

## СОДЕРЖАНИЕ

### ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

<b>Архангельский Ю.С., Гришина Е.М.</b> Влияние диэлектрической проницаемости среды, заполняющей согласующий четвертьволновый трансформатор, на энергетическую эффективность камер лучевого типа.....	6
<b>Архангельский Ю.С., Доценко А.В.</b> Резервирование в СВЧ сушилках пиломатериалов.....	9
<b>Беляев В.И., Фурсаев М.А.</b> Импедансная характеристика транзистора и устойчивость работы СВЧ транзисторного генератора.....	14
<b>Огурцов К.Н., Лаврентьев В.А., Лабунская В.И., Короткова Е.В., Артамонова Ю.В.</b> Влияние СВЧ - излучения на химический и биологический состав пластовых вод.....	18
<b>Лаврентьев В.А., Калганова С.Г.</b> Применение технологии СВЧ обработки при производстве базальтовых труб.....	23
<b>Гришина Е.М.</b> Целесообразность применения гибридных СВЧ электротехнологических установок.....	26
<b>Гришина Е.М.</b> Влияние параметров рабочей камеры лучевого типа на её энергетическую эффективность.....	29
<b>Чесноков Б.П., Ажгалиев Ю.А., Угаров Г.Г., Вайцуль А.Н.</b> Электротехнологический процесс получения полимерных материалов.....	35
<b>Дунаева Т.Ю.</b> Общие принципы рационального подхода к выбору СВЧ установок для сушки зерна и семян.....	39
<b>Антонов И.Н., Чижов К.А.</b> Физические процессы, проходящие в импульсных разрядных камерах.....	43
<b>Чижов К.А.</b> Метод приближенного расчета импульсных эрозионных камер.....	49
<b>Давыдов Д.А.</b> Исследование диэлектрических свойств теплоизоляционного материала на основе жидкого стекла.....	55
<b>Яковлева И.Б., Ватрушкин Д.А., Сальникова Д.А., Скоробогатова А.В.</b> Гармонический анализ импульсов катодного тока в клистроде.....	57
<b>Слепцова С.К., Лаврентьев В.А.</b> Модификация волокнистого поликапроамида в СВЧ электромагнитном поле.....	60
<b>Степанов С.Ф., Курдя В.В.</b> Разработка энергоэффективных автономных источников электропитания для мобильных СВЧ установок.....	64
<b>Нейман В.Ю., Угаров Г.Г., Егоров А.А.</b> Форсированные линейные электромагнитные двигатели для импульсных технологий.....	75
<b>Артюхов И.И., Сошинов А.Г., Артюхова И.И.</b> Обеспечение электромагнитной совместимости установок СВЧ нагрева с источниками электроснабжения.....	80
<b>Сальникова Д.А., Царев В.А.</b> Оценка выходных параметров многолучевого клистрода с трубчатými электронными пучками.....	88
<b>Артюхов И.И., Вокин И.А.</b> Двухканальное регулирование выходного напряжения блока «асинхронный генератор – выпрямитель».....	97
<b>Анфиногенова Е.В.</b> Применение СВЧ энергоподвода в сушилках мелкодисперсных сред.....	102
<b>Колесников Е.В.</b> Цены, тарифы и коммерческий расчет в электротехнологии.....	104
<b>Колесников Е.В.</b> Вспомогательное оборудование установок СВЧ диэлектрического нагрева.....	106
<b>Кожевников В.Ю.</b> Мониторинг спекания керамических материалов в СВЧ электромагнитном поле.....	111
<b>Огурцов К. Н., Брюханов М.В.</b> СВЧ электротехнологические установки для высокотемпературного нагрева диэлектриков.....	116
<b>Кульбацкий Д.М., Нефедов Д.В., Семенов С.И., Яфаров Р.К.</b> Влияние режима синтеза в неравновесной плазме СВЧ газового разряда на фундаментальные свойства наноразмерного пленочного кремния и его соединений.....	121
<b>Шаныгин В.Я., Яфаров Р.К.</b> Механизм и качество травления кремния различных кристаллографических ориентаций в плазме СВЧ газового разряда низкого давления.....	129
<b>Архангельский Ю.С., Гришина Е.М.</b> К вопросу о получении максимальной удельной поглощенной мощности в камерах лучевого типа.....	136
<b>Слепцова С.К., Кульбацкий Д.М.</b> Исследование поликапроамидных нитей в СВЧ электромагнитном поле.....	140
<b>Слепцова С.К., Кульбацкий Д.М.</b> Модификация поликапроамидных нитей в СВЧ электро-	

## CONTENTS

**POWER ENGINEERING AND ELECTRICAL ENGINEERING**

<b>Arkhangelskiy Y.S., Grishina E.M.</b> The influence dielectric permeability of the ambience, filling matching quarter-wave transformer, on energy efficiency of the cameras of the beam type.....6	6
<b>Arkhangelskiy Y.S., Dotsenko A.V.</b> Reservation in the microwave dryers of saw-timbers.....9	9
<b>Beljaev I.V., Fursaev M.A.</b> Transistor's impedance characteristic and stability of the micro-wave transistor generator with an external feedback.....14	14
<b>Ogurtsov K.N., Lavrentiev V.A., Labunskaya V.I., Korotkova E.V., Artamonova Y.V.</b> The influence of on the chemical and biological mixture of reservoir water.....18	18
<b>Lavrentiev V.A., Kalganova S.G.</b> Application of technology of the microwave of processing by manufacture basalt pipes.....23	23
<b>Grishina E.M.</b> Practicability of the using hybrid microwave electrotechnological installations.....26	26
<b>Grishina E.M.</b> Influence parameter worker of the camera of the beam type on her energy efficiency.....29	29
<b>Chesnokov B.P., Azhgaliyev Y.A., Ugarov G.G., Vaicul A.N.</b> Electrotechnology manufacturing process polymer materials.....35	35
<b>Dunaeva T.Y.</b> Rational choice of drying plants for agricultural products.....39	39
<b>Antonov I.N., Chizhov K.A.</b> The physical processes of the erosive discharge cameras.....43	43
<b>Chizhov K.A.</b> The method of evolution calculation of the impulse erosive discharge cameras.....49	49
<b>Davidov D.A.</b> Research of dielectric properties the warmlyisolation material on the basis of liquid glass.....55	55
<b>Yakovleva I.B., Vatrushkin D.A., Salnikova D.A., Skorobogatova A.V.</b> The harmonious analysis of pulses of the cathodic current in klystrod.....58	58
<b>Sleptsova S.K., Lavrentiev V.A.</b> Modification of polycaproamid in the electromagnetic field of SHF.....61	61
<b>Stepanov S.F., Kurdia V.V.</b> Elaboration energoeffective autonomous sources of electrosupplies for mobile microwaves of devices.....64	64
<b>Nayman V.U., Ugarov G.G., Yegorov A.A.</b> The forced linear electromagnetic engines for pulsed technology.....75	75
<b>Artjukhov I.I., Soshinov A.G., Artjukhova I.I.</b> Ensuring of electromagnetic compatibility of microwave devices of heating with sources of electrosupply.....80	80
<b>Salnikova D.A., Tsarev V.A.</b> Estimation of target parameters multibeam klystrod with tubular electronic beams.....88	88
<b>Artjukhov I.I., Vokin I.A.</b> Two-channel regulation of the target voltage of the block «the power providing asynchronous generator - the rectifier».....97	97
<b>Anfinogenova E.V.</b> Using UHF power providing in dryer fine-dyspersated ambiences.....102	102
<b>Kolesnikov E.V.</b> The prices, tariffs and commercial payment in electrotechnics.....104	104
<b>Kolesnikov E.V.</b> Accessory of the installation UHF dielectric heating.....106	106
<b>Kozhevnikov V.Y.</b> Monitoring of microwave electromagnetic sintering of ceramic solids.....111	111
<b>Ogurtsov K. N., Bruchanov M.V.</b> Microwave electrotechnological plants for high temperature heating of dielectrics.....116	116
<b>Kulbatskiy D.M., Nefedov D.V., Semenov S.I., Yafarov R.K.</b> The influence of synthesis regime in nonequilibrium microwave plasma on fundamental properties of nanosized thin film silicon and its compounds.....121	121
<b>Shanigin V.Y., Yafarov R.K.</b> Mechanism and quality of silicon etching with different crystallographic orientation in microwave plasma.....129	129
<b>Arkhangelskiy Y.S., Grishina E.M.</b> To question about reception maximum specific power in camera of the beam type.....136	136
<b>Sleptsova S.K., Kulbatskiy D.M.</b> Exploration of stringy polycaproamide in the electromagnetic field of SHF.....141	141
<b>Sleptsova S.K., Kulbatskiy D.M.</b> Modification of stringy polycaproamide in the electromagnetic field of SHF.....143	143



## Энергетика и электротехника

Этот выпуск «Вестника Саратовского государственного технического университета» является тематическим. В нем публикуются статьи ученых ведущей научной школы России НИИ-9553.2006.8 и ее аспирантов. Научные исследования, результаты которых отражены в статьях научной школы, получены с использованием гранта Президента Российской Федерации (Соглашение №02.120.11.9553 об условиях предоставления и использования гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущей школы Российской Федерации НИИ-9553.2006.8 от 15 июня 2006 г.).

Работы в области применения энергии СВЧ электромагнитных колебаний в технологических процессах были начаты в Саратовском государственном техническом университете (Саратовском политехническом институте) в 1967 – 1968 годах в отраслевой лаборатории электронной техники кафедры электроники факультета электронной техники и приборостроения. У истоков этих исследований стояли к.т.н., доцент Ю.С.Архангельский, аспирант В.А.Коломейцев, соискатели ученой степени кандидата технических наук инженеры Н.Г.Арделян, И.К.Сатаров. С 1980 г. научная работа в области СВЧ электротехнологии начата на кафедрах «Электроснабжение промышленных предприятий» (Ю.С.Архангельский, Е.В.Колесников, С.В.Тригорный Л.Г.Бунин, Т.Н.Шимило), «Теоретические основы электротехники» (В.А.Сосунов, И.И.Артюхов) энергетического факультета. На этом факультете в 1992 г. была открыта кафедра «Автоматизированные электротехнологические установки и системы». Для ее преподавателей Ю.С.Архангельского, К.Н.Огурцова, Д.А.Давыдова, В.Ю.Кожевникова, С.Г.Калгановой исследования в области СВЧ электротехнологии являются приоритетными.

На основании конкурса, проведенного в 2006 г. Роснаукой совместно с Советом по грантам Президента Российской Федерации по государственной поддержке ведущих научных школ России, научная школа СГТУ в составе Заслуженного деятеля науки РФ, д.т.н., профессора, Почетного работника высшей школы РФ Ю.С.Архангельского, д.т.н., профессора, Почетного работника высшей школы РФ И.И.Артюхова, д.т.н., профессора В.А.Царева, лауреата Государственной премии СССР, д.т.н., профессора М.А.Фурсаева, д.т.н., профессора Г.Г.Угарова, к.т.н., доцента В.Ю.Кожевникова, к.т.н., доцента С.Г.Калгановой, к.т.н., доцента К.Н.Огурцова, к.т.н., доцента Д.А.Давыдова, к.ф.-м.н., доцента И.Н.Антонова, к.т.н., доцента С.Ф.Степанова, к.т.н., доцента И.Б.Яковлевой признана ведущей научной школой России.

Сейчас научная школа НИИ-9553.2006.8 ведет научные исследования по всем основным разделам СВЧ электротехнологии: источники энергии (СВЧ генераторы и источники их питания), линии передачи, рабочие камеры, транспортные системы на базе электропривода, системы управления СВЧ электротехнологических установок, электротехнологические процессы, измерения в СВЧ электротехнологии, модификация свойств диэлектриков и получение новых материалов с применением СВЧ электромагнитных колебаний, энергосбережение в СВЧ электротехнологии.

Грант Президента Российской Федерации способствовал развитию исследований научной школы НИИ-9553.2006.8, часть которых отражена в статьях, вошедших в настоящий выпуск «Вестника Саратовского государственного технического университета». Полностью эти результаты изложены в отчете научной школы по итогам работы в 2006-2007гг.

Руководитель научной школы  
НИИ-9553.2006.8,  
Профессор Ю.С. Архангельский

УДК 621.365.5

Ю.С. Архангельский, Е.М. Гришина

**ВЛИЯНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ СРЕДЫ,  
ЗАПОЛНЯЮЩЕЙ СОГЛАСУЮЩИЙ ЧЕТВЕРТЬВОЛНОВЫЙ ТРАНСФОРМАТОР,  
НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ КАМЕР ЛУЧЕВОГО ТИПА**

*Получены соотношения для расчета зависимости энергетической эффективности камер лучевого типа СВЧ электротермической установки от отклонения диэлектрической проницаемости среды в согласующем четвертьволновом трансформаторе от расчетной величины.*

Y.S. Arkhangel'skiy, E.M. Grishina

**THE INFLUENCE DIELECTRIC PERMEABILITY OF THE AMBIENCE,  
FILLING MATCHING QUARTER-WAVE TRANSFORMER, ON ENERGY EFFICIENCY  
OF THE CAMERAS OF THE BEAM TYPE**

*Correlations are received for calculation of the dependencies to energy efficiency of the cameras of the beam type using hybrid microwave electrothermal installation from deflection dielectric to permeability of the ambience in agreeing quarter-wave of the transformer from accounting value.*

В камерах лучевого типа (КЛТ) СВЧ электротермических установок (СВЧ ЭТУ) электромагнитная волна от излучающей системы частично отражается от поверхности обрабатываемого диэлектрика, что уменьшает энергетическую эффективность камеры (энергетический КПД) и при определенном уровне отражений может вывести из строя генератор. Для увеличения энергетической эффективности предлагается между излучающей системой и поверхностью обрабатываемого объекта поместить слой диэлектрика без потерь, играющий роль четвертьволнового согласующего трансформатора [1]. Предложенные в работе [1] соотношения для расчета диэлектрической проницаемости среды  $\varepsilon'_n$ , заполняющей четвертьволновый согласующий трансформатор, показывают, что эта величина зависит от таких параметров задачи, как геометрия поперечного сечения рабочей камеры (рис.1), диэлектрические параметры обрабатываемой среды  $\varepsilon'_{oc}$  и  $tg\delta'_{oc}$ , длина  $l$  участка между четвертьволновым трансформатором и обрабатываемым объектом, предназначенная для компенсации реактивной составляющей входного сопротивления единицы поверхности обрабатываемого объекта с учетом элементов конструкции КЛТ за обрабатываемой средой (рис.1).

Рассчитанные по этим соотношениям  $\varepsilon'_n$  на практике обычно реализовать не удается и в качестве этого диэлектрика приходится выбирать тот, у которого  $\varepsilon'_n$  ближе всего к расчетному и у которого  $tg\delta'_n \approx 0$ . Отклонения значения  $\varepsilon'_n$  в реальных конструкциях КЛТ от рассчитанной величины приведут к частичному отражению электромагнитной волны от входа четвертьволнового согласующего трансформатора с коэффициентом отражения  $\Gamma$  и к уменьшению энергетической эффективности, рассчитываемой по соотношению

$$\eta = 1 - |\Gamma|^2. \quad (1)$$

Оценим влияние отклонения диэлектрической проницаемости  $\varepsilon'_n \pm \Delta\varepsilon'_n$  от расчетной величины  $\varepsilon'_n$  на величину  $\eta$ .

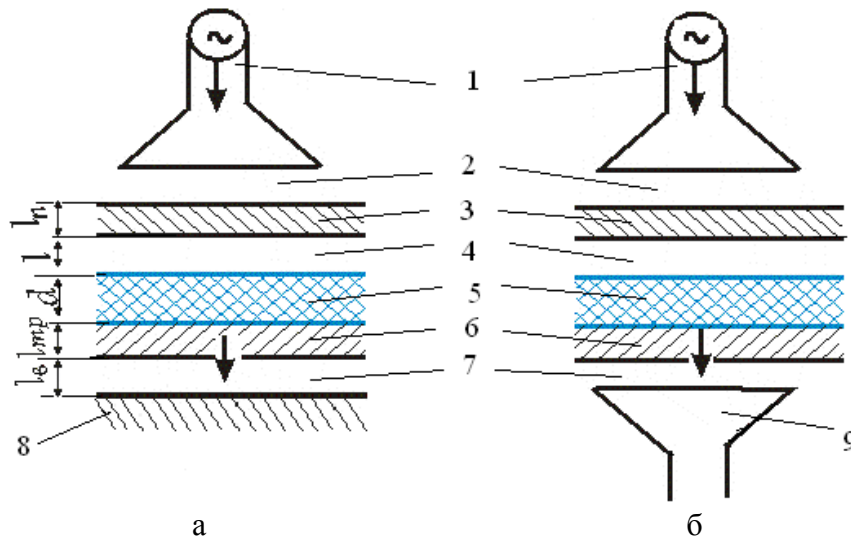


Рис.1. Компоновка камеры лучевого типа СВЧ электротермической установки:  
 а – с коротким замыкателем; б – с приемным согласованным рупором  
 (1 – излучающая система; 2 – воздух; 3 – согласующий трансформатор  
 с  $l_n = \frac{\lambda}{4}$ ; 4 – компенсирующий отрезок; 5 – обрабатываемая среда; 6 – транспортная система;  
 7 – воздух; 8 – короткое замыкание; 9 – приемный рупор)

В соотношении (1)

$$|\Gamma| = \left| \frac{Z_{ex\ mp} - 377}{Z_{ex\ mp} + 377} \right| \quad (2)$$

где входное сопротивление трансформатора  $Z_{ex\ mp}$  рассчитывается по соотношению

$$Z_{ex\ mp} = Z_{0\ n} \frac{Z_{ex\ x} + j Z_{0\ n} \operatorname{tg} \beta_n l_n}{Z_{0\ n} + j Z_{ex\ x} \operatorname{tg} \beta_n l_n} \quad (3)$$

Если в соотношении (3)  $l_n = \frac{\lambda}{4}$ , то  $\beta_n l_n = \frac{\pi}{2}$  и тогда соотношение (3) примет вид

$$Z_{ex\ n} = \frac{Z_{0\ n}^2}{Z_{ex\ x}} \quad (4)$$

Здесь  $Z_{0\ n}$  – характеристическое сопротивление диэлектрика, заполняющего четвертьволновый трансформатор,  $Z_{ex\ x}$  – входное сопротивление отрезка линии передачи по направлению распространения электромагнитной волны на выходе четвертьволнового трансформатора,  $\beta_n \frac{2\pi}{\lambda}$ ,  $l_n$  – длина четвертьволнового перехода.

Если длина  $l$  компенсирующего отрезка (рис.1) выбрана в соответствии с рекомендациями работы [1], т.е. так, что  $Z_{ex\ x}$  – величина чисто активная, а  $\varepsilon'_n$  равна расчетной величине, то [2]

$$Z_{0\ n}^2 = Z_0 Z_{ex\ x}, \quad (5)$$

где  $Z_0 = 377$  Ом – характеристическое сопротивление воздуха.

