.

Линейный электромагнитный двигатель, тяговое усилие, жесткость пружины, якорь

V.I. Moshkin, G.G. Ugarov

POWER AND DYNAMIC EFFICIENCY OF LINEAR ELECTROMAGNETIC ENGINES WITH ONE WINDING AND THE RETURNABLE SPRING

On the basis of ratios of a principle of reciprocity the key power and dynamic parameters of LEME with one winding and a returnable spring are received and

analysed and is established that productivity and shock capacity of the car constructed on such constructive scheme, are limited to duration of idling.

The linear electromagnetic motor, traction, stiffness spring anchor

Анализ известных конструктивных схем импульсных линейных электромагнитных машин [1, 2] показывает, что в их состав чаще всего входит однообмоточный линейный электромагнитный двигатель (ЛЭМД). В [3] рассмотрены две конструктивные схемы однообмоточных ударных машин для погружения металлических электродов в грунт и экспериментально получены их динамические характеристики, причем в этих схемах пружина использована как для совершения холостого хода, так и для рабочего хода. Полученные таким образом динамические характеристики рассмотренных конструктивных схем ударных машин позволили выбрать лучшую из них.

В [4, 5] показано, что на этапе проектного расчета электромагнитного привода с импульсным ЛЭМД его основные динамические и энергетические характеристики целесообразно рассчитать с применением взаимных соотношений, без решения нелинейных дифференциальных уравнений. Применяя такой подход, получим, как и в [4, 5] основные энергетические и динамические характеристики ударной машины, выполненной по конструктивной схеме однообмоточного ЛЭМД с возвратной пружиной (рис. 1), когда рабочий ход якоря совершается под действием электромагнитного усилия ЛЭМД, а холостой – за счет накопленной энергии возвратной пружины. Машины с такой конструктивной схемой используются в

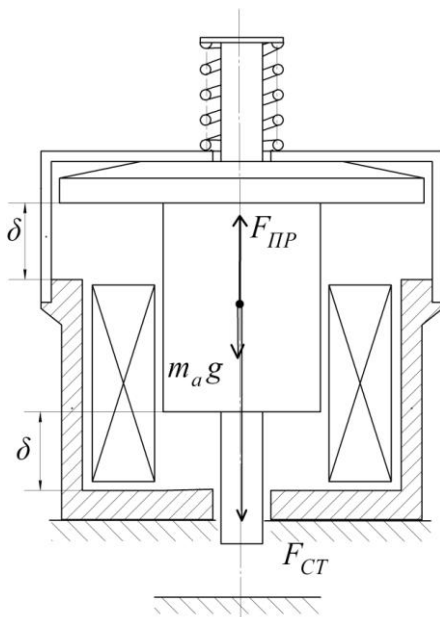


Рис. 1. Конструктивная схема однообмоточного ЛЭМД с возвратной пружиной

приводе машин для импульсных технологий, например, для прессового и штамповочного оборудования. Имея рассчитанные динамические и энергетические характеристики машин, можно в дальнейшем, как и в [3], сравнивать их между собой и выбирать наиболее рациональные конструктивные схемы.

Будем считать, что статические тяговые характеристики импульсных ЛЭМД $F_{СТ}(\delta)$, используемых в приводе ударных машин, неизменны на большей части перемещения якоря, электромагнитное усилие возникает после включения обмотки двигателя без запаздывания [4, 5].

Проанализируем работу однообмоточного импульсного ЛЭМД в приводе ударной машины (рис. 1) и получим для периода рабочего хода машины выражения энергии удара, динамической силы тяги, времени рабочего и холостого хода, частоты ходов и ударной мощности. Будем считать, что начальная скорость движения якоря массой m_a равна нулю и противодействующее усилие пружины $F_{ПР}$ пропорционально перемещению δ , жесткость c пружины постоянна на всем перемещении якоря, импульсный ЛЭМД расположен вертикально.

На основании принципа взаимности для электромеханических систем [4, 5] кинетическая энергия движущихся частей A_K импульсного ЛЭМД должна равняться энергии A_e , связанной с противоЭДС, то есть

$$A_K = A_e = 0,5(A_u - A_n), \tag{1}$$

где $A_u = F_{СТ} \cdot \delta$ – интегральная работа импульсного ЛЭМД; $A_n = \int_{\delta_i}^{\delta_k} F_n(\delta) d\delta$ – работа по преодолению полезной нагрузки.

Применяя выражение (1) к данной конструктивной схеме (рис. 1) и пренебрегая отскоком якоря ЛЭМД при ударе, получим выражение для энергии удара

$$A_y = A_k = 0,5(F_{CT} \cdot \delta + m_a g \cdot \delta - A_{IP}), \quad (2)$$

где $A_{IP} = \int_{\delta_i}^{\delta_k} F_{IP}(\delta) d\delta = \int_{\delta_i}^{\delta_k} c \delta d\delta = \int_0^{\delta} c \delta d\delta = 0,5c\delta^2$ – потенциальная энергия, запасаемая в пружине при её деформации на величину перемещения якоря под действием электромагнитного усилия; δ_n, δ_k – начальное и конечное положения якоря; F_{CT} – статическое тяговое усилие двигателя.

Представим выражение (2) в относительной форме

$$A_y^* = A_y / (m_a g \delta) = 0,5(F_{CT}^* + 1 - 0,5c^*), \quad (3)$$

где $c^* = c / (m_a g / \delta)$ – относительная жесткость пружины; $F_{CT}^* = F_{CT} / (m_a g)$.

Для нахождения динамической силы тяги F_D двигателя представим энергию удара в виде суммы двух слагаемых

$$A_y = F_D \cdot \delta - A_{IP}, \quad (4)$$

первое из которых характеризует вклад обмотки ЛЭМД в создание энергии удара, второе – уменьшение ее за счет пружины. Из выражения (4) с учетом (2) получим выражение динамической силы тяги в относительной форме

$$F_D^* = F_D / (m_a g) = 0,5(F_{CT}^* + 1 + 0,5c^*). \quad (5)$$

На рис. 2 показаны зависимости относительных энергии удара A_y^* (штрихпунктирные линии) и динамической силы F_D^* (сплошные линии) от относительных статической силы тяги F_{CT}^* и жесткости возвратной пружины c^* . Анализ этих зависимостей показывает, что они с увеличением F_{CT}^* линейно растут, а с ростом c^* динамическая сила F_D^* также линейно растёт, а энергия A_y^* – линейно падает.

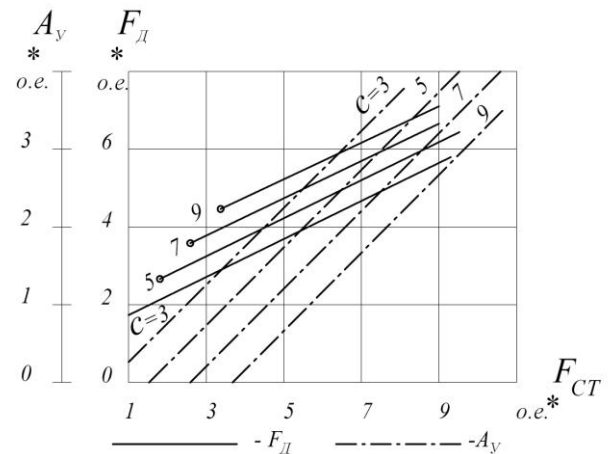


Рис. 2 Зависимости энергии A_y и усилия F_D от параметров F_{CT}^* и c^*

Для определения динамических характеристик импульсного ЛЭМД с возвратной пружиной составим дифференциальное уравнение движения его якоря

$$m_a \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} = F_H - c \cdot \delta, \quad (6)$$

где F_H – начальное значение силы, движущей якорь.

Используя решение уравнения (6), полученное в [6], запишем выражение для времени движения якоря

$$t = \sqrt{\frac{m_a}{c}} \left(\frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{F_K}{F_H} \right), \quad (7)$$

где F_K – конечное значение силы, движущей якорь.

Время движения якоря при рабочем ходе двигателя t_{PX} определим из (7) с учетом динамических усилий применительно к рассматриваемой конструктивной схеме: $F_H = F_D$ и $F_K = F_D - c\delta$. Тогда получим

$$t_{PX} = \sqrt{\frac{m_a}{c}} \left(\frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{F_D - c\delta}{F_D} \right). \quad (8)$$

С учетом $c = c_* \cdot m_a g / \delta$ и выражения (5) формула (8) примет вид

$$t_{PX} = \sqrt{\frac{\delta}{g c_*}} \cdot \left[\frac{\pi}{2} - \arcsin \left(1 - \frac{2c_*}{F_{CT} + 1 + 0,5c_*} \right) \right]. \quad (9)$$

Время движения якоря при холостом ходе двигателя определим из (7) с учетом $F_H = c\delta, F_K = 0$. Тогда получим

$$t_{XX} = \sqrt{\frac{m_a}{c}} \cdot \frac{\pi}{2}. \quad (10)$$

Представим для удобства анализа выражения (9), (10) и время цикла ЛЭМД $t_{Ц} = t_{PX} + t_{XX}$ в относительной форме

$$t_{PX}^* = \frac{t_{PX}}{T_1} = \sqrt{\frac{1}{2c_*}} \cdot \left[\frac{\pi}{2} - \arcsin \left(1 - \frac{2c_*}{F_{CT} + 1 + 0,5c_*} \right) \right]; \quad (11)$$

$$t_{XX}^* = \frac{t_{XX}}{T_1} = \frac{\pi}{2} \cdot \sqrt{\frac{1}{2(c-1)}}; \quad (12)$$

$$t_{Ц}^* = t_{PX}^* + t_{XX}^* = \sqrt{\frac{1}{2c_*}} \cdot \left[\frac{\pi}{2} - \arcsin \left(1 - \frac{2c_*}{F_{CT} + 1 + 0,5c_*} \right) \right] + \frac{0,5\pi}{\sqrt{2(c-1)}}, \quad (13)$$

где $T_1 = \sqrt{2\delta / g}$ – время свободного падения якоря с высоты δ .

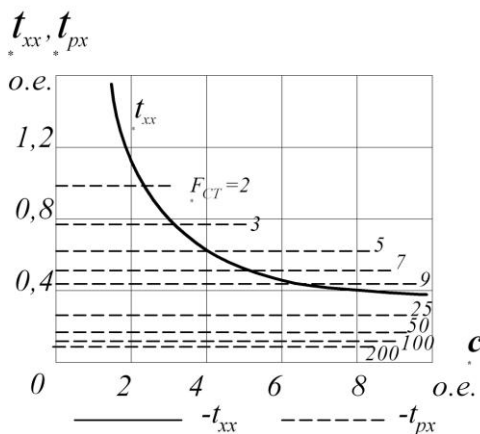


Рис. 3. Влияние параметров F_{CT}^* и c^* на времена t_{PX}^* и t_{XX}^*

На рис. 3 приведены зависимости относительных времен холостого (сплошная линия) и рабочего (пунктирные линии) ходов ЛЭМД в приводе машины с рассматриваемой конструктивной схемой от относительных значений жесткости пружины и статической силы тяги ЛЭМД.

Анализ этих характеристик показывает, что с ростом жесткости пружины время холостого хода t_{XX}^* ,

которое по данным работы [2] составляет 30-45 % времени цикла, падает, причем резко на интервале измене-

ний c^* от 1,5 до 5, стремясь в пределе к нулю. Время рабочего хода t_{PX}^* , как следует из анализа (11) при условии $c^* < 2F_{CT}^*$, практически не зависит от жёсткости c^* и

уменьшается с ростом F_{CT}^* , также стремясь в пределе к нулю. По экспериментальным данным [2] время рабочего хода невелико и составляет 10-20 % от времени цикла. Это свидетельствует о необходимости и важности мер по уменьшению t_{XX} с целью увеличения производительности оборудования с импульсными ЛЭМД.

Относительная частота ходов в минуту якоря двигателя исследуемой машины равна

$$n_* = \frac{60}{t_{ц*}} = \frac{60}{\frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2(c_*-1)}} + \sqrt{\frac{1}{2c_*}} \cdot \left[\frac{\pi}{2} - \arcsin \left(1 - \frac{2c_*}{F_{CT*} + 1 + 0,5c_*} \right) \right]} \quad (14)$$

На рис. 4 а приведены зависимости, построенные по выражению (14), из которых следует, что с ростом жесткости пружины c_* и статического тягового усилия F_{CT*} частота ходов якоря n_* растет. При этом одну и ту же частоту ходов можно получить при различных сочетаниях c_* и F_{CT*} . Для конкретных рекомендаций по выбору рациональных значений c_* и F_{CT*} необходимо привлечь дополнительные критерии, например, постоянство энергии удара, ограничение кинетической энергии якоря на холостом ходе и другие.

Из рис. 4 б, построенного по (3), виден линейный характер уменьшения энергии удара A_{y*} с ростом жесткости возвратной пружины c_* и увеличения A_{y*} с ростом статического тягового усилия F_{CT*} .

Из анализа зависимостей, изображенных на рис. 4, следует вывод о существовании предельной частоты ходов рассматриваемой конструктивной схемы машины при заданных значениях энергии удара A_{y*} , усилия F_{CT*} и жесткости c_* . Дальнейшее повышение частоты ходов, например, за счет увеличения частоты следования питающих обмотку ЛЭМД импульсов напряжения источника, приведет при вышеназванных условиях к снижению энергии удара A_{y*} , что наблюдалось в ходе экспериментов.

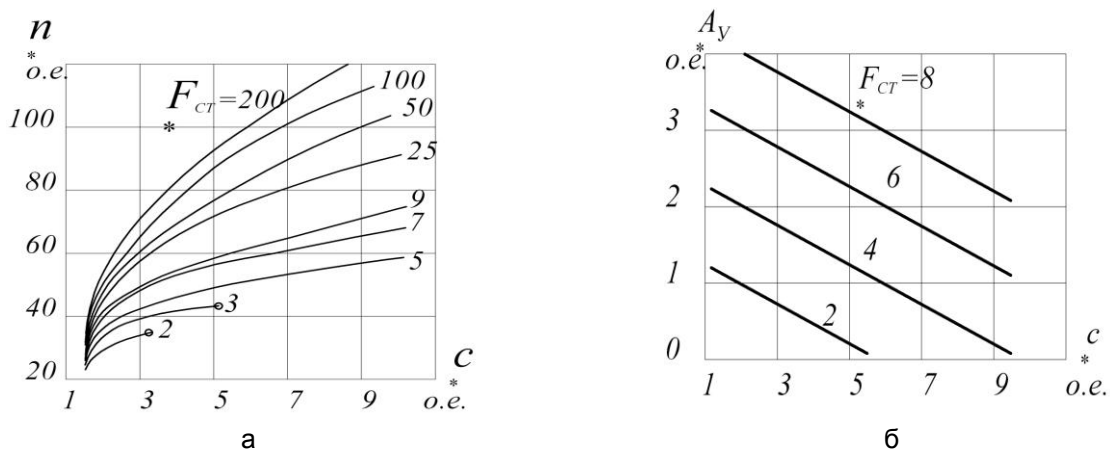


Рис. 4 Влияние параметров F_{CT*} и c_* на частоту ходов якоря ЛЭМД (а) и энергию удара (б)

Используя (3) и (14), получим выражение относительной ударной мощности P_{y*} ЛЭМД для исследуемой конструктивной схемы:

$$P_{y*} = A_{y*} \cdot n_* = \frac{30(F_{CT*} + 1 - 0,5c_*)}{\frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2(c_*-1)}} + \sqrt{\frac{1}{2c_*}} \cdot \left[\frac{\pi}{2} - \arcsin \left(1 - \frac{2c_*}{F_{CT*} + 1 + 0,5c_*} \right) \right]}$$

и представим его в виде поверхности в функции параметров F_{CT*} и c_* на рис. 5.

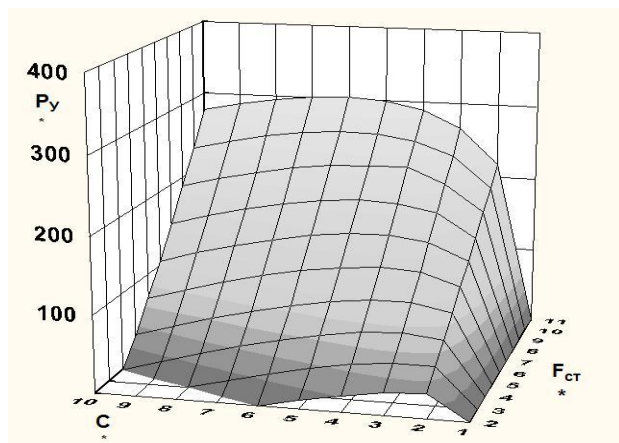


Рис. 5. Зависимости ударной мощности P_y от параметров $F_{ст}$, c

Анализ поведения поверхности показывает, что для фиксированных значений статического тягового усилия и жесткости возвратной пружины существует максимум значения ударной мощности, при котором частота ходов ЛЭМД равна предельной.

С ростом статического усилия максимумы ударной мощности смещаются в сторону больших значений жесткости пружины. Резервом для дальнейшего повышения ударной мощности и частоты ходов могут служить другие конструктивные схемы, например, с двухобмоточным ЛЭМД, в которых обеспечивается активный возврат якоря [2, 7].

Выводы

С помощью взаимных соотношений получены и проанализированы основные энергетические и динамические параметры однообмоточных ЛЭМД с возвратной пружиной. Установлено, что производительность и ударная мощность машин, построенных по такой конструктивной схеме, в большей степени зависят от времени холостого хода. При заданных энергии удара, статическом тяговом усилии и жесткости возвратной пружины существует предельная частота ходов якоря двигателя и соответствующий ей максимум ударной мощности машины. Дальнейшее повышение частоты ходов влечет за собой снижение энергии удара.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ряшенцев Н.П. Электромагнитный привод линейных машин / Н.П. Ряшенцев, В.Н. Ряшенцев. – Новосибирск: Наука, 1985. – 153 с.
2. Ряшенцев Н.П. Электромагнитные прессы / Н.П. Ряшенцев, Г.Г. Угаров, А.В. Львицын. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1989. – 160 с.
3. Усанов К.М. Динамическая эффективность однообмоточных электромагнитных ударных машин с различными рабочими циклами / К.М. Усанов, В.А. Каргин, И.В. Трубенкова // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2010. – №12 (74). – С. 67-70.
4. Мошкин В.И. Использование принципа взаимности при исследовании и расчёте энергетических характеристик линейных электромагнитных двигателей / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Задачи динамики электрических машин. – Омск: Изд-во ОмПИ, 1988. – С.120-128.
5. Мошкин В.И. Основные энергетические и динамические параметры однообмоточных ЛЭМД с возвратной пружиной / В.И. Мошкин // Вестник Курганского государственного университета. Сер. Технические науки. Вып. 6. – Курган: Изд-во Курган. гос. ун-та, 2011. – С. 105-109.
6. Мошкин В.И. О рациональной форме движущих сил, заданных как функции перемещения / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Курган. машиностр. ин-т. – Курган, 1984. – 15 с. Деп. в Информэлектро, N 318эт - 84Деп.
7. Пат. РФ № 2026792 С1 В 30 В 1/42, В21J 7/30. Электромагнитный пресс / Э.Ф. Маер, А.Г. Баталов, В.И. Мошкин и И.П. Попов. Оpubл. 20.01.95 // Б.и. № 2.

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

Vladimir I. Moshkin – Ph. D. Head: Department of Power and Technology of Metals, 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 of Industrial Enter-
prises,
Gagarin Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 16.05.12, принята к опубликованию 15.06.12

УДК 621.316

В.В. Муллин, М.А. Фурсаев

ОЦЕНКА СКОРОСТИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ДУГИ В ВАКУУМНЫХ ДУГОГАСИТЕЛЬНЫХ КАМЕРАХ С ПОПЕРЕЧНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Обсуждены причины изменения скорости перемещения дуги в пространстве между контактами в вакуумных дугогасительных камерах с поперечным магнитным полем при изменении напряжения коммутируемого тока. Проведена оценка изменения этой скорости в течение периода напряжения.

Вакуумная дугогасительная камера, контакт, вакуумная дуга, поперечное магнитное поле

V.V. Mullin, M.A. Fursaev

EVALUATION OF ARC MOTION SPEED IN VACUUM INTERRUPTERS USING TRANSVERSE MAGNETIC FIELD CONTACTS

Factors causing variation speed in the gap between transverse magnetic field contact of a vacuum interrupter at different values of switched current voltage are discussed. The variation speed evaluation during the whole voltage period is effectuated.

Vacuum interrupter, contact, vacuum arc, transverse magnetic field

Вакуумные дугогасительные камеры (ВДК) нашли широкое применение в качестве исполнительных элементов в современной технике коммутации электрических цепей переменного тока высокого напряжения. Они представляют собой конструкцию, в полости которой в вакуумной среде осуществляется механическое замыкание и размыкание контактов. При этом загорается и гаснет дуга между контактами, один из которых является катодом, а другой – анодом. При смене полярности напряжения функции катода и анода между контактами меняются.

С целью увеличения коммутационного ресурса ВДК используется магнитное поле. Различают конструкции камер с поперечным и магнитным полем [1]. В настоящей работе рассматриваются особенности действия магнитного поля, способствующие увеличению коммутационного ресурса ВДК.

Коммутация электрической цепи осуществляется как при номинальном токе, так и при токе короткого замыкания. Очевидно, коммутационный ресурс, зависящий от уровня термической нагрузки контактов, существенно ниже при токах короткого замыкания. При больших значениях тока вакуумная дуга в ВДК пребывает в сжатой форме, при которой она концентрируется в «столбы», т.е. формируются сгустки плазмы, имеющие резкие границы в поперечном направлении и во всем пространстве между катодом и анодом. При такой форме дуги на поверхности контакта, выполняющего функцию анода, под действием интенсивной электронной бомбардировки образуются «анодные пятна», которые, наряду с «катодными»,

являются источниками сильно ионизованной плазмы. Для снижения термической нагрузки, что соответственно приводит к увеличению коммутационного ресурса, в данном случае необходимо обеспечить более равномерную термическую нагрузку анода, которая может достигаться перемещением столба дуги в течение времени. Это перемещение осуществляется при использовании поперечного магнитного поля.

Магнитное поле в ВДК создается за счет специальной конструкции контактов, которые имеют индукторы. По этим кондукторам, когда горит дуга, протекает ток, который обуславливает магнитное поле между разомкнутыми контактами. Величина магнитной индукции этого поля прямо пропорциональна величине тока дуги. Индукторами, обеспечивающими создание поперечного магнитного поля, являются спиралеобразные участки контактов, которые образуются прорезями на контактах. Угловая ориентация этих участков, расположенных друг против друга, такова, что притекающие по ним токи имеют одно и то же направление на столб дуги, который можно рассматривать как проводник с током. В соответствии с законом Ампера поперечное магнитное поле приводит его в движение. В [1] для расчета силы, действующей на столб дуги, предложено использовать соотношение

$$F = 0,5iLB,$$

где i – ток, протекающий по спиралеобразному участку контакта, L – расстояние между контактами, B – магнитная индукция. Под действием этой силы столб дуги перемещается вдоль спиралеобразных участков, т.е., по существу, по периферии рабочих поверхностей контактов.

В ВДК с поперечным магнитным полем электроны в столбе дуги находятся под действием скрещенных электрического и магнитного полей. В этих условиях электроны двигаются под действием силы. Скорость поступательной компоненты этого движения определяется соотношением

$$v = E/B,$$

где E – напряженность электрического поля, величина которого определяется величиной напряжения между разведенными контактами. Можно предположить, что с этой скоростью происходит движение столба дуги.

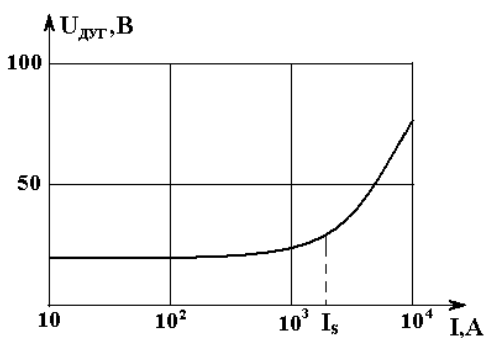


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика вакуумной дуги

Мгновенное значение напряженности электрического поля, действующее на электроны столба дуги, изменяется во времени так, как и напряжение между контактами. Величина магнитной индукции также изменяется в течение полупериода этого напряжения, поскольку магнитное поле обусловлено током дуги, протекающим по индукторам контактов. Изменение величины магнитной индукции пропорционально изменению тока дуги. В свою очередь, величины мгновенных значений тока дуги и напряжения между контактами связаны через вольт-амперную характеристику вакуумной дуги, вид которой приведен на рис. 1 [2].

Как видно, в области малых токов, где дуга пребывает в диффузной форме, когда плазма практически однородно заполняет пространство между контактами, вольт-амперная характеристика линейна. На линейном участке вольт-амперной характеристики обеспечивается пропорциональность между величинами напряженности электрического поля и магнитной индукции. Поэтому можно считать, что скорость поступательного движения электронов в течение периода переменного напряжения остается неизменной. При больших значениях тока дуги, находящейся в сжатой форме, ее вольт-амперная характеристика нелинейная. Она может быть аппроксимирована показательной функцией с величиной показателя степени больше двух. Величина напряженности электрического поля изменяется в большей степени, чем величина магнитной индукции. Вследствие этого в течение периода переменного напряжения скорость поступательного движения электронов будет изменяться, что влечет за собой изменение перемещения столба дуги. Однако на основании изложенного выше не представляется возможным определить истинную скорость перемещения столба дуги в ВДК с попе-

речным магнитным полем при размыкании электрической цепи при коротком замыкании в нагрузке, но может быть оценена величина изменения этой скорости. Критерием изменения может быть величина отношения максимального значения скорости перемещения столба дуги, которую он приобретает в течение полупериода переменного напряжения к значению скорости в фиксированной фазе полупериода.

Для оценки изменения скорости перемещения столба дуги в ВДК в течение полупериода напряжения был рассмотрен простейший случай, т.е. в предположении, что расстояние между контактами остается неизменным, в течение полупериода дуга находится в сжатой форме, а ее перемещение начинается с начала полупериода и заканчивается в его конце, т.е. не учитывается факт пребывания дуги в диффузном состоянии при малых величинах токов. Величина показателя степени при аппроксимации вольт-амперной вакуумной дуги в сжатой форме принималась равной 3.

Как показал расчет, скорость перемещения столба дуги в течение полупериода переменного напряжения сначала увеличивается, а затем уменьшается. Максимальная скорость достигается при максимуме мгновенного значения напряжения. Величина отношения значения максимальной скорости перемещения столба дуги к значениям скорости, соответствующим фазам 10 и 170 градусов переменного напряжения, равна 0,3.

Таким образом, в те моменты времени, когда энергия электронной бомбардировки анода максимальна, обеспечивается максимальная скорость перемещения столба дуги, а вследствие этого перемещения анодного пятна, являющегося местом интенсивной электронной бомбардировки и наибольшей термической нагрузки, по поверхности контакта. Этим достигается равномерность распределения термической нагрузки по поверхности контакта, выполняющего функцию анода в ВДК с поперечным магнитным полем, а тем самым увеличение ее коммутационного ресурса.

Экспериментальная проверка результатов выполненного расчета затруднена из-за сложности обеспечения зажигания дуги при разведенных контактах. Поэтому были использованы данные экспериментальных исследований [3]. Исследования проводились с использованием цифровой видеокамеры. Процесс съемки позволяет регистрировать все моменты существования дуги между контактами в течение полупериода переменного напряжения при сохранении кадров. Дуга зажигалась при размыкании контактов при одновременном начале полупериода переменного напряжения. Однако в [3] не приведены данные относительно скорости разведения контактов и расстояния между разведенными контактами.

Согласно экспериментальным данным перемещение столба дуги начинается не с нулевой фазы переменного напряжения и заканчивается до окончания его полупериода. Дело в том, что при разведении контактов загорается короткая дуга, которая по своим свойствам близка к дуге сжатой формы. Она загорается в последних местах соприкосновения контактов. При малых величинах тока дуги, а следовательно, при малых значениях магнитной индукции сила Лоренца мала и не способна оторвать дугу от места ее возникновения. При уменьшении напряжения дуга переходит из сжатой формы в диффузную, с равномерным распределением плазмы в пространстве между контактами. Однако, как следует из эксперимента, максимальная скорость перемещения столба дуги соответствует области фаз переменного напряжения, где его величина наибольшая. Отношение измеренной максимальной скорости перемещения столба дуги к измеренным скоростям в начале и в конце его перемещения составляют 0,18 и 0,27. Эти значения весьма близки к полученным при расчете.

Таким образом, приведенные выше данные можно рассматривать как подтверждение предположения, что изменение скорости перемещения столба дуги в ВДК с поперечным магнитным полем, когда отключается электрическая цепь при токах короткого замыкания, связано с нелинейностью зависимости напряжения от тока дуги, находящейся в сжатой форме. При этом максимальная скорость перемещения столба дуги достигается в фазах полупериода переменного напряжения, в которых оно максимально, в результате чего увеличивается коммутационный ресурс ВДК такой конструкции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Slade P. G. The Vacuum Interrupter. Theory, Design und Application / P. G. Slade. CPC Press, 2008. – 510 p.
2. Белкин Г. С. Коммутационные процессы в электрических аппаратах / Г. С. Белкин. – М.: Знак, 2003. – 224 с.
3. Gentsch D. High-Speed Observations of Modes of RMT and AMT Contacts / D. Gentsch, W. Shang // XX Internation Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. – Yalta: Crimea, 2004. – P. 257-260.

Муллин Виктор Валентинович –
кандидат технических наук, генеральный директор
ОАО «НПП «Контакт», г. Саратов

Victor V. Mullin –
Ph. D.,
General Director «NPP Kontakt JSC», Saratov

Фурсаев Михаил Александрович –
доктор технических наук, профессор кафедры
«Электротехника и электроника» Саратовского
государственного технического университета
имени Гагарина Ю.А.

Mikhail A. Fursaev –
Dr. Sc., Professor
Department of Electrical Engineering and Elec-
tronics,
Gagarin Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 17.05.12, принята к опубликованию 16.06.12

УДК 621.365.5

К.Н. Огурцов, Д.Д. Давыдов

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ СВЧ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

Изложены физические основы высокотемпературного СВЧ диэлектрического нагрева. Описаны перспективные технологии применения высокотемпературных СВЧ установок.

Диэлектрик, сверхвысокочастотная электротермия, высокотемпературный нагрев, испарение, конденсация, спекание

K.N. Ogurtsov, D.D. Davydov

HIGH-TEMPERATURE MICROWAVE SYSTEMS

The article describes physical foundations of the microwave electrical technology. We describe the emerging technologies of high-temperature microwave systems.

Dielectric microwave electroheat, high-temperature heating, evaporation, condensation and sintering

Применение СВЧ энергии в технологических целях началось около 70 лет назад. Бытовые СВЧ печи вошли в наш быт и заняли постоянное место на наших кухнях, однако о применении СВЧ энергии в промышленных целях и техпроцессах мы слышим нечасто. Активное внедрение СВЧ энергии сдерживается технологическими (сложность оборудования, нехватка опыта проектирования, отсутствие квалифицированных специалистов), экономическими (дороговизна установок СВЧ диэлектрического нагрева) и психологическими факторами (некоторые люди утверждают, что продукты, обработанные в СВЧ электромагнитном поле, вредны для человека).

Стремление создать новые материалы и модифицировать уже известные приводят исследователей к созданию новых технологий и использованию уже известных в нетрадицион-

ных сферах. Одной из таких перспективных сфер является использование СВЧ диэлектрического нагрева для реализации высокотемпературных технологий, таких как выращивание кристаллов, получение наноматериалов, спекание керамик, получение композиционных и огнеупорных материалов и др. Все вышеперечисленные технологии объединяет необходимость нагрева исходного материала до температур свыше $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, причем зачастую нагрев сопровождается фазовыми переходами.

Среди всех видов нагрева СВЧ диэлектрический нагрев, пожалуй, можно считать наименее исследованной областью с точки зрения получения высоких температур. А ведь СВЧ диэлектрический нагрев позволяет существенно интенсифицировать процессы равномерного нагрева диэлектриков, что, безусловно, сыграет существенную роль в получении новых конструкционных материалов и модификации известных.

Конечно, для создания высокотемпературных СВЧ установок предстоит решить массу вопросов, связанных с теплоизоляцией, вакуумированием, материалами для изготовления рабочих камер, новыми методами расчета установок, измерения диэлектрических свойств при высоких температурах и многое другое, но перспективы, которые открываются перед исследователями в этой области, многообещающие.