В таком случае соотношение (4) можно записать в виде

$$Z_{exx} = Z_0 \quad (6)$$

и тогда по (2)  $|\Gamma| = 0$ , а по (1)  $\eta = 1$ , т.е. достигается максимальная эффективность.

Если же диэлектрик, заполняющий четвертьволновый трансформатор, имеет относительную диэлектрическую проницаемость  $\varepsilon'_n \pm \Delta\varepsilon'_n$ , то в соотношении (3)  $Z_{0n}$  являются функциями  $\varepsilon'_n \pm \Delta\varepsilon'_n$ .

При соблюдении всех остальных вышеперечисленных условий

$$|\Gamma| = \left| \frac{\pm \left( \frac{\Delta\varepsilon'_n}{\varepsilon'_n} \right)}{2 \pm \frac{\Delta\varepsilon'_n}{\varepsilon'_n}} \right|. \quad (7)$$

В таком случае энергетическая эффективность рассматриваемой рабочей камеры может быть рассчитана по одному из соотношений:

$$\eta = \begin{cases} 1 - \frac{\left( \frac{\Delta\varepsilon'_n}{\varepsilon'_n} \right)^2}{4 \left( 2 + \frac{\Delta\varepsilon'_n}{\varepsilon'_n} \right)^2}; & (8.1) \end{cases}$$

$$\eta = \begin{cases} 1 - \frac{\left( \frac{\Delta\varepsilon'_n}{\varepsilon'_n} \right)^2}{4 \left( 2 - \frac{\Delta\varepsilon'_n}{\varepsilon'_n} \right)^2}, & (8.2) \end{cases}$$

Соотношение (8.1) справедливо, если диэлектрическая проницаемость равна  $\varepsilon'_n + \Delta\varepsilon'_n$ , а соотношение (8.2) справедливо, если  $\varepsilon'_n - \Delta\varepsilon'_n$ .

Зависимости энергетической эффективности КЛТ от  $\pm \left( \frac{\Delta\varepsilon'_n}{\varepsilon'_n} \right)$  приведены на рис.2.

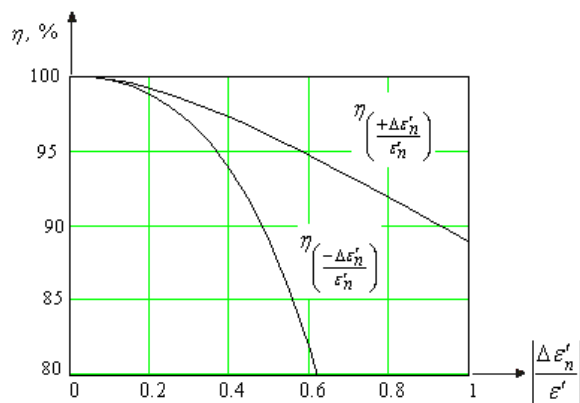


Рис.2. Зависимости энергетической эффективности от отклонения диэлектрической проницаемости диэлектрика согласующего трансформатора от расчетной величины

Согласно рис.2 отклонение диэлектрической проницаемости от расчетной на 60 % приводит к уменьшению энергетической эффективности на 5 -18 % от её максимальной величины.

### Выводы

1. Применение в согласующем четвертьволновом трансформаторе КЛТ диэлектрика без потерь с расчетным значением  $\varepsilon'_n$  даёт возможность получить максимальную энергетическую эффективность.
2. Отклонение реального значения  $\varepsilon'_n$  диэлектрика, заполняющего четвертьволновый трансформатор КЛТ, от расчетного приводит к тем большему уменьшению энергетической эффективности, чем больше это отклонение.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Архангельский Ю.С. Согласование обрабатываемого диэлектрика с рупорным излучателем камеры лучевого типа СВЧ электротермической установки / Ю.С. Архангельский, Е.М. Гришина // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2006. № 4 (19). Вып. 4. С.23-26.
2. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ / И.В. Лебедев. М.: Высшая школа, 1970. Т.1. С.435.

#### **Архангельский Юрий Сергеевич –**

доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, заведующий кафедрой «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета

#### **Гришина Екатерина Михайловна –**

аспирант кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 25 октября 2007г., принята к опубликованию 2 ноября 2007г.*

УДК 621.365.5

Ю.С. Архангельский, А.В. Доценко

### **РЕЗЕРВИРОВАНИЕ В СВЧ СУШИЛКАХ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ**

*Рассмотрены варианты резервирования в СВЧ сушилках длинномерных пиломатериалов.*

Y.S. Arkhangelskiy, A.V. Dotsenko

### **RESERVATION IN THE MICROWAVE DRYERS OF SAW-TIMBERS**

*Variants of reservation in the microwave dryers of lengthy saw-timbers are considered.*



Отсутствие резервирования в мощных высокопроизводительных установках СВЧ диэлектрического нагрева неминуемо приводит к ущербу. Простой установки из-за какой-либо аварии или плановой замены элемента сушилки может привести к существенному уменьшению прибыли по итогам эксплуатации в течение года. В работах [1-4] рассмотрена проблема ущерба и резервирования в установках СВЧ диэлектрического нагрева и изложены принципы оптимизации ущерба и резервирования.

Рассмотрим вопросы выбора варианта резервирования в СВЧ сушилках пиломатериалов. Выбор оптимального варианта резерва должен быть проведен с учетом целесообразности замены традиционных сушилок, например аэродинамических, на СВЧ сушилку и достижения максимальной эффективности СВЧ сушилки с учетом ущерба и затрат на резервирование. Следует отметить существенную разницу не только в способе сушки, скажем, пиломатериалов, но и в организации садки аэродинамических и СВЧ сушилок. В аэродинамических сушилках в садке между слоями досок необходимы воздушные зазоры, для обеспечения прохождения воздушных потоков между слоями пиломатериалов. В то же время в СВЧ сушилке зазоров между слоями не требуется, так как процессы диффузии при объемном тепловыделении способствуют перемещению влаги на внешние поверхности садки, с которой выделяющиеся пары уносятся потоками воздуха, создаваемыми вентиляторами.

Для обеспечения максимальной эффективности СВЧ сушилки, представленной на рис. 1, необходимо оптимизировать ущерб и резервирование. В выбранном варианте используется одна установка с  $A$  магнетронами со своими источниками питания. При большом количестве магнетронов, работающих на одну рабочую камеру, уместен вопрос о применении источников питания, снабжающих энергией от сети переменного тока одновременно несколько СВЧ генераторов. На такую возможность указано в работах [5-8], однако этот вопрос специалистами в области электроснабжения установок СВЧ диэлектрического нагрева до сих пор в полной мере не исследован, а потому схемы установок с общим источником питания для нескольких магнетронов практически не применяются. В дальнейшем будем считать, что в СВЧ сушилке каждый источник СВЧ энергии имеет СВЧ генератор с магнетроном и его источник питания.

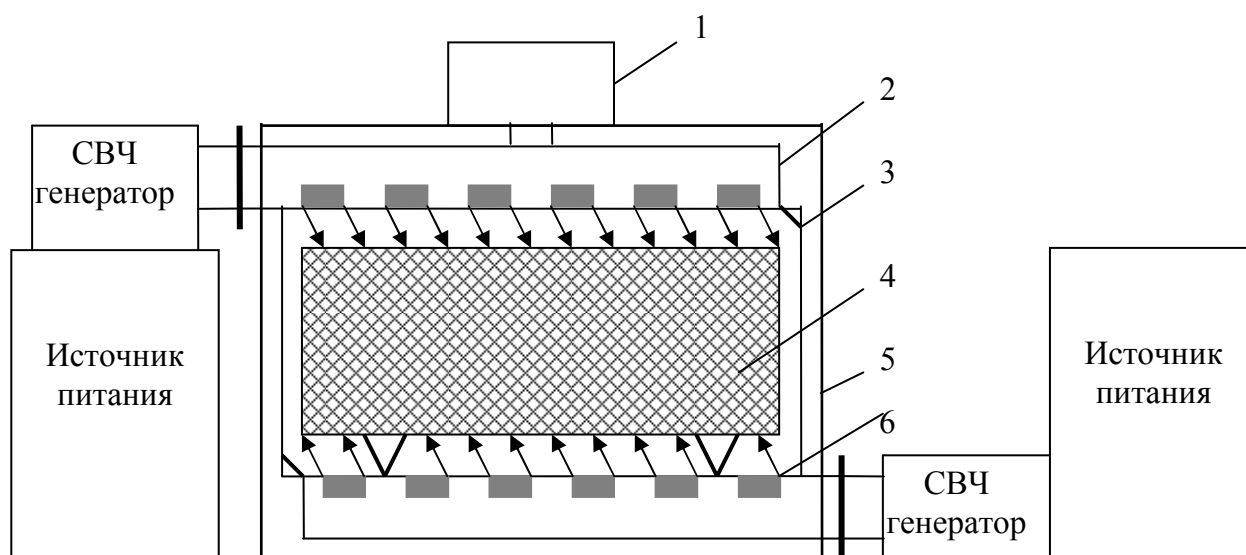


Рис. 1. Компоновка СВЧ сушилки с волноводно-щелевыми излучателями  
 (1 – вентилятор, 2 – волноводно-щелевой излучатель, 3 – отражатель,  
 4 – штабель пиломатериала, 5 – кожух, 6 – щели волноводно-щелевого излучателя)

Таким образом, возможны следующие варианты резервирования в СВЧ сушилке:

- 1)  $A$  магнетронов по 5 кВт каждый в количестве, необходимом для замены двенадцати магнетронов установки в течение года с учетом количества рабочих дней в году, продолжительности работы установки в сутки и сроком службы магнетрона;
- 2) СВЧ генератор с входящим в него магнетроном и количество магнетронов  $A-1$ ;
- 3)  $A$  магнетронов и источник питания;
- 4) СВЧ сушилка и  $A-12$  магнетронов.

Будем считать оптимальным тот вариант ущерба и резервирования, при котором сравнительный интегральный эффект на интервале в один год при сравнении СВЧ сушилки и аэродинамической будет максимальным.

Расчет сравнительного интегрального эффекта следует проводить для СВЧ сушилок с учетом максимально допустимых цен для их элементной базы. В таком случае получим минимальное значение сравнительного интегрального эффекта, и если установка будет приобретена у изготовителя по ценам, меньшим максимально допустимых, то сравнительный интегральный эффект будет гарантированно больше.

Для дальнейших расчетов следует установить пропорции цен рабочей камеры, источника питания, СВЧ генератора и магнетрона. Это можно сделать по ценам элементов установки, приведенным в [9]. В таком случае с учетом банковского кредита, налога на добавленную стоимость, налога на прибыль и выплат дивидендов банковский кредит (цена установки) равен

$$K = \frac{(ПЦ - C_{см})(1 - \gamma_n - \gamma_{ндс})(1 - \gamma_y) - (C_z + C_{zn} + Y)(1 - \gamma_n)(1 - \gamma_y)}{0,14(1 - \gamma_n)(1 - \gamma_y) + 1 + i_{кр}},$$

где  $K = K_y + K_{рез}$ .

Здесь  $K_y = C_k + Z_1 + C_{ин}$ ;  $C_k$  – цена рабочей камеры;  $C_{ин}$  – цена источников питания СВЧ генераторов;  $Z_1$  – цена СВЧ генератора с магнетроном;  $K_{рез}$  – величина затрат на реализацию резерва.

Если цену магнетрона принять за 1, то эта пропорция цен имеет вид 1:3:15:35. Используя эту пропорцию, величину  $K$  можно определить как

$$K = 251X + K_{рез}.$$

Следовательно, величина капиталовложения  $K$  будет варьироваться в зависимости от приведенных выше вариантов резервирования. Так, для первого варианта  $K = 292X$ , для второго  $K = 294X$ , для третьего  $K = 307X$  и для четвертого  $K = 531X$ .

Все рассмотренные до сих пор варианты резервирования предполагают остановку установки для замены вышедшего из строя элемента. От варианта резервирования в первую очередь зависит время простоя, следовательно, ущерб и максимально допустимая цена установки. В то же время можно предложить еще один вариант резервирования, когда можно продолжать процесс сушки садки, находящейся в установке (рис. 2).

На частоте 433 МГц волноводно-щелевые излучатели длиной 1,5 м расположены на верхней и нижней стенках туннеля. С помощью поворотов излучатели размещаются на стенке камеры зигзагообразно, подобно меандровому волноводу СВЧ сушилок тонких материалов [10]. Размеры садки должны быть такими, чтобы поперечное сечение относительно оси камеры было квадратным. Подобные же зигзагообразные волноводно-щелевые излучатели должны быть расположены и на боковых стенках камеры.

Квадратное сечение штабеля пиломатериалов позволяет получить наименьшее изменение характера температуры поля в обрабатываемом объекте, если СВЧ энергоподвод осуществлен только сверху и снизу штабеля или боковых поверхностей.

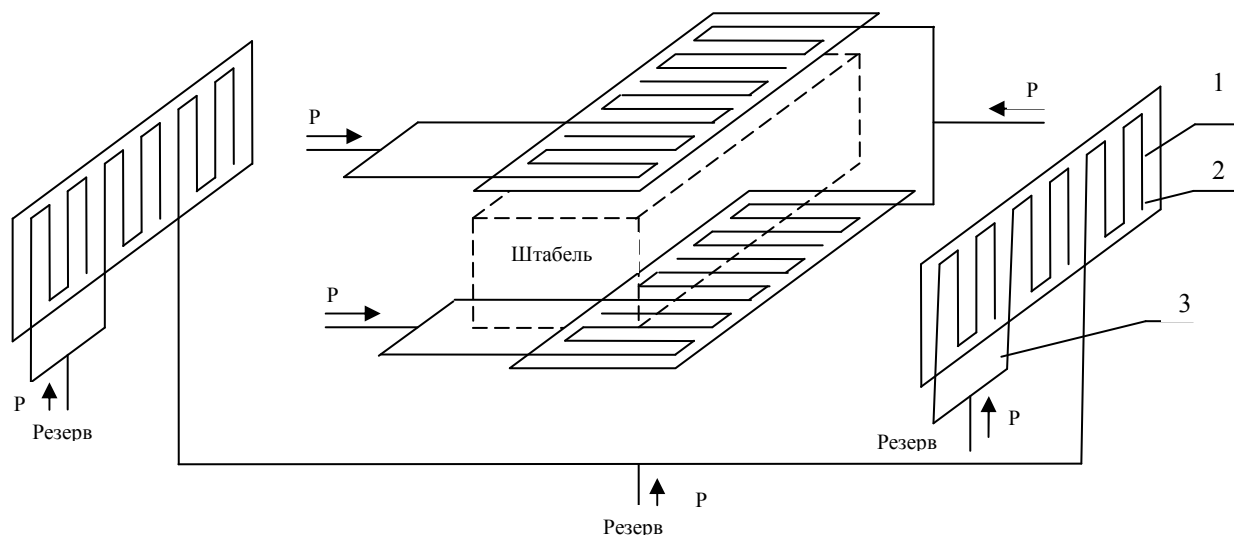


Рис. 2. Компоновка СВЧ сушилки с резервными излучателями  
(1 – волновод с поперечными щелями на широких стенках,  
2 – короткое замыкание волновода, 3 – волноводный тройник)

Если рабочую камеру и систему волноводно-щелевых излучателей в рассмотренном случае на частоте 433 МГц использовать для сушки пиломатериалов, то квадратное поперечное сечение 0,36 x 0,36 м будет иметь место, если штабель собрать из 9 слоев по 2 доски в слое (без прокладок). Так как длина волноводно-щелевого излучателя на прямоугольном волноводе сечением 250 x 500 мм равна 1,5 м, то один волноводно-щелевой излучатель должен иметь 4 секции, а всего для облучения каждой из четырех сторон требуется 3 волноводно-щелевых излучателя. Если запитывать 2 излучателя от одного СВЧ генератора с помощью делителя мощности (тройника), то для облучения с двух противоположных сторон потребуется 3 магнетрона по 5 кВт общей мощностью 15 кВт, объем садки в этом случае 0,78 м<sup>3</sup>. По этой схеме следует организовать резерв, позволяющий подводить к боковым поверхностям садки от трех магнетронов по 5 кВт каждый общую мощность 15 кВт.

Расчет сравнительного интегрального эффекта  $\Delta B_1$  для СВЧ сушилки, показанной на рис. 2, проводится по аналогии с предыдущими вариантами резервирования с учетом максимально допустимых цен для элементной базы этой СВЧ сушилки. В таком случае при использовании той же пропорции цен (1:3:15:35) соотношение для величины капиталовложения СВЧ сушилки, имеющей резерв в холодном режиме, имеет вид

$$K = 143X + K_{рез},$$

причем в резерве должно быть 20 магнетронов.

Величина сравнительного интегрального эффекта на втором году эксплуатации с учетом равной производительности обычной СВЧ сушилки (рис. 1) и СВЧ сушилки с «холодным» резервом (рис. 2) при замене одной СВЧ сушилки с резервированием по второму варианту на четыре СВЧ сушилки с резервом в холодном режиме примет вид

$$\begin{aligned} \Delta B_1 = & ((C_{эСВЧ} - C_{эСВЧ\text{хол}}) + (Y_{СВЧ} - Y_{СВЧ\text{хол}}))(1 - \gamma_n)(1 - \gamma_y) + \\ & + 0,14((K_{СВЧ} + K_{резСВЧ}) - (K_{СВЧ\text{хол}} + K_{резСВЧ\text{хол}}))(1 - \gamma_n)(1 - \gamma_y) + \\ & + (K_{резСВЧ} - K_{резСВЧ\text{хол}})(1 - i_{кр}). \end{aligned}$$

Существенным преимуществом СВЧ сушилки, показанной на рис. 2, является наименьшее по сравнению с другими вариантами резервирования время включения резерва. Это особенно важно при сушке, когда из-за прекращения энергоподвода изменяется поле

температуры, влагосодержания и давления в садке, что приведет нарушению технологии сушки и возможному увеличению ущерба.