Уже сейчас в лабораторных условиях с помощью СВЧ энергии удается получить наноразмерные структуры, спеки керамик и металлокерамик, выращивать кристаллы и получать полупроводниковые материалы, существенно экономя и электроэнергию по сравнению с традиционными способами.

В конце прошлого века было выявлено так называемое «нетепловое» воздействие СВЧ энергии на материалы, которое выражалось в изменении свойств материалов после непродолжительного пребывания в СВЧ электромагнитном поле без явно выраженного нагрева. Так, доказано влияние СВЧ энергии на скорость отверждения эпоксидных компаундов, щелочевпитываемость полисульфона. До этого было обнаружено воздействие СВЧ энергии на биологические объекты. Ускоряются процессы пастеризации и подавления патогенной микрофлоры при меньших температурах, чем при традиционной тепловой обработке.

Самосогласованная краевая задача электродинамики и теплопроводности для высокотемпературной термообработки диэлектриков

Задача проектирования СВЧ электротермических установок для нагрева диэлектрических материалов имеет комплексный характер и находится на стыке электродинамики СВЧ, тепломассопереноса, материаловедения, термомеханики, метрологии, технологии. Процессы в таких СВЧ электротермических установках описываются системой уравнений Максвелла и уравнений тепломассопереноса. Исключая из рассмотрения термообработку небольшого класса веществ, у которых электрофизические параметры зависят от векторов напряженности электрического \mathbf{E} и магнитного \mathbf{H} полей уже в сравнительно слабых полях (ферромагнетики и сегнетоэлектрики), можно ограничиться линейной зависимостью вектора электрической индукции \mathbf{D} от \mathbf{E} и вектора магнитной индукции \mathbf{B} от \mathbf{H} , а так как подвергаемые СВЧ термообработке среды обычно изотропны, запишем материальные уравнения в виде [1]:

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}, \quad \mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}, \quad \mathbf{B} = \mu \mathbf{H}, \quad (1)$$

где ε , μ – абсолютные диэлектрическая и магнитная проницаемости среды; σ – проводимость среды; \mathbf{j} – плотность тока проводимости.

Нагреваемые в СВЧ электротермических установках среды можно отнести к несовершенным диэлектрикам (диэлектрики с потерями), обладающим начальной (структурной) неоднородностью. Обычно структурные неоднородности многочисленны, размеры их много меньше длины волны в среде, а потому в практических приложениях, воспользовавшись теорией смесей [2], заменим неоднородную среду однородной с эквивалентными электрофизическими параметрами.

У большинства сред имеются зависимости относительной диэлектрической проницаемости ε' и тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$ от температуры. Следовательно, при

нагреве таких сред ε' и $tg\delta$ оказываются функциями координат и времени. Теплофизические параметры, входящих в уравнения и граничные условия тепломассопереноса, так же существенно меняются как в процессе нагрева диэлектриков, так и с изменением агрегатного состояния вещества, причем эти изменения достаточно существенны и их необходимо учитывать при математическом моделировании.

В таком случае уравнения Максвелла и теплопроводности в отсутствие сторонних токов и объемных зарядов, при отсутствии массопереноса и перемещения объекта в рабочей камере для капиллярно-пористого материала можно представить в виде [2, 3]

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad (2)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (3)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = 0, \quad (4)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} + \mathbf{v} \nabla \Theta = a_0 \nabla^2 \Theta + \frac{P_{y0}}{c_0 \rho_0}, \quad (6)$$

где a_0 – коэффициент температуропроводности; T – температура объекта; T_0 – температура окружающей среды; \mathbf{v} – скорость транспортировки нагреваемого материала;

$$P_{y0} = 0,5 \omega \varepsilon_0 \varepsilon' tg\delta |\dot{\mathbf{E}}|^2; \quad (7)$$

где ω – круговая частота; ε_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума.

Электромагнитные поля в отдельных областях рабочей камеры сопрягаются на поверхностях раздела сред 1 и 2 с помощью граничных условий

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_2 - \mathbf{H}_1 \cdot \mathbf{n} &= 0, & \mathbf{E}_2 - \mathbf{E}_1 &= 0, \\ \mathbf{n} \cdot \mathbf{D}_2 - \mathbf{D}_1 &= 0, & \mathbf{n} \cdot \mathbf{B}_2 - \mathbf{B}_1 &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

где \mathbf{n} – единичный вектор, направленный из среды 2 в среду 1.

Если среда 1 является идеальным проводником, то

$$\mathbf{E} = 0, \quad \mathbf{n} \cdot \mathbf{B} = 0. \quad (9)$$

Взаимодействие поверхности нагреваемого материала с окружающей средой описывается граничными условиями четырех видов [1]. Для высокотемпературных СВЧ установок необходимо учитывать конвективный, кондуктивный и теплообмен излучением, последний в зонах высоких температур превалирует.

В этом случае граничным условием первого рода задано распределение температурного напора по поверхности тела

$$\Theta(t) = \Theta_0(t), \quad (10)$$

граничным условием второго рода задается плотность теплового потока для каждого элемента поверхности тела как функция времени то есть

$$\frac{\partial \Theta}{\partial n} = f(\tau) \quad (11)$$

(простейший случай $\frac{\partial \Theta}{\partial n} = const$), граничным условием третьего рода задан закон теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой (для высокотемпературного нагрева пользуются законом Стефана-Больцмана)

$$\frac{\partial \Theta}{\partial n} = -\frac{h}{\lambda_0} \Theta. \quad (12)$$

И, наконец, граничным условием четвертого рода – закон теплообмена на соприкасающихся твердых поверхностях

$$\Theta_1 = \Theta_2, \quad \frac{\partial \Theta_1}{\partial n} = \frac{\partial \Theta_2}{\partial n}, \quad (13)$$

где $\Theta_{1,2} = T_{1,2} - T_0$.

Высокотемпературный нагрев может сопровождаться фазовыми переходами: твердая фаза – жидкая, жидкая – газообразная. Такие фазовые переходы наблюдаются при выращивании кристаллов из расплавов и паров, получении наноматериалов из твердого материала конденсационным методом. Переход вещества из одного агрегатного состояния в другое обычно происходит с выделением или поглощением энергии (фазовый переход первого рода), при этом энергия фазового перехода зависит от многих факторов (например, энергия фазового перехода из твердого состояния в жидкое при атмосферном давлении для воды $T_{\text{плавл}} = 0$ °С составляет $\Delta H = 6,013$ кДж/моль, а из жидкого в газообразное $T_{\text{испар}} = 100$ °С $\Delta H = 40,683$ кДж/моль).

При фазовом переходе первого рода температура нагреваемого объекта не изменяется, а подводимая к объекту энергия расходуется на совершение фазового перехода.

Количество теплоты, необходимое для совершения фазового перехода

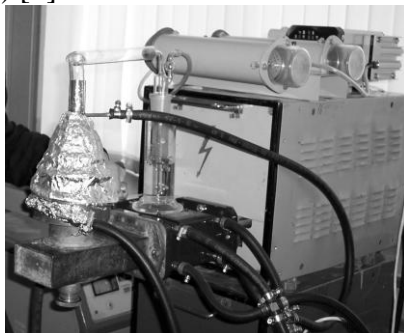
$$Q = mq, \quad (14)$$

где q – удельная теплота фазового перехода.

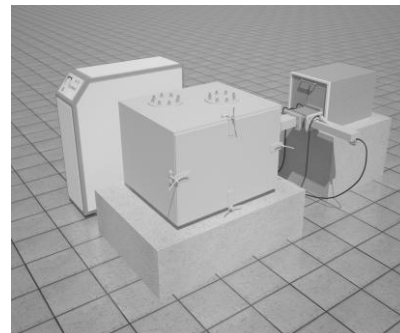
Зная q , можно моделировать нагрев материала с учетом фазовых превращений.

Тепловые процессы нагрева диэлектрика в СВЧ электромагнитном поле могут быть описаны решением краевой задачи теплопроводности (7) и (10)–(14) в приближении заданного электромагнитного поля, в свою очередь найденного из решения краевой задачи электродинамики (2)–(5), (8), (9) с учетом (1). Определив, например, экспериментально зависимости электрофизических и теплофизических параметров нагреваемой среды от температуры, разобьем время термообработки на интервалы τ , в пределах которых эти параметры будем считать не зависящими от времени. Решение краевой задачи (2)–(5), (8), (9) на этом временном интервале определит функцию $P_{\text{уд}}$, что позволяет в явном виде найти решение краевой задачи (6), (10)–(14). Решение краевой задачи теплопроводности дает возможность установить электрофизические параметры диэлектрика на следующем временном интервале. Повторяя расчеты для все новых интервалов времени до достижения заданной или установившейся температуры нагреваемого диэлектрика, можно выяснить динамику процесса, учесть изменение во времени электрофизических и теплофизических параметров диэлектрика, исследовать влияние различных параметров установки (рабочей камеры) на его характеристики, проводить машинный синтез оптимальных СВЧ электротермических установок.

В рамках исследований новых технологий на кафедре АЭУ СГТУ им. Гагарина Ю.А. создана лабораторная установка для исследования высокотемпературных СВЧ процессов (рис. 1) [4].



а



б

Рис. 1. Высокотемпературная СВЧ установка: а – с рабочей камерой на нерегулярном круглом волноводе, б – с рабочей камерой резонаторного типа

Спекание керамических и металлокерамических материалов. Спекание керамических и металлокерамических изделий проводилось в установке с камерами с бегущей и стоячей волной. После спекания диэлектрические свойства полученных материалов существенно изменялись. Образцы, полученные при спекании керамики (оксид цинка), представлены на рис. 2.



Рис. 2. Образцы спеченной в СВЧ электромагнитном поле керамики оксида цинка

Выращивание кристаллов из расплавов и паров. Для выращивания кристаллов оксида цинка использовался спрессованный образец. После нагрева образца до температуры сублимации СВЧ энергия отключалась а на поверхности образца образовывались кристаллы оксида цинка (рис. 3).

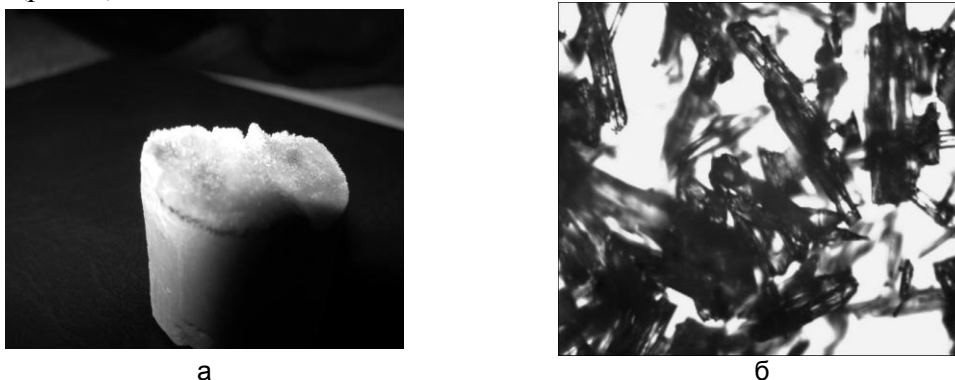


Рис. 3. Образцы кристаллов, полученных в СВЧ электромагнитном поле

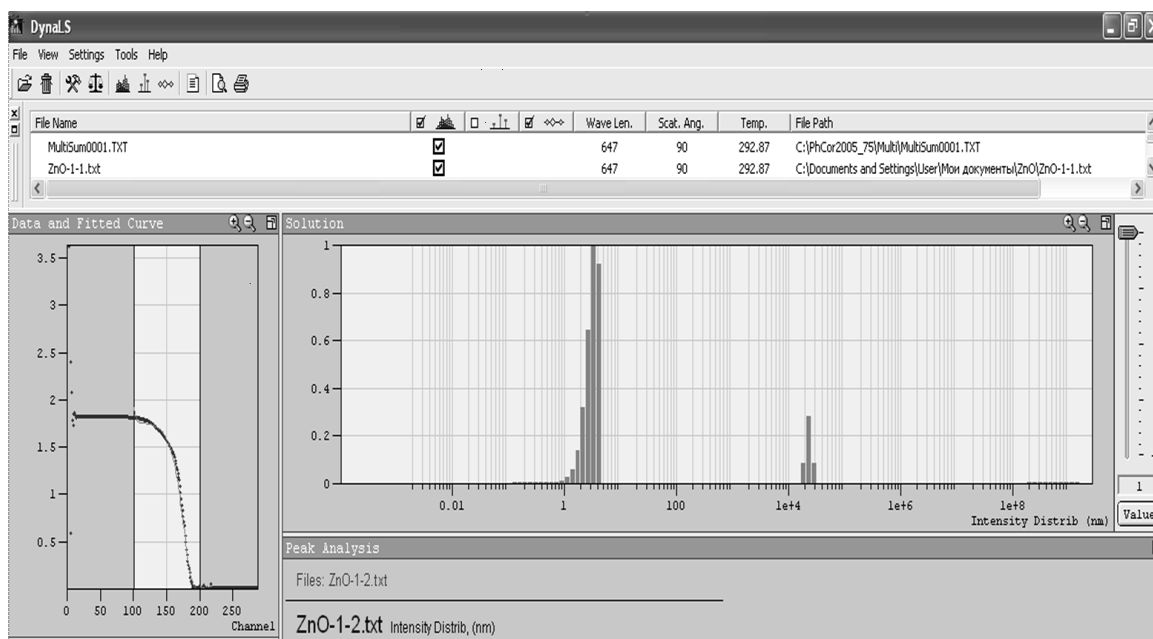


Рис. 4. Результаты гранулометрического анализа суспензии оксида цинка

Получение наноматериалов конденсационным методом. Для получения наноразмерных частиц оксида цинка конденсационным методом спрессованный образец помещался в рабочую камеру с бегущей волной. Вакуумный насос откачивал пары из рабочей камеры. Парогазовая смесь, проходя через водяной затвор в склянке Дрекслея, конденсировалась. Результаты анализа гранулометрического состава полученной суспензии представлены на рис. 4.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Архангельский Ю.С. Установки диэлектрического нагрева. СВЧ установки / Ю.С. Архангельский. – Саратов: СГТУ, 2008. – 343 с.
2. Архангельский Ю.С. Сверхвысокочастотные нагревательные установки для интенсификации тепловых процессов / Ю.С. Архангельский, И.И. Девяткин. – Саратов: Изд. Сарат. ун-та, 1983. – 140 с.
3. Архангельский Ю.С. Математическое моделирование высокотемпературного нагрева диэлектриков с фазовыми переходами / Ю.С. Архангельский, К.Н. Огурцов // Вестник СГТУ. – 2010. – №3(47). – С. 116-119.
4. Огурцов К.Н. Высокотемпературная СВЧ-электротехнологическая установка для получения наноматериалов, монокристаллов и спекания керамических и металлокерамических материалов / Ю. С. Архангельский, В. В. Чернецов // Шестой Саратовский салон инноваций, инноваций и инвестиций, Саратов, 23-25 марта 2011 г.: в 2 ч. / СГАУ. – Саратов, 2011. – Ч. 1. – С. 122.

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

Konstantin N. Ogurtsov – Ph. D., Associated Professor
Head: Department of Automated Electrical-Technological Plants and Systems,
Gagarin Saratov State Technical University

Давыдов Денис Дмитриевич – студент кафедры «Ядерные реакторы и установки» Московского государственного технического университета им. Баумана

Denis D. Davydov – Student
Department of Nuclear Reactors and Plants,
Bauman Moscow State Technical University

Статья поступила в редакцию 14.05.12, принята к опубликованию 13.06.12

УДК 621.313

И.М. Павленко, С.Ф. Степанов

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОГЕНЕРИРУЮЩИХ СИСТЕМ ВЕТРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Рассмотрены проблемы преобразования механической энергии ветроколеса в электрическую. Приведены основные типы генераторов ветроэлектростанций, работающих с переменной частотой вращения ветроколеса. Рассмотрены особенности тихоходных синхронных генераторов с возбуждением от высококоэрцитивных постоянных магнитов.

Ветроэлектростанция, скорость ветра, генератор, мощность, напряжение

I.M. Pavlenko, S.F. Stepanov

FEATURE OF ELECTRICAL GENERATION SYSTEM FOR WIND POWER STATIONS

The paper considers the problem of converting mechanical energy of wind wheel into electrical energy. The main types of wind power generators, working with variable speed of wind wheel are considered. The features of low-speed synchronous generator with excitation from permanent magnets are considered.

Wind power plant, wind speed, generator, power, voltage

Ветер является возобновляемым и неисчерпаемым источником энергии. В сравнении с другими источниками он является одним из самых используемых в настоящее время. С ростом доли возобновляемых источников энергии важное значение приобретает качество энергии, которую они поставляют в сеть [3]. Эта проблема особенно актуальна для ветровых генераторов, поскольку скорость ветрового потока является очень нестабильной величиной, а следовательно, при отсутствии качественного регулирования нестабильными будут выходное напряжение, его частота и в конечном итоге мощность ветрогенератора.

Для того, чтобы оценить степень влияния скорости ветра на выходную мощность ветрогенератора, достаточно привести формулу мощности, которую ветровой поток отдает ветроколесу [3]:

$$P = 0,49 \cdot c_p(\lambda, \delta) \cdot D^2 \cdot V_w^3, \quad (1)$$

где V_w – скорость ветра, D – диаметр ветроколеса, c_p – коэффициент мощности ветроколеса, который зависит от быстроходности λ и установочного угла δ между плоскостью вращения ветроколеса и хордой крыла. В формуле (1) скорость ветра участвует в кубе, поэтому небольшие изменения скорости ветра будут приводить к существенным изменениям мощности ветрогенератора. Для стабилизации выходной мощности ветрогенератора можно использовать большой момент инерции ветроколеса. В этом случае ветроколесо может выступать в роли буфера-накопителя кинетической энергии.

Графики мощностных характеристик ветроэлектростанции в зависимости от скорости ветра имеют вид, представленный на рис. 1, где V_{\min} – минимальная или пусковая скорость, V_n – номинальная или расчетная скорость ветра для ВЭС с аэродинамическим регулированием, V_{\max} – максимальная буревая скорость ветра.

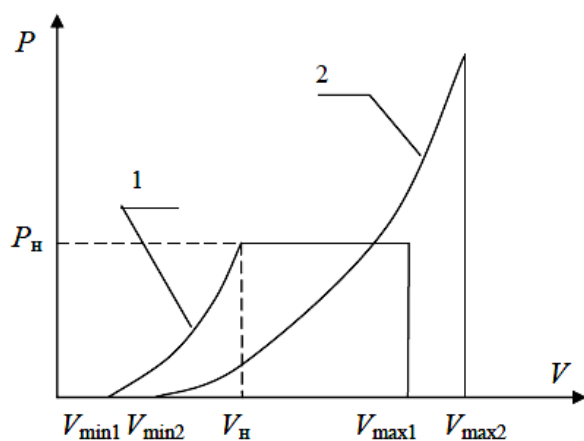


Рис. 1. Мощностные характеристики ветроэлектростанции:

- 1 – с аэродинамическим регулированием,
2 – без аэродинамического регулирования

Аэродинамическое регулирование обеспечивает ограничение генерируемой мощности и частоты вращения ВЭС при скоростях ветра в диапазоне $V_n - V_{\max1}$, однако при этом уменьшается эффективность преобразования энергии ветра в электроэнергию [1]. Использование ВЭС с переменной частотой вращения позволяет максимально использовать энергию ветра в диапазоне скоростей $V_{\min2} - V_{\max2}$ и вырабатывать на 20-30 % больше электроэнергии.

Анализ режимов работы распространенных типов ВЭС мощностью 5-30 кВт позволил установить, что диапазон изменения частоты вращения ветродвигателя изменяется в 3 и более раз, а развиваемая им мощность в 30-40 раз [1]. Поэтому электрогенерирующий комплекс

ветроэлектростанций должен выполнять функции по стабилизации и регулированию параметров, определяющих качество вырабатываемой электроэнергии. При этом электрические генераторы, применяемые на ветроэлектростанциях, должны удовлетворять определенным

требованиям, важнейшими из которых являются: высокая надежность в работе при различных условиях эксплуатации, простота обслуживания, заданный срок службы [2].

Основными преобразователями механической энергии ветроколеса в электрическую являются генераторы постоянного тока, синхронные и асинхронные генераторы. Генераторы постоянного тока применимы на малых ВЭС мощностью не более 10 кВт и не требуют поддержания постоянной частоты вращения ветроколеса. Генераторы постоянного тока малой мощности, генерирующие постоянный ток напряжением 110 - 230 В, имеют КПД 0,79 - 0,87 при удельной массе 11 - 19 кг/кВт [2]. Основное достоинство этих генераторов – простота и гибкость регулирования напряжения, а главный недостаток – наличие щеточно-коллекторного узла, понижающего надежность работы генератора.

В современных ВЭС преобразование энергии ветра осуществляется в основном в системах с генерированием переменного тока. Применение асинхронных генераторов (АГ) в автономных ВЭС перспективно из-за простоты конструкции, высокой надежности в эксплуатации, достаточно простых схем включения на параллельную работу с сетью и другими источниками электроэнергии. Обычно асинхронные генераторы применяются в сетевых ВЭС мощностью до 3 МВт, выпускаемых компаниями АВВ, Vestas и другими. Однако асинхронный генератор может работать и автономно, если подавать в обмотку статора реактивную мощность, например, от батареи конденсаторов. В этом случае к выходу АГ, приводимого во вращение ветродвигателем, параллельно нагрузке в каждую фазу подключают конденсатор.[2] Недостатком ВЭС с асинхронным генератором является то, что при одном и том же ветровом режиме она вырабатывает меньше энергии, чем ВЭС с синхронным генератором, что связано с меньшим коэффициентом мощности, обусловленным большими токами намагничивания, которые приблизительно пропорциональны квадрату напряжения.

Альтернативой конденсаторному возбуждению асинхронного генератора ВЭУ является вентильное возбуждение. По данным исследований, асинхронный генератор с вентильным возбуждением может устойчиво работать под нагрузкой без присоединения конденсатора. [2] Однако в области малых нагрузок, близких к режиму холостого хода, на отдельных элементах схемы возникают перенапряжения, что приводит к необходимости включения на выходе выпрямителя конденсатора.

В современных ветроустановках получили синхронные генераторы (СГ) с обмоткой возбуждения на роторе, так как они не нуждаются в дополнительном источнике реактивной мощности для создания рабочего потока. Мощность возбуждения не превышает нескольких процентов мощности генератора, а частота генерирующего тока определяется только частотой вращения генератора. Синхронные генераторы обеспечивают генерирование переменного тока частотой 50 Гц и напряжением 220-380 В. Удельные массы этого типа генераторов мощностью до и выше 30 кВт составляют соответственно 11-20 и 7-12 кг/кВт, а КПД – 0,72-0,88 и 0,88-0,92. Недостатки СГ – невысокие показатели качества переходных процессов и надежность работы, относительно большие масса и габариты, сложность включения на параллельную работу. В настоящее время на некоторых ВЭС используются СГ традиционной конструкции серии ВЭГ на 2,5, 5, 7,5 и 10 кВт с частотой вращения ротора $n=750$ об/мин [2].

На ВЭС малой мощности целесообразно применять тихоходные бесконтактные генераторы, которые соединяются с ветроколесом непосредственно (без редуктора). К преимуществам этих генераторов относятся надежность, простота конструкции и обслуживания, удобство эксплуатации, автономность, меньший нагрев. Особенностью этих бесконтактных генераторов является отсутствие подвижных контактов, усложняющих конструкцию и снижающих надежность электрической машины. По имеющимся статистическим данным, щеточный контакт при нормальных условиях работы наряду с изоляцией и подшипниковыми узлами вызывает наибольшее число отказов электрических машин. Так, для коллекторных машин постоянного тока в среднем 25 % отказов происходит из-за выхода из строя щеточно-коллекторного узла. [2] Помимо этого, щеточный контакт создает дополнительные механи-

ческие и электрические потери, загрязняет внутренние полости машины графитовой пылью, снижающей электрическую прочность изоляции, значительно сокращает срок службы генератора. Перспективными бесконтактными источниками энергии являются СГ с вращающимися выпрямителями, СГ с постоянными магнитами, СГ с когтеобразными полюсами, индукторные генераторы, асинхронные генераторы с конденсаторным возбуждением и вентильные генераторы.

В большинстве современных конструкций ВЭС применяются синхронные генераторы с возбуждением от высококоэрцитивных постоянных магнитов, безобмоточная конструкция ротора которых более проста в изготовлении.

Увеличение числа полюсов СГ приводит к необходимости увеличения внутреннего диаметра расточки статора, что увеличивает момент инерции ротора и обеспечивает демпфирование динамических колебаний, связанных с порывами ветра. Особый интерес среди генераторов данного типа представляют машины с беспазовой обмоткой на статоре, не содержащем ферромагнитных материалов. В связи с отсутствием переменной составляющей поля в ферромагнитных частях двигателя потери в стали практически отсутствуют.

Особенностью синхронных генераторов на постоянных магнитах является зависимость мощности и выходного напряжения от частоты вращения ротора и нагрузки генератора. Мощность генератора на постоянных магнитах [1] определяется по формуле

$$P_r = f \sqrt{(1 + \beta) \frac{f^{0,74} + \delta(1 - f^{1,6}) - (1 - \alpha)}{(\beta + f^{1,5})\alpha}}, \quad (2)$$

где f – частота тока статора, α, β, δ – коэффициенты, величина которых находится в диапазоне $\alpha = 0,45 \dots 0,25$, $\beta = 0,5 \dots 0,35$, $\delta = 0,4 \dots 0,15$.

Синхронные генераторы на постоянных магнитах обладают рядом недостатков, наиболее существенными из которых являются сложность регулирования и стабилизации напряжения. Устранение этого недостатка осуществляется с помощью преобразователя частоты со звеном постоянного тока, который особенно удобен для подключения аккумуляторных батарей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лукутин Б.В. Возобновляемая энергетика в децентрализованном электроснабжении: монография / Б.В. Лукутин, О.А. Суржикова, Е.Б. Шандарова. – М.: Энергоатомиздат, 2008. – 231 с.
2. Электрические генераторы для ветроэлектростанций: состояние и перспективы развития / И.М. Павленко и др. // Инновационные технологии в обучении и производстве: материалы VII Всерос. науч.-практ. конф. – Камышин, 2010. – Т.4. – С. 77-80.
3. Franquesa M. Kleine Windräder: Berechnung und Konstruktion / M. Franquesa. – Weisbaden Berlin: Udo Pfriemer Buchverlag in der Bauverlag, 1989. – 175 s.

Павленко Ирина Михайловна – ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Irina M. Pavlenko – Assistant
Department of Power Supply of Industrial Enterprises,
Gagarin Saratov State Technical University

Степанов Сергей Федорович – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Sergey F. Stepanov – Dr. Sc., Professor
Department of Power Supply of Industrial Enterprises,
Gagarin Saratov State Technical University

УДК 621.9.048.7; 621.37

Н.В. Протасова, И.П. Гришина, В.М. Таран, А.В. Лясникова

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АКТИВАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ ОСНОВЫ ДУГОВЫМ РАЗРЯДОМ В ПРОЦЕССЕ НАПЫЛЕНИЯ НА АДГЕЗИОННО-КОГЕЗИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАЗМЕННОГО ПОКРЫТИЯ

Исследованы процессы влияния активации поверхности подложки дуговым разрядом в процессе электроплазменного напыления на прочность сцепления покрытия. Экспериментально установлено, что активацию поверхности подложки дуговым разрядом можно проводить с использованием широкого диапазона регулирования силы тока.

Плазменное напыление, термическая активация, прочность, дуговой разряд, локальный нагрев

N.V. Protasova, I.P. Grishina, V.M. Taran, A.V. Lyasnikova

RESEARCH THE EFFECT OF ACTIVATION SUBSTRATE BY ARC DISCHARGE DURING THE SPRAYING ON ADHESION-COHESION CHARACTERISTICS OF PLASMA COATINGS

The processes influence the activation of the substrate surface by arc discharge during electroplasma spraying on adhesion of the coating was research. Experimentally established that activation of the substrate surface by arc discharge can be carried out with using a wide regulation range of the amperage.

Plasma spraying, thermal activation, strength, arc discharge, the local heating

Целью данного исследования являлось совершенствование технологии плазменного напыления порошковых покрытий, в частности применительно к требованиям производства изделий машиностроения и электровакуумных приборов.

Покрытия на изделиях машиностроения и электронной техники должны обладать определенными свойствами, такими как износостойкость, определенная пористость и адгезивно-когезионные характеристики, эмиссионность или антиэмиссионность и т.д. При нанесении таких покрытий необходимо исключить изменение химического состава и структуры материалов, а также насыщение их газами (для изделий электронной техники), что достигается напылением покрытий в вакуумных камерах с контролируемой средой.

При изготовлении электровакуумных приборов и некоторых изделий машиностроения покрытия наносятся в основном не на отдельные детали, а на узлы, выполненные из материалов малой толщины, имеющие сложную конфигурацию и низкую механическую прочность. К сожалению, при обычных методах плазменно-дугового напыления на такие изделия прочность сцепления является часто невысокой. Связано это с тем, что используемые методы подготовки поверхности основы не обеспечивают необходимой степени их активации, а в некоторых случаях они разрушают обрабатываемое изделие. Эти недостатки сдерживают более широкое использование плазменно-дугового напыления в промышленности.

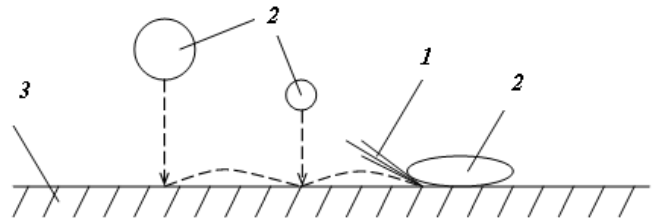


Схема локальной термической активации

С целью повышения адгезионно-когезионных характеристик плазменных покрытий проводится термическая активация. Как правило, в процессе термической обработки разогревается весь объем изделия. При плазменном напылении в контролируемой среде обычно проводят высокотемпературный нагрев. Однако для некоторых изделий это недопустимо.

Идеальным источником термической активации следует считать такой, который позволил бы вводить энергию в контакт «частица – поверхность» в виде остронаправленного импульса 1 в момент удара частицы 2 поверхность 3 (рисунок).

Однако для перемещения такого источника синхронно с поступлением частиц на напыляемую поверхность необходимо специальное автоматическое устройство управления.

Поскольку процесс взаимодействия протекает достаточно быстро ($10^{-3} \dots 10^{-4}$ с), и поступления частиц на напыляемую поверхность имеют вероятностный характер, то создать автоматическую систему для контроля за частицами на современном уровне развития техники практически невозможно. Но целесообразно оценить возможность использования катодного микропятна дугового разряда низкого давления для локальной термической активации напыления отдельной частицы.

Отметим, что дуговой разряд низкого давления обладает свойством внутреннего регулирования перемещения катодного микропятна, которое позволяет использовать его для локальной термической активации напыляемой поверхности. Особенностью этого разряда является то, что его катодное микропятно перемещается по поверхности катода, где наиболее благоприятные условия для эмиссии электронов.

На участке удара разогретой напыляемой частицы происходит резкое повышение температуры, разрушение поверхностных оксидных пленок, структурные изменения материала, т.е. создаются благоприятные условия для эмиссии электронов. Катодное микропятно дугового разряда низкого давления с наибольшей вероятностью перемещается на этот участок поверхности обрабатываемого изделия.

Экспериментальными исследованиями установлено, что плотность тока в микропятне находится в пределах $10^3 \dots 10^6$ А/см². Среднее «время жизни», в течение которого оно находится на участке диаметром 10^{-3} см, составляет $10^{-3} \dots 10^{-5}$ с.

Таким образом, катодное микропятно представляет собой достаточно интенсивный остронаправленный источник нагрева, близкий по своим энергетическим параметрам к импульсному лазерному излучению.

Естественно предположить, что в результате действия катодного микропятна будет происходить локальный высокотемпературный нагрев поверхности основы в зоне напыления, что должно обеспечить прочное сцепление напыляемой поверхности с основой.

Вероятность взаимодействия активных частиц на поверхности основы, характеризующую прочность сцепления покрытия с подложкой, представим выражением

$$p(G/H) = \frac{N(t)}{N_0} = 1 - \exp\left(-\frac{\mathcal{G}t}{\exp(E_a/kT_a)}\right), \quad (1)$$

где $p(G/H)$ – условная вероятность; G – событие, состоящее во взаимодействии поступающих на поверхность подложки частиц с активными частицами подложки; H – гипотеза о поступлении в активную зону подложки напыляемых частиц; N_0 – число активных зон на поверхности подложки; $N(t)$ – количество частиц N_0 , вступивших во взаимодействие за время t ; \mathcal{G} – частота собственных колебаний атомов; E_a – энергия активации; K – постоянная Больцмана; T_a – температура термической активации.

Принимая закон распределения напыляемых частиц, поступающих на подложку, нормально-круговым (что подтверждается экспериментально), то вероятность $p(H)$ записываем в форме закона Рэлея:

$$p(H) = 1 - \exp\left(-\frac{2N}{r\sigma^2}\right), \quad (2)$$

где r – радиус зоны термической активации, в которой $T_a > T$.

Для определения r рассматривается задача теплопроводности на поверхности полубесконечного тела.

$$\begin{cases} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = 0, \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0,t} = \begin{cases} q, & \text{при } r \leq r_0, \\ 0, & \text{при } r > r_0, \end{cases} \\ T \Big|_{x=\infty,0} = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Решение задачи (3) при условиях $x = 0$ имеет вид

$$\begin{aligned} T(r, \tau) = & \frac{qr_0}{\lambda} \sqrt{\frac{a\tau}{r_0 r}} \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ 2 \operatorname{ierfc} \left[\frac{\operatorname{erfc} \left(\frac{r_c}{r_0} - 1 \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{r_c}{r_0} - \frac{r}{r_0} \right)}{2\sqrt{a\tau/r_0^2}} \right] + \right. \\ & \left. + 2 \operatorname{ierfc} \left[\frac{\operatorname{erfc} \left(\frac{r_c}{r_0} - 1 \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{r_c}{r_0} - \frac{r}{r_0} \right)}{2\sqrt{a\tau/r_0^2}} \right] \right\}, \end{aligned} \quad (4)$$

где r_0 – радиус источника нагрева; r_c – радиус полуограниченного цилиндра, на внутренней поверхности которого действует источник нагрева g ; r – радиус зоны термической активации; a , λ – теплофизические коэффициенты материала подложки; τ – время.

$$q = \eta I_p V_p, \quad (5)$$

где $I_p V_p$ – соответственно ток и напряжение дугового разряда.

Решение задачи (4) для случая $r_c/r_0 \gg 1$ (что справедливо для решаемой задачи) существенно упрощается:

$$T(r, \tau) = \frac{qr_0}{\lambda} \sqrt{\frac{a\tau}{r_0 r}}, \quad (6)$$

Преобразуем выражение (6) следующим образом:

$$\frac{r}{r_0} = \frac{4q^2 a \tau}{\pi^2 \lambda^2 T_{II}^2}, \quad (7)$$

где T_{II} – температура поверхности подложки.

Выделим зону, в которой температура нагрева напыляемой поверхности будет равна или больше температуры термической активации, т.е. обеспечивается условие

$$T(r) = T_{T.a.}, \quad (8)$$

где $T(r)$ – температура нагрева подложки в зоне действия катодного микропятна; $T_{T.a.}$ – температура термической активации напыляемой поверхности, обеспечивающая химическое взаимодействие атомов частицы и поверхности.

Температуру $T_{T.a.}$ в первом приближении можно определить по выражению

$$T_{T.a.} = \frac{E \left(B_r + B_n \right)}{k B_n \left(t + 30 \right)} - \frac{B_r}{B_n} T_{nl}, \quad (9)$$

где E – энергия активации образования химических связей; T_k – абсолютная температура контакта; k – постоянная Больцмана; t – время; B_r, B_n – коэффициент аккумуляции тепла материала и подложки соответственно; T_{nl} – температура плавления материала частиц.

Результаты расчетов $T_{T.a.}$ по выражению (9) для некоторых состояний материалов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Расчетные значения температуры термической активации

Материал		B_r	B_n	E , Дж/моль	T_r , °C	$T_{T.a.}$, °C
частица	подложка					
Ti	Ni	192,49	558,52	215366	1690	924,30
Ti	Cu	192,49	1161,33	169401,5	1690	748,58
Ti	Mo	192,49	654,27	329543,5	1690	1724,48
Mo	Mo	654,27	654,27	329543,5	2630	803,29
Ni	Ni	553,52	553,52	215366	1453	790,75
Mo	Mo	553,52	654,27	329543,5	1453	1939,69

Результатов расчетов зоны нагрева напыляемой поверхности до температуры термической активации $T_{T.a.}$ при воздействии катодного микропятна приведены в табл. 2.

Таблица 2

Расчетные значения зоны нагрева напыляемой поверхности

Материал		$T_{T.a.}/T_{II}$	r/r_0
частица	подложка		
Ti	Ti	0,31	1,75
Ti	Ti	0,29	2
Ti	Ti	0,37	1,5
Mo	Mo	0,17	2,75
Ni	Mo	0,42	1,25

Результаты расчетов показывают, что условие (9) выполняется в зоне размером $(1,25-2,75)r_0$, т.е. диаметр этой зоны равен $(12,5-27,5)$ мкм; поскольку диаметр напыляемых частиц, как правило, выбирается в пределах $(40-100)$ мкм, очевидно, что температурное поле катодного микропятна не полностью покрывает зону химического взаимодействия напыляемой частицы и поверхности подложки. Оценочные расчеты показывают, что при активации катодным микропятном вероятность прочного сцепления покрытия с подложкой равна примерно 0,4.

Для того чтобы происходил локальный нагрев поверхности подложки до высокой температуры, но при этом средняя (интегральная) температура подложки оставалась невысокой, целесообразно использовать импульсный дуговой разряд.

При подаче энергии периодическими импульсами в теле возникают нестационарные тепловые потоки. Если тепловая инерция тела велика по сравнению с длительностью отдельных импульсов, то изменение температуры в точке тела во времени будет в первом приближении происходить так же, как и при неизменной мощности источника нагрева, при условии, что мощность источника будет соответствовать среднему за период следования импульсов значению мощности источника. В этом случае возможно рассматривать отдельно мгновенную температуру точки, обусловленную непосредственно воздействием источника нагрева, действующего в этой точке, и среднюю температуру, которую можно определить усреднением во времени мощности источника нагрева.

В результате температура нагрева в данный момент времени равна сумме мгновенной и средней температур:

$$T_0 = T + \bar{T}, \quad (10)$$

где T_0, T, \bar{T} – соответственно суммарная, мгновенная и средняя температуры.

Таким образом, температура в зоне воздействия дугового разряда будет зависеть от мощности импульсного источника нагрева, а средняя температура подложки – от средней мощности импульсного источника. Особенностью импульсных источников нагрева является то, что их средняя мощность может быть значительно меньше пиковой мощности в импульсе.

В общем случае средняя мощность периодически повторяющихся импульсов определяется выражением

$$\bar{q} = \frac{1}{T} \int_0^T q dt, \quad (11)$$

где \bar{q} – средняя мощность импульсного источника нагрева; q – амплитудное значение мощности источника нагрева; T – период повторения импульсов.

Из выражения (11) видно, что среднюю мощность импульса возможно регулировать изменением амплитуды и длительности периода повторения импульсов.

Изложенные рассуждения о целесообразности применения для термической активации подложки импульсного дугового разряда проверялись экспериментальными исследованиями, которые показали, что активацию поверхности подложки дуговым разрядом можно проводить с использованием широкого диапазона регулирования силы тока. При этом необходимо учитывать, что уменьшение силы тока активирующего дугового разряда приводит к снижению производительности процесса, а с увеличением силы тока повышается средняя температура обрабатываемых изделий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Электроплазменные технологии и оборудование для обработки материалов / В.М. Таран [и др.] // Технология металлов. – 2005. – № 5. – С. 27-32.
2. Лисовский С.М. Проектирование электроплазменных технологий и автоматизированного оборудования / С.М. Лисовский, В.М. Таран, А.В. Лясникова. – М.: Моск. гос. техн. ун-т им. Н.Э. Баумана, 2005. – 256 с.

Протасова Наталия Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Физическое материаловедение и технология новых материалов» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Natalia V. Protasova – Ph. D., Associate Professor
Department of Physical Materials and Technologies of New Materials,
Gagarin Saratov State Technical University

Гришина Ирина Петровна – магистрант кафедры «Биотехнические и медицинские аппараты и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Irina P. Grishina – Graduate
Department of Biotechnical and Medical Devices and Systems,
Gagarin Saratov State Technical University

Таран Владимир Маркович – доктор технических наук, профессор кафедры «Биотехнические и медицинские аппараты и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Vladimir M. Taran – Dr. Sc., Professor
Department of Biotechnical and Medical Devices and Systems,
Gagarin Saratov State Technical University

Лясникова Александра Владимировна – доктор технических наук, заведующая кафедрой «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 Devices and Systems,
Gagarin Saratov State Technical University

УДК 621.311.029

Л.А. Сандалова, М.С. Анкудинова, Е.А. Ларин

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И МЕТОДИКА РАСЧЁТА БЕЗОТКАЗНОСТИ
ПАРОГЕНЕРАТОРОВ ОТОПИТЕЛЬНЫХ ПАРОГАЗОВЫХ УСТАНОВОК**

Изложены методические положения расчета безотказности парогенераторов отопительных парогазовых установок.

Парогазовые установки, парогенераторы, показатели надежности, безотказность

L.A. Sandalova, M.S. Ankudinova, E.A. Larin

**MATHEMATICAL MODEL AND NON-FAILURE OPERATION DESIGN PROCEDURE
STEAM GENERATORS OF THE HEATING STEAM-GAS INSTALLATIONS**

Methodical provisions of calculation of non-failure operation of steam generators of heating steam-gas installations are stated.

Steam-gas installations, steam generators, indicators reliability, non-failure operation

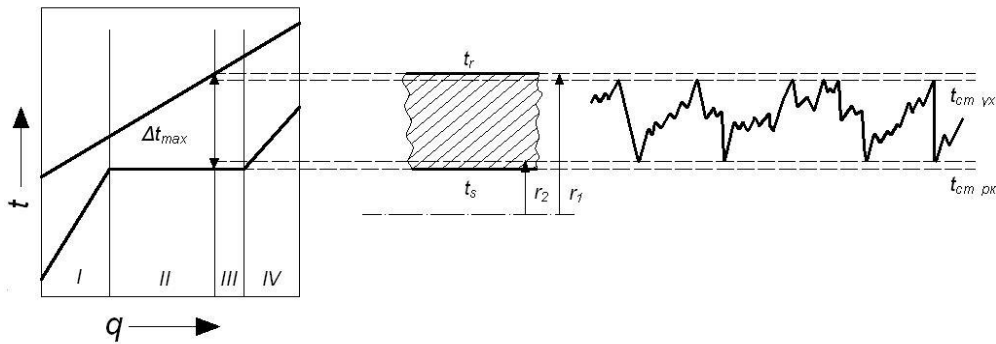
Термодинамическое совершенствование парогазовых установок (ПГУ) идет по пути повышения параметров газа и пара перед газовой и паровой турбинами, усложнения схем с применением двух и трех уровней давления пара, использования комбинированной выработки электрической и тепловой энергии. Все это приводит к снижению надежности работы ПГУ в системах теплоэнергоснабжения. Управление надежностью при проектировании энергетического оборудования с целью оптимизации конструктивных, технологических, схемных и эксплуатационных решений требует разработки моделей и методов расчета единичных показателей надежности (ПН) элементов энергооборудования. Модели надежности элементов энергооборудования и энергоустановок в целом создаются на основе анализа их функционального назначения с учетом действительных факторов и условий работы, достоверности исходной информации, требуемой точности результата оценки надежности. Детерминированные методы расчета ПН элементов энергооборудования, получившие достаточно широкое применение и основанные на расчете относительных или абсолютных запасов прочности и долговечности, не учитывают ряда реальных эксплуатационных факторов. В действительных условиях эксплуатации значения служебных характеристик металла (предел длительной прочности, предел усталости и др.) и действующих (растягивающих, изгибных, кручения, термических и др.) напряжений носят случайный характер из-за случайных нарушений стационарных режимов работы и отклонений характерных размеров элементов вследствие производственных, технологических и эксплуатационных факторов. Поэтому расчет ПН элементов энергооборудования должен базироваться на основе вероятностных методов, позволяющих учесть статистическое рассеяние характеристик прочности и нагруженности с использованием теории случайных величин и случайных функций.

Надёжность ПГ отопительных парогазовых установок (ПГУ) определяется

– термонапряжённым состоянием трубного пучка, температурный режим которого зависит от параметров теплоносителей, конструктивных особенностей ПГ, конструкционных материалов, режимов эксплуатации и ряда других факторов;

– в отдельных зонах ПГ возникают пульсации температур, вызванные особенностями генерации пара и нестационарностью расходов, давлений и температур теплоносителей. Од-

ним из самых опасных с точки зрения разрушения является участок ухудшенного теплообмена испарительной зоны ПГ (см. рисунок). Причиной пульсаций температуры стенки труб ПГ является изменение локальных коэффициентов теплоотдачи из-за высыхания микроплёнки жидкости на внутренней образующей труб испарительной части. Пульсации температур вызывают соответствующие пульсации термических напряжений, которые, суммируясь со стационарными напряжениями, снижают надёжность ПГ. Так как пульсации температур и напряжений носят случайный характер, а служебные характеристики материалов имеют статистическую природу, расчёт показателей надёжности должен базироваться на использовании вероятностных подходов.



В соответствии с феноменологическим подходом к расчету надёжности элементов энергооборудования [1] в основу математической модели расчета одного из важнейших единичных показателей надёжности ПГ, его безотказности, положено следующее:

- ПГ делится на зоны, каждая из которых вносит свой вклад в вероятность отказа. При этом для каждого контура генерирования пара экономайзерная зона (I) содержит четыре участка, испарительная имеет участки развитого кипения (II) и ухудшенного теплообмена (III), перегревательная зона (IV) состоит из двух участков;
- действующие напряжения являются случайными величинами, разброс которых относительно математического ожидания определяется глобальными и локальными факторами. Глобальные неопределённости характерны для всех зон ПГ, определяются местными условиями и связаны с уменьшением толщин стенки из-за технологических факторов, эрозии, коррозии и т.д. Все локальные неопределённости статистически независимы, поэтому для получения общего закона распределения напряжений могут быть использованы свёртки отдельных функций;
- служебные характеристики применяемых материалов (предел длительной прочности и предел выносливости) являются случайными величинами, распределёнными по нормальному или логарифмически нормальному законам;
- оценка безотказности проводится из условия определения вероятности превышения действующих напряжений над допустимыми на каждом расчётном участке. Для определения этого условия используются свёртки дифференциальных функций распределения действующих напряжений и их предельных значений.

Под безотказностью следует понимать вероятность не превышения величины нагружения $X(t) = \{x_1, \dots, x_i, \dots, x_j, t\}$ прочности $Y(t) = \{y_1, \dots, y_j, \dots, y_j, t\}$, то есть попадания случайной функции работоспособности (ФР) $Z(t) = X(t) - Y(t)$ в область положительных значений. Значения аргументов функции $X(t)$ и $Y(t)$ в общем случае определяются их номинальными значениями x_i^H и y_j^H , а также постоянными Δx_i и Δy_i и переменными во времени δx_i и δy_j отклонениями. Если в ПГ выделено m ($m = I, \hat{m}$) участков или модулей, имеющих одинаковую надёжность, а безотказность каждого из них характеризуется n ($n = I, \hat{n}$) ФР, то условие безотказности запишется в виде

$$Z_{n,m}(t) = \{\min[Y_{nk}(t) - X_{nk}(t)]\}_m > 0, m \in \hat{m}; n \in \hat{n}, \quad (1)$$

где k – количество анализируемых зон ПГ.

Таким образом, функция работоспособности $Z_{n,m}(t)$ является случайной функцией, колеблющейся около некоторого случайного стационарного уровня $Z_{n,m}^{cm}(t)$, положение которого определяется постоянными во времени отклонениями аргументов Δx_i и Δy_i от математического ожидания $\bar{Z}_{n,m}(t)$, рассчитываемого по номинальным значениям x_i^H и y_j^H . Дисперсия $\bar{\sigma}_z^2$ определяется по формуле

$$\bar{\sigma}_z^2 = (\bar{\sigma}_z^{\wedge})^2 + (\bar{\sigma}_z^{\Gamma})^2, \quad (2)$$

где $(\bar{\sigma}_z^{\wedge})$, $(\bar{\sigma}_z^{\Gamma})$ – среднеквадратичные отклонения ФР, обусловленные локальными и глобальными неопределённостями, определяемые по формуле

$$\bar{\sigma}_z^{\wedge(\Gamma)} = \sqrt{\sum_{i=1}^{\hat{i}} \left(\frac{\partial Z_{n,m}(t)}{\partial x_i}\right)^2 [\bar{\sigma}_i^{\wedge(\Gamma)}]^2 + \sum_{j=1}^{\hat{j}} \left(\frac{\partial Z_{n,m}(t)}{\partial y_j}\right)^2 [\bar{\sigma}_j^{\wedge(\Gamma)}]^2}, \quad (3)$$

где $\bar{\sigma}_i^{\wedge(\Gamma)}$, $\bar{\sigma}_j^{\wedge(\Gamma)}$ – среднеквадратичные отклонения аргументов x_i и y_j от их номинальных значений x_j^H и y_j^H , которые определяются по коэффициентам вариации.

Случайные колебания ФР $Z_{n,m}(t)$ около $Z_{n,m}^{cm}(t)$ определяются только стационарными случайными функциями изменения расхода $\partial G(t)$, давления $\partial P(t)$, температуры $\partial T(t)$ и описываются законом

$$F\{Z_{n,m}(t) / Z_{n,m}^{cm}(t)\} = (\sqrt{2\pi}\bar{\sigma}_z)^{-1} \exp\{-[Z_{n,m}(t) - Z_{n,m}^{cm} / 2\bar{\sigma}_z^2]\}, \quad (4)$$

где $\bar{\sigma}_z^2 = (\bar{\sigma}_z^{\wedge})^2 + (\bar{\sigma}_z^{\Gamma})^2$, $\bar{\sigma}_z^{\wedge}$, $\bar{\sigma}_z^{\Gamma}$ – среднеквадратичные отклонения ФР $Z_{n,m}(t)$ из-за переменных во времени локальных и глобальных отклонений, рассчитываемых аналогично (3).

В общем случае, когда несколько ФР определяют безотказность, то есть при $\hat{n} > 1$, вероятность безотказной работы запишется в виде

$$P(t) = P\{Z_{n,m}(t) > 0\}_m, \quad m \in \hat{m}. \quad (5)$$

Если ФР $Z_{n,m}(t)$ зависимы, то формула (5) принимает вид

$$P(t) = P\{Z_{1m}(t) > 0\} \prod_{n=2}^{\hat{n}} P\{Z_{n,m}(t) > 0 / Z_{1m}(t) > 0, \dots, Z_{n-1,m}(t) > 0\}. \quad (6)$$

Если ФР $Z_{n,m}(t)$ независимы, то

$$P(t) = \prod_{m=1}^{\hat{m}} \prod_{n=1}^{\hat{n}} P_{nm}\{Z_{n,m}(t) > 0\}. \quad (7)$$

Величину $P_{nm}\{Z_{n,m}(t) > 0\}$ определим по формуле

$$P_{nm}\{Z_{n,m}(t) > 0\} = P\{Z_{n,m}^{cm}(t) > 0\} P_{nm}(t) = p\{Z_{n,m}^{cm}(t) > 0\} \exp\{-\nu_{n,m} t\}, \quad (8)$$

где величина $P\{Z_{n,m}^{cm}(t) > 0\}$ характеризует вероятность того, что случайная величина действующего напряжения не превысит допустимых значений в момент времени t , а величина $P_{nm} = \exp\{-\nu_{n,m} t\}$ соответствует вероятности отсутствия выброса случайной ФР $Z_{n,m}(t)$ в отрицательную область значений в течение времени t . Средняя частота выброса ФР $Z_{n,m}(t)$ в область $Z_{n,m}(t) < 0$ в соответствии с [2] равна

$$\nu_{n,m} = (\sqrt{2\pi}\bar{\sigma}_z)^{-1} S_{nm} \exp\{-[Z_{n,m}(t)]^2 / 2\bar{\sigma}_z^2\}, \quad (9)$$

где S_{nm} – среднеквадратичное отклонение скорости изменения ФР $Z_{n,m}(t)$, определяемое по автокорреляционной функции случайного процесса $Z_{n,m}(t)$ [2].

Для расчёта первого сомножителя в формуле (8) представим стационарные напряжения на любом выделенном участке ПГ случайной величиной с математическим ожиданием $\langle \sigma \rangle$ и дисперсией S_σ^2 .

Величина $\langle \sigma \rangle$ определяется перепадом давлений теплоносителей и температур на стенке и рассчитывается по формуле [3]

$$\langle \sigma \rangle = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2}, \quad (10)$$

Составляющие напряжений от стационарного перепада температур определяются как

$$\sigma_r^1 = 0; \sigma_\theta^1 = \sigma_z^1 = \frac{\alpha E}{1-\nu} \frac{qr_1}{\lambda} \ln \delta \left(\frac{1}{1-\delta^{-2}} - \frac{1}{2 \ln \delta} \right), \quad (11)$$

а составляющие напряжений, обусловленные давлением теплоносителей, рассчитываются по формулам

$$\sigma_r'' = -P_1; \sigma_\theta'' = \frac{\delta^2 + 1}{\delta^2 - 1} P_1 - \frac{2\delta}{r_1(\delta^2 - 1)} P_2, \quad (12)$$

где E – модуль Юнга, МПа; α – коэффициент линейного расширения, 1/К; ν – коэффициент Пуассона; q – тепловой поток, Вт/(м².К); λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(мК); $\delta = r_2 / r_1$, r_2 , r_1 – внешний и внутренний диаметр трубки участка ПГ, м; P_1 , P_2 – давления теплоносителей, МПа.

Дисперсия стационарных напряжений S_σ^2 может быть оценена по коэффициенту вариации ν_σ , определяемому как $\nu_\sigma = S_\sigma / \langle \sigma \rangle$, значение которого находится в пределах 0,05...0,15 [5].

Вероятность того, что для m -го участка ПГ (опуская индекс m) действующие напряжения $\sigma(t)$ превысят допустимые $\bar{\sigma}(t)$, то есть $Z(t) \geq 0$, определится как

$$F[\sigma(t) > \bar{\sigma}(t)] = \iint f(\sigma, \bar{\sigma}, t) d\sigma d\bar{\sigma}, \quad (13)$$

где $f(\sigma, \bar{\sigma}, t)$ – совместная дифференциальная функция распределения вероятностей приведённых напряжений и длительной прочности.

Так как условие работоспособности участка ПГ имеет вид $\xi(t) = \sigma(t) - \bar{\sigma}(t) < 0$, используя его для определения областей интегрирования (13), получим

$$P\{\sigma(t) < \bar{\sigma}(t)\} = 1 - F[\xi(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\xi + \bar{\sigma}} f(\sigma, \bar{\sigma}, t) d\sigma d\bar{\sigma}, \quad (14)$$

В случае, если величины σ и $\bar{\sigma}$ распределены по нормальным законам, вероятность безотказной работы запишется в виде

$$P\{\sigma < \bar{\sigma}, t\} = 0,5 - \phi[(\langle \sigma(t) \rangle - \langle \bar{\sigma}(t) \rangle) / \sqrt{S_\sigma^2(t) + S_{\bar{\sigma}}^2(t)}], \quad (15)$$

где $\phi[\beta]$ – функция Лапласа, определяемая по [4]; $\langle \sigma(t) \rangle$, $\langle \bar{\sigma}(t) \rangle$, $S_\sigma^2(t)$, $S_{\bar{\sigma}}^2(t)$ – соответственно, математические ожидания и дисперсии действующих стационарных и предельных напряжений в момент времени t .

Наряду со стационарными напряжениями трубный пучок испарительной зоны ПГ испытывает переменные термические напряжения, обусловленные пульсациями температур. Наибольший размах температурных пульсаций достигается на участке ухудшенного теплообмена и обусловлен поочередным омыванием внутренней стенки трубки ПГ кипящей водой и паром (рисунок). Максимальное значение температурных пульсаций не превышает значения $\Delta t_{\max} = t_r - t_s$, где t_r – температура греющей среды (продуктов сгорания после газовой турбины ПГУ) в соответствующей зоне ПГ; t_s – температура насыщения, °С. Размах температурных пульсаций определяется условиями теплопередачи и рассчитывается по формуле

$$\Delta t_{II} = \frac{\Delta t_{\max} (\alpha_2^* - \alpha_2) (R_1 + R_{cm})}{1 + (\alpha_2^* + \alpha_2) (R_1 + R_{cm}) + \alpha_2^* \alpha_2 (R_1 + R_{cm})^2}, \quad (16)$$

где α_2^* , α_2 – коэффициенты теплоотдачи при ухудшенном теплообмене и режиме развитого кипения, Вт/(м².гр); R_1 , R_{cm} – термические сопротивления теплоотдачи от газа к стенке и сопротивление стенки, (м².гр)/Вт.

Так как величина $\Delta t_{II} < \Delta t_{\max}$, то амплитуда температурных напряжений $\sigma_a < \sigma_a^{\max}$, значения которых определяются как

$$\sigma_a = \frac{\alpha E}{1-\nu} \frac{\Delta t_{II}}{2}; \quad \sigma_{\max} = \frac{\alpha E}{1-\nu} \frac{\Delta t_{\max}}{2}. \quad (17)$$

Учитывая, что $0 < \sigma_a < \sigma_a^{\max}$, можно считать, что случайная величина σ_a распределена по усечённому закону Рэлея с параметрами ε и ε_{σ_2} , то есть

$$f(\sigma_a) = \frac{\varepsilon \sigma_a}{S_{\sigma_a}^2} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_a}{S_{\sigma_a}}\right)^2\right], \quad (18)$$

где $\varepsilon = [1 - \exp(-\sigma_{a\max}^2 / 2S_{\sigma_a}^2)]_{\sigma_{a\max}}$ – параметр усечения, определяемый из условия нормировки

$$\int_0^{\sigma_{a\max}} f(\sigma_a) d\sigma_a = 1.$$

При работе металла труб ПГ в условиях воздействия коррозионной среды и высоких температур воспользуемся наиболее общим выражением кривой усталости в виде

$$N = \begin{cases} N_1 (\sigma_{-1} / \sigma_3)^{m_1} \text{ при } \sigma_3 \geq \sigma_{-1}; \\ N_1 (\sigma_{-1} / \sigma_3)^{m_2} \text{ при } \sigma_3 < \sigma_{-1}, \end{cases} \quad (19)$$

где σ_3 – эквивалентная амплитуда напряжений, приведённая к симметричному циклу, вычисляемая по формуле $\sigma_3 = \sigma_a + \psi \bar{\sigma}$, МПа; ψ – коэффициент влияния асимметрии цикла на эквивалентную амплитуду напряжений, $\psi = 0,03 \dots 0,3$ [6]; σ_{-1} – предел выносливости, МПа; N_1 – база испытаний; m_1 , m_2 – постоянные показатели степени.

Расчёт на усталость можно проводить, сравнивая эквивалентные амплитуды σ_3 , приведённые к симметричному циклу, с пределом выносливости или путём сравнения рабочих амплитуд напряжений σ_a с предельными значениями. Воспользуемся вторым подходом. При этом предельная амплитуда напряжений определится как сумма $\sigma_{a0} = \sigma_{-1} + \psi \bar{\sigma}$. Приняв величины σ_{-1} и $\bar{\sigma}$ случайными и распределёнными по нормальным законам, параметры распределения предельной амплитуды напряжений определим как

$$\langle \sigma_{a0} \rangle = \langle \sigma_{-1} \rangle + \psi \langle \bar{\sigma} \rangle; \quad S_{\sigma_{a0}}^2 = [S_{\sigma_{-1}}^2 - \psi^2 S_{\bar{\sigma}}^2], \quad (20)$$

где $\langle \sigma_{-1} \rangle$, $\langle \bar{\sigma} \rangle$, $S_{\sigma_{-1}}^2$, $S_{\bar{\sigma}}^2$ – соответственно математические ожидания и дисперсии соответствующих случайных величин.

Расчёт вероятности безотказной работы при усталостном нагружении участка поверхности теплообмена ПГ сводится к определению вероятности не превышения амплитуды рабочих напряжений σ_a допустимых значений σ_{a0} . Для получения этой вероятности проинтегрируем плотность вероятности совместной функции распределения случайных величин σ_a и σ_{a0} , умноженную на дифференциалы аргументов по областям их изменения, определяемым неравенствами $-\infty < \sigma_{a0} < \sigma_{a\max}$ и $\sigma_{a0} < \sigma_a < \sigma_{a\max}$

$$P\{\sigma_a < \sigma_{a0}\} = \int_{-\infty}^{\sigma_{a\max}} f(\sigma_{a0}) \left[\int_{\sigma_{a0}}^{\sigma_{a\max}} f(\sigma_a) d\sigma_a \right] d\sigma_{a0}. \quad (21)$$

Подставив (20) в (21) и принимая закон распределения σ_{ad}, σ_a нормальным с параметрами, полученными в (2 и 3), и выполнив интегрирование, после несложных преобразований получим выражение для расчёта вероятности безотказной работы в виде

$$P(\sigma_a < \sigma_{ad}) = \varepsilon \left\{ \exp \left[-\frac{1}{2} \frac{(\langle \sigma_{ad} \rangle)^2 \delta}{S_{\sigma_{ad}}^2 + S_{\sigma_a}^2} (1 - \delta) \right] S_{\sigma_a} * \right. \\ \left. \phi \left[\frac{\langle \sigma_a \rangle - \delta \langle \sigma_{ad} \rangle}{S_{\sigma_{ad}} S_{\sigma_a}} \right] - \phi \left[\frac{\sigma_{a \max} - \langle \sigma_{ad} \rangle}{S_{\sigma_a}} \right] \right\}, \quad (22)$$

где $\delta = S_{\sigma_a}^2 / (S_{\sigma_a}^2 + S_{\sigma_y}^2)$.

Учитывая вклад каждого участка ПГ в общую надёжность, вероятность безотказной работы ПГ определится как

$$P(t) = \{P(\sigma < \bar{\sigma}, t) P(\sigma_a < \sigma_{ad}, t)\}^m, \quad (23)$$

где m – количество выделенных участков в парогенераторе.

Таким образом, разработанная вероятностная модель расчёта безотказной ПГ позволяет выявить влияние термодинамических параметров рабочего тела энергоустановки и конструктивных характеристик ПГ на показатели надёжности ПГ.

С использованием разработанной модели расчетно-теоретическими исследованиями решен ряд задач по оценке влияния различных факторов на показатели надёжности ПГ в составе ПГУ мощностью 110 МВт, выполненной по сложным схемам, обоснованию конструктивных характеристик ПГ, оптимизации схем и параметров рабочих тел отопительных ПГУ.

В таблице приведены результаты расчета коэффициентов готовности парогенераторов с одно-, двух- и тремя уровнями давления пара в паротурбинной части ПГУ.

Значения коэффициентов готовности парогенераторов ПГУ – 110

Показатели надёжности	ПГ с одним уровнем давления	ПГ с двумя уровнями давления	ПГ с тремя уровнями давления
Экономайзерная зона	0,9920	0,9923	0,9930
Испарительная зона	0,9711	0,98	0,9927
Перегревательная зона	0,980	0,981	0,982
Парогенератор в целом	0,945	0,953	0,968

Расчетно-теоретическими исследованиями установлено, что, несмотря на большую теплообменную поверхность нагрева, коэффициент готовности парогенератора выше для более сложных схем.

Выводы

1. Разработана вероятностная модель расчёта безотказности ПГ бинарных ПГУ, учитывающая реальные условия работы парогенератора, служебные характеристики конструкционных материалов и термонапряженное состояние работы металла, термодинамические параметры и расходные характеристики рабочего тела энергоустановки.

2. Математическая модель и методики расчета безотказности парогенератора позволяют решить ряд задач по оценке влияния различных факторов на показатели надёжности ПГ в составе ПГУ, выполненной по сложным схемам, обоснованию конструктивных характеристик ПГ, оптимизации схем и параметров рабочих тел отопительных ПГУ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (ГК 14. 740.11.0107).

ЛИТЕРАТУРА

1. Надёжность теплоэнергетического оборудования ТЭС и АЭС: учеб. пособие для теплоэнергетических и энергомашиностроительных вузов / Г.П. Гладышев, Р.З. Аминов, В.З. Гуревич и др. / Под ред. А.И. Андриющенко. – М.: Высш. шк. 1991. – 303 с.