### Выводы

1. При проектировании СВЧ сушилок необходимо предусмотреть резервирование в первую очередь магнетронов в СВЧ генераторах. Кроме этого, могут также резервироваться источник энергии и вся СВЧ сушилка целиком.
2. Выбор того или иного варианта резервирования следует проводить на базе технико-экономических расчетов сравнительно-интегрального эффекта.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Доценко А.В. Влияние ущерба и резервирования на эффективность установок СВЧ диэлектрического нагрева / А.В. Доценко // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2006. №4 (19). Вып. 4. С. 130-133.
2. Доценко А.В. Резервирование в системах энергообеспечения электротермического оборудования / А.В. Доценко // Промышленная энергетика. 2007. №5. С. 2-6.
3. Доценко А.В. Резервирование как метод повышения эффективности У СВЧ ДН / А.В. Доценко // Материалы междунар. науч.-техн. конф., посвященной 110-летию изобретения радио и 75-летию СГТУ. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2005. С. 402-406.
4. Доценко А.В. Варианты компоновки и резервирования У СВЧ ДН для сушки пиломатериалов / А.В. Доценко // Радиотехника и связь: материалы третьей междунар. науч.-техн. конф. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2006. С. 344-347.
5. Артюхов И.И. Адаптивная система электропитания модульного типа / И.И. Артюхов, И.П. Крылов // Функциональные электродинамические системы и устройства низких и высоких частот: межвуз. науч. сб. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2001. С. 95-100.
6. Артюхов И.И. Магнетронные генераторы для установок СВЧ нагрева / И.И. Артюхов, М.А. Фурсаев. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2000. 48 с.
7. Артюхов И.И. Система электропитания группы СВЧ генераторов магнетронного типа / И.И. Артюхов // Вопросы преобразовательной техники, частотного электропривода и управления: межвуз. науч. сб. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 1996. С. 96-99.
8. Система электропитания СВЧ генератора магнетронного типа с промежуточным звеном повышения частоты / И.И. Артюхов, В.А. Серветник, Н.П. Митяшин, В.А. Сысуев // Вопросы преобразовательной техники, частотного электропривода и управления: межвуз. науч. сб. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 1992. С. 49-59.
9. Архангельский Ю.С. Элементная база СВЧ электротермического оборудования / Ю.С. Архангельский, В.А. Воронкин. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2003. 213 с.
10. Архангельский Ю.С. СВЧ электротермия / Ю.С. Архангельский. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 1998. 408 с.

#### **Архангельский Юрий Сергеевич -**

доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, заведующий кафедрой «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета

#### **Доценко Анастасия Владимировна -**

аспирант кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 25 октября 2007г., принята к опубликованию 2 ноября 2007г.*

И.В.Беляев, М.А.Фурсаев

**ИМПЕДАНСНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТРАНЗИСТОРА  
И УСТОЙЧИВОСТЬ РАБОТЫ  
СВЧ ТРАНЗИСТОРНОГО ГЕНЕРАТОРА**

*Обсуждены особенности обеспечения условий стационарного режима работы и устойчивости СВЧ-транзисторного генератора с внешней обратной связью, обусловленные зависимостью активной и реактивной компонент входной проводимости транзистора от уровня напряжения на входе.*

I.V.Beljaev, M.A.Fursaev

**TRANSISTOR'S IMPEDANCE CHARACTERISTIC AND STABILITY  
OF THE MICROWAVE TRANSISTOR GENERATOR  
WITH AN EXTERNAL FEEDBACK**

*The features of supporting stationary mode and stability of the microwave transistor generator with an external feedback due to dependence of the input transistor's active and reactive immitance on input voltage are discussed.*

В настоящее время широко используются схемы построения СВЧ транзисторных генераторов с внешней обратной связью. Их синтез отличается от синтеза низкочастотных транзисторных генераторов. Дело в том, что при синтезе генераторов низкой частоты обычно полагают постоянство величины коэффициента передачи цепи обратной связи, что, в свою очередь, предполагает независимость значения входного сопротивления транзистора от его электрического режима. Последнее условие для СВЧ-транзисторов, работающих в нелинейном режиме, не выполняется. Данное обстоятельство должно учитываться при анализе условий обеспечения стационарного режима СВЧ-транзисторных генераторов с внешней обратной связью и устойчивости его работы. Ниже проводится обсуждение особенностей этого учета.

Амплитудное условие стационарного режима работы генератора с внешней обратной связью, в котором цепь этой связи является пассивным четырехполюсником, а транзистор – активным, можно записать как [1]

$$K_{u\ mp} = \frac{1}{K_{u\ oc}}, \quad (1)$$

где  $K_{u\ mp}$  и  $K_{u\ oc}$  – модули коэффициента передачи напряжения транзистора и цепи обратной связи соответственно. Графическое решение уравнения (1) обычно представляется в виде пересечения кривых зависимости величин, соответствующих левой и правой частям этого уравнения, от напряжения  $U_{ex}$ , действующего на входе транзистора. Точка пересечения дает значение этого напряжения,  $U_{ex\ ст}$ , при котором устанавливается стационарный режим генератора. Условие устойчивости стационарного режима генератора можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} \text{при } U_{ex} < U_{ex\ ст} \quad K_{u\ mp} &> \frac{1}{K_{u\ oc}}, \\ \text{при } U_{ex} > U_{ex\ ст} \quad K_{u\ mp} &< \frac{1}{K_{u\ oc}}. \end{aligned}$$

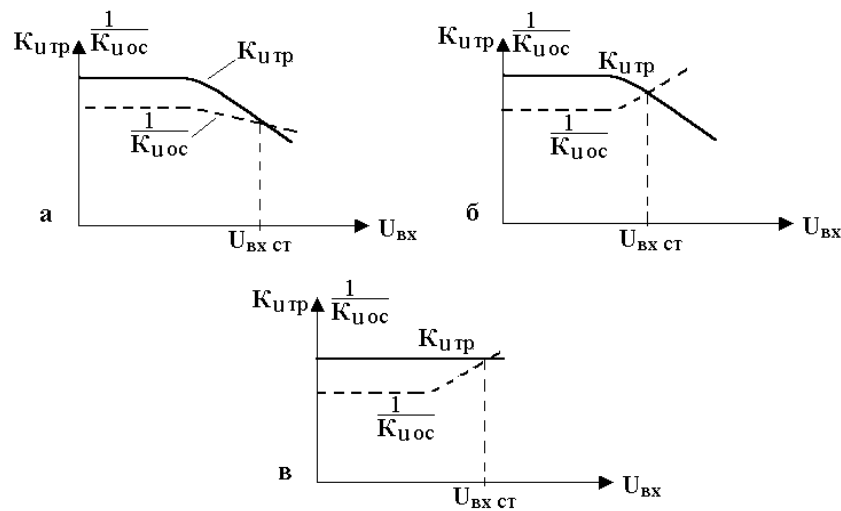


Рис.1. Графическое решение уравнения (1) для ряда вариантов реализации СВЧ-генератора с внешней обратной связью на биполярном транзисторе

Если ограничиться рассмотрением случая использования в составе генератора биполярного транзистора, то с учетом зависимости модуля коэффициента передачи прибора от величины входного напряжения возможны три варианта обеспечения условия устойчивости стационарного режима генератора. Эти варианты иллюстрируются построениями графического решения уравнения (1), приведенными на рис.1. Рис.1,а и б иллюстрируют случаи работы транзистора в перенапряженном режиме, когда в определенном интервале фаз коллекторный переход открыт, т.е. при насыщении его амплитудной (передаточной) характеристики. Рис.1,в соответствует работе транзистора в недонапряженном режиме с отсечкой тока, когда коллекторный переход находится все время в закрытом состоянии.

Нетрудно заключить, что реализация пересечения кривых зависимостей на рис.1 проще достигается, когда ход передаточной характеристики цепи обратной связи удовлетворяет условию

$$\frac{d}{dU_{вх}} \left( \frac{1}{K_{у\text{ос}}} \right) > 0. \quad (2)$$

Более того, только при выполнении этого условия обеспечивается возможность работы транзистора в недонапряженном режиме в составе генератора с внешней обратной связью. Поэтому заслуживает большего внимания случай реализации цепи обратной связи, который иллюстрируется рис.1,б и в и который рассматривается на примере построения СВЧ-транзисторного генератора с ферритовой развязкой в цепи обратной связи.

На рис.2 приведена упрощенная структурная схема СВЧ-транзисторного генератора с внешней обратной связью. В состав цепи этой связи входят следующие элементы:

- выходной трансформатор связи;
- нагрузка генератора;
- ферритовая развязка;
- резонаторная система;
- входной трансформатор связи.

Трансформаторы связи и ферритовая развязка представляются отрезками передающей линии без потерь и характеризуются значениями волновой проводимости и электрической

длины. Нагрузка генератора и резонаторная система являются двухполюсниками и характеризуются значениями активной и реактивной проводимостей, значения которых пересчитываются к сечениям  $aa'$  и  $bb'$ .

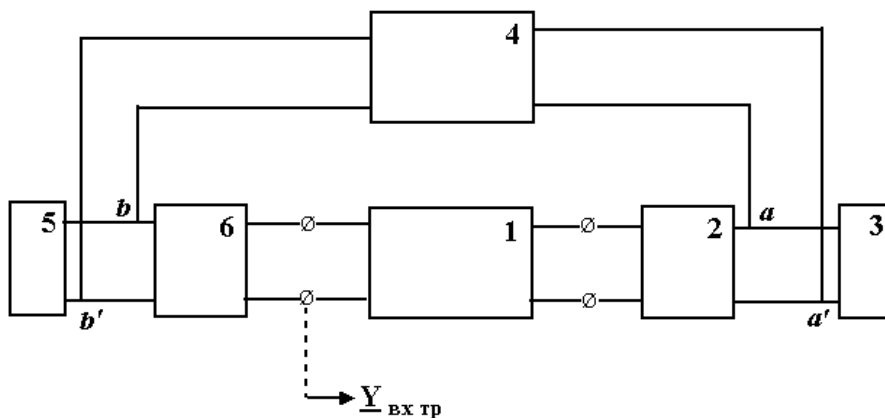


Рис.2. Упрощенная структурная схема СВЧ-транзисторного генератора с внешней обратной связью

Коэффициент передачи цепи обратной связи генератора как пассивного четырехполюсника определяется соотношением [2]:

$$K_u = \frac{1}{A_{11} + A_{12} Y_n}, \quad (3)$$

где  $A_{11}$  и  $A_{12}$  – элементы матрицы передачи четырехполюсника, эквивалентного цепи обратной связи;  $Y_n$  – проводимость нагрузки на выходе этого четырехполюсника. Цепь обратной связи нагружена на вход транзистора, поэтому

$$Y_n = Y_{вх тр},$$

где  $Y_{вх тр}$  – входная проводимость транзистора.

Величина входной проводимости транзистора, работающего в нелинейном режиме, является функцией напряжения, действующего на входе прибора, в результате чего от этого напряжения будет зависеть ход передаточной характеристики цепи обратной связи. Таким образом, выполнимость условия (2) определяется характером зависимости значений активной и реактивной компонент входной проводимости транзистора от входного напряжения  $U_{вх}$ , т.е. его импедансной характеристикой.

В таблице представлены расчетные величины производной в условии (2) для ряда сочетаний величин активной и реактивной компонент входной проводимости транзистора, соответствующих двум значениям входного напряжения: меньшему и большему значениям, определяемым решением уравнения (1). Каждое из этих сочетаний определяет вариант характера зависимости компонент входной проводимости транзистора от напряжения на его входе. Расчет величины производной в условии (2) проводился при следующих величинах параметров элементов цепи обратной связи:

- волновая проводимость линии, которой выполнен выходной трансформатор связи – 0,6 См;
- электрическая длина выходного трансформатора связи – 30 град;
- волновая проводимость линии, которой выполнен входной трансформатор связи – 0,12 См;
- электрическая длина входного трансформатора связи – 25 град;

- волновая проводимость линии, которой выполнена ферритовая развязка – 0,08 См;
- электрическая длина ферритовой развязки –  $(360 \cdot n + 20)$  град;
- проводимость нагрузки генератора, пересчитанная к сечению  $aa'$  –  $0,135 - j0,0552$  См;
- проводимость резонансной системы, пересчитанная к сечению  $bb'$  –  $0,01 + j0,05$  См.

$\underline{Y}_{вх тр}$ при $U_{вх0} - \Delta U_{вх}$	$\underline{Y}_{вх тр}$ при $U_{вх0} + \Delta U_{вх}$	Величина производной $\frac{d}{dU_{вх}} \left( \frac{1}{K_{уоо}} \right)$
0,055 – j 0,10	0,055 – j 0,3	+0,984
0,075 – j 0,3	0,075 – j 0,1	-0,938
0,035 – j 0,1	0,075 – j 0,1	+0,317
0,075 – j 0,3	0,035 – j 0,3	-0,210
0,035 – j 0,1	0,075 – j 0,3	+1,245
0,035 – j 0,3	0,075 – j 0,1	-0,728

Как показывает анализ данных таблицы, положительная величина производной в условии (2) обеспечивается только при определенном виде импедансной характеристики транзистора. Следовательно, вид этой характеристики является важным фактором, определяющим выполнение условия устойчивой работы СВЧ транзисторного генератора с внешней обратной связью, и его необходимо учитывать при проектировании данных устройств. При этом можно использовать подход, аналогичный тому, который был применен в настоящей работе.

Таким образом, не любой электрический режим транзистора при его работе в составе усилительного каскада может быть реализован в составе СВЧ-генератора с внешней обратной связью. Ограничивающими факторами, кроме вида импедансной характеристики транзистора, могут быть состав и значения параметров элементов цепи этой связи, действие которых необходимо учитывать при проектировании генераторов рассматриваемого типа, особенно в случае применения биполярного транзистора, работающего в недонапряженном режиме.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Забродин Ю.С. Промышленная электроника / Ю.С.Забродин. М.: Высшая школа, 1982. 492 с.
2. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники / Г.И.Атабеков. М.: Энергия, 1970. Ч.1. 592 с.

**Беляев Виктор Иванович** –

ассистент кафедры «Электротехника и электроника» Саратовского государственного технического университета

**Фурсаев Михаил Александрович** –

доктор технических наук, профессор кафедры «Электротехника и электроника» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 25 октября 2007г., принята к опубликованию 2 ноября 2007г.*



УДК 504.064.4 : 621.3

К.Н. Огурцов, В.А. Лаврентьев, В. И. Лабунская, Е. В. Короткова, Ю.В. Артамонова

### **ВЛИЯНИЕ СВЧ - ИЗЛУЧЕНИЯ НА ХИМИЧЕСКИЙ И БИОЛОГИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПЛАСТОВЫХ ВОД**

*Изучается влияние СВЧ – излучения на химический и микробиологический состав пластовых вод с целью возможного его применения для уменьшения концентрации нефтепродуктов и биологического обезвреживания. Показано, что существует зависимость между качественным составом нефтяных остатков в пластовых водах и режимами облучения.*

K.N. Ogurtsov, V.A. Lavrentiev, V.I. Labunskaya, E.V. Korotkova, Y.V. Artamonova

### **THE INFLUENCE OF ON THE CHEMICAL AND BIOLOGICAL MIXTURE OF RESERVOIR WATER**

*In this article we can see analyses of the super-high-frequency radiation influence on the chemical and microbiological mixture of reservoir water. The purpose of it is to apply this issue for decreasing the concentration of mineral oil and biological sterilization.*

*There also is existence of dependence between high-quality of the fuel-oil residue in reservoir water and rate of radiation.*

В настоящей работе изучалось влияние СВЧ-излучения на химический и бактериологический состав пластовых вод, содержащих нефтепродукты. Пластовые воды - это воды, выкачиваемые из пласта попутно с нефтью. Они высокоминерализованы (засолены) и обеднены кислородом, содержат нефтепродукты, тяжелые металлы, фенол и др. После механической очистки вода закачивается обратно в пласт для поддержания пластового давления. При очистке отделяется в основном взвешенная и диспергированная нефть, тогда как водорастворимые фракции нефти в концентрациях от 20 до 50 мг/л и выше остаются в пластовой воде. Это приводит к дестабилизации пластового давления и загрязнению окружающей среды. Кроме того, отсутствие антибактериальной подготовки приводит к повсеместному заражению микроорганизмами нефтепромысловых вод, которые циркулируют в системе пласт – скважина – наземное оборудование [1]. Адаптируясь в нефтяном пласте, микроорганизмы усиливают коррозию промышленного оборудования. Это приводит к авариям, вследствие которых происходит загрязнение территорий нефтепромыслов и грунтовых вод [2, 3]. Для предотвращения развития биоценоза в пласте в мировой практике уже с 60-х годов XX века закачиваемые воды обеззараживаются. Сейчас это осуществляется несколькими способами: обработкой УФ и гамма-лучами, добавками бактерицидов, озонированием. Все эти методы имеют свои достоинства и недостатки. Но до сих пор ведутся разработки новых, более эффективных и экономичных методов борьбы с микробным заражением [4, 5].

Все большее применение в различных отраслях хозяйственной деятельности находит СВЧ-излучение. Созданы и эффективно используются установки по стерилизации сельскохозяйственных продуктов. В нефтегазовом комплексе СВЧ-установки используются для удаления газогидратных и парафиновых пробок в скважинах, для обезвоживания нефти.

Целью нашей работы стало изучение возможности применения СВЧ-излучения для снижения концентрации нефтепродуктов и биологического обезвреживания пластовых вод, что позволит увеличить эффективность поддержания пластового давления и уменьшить экологическую нагрузку на окружающую среду [6].

В экспериментах использовалась пластовая вода с предприятия «Левобережный цех по подготовке и транспортировке нефти и газа», входящего в состав ОАО «Саратовнефте-18

газ». На данном предприятии при добыче нефти отделяются пластовые воды, которые подвергаются механической очистке (отстаивание в пруду), после чего возвращаются в производство, т.е. закачиваются в пласт.

Облучению подвергались образцы воды до и после очистки, которые нами были условно названы проба (I) и проба (II), и анализировался химический и бактериальный состав вод до и после облучения.

Работа проводилась в следующем режиме: частота излучения 2450 МГц, время экспозиции образцов под облучением 10 секунд, интервал используемых мощностей – от 200 до 700 Вт.

Предварительно была определена зависимость температуры среды от мощности излучения (табл.1).

Таблица 1

## Изменение температур воды в зависимости от мощности излучения

Мощность излучения, Вт	Температура, °С	
	проба (I)	проба (II)
0 (контрольная проба)	24	20
200	34	30
300	36	32
400	42	38
500	55	42
600	65	53
700	71	59

Как следует из данных таблицы, температура воды в интервале рабочих мощностей не превышала 80 °С на верхней границе, при этом характер температурных кривых одинаков в случае проб (I) и (II).

Следующим этапом стало проведение анализов проб вод обоих типов на содержание нефтепродуктов до и после облучения. Результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2

## Изменение количества нефтепродуктов в зависимости от мощности излучения

Мощность излучения, Вт	Концентрация нефтепродуктов, мг/л	
	проба (I)	проба (II)
0 (контрольная проба)	390,8	123,6
200	9,3	9,5
300	316,9	112,7
400	305,0	50,5
500	301,2	105,4
600	75,6	56,0
700	94,7	88,5

Минимальное содержание нефтепродуктов имеет место при мощности излучения в 200 Вт: по сравнению с контрольными образцами их содержание в пробе (I) уменьшилось в 41 раз, во (II) пробе - в 13 раз. Пятикратное уменьшение содержания нефтей в (I) также фиксировалось при 600 Вт, двукратное в пробе (II) при 700 Вт.

Хроматографический анализ образцов показал, что основными компонентами в составе примеси в интервалах облучения от 200 до 500 Вт являются ксилол и толуол в (I) воде, а в пробе (II) – толуол и метан. При 600 и 700 Вт появляются парафины: гексан и декан в (I) пробе и гептан во (II). В спектрах поглощения облученных образцов воды были выделены интенсивные максимумы при  $\lambda = 224$  нм в пробе (I) и  $\lambda = 222$  нм в пробе (II).