2. Надёжность систем энергетики. Терминология. Сб. рекомендуемых терминов. – М.: Наука, 1980. – Вып. 95. – 28 с.

3. Надежность систем энергетики и их оборудование: справочник / Г.Н. Антонов и др.; под общ. ред. Ю.Н. Руденко. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 480 с.
4. Гнеденко Б.В. Математические методы в теории надежности / Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляев, А.Д. Соловьев. – М.: Наука, 1985. – 524 с.
5. Китушин В.Г. Надежность энергетических систем / В.Г. Китушин. – М.: Высш. шк., 1984. – 256 с.
6. Ларин Е.А. Методы и модели расчета и обеспечения надежности комбинированных теплоэнергетических установок и систем / Е.А. Ларин // Вестник СГТУ. – 2004. – №3(4). – С. 44-57.

Сандалова Лидия Александровна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплоэнергетика» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Lidia A. Sandalova – Ph.D., Associate Professor
Department of Heat-Power Engineering,
Gagarin Saratov State Technical University

Анкудинова Мария Сергеевна – аспирант кафедры «Теплоэнергетика» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Mariya S. Ankudinova – Postgraduate
Department of Heat-Power Engineering,
Gagarin Saratov State Technical University

Ларин Евгений Александрович – кандидат технических наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Evgeny A. Larin – Ph. D., Professor
Department of Heat-Power Engineering,
Gagarin Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 17.05.12, принята к опубликованию 16.06.12

УДК 621.365

Ж.С. Синицына

ВЫРАЩИВАНИЕ МОНОКРИСТАЛЛОВ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СВЧ УСТАНОВКЕ БЕЗ ПРЕРЫВАНИЯ РОСТОВОГО ПРОЦЕССА

Проанализированы методы выращивания монокристаллов. Предложен вариант конструкции высокотемпературной СВЧ установки без прерывания ростового процесса для выращивания монокристаллов.

Монокристаллы, выращивание монокристаллов, методы выращивания

J.S. Sinitsyna

SINGLE-CRYSTAL GROWTH IN THE HIGH MICROWAVE INSTALLATION WITHOUT INTERRUPTING THE GROWTH PROCESS

The methods of growing single crystals. A variant of the design of microwave high-install without interrupting the growth process for growing single crystals.

Single crystals, growing single crystals, methods of growing

Одни из самых выдающихся достижений науки и техники ознаменованы использованием кристаллов минералов, их уникальных свойств: оптических, пьезоэлектрических, полу-

проводниковых и прочих. Самые первые в России корунды тоже были изначально синтезированы с целью применения их в науке: в точном приборостроении, часовой промышленности и т.д. В 1936 году заработала первая в России установка по выращиванию корундов, а вскоре было налажено непрерывное производство. Первым промышленным методом получения корундов (а также шпинели) является метод Вернейля – тугоплавких оксидов и солей, легированных примесями [3].

Французский химик Огюст Вернейль начал свои опыты по выращиванию минералов еще в конце XIX века, но официальным годом рождения первых синтетических корундов считается 1905 год. Позже появились и другие методы выращивания монокристаллических структур.

Методы Стронга-Штёбера и Наккена чаще всего используют для выращивания крупногабаритных кристаллов легкоплавких органических веществ (нафталина размером 20-50 см, бифталата калия размером 1-20 см). Методы Бриджмена-Стокбаргера и Киропулоса – кристаллов неорганических солей (NaCl и KCl размером 20-90 см). Методы Чохральского и зонной плавки – кристаллов, металлов и полупроводников (Ge, Si, GdAs, ZnAs размером 1-50 см). Метод Степанова – металлических кристаллов сложной формы (труб из Al и лопаток турбин размером до 1 м). Чтобы получить корунд красного цвета (рубин), добавляют к порошку окиси алюминия окись хрома; синего цвета (сапфир) – добавляют окись железа и титана. Никель окрасит корунд в желтый цвет. Используя подобие метода Чохральского, получают шпинель с 1920-х годов, для этого используют окись магния и окись алюминия. Шпинели обычно придают сапфирово-голубую или зеленую окраску [1-5].

В настоящее время отечественной технологии выращивания монокристаллов позволяет получать кристаллы диаметром до 50 мм с длиной до 3 м. Часто выращивание кристаллов производится на установке «Кристалл-3».

Однако достигнутый технический уровень не удовлетворяет запросам рынка, нужно, чтобы выращенные монокристаллы соответствовали потребностям некоторых отраслей технической промышленности. В частности, это касается лазерной промышленности. Создать активные лазерные элементы производства невозможно без кристаллов ИАГ: Nd диаметром 80 мм и более, длиной более 300 мм [4]. Необходимо новое оборудование для выращивания монокристаллов иттрий-алюминиевого граната, удовлетворяющего следующим требованиям:

- диаметр ростовой камеры установки, мм, не менее 800;
- диаметр тигля, мм, не менее 150;
- скорость вращения штока, об./мин – от 0 до 100;
- максимально допустимое биение штока, мм, не более 0,1;
- мощность транзисторного преобразователя частоты, кВт, 100;
- гарантированное время безотказной работы, ч, не менее 1000;
- установка должна быть оборудована системой досыпки тигля шихтой без прерывания ростового процесса;
- установка должна быть оснащена системой управления технологического процесса, выполненной на современной элементной базе и позволяющей реализовывать различные варианты ведения ростового процесса.

Многие установки для выращивания монокристаллов не оснащены оборудованием системой досыпки тигля шихтой без прерывания ростового процесса, что значительно замедляет производство.

Для решения данной проблемы предлагаем подавать материал через рукав загрузки, не прекращая процесс роста монокристалла.

Схема установки для выращивания монокристаллов методом Чохральского представлена на рисунке.

За счет непрерывной досыпки материала через загрузочный рукав 6 и доставки посредством винта Архимеда 5 ванна 3 с расплавом остается на одном уровне, что позволяет выращивать монокристалл той длины, которая необходима для дальнейшего производства.

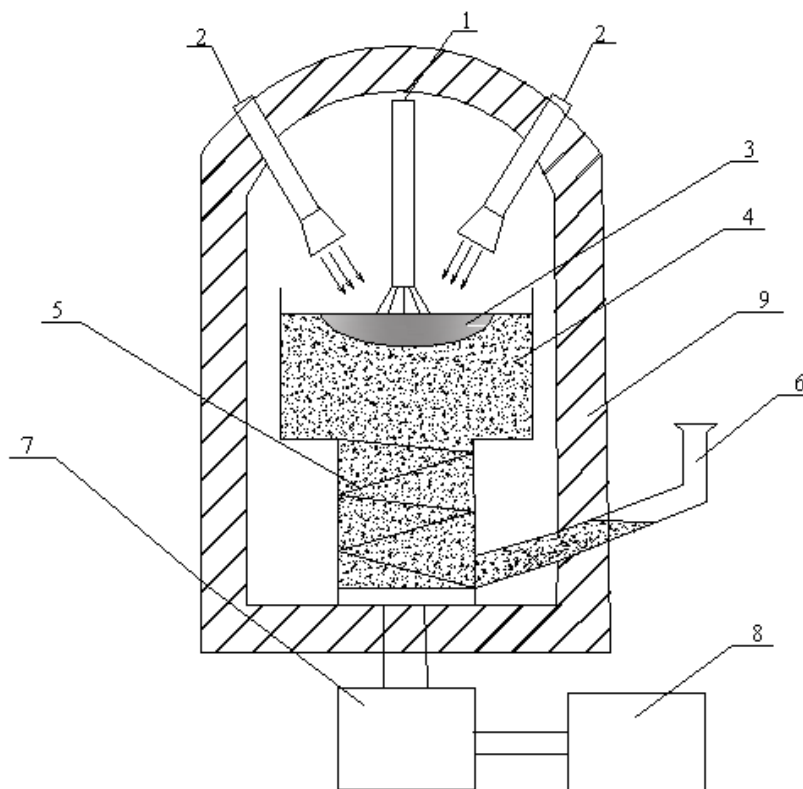


Схема установки для выращивания монокристаллов методом Чохральского:
1 – затравка; 2 – излучатели; 3 – ванна; 4 – материал; 5 – винт Архимеда; 6 – рукав загрузки;
7 – редуктор; 8 – двигатель; 9 – футеровка

Оснащение отечественных ростовых производств оборудованием такого класса позволит обеспечить лазерную отрасль России кристаллами ИАГ, соответствующими мировому уровню технологии. В Белоруссии была принята специальная национальная программа развития производства синтетических кристаллов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бакли Г. Рост кристаллов: пер. с англ. / Г. Бакли. – М.: Изд-во иностр. лит., 1954. – 184 с.
2. Лодиз Р. А. Рост монокристаллов: пер. с англ. / Р.А. Лодиз, Р.Л. Паркер. – М.: Мир, 1973. – 540 с.
3. Маллин Д. Кристаллизация: пер. с англ. / Д. Маллин. – М.: Metallurgy, 1966. – 342 с.
4. Шубников А. В. Образование кристаллов / А.В. Шубников. – М.– Л.: Изд-во АН СССР, 1947. – 39 с.
5. Шубников А. В. Как растут кристаллы / А.В. Шубников. – М.– Л.: Изд-во АН СССР, 1935. – 175 с.

Синицына Жанна Сергеевна – аспирант кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Janna S. Sinitsyna – Postgraduate Department of Automated Electrical-Technological Plants and Systems, Gagarin Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 18.05.12, принята к опубликованию 17.06.12

С.Ф. Степанов, В.В. Коваленко

**О ВВЕДЕНИИ ЭНЕРГОЭКОЛОГИЧЕСКОГО ПОКАЗАТЕЛЯ
ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ОБЪЕКТОВ
ГАЗОТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ СТРАНЫ**

Рассматриваются вопросы введения энергоэкологического показателя для оценки эффективности работы объектов газотранспортной системы.

Газотранспортные системы, эффективность, условное топливо, экологическое воздействие

S.F. Stepanov, V.V. Kovalenko

**ABOUT INTRODUCTION OF THE POWER ECOLOGICAL INDICATOR
FOR THE ASSESSMENT OF OVERALL PERFORMANCE OF OBJECTS GAS
TRANSPORT SYSTEM OF THE COUNTRY**

Questions of introduction of a power ecological indicator for an assessment of overall performance of objects of the gas transport system are considered.

Gas transmission system, efficiency, reference fuel, ecological influence

Если в начале развития газотранспортной системы страны основное внимание уделялось снижению затрат при транспортировке газа, то в настоящее время вопросы экологического плана заставляют пересмотреть вопросы эффективности работы того или иного вида оборудования или технологического процесса. Постоянно увеличивающиеся платежи за утилизацию отходов производства и штрафы за сверхнормативные выбросы вредных веществ в атмосферу заставляют устанавливать дополнительное довольно дорогостоящее оборудование для обеспечения экологических требований.

Полностью исключить негативное воздействие топливного цикла при транспортировке газа на окружающую среду нельзя. Однако уменьшить влияние всех стадий топливного цикла путем применения природоохранных технологий, обеспечивающих заданную экологическую чистоту производства, вполне достижимо.

Сравнительную оценку эффективности работы газотранспортной системы страны и отдельных ее подразделений в части использования энергоресурсов и влияния на окружающую среду, необходимо (целесообразно) оценивать значением одного специального технико-экологического показателя. Этот вновь вводимый показатель является интегральным показателем, учитывающим как затраты энергоресурсов на транспортировку 1 м^3 газа на 1 км, так и все сопутствующие этому процессу негативные факторы влияния на окружающую среду, связанные с выбросом в атмосферу вредных веществ как по количеству, так и по их составу.

Назовем этот показатель как «*энергоэкологический показатель*» *транспортировки магистрального газа* (ЭЭП).

Показатель формируется на основе, как минимум, трех составляющих:

- α – составляющая, характеризующая энергетические затраты на перемещение 1 м^3 газа на 1 км;
- β – составляющая, характеризующая химическое загрязнение атмосферы при перемещении 1 м^3 газа на 1 км;
- λ – составляющая, характеризующая тепловое загрязнение атмосферы при перемещении 1 м^3 газа на 1 км.

$$ЭЭП = m\alpha + n\beta + k\lambda,$$

где m , n , k – весовые коэффициенты.

Для получения численного значения ЭЭП его составляющие нужно привести или к безразмерным величинам, или к единицам, имеющим одинаковую размерность.

В теплотехнике широко используется понятие условное топливо.

Каждую составляющую ЭЭП (α , β , λ) путем определенных преобразований можно выразить в виде единиц условного топлива.

Это связано с тем, что при сгорании одного кг любого топлива получается определенное количество тепловой энергии и некоторое количество вредных веществ, часть тепловой энергии при этом идет на выполнение полезной механической работы, в нашем случае на перемещение газа по трубопроводу, другая часть выбрасывается с уходящими газами в атмосферу. При этом, зная химический состав топливного газа и технические параметры оборудования, мы можем дать точную количественную оценку: сколько и каких образуется вредных веществ, сколько получается килокалорий тепловой энергии, сколько ее превращается в механическую работу, а сколько выбрасывается в атмосферу с уходящими отработанными газами. Поэтому и количество получаемой тепловой энергии, и количество вредных выбросов мы можем сопоставить с определенным количеством сгоревшего топлива. То есть, другими словами, зная, сколько выбрасывается веществ в атмосферу, можно сказать какому количеству сгоревшего топлива это соответствует и тем самым выразить ЭЭП в кг условного топлива.

Определение условного топлива в настоящее время трактуется как некое гипотетическое топливо, теплотворная способность которого равна 7000 ккал на кг веса. Для нашего случая понятие условного топлива необходимо расширить. Это не только тепловой эквивалент 7000 ккал на кг сгоревшего топлива, но и строго определенное количество углекислого газа, окислов азота и т.д. которые образуются при сгорании одного кг топлива. Эти величины можно взять из процесса сгорания наиболее экологически чистого газа одного из месторождений страны. Определить параметры наиболее эффективного и оптимизированного процесса его сжигания, при котором в наибольшей степени проявляется теплотворная способность топлива и образуется минимальное количество вредных веществ. Вычислить для этого случая энергоэкологический показатель и взять его за эталон. Рассчитывая ЭЭП для каждого вида газосжигающего оборудования компрессорной станции магистрального газопровода и сравнивая его с эталонным ЭЭП, можно будет оценить эффективность работы КС с точки зрения затрат энергоносителей на транспортировку газа и влияния на окружающую среду.

Минимальное значение данного показателя будет говорить об эффективности работы системы транспортировки газа и минимальном воздействии на окружающую среду.

Показатель α , характеризующий энергетические затраты на перемещение 1 нм^3 газа на 1 км, прямо выражается через ккал и далее в кг условного топлива.

Показатель λ определяет количество выброшенных ккал теплоты с уходящими газами. Поэтому он также может быть выражен через кг условного топлива. Т.е. это такое количество топлива, которое сгорело в ГПА, не совершая никакой полезной работы. Эти два показателя говорят о фактическом количестве израсходованного топлива и КПД установки.

Коэффициент β характеризует, прежде всего, какое топливо мы используем, а также условия и режим сгорания топливного газа в ГПА и эффективность работы очистных сооружений.

Зная состав используемого топливного газа и оптимальные условия его сгорания, мы сможем определить удельное значение образования вредных веществ при сгорании 1 нм^3 топливного газа. Полученное значение будет соответствовать минимально возможному уровню коэффициента β . Если у реального объекта уровень выбросов будет выше, то это будет говорить о неоптимальном режиме работы оборудования. То есть данный показатель β , выраженный в кг условного топлива, показывает, сколько сгорело бы кг условного топлива, в установке без очистных сооружений, чтобы образовалось такое количество вредных выбросов.

При этом следует учитывать, что в процессе сгорания топливного газа образуется целый ряд вредных веществ, отличающихся количественным составом и имеющих разную химическую формулу. Для вычисления показателя β необходимо их выразить в виде приведенных масс к какому-либо одному химическому соединению. При этом следует учитывать, что каждое вещество обладает разной степенью вредного влияния на окружающую среду.

Величины приведенных масс выброса загрязняющих веществ определяют по формулам:

$$m_1 = \sum_{i=1}^N A_i M_i;$$

где A_i – показатель относительной агрессивности образующегося вредного вещества, усл.кг/т. усл. топлива; M_i – массы образующихся загрязняющих веществ; i – количество видов загрязняющих веществ.

Значения величины A для некоторых веществ, выбрасываемых в атмосферу, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Вещество	A, усл.т/т
Окись углерода	1
Сернистый ангидрид SO ₂	22
Серная кислота SO ₃	49
Окислы азота в пересчете (по массе) на NO ₂	41,1
3-4-бенз(а)пирен	12,6 · 10 ⁵
Сажа без примесей	41,5
Пятиокись ванадия	1225

Примечание. Указанные значения A соответствуют случаю выбросов примесей в зонах с количеством осадков свыше 400 мм в год. В более засушливых районах эти значения следует увеличить в 1,2 раза для всех твердых аэрозолей.

Зависимость удельных масс образующихся загрязняющих веществ от вида топлива приведена в табл. 2.

Таблица 2

Вредное вещество	Твердое	Газообразное	Жидкое
NO _x	250	150	200
SO _x	2500	-	1500
CO	3000	100	140
Твердые частицы	3000	-	50
То же	-	-	20

Для снижения величины вводимого показателя (ЭЭП) на действующих КС МГ необходимо разрабатывать мероприятия по повышению эффективности работы газоперекачивающего оборудования, применять менее энергоемкие технологии при обеспечении эксплуатации КС и участков МГ, устанавливать специальное оборудование для уменьшения химических выбросов в атмосферу и снижать температуру уходящих газов от работающих ГТУ.

Сокращение выбросов загрязняющих веществ при эксплуатации КС МГ предполагает, прежде всего, разработку программ по контролю за каждым видом выбросов.

Все три показателя вводимого ЭЭП в определенной степени взаимосвязаны. Так, для повышения КПД ГПА разработчики увеличивают температуру в камере сгорания. Однако это приводит к увеличению эмиссии NO_x, но при этом снижаются выбросы CO₂ и CO.

Основные направления, которые позволяют снизить эмиссии NO_x, CO, CH₄ и CO₂, включают:

- разработку и внедрение новых типов малотоксичных ГТУ;
- модернизацию камер сгорания эксплуатируемых ГПА;

- исследования по влиянию режимных и эксплуатационных факторов;
- исследования процессов рассеивания и трансформации выбросов в атмосфере;
- мониторинг выбросов и состояния атмосферы;
- создание каталитических камер сгорания (эмиссия NO_x менее 10 мг/м^3) [2].

Следовательно, сокращение эмиссии наиболее вредных газов при транспорте газа и уменьшение воздействия на окружающую среду, прежде всего, происходит в рамках снижения энергозатрат.

Внедрение новых малоэмиссионных технологий на транспорте газа является одним из важнейших методов снижения воздействия на окружающую среду.

Применение менее токсичного топлива и лучших очистных сооружений приведет к уменьшению β .

Повышение КПД установки приводит к уменьшению значений α и λ .

При этом следует отметить, что, кроме взаимного влияния на величину каждой составляющей ЭЭП оказывают влияние факторы, не зависящие от других составляющих. Так, расход топливного газа во многом зависит от конструктивных параметров газопровода, геологических характеристик местности пролегания газопровода, интервала расположения КС и ряда других параметров. Выброс тепла с уходящими газами зависит от КПД ГПА, но также зависит от наличия устройств отбора этой теплоты для отопления и горячего водоснабжения.

Поэтому для каждой конкретной КС теоретически должен быть рассчитан минимально возможный ЭЭП. Сравнение реального ЭЭП с минимально возможным (эталонным) позволит в целом судить об эффективности работы технологического оборудования КС и влияния его на окружающую среду.

Стремление получить как можно более низкое значение ЭЭП будет говорить: во-первых, о хорошем использовании топлива, за счет применения высокоэффективного оборудования и соответствующих технологий его работы; во-вторых, о меньшем влиянии на окружающую среду за счет малых выбросов вредных веществ в атмосферу и в-третьих, о хорошо подобранных очистных сооружениях.

Вывод

Предложенный энергоэкологический показатель является интегральным показателем, характеризующим технологические процессы транспортировки магистрального газа с учетом экологического влияния на окружающую среду.

ЛИТЕРАТУРА

1. Поршаков Б.П. Газотурбинные установки / Б.П. Поршаков. – М.: Недра, 1992. – 238 с.
2. Самсонов Р.О. Управление геоэкологическими рисками оптимизация работы КС на магистральных газопроводах / Р.О. Самсонов // Нефтегазовое дело. – 2007. – 12 с.
3. Россия может экономить до трети потребления газа [Электронный ресурс] // <http://www.energieforum.ru>.

Степанов Сергей Федорович – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Sergey F. Stepanov – Dr. Sc., Professor
Department of Power Supply of Industrial Enterprises,
Gagarin Saratov State Technical University

Коваленко Василина Васильевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Vasilina V. Kovalenko – Ph.D., Associate Professor
Department of Power Supply of Industrial Enterprises,
Gagarin Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 14.05.12, принята к опубликованию 13.06.12

Р.Ш. Тарисов**СИСТЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ ТЕМПЕРАТУРЫ КОМПРИМИРОВАННОГО
ГАЗА С ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ
ВЕНТИЛЯТОРОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ**

Описывается способ применения нечеткой логики для улучшения качества регулирования классического ПИ-регулятора в системе стабилизации температуры газа на выходе из АВО при эксплуатации в широком диапазоне изменений климатических условий. Дан сравнительный анализ качества регулирования при использовании в системе классического ПИ регулятора и гибридного регулятора.

Установка охлаждения газа, ПИ регулятор, качество регулирования, нечеткая логика

R.Sh. Tarisov**SYSTEM OF TEMPERATURE STABILIZATION OF COMPRESSED GAS
WITH VARIABLE FREQUENCY DRIVES FAN USING FUZZY LOGIC**

Describes the method of using fuzzy logic to improve the regulation of the classical PI controller in the stabilization system of the gas temperature at the outlet of the air cooler during operation in a wide range of climatic conditions. A comparative analysis of the quality control system for use in a classical PI controller and a hybrid controller.

Gas cooler, PI control, quality control, fuzzy logic

В настоящее время на объектах магистрального транспорта газа происходит интенсивное внедрение частотно-регулируемого электропривода в системах воздушного охлаждения, в частности для стабилизации температуры газа после компримирования [1]. Опыт создания и эксплуатации таких систем показал необходимость применения современных подходов к построению регуляторов для получения требуемого качества переходных процессов. Так, в [3] показано, что жесткий выбор коэффициентов ПИ-регулятора не может обеспечить требуемое качество регулирования в реальных условиях эксплуатации системы, в широком диапазоне изменений климатических условий и режима транспорта газа.

В [5] была рассмотрена одна из методик синтеза адаптивного регулятора на основе метода нечеткого управления Мамдани. В настоящей работе показаны результаты моделирования гибридного ПИ-регулятора, включающего классический ПИ-регулятор, вспомогательный нечеткий регулятор, обеспечивающий адаптацию настроек регулятора к изменениям условий эксплуатации системы.

Функциональная схема системы стабилизации температуры газа с частотно-регулируемым электроприводом вентиляторов аппаратов воздушного охлаждения (АВО) газа представлена на рис. 1.

Сигнал с датчика температуры газа сравнивается с сигналом задатчика. Полученная разность сигналов $\Delta X = X_0 - X$ подается на вход регулятора, который с помощью сигнала $U_{\text{УПР}}$ задает частоту f и напряжение U на выходе преобразователей частоты.

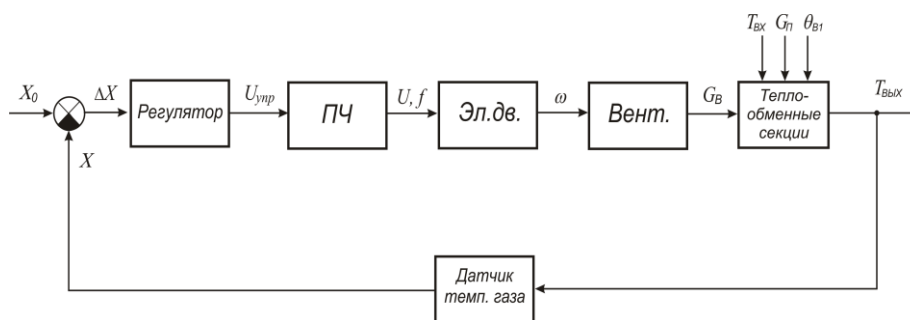


Рис. 1. Функциональная схема системы стабилизации температуры газа с частотно-регулируемым электроприводом вентиляторов

Если в силу каких-либо причин температура газа на выходе АВО газа отличается от заданного значения, то регулятор так изменяет частоту f и напряжение U , чтобы за счет изменения частоты вращения ω и соответствующего изменения расхода воздуха G_B , создаваемого вентиляторами, температура газа $T_{ВЫХ}$ стремилась к заданному значению. Возмущающими воздействиями в системе стабилизации температуры газа являются массовый расход газа G_{II} , его температура T_{BX} на входе АВО, температура θ_B охлаждающего воздуха.

В [2] предложено двигатели, вентиляторы и теплообменные секции, образующие конструктив АВО газа, рассматривать как одно динамическое звено с передаточной функцией $W_{ABO}(p)$. На основании экспериментальных данных эта передаточная функция может быть идентифицирована инерционным звеном первого порядка

$$W_{ABO}(p) = \frac{k_{ABO}}{T_{ABO}p + 1}. \tag{1}$$

где k_{ABO} , T_{ABO} – соответственно коэффициент передачи и постоянная времени АВО.

В [6] было показано, что значение k_{ABO} зависит от значений параметров: массовый расход газа G_{II} , его температура T_{BX} на входе АВО, температура θ_B охлаждающего воздуха.

В результате проведенного эксперимента для диапазонов изменения параметров θ_{B1} (от 8 °С до 20 °С) и T_{BX} (25 °С - 35 °С) при постоянном массовом расходе газа получена зависимость k_{ABO} от этих параметров, которая приведена в таблице.

Полученные результаты положены в основу настройки (базы правил) нечеткого регулятора с входными лингвистическими переменными «Температура газа T_{BX} » и «Температура воздуха θ_{B1} », и выходной переменной «коэффициент k_{ABO} ». Поверхность нечеткого вывода вспомогательного регулятора, полученная в среде MATLAB+ Simulink, показана на рис. 2.

Зависимость k_{ABO} от θ_{B1} и T_{BX}

		Температура газа на выходе из АВО					
		25	27	29	31	33	35
Температура воздуха	8	5,30181	4,40815	3,51449	2,62083	1,72717	0,83351
	10	5,16995	4,27629	3,38263	2,48897	1,59531	0,70165
	12	5,03809	4,14443	3,25077	2,35711	1,46345	0,56979
	14	4,90623	4,01257	3,11891	2,22525	1,33159	0,43793
	16	4,77437	3,88071	2,98705	2,09339	1,19973	0,30607
	18	4,64251	3,74885	2,85519	1,96153	1,06787	0,17421
	20	4,51065	3,61699	2,72333	1,82967	0,93601	0,04235

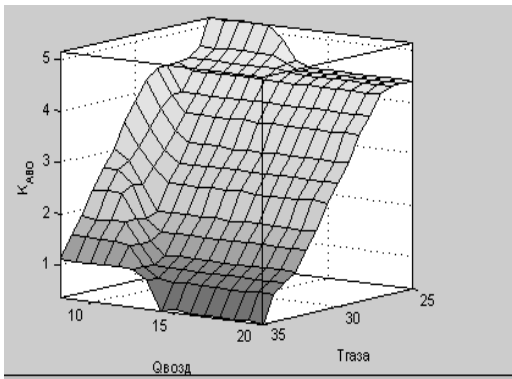


Рис. 2. Поверхность нечеткого вывода

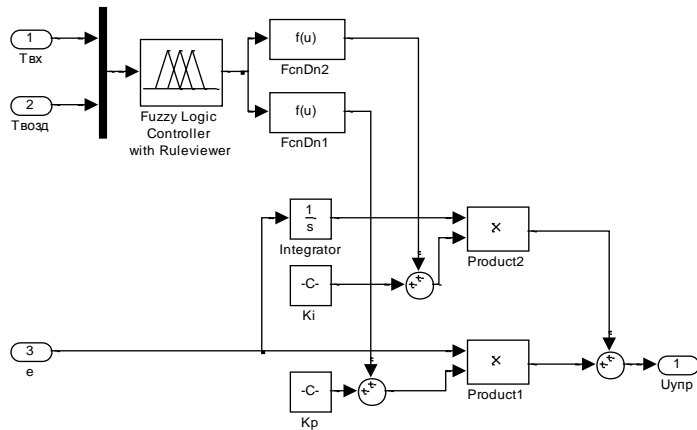


Рис. 3. Модель гибридного ПИ-регулятора с применением вспомогательного нечеткого регулятора

Вывод вспомогательного нечеткого регулятора используется для субоптимальной настройки коэффициентов классического ПИ-регулятора, это дает возможность получения требуемых качеств переходных процессов в системе стабилизации температуры газа при изменяющихся условиях эксплуатации. Модель гибридного ПИ-регулятора, построенная в среде MATLAB, приведена на рис. 3.

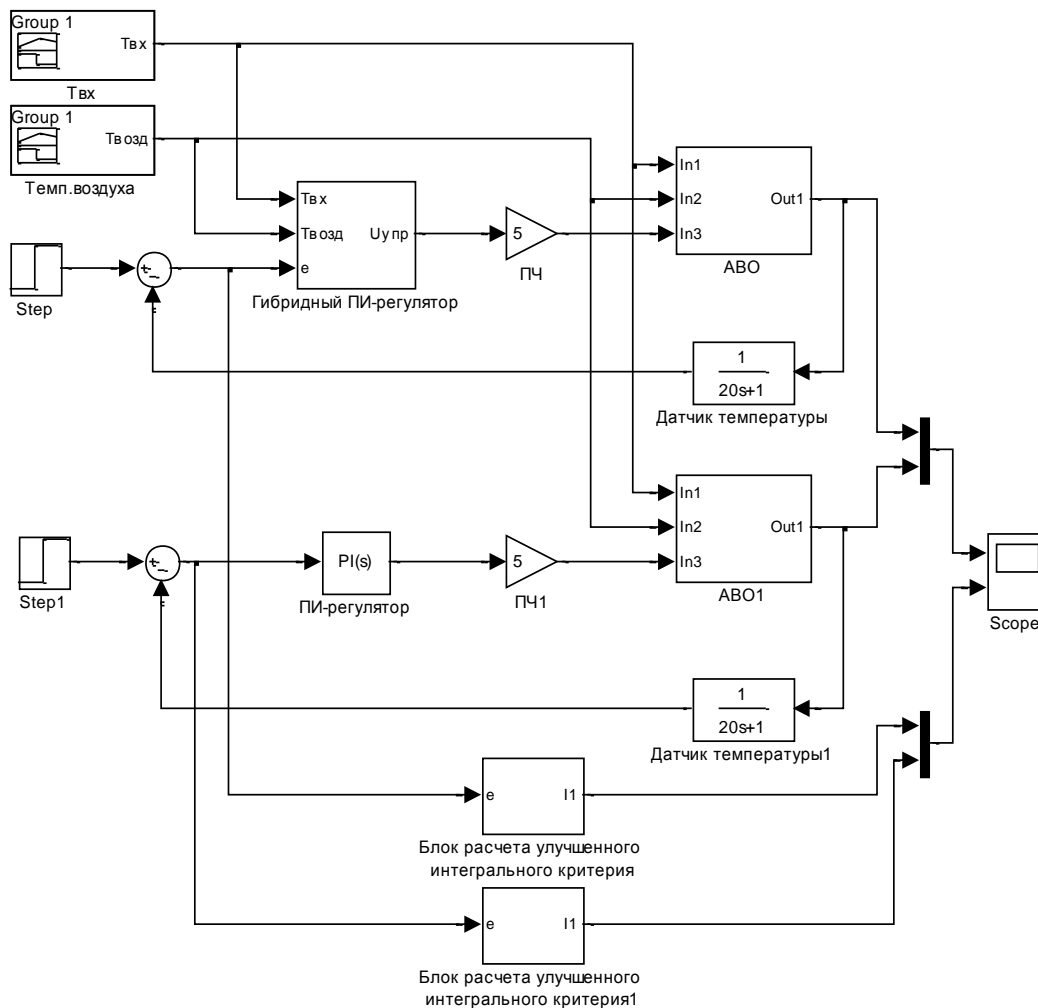


Рис. 4. Виртуальная модель для сравнительного расчета качества переходных процессов системы стабилизации температуры АВО газа

Проведен эксперимент, целью которого было получение сравнительных характеристик качества регулирования в системе стабилизации температуры газа с частотно-регулируемым электроприводом вентиляторов с применением классического ПИ-регулятора и гибридного ПИ-регулятора с вспомогательным нечетким регулятором. Модель в среде MATLAB+ Simulink, используемая в эксперименте, показана на рис. 4.

Настройки классического ПИ-регулятора произведены при средних значениях температуры газа T_{BX} на входе АВО и температуры θ_B охлаждающего воздуха, приведенных в таблице.

В качестве основных критериев оценки качества переходных процессов были выбраны: время переходного процесса, перерегулирование и улучшенный интегральный критерий. Выбор улучшенного интегрального критерия обоснован тем, что при помощи него можно оценить качество переходного процесса не только по быстродействию системы, но и по отсутствию колебательности и перерегулирования в системе [4].

Требования, выставляемые к качеству переходных процессов: перерегулирование не должно превышать 10 % от задания; максимальное время переходного процесса 200 с.

Графические результаты проведенного эксперимента приведены на рис. 5-7.

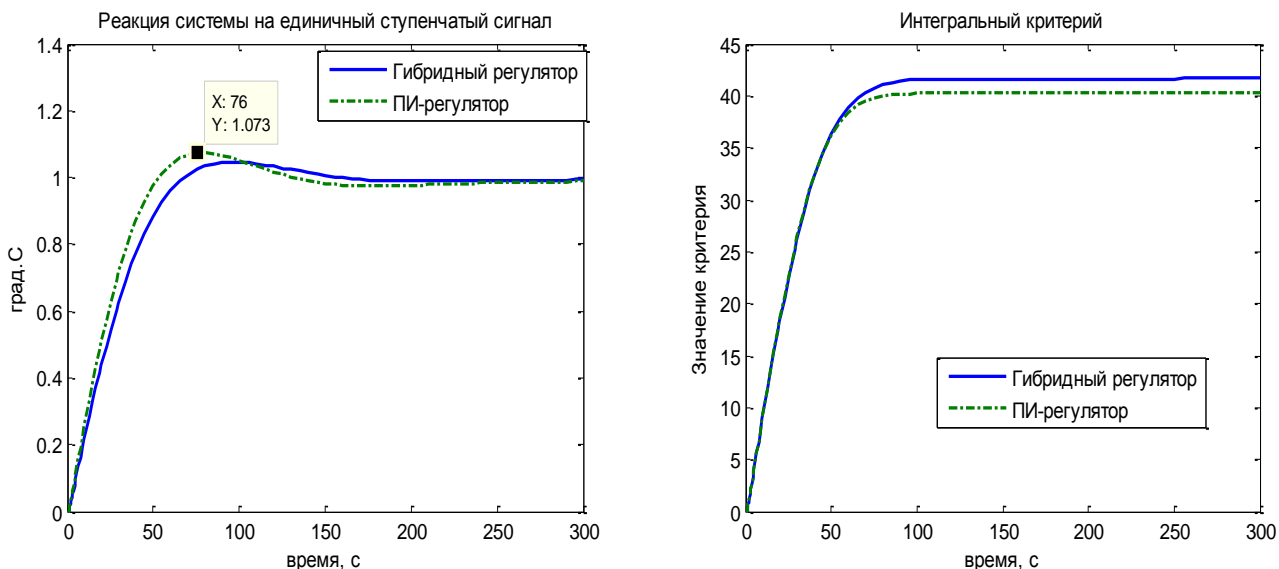


Рис. 5. Реакция системы ступенчатый сигнал и изменение интегрального критерия $\theta_{B1}=14^{\circ}\text{C}$ и $T_{BX}=30^{\circ}\text{C}$

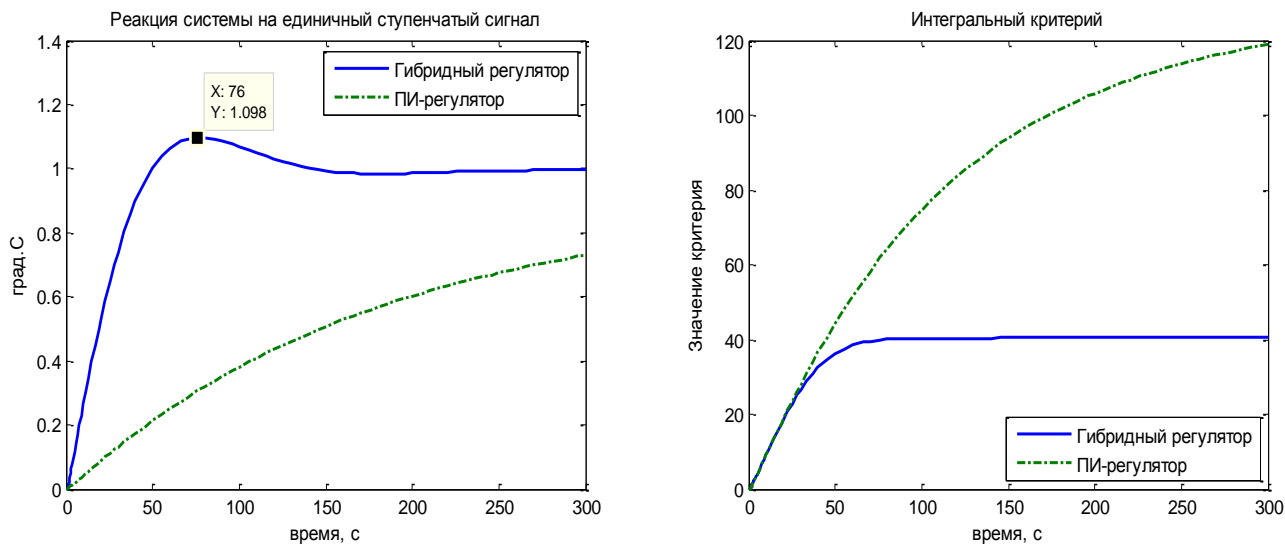


Рис. 6. Реакция системы ступенчатый сигнал и изменение интегрального критерия $\theta_{B1}=20^{\circ}\text{C}$ и $T_{BX}=35^{\circ}\text{C}$

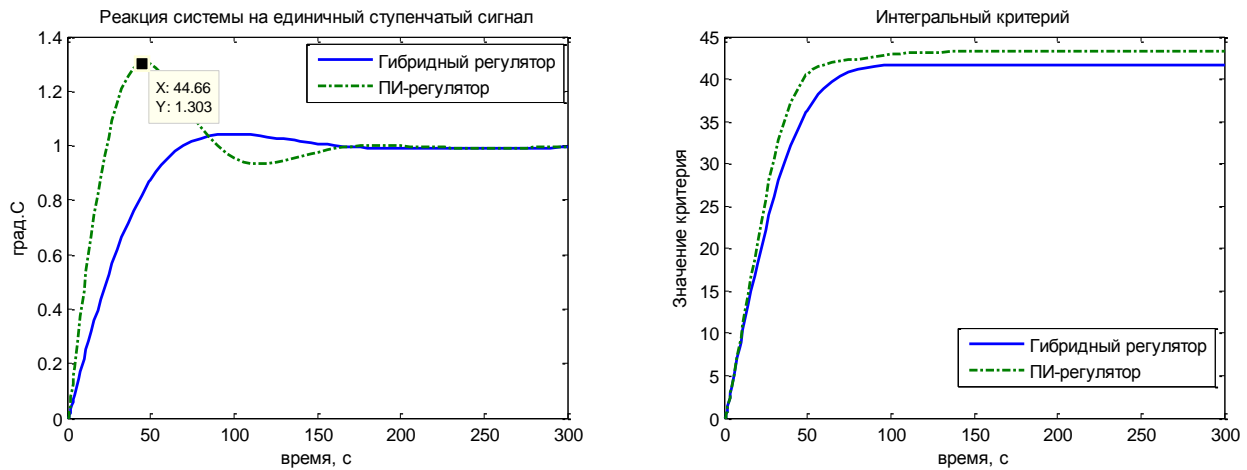


Рис. 7. Реакция системы ступенчатый сигнал и изменение интегрального критерия при $\theta_{B1} = 8^\circ\text{C}$ и $T_{BX} = 25^\circ\text{C}$

Штрихпунктирные линии характеризуют систему с классическим ПИ-регулятором, а сплошные – систему с гибридным регулятором.

Проанализировав полученные результаты, можно сделать следующие выводы:

1. Классический ПИ-регулятор с фиксированной настройкой на усредненные значения k_{ABO} дал удовлетворительные результаты только в некоторой области изменения возмущающих воздействий, при которых регулятор был настроен (рис. 5).

2. При крайних значениях k_{ABO} либо время регулирования значительно превышает заданные (рис. 6) либо перерегулирование превышает требуемые 10% (рис. 7). Менее качественный переходный процесс, в сравнении с системой использующий гибридный регулятор, подтверждается также значением интегрального критерия.

3. Гибридный ПИ-регулятор с нечеткой адаптацией дает удовлетворительное качество регулирования на всем диапазоне изменений возмущающих факторов. Уменьшение интегрального критерия с целью получения более оптимального качества переходных процессов в системе может быть достигнуто за счет дополнительной подстройки нечеткой модели вспомогательного регулятора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аршакян И.И. Опыт создания и эксплуатации системы стабилизации температуры газа с частотно-регулируемым электроприводом вентиляторов аппаратов воздушного охлаждения / И.И.Аршакян, А.А.Тримбач, И.И.Артюхов // Проблемы электроэнергетики: сб. науч. тр. – Саратов: СГТУ, 2008. – С.45-54.
2. Артюхов И.И. Устойчивость системы стабилизации температуры газа с частотно-регулируемым электроприводом вентиляторов / И.И. Артюхов, И.И. Аршакян, Р.Ш. Тарисов и др. // Проблемы электроэнергетики: сб. науч. тр. – Саратов: СГТУ, 2009. – С. 141-148.
3. Динамика системы стабилизации температуры с частотно-регулируемым электроприводом вентиляторов аппаратов воздушного охлаждения / И.И.Артюхов, И.И.Аршакян, Р.Ш.Тарисов, А.А.Тримбач // Проблемы электроэнергетики: сб. науч. тр. – Саратов: СГТУ, 2010. – С. 145-150.
4. Иващенко Н.Н. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем / Н.Н. Иващенко. – М.: Машиностроение, 1978. – 736 с.
5. Нечеткий регулятор в системе стабилизации температуры газа / И.И.Артюхов, Н.П.Митяшин, Р.Ш.Тарисов, П.П. Говорухин // Инновационные технологии в обучении и производстве: материалы VII Всерос. науч.-практ. конф., Камышин, 22-23 декабря 2010 г. – Волгоград: ИУНЛ ВолгГТУ, 2011. – Т. 1. – С. 108-111.
6. Determination of Dynamic Model of Natural Gas Coller in CPS Molve III Using Computer / Petar Crnosija, Toni Vjazic, Fetah Kolonic // Proceedings of the 29th International Conven-

tion MIPRO 2006. CTS&CIS – Computers in Technical Systems, Intelligent Systems / Budin, Leo; Ribarić, Slobodan (ed). – Rijeka: MIPRO, 2006. – P. 21-26.

Тарисов Ришат Шамильевич –
Инженер отдела главного энергетика,
ООО «Газпром трансгаз Югорск»,
аспирант кафедры «Электроснабжение
промышленных предприятий» Саратовского
государственного технического университета
имени Гагарина Ю.А.

Rishat Sh. Tarisov –
Engineer of Department of chief power
LLC «Gazprom transgaz Yugorsk»,
Postgraduate Department of Power Supply
for Industrial Enterprises
Gagarin Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 18.05.12, принята к опубликованию 17.06.12

УДК 665

Е.А. Терлова, В.Ю. Кожевников

АКТИВАЦИЯ ПРОЦЕССА ЭКСТРАКЦИИ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ В СВЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ

*Разработка технологии и оборудования для получения растительных масел из
масличного сырья методом экстрагирования в СВЧ электромагнитном поле с макси-
мальным сохранением его биологической ценности.*

Экстракция, растительные масла, этиловый спирт, СВЧ излучение

E.A. Terlova, V.Yu. Kozhevnikov

ACTIVATION PROCESS OF EXTRACTION OF VEGETABLE OILS IN THE MICROWAVE ELECTROMAGNETIC FIELD

*Development of technology and equipment to produce of vegetable oils from oilseeds
extraction method in a microwave electromagnetic field with maximum preservation of its biolog-
ical value.*

Extraction, vegetable oils, alcohol, microwave radiation

Растительные масла обладают высокой биологической ценностью и являются источником незаменимых полиненасыщенных жирных кислот, витаминов и микроэлементов. Они являются структурной частью всех тканей организма, благоприятно воздействуют на многие его системы и функции и способствуют правильному обмену веществ. В связи с этим растительные масла широко используются в медицине, косметологии и парфюмерии, пищевой промышленности и диетическом питании. И такое широкое их применение приводит к необходимости получения экологически чистых масел с максимальным содержанием биологически активных веществ.

В связи с этим актуальной задачей является разработка способов глубокой переработки маслосодержащего сырья с получением экологически безопасных жировых продуктов. Глубокая переработка подразумевает создание и применение технологий, позволяющих безотходно использовать все компоненты сырья и получать экологически чистые продукты.

В общем случае экстракция – это процесс разделения жидких смесей и извлечения компонентов смеси при помощи жидкого растворителя (экстрагента), избирательно растворяющего только извлекаемые компоненты [4].

Для разработки экстракционной установки проводилось изучение факторов, влияющих на процесс экстракции растительного масла из масличного сырья. Такими факторами являются: растворимость растительных масел в экстрагентах, диэлектрические характеристики обрабатываемого сырья и экстрагента, скорость возрастания температуры в СВЧ поле и коэффициент диффузии масла [2].

Чем ближе по величине силы взаимодействия молекул в двух жидкостях, тем легче они смешиваются друг с другом. Приближенной характеристикой, отражающей силу молекулярного взаимодействия, считается диэлектрическая проницаемость. Для большинства растительных масел диэлектрическая проницаемость при нормальной температуре находится в пределах 2,0 – 3,2. Поэтому почти все растительные масла хорошо растворяются в неполярных гидрофобных растворителях с диэлектрической проницаемостью, близкой к диэлектрической проницаемости масел. Такими растворителями являются гексан, бензин, бензол, дихлорэтан и другие органические растворители. Однако все эти растворители имеют такие недостатки как неоднородный химический состав, легкая воспламеняемость, взрывоопасность и токсичность. Учитывая эти недостатки, в качестве растворителя принимается этиловый спирт. Преимущество использования этилового спирта заключается в том, что он, хорошо растворяя масло при температурах до 120 °С, при охлаждении до 16-24 °С отслаивается от него. Таким путем масло отделяется в сравнительно чистом виде без теплового воздействия.

На рис. 1 представлены результаты известных исследований [2] относительно диэлектрических характеристик масличного сырья и экстрагента.

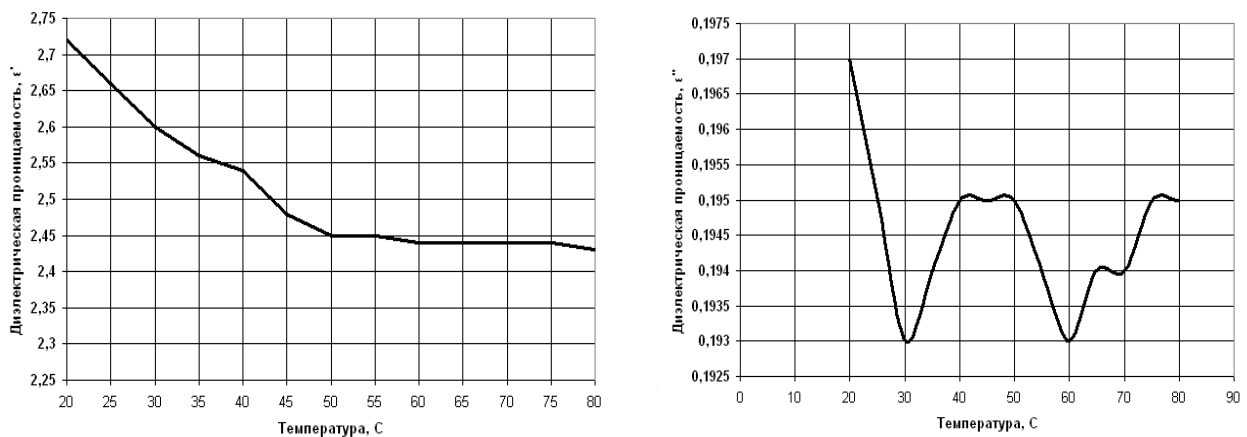


Рис. 1. Зависимость диэлектрической проницаемости ϵ' и ϵ'' экстрагируемого масличного сырья от температуры под воздействием СВЧ поля

Они свидетельствуют, что диэлектрическая проницаемость этилового спирта под воздействием СВЧ поля и температуры изменяется от 2,73 до 2,43, что примерно равно диэлектрической проницаемости масла (2,48 - 2,42). При таких условиях масло практически полностью растворяется в этиловом спирте.

Для уточнения и сравнения этих значений были проведены собственные исследования.

Измерения диэлектрических характеристик проводились волноводным методом полного заполнения сечения волновода [3].

В этом методе образец исследуемого диэлектрика толщиной d располагается в волноводе вплотную к короткозамыкающей пластине и без зазоров прилегает по всем стенкам волновода. Второй конец волновода через развязывающий аттенуатор подключен к генератору.

Длина волны генератора (или размеры волновода) выбирается таким образом, чтобы в волноводе располагался основной тип колебаний.

В отсутствии образца в волноводе устанавливается чисто стоячая волна с узлами, расположенными на расстоянии $\frac{1}{2}\lambda_B$ друг от друга и от короткозамыкающей пластинки, где λ_B – длина волны в волноводе, связанная с граничной длиной волны λ_G и λ_0 соотношением

$$\lambda_B = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_\Gamma}\right)^2}} \quad (1)$$

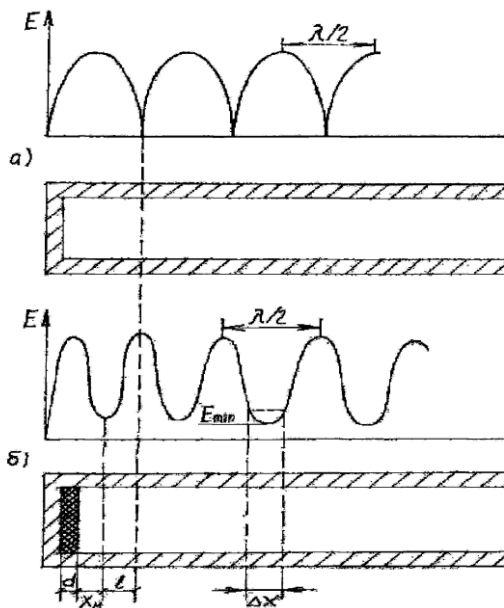


Рис. 2. Эпюра стоячей волны в волноводе:
а – без образца; б – с образцом

Напряженность электрического поля в узлах чисто стоячей волны достигает нуля, т.к. амплитуда отраженной волны равна амплитуде падающей. При внесении образца напряженность поля в узлах не достигает нуля, т.к. амплитуда отраженной волны за счет поглощения в образце становится меньше амплитуды падающей. Кроме того, все минимумы стоячей волны смещаются в сторону образца, насколько длина волны в образце меньше длины волны в пустом волноводе (рис. 2).

Указанные изменения картины стоячей волны зависят от свойств исследуемого образца диэлектрика и могут быть связаны с его электрическими характеристиками определенным соотношением, получающимся в результате решения соответствующей электродинамической задачи.

Решение электродинамической задачи приводит к комплексному трансцендентному уравнению, связывающему характеристики диэлектрического образца с измеряемыми величинами – коэффициентом бегущей волны K_B (или коэффициентом стоячей

волны K_C) и положением узла стоячей волны относительно поверхности образца. Это уравнение имеет вид

$$\frac{th\gamma d}{\gamma d} = -j \frac{\lambda_B}{2\pi d} \times \frac{K_B - jtg\Theta}{1 - jK_B tg\Theta}, \quad (2)$$

где d – толщина исследуемого образца; γ – постоянная распространения в образце; X_M – расстояние от поверхности образца до первого узла стоячей волны:

$$X_M = \frac{\lambda_B}{2} - d - l \quad (3)$$

l – смещение любого узла, обусловленное внесением образца; Θ – фазовый угол, соответствующий расстоянию X_M :

$$\Theta = \frac{2\pi}{\lambda_B} \times X_M; \quad (4)$$

K_B – коэффициент бегущей волны:

$$K_B = \frac{1}{K_C} = \frac{\pi\Delta X}{\lambda_B}; \quad (5)$$

ΔX – расстояние между точками удвоенного минимума:

$$\Delta X = X_2 - X_1. \quad (6)$$

Определенные значения величин K_B , λ_B и X_M , а также заранее измеренная толщина образца d позволяют вычислить постоянную распространения γ , связанную с ϵ' и ϵ'' , следующей формулой:

$$\gamma = \frac{2\pi}{\lambda_B} \sqrt{\epsilon' - j\epsilon'' - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_\Gamma}\right)^2}. \quad (7)$$

Вычисление постоянной распространения наталкивается, однако, на принципиальные трудности, связанные, во-первых, с невозможностью аналитического решения уравнения и, во-вторых, с неоднозначностью, обусловленной периодичностью входящих в него функций. Неоднозначность вычислений устраняется, если хотя бы ориентировочно известно значение проницаемости исследуемого материала или произведено несколько измерений с образцами различных толщин.

Измерения проводились на лабораторной установке. На рис. 3 приведена ее блок-схема.

Мощность СВЧ колебаний генератора ГЧ-80 СВЧ кабелем через волноводно-коаксиальный переход подается в плечо *A* волноводного моста (двойного волноводного тройника), выполненного на прямоугольном волноводе. В волноводном мосте мощность делится на части, поступающие в плечи *C* и *D*. К плечу *C* болтами крепится специальная короткозамкнутая волноводная секция, в которой помещается образец исследуемого диэлектрика. К плечу *D* болтами крепится подвижный реактивный короткозамыкатель, а к плечу *B* – детекторная головка, сигнал с которой регистрируется индикаторным прибором.

Для нагрева образца исследуемого диэлектрика в установке имеется электронагреватель сопротивления косвенного нагрева, позволяющий устанавливать и регистрировать заданную температуру.

Экспериментальная установка позволяет проводить измерения ε' и $tg\delta$ исследуемого диэлектрика волноводным методом, используя характер распределения поля в волноводе.

Для проведения исследований использовалась вытяжка из семян подсолнечника. Для ее изготовления применялись семена подсолнечника массой 40 г, которые заливались 96% этиловым спиртом и настаивались. Исследования проводились для двух вариантов: без нагрева (20 °С) и с нагревом (50 °С). На основе экспериментально полученных данных с помощью программы, написанной в среде программирования MathCad, был выполнен расчет диэлектрических параметров. В результате расчета было получено, что диэлектрическая проницаемость для вытяжки из семян подсолнечника составляет $\varepsilon'=2,135$, а тангенс угла диэлектрических потерь – $tg\delta=0,08064$. Изменение температуры на диэлектрические характеристики не повлияло.

Немаловажным фактором, влияющим на процесс активации, является скорость возрастания температуры в СВЧ поле. Скорость роста температуры можно разделить на два этапа: на первом этапе от 20 до 80 °С она изменяется достаточно быстро, на втором этапе – от 80 °С, т.е. от начала температуры кипения растворителя, она резко снижается и изменяется медленнее. С увеличением мощности рост температуры происходит намного быстрее и температура достигает заданных значений раньше. Это приводит к усилению диффузионных процессов.

Возрастание коэффициента диффузии происходит в первые секунды экстрагирования (20-100 с), максимальные величины коэффициента диффузии соответствуют 50-100 секунде экстрагирования, затем наступает резкое его уменьшение в 3-4 раза, а после 150-200 секунды экстракции коэффициент диффузии уменьшается менее резко и извлечения масла в растворитель практически заканчивается. Таким образом, можно сделать вывод, что чем выше мощность излучения, тем выше коэффициент диффузии и тем быстрее протекает процесс извлечения масла в растворитель.

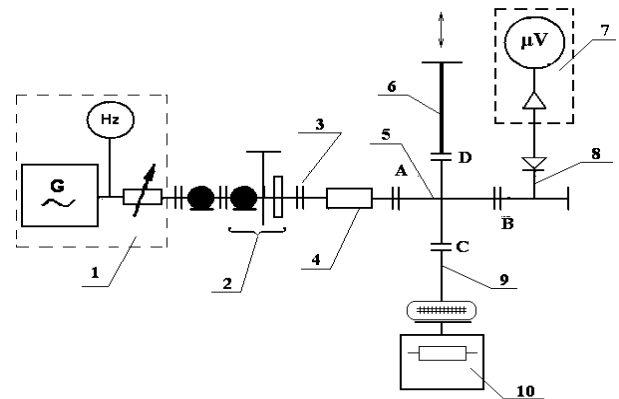


Рис. 3. Блок-схема установки для измерения диэлектрических параметров с помощью волноводного моста: 1 – СВЧ генератор; 2 – волноводно-коаксиальный переход; 3 – соединение волноводов; 4 – аттенюатор; 5 – двойной волноводный тройник; 6 – подвижный реактивный короткозамыкатель; 7 – индикаторный прибор; 8 – детекторная головка; 9 – короткозамкнутая волноводная секция с исследуемым образцом; 10 – электронагреватель

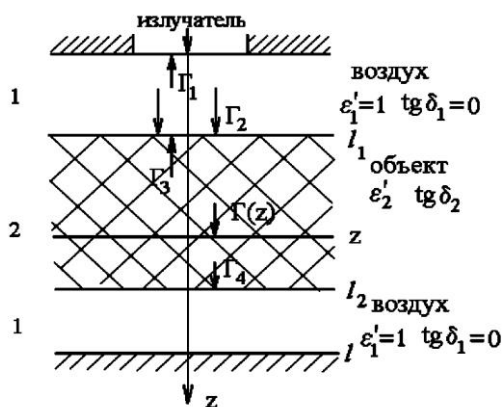


Рис. 4. Распространение плоской электромагнитной волны

Коэффициент диффузии зависит не только от относительной скорости движения твердых частиц и жидкости, но и от активной поверхности, участвующей в процессе. Поэтому особое внимание обращалось на возможность обеспечения участия поверхности каждой частицы в процессе экстрагирования. И для улучшения контакта растворителя с частицами экстрагируемого сырья предусматривается вращение экстракционной емкости. Оптимальная частота вращения определяется экспериментальным путем. По результатам этих известных экспериментов [2] оптимальная частота вращения составляет 10 об./мин.

Для разработки конструкции экстракционной установки применялось математическое моделирование процесса экстракции в СВЧ электромагнитном

поле. В определенном смысле электротехнологическую установку для экстракции в СВЧ поле можно считать СВЧ электротермической установкой лучевого типа [1]. Задача заключалась в определении нестационарного поля температур при заданной мощности СВЧ генератора. Для ее решения проводилось моделирование процессов электродинамики и теплопроводности при нагреве диэлектриков в СВЧ электротермической установке лучевого типа. Обработываемый диэлектрик, помещенный в цилиндрическую камеру, считался относительно плоским и рассматривалось нормальное падение плоской электромагнитной волны на поверхность плоского диэлектрика, как видно из рис. 4.

Программа для компьютерного моделирования была написана в среде программирования MathCad на основе дифференциального уравнения теплопроводности (8) и волнового уравнения (9):

$$\lambda \left(\frac{d^2 T}{dz^2} \right) + q_v \overset{\curvearrowright}{\leftarrow} = c\rho \frac{dT}{dt} \tag{8}$$

$$\frac{d^2 \dot{E}_n}{dz^2} = k_n^2 \cdot \dot{E}_n, \tag{9}$$

Также использовались начальные условия (10), граничные условия 3-го рода (11) и волновые граничные условия (12):

$$T \overset{\curvearrowright}{\leftarrow} = T_0 \tag{10}$$

$$-\lambda \left(\frac{dT}{dn} \right)_s = \alpha \overset{\curvearrowright}{\leftarrow} - T_B \overset{\curvearrowright}{\leftarrow} \tag{11}$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_0 &= \dot{A}_n + \dot{B}_n \text{ при } z = 0; \\ \dot{E}_{n-1} &= \dot{E}_n \text{ при } z = l_n; \\ \dot{E}_n &= 0 \text{ при } z = l_g. \end{aligned} \tag{12}$$

В уравнениях (8)-(12) использовались обозначения: λ – коэффициент теплопроводности; T – температура; q_v – мощность внутренних источников тепла; c – теплоемкость; ρ – плотность; τ – время; α – коэффициент теплоотдачи; z – координата в направлении распространения электромагнитной волны; \dot{E}_n – комплексная функция напряженности электрического поля в слое с номером n ; k_n – коэффициент распространения; \dot{A}_n, \dot{B}_n – постоянные интегрирования. В результате проведенного моделирования в среде программирования MathCad были получены графики распределения температур по толщине обрабатываемого сырья для различных моментов времени (рис. 5).

По полученным графикам распределения температур можно сделать вывод, что нагрев экстракционной смеси в СВЧ электромагнитном поле до необходимых для проведения процесса экстракции температур происходит за 2 минуты, при этом температура внутренних слоев обрабатываемого материала выше, чем внешних.

Внутри обрабатываемого материала возникает градиент общего давления, который активизирует циркуляционные потоки в капиллярах. Внутри сферосом масличного сырья, содержащих масло и окруженных мембранными оболочками, также возникает градиент общего давления, в результате чего мембранные оболочки разрываются и масло из цитоплазм клеток благодаря активированным циркуляционным потокам и диффузионным процессам выделяется на поверхность и легко смешивается с этиловым спиртом.

Конструкция основного узла СВЧ электротехнологической установки для экстракции растительных масел представлена на рис. 6.

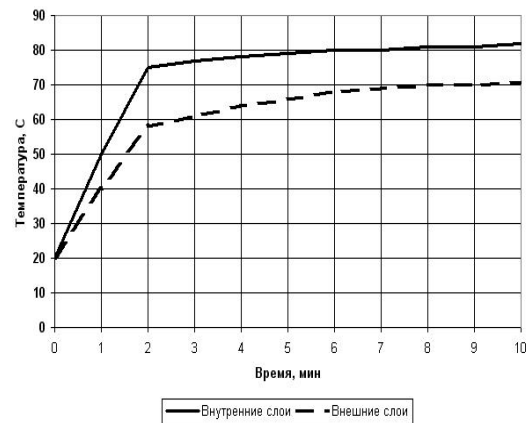


Рис. 5. Распределение температур по толщине обрабатываемого объекта

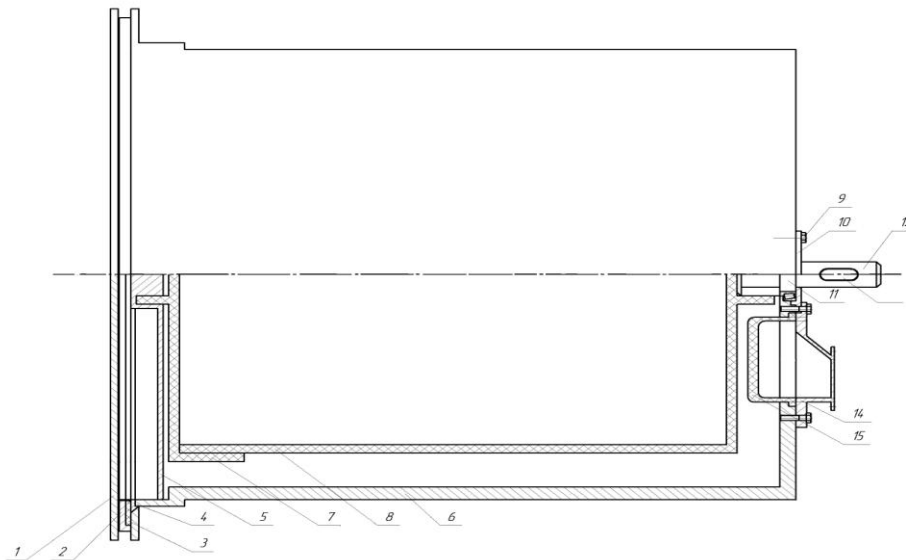


Рис. 6. СВЧ ЭТУ для экстракции растительных масел

СВЧ ЭТУ включает цилиндрическую камеру (6) с крышкой (1), в которую помещается экстракционная емкость (8) с крышкой (7). Соединение с СВЧ блоком источника СВЧ энергии происходит с использованием соединительного адаптера (14) и фторопластового стакана (15). Крышка камеры (1) имеет четвертьволновый дроссель (2), выполненный в виде кольца, приваренного к двери так, чтобы в закрытом состоянии это кольцо образовывало с фланцем (4) радиальную линию. Для исключения касания дросселя и фланца надевается фторопластовый протектор (3). Для вращения экстракционная емкость имеет зацепление с валом вращения (12). Для поддержания камеры и ее вращения со стороны крышки экстракционной емкости (7) надевается поддерживающий люнет (5).