На рис. 1 приведена кривая зависимости оптической плотности образца пробы (I) от мощности облучения СВЧ. Характер изменения кривой указывает на минимальное количество вещества при 200 Вт и последующий рост его концентрации в воде при увеличении

мощности облучения. При сравнении с образцами свидетелей было выяснено, что этим веществом является анизол.

В пробе (II) фиксировался постоянный максимум при  $\lambda = 222$  нм, что соответствует полосе поглощения диеновых структур. Колебания величин оптической плотности в зависимости от мощности СВЧ-излучения указывает на сложный характер взаимодействия среды с излучением и не поддается однозначной интерпретации.

Сложность интерпретации обусловлена тем, что в пластовых водах существуют разнообразие колонии микроорганизмов, среди которых, несомненно, присутствуют нефтеокисляющие бактерии. Поэтому вполне вероятно, что в изучаемых образцах пластовых вод имеет место сочетание действия излучения и микроорганизмов.

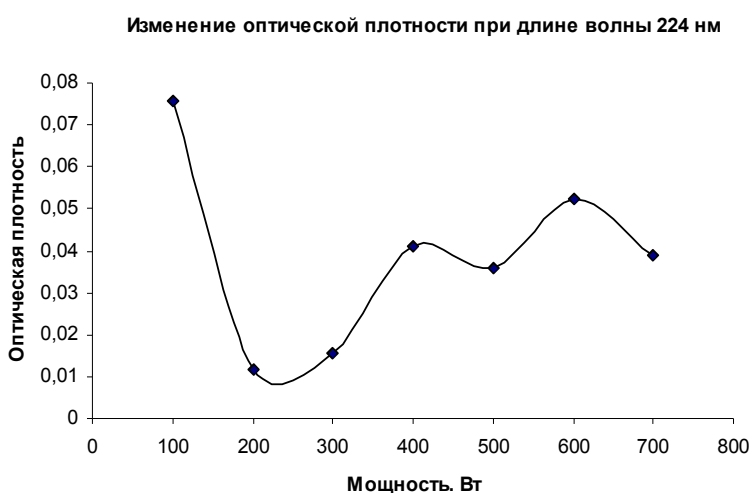


Рис. 1. Изменение оптической плотности в зависимости от мощности облучения при длине волны 224 нм

В соответствии с задачами исследования нами было изучено влияние СВЧ-излучения на микрофлору пластовых вод, содержащих нефтепродукты – проба (I) и проба (II).

Контрольные опыты роста микроорганизмов на средах Эндо были проведены для разведения от  $10^{-1}$  до  $10^{-10}$ .

На рис. 2 представлены графики роста колоний микроорганизмов, на которых в каждом варианте выделены максимумы при  $10^{-2}$  и  $10^{-6}$  для пробы (I) и один максимум  $10^{-4}$  степени разведения для пробы (II).

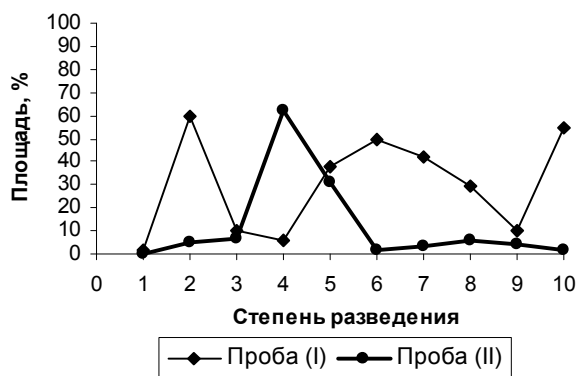


Рис. 2. Динамика роста микроорганизмов в контрольном опыте

В случае пробы (I) максимальный рост колоний микроорганизмов фиксируется при 200 и 400 Вт, для пробы (II) – при 300 и 600 Вт.

На рис. 3 представлены кривые содержания нефтепродуктов в образцах в зависимости от мощности излучения и роста колоний микроорганизмов при этих же условиях для степени разведения  $10^{-5}$ , т.к. это та концентрация, при которой скорости роста колоний в пробах (I) и (II) - совпадали.

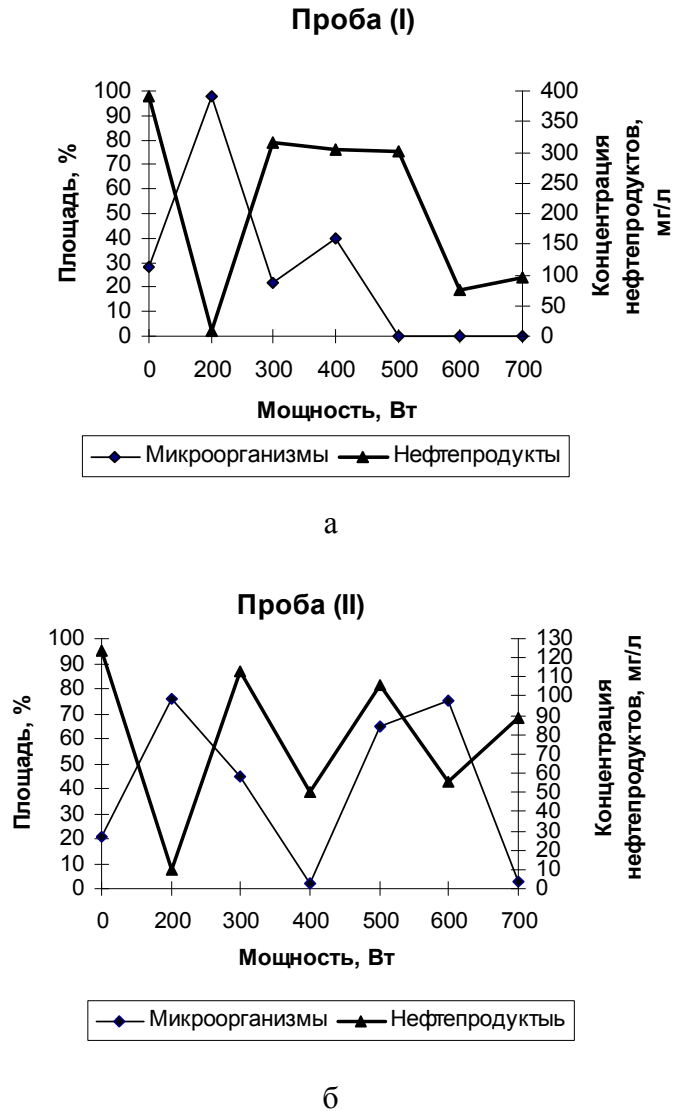


Рис. 3. Изменение количества нефтепродуктов и интенсивности роста микроорганизмов

Сопоставление кривых выявляет антибатный характер изменения, т.е. минимальному содержанию нефтепродуктов в водах соответствует заметный рост колоний микроорганизмов. Наиболее этот эффект заметен при 200 Вт.

Последующее увеличение мощностей облучения приводит одновременно к уменьшению скорости роста бактерий увеличению количества нефтепродуктов. Два максимума на кривой роста бактерий при различных мощностях облучения могут указывать на наличие двух групп микроорганизмов. Поскольку в пластовых водах присутствуют как алифатические, так и ароматические углеводороды, то вполне вероятно, что изменение баланса ароматические вещества/алифатические структуры вызывает попеременно рост и угнетение различных групп микроорганизмов.

Возможно изменение интенсивности их роста объясняется тем, что из сообщества микроорганизмов просто "исключаются" отдельные виды, что связано с отсутствием необходимой питательной среды. Вследствие этого между ними практически не наблюдается конкурентной борьбы, что ведет к развитию групп микроорганизмов, непосредственно питающихся углеводами, содержащимися в среде Эндо-истинных кишечных палочек.

Можно предположить, что все эти процессы стимулирует электромагнитное излучение нетепловых мощностей. Кроме четкого снижения количества нефтепродуктов при увеличении мощности облучения, была выявлена тенденция снижения выживаемости микроорганизмов при этих же условиях. Однако в этом случае биоэффекты слабо зависят от дозы и определяются, по-видимому, иными параметрами СВЧ излучения. Специфичность нетеплового действия СВЧ-излучений определяется резонансным характером энергетической и информационной природы и конформационными изменениями биомолекул [6].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Особенности микробиологических процессов в заводняемом нефтяном месторождении Среднего Приобья / С.С. Беляев; Е.П. Розанова; И.А. Борзенкова и др. // Микробиология. 1990. Т. 59. № 6. С. 1075-1081.
2. Яковлев В.С. Хранение нефтепродуктов. Проблемы защиты окружающей среды / С.С. Яковлев. М.: Химия, 1987. 152 с.
3. Крец В.Г. Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений: учеб. пособие / В. Г. Крец. – Томск: Изд. ТПУ, 1992. 112 с.
4. Исследование фильтрации культурной жидкости, содержащей микрофлору заводняемого нефтяного пласта / М.Ю. Доломатов; А.Т. Телин; Г.А. Исмагилов и др. // Геология, геофизика и разработка нефтяных месторождений. – М.:ВНИИОЭНГ, 1995. – №1. – С. 56-59.
5. Применение технологии биоцидного воздействия на Алехинском месторождении / З.М. Хусаинов, О.Р. Коробовкин, В.Л. Чирков, Н.Н. Силищев, А.В. Ключарев // Нефтепромысловое дело. 1999. №8. С.10-16.
6. Ипатова А.Г. Действие ЭМИ СВЧ -диапазона на лабораторных и сельскохозяйственных животных / А.Г. Ипатова, В.Л. Иванов; Г.В. Козьмин // Радиобиологический съезд. Киев, 1993.

#### **Огурцов Константин Николаевич –**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета

#### **Лаврентьев Владимир Александрович –**

ассистент кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета

#### **Лабунская Вероника Иосифовна –**

кандидат химических наук, доцент кафедры «Экология» Саратовского государственного технического университета

#### **Короткова Елена Владимировна –**

кандидат биологических наук, доцент кафедры «Экология» Саратовского государственного технического университета

**Артамонова Юлия Владимировна –** аспирант кафедры «Экология» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 25 октября 2007г., принята к опубликованию 2 ноября 2007г.*

УДК 621.365.5

В.А. Лаврентьев, С.Г. Калганова

**ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СВЧ ОБРАБОТКИ  
ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ БАЗАЛЬТОВЫХ ТРУБ**

*Представлено инновационное предложение по применению технологии СВЧ обработки при производстве базальтовых труб. Предложена конструкция рабочей камеры СВЧ электротехнологической установки для производства базальтовых труб.*

V.A.Lavrentiev, S.G.Kalganova

**APPLICATION OF TECHNOLOGY OF THE MICROWAVE  
OF PROCESSING BY MANUFACTURE BASALT PIPES**

*The innovative offer on application of technology of the microwave of processing is presented by manufacture of basalt pipes. The design of the working chamber of the microwave of electro-technological installation for manufacture of basalt pipes is offered.*

Проблема замены дорогих и недолговечных металлических труб общего назначения на более дешевые и стойкие стоит весьма остро. Широкое распространение в последние годы в строительстве получили пластмассовые трубы. При своих достоинствах практика их эксплуатации показала, что при больших механических нагрузках, возникающих со временем в коммуникациях зданий и сооружений из-за осадки здания, подвижки грунта отдельные элементы трубопроводов, выполненные из пластмассы, выходят из строя. Не пригодны пластмассовые трубы и в ряде химических производств.

В этой связи несомненный интерес представляют базальтовые трубы, изготовленные методом литья расплавленных базальтов (базальтовое или каменное литье). Базальт – основная горная порода, занимающая огромные площади дна океана и обширные территории материков. Базальт обладает прочностью на сжатие до  $260 \text{ МН/м}^2$  при плотности  $2800\text{--}3200 \text{ кг/м}^3$ , являясь ценным строительным, облицовочным, электроизоляционным и кислотоупорным материалом.

В последнее время появились работы по применению для изготовления труб разного диаметра базальтовых волокон с полимерным связующим [1, 2].

Среди связующих материалов важное место занимают эпоксидные смолы, которые принадлежат к синтетическим продуктам, появление которых дало мощный толчок развитию ряда принципиально новых направлений использования полимерных материалов, сыграло важную роль в создании многих уникальных конструкций и устройств в различных областях техники.

Эпоксидно-диановые смолы получили большее распространение по сравнению с другими благодаря меньшей токсичности, большей доступности и относительно низкой стоимости. Эпоксидные смолы, модифицированные полиамидами и изоцианатами, отверждаются при низких температурах, обладают большой пластичностью и высокой ударной прочностью [3].

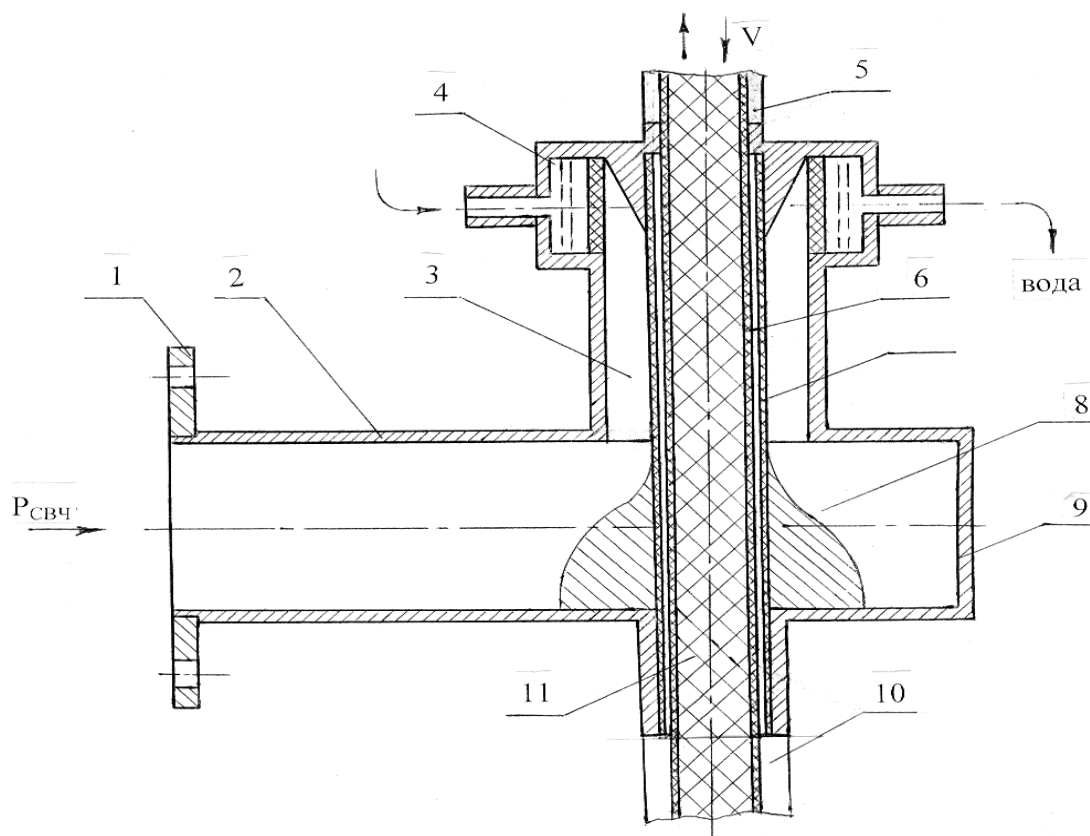
Особенно важно при производстве базальтовых труб то, что эпоксидные композиции дают незначительную усадку, что способствует снижению внутренних напряжений в материалах, обеспечивает высокие герметичность и степень заполнения свободного объема. Они с большой точностью воспроизводят форму изделий и не требуют последующей механической обработки поверхности. Композиции на основе эпоксидных смол обладают высокой адгезией к самым разнообразным материалам, имеют достаточно высокую химическую и

термическую стойкость, не вызывают коррозии соприкасающихся с ними материалов, являются весьма хорошими диэлектриками. По износостойкости они близки к алюминиевым сплавам.

Однако эпоксидные смолы обладают низкой жидкотекучестью, вследствие чего затрудняется заполнение форм, полостей, зазоров, щелей, пор и капилляров и при традиционной технологии отверждаются длительное время, что соответственно усложняет технологию производства базальтовых труб.

Поскольку установлено, что кратковременное воздействие СВЧ электромагнитных колебаний интенсифицирует процесс отверждения эпоксидного компаунда в несколько десятков раз, представляет практический интерес применение СВЧ технологии при изготовлении труб из базальтовых нитей [4].

На рисунке показана конструкция рабочей камеры СВЧ электротехнологической установки для производства базальтовых труб. Камера представляет собой круглый волновод 3, по оси которого на диэлектрической оправке 11 перемещается труба из базальтовых нитей с полимерным наполнителем – связующим 4. СВЧ энергия подводится к круглому волноводу 3 по прямоугольному волноводу 2, присоединенного с помощью согласующего элемента 8.



Рабочая камера для СВЧ обработки базальтовых труб с полимерным связующим:

- 1 – фланец; 2 – прямоугольный волновод; 3 – круглый волновод; 4 – балластная нагрузка с проточной водой; 5 – шлюз; 6 – радиопрозрачная направляющая труба; 7 – базальтовая труба;
- 8 – согласующий элемент; 9 – короткозамыкающая пластина; 10 – шлюз;
- 11 – диэлектрическая оправка

Максимальные внешние диаметры базальтовых труб, которые могут быть обработаны в подобных рабочих камерах на частотах 2450, 915 и 433 МГц, разрешенных к применению в СВЧ электротехнологических установках, приведены в таблице.

Внешние диаметры базальтовых труб

Частота, МГц	Сечение прямоугольного волновода, мм x мм	Рекомендуемый максимальный внешний диаметр базальтовых труб, мм
2450	90 x 45	30 – 40
	110 x 55	35 – 50
915	196 x 98	65 – 86
	220 x 110	75 – 95
	248 x 124	85 – 110
	270 x 135	90 – 120
	292 x 146	100 – 130
433	457 x 228,5	150 – 200
	500 x 250	165 – 220
	580 x 290	195 – 260
	620 x 310	205 – 270

Трубы большего диаметра могут быть обработаны, например, в камере лучевого типа (КЛТ).

Экономическая эффективность такого рода установок и базальтовых труб на основе эпоксидного связующего может быть рассчитана по соотношениям, аналогично приведенным в [5].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Технологические особенности поликонденсационного наполнения ПКМ на основе профилированных полипропиленовых нитей / Е.И. Титоренко, С.Е. Артеменко, Т.П. Устинова, М.М. Кардаш //Пластмассы. 2000. №12. С.29-31.
2. Физико-химические основы альтернативной технологии магнитоластов (обзор) / С.Е. Артеменко, С.Г. Кононенко, А.А. Артеменко, Л.Л. Семенов //Хим.волокна. 1998. №3. С.45–50.
3. Композиционные материалы в машиностроении / Ю.Л. Пилиповский, Т.В. Грудина и др. Киев: Техніка, 1990. 141 с.
4. Лаврентьев В.А. Влияние СВЧ электромагнитного поля на процесс отверждения эпоксидных смол / В.А. Лаврентьев, С.Г. Калганова // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. Красноярск: Крас. гос. техн. ун-т, 2002. С.139-140.
5. Толстов В.А. Эффективность электротехнологических установок / В.А. Толстов, Ю.С. Архангельский. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2000. 148 с.

**Лаврентьев Владимир Александрович** – ассистент кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета

**Калганова Светлана Геннадьевна** –



докторант, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 25 октября 2007г., принята к опубликованию 2 ноября 2007г. УДК 621.365.5.*

Е.М. Гришина

## **ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ГИБРИДНЫХ СВЧ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

*Приведены соотношения для проверки целесообразности применения гибридных СВЧ электротехнологических установок для модификации диэлектриков.*

Е.М. Grishina

## **PRACTICABILITY OF THE USING HYBRID MICROWAVE ELECTROTECHNOLOGICAL INSTALLATIONS**

*The brought correlations for check of practicability of the using hybrid microwave electro-technologicals of the installations for modification dielectrics.*

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. Теория таких конкретных установок находится в стадии становления [3].

Примерами практического применения нетепловой модификации могут быть обработка полимерных материалов неживой природы, например, кратковременное пребывание в СВЧ электромагнитном поле нитей поликапроамида, приводящее к увеличению удельной разрывной нагрузки, и эпоксидной смолы, существенно сокращающее время её отверждения [4, 5].

Если поверхность обрабатываемого объекта велика, то наиболее перспективными являются СВЧ ЭТУ, работающие на базе камер лучевого типа (КЛТ), так как эти камеры дают возможность использовать необходимое количество излучающих систем. В конечном счете такие рабочие камеры позволяют достичь большей производительности, чем камеры с бегущей волной (КБВ) и со стоячей волной (КСТ) [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 волн 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 будем называть гибридными СВЧ ЭТУ.

Для реализации гибридных СВЧ ЭТУ по сравнению с обычными СВЧ ЭТУ требуются дополнительные затраты на вторую рабочую камеру, сырьё для реализуемого в ней технологического процесса, заработную плату обслуживающего персонала и другие затраты. В то же время гибридные СВЧ ЭТУ дают дополнительный продукт, т.е. дополнительную прибыль.

Применение гибридных СВЧ ЭТУ целесообразно, если прибыль, получаемая при эксплуатации такой установки, например, в течение года будет больше прибыли при эксплуатации СВЧ ЭТУ НД за тот же период.

Экономическая эффективность СВЧ ЭТУ может быть определена на интервале в 1 год прибылью  $\mathcal{E}_{\Sigma n, z}$  [6]:

$$\mathcal{E}_{\Sigma n} = [(P_n C_n - c_n)(1 - \gamma_n) - (P_n C_n - P_{cn} C_{cn}) \gamma_{ндс}] (1 - \gamma_y) - c_{ни н} - c_{\% н}, \quad (1)$$

$$\mathcal{E}_{\Sigma z} = [(P_z C_z + P_m C_m - c_n - c_m)(1 - \gamma_n) - (P_n C_n + P_m C_m - P_{cn} C_{cn} - P_{cm} C_{cm}) \gamma_{ндс}] - (1 - \gamma_y) - (c_{ни нz} + c_{ни m}) - (c_{\% нz} + c_{\% m}), \quad (2)$$

где  $P_n, C_n$  – количество и цена единицы продукции в рабочей камере в СВЧ ЭТУ НД;  $P_{cn}, C_{cn}$  – количество и цена единицы сырья СВЧ ЭТУ НД;  $c_n$  – издержки производства в СВЧ ЭТУ НД;  $c_{ни н}, c_{\% н}$  – затраты на научные исследования и плата за кредит в СВЧ ЭТУ НД;  $P_m, C_m$  – количество и цена единицы продукции в рабочей камере теплового действия гибридной СВЧ ЭТУ;  $P_{cm}, C_{cm}$  – количество и цена единицы сырья в рабочей камере теплового действия гибридной СВЧ ЭТУ;  $c_m$  – издержки производства рабочей камеры теплового действия гибридной СВЧ ЭТУ;  $c_{ни нz}$  – затраты на научное исследование рабочей камеры нетеплового действия СВЧ ЭТУ НД;  $c_{ни m}$  – затраты на научные исследования рабочей камеры теплового действия гибридной СВЧ ЭТУ;  $c_{\% нz}$  – плата за кредит на рабочую камеру нетеплового действия гибридной СВЧ ЭТУ;  $c_{\% m}$  – плата за кредит на рабочую камеру теплового действия гибридной СВЧ ЭТУ;  $\gamma_n, \gamma_{ндс}, \gamma_y$  – функции, учитывающие систему налогов, налог на добавочную стоимость и распределение прибыли между учредителями. Соотношения (1) и (2) записаны для интервала 1 год при условии, что рабочая камера СВЧ ЭТУ НД отличается от рабочей камеры нетеплового действия гибридной СВЧ ЭТУ только наличием в ней калориметрической балластной нагрузки.

Применение гибридной СВЧ ЭТУ целесообразно, если

$$\Delta \mathcal{E} = \mathcal{E}_{\Sigma z} - \mathcal{E}_{\Sigma n} > 0. \quad (3)$$

Подставив (1) и (2) в (3), получим

$$(P_m C_m - P_{cm} C_{cm})(1 - \gamma_n - \gamma_{ндс})(1 - \gamma_y) > B_{кр m} [1 + i_{кр} - \kappa_a (1 - \gamma_n)(1 - \gamma_y)] - B_{кр н} (1 + i_{кр}), \quad (4)$$

где  $B_{кр m}$  – банковский кредит на рабочую камеру теплового действия гибридной СВЧ ЭТУ,  $B_{кр н}$  – банковский кредит на калориметрическую нагрузку в рабочей камере СВЧ ЭТУ НД,  $i_{кр}$  – банковский процент;  $\kappa_a \approx 0,14$  – коэффициент амортизационных отчислений. Соотношение (4) получено при условиях, что

$$c_m = c_{cm} + c_{эм} + c_{зм} + c_{ам} + c_{бр m} \approx P_{cm} C_{cm} + \kappa_a B_{кр m}, \quad (5)$$

т.к.  $c_{cm} = P_{cm}U_{cm}$ ;  $c_{эм} = 0$ , т.к. для работы рабочей камеры теплового действия гибридной СВЧ ЭТУ не требуется генерация дополнительной СВЧ мощности;  $c_{эм} \approx 0$ , т.к. рабочая камера гибридной СВЧ ЭТУ обслуживается одним и тем же обслуживающим персоналом;  $c_{зчм} \approx 0$ ;  $c_{ам} = \kappa_a K_m = \kappa_a B_{крм}$ ;  $c_{брм} = 0$ ;  $c_{нин} = c_{нин} + c_{никн}$ ;  $c_{нинт} = c_{нин}$ ;  $c_{%н} = (B_{крн} + B_{кркн})(1 + i_{кр})$ ;  $c_{%нд} + c_{%м} = (B_{крн} + B_{крз})(1 + i_{кр})$ . Здесь  $K_m$  – капитальные затраты на рабочую камеру теплового действия гибридной СВЧ ЭТУ;  $B_{крз}$  – банковский кредит на рабочую камеру теплового действия гибридной СВЧ ЭТУ;  $c_{нин}$ ;  $c_{никн}$  – затраты на научные исследования рабочей камеры СВЧ ЭТУ НД и калориметрической нагрузки рабочей камеры этой установки;  $B_{крн}$  – банковский кредит на рабочую камеру СВЧ ЭТУ НД.

Если положить, что  $P_m = P_{cm}$ , т.е. в технологическом процессе нет потери сырья, а из-за малой по сравнению с другими частями установки цены калориметрической нагрузки  $B_{кркн}$ , то соотношение (4) примет вид

$$P_m(U_m - U_{cm})(1 - \gamma_n - \gamma_{ндс})(1 - \gamma_y) > B_{крм} [1 + i_{кр} - \kappa_a(1 - \gamma_n)(1 - \gamma_y)]$$

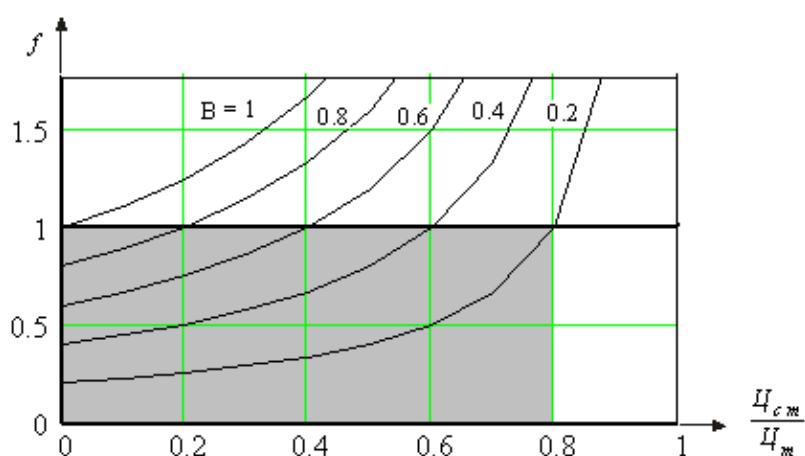
или

$$1 > \frac{B_{крм}(1 + i_{кр})}{P_m U_m (1 - \gamma_n - \gamma_{ндс})(1 - \gamma_y) \left(1 - \frac{U_{cm}}{U_m}\right)}, \quad (6)$$

т.к.  $1 + i_{кр}$  больше  $\kappa_a(1 - \gamma_n)(1 - \gamma_y)$  более чем на порядок.

Графически соотношение (5) может быть представлено рисунком, где на оси абсцисс отложена функция  $f = \frac{B}{\left(1 - \frac{U_{cm}}{U_m}\right)}$ , если  $B = \frac{B_{крм}(1 + i_{кр})}{P_m U_m (1 - \gamma_n - \gamma_{ндс})(1 - \gamma_y)}$ .

Например, при значении  $B = 0.2$  зоне целесообразности применения гибридной СВЧ ЭТУ соответствует заштрихованная на рисунке область.



Номограмма для определения целесообразности гибридной СВЧ ЭТУ

### Выводы

1. Увеличения энергетической эффективности СВЧ электротехнологической установки нетеплового действия, модифицирующей полимерные материалы, можно достичь применением дополнительной рабочей камеры теплового действия, модифицирующей, в свою очередь, другой какой-либо диэлектрик за счет СВЧ диэлектрического нагрева.
2. О целесообразном применении гибридной СВЧ электротехнологической установки можно судить из сравнительного экономического эффекта, сопоставляющего чистую прибыль от эксплуатации гибридной СВЧ ЭТУ и СВЧ электротехнологической установки нетеплового действия.
3. Приведены соотношения для расчета сравнительного экономического эффекта, позволяющего до проектирования и изготовления определить, какая из двух установок - гибридная СВЧ ЭТУ или СВЧ ЭТУ НД – принесет больше прибыли.
4. Приведена номограмма для определения целесообразности гибридных СВЧ ЭТУ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Архангельский Ю.С. Установки диэлектрического нагрева. СВЧ установки: учеб. пособие / Ю.С. Архангельский. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2003. 344 с.
2. Архангельский Ю.С. СВЧ электротермия / Ю.С. Архангельский. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 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 Саратовского государственного технического университета. 2006. № 4(19). Вып.4. С. 125-129.
4. Калганова С.Г. Нетепловое действие СВЧ электромагнитных колебаний / С.Г. Калганова // Электро- и теплотехнологические процессы и установки: сб. науч. тр. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2003. С. 5-11.
5. Калганова С.Г. Влияние СВЧ электромагнитного поля на процесс отверждения эпоксидных смол / С.Г. Калганова, В.А. Лаврентьев // Современные проблемы радиотехники: сб. науч. тр. Красноярск: Красн. гос. техн. ун-т, 2002, С. 139-140.
6. Колесников Е.В. Проектирование электротехнологических установок / Е.В. Колесников. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2006. 282 с.

**Гришина Екатерина Михайловна –**

аспирант кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета.

*Статья поступила в редакцию 25 октября 2007г., принята к опубликованию 2 ноября 2007г.*

УДК 621.365.5

Е.М. Гришина

#### **ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕЙ КАМЕРЫ ЛУЧЕВОГО ТИПА НА ЕЁ ЭНЕРГЕТИЧЕСКУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ**

*Исследовано влияние геометрии камеры лучевого (КЛТ) типа и диэлектрических параметров обрабатываемого диэлектрика на энергетическую эффективность рабочей камеры.*

E.M. Grishina

**INFLUENCE PARAMETER WORKER OF THE CAMERA OF THE BEAM TYPE**

ON HER ENERGY EFFICIENCY

*The explored influence to geometries of the camera of the beam type (KLT) and dielectrics parameters processed dielectrics on energy efficiency worker cameras.*

Энергетическая эффективность рабочей камеры определяется соотношением [1]:

$$\eta = 1 - |\Gamma|^2, \tag{1}$$

где  $\Gamma$  – коэффициент отражения от рабочей камеры.

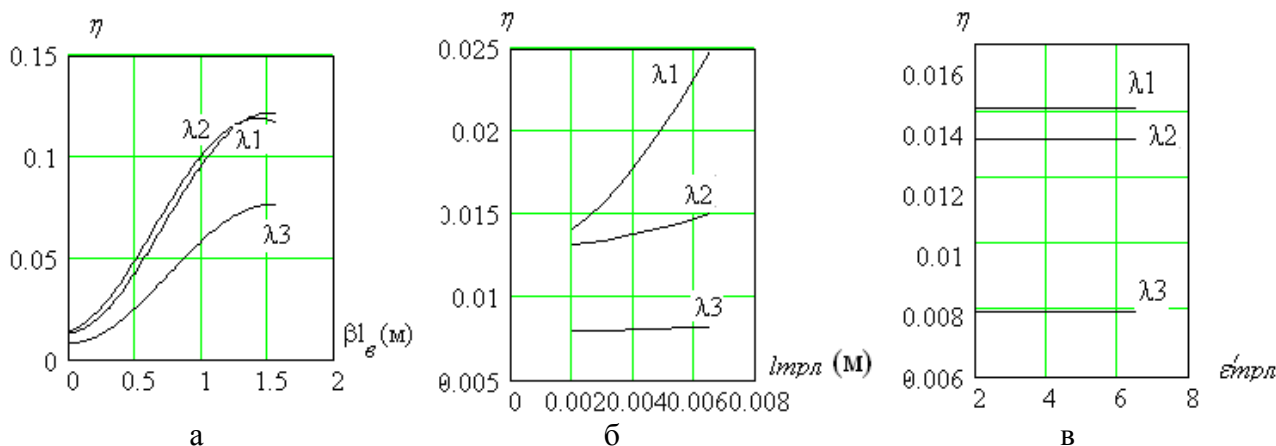
В случае камеры лучевого типа при условии согласования излучателя с линией передачи, связывающей его с СВЧ генератором и с воздушным пространством коэффициент отражения  $\Gamma$  характеризует отражение от поверхности обрабатываемого диэлектрика. Величина  $\Gamma$  зависит от геометрии рабочей камеры и диэлектрических свойств модифицированного диэлектрика (рис.5 а).

Расчетные соотношения для определения характера влияния этих параметров на величину  $\Gamma$  приведены в работе [2] в предположении о распространении от излучателя к диэлектрику плоской электромагнитной волны. Эти соотношения позволяют рассчитать четвертьволновый согласующий трансформатор между модифицированным диэлектриком и излучающей системой (рис.5 б).

Ниже приведены зависимости энергетического КПД ( $\eta$ ) от различных параметров задачи, в том числе при наличии и отсутствии транспортной ленты, при замене короткозамкнутой стенки рабочей камеры (7) (рис.5 б) на согласованный с воздухом и нагрузкой приемный ру-пор.

Как видно из рис.1, 2, наибольшее влияние на энергетический КПД оказывают диэлектрические свойства обрабатываемого объекта и короткозамкнутая стенка рабочей камеры, расположенная за модифицируемым диэлектриком.

По степени влияния  $\eta$  на диэлектрические параметры модифицирующие диэлектрики можно разделить на две группы: диэлектрики, модификация которых проявляется в первую очередь в увеличении температуры [3], и диэлектрики, помещаемые в СВЧ электромагнитное поле для нетепловой модификации [4].