Основным преимуществом разработанной установки является возможность значительно сократить продолжительности температурного воздействия на сырье, значительно повысить равномерность распределения температурного поля, а тем самым обеспечить практически полное извлечение масла более высокого качества. Установка может использоваться для получения как пищевых, так и технических растительных масел, используемых в парфюмерно-косметической промышленности, для производства биотоплива, различных лаков, красок и пропиток.

ЛИТЕРАТУРА

1. Архангельский Ю.С. Компьютерное моделирование СВЧ электротермических процессов и установок: учеб. пособие / Ю.С. Архангельский, С.В. Тригорный. – Саратов: СГТУ, 2006. – 212 с.
2. Бадмацыренов Б.В. Разработка оборудования и процесса экстракции кедрового масла в электромагнитном поле СВЧ: дис...канд. техн. наук: 03.00.23 / Б.В. Бадмацыренов; ВСГТУ. – Улан-Удэ, 2004. – 147 с.
3. Брандт А.А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах: учеб. для вузов / А.А. Брандт. – М.: Физматгиз, 1963. – 404 с.
4. Плановский А.Н. Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии: учеб. пособие / А.Н. Плановский, В.М. Рамм, С.З. Каган. – 5-е изд., стер. – М.: Химия, 1968. – 848 с.

Терлова Евгения Анатольевна – магистрант кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Evgeniya A. Terlova – Graduate
Department of Automated Electrical-Technological Plants and Systems,
Gagarin Saratov State Technical University

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

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

Статья поступила в редакцию 17.05.12, принята к опубликованию 16.06.12

УДК 621.391

В.А. Ушаков, В.С. Дрогайцев, Д.Е. Крупейников

ФРЕЙМОВО-ПРОДУКЦИОННЫЕ И ЛОГИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЗНАНИЙ В ПРОЦЕССАХ ОБНАРУЖЕНИЯ И ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ПРЕДОТКАЗНЫХ СОСТОЯНИЙ В ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ

Рассматривается формальный подход к представлению знаний интеллектуальных технологий в процессах поддержки методов оценивания работоспособности технических объектов, обнаружения и диагностирования источников генерации предотказных состояний в их поведении.

Фреймы, продукционные правила, логические модели, предотказные состояния объектов, нейронные сети, интеллектуальные технологии

V.A. Ushakov, V.S. Drogaytsev, D.E. Krupeynikov

FRAME-PRODUCTIONS AND LOGICAL MODELS OF KNOWLEDGE REPRESENTATION IN THE PROCESS OF DETECTING AND DIAGNOSING FAULTS IN TECHNICAL OBJECTS

We consider a formal approach to knowledge representation in the process of intelligent technologies to support health assessment methods of technical objects, detecting and diagnosing the sources of generation failures in their behavior.

Frames, production rules, logic model, the exemption status of the object, neural networks, intelligent technologies

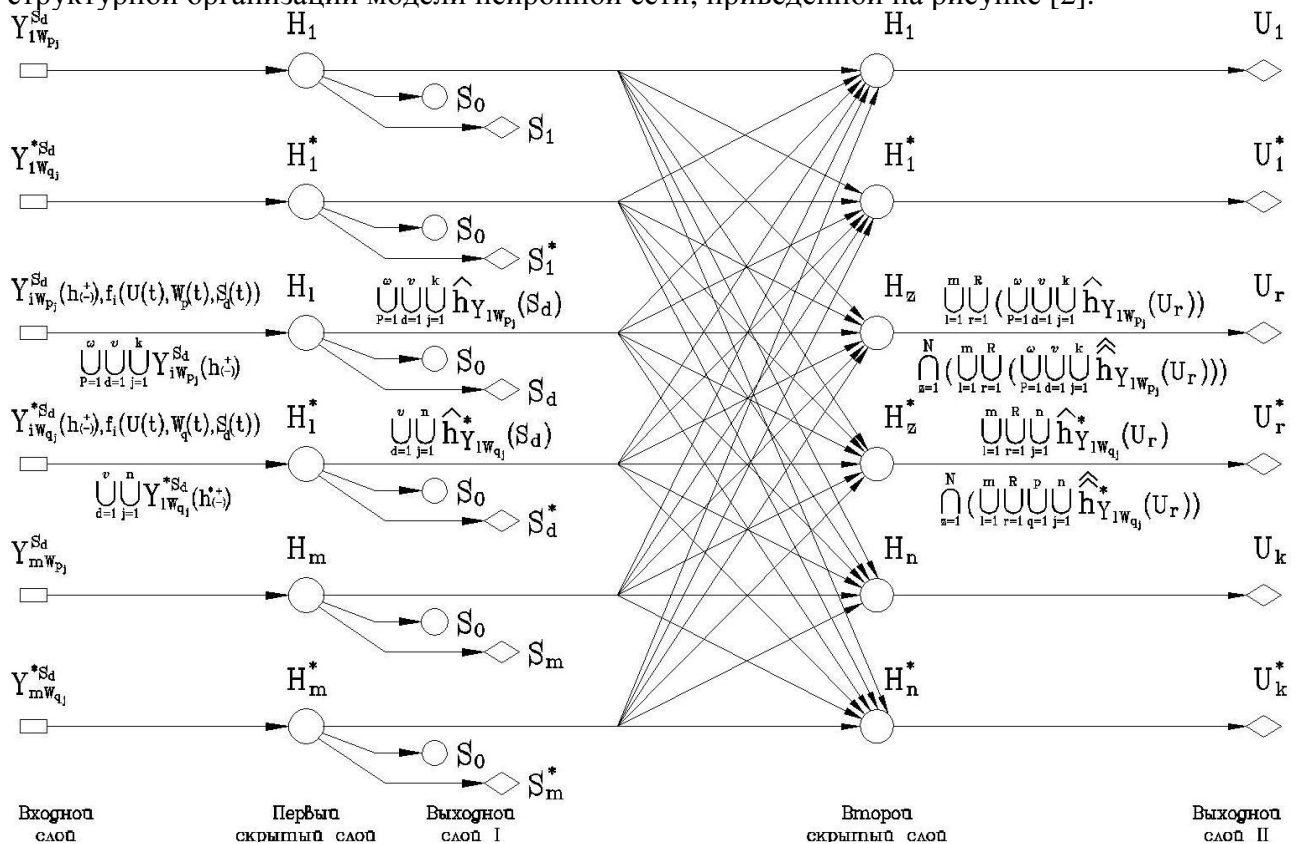
Работа является развитием публикаций [1, 2], связанных с методами и интеллектуальными технологиями решения проблемных задач предметной области оценивания работоспособности технических объектов, обнаружения и диагностирования источников генерации предотказных состояний в их поведении.

Предпосылки, составляющие основу целесообразности применения фреймово-продукционных, логических и табличных моделей представления знаний интеллектуальных технологий поддержки методов решения проблемных задач предметной области, представляются факторами: сложностью методов решения проблемных задач; значительными объемами и разнородностью исходных данных и знаний; существенной априорной неопределенностью нечетких описаний состояний объектов.

Разрешающая способность интеллектуальных технологий поддержки методов решения проблемных задач соответствующих предметных областей в значительной степени зависит от средств и адекватности моделей представления знаний и способов обработки знаний в плане достоверного принятия решений.

В рассматриваемой постановке совокупность методов, алгоритмов и интеллектуальных технологий решения проблемных задач представляет собой иерархическую семантическую сеть, которая описывается фреймово-продукционными, логическими и табличными моделями. Вершины семантической сети представлены фреймами, а дуги определяют структуру переходов и взаимосвязей между фреймами и составными моделями.

В работе технология представления знаний процессов реализации формализованных методов и интеллектуальных технологий оценивания работоспособности технических объектов обнаружения и диагностирования предотказных состояний в их поведении средствами фреймово-продукционных, логических и табличных моделей рассматривается на примере структурной организации модели нейронной сети, приведенной на рисунке [2].



Нейросетевая структура формирования выводов и правил принятия решений

В методическом плане технология представления моделями знаний интеллектуальных средств поддержки формальных процедур методов решения проблемных задач предметной области обеспечивает решение задач: послойное обучение нейронной сети; описание моделями на уровне каждого слоя сети процессов исполнения заданной последовательности формальных процедур методов решения проблемных задач; представление моделями способов реализации нейронами скрытых слое сети функций активации, отражающих механизмы вывода и правила принятия решений в плане оценивания работоспособных состояний объектов, обнаружения и диагностирования предотказных состояний в их поведении.

Алгоритм обучения нейронной сети определяется подачей на входы нейронов сети эталонных образов обучающей выборки, оценивания правильности функции активации, которые сопоставляются по заданным условиям и критериям в смысле выбранной меры близости с эталонными моделями. При правильной реакции сети исполняется заданная последовательность эталонных образов, при неправильных результатах осуществляется корректировка весовых коэффициентов семантических связей в соответствии с выбранным алгоритмом обучения.

Применительно к рассматриваемой в работе предметной области в качестве базового вида модели представления знаний интеллектуальных средств поддержки формальных процедур методов решения заданного перечня проблемных задач приняты фреймы, структурная и информационная организация которых позволяет объединить производственные правила, логические и табличные модели, востребованные при построении, обучении и применении по назначению нейронных сетей принятой направленности.

На уровне первого скрытого слоя, средствами нейронов которого обеспечивается оценивание работоспособных состояний объектов, обнаружение и диагностирование источников генерации предотказных состояний в их поведении. Знания интеллектуальных средств поддержки заданного перечня формальных процедур могут быть представлены фреймом, включающим слоты:

Слот 1. Агрегирование эталонных образов, распознаваемых средствами нейронов первого скрытого слоя сети, представленных интегральными векторами переменных, отражающих знания о состоянии внешней среды и техническом состоянии объектов в условиях предотказных состояний в их поведении:

– агрегирование интегральных векторов на уровне l -го нейрона сети (H_l на рис. 1) в режиме функционирования объекта в условиях дискретного повышения критичности p -го фактора внешней среды, определяется зависимостью [1]:

$$Y_{iW_{pj}}^{S_d} (h_{(-)}^+), f_i(U(t), W_{pj}(t), S_d(t)),$$

где $Y_{iW_{pj}}^{S_d}, i = \overline{1, m}$ – число выходных параметров (показателей нечетких дискретных временных рядов (НДВР)) объекта; $p_j, j = \overline{1, k}$ – число дискрет p -го фактора внешней среды W ; $h_{(-)}^+$ – уровень числового значения деградации соответствующего выходного параметра (показателя НДВР) объекта; U – число управляющих сигналов, подаваемых на объект; $S_d, d = \overline{1, r}$ – число предотказных состояний объекта;

– агрегирование интегральных векторов на уровне нейрона H_i^* (рисунок) в режиме реализации заданной последовательности факторов внешней среды, согласно зависимости вида

$$Y_{iW_{pj}}^{*S_d} (h_{(-)}^{*+}), f_i(U(t), W_{pj}(t), S_d(t)),$$

где $j = \overline{1, n}$ – заданная последовательность факторов внешней среды.

Слот 2. Распознавание каждым нейроном первого скрытого слоя эталонных образов, представленных интегральными векторами, и оценивание по заданному критерию соответствия или не соответствия технических состояний объекта установленным требованиям (ТЗ, ТУ).

Структурная организация переменных эталонных образов, распознаваемых нейронами на примере нейронов слоя H_l, H_l^* (рисунок), определяется зависимостями:

– по результатам анализа показателей НДВР, образованных в режиме дискретного повышения критичности локального фактора внешней среды [2]

$$\Theta = \bigcup_i^m \left(\bigcup_{p=1}^{\omega} \bigcup_{d=1}^{\nu} \bigcup_{j=1}^k \left(\left(\bigwedge_{i \in \mathcal{A}_i} \bigwedge_{j \in \mathcal{A}_j} \right) \right) \right),$$

где $i = \overline{1, m}$ – число выходных параметров (показателей НДВР), соответственно, число нейронов первого скрытого слоя сети; $j = \overline{1, k}$ – число дискрет локального фактора внешней среды; $d = \overline{1, \nu}$ – заданное подмножество предотказных состояний объекта; $K = \overline{1, r}$ – число критериев количественной оценки выходных параметров (показателей НДВР) объекта; \mathcal{D} – допусковые ограничения выходных параметров (показателей НДВР) объекта;

– по результатам анализа НДВР, формируемых в режиме воздействия на объект заданной последовательности факторов внешней среды:

$$\Theta^* = \bigcup_i^{m^*} \left(\bigcup_{d=1}^{\nu} \bigcup_{j=1}^n Y_{iW_{qj}}^{*S_d} \left(\bigwedge_{i \in \mathcal{A}_i} \bigwedge_{j \in \mathcal{A}_j} \right) \right),$$

где $l = \overline{1, m^*}$ – число выходных параметров (показателей НДВР); $j = \overline{1, n}$ – число локальных факторов внешней среды заданной последовательности.

В процессе исполнения данной формальной процедуры и алгоритмов распознавания эталонных образов в качестве критерия, обеспечивающего количественное оценивание текущих состояний и состояний предыстории интегральных векторов на примере НДВР, образованного в режиме повышения критичности p -го фактора внешней среды в условиях предотказного состояния объекта (S_d), используется зависимость вида [1]:

$$\max \hat{h}_{Y_{iW_p}^{S_d}} = \left[\left(\frac{\hat{Y}_{iW_p}^{S_d(h^+)} - Y_{iW_H}}{\Delta Y_{il \max}} \right) + \left(\frac{Y_{iW_H} - \hat{Y}_{ijW_p}^{S_d(h^-)}}{\Delta Y_{ij \min}} \right) \right] / 2, \quad (1)$$

где символ " \wedge " означает измеренное значение показателя НДВР.

Слот 3. Определение числовых значений весовых коэффициентов синаптических связей на основе анализа показателей НДВР, регистрируемых в пространственно-временном представлении [1]. В качестве условий определения весовых коэффициентов, характеризующих работоспособные состояния объекта и обнаружения предотказных состояний, используются равенства:

– применительно к содержанию показателей НДВР, образованных в режиме дискретного повышения критичности локального фактора внешней среды:

$$K_{Y_{iW_p_j}}^{(\hat{h})} = \begin{cases} 0, & \text{при } \hat{h}_{iW_p_j} (S_d) \leq \max \hat{h}_{Y_{iW_p_j}} (S_d) \\ 1, & \text{при } \hat{h}_{iW_p_j} (S_d) > \max \hat{h}_{Y_{iW_p_j}} (S_d) \end{cases} \quad (2)$$

– применительно к показателям НДВР, агрегируемых в режиме воздействия на объект заданной последовательности факторов внешней среды:

$$K_{iW_{qj}}^{(\hat{h}^*)} = \begin{cases} 0, & \text{при } \hat{h}_{Y_{iW_{qj}}}^* (S_d) \leq \max \hat{h}_{Y_{iW_{qj}}}^* (S_d) \\ 1, & \text{при } \hat{h}_{Y_{iW_{qj}}}^* (S_d) > \max \hat{h}_{Y_{iW_{qj}}}^* (S_d) \end{cases} \quad (3)$$

где $W_{q1}, W_{q2}, \dots, W_{qj}, \dots, W_{qn}$ – последовательность факторов внешней среды.

Слот 4. Анализ средствами нейронов первого скрытого слоя сети результатов моделирования состояний объекта в условиях имитации предотказных состояний и факторов внешней среды, с целью установления причинно-следственных связей между показателями внешней среды, переменными описания состояний объекта и предотказными состояниями в его

поведении, а также агрегирования информационно-значимых выходных параметров объекта представленные показателями НДВР, образованных в режимах:

– дискретного повышения критичности локального фактора внешней среды (P_j):

$$Y_{iW_{p_j}}^{S_d}(h_{(-)}^+), f_i \left(U(t), W_p(t), S(t) \right) \left. \begin{array}{l} U(t) \\ \rightarrow W_p(t) \\ S(t) \end{array} \right\} \rightarrow \text{var}$$

– воздействия на объект заданной последовательности факторов внешней среды:

$$Y_{iW_{q_j}}^{S_d}(h_{(-)}^{*+}), f_i \left(U(t), W_q(t), S_d(t) \right) \left. \begin{array}{l} U(t) \\ \rightarrow W_q(t) \\ S(t) \end{array} \right\} \rightarrow \text{var}$$

Слот 5. Синтез функций активации средствами нейронов первого скрытого слоя на основе результатов распознавания ими эталонных образов [2]:

– применительно к показателям НДВР, регистрируемых в режиме дискретного повышения критичности локального фактора внешней среды средствами нейрона H_l (рисунок), формируются функции активации вида

$$F_{H_l} = \bigcup_{p=1}^{\omega} \bigcup_{d=1}^{\nu} \bigcup_{j=1}^k \hat{h}_{Y_{W_{p_j}}} (S_d)$$

– применительно к показателям НДВР, агрегируемых в режиме воздействия на объект заданной последовательности факторов внешней среды средствами нейрона H_l^* формируются функции активации, определяемые зависимостью

$$F_{H_l^*} = \bigcup_{d=1}^{\nu} \bigcup_{j=1}^n \hat{h}_{Y_{W_{q_j}}}^* (S_d)$$

где $\hat{h}_{Y_{W_{p_j}}} (S_d)$, $\hat{h}_{Y_{W_{q_j}}}^* (S_d)$ – числовые значения пороговых уровней деградации показателей НДВР (выходных параметров, определяемые по условиям (2), (3) и критерию (1)) относительно конечного подмножества предотказных состояний в поведении соответствующего объекта.

Слот 6. Оценивание работоспособного состояния объекта средствами нечетких правил механизма логического вывода на основе анализа функций активации $\{F_{H_l}, F_{H_l^*}\}$ формируемых нейронами первого скрытого слоя сети $\{H_l, H_l^*, 1=1, m, 1=1, m^*\}$ согласно продукционному правилу вида

$$\begin{aligned} &\text{ЕСЛИ } F_{H_1} \text{ равна } \langle\langle 0 \rangle\rangle \& \dots \& F_{H_1} \text{ равна } \langle\langle 0 \rangle\rangle \& \dots \& F_{H_m} \\ &\text{равна } \langle\langle 0 \rangle\rangle \& F_{H_1^*} \text{ равна } \langle\langle 0 \rangle\rangle \& \dots \& F_{H_1^*} \text{ равна } \langle\langle 0 \rangle\rangle \\ &\& \dots \& F_{H_m^*} \text{ равна } \langle\langle 0 \rangle\rangle, \text{ ТОГДА } S_0 \end{aligned}$$

Здесь S_0 означает работоспособное состояние объекта.

Слот 7. Обнаружение предотказных состояний объекта на основе результатов анализа функций активации, формируемых средствами нейронов первого скрытого слоя (рисунок), согласно реализации продукционного правила вида

$$\begin{aligned} &\text{ЕСЛИ } F_{H_1} \text{ равна } \langle\langle 1 \rangle\rangle \text{ ИЛИ } \dots \text{ ИЛИ } F_{H_1} \text{ равна } \langle\langle 1 \rangle\rangle \text{ ИЛИ } \dots \text{ ИЛИ } F_{H_m} \\ &\text{равна } \langle\langle 1 \rangle\rangle \text{ ИЛИ } F_{H_1^*} \text{ равна } \langle\langle 1 \rangle\rangle \text{ ИЛИ } \dots \text{ ИЛИ } F_{H_1^*} \text{ равна } \langle\langle 1 \rangle\rangle \\ &\text{ИЛИ } \dots \text{ ИЛИ } F_{H_m^*} \text{ равна } \langle\langle 0 \rangle\rangle, \text{ ТОГДА } S^q \end{aligned}$$

Здесь S^q означает конечное подмножество предотказных состояний.

На уровне второго скрытого слоя нейронной сети (рисунок) осуществляется процесс реализации средствами нейронов формальных процедур метода диагностирования источников генерации предотказных состояний в поведении объектов. Знания интеллектуальной технологии поддержки решения формальных процедур могут быть представлены фреймом, объединяющим продукционные правила, логические и табличные модели. При этом структурная организация фрейма определяется перечнем слотов:

Слот 1. Распознавание каждым нейроном второго скрытого слоя эталонных образов синтезированных в результате объединения функций активации, сформированных средствами нейронов первого скрытого слоя, согласно приведенным ниже зависимостям:

– сформированных в результате анализа пороговых уровней деградации показателей НДСВР в режиме дискретного повышения критичности соответствующего локального фактора внешней среды:

$$L = \bigcup_{l=1}^m \bigcup_{r=1}^R \left(\bigcup_{p=1}^{\omega} \bigcup_{d=1}^{\nu} \bigcup_{j=1}^k \hat{h}_{Y_{lW_{pj}}} (U_r) \right);$$

– агрегированных в режиме воздействия на объект заданной последовательности факторов внешней среды:

$$L^* = \bigcup_{l=1}^{m^*} \bigcup_{r=1}^R \bigcup_{j=1}^n \left(\hat{h}_{Y_{lW_{qj}}}^* (U_r) \right),$$

где $U_r, r = \overline{1, R}$ – конечное подмножество источников генерации предотказных состояний объекта; $l = \overline{1, m(m^*)}$ – число нейронов первого скрытого слоя сети.

Слот 2. Определение средствами нейронов второго скрытого слоя сети дополнительного состава пороговых уровней весовых коэффициентов синоптических связей чувствительных к источникам генерации предотказных состояний объектов, представленных числовыми значениями уровней деградации показателей НДСВР [1], востребованных в формальных процедурах диагностирования источников генерации предотказных состояний, согласно условиям:

– применительно к уровням деградации показателей НДСВР, образованных в режиме дискретного повышения критичности соответствующего локального фактора внешней среды:

$$K_{Y_{lW_{pj}}}^{H_z}(\hat{h}) = \left\{ 1, \text{при } h_{Y_{lW_{pj}}}(S_0) < \hat{h}_{lW_{pj}}(S_d) \leq \max \tilde{h}_{lW_{pj}}(S_d) \right\}$$

– применительно к уровням деградации, образованных в режиме воздействия на объект заданной последовательности факторов внешней среды:

$$K_{Y_{lW_{qj}}}^{H_z^*}(\hat{h}^*) = \left\{ 1, \text{при } h_{Y_{lW_{qj}}}^*(S_0) < \hat{h}_{lW_{qj}}^*(S_d) \leq \max h_{lW_{qj}}^*(S_d) \right\}$$

где $\hat{h}_{lW_{pj}}(S_d), \hat{h}_{lW_{qj}}^*(S_d)$ – числовые значения уровней деградации l -го, i -го показателя НДСВР чувствительных к заданному перечню предотказных состояний; $h_{Y_{lW_{pj}}}(S_0), h_{Y_{lW_{qj}}}^*(S_0)$ – числовые значения уровней деградации l -го, i -го показателя НДСВР, означающие, что объект не находится в предотказном состоянии; $H_z, H_z^*, z = \overline{1, n}$ – число нейронов второго скрытого слоя.

Слот 3. Формирование нейронами второго слоя сети функций активации, характеризующих разделительные свойства показателей НДСВР относительно заданного подмножества диагностируемых источников генерации предотказных состояний соответствующего объекта, определяется условиями:

– применительно к показателям НДСВР, регистрируемых в режиме дискретного повышения уровня критичности локального фактора внешней среды, функции активации определяются зависимостями [2]:

$$\hat{F}_{H_z} = \bigcap_{Z=1}^N \left(\bigcup_{l=1}^m \bigcup_{r=1}^R \left(\bigcup_{p=1}^{\omega} \bigcup_{d=1}^{\nu} \bigcup_{j=1}^k \hat{h}_{Y_{W_{pj}}} (U_r) \right) \right);$$

– применительно к показателям НДСР, сформированных в режиме воздействия на объект заданной последовательности факторов внешней среды, функции активации, формируемые нейронами второго слоя, характеризуются зависимостями:

$$F_{H_z}^* = \bigcap_{Z=1}^N \left(\bigcup_{l=1}^m \bigcup_{r=1}^R \bigcup_{q=1}^p \bigcup_{j=1}^n \hat{h}_{Y_{W_{qj}}} (U_r) \right)$$

где $z = \overline{1, N}$ – число нейронов второго скрытого слоя сети.

Слот 4. Диагностирование источников генерации предотказных состояний соответствующего объекта средствами нечетких правил логического вывода в результате сопоставления кодовых комбинаций числовых значений функций активации, сформированных нейронами второго скрытого слоя сети с кодовыми комбинациями эталонной табличной модели диагностирования [1], согласно продукционному правилу вида

$$\begin{aligned} & \text{ЕСЛИ } \hat{F}_{H_1} \text{ равна } \langle\langle 0 \rangle\rangle \text{ ИЛИ } \langle\langle 1 \rangle\rangle \& \dots \& \hat{F}_{H_z} \text{ равна } \langle\langle 0 \rangle\rangle \\ & \text{ИЛИ } \langle\langle 1 \rangle\rangle \& \dots \& \hat{F}_{H_z} \text{ равна } \langle\langle 0 \rangle\rangle \text{ ИЛИ } \langle\langle 1 \rangle\rangle \& \hat{F}_{H_1}^* \text{ равна } \langle\langle 0 \rangle\rangle \\ & \text{ИЛИ } \langle\langle 1 \rangle\rangle \& \dots \& \hat{F}_{H_z}^* \text{ равна } \langle\langle 0 \rangle\rangle \text{ ИЛИ } \langle\langle 1 \rangle\rangle \& \dots \& \hat{F}_{H_n}^* \\ & \text{равна } \langle\langle 0 \rangle\rangle \text{ ИЛИ } \langle\langle 1 \rangle\rangle, \text{ ТОГДА } (S_0, U_i) = \mathbb{H}1 \dots 1 \end{aligned}$$

где $U_i, i = \overline{1, p}$ – конечное подмножество диагностируемых источников генерации предотказных состояний объекта; $\mathbb{H}1 \dots 1$ – кодовые комбинации числовых значений функций активации, представленные пороговыми весовыми коэффициентами, сопоставляемые с кодовыми комбинациями элементов эталонной табличной модели диагностирования объекта; S_0 – работоспособное состояние объекта.

Из содержания изложенной технологии представления знаний интеллектуальных средств поддержки решения проблемных задач следует, что достоверность обнаружения и диагностирования предотказных состояний объектов средствами нейронных сетей определяется достоверностью знаний о поведении объектов в работоспособном состоянии, соответственно достоверностью эталонных моделей физическим образцам объектов. Требуемый уровень достоверности направленно достигается реализуемыми нейронной сетью средствами:

- формализованными методами решения проблемных задач предметной области;
- представительностью обучающих выборок, формируемых в процессе моделирования состояний объектов в условиях имитации предотказных состояний и критичных к ним факторов внешней среды;
- критериями и условиями определения числовых значений весовых коэффициентов синоптических связей;
- средствами агрегирования информационно-значимых показателей нечетких дискретных временных рядов;
- средствами понижения уровня неопределенности показателей НДСР.

Заключение. Приведенный формальный подход к представлению знаний интеллектуальных технологий в процессах оценивания работоспособных состояний технических объектов, обнаружения и диагностирования предотказных состояний в их поведении, базирующийся на использовании семантических и фреймовых сетей, продукционных правил, логических и табличных моделей, носит универсальный характер, соответственно, может быть применен в процессах оценки технического состояния широкой номенклатуры технических объектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ушаков В.А. Обнаружение предотказных состояний и идентификация источников их генерации сложных технических объектов. I / В.А. Ушаков, В.С. Дрогайцев // Вестник СГТУ. – 2011. – №4 (60). – Вып. 2. – С. 85-193.

2. Ушаков В.А. Обнаружение предотказных состояний и идентификация источников их генерации сложных технических объектов. Построение и обучение нейросетевых структур. II / В.А. Ушаков, В.С. Дрогайцев // Вестник СГТУ. – 2011. – №4 (60). – Вып. 2. – С. 193-199.

Ушаков Виталий Алексеевич –
кандидат технических наук, генеральный
директор ОАО «КБ Электроприбор», г. Саратов

Vitaliy A. Ushakov –
Ph. D.
General Director of JSC “KB Electropribor”, Saratov

Дрогайцев Валентин Серафимович –
доктор технических наук, профессор
кафедры «Автоматизация и управление
технологическими процессами» Саратовского
государственного технического университета
имени Гагарина Ю.А.

Valentine S. Drogaytsev –
Dr. Sc., Professor
Department of Automation and Process Control,
Gagarin Saratov State Technical University

Крупейников Денис Евгеньевич –
аспирант кафедры «Автоматизация
и управление технологическими
процессами» Саратовского
государственного технического университета
имени Гагарина Ю.А.

Denis E. Krupeynikov –
Postgraduate
Department of Automation and Process Control,
Gagarin Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 15.05.12, принята к опубликованию 14.06.12

УДК 537.331.33

В.Я. Шаныгин, Р.К. Яфаров

**МОДИФИКАЦИЯ НАНОМОРФОЛОГИИ МОНОКРИСТАЛЛОВ
КРЕМНИЯ (100) ПРИ СВЧ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКЕ
РАЗЛИЧНОЙ СЕЛЕКТИВНОСТЬЮ**

Исследованы закономерности влияния режимов высокоионизованной плазмы электронного циклотронного резонанса (ЭЦР) СВЧ газового разряда низкого давления на наноморфологию поверхности монокристаллов кремния кристаллографической ориентации (100). Рассмотрены основные характеристические параметры наноморфологии поверхности и модельные механизмы процессов, обеспечивающих их модификацию в результате низкоэнергетичной СВЧ ионно-плазменной обработки с различной селективностью к гетероструктурному материалу подложки.

Микроволновая плазма, электронный циклотронный резонанс, кристаллы кремния, микрообработка, модификация

V.Ya. Shanygin, R.K. Yafarov

**VERSION OF NANOMORPHOLOGY OF SINGLE CRYSTALS
SILICON (100) AT THE MICROWAVE PLASMA MANUFACTURING
WITH VARIOUS SELECTIVITY**

Regularities of influence of modes of high ionized plasma of an electronic cyclotron resonance (ECR) of the microwave of the gas discharge of low pressure upon nanomorphology of a surface of single crystals of silicon of crystallographic orientation (100) are investigated. The general characteristic parameters of nanomorphology of a surface and model mechanisms of the processes providing their version as a result of low energy with the microwave of ion plasma manufacturing with various selectivity to a heterostructure material of a substrate are considered.

Microwave plasma, electronic cyclotron resonance, silicon crystals, micromachining, version

Введение. Актуальной задачей современного полупроводникового материаловедения является получение атомно-чистых поверхностей кристаллов – подложек с высоким качеством границы раздела и заданной наноморфологией. Это вызвано высокой чувствительностью электронных свойств материалов к дефектам и неоднородностям структуры, а также перспективой их использования для получения спонтанно упорядоченных наноструктур – равновесных массивов трехмерных островков нанометровых размеров путем предварительного создания мест, предпочтительных для зарождения кластеров. При этом большое значение имеет выбор кристаллографической ориентации, который предопределен особенностями строения решетки полупроводникового материала. Использование свойств наноморфологии поверхности кристаллов открывает возможности для создания принципиально новых квантово-размерных систем в двух- и трехмерных структурах, примером которых являются самоорганизующиеся системы при создании ансамблей квантовых точек, нитей, латеральных поверхностных сверхрешеток, пространственно-упорядоченных низкоразмерных систем [1, 2].

Наиболее востребованным материалом современной микро- и нанoeлектроники остается монокристаллический кремний. Так, в последнее время благодаря созданию квантово-размерных структур на кремнии преодолена трудность его использования в фотоэлектронике из-за низкой вероятности излучательной рекомбинации, обусловленной запретом на прямые переходы носителей, и, тем самым, получен новый импульс его широкого применения в различных областях науки и техники [3].

Целью работы являлось исследование влияния плазмы СВЧ разряда низкого давления различных газовых сред на наноморфологические характеристики поверхности монокристаллов кремния ориентации (100).

Методики и результаты экспериментов. Эксперименты проводились в вакуумной установке с использованием СВЧ ионно-плазменного источника, описанного в [4]. В качестве рабочих газов использовались аргон и водород. Величины ускоряющих напряжений на подложкодержателе в процессах плазменной обработки изменялись в интервале от -100 до -300 В, мощность СВЧ излучения и индукция магнитного поля, соответствующая возникновению в зоне газового разряда ЭЦР составляли, соответственно, 250 Вт и 875 Гс. Давление рабочего газа при обработке было равным 0,1 Па и обеспечивало выполнение условий ЭЦР, при котором степень ионизации плазмы составляла около 5% [6].

В экспериментах использовались пластины монокристаллического кремния Si (100) р-типа с удельным сопротивлением 0,01 - 0,02 Ом·см. Наноморфология поверхностей пластин изучалась с помощью сканирующего атомно-силового микроскопа (АСМ) Solver-P-47. В качестве зонда использовались стандартные кремниевые кантилеверы CSG10 пирамидальной формы с радиусом закругления 10 нм и жесткостью 0,1 Н/м. Поле сканирования составляло 6×6 мкм. Обработка результатов измерений производилась с использованием программного обеспечения этого микроскопа.

На рис. 1 приведены полученные с использованием АСМ типовые изображение поверхности и распределения поверхностных плотностей разновысотных микровыступов на

кристаллах кремния Si (100) до и после СВЧ плазмохимического травления (ПХТ) в среде водорода в течение 10 мин при различных смещениях на подложкодержателе. Можно видеть, что на стандартной (не обработанной в плазме) поверхности кремния (100) максимальную поверхностную плотность около $3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ имеют микровыступы высотой около 0,6 нм при разбросе высот (Δh) на уровне $0,1 \rho_{\text{max}}$ от 0,42 до 0,72 нм, что составляет 0,3 нм, а СВЧ плазменная обработка существенно изменяет эти наноморфологические характеристики. Так, например, плазменные обработки с использованием различных режимов приводят как к уменьшению, так и к увеличению по сравнению с исходной пластиной высот выступов, имеющих максимальную поверхностную плотность (h_{max}), и могут существенно изменять величину поверхностной плотности.

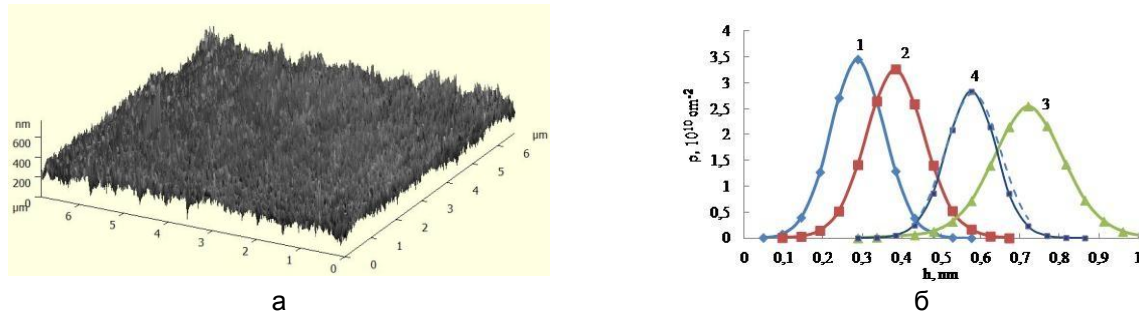


Рис. 1. Типовое АСМ изображение поверхности (а) и распределений поверхностных плотностей разновысотных микровыступов на кристаллах кремния Si (100) до (4) и после СВЧ ПХТ в среде водорода в течение 10 мин при различных смещениях на подложкодержателе (б): 1 – $U = -100 \text{ В}$; 2 – $U = -200 \text{ В}$; 3 – $U = -300 \text{ В}$ (пунктирной линией показано гауссовское распределение функции $\rho(h)$ для необработанного в плазме кристалла кремния)

На рис. 2, 3 приведены экспериментальные зависимости максимальных поверхностных плотностей микровыступов ρ_{max} , высот микровыступов с ρ_{max} (h_{max}), а также интервалов разброса их высот (Δh) на уровне $0,1 \rho_{\text{max}}$ от длительности СВЧ ПХТ кремния (100) в различных газовых средах.

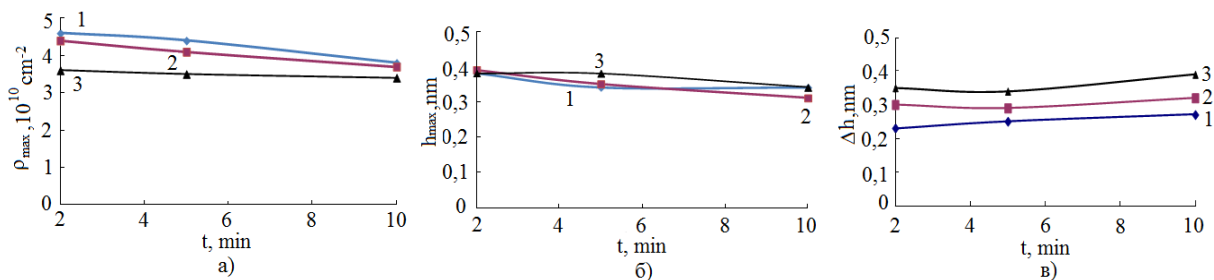


Рис. 2. Зависимости максимальных поверхностных плотностей микровыступов ρ_{max} (а), высот микровыступов с ρ_{max} (h_{max}) (б) и интервалов их разброса (в) на уровне $0,1 \rho_{\text{max}}$ от длительности СВЧ ПХТ кремния (100) в среде аргона при различных смещениях на подложкодержателе: 1 – $U = -100 \text{ В}$; 2 – $U = -200 \text{ В}$; 3 – $U = -300 \text{ В}$

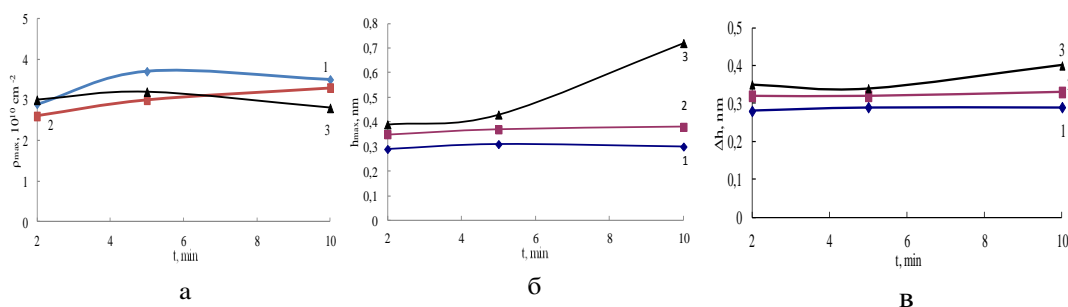


Рис. 3. Зависимости максимальных поверхностных плотностей микровыступов ρ_{max} (а), высот микровыступов с ρ_{max} (h_{max}) (б) и интервалов их разброса (в) на уровне $0,1 \rho_{\text{max}}$ от длительности СВЧ ПХТ кремния (100) в среде водорода при различных смещениях на подложкодержателе: 1 – $U = -100 \text{ В}$; 2 – $U = -200 \text{ В}$; 3 – $U = -300 \text{ В}$

Можно видеть, что с увеличением длительности обработки в аргоне ρ_{\max} уменьшаются и приближаются к ρ_{\max} необработанной пластины, а при обработке в водороде, напротив, ρ_{\max} увеличиваются, а затем стабилизируются на уровне ρ_{\max} необработанной пластины. Высоты выступов с ρ_{\max} (h_{\max}) с увеличением длительности обработки в плазме аргона уменьшаются. При обработке в плазме водорода характер кривых зависит от величины смещений. Для низких смещений (-100...-200 В) h_{\max} от длительности обработок практически не зависят, а при продолжительных обработках с большим смещением существенно увеличиваются. Интервалы разброса высот выступов на уровне 0,1 ρ_{\max} в обоих случаях имеют тенденцию к увеличению, причем при обработке в аргоне Δh могут быть меньше, чем при обработке в водороде.

Из рис. 4, 5, на которых приведены зависимости от смещения на подложкодержателе при различных длительностях СВЧ ПХТ рассматриваемых параметров наноморфологии пластин кремния (100), можно видеть, что при обработках в плазме обоих газов ρ_{\max} с увеличением смещения монотонно уменьшаются. Темпы уменьшения зависят от длительностей обработки. При обработке в аргоне они наименьшие при длительной обработке, а при обработке в водороде, напротив, при кратковременных обработках. $h(\rho_{\max})$ при обработке в аргоне от смещения практически не зависят, а при обработке в водороде увеличиваются тем сильнее, чем больше длительность обработки. Интервалы разброса высот выступов в обоих случаях с увеличением смещения монотонно растут.

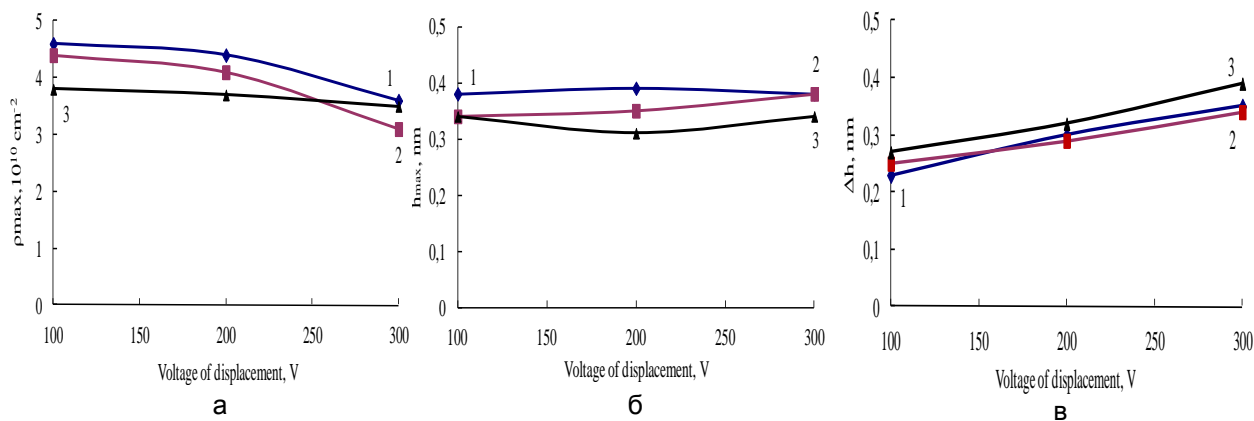


Рис. 4. Зависимости от смещения на подложкодержателе при различных длительностях СВЧ ПХТ кремния (100) в среде аргона максимальных поверхностных плотностей выступов ρ_{\max} (а), высот микровыступов с ρ_{\max} ($h_{\rho_{\max}}$) (б), а также их интервалов разброса (Δh) на уровне 0,1 ρ_{\max} (в): 1 – 2 мин; 2 – 5 мин; 3 – 10 мин

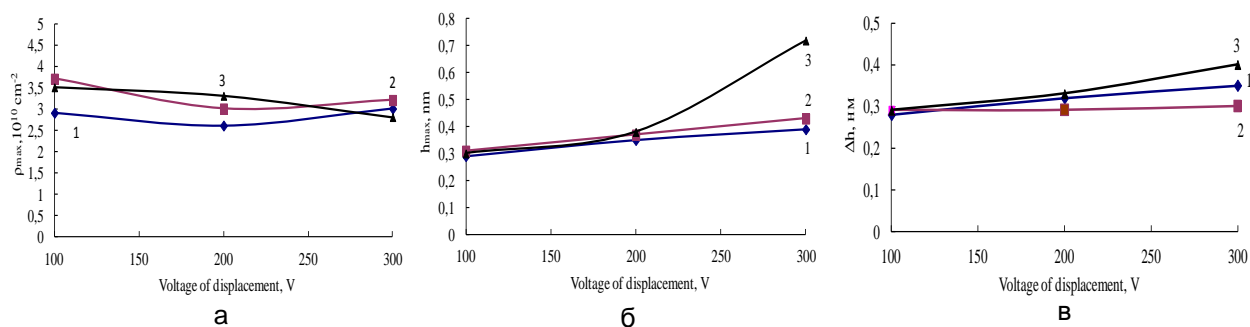


Рис. 5. Зависимости от смещения на подложкодержателе при различных длительностях СВЧ ПХТ кремния (100) в среде водорода максимальных поверхностных плотностей выступов ρ_{\max} (а), высот микровыступов с ρ_{\max} ($h_{\rho_{\max}}$) (б), а также их интервалов разброса (Δh) на уровне 0,1 ρ_{\max} (в): 1 – 2 мин; 2 – 5 мин; 3 – 10 мин

Обсуждение результатов. Анализ распределений поверхностных плотностей выступов по высоте на поверхности кремния (100), как до, так и после плазменной

обработки, приведенных на рис. 1, показывает, что они имеют вид симметричных функций распределения Гаусса. Концентрация наноморфологических выступов в зависимости от их высоты $\rho(h)$ может быть представлена выражением

$$\rho(h) = \rho_{\max} \exp\left[-\frac{(h - h_{\max})^2}{2\Delta h_0^2}\right], \quad (1)$$

где $\rho(h_{\max})$ – поверхностная плотность выступов, имеющих высоту h_{\max} ; Δh_0 – среднеквадратичное отклонение, или рассеяние распределения. Построение функции распределения Гаусса поверхностных плотностей выступов по высоте на поверхности кремния (100) до плазменной обработки с использованием экспериментальных значений параметров $\rho(h_{\max})$ и h_{\max} , приведенных на рис. 1 и Δh_0 , определенным программным обеспечением микроскопа и равным 0,07 нм (пунктирная кривая), показывает хорошее совпадение с экспериментальной кривой 4. Оценки, сделанные из этих АСМ измерений, схема которых приведена на рис. 6, свидетельствуют, что при поверхностной плотности выступов – острий на кристаллах кремния (100) порядка 10^{11} см^{-2} и радиусе закругления кончика кантилевера ~ 10 нм расстояние между остриями на глубине погружения кантилевера может составлять менее 10 нм.

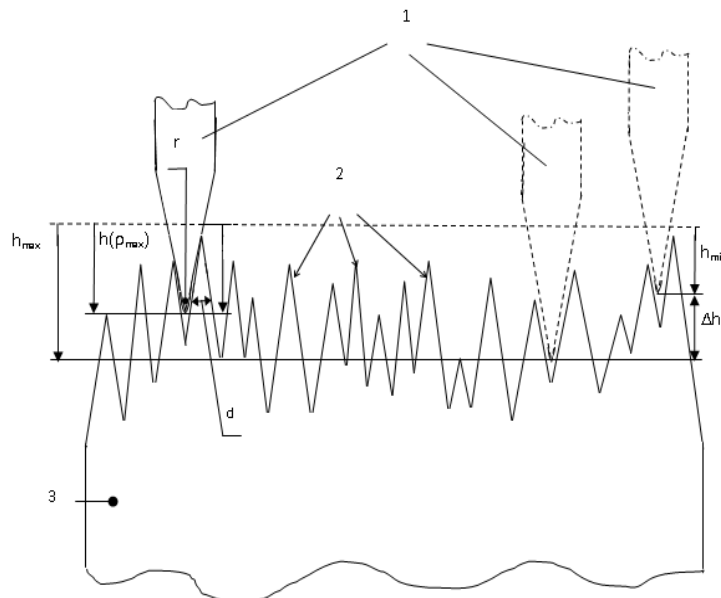


Рис.6. Схема АСМ измерений и оценки основных морфологических характеристик поверхности пластин кремния: 1 – положения кантилевера, 2 – острия – выступы, 3 – фрагмент исследуемой поверхности кремния (r – радиус закругления кончика кантилевера, d – расстояние между остриями на глубине погружения кантилевера)

Радиус же закругления таких острий может иметь значения порядка нескольких параметров кристаллической решетки.

Эти результаты измерения и оценки параметров наноморфологии поверхностей кристаллов кремния (100), полученные с использованием зондовой атомно-силовой микроскопии, обладающей на сегодняшний день наиболее высокой рельефной (вертикальной) чувствительностью, которая позволяет визуализировать атомарно тонкие детали морфологической структуры, свидетельствуют о том, что масштабы неровностей поверхности кристаллов кремния (100) сопоставимы с параметрами кристаллической решетки. В связи с этим вместо понятия «атомно-гладкая» поверхность более точным может быть понятие «атомно-шероховатая» поверхность, которое учитывает реальную атомную структуру и потенциальный рельеф поверхности, представляющий собой набор потенциальных ям, разделенных потенциальными барьерами. Последнее согласуется с давно употребляемыми в физике поверхности понятиями, связанными с энергиями активации различных поверхностных процессов, а также самой природой поверхности твердых тел.

По природе взаимодействия частиц плазмы с поверхностью кремния, пассивированной тонкой пленкой естественного окисла, процессы СВЧ плазменной обработки можно разделить на физические, которые реализуются при работе с инертными газами и газами, имеющими низкую реакционную способность по отношению к кремнию, в частности аргонном и водородом, и физико-химические – при обработке в атмосфере водорода, так как ионы водорода способствуют восстановлению и удалению окислов кремния с поверхности.

Эффективности физического распыления определяются коэффициентом аккомодации $A_k = 4M_1M_2/(M_1 + M_2)^2$, который характеризует долю энергии бомбардирующего иона, переданную поверхностному атому в упругом столкновении. При обработке кремния ионами аргона $A_k = 0,97$, а при обработке в водороде 0,13. В результате этого пороговая энергия распыления при плазменной обработке в водороде возрастает в 7,5 раза. И обратно, при одинаковых ускоряющих потенциалах смещения при СВЧ плазменной обработке ионами водорода эффективность физического распыления атомов кремния почти на порядок меньше, чем в аргонной плазме. Так, скорость травления кремния в плазме аргона при смещениях в интервале от -100 до -300 В составляет 8-10 нм/мин, а скорость травления тех же пластин в атмосфере водорода практически отсутствует. Это свидетельствует о селективном действии СВЧ плазменной обработки пластин кремния в атмосфере водорода. Такая обработка восстанавливает и удаляет с поверхности окислы кремния и практически не распыляет кремний из-за низкого коэффициента аккомодации. Образующиеся при восстановлении адкомплексы О-Н имеют энергию десорбции, которая уже сравнима с энергией, передаваемой им ускоренными электрическим смещением ионами водорода, и могут быть удалены с поверхности.

В случае ионно-физического механизма травление кремния с заданной наноморфологией (кривая 4 на рис. 1) осуществляется за счет эффектов переотражения на наклонных стенках углублений и распыления атомов кремния и частиц его естественного окисла ускоренными ионами. Усиление электрического поля на вершинах острий выступов приводит к их более интенсивному травлению. При наклонном падении ионов на поверхность мишени скорость травления определяется выражением

$$V_{\text{травл}} = 6,25 \cdot 10^{25} \left[\frac{S(\alpha) A}{N_A \rho} \right] \cos \alpha, \quad (2)$$

где A – атомный вес распыляемого материала, г/моль; N_A – число Авогадро, атом/моль; ρ – плотность материала, г/см³; j_u – плотность ионного тока в сечении, перпендикулярном направлению поступления ионов, А/см², $S(\alpha)$ – коэффициент распыления материала при угле падения ионов α относительно нормали к поверхности.

Практически у всех материалов с увеличением угла падения ионов на поверхность распыляемого материала от 0 до 60 - 70° наблюдается увеличение коэффициента распыления, которое в случае травления окислов кремния может достигать пятикратного значения относительно нормального падения ионов аргона [7]. За счет различной интенсивности распыления, обусловленной статистической неоднородностью геометрии и толщины стенок углублений, отдельные выступы с увеличением длительностей обработки исчезают. Это приводит к уменьшению поверхностных плотностей выступов и увеличиваются интервалы разброса их высот Δh (рис. 2а, в, 4а, в). Основным фактором, влияющим на увеличение разброса высот, является смещение, так как оно определяет плотность потока ионов и коэффициент распыления S . Из-за преимущественного и низкоселективного распыления гетероструктурных вершин высоты микровыступов с максимальной поверхностной плотностью при плазменной обработке в атмосфере аргона всегда меньше, чем на не обработанной пластине (рис. 2 б), а в связи с их повышенными однородностью и экранирующим свойством по отношению к потенциалу ядра плазмы, от смещения практически не зависят (рис. 4 б). Однако с увеличением длительности обработки их высота для всех смещений постепенно уменьшается со скоростью около 0,01 нм/мин.

При высокоселективной обработке в плазме водорода наноморфология гетероструктурной поверхности кремния за счет удаления окисных покрытий постепенно восстанавливает конфигурацию, приобретенную в процессах предварительной физико-химической обработки пластин. Это отображается специфической кинетикой изменения ее

наноморфологических параметров. В частности, за счет более интенсивной бомбардировки ионами водорода окисленных выступов поверхности кремния их поверхностная плотность даже при небольших длительностях обработки становится меньше, чем на необработанной в плазме пластине (рис. 3а). С увеличением длительности обработки до 4-5 минут процесс восстановления окисных покрытий на вершинах выступов в основном заканчивается и дальнейшая обработка к изменению их плотности практически не приводит (рис. 3а). Этот процесс происходит тем интенсивнее, чем больше энергия и плотность потока ионов водорода, которые уже могут распылять атомно-тонкие острия вершин выступов (рис. 5а). Одновременно с ускоренной обработкой вершин выступов происходят процессы восстановления окислов кремния в углублениях рельефа поверхности. Они характеризуются меньшей интенсивностью и большей длительностью из-за более плотной структуры окислов, находящихся в углублениях рельефа в сжатом, по сравнению со структурой на вершинах, состоянии. В результате этого высоты микровыступов увеличиваются и становятся тем больше, чем больше длительность процесса и энергия ионов водорода (рис. 3 б и 5 б). Результатами этих процессов, как и в случае травления в аргоне, является статистическое увеличение интервалов разброса высот Δh , которые, как уже отмечалось, будут тем больше, чем больше длительность процесса и смещение на подложкодержателе (рис. 3 в, 5 в).

Заключение. Низкоэнергетичная высокоионизованная СВЧ плазменная обработка в зависимости от режима и химического состава используемой газовой фазы позволяет различным образом модифицировать наноморфологию поверхности пластин кремния (100). Наилучшие результаты по однородности высот микровыступов достигаются при кратковременной (2 - 5 мин) СВЧ плазменной обработке в аргоне со смещением – 100 В. В этом случае разброс высот Δh составляет около 0,2 нм. С увеличением длительности обработки и смещения интервалы разброса высот выступов увеличиваются, хотя сами высоты при этом уменьшаются.

Благодаря селективности процесса и высоким плотностям потока и энергиям ионов при больших смещениях, при длительных обработках в СВЧ плазме водорода обеспечивается получение выступов, более чем в два раза превышающих высоту выступов, имевшихся на не обработанных в плазме пластинах кремния с естественным окисным покрытием, а также полученных в тех же режимах неселективной СВЧ плазменной обработки в атмосфере аргона.

Использование величин шероховатости, полученных автоматической обработкой результатов измерений с использованием программного обеспечения АСМ, для анализа наноморфологии поверхности, является недостаточным для их характеристики, так как такие ее важнейшие параметры как поверхностная плотность выступов, их высота, а также интервалы разброса высот не отображаются в явном виде.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гетероструктуры с квантовыми точками: получение, свойства, лазеры. Обзор / Н.Н. Леденцов [и др.] // ФТП. – 1998. – Т. 32. – Вып. 4. – С. 385-410.
2. Шаныгин В.Я. Структурирование субмонослойных углеродных покрытий, осажденных в СВЧ плазме низкого давления на монокристаллическом кремнии / В.Я. Шаныгин, Р.К. Яфаров // ФТП. – 2011. – Т. 45. – Вып. 11. – С. 1542-1548.
3. Герасименко Н.Н. Кремний – материал наноэлектроники / Н.Н. Герасименко, Ю.Н. Пархоменко. – М.: Техносфера, 2007. – 352 с.
4. Шаныгин В.Я. Получение атомарно-чистых поверхностей кремния в низкоэнергетичной СВЧ-плазме низкого давления / В.Я. Шаныгин, Р.К. Яфаров // ЖТФ. – 2009. – Т. 79. – Вып. 12. – С. 73-78.
5. Технология СБИС: пер. с англ. /под ред. С. Зи. – М.: Мир, 1985. – 404 с.
6. Яфаров Р.К. Физика СВЧ вакуумно-плазменных нанотехнологий / Р.К. Яфаров. – М.: Физматлит, 2009. – 216 с.
7. Ивановский Г.Ф. Ионно-плазменная обработка материалов / Г.Ф. Ивановский, В.И. Петров. – М.: Радио и связь, 1986. – 232 с.

Шаныгин Виталий Яковлевич – аспирант кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Vitaliy Ya. Shanygin – Postgraduate
Department of Automated Electrical-Technological Plants and Systems,
Gagarin Saratov State Technical University

Яфаров Равиль Кяшшафович – доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Ravil K. Yafarov – Dr. Sc., Professor
Department of Automated Electrical-Technological Plants and Systems,
Gagarin Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 16.05.12, принята к опубликованию 15.05.12

УДК 621.039

С.В. Ялов, Е.А. Ларин

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ОЦЕНКИ ЭКОНОМИЧЕСКИХ РИСКОВ ПРИ СОЗДАНИИ УТИЛИЗАЦИОННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОНТУРОВ ГТУ

Изложен методический подход к оценке экономических рисков при создании утилизационных энергетических контуров газотурбинных установок.

Утилизационный энергетический контур, ГТУ, экономическая эффективность, экономические риски

S.V. Yalov, E.A. Larin

METHODICAL PROVISIONS OF AN ASSESSMENT OF ECONOMIC RISKS AT CREATION OF UTILIZATION POWER CONTOURS OF GTU

The methodical approach to an assessment of economic risks is stated at creation of utilization power contours of gas-turbine installations.

Utilization power contours, GTU, economic efficiency, economic risks

В современных условиях главным фактором функционирования систем теплоэнергоснабжения является эффективное, надежное и безопасное энергоснабжение потребителей при меняющейся конъюнктуре рынка топлива, оборудования, энергетического спроса на электрическую и тепловую энергию и т.п. Важнейшим условием формирования конкурентной среды в энергетическом секторе экономики является демонаполизация энергетического рынка на основе свободного бездискриминационного доступа к системам транспорта электрической и тепловой энергии независимых энергопроизводителей при сохранении преимуществ единых энергетических систем и государственного регулирования тарифообразованием на транспорт и поставки электрической и тепловой энергии.

Учитывая общую ориентацию в развитии основных генерирующих мощностей на энерго- и ресурсосбережение, постоянный рост стоимости энергоресурсов как на внешнем, так и на внутреннем энергетическом рынке, влекущем за собой непреходящий рост тарифов, строительство и модернизация существующего газотурбинного привода центробежных нагнетателей в системах транспорта природного газа путем создания утилизационных энергетических контуров ГТУ становятся все всё более перспективными и экономически оправданными. Такие источники энергии могут занять определенную нишу в системе энергоснаб-

жения производственной и социальной инфраструктуры предприятий добычи и транспортировки природного газа многих регионов страны. Поскольку компрессорные станции, газовые промыслы и другие объекты, имеющие в своем арсенале газотурбинные двигатели, часто входят в состав градообразующих предприятий, это может изменить конъюнктуру регионального энергетического рынка в пользу внедрения комбинированных ГТУ. Примером таких регионов могут стать горда Тюменской области, созданные в процессе обустройства нефтегазовых месторождений, в которых энергетические рынки частично или полностью находятся под контролем предприятий, имеющих потенциал для строительства комбинированных ГТУ. Создание подобных локальных систем энергообеспечения, по своей природе призванных осуществлять более эффективное функционирование, обусловлено тем, что им необходимо принимать на себя ответственность за риск реализации проекта. Величина этого риска определяется макроэкономической, законодательной и регуляторной средой. Основным фактором снижения риска является установление юридически обоснованных гарантий, финансовых структур и операционных процедур.

Основной отличительной особенностью децентрализованных источников энергии (ДИЭ) является то, что они финансируются самим проектом. При этом разработка инвестиционного проекта ДИЭ должна предусматривать такой баланс между рисками и прибылью проекта на каждом этапе его реализации, при котором проект получает финансирование на ограниченной или необеспеченной основе. При таком виде финансирования доходы от реализации проекта должны покрывать выплаты основной суммы и процентов по кредитам, а также приемлемого дохода на капитал инвесторов.

Инвестиционные проекты ДИЭ в зависимости от условий реализации могут осуществляться по следующим схемам:

- строительство – владение – эксплуатация (СВЭ);
- строительство – владение – эксплуатация – передача (СВЭП);
- строительство – сдача в аренду – передача (САП).

Любая из схем предполагает образование частной компании или совместного предприятия, создаваемого для планирования, финансирования на ограниченно-необеспеченной основе, проектирования, строительства и эксплуатации энергетического объекта. Выбор схемы реализации инвестиционного проекта ДИЭ определяется энергокомпанией и инвесторами.

Метод проектного финансирования ИП ДИЭ требует более строгой оценки риска проекта вследствие того, что этот метод обуславливает более высокую степень риска для инвесторов по сравнению с традиционной схемой финансирования через балансовую ведомость. Инвестиционные проекты ДИЭ являются риском для всех его участников: энергетической компании, кредиторов и покупателей энергии. Способность деления рисков между ними является важнейшим условием осуществления ИП ДИЭ. Эти риски можно разделить на три группы: коммерческие, политические и стихийные.

На сегодня нет однозначного понимания сущности риска. Это объясняется, в частности, многоаспектностью этого явления, практически полным игнорированием его нашим хозяйственным законодательством в реальной экономической практике и управленческой деятельности. Кроме того, риск – это сложное явление, имеющее множество не совпадающих, а иногда противоположных реальных основ. Это обуславливает возможность существования нескольких определений понятий риска с разных точек зрения.

Рассмотрим ряд определений риска, даваемых отечественными и зарубежными авторами:

1. Риск – потенциальная, численно измеримая возможность потери. Понятием риска характеризуется неопределенность, связанная с возможностью возникновения в ходе реализации проекта неблагоприятных ситуаций и последствий.
2. Риск – вероятность возникновения потерь, убытков, недопоступлений планируемых доходов, прибыли.
3. Риск – это неопределенность финансовых результатов в будущем.
4. Риск – степень неопределенности получения будущих чистых доходов.

5. Риск – это стоимостное выражение вероятностного события, ведущего к потерям.

6. Риск – шанс неблагоприятного исхода, опасность, угроза потерь и повреждений.

7. Риск – вероятность потери ценностей (финансовых, материальных товарных ресурсов) в результате деятельности, если обстановка и условия проведения деятельности будут меняться в направлении, отличном от предусмотренного планами и расчетами.

В настоящей работе под риском понимается мера опасности, представляющая собой многофакторную величину потенциально возможной потери или недополучения дохода по сравнению с расчетным вариантом и включающую следующие количественные показатели:

- величину ущерба в виде недополучения расчетного дохода вплоть до потери инвестиций;
- вероятность возникновения указанного ущерба вследствие проявления в реальных условиях какого-либо фактора;
- неопределенность как величины ущерба, так и вероятности.

Таким образом, риск есть вероятностная категория и, по сути, характеризуется вероятностью возникновения определенного уровня потерь и рассчитывается по формуле

$$r = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P_{ij} \Delta Y_{ij}, \quad (1)$$

где P_{ij} – вероятность (частота) недополучения дохода величиной ΔY_{ij} ; $j = \overline{1, m}$, m – количество видов рисков; $i = \overline{1, n}$, n – количество диапазонов недополучения дохода.

Применительно к ИП ДИЭ оценка риска является чрезвычайно сложной задачей. Поэтому в практических расчетах ограничиваются упрощенными подходами [1] оценивая риск по одному или нескольким показателям, представляющим обобщенные характеристики.

Так, например, в [1] предложен простой способ минимизации рисков путем сокращения минимально допустимого срока окупаемости проекта. Другим способом является включение оценки риска в норму дисконтирования по формуле

$$\alpha_i = r + E, \quad (2)$$

где E – норма приведения разновременных затрат без учета риска; r – величина рисковой премии. В [1] не указано, каким образом рассчитывается эта величина.

В [1] предлагается оценивать только экономический риск, который отражает ненадежность будущих доходов из-за изменения исходных условий, заложенных в проект (уменьшение объемов реализации продукции (услуг), увеличение инвестиций, рост текущих затрат, увеличение периода строительства и прочие факторы).

Наиболее важным представляется расчет коммерческого риска r_k , связанного с возможными изменениями определяющих его факторов в процессе и на стадии завершения строительства ДИЭ (инвестиционный риск r_k^u) и в процессе эксплуатации (эксплуатационный риск r_k^o). Коммерческий риск оказывает влияние на способность ИП ДИЭ получать расчетные значения критериев эффективности и удовлетворять требованиям потребителей.