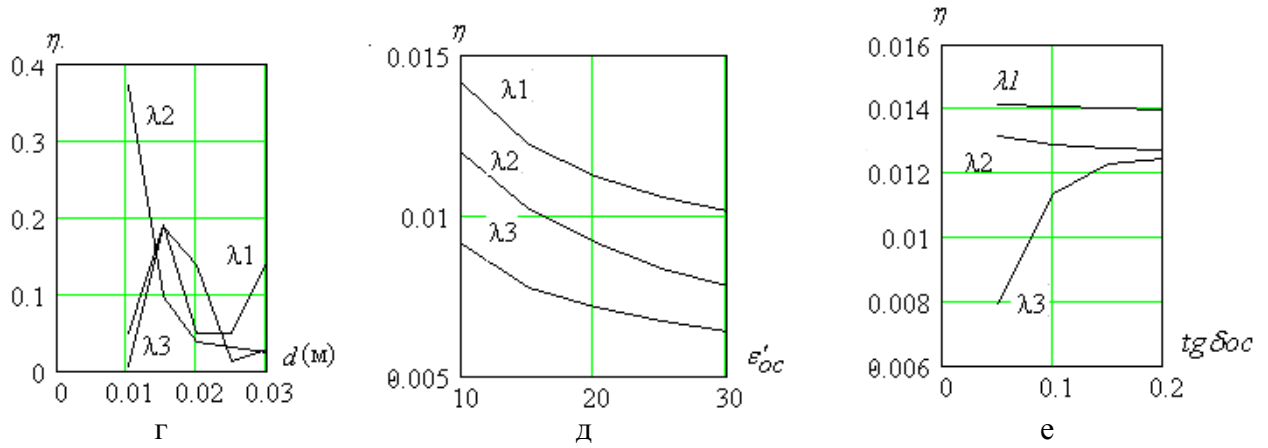


Рис. 1. Зависимости  $\eta$  от  $\beta l_{\theta}$ ,  $l_{mрл}$ ,  $\varepsilon'_{mрл}$ ,  $d$ ,  $\varepsilon'_{oc}$ ,  $tg\delta_{oc}$  при наличии транспортной ленты, без приемных рупоров: а –  $\eta(\beta l_{\theta})$ ; б –  $\eta(l_{mрл})$ ; в –  $\eta(\varepsilon'_{mрл})$ ; г –  $\eta(d)$ ; д –  $\eta(\varepsilon'_{oc})$ ; е –  $\eta(tg\delta_{oc})$

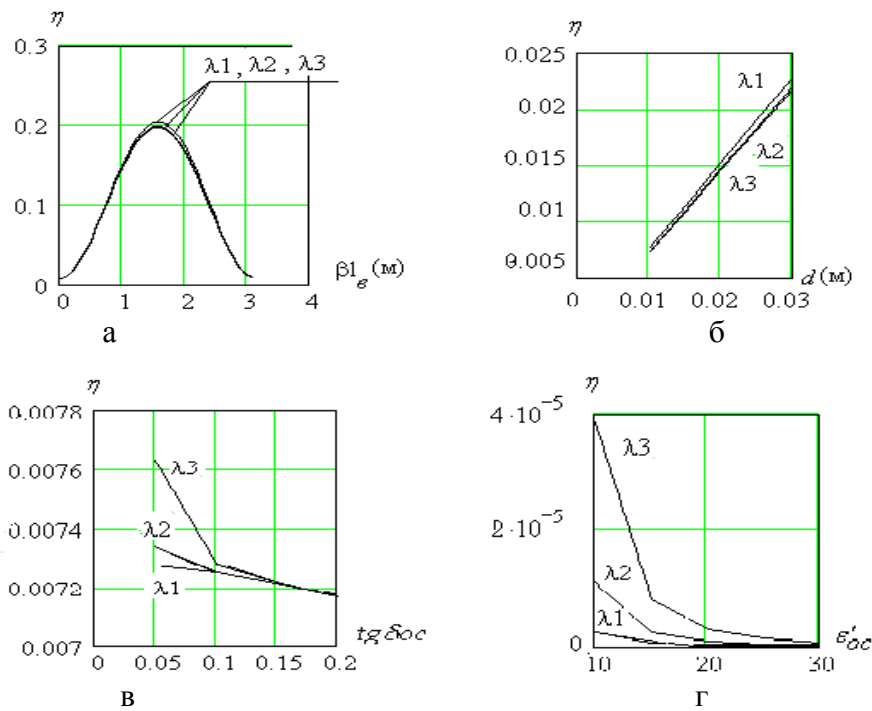
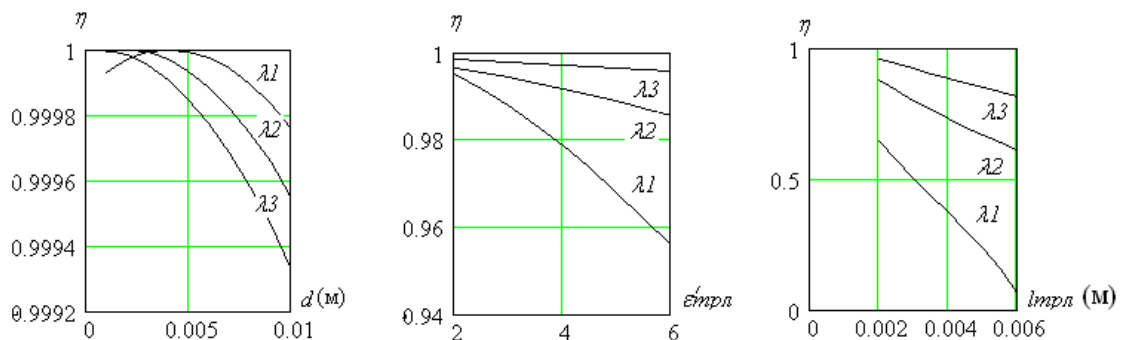


Рис. 2. Зависимости  $\eta$  от  $\beta l_{\theta}$ ,  $d$ ,  $\varepsilon'_{oc}$ ,  $tg\delta_{oc}$  при отсутствии транспортной ленты, без приемных рупоров: а –  $\eta(\beta l_{\theta})$ ; б –  $\eta(d)$ ; в –  $\eta(tg\delta_{oc})$ ; г –  $\eta(\varepsilon'_{oc})$ .



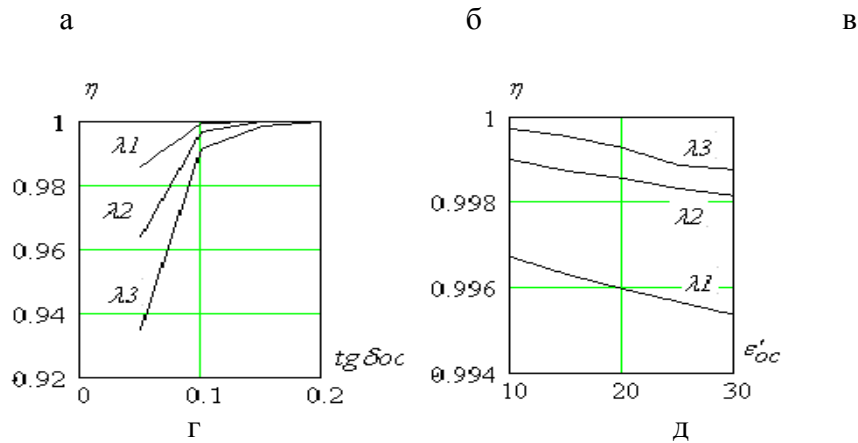


Рис. 3. Зависимости  $\eta$  от  $d$ ,  $l_{mpl}$ ,  $\varepsilon'_{mpl}$ ,  $tg\delta_{oc}$ ,  $\varepsilon'_{oc}$  при наличии транспортной ленты, без приемных рупоров для нетепловой модификации: а –  $\eta(d)$ ; б –  $\eta(\varepsilon'_{mpl})$ ; в –  $\eta(l_{mpl})$ ; Г –  $\eta(tg\delta_{oc})$ ; Д –  $\eta(\varepsilon'_{oc})$

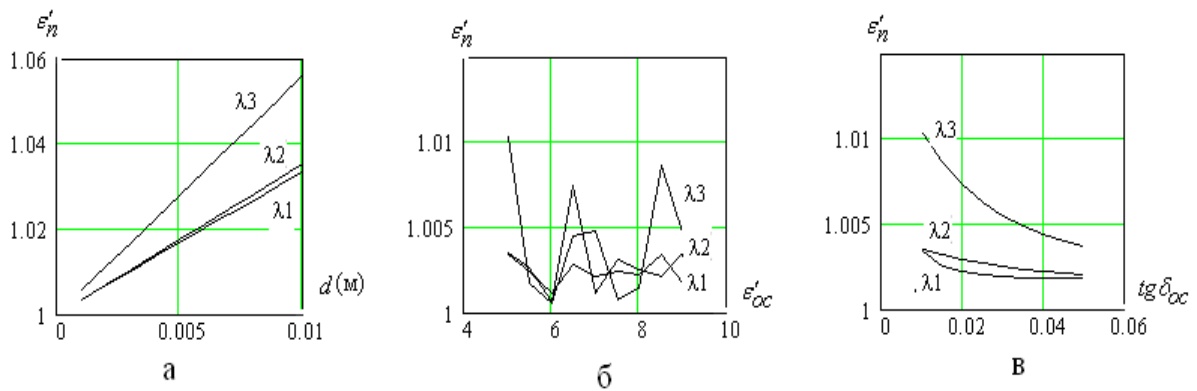


Рис. 4. Зависимости  $\eta$  от  $d$ ,  $tg\delta_{oc}$ ,  $\varepsilon'_{oc}$  при отсутствии транспортной ленты, без приемных рупоров для нетепловой модификации: а –  $\eta(d)$ ; б –  $\eta(\varepsilon'_{oc})$ ; в –  $\eta(tg\delta_{oc})$

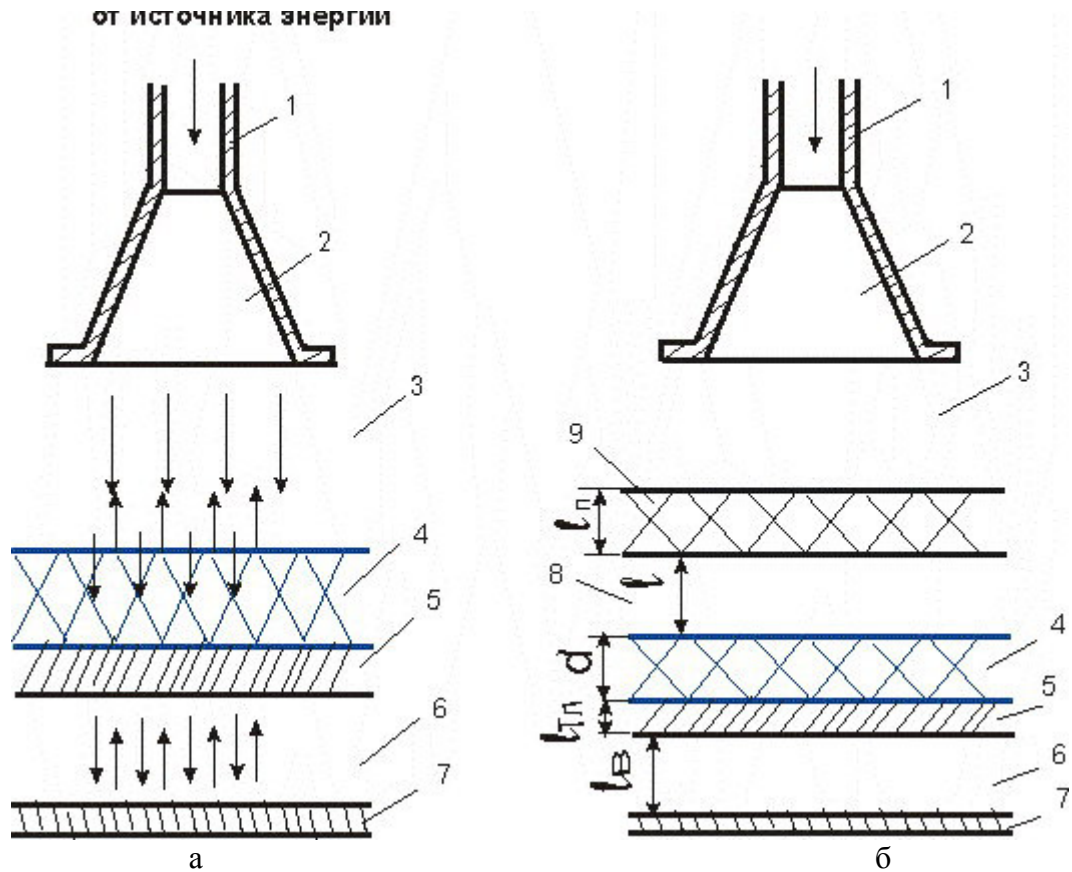
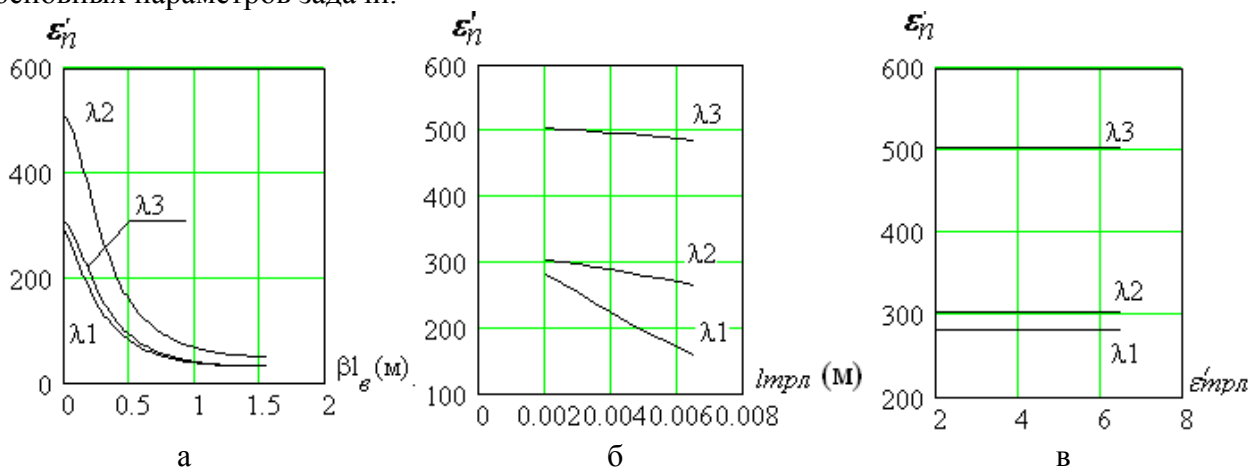


Рис. 5. Продольное сечение КЛТ: а – без четвертьволнового трансформатора; б – с четвертьволновым трансформатором (1 – волноводная передача, 2 – рупорный излучатель, 4 – обрабатываемый диэлектрик, 5 – подложка (транспортная лента), 7 – металлическая пластинка, 3, 8, 6 – слои воздуха, 9 – слой диэлектрика без потерь, заполняющего четвертьволновый трансформатор, 10 – металлический корпус КЛТ)

Ниже приведены зависимости КПД ( $\eta$ ) от различных параметров задачи, в том числе при наличии и отсутствии транспортной ленты, для нетепловой модификации диэлектриков.

На рис 6,7 приведены зависимости относительной диэлектрической проницаемости от основных параметров задачи.





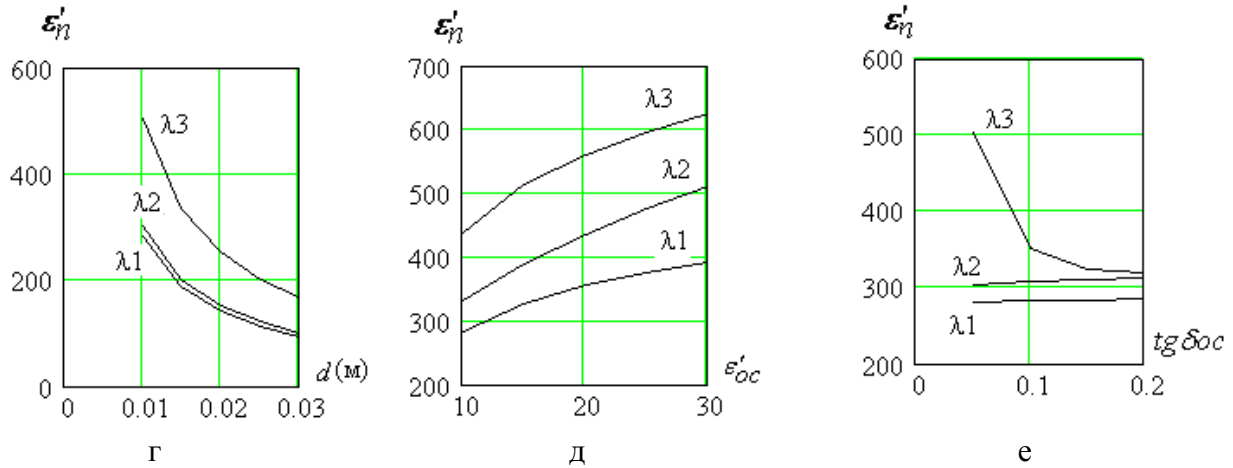


Рис. 6. Зависимости  $\varepsilon'_n$  от  $\beta l_\theta$ ,  $l_{mpл}$ ,  $\varepsilon'_{mpл}$ ,  $d$ ,  $tg\delta_{oc}$ ,  $\varepsilon'_{oc}$  при наличии транспортной ленты, без приемных рупоров: а –  $\varepsilon'_n(\beta l_\theta)$ ; б –  $\varepsilon'_n(l_{mpл})$ ; в –  $\varepsilon'_n(\varepsilon'_{mpл})$ ; г –  $\varepsilon'_n(d)$ ; д –  $\varepsilon'_n(\varepsilon'_{oc})$ ; е –  $\varepsilon'_n(tg\delta_{oc})$ .

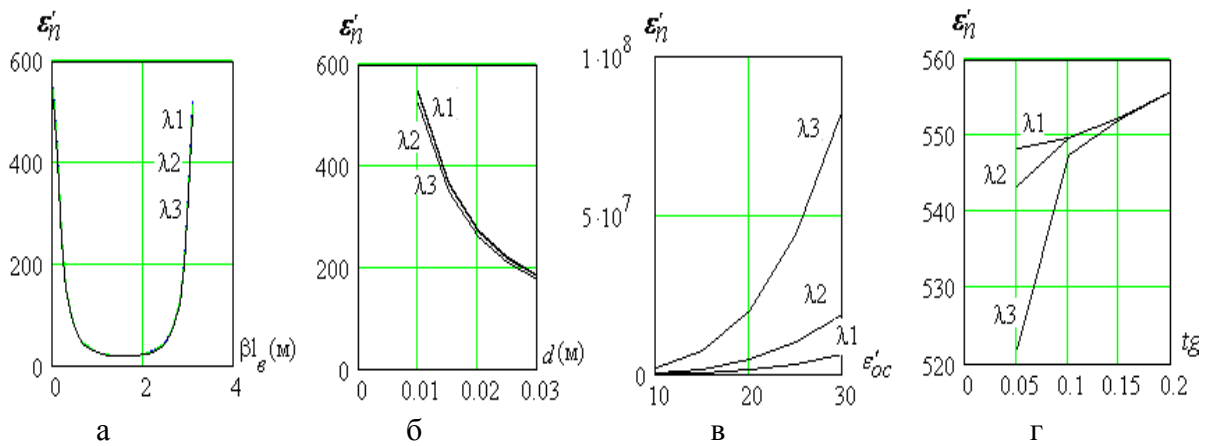
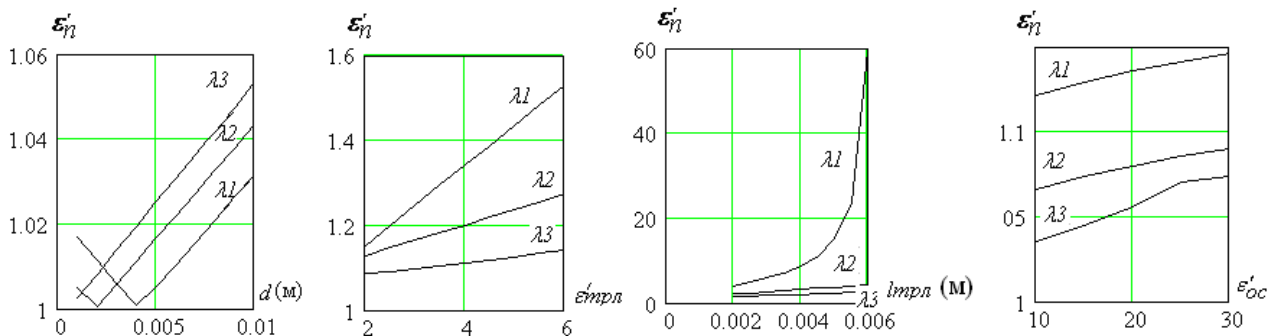


Рис. 7. Зависимости  $\varepsilon'_n$  от  $\beta l_\theta$ ,  $d$ ,  $\varepsilon'_{oc}$ ,  $tg\delta_{oc}$  при отсутствии транспортной ленты, без приемных рупоров: а –  $\varepsilon'_n(\beta l_\theta)$ ; б –  $\varepsilon'_n(d)$ ; в –  $\varepsilon'_n(\varepsilon'_{oc})$ ; г –  $\varepsilon'_n(tg\delta_{oc})$ .