Главными факторами, определяющими инвестиционный риск r_k^u , являются задержки в выполнении и повышение затрат на строительство энергетического объекта. Эксплуатационный риск r_k^o определяется техническими и режимными условиями, а также финансовым выполнением операционной деятельности.

Важнейшим условием рациональной финансовой структуры ИП ДИЭ является управление риском, то есть его распределение между участниками проекта, что требует знания показателей риска и методов его расчета.

В соответствии с [1] эффективность ИП ДИЭ определяется следующими критериями:

- интегральный экономический эффект;
- индекс доходности;
- внутренняя норма доходности проекта;

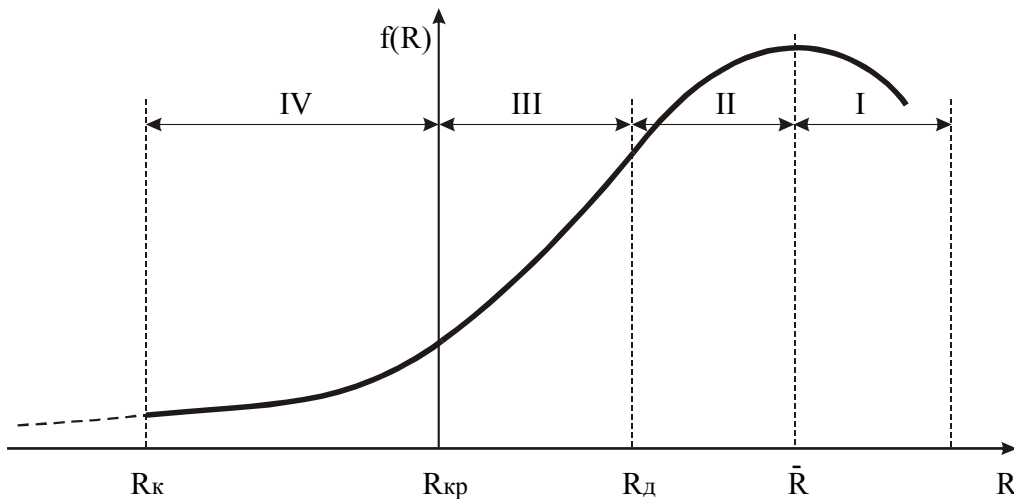
– дисконтированный срок окупаемости.

Каждый из показателей эффективности R зависит от большого числа неопределенных или вероятностно-неопределенных факторов и представляется вероятностной нормально распределенной величиной с математическим ожиданием \bar{R} и стандартом σ_R . Тогда, в соответствии с рисунком, можно выделить в зависимости от величины потерь три зоны рисков: безрисковая (I), допустимого риска (II), критического риска (III) и катастрофического риска (IV).

Зона допустимого риска характеризует экономическую целесообразность ИП, в этой зоне вероятные потери меньше ожидаемого дохода. Зона критического риска характеризуется возможностью потерь ожидаемого дохода вплоть до величины полной расчетной выручки. Зона катастрофического риска связана с потерей основных фондов вплоть до полной потери инвестиций.

В соответствии с выделенными рисковыми зонами вероятность появления потери величиной $\Delta R = \bar{R} - R$ определится как

$$P \{R < \bar{R}\} = P_c + \int_{-K}^{\bar{R}} f(R) dR, \tag{3}$$



Типичная кривая дифференциальной функции вероятности возникновения определенного уровня потерь

где $f(R)$ – дифференциальная функция распределения вероятности появления потери критерия эффективности от расчетного значения \bar{R} вплоть до полной потери приведенных инвестиций K в проект. Функция $f(R)$ представляется усеченной слева кривой нормального распределения вероятности появления потерь дохода, которой является условие нормировки вида

$$\int_{-K}^{\infty} f(R) dR = 1. \tag{4}$$

При этом вероятность потери инвестиций в ДИЭ определяется величиной стихийного риска и по данным [2] составляет $P_c = 10^{-5} \dots 10^{-6}$ 1/год.

В процессе принятия решения о допустимости риска необходимо знание не только потерь, но и вероятности того, что потери не превысят некоторого уровня. Величины предельного и приемлемого рисков устанавливаются участниками проекта. В [2] предлагается ориентироваться на следующие предельные значения показателей риска

$$P_o = P \{R < R_o\} \approx 0,1; P_{кр} = P \{R < R_{кр}\} \approx 0,01; P_k = P \{R < R_k\} \approx 0,001.$$

Пользуясь категорией предельного значения показателей риска в виде приемлемой вероятности потерь расчетного критерия эффективности ИП ДИЭ, можно рассчитать предельную величину критерия R' , соответствующего заданной вероятности P' недополучения расчетного критерия по формуле

$$P \leq \int_{-\infty}^{R'} f(R) dR . \quad (5)$$

Решение указанного уравнения относительно величины R' для заданного уровня вероятности P' недополучения соответствующего критерия эффективности $(\bar{R} - R')$ имеет вид

$$R' = \bar{R} - u_p \cdot \sigma_R , \quad (6)$$

где u_p – квантиль функции нормального распределения вероятности возникновения определенного уровня потерь критерия эффективности, соответствующая заданной (приемлемой) вероятности.

Относительная величина недополучения расчетного значения критерия эффективности $\delta R_p = (\bar{R} - R') / \bar{R}$ определяется заданной вероятностью этого недополучения и рассчитывается по формуле

$$\delta R_p = u_p \cdot \nu_R , \quad (7)$$

где ν_R – коэффициент вариации случайной величины расчетного значения критерия эффективности ИП ДИЭ.

Одним из условий экономической приемлемости ИП ДИЭ является условие

$$E_{\text{вн}} \geq E + r , \quad (8)$$

где $E_{\text{вн}}$ – внутренняя норма доходности проекта.

Выводы

1. Разработан методический подход к оценке экономических рисков при анализе эффективности инвестиционного проекта создания утилизационных энергетических контуров газотурбинных установок.

2. Метод расчета экономических рисков позволяет решить ряд задач управления рисками при анализе инвестиционных проектов создания утилизационного энергетического контура газотурбинного привода центробежных нагнетателей в системах транспорта природного газа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов и их отбору для финансирования / А.Г. Шахназаров и др. – М., 1994. – 80 с.

2. Ларин Е.А. Математическое моделирование энергетических характеристик и системная эффективность ГТУ с энергетическим контуром на низкокипящем рабочем теле / Е.А. Ларин, С.В. Ялов // Вестник СГТУ. – 2008. – № 1 (31). Вып. 2. – С. 143-154.

Ялов Сергей Викторович –
аспирант кафедры «Теплоэнергетика»
Саратовского государственного
технического университета
имени Гагарина Ю.А.

Sergey V. Yalov –
Postgraduate
Department of Heat-power Engineering,
Gagarin Saratov State Technical University

Ларин Евгений Александрович –
кандидат технических наук, профессор к
афедры «Теплоэнергетика» Саратовского
государственного технического университета
имени Гагарина Ю.А.

Evgeny A. Larin –
Ph. D., Professor
Department of Heat-power Engineering,
Gagarin Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 14.05.12, принята к опубликованию 13.06.12

Р.К. Яфаров

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЕННЫХ И НЕЙТРАЛЬНЫХ ГАЗОВЫХ СРЕД

Рассмотрены перспективы использования невозмущающего СВЧ электромагнитного излучения для диагностики и исследования плазменных и нейтральных газовых сред. Анализируются физика процессов и возможные методики организации диагностики и мониторинга изменения состояния газовых сред с использованием открытых цилиндрических резонаторов.

Диагностика, СВЧ электромагнитное излучение, газовая плазма, нейтральные газы, открытые цилиндрические резонаторы

R.K. Yafarov

USE OF THE MICROWAVE ELECTROMAGNETIC RADIATION FOR DIAGNOSTICS OF PLASMA AND NEUTRAL GAS ENVIRONMENTS

Prospects of use of not stir up microwave electromagnetic radiation for diagnostics and research of plasma and neutral gas environments are considered. Are analyzed physics of processes and possible techniques of the organization of diagnostics and monitoring of change of a condition of gas environments with use of open cylindrical resonators.

Diagnostics, microwave electromagnetic radiation, gas plasma, neutral gases, open cylindrical resonators

Введение

Актуальной проблемой современной микро- и нанoeлектроники является создание источников плазмы для высокопроизводительной безрадиационной вакуумно-плазменной обработки полупроводниковых материалов на подложках большой площади. Этим требованиям удовлетворяет плазма на основе микроволнового газового разряда в магнитном поле. Однако создание источников плазмы большого объема наталкивается на серьезные трудности, связанные с нежелательным снижением концентрации плазмы и ее однородности при увеличении площади обрабатываемой пластины.

Другой не менее важной проблемой всех известных методов вакуумно-плазменной обработки материалов в микроэлектронике, включающих «сухое» травление, осаждение, очистку и т.д., является недостаточно высокая для удовлетворения требований нанoeлектроники воспроизводимость параметров плазменного процесса. Это объясняется комплексным влиянием на них большого количества неконтролируемых или контролируемых с недостаточной точностью параметров, таких как стабильность мощности генераторов, давления в системе, изменение скорости откачки и прокачки газов, натекание атмосферного воздуха или газовой выделения и т.д. Все это существенным образом отражается на воспроизводимости интегральных характеристик плазменных источников, таких как температура и концентрация электронов, их распределении по плазменному объему, и, как следствие, на воспроизводимости характеристик обработки как по радиусу от центра подложки, так и от процесса к процессу.

Проблема воспроизводимости внутренних параметров плазмы в технологических устройствах, применяемых в микроэлектронике, не является новой. Особенно актуальной становится она в последние годы при создании СБИС высокой стоимости с повышенной

степенью интеграции на пластинах сверхбольших диаметров (10-12 дюймов и более). Одним из путей решения проблемы является создание микроволновых источников плазмы с распределенным вводом энергии и активным воздействием на пространственное распределение плотности плазмы по сечению многомодового реактора [1,2]. Однако для управления этим воздействием необходима оперативная информация о текущем распределении параметров плазмы по сечению реактора, методы получения которой в реальном масштабе времени для технологических источников плазмы, применяемых в микроэлектронике, ещё не разработаны.

В настоящее время имеются методы контроля параметров плазмы, включающих эмиссионный, масс-спектрометрический контроль, зондовые измерения и др. Однако все они являются или косвенными, или неполными, или возмущающими, т.е. не один из существующих методов не дает исчерпывающей информации о параметрах плазменного процесса и, тем более, о пространственном их распределении по плазменному объему в реальном времени.

В связи с этим в настоящем разделе изложены физико-технические основы использования бесконтактного невозмущающего микроволнового зондирования плазмы и нейтральных газовых сред различного химического состава для проведения научных исследований и разработки методов и средств диагностики и мониторинга высокопрецизионных вакуумно-плазменных технологических процессов в производстве СБИС с высокой степенью интеграции на пластинах сверхбольшого диаметра.

1. Физика явления

Разработка метода основывается на общей теории взаимодействия электромагнитных волн СВЧ диапазона с газовой низкотемпературной плазмой, разработанной в начале 60-х годов XX века в работах В.Л. Гинзбурга [3], В.Е. Голанта [4] и др., из которой следует, что невозмущающее зондирование ее электромагнитными волнами является наиболее информативным методом диагностики и мониторинга плазмы. Эта теория нашла широкое экспериментальное подтверждение при решении многих важных научно-технических проблем.

Невозмущающее микроволновое зондирование означает, что уровень мощности электромагнитной волны пренебрежимо мал, поэтому влиянием электрического поля волны на состояние среды можно пренебречь. Однако сама среда из-за эффектов, связанных с ее поляризацией, может оказывать существенное влияние на распространение зондирующей волны. Распространение такой электромагнитной волны в зондируемой плазменной среде в z - направлении может быть описано выражением:

$$E, H \sim \exp \left[-i\omega \left(t - n \frac{z}{c} \right) - \chi \frac{\omega}{c} z \right], \quad (1)$$

где $n = \sqrt{1 - n_e/n_c}$ – показатель преломления, определяющий фазовую скорость бегущей волны $v = c/n$ (c – скорость света в вакууме) и длину волны $\lambda = \lambda_0/n$ в плазме (λ_0 – длина волны в вакууме), n_e – плотность плазмы, n_c – критическая плотность плазмы, при которой волна перестает быть бегущей (обычно частоту зондирующего излучения выбирают таким образом, чтобы $n_e \ll n_c$); χ – коэффициент поглощения, который характеризует затухание волны, ее амплитуда уменьшается в e – раз на расстоянии $z = c/\omega\chi$ или в e^χ раз на фиксированном для данной частоты расстоянии $z = c/\omega = \lambda_0/2\pi$. Из этого выражения следует, что влияние плазменной среды на распространение зондирующей электромагнитной волны можно определить по величине фазового сдвига или ее затуханию.

Для оценки величин эффектов взаимодействия зондирующего излучения с плазмой рассмотрим однородный слой плазмы плотностью n_e и толщиной l_p . Будем считать, что излучающая антенна формирует плоскую волну $E_z = E_0 \sin(\omega t - kz)$, проходящую сквозь плазму и принимаемую приемной антенной. Когда плазма отсутствует, пространственная

фаза волны у приемной антенны будет равна: $\varphi_1 = k_1 l_1 = \left(\frac{\pi}{\lambda_1} \right) l_1$, где l – расстояние между антеннами. При наличии плазмы фаза принимаемой волны изменится:

$$\varphi_2 = \left(\frac{\pi}{\lambda_1} \right) l_p + \left(\frac{\pi}{\lambda_2} \right) l_p, \quad (2)$$

где $\lambda_2 = \lambda_1/n$. Таким образом, дополнительный набег фазы, связанный с появлением плазмы между антеннами, будет

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = \left(\frac{\pi l_p}{\lambda_1} \right) (n - 1). \quad (3)$$

Если плазма неоднородная $n = n(z)$, то соотношение (3) следует переписать в виде

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_1} \int_0^{l_p} \left(\sqrt{1 - \frac{n_e}{n_c}} - 1 \right) dz \quad (4)$$

При $n_e \ll n_c$ подкоренное выражение в (4) можно разложить в ряд и, ограничившись первыми двумя членами, получить выражение

$$\Delta\varphi = -\frac{\pi}{\lambda_1 n_c} \int_0^{l_p} n_e dz = -\pi \frac{l_p}{\lambda} \frac{\bar{n}_e}{n_c} \quad (5)$$

где \bar{n}_e – средняя плотность плазмы. Из выражения (5) можно определить плотность плазмы по измеренной разности фаз (без плазмы и с плазмой).

Кроме измерения фазы или затухания (уменьшение амплитуды) (см. выражение (1)) СВЧ излучения на двух или нескольких частотах зондирующей волны при заполнении некоторого объема плазмой для измерения ее параметров, используются и другие эффекты, например, смещение резонансной частоты полого резонатора при плазменном наполнении. В последнем случае выражение для сдвига резонансной частоты резонатора имеет вид [5]

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} = \frac{1}{2} \frac{\bar{n}_e}{n_c} \frac{V_p}{V_r} C_\gamma, \quad (6)$$

где V_p, V_r – объемы плазмы и резонатора, соответственно.

$$C_\gamma = \frac{V_r \int n_e E_{mpq}^2 dV}{\int_0^{\gamma_1} n_e dV \int_0^{\gamma_1} E_{mpq}^2 dV} \quad (7)$$

коэффициент, зависящий от распределения плотности плазмы $n_e(V)$ и электрического поля моды E_{mpq} по объему резонатора.

Исходя из условия малости возмущения, минимальную частоту зондирующего излучения (частоту возбуждения резонатора) можно оценить, как уже говорилось, из условия $n_{e\max} = 0,1n_c$. Если $n_{e\max} = 5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ (характерная плотность СВЧ плазмы в установках вакуумно-плазменной обработки материалов), то, согласно расчету из выражения для плазменной частоты [6], получим $\omega_{\min} = 1,26 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$ ($f_{\min} = 20 \text{ ГГц}$). С увеличением частоты зондирующего сигнала влияние плазмы на параметры электромагнитной волны уменьшается.

Последовательное зондирование пространства плазмы несколькими типами электромагнитных колебаний с различными азимутальными индексами, обеспечивающее локализацию электрических полей в кольцах различной ширины (или, как принято говорить, с различным радиусом внутренней каустики), и измерения смещений резонансных частот этих типов волн позволяют получить информацию о пространственном распределении плотности плазмы по объему резонатора.

2. Измерение плотности нейтрального газа

Важной принципиальной особенностью метода является возможность мониторинга газовых сред, находящихся в плазмохимических установках как в ионизованном, так и нейтральном состоянии. Для измерения плотности (давления или его изменения) нейтрального газа, его вида (или наличия примесей в нем, например влаги и др.) можно использовать высокочувствительные осесимметричные открытые резонаторы (ООР) СВЧ

диапазона [5]. Основные преимущества применения ООР по сравнению с традиционно используемыми жидкостными манометрами, термопарными и ионизационными вакуумметрами, пьезоэлектрическими датчиками и пр. заключаются в его возможности определять распределение плотности газа по сечению, в частности измерять плотность газа в центре. Очень важно и то, что эти измерения производятся бесконтактным путем. Кроме того, часто существенна его малая инерционность (время измерения легко можно сделать 10^{-5} - 10^{-6} с). Учитывая эти особенности, можно использовать ООР для диагностики струй нейтрального газа – как квазистационарных, так и импульсных, и исследовать их поведение во времени и в пространстве. Знание распределения плотности газа важно при изучении работы импульсных клапанов для напуска газа в рабочую камеру, при разработке механических затворов для выпуска мощных пучков электронов в атмосферу и других подобных устройств.

Физические основы метода и техника при этом остаются теми же: измеряют сдвиг частоты ООР при заполнении его газом. Основное отличие от плазменных экспериментов – существенно меньшие значения частотных смещений из-за очень малого отличия диэлектрической постоянной от единицы при обычных давлениях.

Изменение частоты резонатора при заполнении его газом давлением p можно определить следующим образом. Учитывая связь между проводимостью и диэлектрической постоянной

$$\varepsilon - 1 = -i \frac{4\pi}{\omega} \sigma, \tag{8}$$

получаем соотношение

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} = \frac{\frac{1}{2} \int_{V_r} \varepsilon - 1 E^2 dV}{\int E^2 dV} = \frac{1}{2} \langle \varepsilon - 1 \rangle, \tag{9}$$

если газ занимает весь объем резонатора.

Для неполярных газов

$$\varepsilon - 1 = 4\pi\alpha_e n, \tag{10}$$

где α_e – электронная поляризуемость; n – число атомов газа в единице объема.

Для полярных газов

$$\varepsilon - 1 = \left(-\frac{d_e^2}{3kT} \right) n, \tag{11}$$

где d_e – электрический дипольный момент молекулы; k – постоянная Больцмана.

Как видно из приведенных соотношений, в обоих случаях $\varepsilon - 1$ пропорционально плотности n , поэтому можно записать

$$\varepsilon - 1 = const \cdot n^*. \tag{12}$$

Константу в (12) можно вычислить или измерить для различных газов, и поэтому с помощью формул (9) и (12) можно найти абсолютное значение плотности газа или давления (перейти к давлению можно с помощью известного соотношения $p = nkT$).

Если газ занимает не весь объем, а только его часть (например, струя, инжектируемая в вакуумную камеру), то следует использовать общее соотношение (9)

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} = const \frac{\int_{V_r} E^2 \langle \varepsilon - 1 \rangle dV}{\int_{V_r} E^2 dV}, \tag{13}$$

и проводить определение $n(V)$ точно так же, как это делают при определении плотности плазмы, т.е. с помощью зондирования на модах с разными каустиками.

Оценим теперь значения ожидаемых частотных смещений. Обычно в справочниках дают значение ε , приведенное к комнатной температуре ($t_0 = 18^\circ\text{C}$) и нормальному давлению

$p = p_0 = 760$ мм рт. ст. ($1,01 \cdot 10^5$ Па); обозначим его ϵ_0 . В качестве примера приведем значение ϵ_0 для некоторых газов:

Газ	ϵ_0	$\epsilon_0 - 1$
Азот	1,00061	0,00061
Водород	1,00026	0,00026
Воздух	1,00059	0,00059
Гелий	1,00007	0,00007
Пары воды	1,0078	0,0078

Переход к величинам ϵ_p, T при различных давлениях и температуре может быть сделан по соотношению (12):

$$\epsilon_{p,T} - 1 = \frac{\epsilon_0 - 1}{T p_0} T_0 p, \quad (14)$$

где $T_0 = (273 + t_0)$, °С; T – температура газа, К.

Далее для простоты примем, что температура газа остается постоянной, $\epsilon_{p,T} = \epsilon_p$. Тогда

$$\epsilon_p - 1 = \frac{\epsilon_0 - 1}{p_0} p = \epsilon_0 - 1 \cdot 10^{-5} p, \quad (15)$$

где p – давление, Па.

С помощью (15) и (9) можно найти смещение частоты резонатора при изменении в нем давления на Δp . В частности, если отсчитывать смещение от частоты резонатора в вакууме, то $\Delta p = p$ и

$$\frac{\Delta \omega}{\omega} = \epsilon_0 - 1 \cdot 10^{-5} p. \quad (16)$$

С помощью (15) можно оценить минимально измеряемое давление p_{\min} , если известен сорт газа. Из (15) найдем

$$p_{\min} = \frac{10^5}{\epsilon_0 - 1} \left(\frac{\Delta \omega}{\omega} \right) = \frac{10^5}{\epsilon_0 - 1} \frac{\eta}{Q}.$$

Коэффициент η зависит от способа измерения частоты; обычно $\eta \sim 0,5 \div 0,1$. Положим для оценок $\eta \approx 0,2$, $Q \approx 3 \cdot 10^4$. Тогда для воздуха или азота имеем $p_{\min} \approx 10^3$ Па. Для водяного пара это значение будет примерно в 13 раз ниже, а для гелия – примерно в 8 раз выше. Отсюда ясно, что при работе с наиболее распространенными в плазменных экспериментах газами H_2 , He, N_2 ... при обычной технике регистрации частотных сдвигов можно исследовать давления свыше десятков (для гелия – сотен) килопаскалей. Для измерения давлений ниже 10^5 Па требуются регистрирующие схемы с возможностью измерять сдвиги $\Delta \omega / \omega \leq 10^{-6}$, что является уже непростой задачей.

3. Диагностика плазмы с использованием открытых цилиндрических резонаторов

Для резонатора с характерным размером (диаметром) $D = 330$ мм, конструктивно сопряженным с реакторной камерой в вакууно-плазменных установках для обработки кремниевых пластин диаметром до 300 мм, при возбуждении в полуторасантиметровом диапазоне длин волн будет наблюдаться практически сплошной спектр из-за большого количества возбуждаемых типов волн. Поэтому использование резонаторного метода в данных условиях возможно лишь при условии осуществления селекции возбуждаемых типов колебаний.

Известно [5], что открытые осесимметричные резонаторы (ООР), например, открытые цилиндрические резонаторы (ОЦР) и открытые бочкообразные резонаторы (ОБР), имеют более редкий спектр по сравнению с закрытыми резонаторами, так как в ООР типы колебаний с большими аксиальными числами имеют большие радиационные потери и практически не возбуждаются. Дальнейшая селекция возможна при использовании системы распределенной связи, при которой возбуждение резонатора осуществляется с помощью волновода, охватывающего резонатор по экватору, и имеет большое число элементов связи – отверстий, раз-

мещенных на их общей стенке. При распределенной связи, в отличие от сосредоточенного возбуждения, например, с помощью единичного штыря или отверстия, возбуждающее поле в резонаторе характеризуется уже двумя параметрами – частотой и пространственной структурой. За характеристику последней в первом приближении можно принять пространственный период ее основной гармоники или ее номер. Поскольку каждое из собственных колебаний резонатора также характеризуется своим распределением поля, т.е. своим периодом, резонанс наступает при одновременном выполнении двух условий: совпадение частот и пространственных периодов.

Таким образом, при использовании распределенного возбуждения, кроме отбора по частоте, происходит дополнительный отбор по азимутальному индексу, из-за чего реализуется дополнительное разрежение спектра возбуждаемых колебаний. Это дает возможность использовать резонаторы больших размеров на коротких длинах волн.

На рис. 1 в качестве иллюстрации приведены расчетные распределения напряженностей электрических полей в колебаниях мод пристеночного типа H_{mpq} с $m = 3 \dots 8$, из которых следует, что с изменением азимутального числа изменяется радиус действия (амплитуда) зондирующего электрического поля.

Для возбуждения резонатора на расчетной зондирующей частоте можно использовать

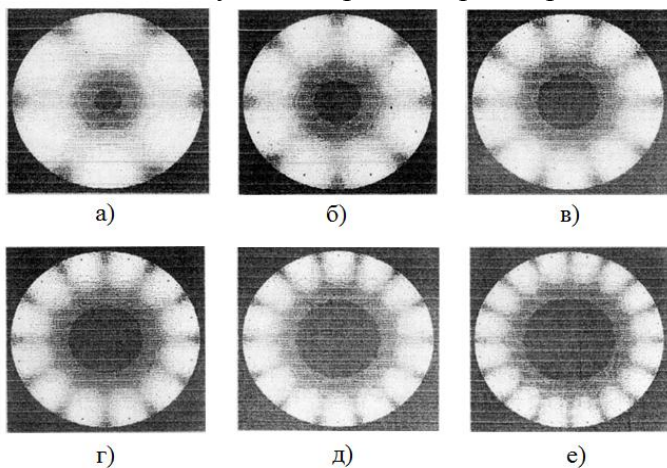


Рис. 1. Расчетные распределения напряженностей электрических полей с различными азимутальными индексами m в многомодовом СВЧ реакторе: а) $m = 3$; б) $m=4$; в) $m=5$; г) $m=6$; д) $m=7$; е) $m=8$

прямоугольный волновод сечением $11 \times 5,5$ мм с диаметрами отверстий связи в общей стенке резонатора и волновода выбираемых из соотношения $d/\lambda = 0,08 - 0,13$. При размерах отверстий связи меньших значений этого соотношения сигнал, снимаемый с резонатора, становится слишком маленьким; при больших – возможно их влияние на собственную добротность резонатора. В рассматриваемом случае размер отверстий связи составляет около 1,5 мм.

Для вывода сигнала из резонатора целесообразно использовать такой же тип волновода, расположенный в одной плоскости с входным волноводом так, чтобы каждый из них занимал половину длины окружности экватора. Резонатор может быть выполнен в виде скачка внутреннего диаметра реакторной камеры установки в

сторону его увеличения или уменьшения (рис. 2).

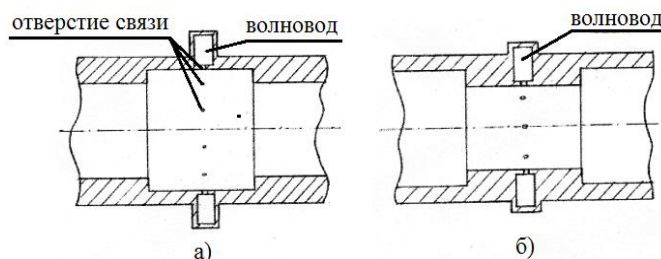


Рис. 2. Схема расположения диагностической секции с волноводными вводами в СВЧ реакторе: а – диаметр ДС больше диаметра реакторной камеры; б – диаметр ДС меньше диаметра реакторной камеры

Расчет расстояний между отверстиями связи, определяющих состав возбуждаемого спектра колебаний в резонаторе, может быть осуществлен из «карты резонансов», построенной по методике, изложенной в [5]. Так, для диаметра ОЦР, равного 330 мм, в диапазоне частот зондирующего излучения от 18 до 24 ГГц при $q = 1$ и расстоянии между отверстиями связи $L_d = 129$ мм спектр резонатора содержит моды с азимутальными числами от 5 до 61, рав-

номерно перекрывая весь диапазон. Азимутальные числа группируются около значений $m = 5, 12, 21, 28, 36, 44, 53, 61$. Общее количество отверстий в волноводно-резонаторном переходе равно 8 (по 4 отверстия на каждый канал). Данный набор мод позволяет определять и/или отслеживать (в случае непрерывного зондирования при разных частотах задающего генератора) изменения распределения плотности плазмы по координатам пространства реактора в процессе вакуумно-плазменной обработки.

Блок-схема методики измерения сдвигов резонансных частот ОЦР в присутствии плазмы для нескольких рабочих мод с различными азимутальными числами приведена на рис. 3.

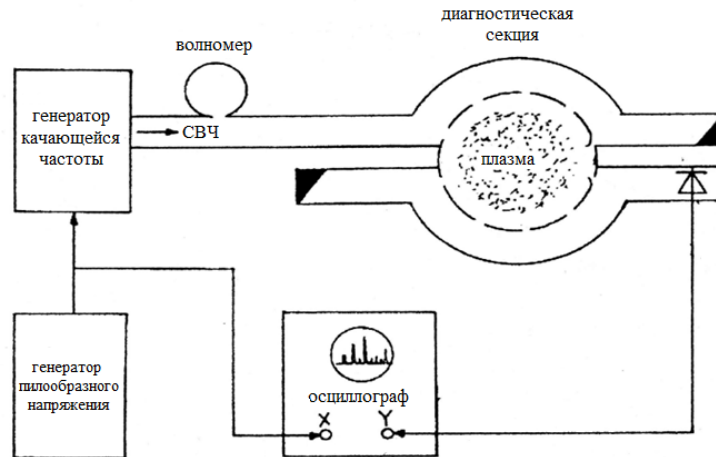


Рис. 3. Блок-схема определения сдвига резонансных частот ОЦР в СВЧ реакторе плазменной установки

Генератор качающей частоты (ГКЧ) с диапазоном перестройки от 18 до 24 ГГц в схеме управляется по частоте с помощью генератора пилообразного напряжения (ГПН). Сигнал с ГКЧ через волномер подается на диагностическую секцию (ДС) – резонатор. Снимаемый с ДС сигнал после детектирования подается на Y – канал осциллографа, а на его X – вход – сигнал с ГПН. Таким образом, на экране осциллографа по горизонтальной оси отображается частота, а по вертикальной – отклик от собственных мод ОЦР. Волномер позволяет определить резонансную частоту каждой возбуждаемой моды. Внешний вид диагностической секции на основе ОЦР приведен на рис. 4.

Возможно также построение измерительной схемы на основе стандартного панорамного измерителя $K_{стU}$, включенного на измерение коэффициента передачи диагностической секции.

Перспективным представляется применение резонаторных методов также для контроля моментов возбуждения плазмы с заданным составом и окончания процессов плазмохимической обработки (травления) тонкопленочных гетероструктурных материалов по изменению химического состава и плотности плазмы при переходе через границу раздела в гетероструктуре.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. 2106717 Российская Федерация, МПК⁶ Н 01 J 37/32. Установка для микроволновой вакуумно-плазменной обработки конденсированных сред / Яфаров Р.К.; заявитель и патентообладатель Яфаров Р.К. – № 5040131/09; заявл. 27.04.92; опубл. 10.03.98, Бюл. № 30. – 3 с.: ил.



Рис. 4. Внешний вид открытого цилиндрического резонатора с волноводной системой возбуждения и приема СВЧ зондирующего излучения

2. Пат. 2120681 Российская Федерация, МПК⁶ Н 01 L 21/3065. Устройство для микроволновой вакуумно-плазменной с электронно-циклотронным резонансом обработки конденсированных сред / Яфаров Р.К.; заявитель и патентообладатель Яфаров Р.К.. – № 96108018/25; заявл. 16.04.96; опубл. 20.10.98, Бюл. № 30. – 3 с.: ил.

3. Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме / В.Л. Гинзбург. – М.: Наука, 1967. – 685 с.

4. Голант В. Е. Сверхвысокочастотные методы исследования плазмы / В.Е. Голант. – М.: Наука, 1968. – 327 с.

5. Москалев И. Н, Стефановский А. М. Диагностика плазмы с помощью открытых цилиндрических резонаторов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 145 с.

6. Райзер Ю.П. Физика газового разряда / Ю.П. Райзер. – М.: Наука, 1987. – 592 с.

Яфаров Равиль Кяшшафович –
доктор технических наук, профессор кафедры
«Автоматизированные электротехнологические
установки и системы» Саратовского
государственного технического университета
имени Гагарина Ю.А.

Ravil K. Yafarov –
Dr. Sc., Professor
Department of Automated Electrical-Technological
Plants and Systems,
Gagarin Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 14.05.12, принята к опубликованию 13.06.12