Подобрать диэлектрик без потерь, заполняющий четвертьволновый трансформатор, значительно проще при термообработке диэлектрика, чем при его нетепловой модификации.



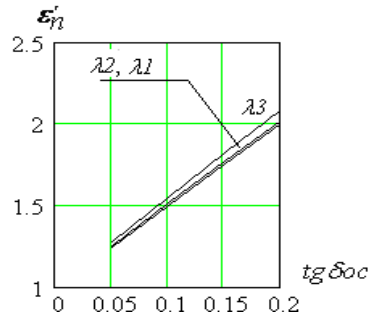


Рис. 8. Зависимости  $\varepsilon'_n$  от  $l_{мпл}$ ,  $\varepsilon'_{мпл}$ ,  $d$ ,  $tg\delta_{oc}$ ,  $\varepsilon'_{oc}$  при наличии транспортной ленты, без приемных рупоров при нетепловой обработке: а –  $\varepsilon'_n(\beta l_{\phi})$ ; б –  $\varepsilon'_n(l_{мпл})$ ; в –  $\varepsilon'_n(\varepsilon'_{мпл})$ ; г –  $\varepsilon'_n(d)$ ; д –  $\varepsilon'_n(\varepsilon'_{oc})$ ; е –  $\varepsilon'_n(tg\delta_{oc})$ .

Что касается применения вместо короткозамкнутой стенки приемного рупора, то это наиболее радикальный способ уменьшения коэффициента отражения  $\Gamma$ , однако прошедшая в приемный рупор энергия должна быть каким-либо полезным образом использована.

### Выводы

1. На энергетическую эффективность КЛТ наибольшее влияние оказывают диэлектрические свойства модифицированного диэлектрика и короткозамкнутая стенка рабочей камеры, находящейся за модифицированным диэлектриком.
2. Четвертьволновый согласующий трансформатор, расположенный между обрабатываемым объектом и излучателем, позволяет максимально увеличить энергетическую эффективность КЛТ. В конечном счете, все сводится к тому, удастся ли подобрать диэлектрик без потерь с нужной относительной диэлектрической проницаемостью.
3. Радикальным способом уменьшения отражений является замена короткозамкнутой металлической стенки за модифицированным диэлектриком на приемный рупор.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Колесников Е.В. Проектирование электротехнологических установок / Е.В. Колесников. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2006. 282 с.
2. Архангельский Ю.С. Согласование обрабатываемого диэлектрика с рупорным излучателем камеры лучевого типа СВЧ электротермической установки / Ю.С. Архангельский, Е.М. Гришина // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2006. № 4(19). Вып.4. С. 23-26.
3. Архангельский Ю.С. СВЧ электротермия / Ю.С. Архангельский. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 1998. 408 с.
4. Калганова С.Г. Создание научных основ модифицирующего нетеплового СВЧ воздействия на полимерные материалы / С.Г. Калганова // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2006. № 4(19). Вып.4. С. 96 -102.

**Гришина Екатерина Михайловна** –

аспирант кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета.

*Статья поступила в редакцию 25 октября 2007г., принята к опубликованию 2 ноября 2007г.*

УДК.678.76:548.51

Б.П. Чесноков, Ю.А. Ажгалиев, Г.Г. Угаров, А.Н. Вайцуль

### ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

*В статье рассматриваются результаты исследований воздействия облучения, позволяющие на наноуровне управлять процессами модифицирования полимерных материалов. Показана перспективность использования данного способа, который позволяет изменять физико-химические и механические характеристики готовых изделий.*

B.P. Chesnokov, Y.A. Azhgaliyev, G.G. Ugarov, A.N. Vaicul

### ELECTROTECHNOLOGY MANUFACTURING PROCESS POLYMER MATERIALS

*The influence irradiation, prevented on the nano-level operate in the process of modification polymer materials by their manufacture are considered in this article. Show that perspective realizing new method, which allow change of mechanic physical and chemical characteristics of production.*

Развитие радиоэлектроники и электронной техники потребовало совершенствования технологии изготовления высокомолекулярных органических веществ и новых видов полимеров. Важные значения для этих материалов имеют их физико-химические и механические свойства: прочность, пластичность, теплопроводность, гигроскопичность, величина диэлектрической проницаемости, радиационная и химическая стойкость, растворимость и др.

Одним из самых дешёвых полимеров является полиэтилен, для которого характерно сочетание ценных свойств, заключающихся в способности перерабатываться всеми известными для термопластов высокопроизводительными методами.

При конструировании высоковольтных, высокочастотных устройств стремятся подбирать материалы с малыми величинами угла потерь и диэлектрической проницаемости [1,2,3]. Ввиду того, что диэлектрические потери зависят от технологии изготовления изделий, обусловленной неоднородностью структуры полимера, научиться управлять процессом их производства представляется весьма актуальной задачей.

Получение полимерного материала без пор и расслоений, с однородной структурой и при отсутствии влаги позволило не только повысить качество материала, но и расширить перспективу использования его в СВЧ-технике. Кроме электротехнических целей, некоторые из них могут применяться в приборостроении в качестве антикоррозионных покрытий металлических деталей радиоэлектронной аппаратуры.

Причиной низкой прочности изделий является хаотическая структура полимеров, и поэтому, научившись управлять построением молекул, возможно изготавливать материалы на заказ.

Путем упорядочения полимерной структуры ученой из Голландии Паулеттой Принс (Дельфтский технологический университет) удалось на порядок улучшить проводимость пластика, который по данному показателю не уступает современным полупроводникам. Технология позволяет воздействовать на полимерные цепочки таким образом, что они, приобретая вид стройных цепеобразных рядов, позволяют получать пластик с более гибкой, эла-

стичной полимерной структурой. Использование нового материала вместо полупроводников в дисплеях ноутбуков, сотовых телефонов и т.д. открывает возможность сворачивать их в рулон, сгибать, мять, ронять, не опасаясь поломки. Однако технология получения текстурированного материала не раскрывается. Известный способ получения текстурированных полимеров ввиду относительно сложной технологии и ее неприспособленности к условиям массового производства не находит пока широкого применения.

Для совершенствования свойств материала предлагается в технологический процесс получения ввести операцию облучения от электронного ускорителя. Исследование влияния условий радиационного синтеза на физико-химические и механические свойства гранулированных компонентов, а также на кинетику протекания радиационной полимеризации представляет большой научный и практический интерес.

Известны исследования по влиянию электронного излучения на электропроводимость полистирола и полиэтилена на возможность использования их в радиоаппаратуре, подвергающейся воздействию космических ионизирующих излучений [4,5,6]. Установлено, что облучение приводит к деградации электроизоляционных свойств на много порядков, следовательно при разработке приборов, работающих в условиях космоса, это должно учитываться. Известны также процессы, позволяющие обеспечить полимеризацию полиэтилена под воздействием электронов [7], однако во всех этих работах изменение свойств осуществлялось на готовых изделиях, что ограничивает возможности использования облучения в технологии изготовления материалов.

Использование облучения на начальной стадии формирования изделий из полимеров позволило не только повысить стойкость материала к облучению, но и изменить коренным образом структуру готового изделия. Предлагаемое техническое решение обеспечивает повышение воспроизводимости параметров готовых изделий.

При проведении экспериментальной работы был решен определённый круг задач, связанных с выбором оптимальных режимов облучения, а именно определение плотности электронного пучка, углового распределения электронов, измерения температуры облучаемого образца. В качестве источника излучения применялся линейный ускоритель электронов ЭЛУ – 4М со средней энергией электронов 2 МэВ. Режим облучения выбирался в зависимости от геометрических размеров образца и заданной температуры.

Плотность электронов при облучении составляла  $6,72 \cdot 10^{12}$  эл/см<sup>2</sup> при токе пучка  $I = 1,08 \mu\text{Кл}$ . Расчёт времени для набора требуемой дозы проводился по формуле

$$t = \alpha \frac{DS}{\Phi \cdot I},$$

где  $t$  – время облучения (с),  $D$  – поглощённая доза (Гр),  $S$  – площадь облучаемой поверхности (см<sup>2</sup>),  $\Phi$  – поток, приходящийся на единицу тока пучка (эл/μКл·с);  $I$  – ток пучка (μКл),  $\alpha$  – коэффициент, характеризующий свойства материала (для полимера  $\alpha = 3,5 \cdot 10^5$  эл/см<sup>2</sup>Гр). Все полимерные образцы проходили механические испытания до и после облучения.

Используя в качестве инструмента воздействия на изменение свойств изделий высоковольтный электронный ускоритель, удаётся управлять процессом формирования молекулярных цепочек при изготовлении полимерных материалов на наноуровне с применением ионизирующего излучения с длиной волны  $10^{-9}$  см [8]. Образование активных центров (свободных радикалов, положительных ионов, молекул в возбужденном состоянии) при облучении вызывает изменение химических реакций ответственных за характер надмолекулярных образований, наличие в полимере низкомолекулярных продуктов радиолиза той или иной

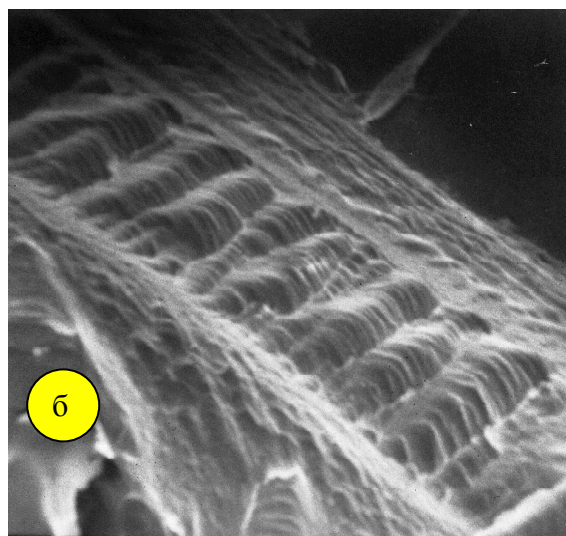
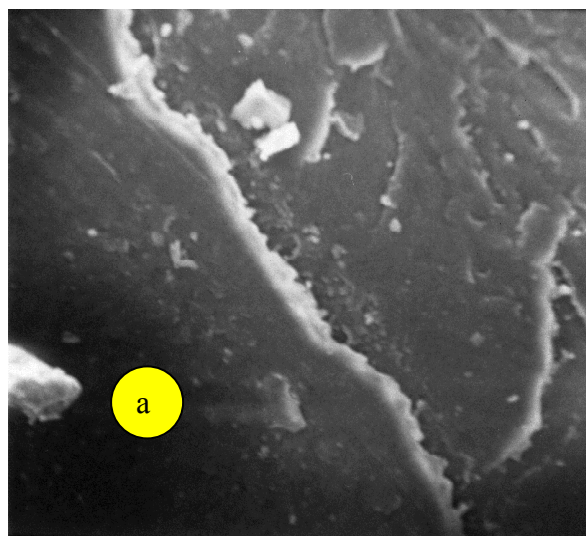
природы и т.д. В таблице представлена зависимость предела текучести расплава исходного гранулированного сырья от дозы облучения.

Зависимость индекса расплава от дозы облучения

Доза облучения, кГр	1	10	50	100	500	1000	2500	5000	10000	25000	50000
Индекс расплава, грамм/10 мин	0,474	0,583	0,569	0,605	0,648	0,516	0,390	0,442	0,476	0,550	0,579

Как видно из таблицы, индекс расплава для полиэтилена, получаемого по радиационной технологии, вначале увеличивается с нарастанием дозы облучения, а затем уменьшается за счёт радиационного отжига. Что касается полиэтилена, получаемого по промышленной технологии, то индекс расплава находится в пределах (0,604 г/10 мин). Гранулированное сырье, подвергнутое воздействию облучения, отличается более высокой точкой плавления, большей температурной стабильностью и более низкой растворимостью.

Исследования свойств полимерных материалов при воздействии энергии высокой плотности показали, что облучение влияет на ход химических реакций в процессе их изготовления и получения структуры с анизотропными свойствами (рисунок б). В процессе полимеризации реакционно-активные центры способствуют формированию полимерных цепей в виде тонких нитей, прочно связывающих макромолекулы.



Микроструктура скола трубы из полиэтилена низкого давления, полученного по промышленной (а) и радиационной (б) технологиям. Увеличение  $\times 2300$

Образованные при облучении полимеры в виде сетки с высокой степенью упорядоченности пространственного строения характеризуются повышенной деформационной устойчивостью и жёсткостью. Возрастание прочности происходит благодаря появлению волокон и их взаимному переплетению и снижению напряжений в связующем звене (при радиационном сшивании), локализованных по концам волокон.

Испытания на растяжение образцов в виде двутаврового сечения проводились на разрывной машине «Zwіc». Результаты экспериментов показали, что при приложении усилия в продольном направлении среднее значение силы составляло  $F = 198,9 \text{ кг/см}^2$ , при удлинении  $L = 821 \%$  для промышленной технологии и  $F = 207,6 \text{ кг/см}^2$ ,  $L = 858 \%$  для радиаци-

онной технологии, а при поперечном разрушении  $F = 99,4 \text{ кг/см}^2$ ,  $L = 620 \%$  для промышленных образцов и  $F = 112,9 \text{ кг/см}^2$ ,  $L = 641 \%$  для образцов полученных по радиационной технологии. Таким образом, волокна, скрепляясь между собой в нити различного плетения, и, кроме того, отдельные слои, переплетаясь между собой, обеспечивают формирование объемной структуры с равномерным распределением нагрузки по волокнам.

Для современного этапа развития отрасли в области производства полимеров использование радиационной технологии, характеризующейся высокой эффективностью и стереорегулирующей способностью, а также возможностью управления основными свойствами получаемых изделий, приобретает важное значение.

Таким образом, переходя к осознанному оперированию молекулами благодаря нанотехнологии, удастся конструировать материалы с необходимыми эксплуатационными свойствами при высокой упорядоченности структуры. Облучение от электронного ускорителя позволяет также формировать изделия с однородным распределением макромолекул и анизотропией свойств. Кроме того, готовые изделия, не имея почти никакой пористости, способны выдерживать при пробое более высокие напряжения. Например, полимерные пленки, полученные с помощью облучения толщиной от 1-2 мк., могут найти широкое применение при конструировании радиоаппаратуры в частности, в технологии плёночных микросхем, а также при изготовлении фольговых конденсаторов выдерживающих на пробой при постоянном напряжении более 50 В., для транзисторных схем.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Диагностика и прогнозирование свойств полимерных материалов / В.М. Аристов, А.Ю. Шевелев, И.Х. Мусяев и др. // Пластические массы. 2000. № 7.
2. Справочник по пластическим массам. М.: Химия, 1975. Т. 2.
3. Диагностика и прогнозирование свойств волокно- и пленкообразующих полимеров / Ю.В. Зеленев, Н.В. Минакова, Е.М. Кулишова и др. // Пластические массы. 2000. № 11.
4. Махлис Ф.А. Радиационная физика и химия полимеров / Ф.А. Махлис. М.: Атомиздат, 1972. 328 с.
5. Радиационное электроматериаловедение / Н.С. Костюков, Н.П. Антонова, М.И. Зильберман, Н.А. Асеев. М.: Атомиздат, 1979. 220 с.
6. Влияние низкоэнергетического излучения на электропроводность радиоматериалов / Б.И. Гвоздév, Е.Д. Пожидаев, В.С. Саенко, А.П. Тютнев // Надёжность и контроль качества. М.: Приборостроение, 1981. 39 с.
7. А. с. №14580. СССР. Способ получения радиационно-модифицированного полиэтилена / В.А. Каргин, В.Л. Карпов. 1949 г.
8. Радиационная модификация полимерных материалов / Ю.А. Ажгалиев, Б.П. Чесноков, А.Н. Вайцуль, Ю.А. Зайкин // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова. 2007. №4. С. 20.

#### **Чесноков Борис Павлович –**

кандидат химических наук, доцент кафедры «Теплотехника, теплогазоснабжение и вентиляция», СГАУ им. Н.И. Вавилова

#### **Ажгалиев Юрий Александрович –**

аспирант кафедры «Теплотехника, теплогазоснабжение и вентиляция», СГАУ им. Н.И. Вавилова

#### **Угаров Геннадий Григорьевич –**

доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета

**Вайцунь Александр Николаевич** –  
генеральный директор Саратовского трубного завода

*Статья поступила в редакцию 25 октября 2007г., принята к опубликованию 2 ноября 2007г.*

УДК 621.365

Т.Ю. Дунаева

## **ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ РАЦИОНАЛЬНОГО ПОДХОДА К ВЫБОРУ СВЧ УСТАНОВОК ДЛЯ СУШКИ ЗЕРНА И СЕМЯН**

*Рассматривается проблема рационального выбора сушильных установок для производителей сельскохозяйственной продукции. Описаны наиболее распространенные типы сушилок, показаны преимущества СВЧ сушилок, выбраны критерии сравнения различных типов установок.*

T.Y. Dunaeva

## **RATIONAL CHOICE OF DRYING PLANTS FOR AGRICULTURAL PRODUCTS**

*The problems of rational choice of drying plants for agricultural products development were observed in this article. There we describe most popular types of microwave drying machines, and there were chosen a criterions of comparison different types of drying machines.*

Интерес к сушке зерна и семян в настоящее время значительно возрос в связи с применением высокопроизводительных комбайнов, а следовательно, с уменьшением сроков уборки. Наличие сушилок позволяет за счет повышения верхнего предела влажности хлебной массы раньше начать комбайновую уборку, максимально использовать время суток, увеличить рабочий период между дождями и, как результат, на 10-15 дней повысить сезонную выработку на комбайн, что эквивалентно введению 2-4 новых комбайнов в хозяйстве. Сушка зерна позволяет получить качественное продовольственное и фуражное зерно и высококачественные семена. Применение высокопроизводительных сушилок значительно снижает время на подготовку зерна к длительному хранению, уменьшает потери зерна в поле в период уборки урожая, а также позволяет в достаточно сжатые сроки и с минимальными потерями провести процесс передачи зерна с поля на склад длительного хранения. Затраты на сушку и хранение зерна непосредственно в хозяйствах снижаются на 200-350 рублей на тонну (данные 2006 г.) по сравнению с сушкой и хранением зерна на перерабатывающих пунктах и элеваторах. Кроме того, после непродолжительного хранения в зерне увеличивается содержание клейковины на 3-4%, что повышает качество зерна и, следовательно, его стоимость.

Необходимо учитывать и еще одно немаловажное обстоятельство. Цены на зерно продолжают неуклонно расти. Только за период с марта по июнь 2007 года цены на зерно выросли на 5-10%. Если в июле закупочная цена пшеницы составляла порядка 2700 руб/т, то уже в августе она поднялась до 5300-5800 руб/т вместо ожидаемых 3400-4400 руб/т, а в октябре составляет уже порядка 6600 руб/т. Следовательно, производителям выгодно продавать зерно не сразу после уборки, а после того, как на него поднимутся цены.

В связи с этим в хозяйствах всё большее распространение получает поточный метод послеуборочной обработки зерна, осуществляемый на механизированных зерноочистительных и зерноочистительно-сушильных пунктах, агрегатах и комплексах. Такие пункты для

послеуборочной обработки зерна представляют собой индустриальные предприятия в сельском хозяйстве нового типа. В их состав входит зерноочистительное, сушильное, погрузочно-разгрузочное, транспортное и другое оборудование для выполнения всех операций, связанных с очисткой, сортированием, сушкой и хранением зерна.

Существуют различные способы сушки зерна. В основном это методы, построенные на повышении температуры обрабатываемого объекта. Наиболее широкое применение в хозяйствах находят сушилки с традиционным энергоподводом (сушилки конвективного типа), где сушильным агентом выступает нагретый воздух либо его смесь с топочными газами.

Выбор типа сушилки определяется, прежде всего, ее производительностью, стоимостью, безопасностью при работе, надежностью контроля температуры, стабильностью производительности и наличием соответствующего транспортного оборудования. Легкость очистки также играет важную роль, особенно при сушке разных партий семенного зерна. В то же время в процессе сушки возможно ухудшение качества зерна вследствие потери всхожести, подгорания, снижения хлебопекарных свойств муки, растрескивания.

Для крупных хозяйств и элеваторов с большими объемами обрабатываемой продукции необходимы сушилки большой производительности – шахтные (в том числе рециркуляционные).

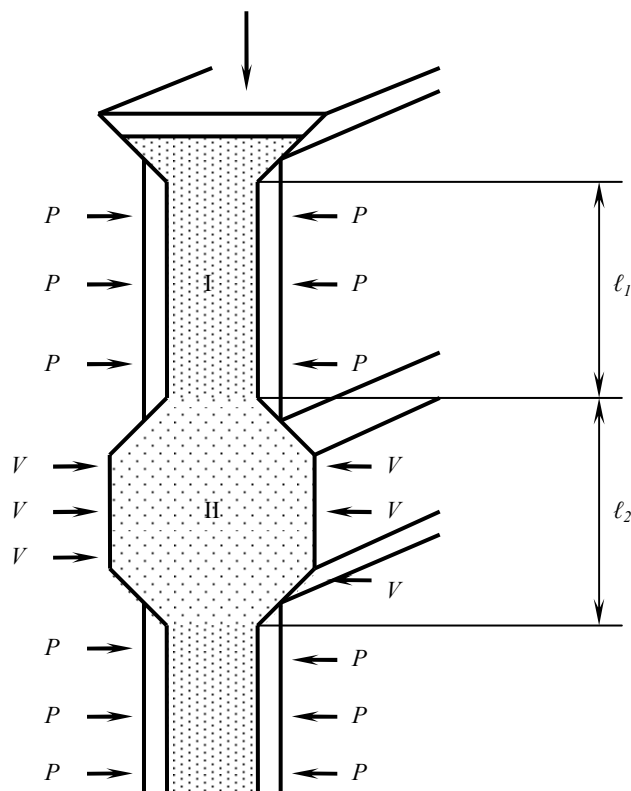
Для небольших хозяйств более предпочтительными в использовании являются сушилки небольшой производительности – например, барабанные сушилки и сушильные комплексы производительностью от 0,2 до 6 т/ч. Однако в настоящее время на этом сегменте рынка появляется все больше сушилок с СВЧ энергоподводом производительностью от 2 до 4 т/ч, имеющих ряд преимуществ по сравнению с традиционными.

Конструктивно данное устройство представляет собой прямоточную зерносушильную установку вертикального типа модульной конструкции. Каждый отдельно взятый модуль представляет собой функционально законченное зерносушильное устройство, обеспечивающее производительность до 5-6 м<sup>3</sup> в час. Увеличение производительности установки достигается увеличением количества модулей до 2-4 штук, при этом производительность можно увеличить до 24 м<sup>3</sup> в час.

Продукт сушки подается в активную зону через засыпной бункер (рисунок). Проходя через активную зону сверху вниз, продукт нагревается за счет энергии СВЧ поля на 25-35°C выше температуры окружающей среды. Разогрев происходит во время движения продукта через активную зону. В этот момент происходит интенсивное выделение влаги на поверхности продукта. Данная технология позволяет применять рециркуляцию продукта в сушильной установке и является экологически чистой, так как отсутствуют продукты сгорания топлива.

Начальный процесс удаления влаги начинается в активной зоне и позволяет снять на сегодняшний момент времени от 2 до 3% влаги. В дальнейшем продукт сушки поступает в сушильную зону, где происходят удаление влаги и снижение температуры продукта до температуры, превышающей температуру окружающей среды на 10-12°C. Затем продукт через шнек выгружается в приемный бункер или высыпную яму (в зависимости от места установки зерносушилки), где происходят выравнивание температуры продукта сушки с температурой окружающей среды и окончательный сьем влаги. Расчет сушилок этого типа подробно рассматривается, например, в [1].





Вертикальная СВЧ сушилка с отдельными зонами нагрева и сушки

Преимущества сушки с помощью энергии СВЧ поля известны: это повышение качества готового продукта, компактность установки, простота обслуживания и монтажа, более высокая скорость обработки продукта. В современных средствах информации (например, в Интернете) имеется достаточно много объявлений, рекламирующих СВЧ сушилки, реализующие эти преимущества, однако при принятии инвестиционного решения делать выбор в пользу той или иной установки, только ориентируясь на эти заявления, по меньшей мере, опрометчиво.

Выбор в пользу того или иного способа энергоподвода, того или иного технического решения при выборе установки, учет иных специфических обстоятельств и требований должен быть проведен на базе системного подхода к проблеме сопоставления и выбора (принятия решения). Сопоставление технологических установок требует обязательного равенства производительности сравниваемых вариантов, а также сопоставления вариантов энергоподвода при условии оптимальности реализующих его установок и систем.

Сопоставление проводится с помощью целевой функции, зависящей от многих параметров, общее число которых может достигать нескольких десятков. Такой целевой функцией может быть сравнительный эффект [2]:

$$\Delta \mathcal{E}_{\Sigma MAX} = \mathcal{E}_{\Sigma MAX} - \mathcal{E}_{\Sigma I MAX} > 0, \quad (1)$$

где  $\mathcal{E}_{\Sigma MAX}$ ,  $\mathcal{E}_{\Sigma I MAX}$  – интегральный эффект, полученный при реализации каждого из вариантов при таком оптимальном сочетании параметров, когда эта величина достигает максимума в каждом из вариантов.

Интегральный эффект ( $\mathcal{E}_{инт}$ ) определяется как сумма текущих (годовых) эффектов за весь расчетный период, приведенная к начальному шагу, или как превышение интегральных

результатов (доходов) над интегральными затратами (расходами). Величина  $\mathcal{E}_\Sigma$  (чистого дисконтированного дохода) может быть вычислена по формуле

$$\mathcal{E}_\Sigma = \sum_{t=0}^T [(P_i C_{Pi})_t (1 - \gamma_H)(1 - \gamma_{НДС})(1 - \gamma_y) - C_t (1 - \gamma_H)(1 - \gamma_y) + C_{CM} \gamma_{НДС} (1 - \gamma_y) - \frac{B_K}{t_{СЛ}} (1 + i_{КР})] \cdot (1 + E)^{-t} + \Phi_{t_{СЛ}} (1 + E)^{-t_{СЛ}} \quad (2)$$

где  $P_i$  – количество  $i$ -й продукции, произведенной установкой в  $t$ -й год ее работы;  $C_{Pi}$  – цена  $i$ -й продукции в  $t$ -й год работы установки;  $C_t$  – производственная себестоимость продукции в  $t$ -м году;  $\Phi_{t_{СЛ}}$  – остаточная на момент времени  $t_{СЛ}$  стоимость основных фондов;  $t_{СЛ}$  – срок службы (эксплуатации) установки;  $C_{CM}$  – затраты на сырье (материалы) за вычетом отходов, а также покупные комплектующие изделия и полуфабрикаты;  $B_K$  – банковский кредит;  $E$  – норма дисконта;  $\gamma_y$  – функция, учитывающая условия участия учредителей в распределении прибыли;  $\gamma_{НДС}$  – процент налога на добавленную стоимость, в настоящее время составляет 18%;  $\gamma_H$  – процент налога на прибыль, равен 24%.

Это соотношение имеет общий характер и может быть использовано при расчете экономической эффективности для любого типа установок. Специфика установки учитывается при расчете входящих в (2) величин, в первую очередь производительности  $G$ , времени работы  $t_P$ , затрат на электроэнергию и водоснабжение  $C_\Sigma$ , затрат на запасные части  $C_{рем}$ .

При определении интегрального эффекта от внедрения новой установки норма дисконта должна быть скорректирована с учетом данных об уровне инфляции  $i$  и поправки на риск  $P$  по формуле [3]:

$$1 + E = \frac{1 + \frac{P}{100}}{1 + \frac{i}{100}} + \frac{P}{100} \quad (3)$$

Стоимость установки и продажная цена выпускаемой ею продукции, а также тарифы на электроэнергию и водоснабжение решающим образом влияют на эффективность СВЧ сушилки и ее преимущество по сравнению с традиционной установкой. Зачастую для реализации проекта требуются значительные капиталовложения, то есть величина банковского кредита достаточно велика [4]. Одним из приемлемых вариантов решения данной проблемы было бы приобретение установки в лизинг [5]. В этом случае производитель вполне может позволить себе приобрести достаточно дорогое оборудование, выпускающее продукцию высокого качества и, соответственно, продавать эту продукцию по более высокой цене, при этом выплачивая фиксированные платежи лизингодателю, в этом случае значительные средства экономятся на налоговых платежах. Организация, реализующая лизинговую сделку, в конце срока контракта получает полностью самортизированное оборудование.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Архангельский Ю.С. СВЧ электротермия / Ю.С.Архангельский. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 1998. 408 с.
2. Толстов В.А. Эффективность электротехнологических установок / В.А. Толстов, Ю.С.Архангельский. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2000. 146 с.
3. Зеленский Ю.Б. Экономическое обоснование инвестиционных проектов на предприятиях Саратовской области: типовая методика / Ю.Б. Зеленский, В.С. Баландин. Саратов: Изд. центр Саратов. гос. соц.-экон. ун-та, 1999. 100 с.

4. Колесников Е.В. Проектирование электротехнологических установок: монография / Е.В.Колесников; под общ. ред. Ю.С. Архангельского. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2006. 283 с.

5. Маркарьян Э.А. Инвестиционный анализ: учеб. пособие / Э.А. Маркарьян, Г.П. Герасименко. М.: ИКЦ «МарТ»; Ростов н/Д: Изд. центр «МарТ», 2003. 96 с.

**Дунаева Татьяна Юрьевна –**

ассистент кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 25 октября 2007г., принята к опубликованию 2 ноября 2007г.*

УДК 553.9.072

И.Н. Антонов, К.А. Чижов

### **ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ПРОХОДЯЩИЕ В ИМПУЛЬСНЫХ РАЗРЯДНЫХ КАМЕРАХ**

*Рассмотрены физические процессы в импульсных разрядных камерах. Описаны процессы формирования плазменного сгустка, его основные свойства.*

I. N. Antonov, K.A. Chizhov

### **THE PHYSICAL PROCESSES OF THE EROSIIVE DISCHARGE CAMERAS**

*It is considered the physical processes of the erosive discharge cameras. It is described the forming processes of plasma formations and its main properties.*

Рассмотрим физические процессы, проходящие в импульсных разрядных камерах. В импульсный плазмотрон можно вложить большую энергию, не вызывая разрушения его конструкции. Разрядные токи в импульсных генераторах плазмы достигают  $10^5 \sim 10^6$  А, а пиковые мощности  $10^2 \sim 10^4$  Вт; в то же время средняя потребляемая мощность может быть совсем небольшой. Это позволяет получать плазменные потоки, параметры которых можно варьировать в широких пределах. Продолжительность рабочего цикла в импульсном плазмотроне также меняется в широких диапазонах – от нескольких микросекунд до миллисекунд, выбор рабочих веществ практически не ограничен – это любые газы, металлы, твердые и жидкие диэлектрики. Наряду с этим возможность работы при невысоких значениях потребляемой средней мощности резко ослабляет все требования к конструкционным материалам.

Принципиальная схема разрядной камеры импульсного плазмотрона представлена на рис.1.

Основными элементами любого импульсного генератора плазмы являются накопитель электромагнитной энергии, блок коммутации или система инициирования разряда, система хранения и подачи рабочего вещества и электроды.

Коммутация разряда в импульсных эрозионных плазмотронах осуществляется с помощью поджигающего устройства – игнайтера. На игнайтер разряжается конденсатор цепи поджига, запасаемая энергия в котором составляет  $\sim 0,1 - 1\%$  от энергии основного накопителя. Вследствие прохождения поджигающего импульса вдоль поверхности диэлектрика, разделяющего электроды, формируется стриммер. После пробоя диэлектрика в парах продуктов его абляции непосредственно вблизи канала стриммера за время порядка долей микросекунды возникает разряд дугового типа. Поступающий из зоны разряда на поверхность диэлектрика тепловой поток обеспечивает его непрерывное испарение в течение всего рабочего цикла. Этот процесс эквивалентен работе быстродействующего клапана, автоматически поддерживающего натекание газа в зону разряда.

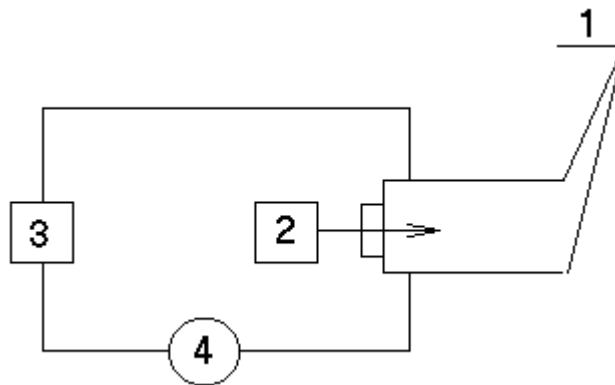


Рис. 1 Принципиальная схема разрядной камеры:

1 – электроды; 2 – система подачи рабочего вещества; 3 – накопитель энергии;  
4 – система инициирования разряда

Меняя геометрию электродов и разрядной камеры, можно управлять режимом образования и ускорения плазмы в импульсном эрозионном плазмотроне.

Первые и наиболее обстоятельные исследования импульсного эрозионного плазмотрона описаны в работе [8]. Характерные параметры ускорителей аналогичного типа следующие: емкость конденсаторной батареи  $\sim 100$  мкФ, рабочее напряжение  $1 \sim 3$  кВ, максимальный разрядный ток порядка 20 кА, выделение мощности в разряде практически заканчивалось к 10 мкс. Активное сопротивление в начальной стадии разряда падает по экспоненциальному закону, а затем по более медленному, степенному. Ко второй микросекунде плазма заполняет всю разрядную камеру. Вместе с плазмой из разрядной камеры происходит вынос частиц рабочего диэлектрика. Масса уносимого материала за один разряд зависит от геометрии камеры и запасаемой энергии  $W_K = \frac{CU_0^2}{2}$  и составляет величину порядка  $10^{-5}$  г/Дж. Спектральными методами была определена температура плазмы  $T_e \approx 2,7 \sim 2,9$  эВ и концентрация  $n_e \approx 3 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup> внутри камеры и  $n_e \approx 2 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup> на выходе. Степень ионизации близка к единице, хотя в целом за разряд число нейтральных частиц примерно в шесть раз превосходит число ионов.

Скорость движения фронта плазменного сгустка составляет  $(1 - 2) \cdot 10^6$  см/с, средне-массовая скорость  $\sim 1 \cdot 10^5$  см/с. Таким образом, истечение основной массы плазмы определяется газодинамическими силами, а движение фронта сгустка носит неустойчивый характер. Увеличение угла раскрытия диэлектрической разрядной камеры приводит к появлению компоненты магнитной силы, направленной вдоль оси ускорителя, и к постепенному переходу в режим электродинамического разгона плазмы.

Особенности процессов, происходящих в электродинамических импульсных разрядных камерах с эрозией диэлектрика, исследованы в работах [1, 4]. В качестве рабочего диэлектрика использовались фторопласт, оргстекло и др. Запасаемая в накопителях энергия менялась в диапазоне  $10^2 \sim 10^3$  Дж, разрядный ток составлял  $10^4 \sim 10^5$  А, длительность разряда при аperiodической форме импульса тока до 30 мкс. Были подробно изучены процессы, происходящие в самом диэлектрике и ведущие к его ускорению. Деполимеризация и выход массы диэлектрика определялись тепловым потоком, поступающим из плазмы на его поверхность.

Как показали эксперименты, удельный тепловой поток на рабочий диэлектрик при  $W_k \approx 500$  Дж составляет в среднем  $\sim 1$  Дж/см<sup>2</sup> и меняется с  $W_k$  приблизительно по линейному закону. Максимум излучения плазмы импульсного ускорителя, согласно теоретическим оценкам, приходится на область вакуумного ультрафиолета, на которую падает до 80-90% полного лучистого потока.

Унос массы диэлектрика определяется удельной теплотой абляции, т.е. энергией разрыва химических связей. Механизм абляции связан с поглощением с поглощением излучения в поверхностном слое, деструкцией сложных молекул и испарением массы.

Исследования процессов формирования токового слоя и ускорения плазмы в импульсных эрозийных камерах различной геометрии описаны в работах [1, 3, 4]. В экспериментах для определения магнитных и электрических полей в системе использована зондовая методика, для определения распределений токов применены пояса Роговского. Температура плазмы измерялась спектральными методами. Обработка и анализ осциллограмм позволили построить графики распределения тока, протекающего по электродам, для различных моментов времени, а также графики распределения погонной плотности тока. Один из таких графиков представлен на рис. 2.

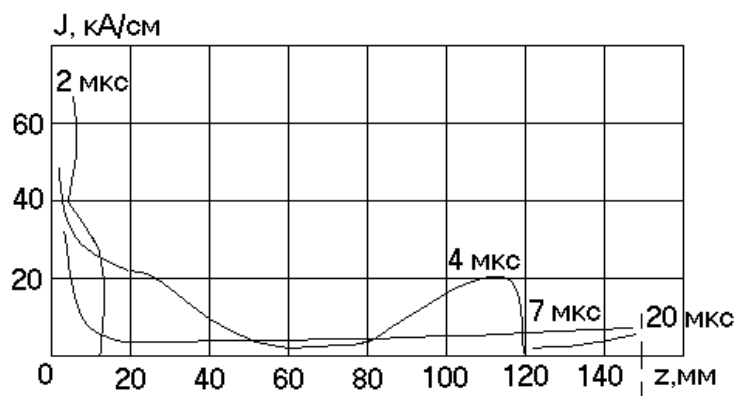


Рис.2. График распределения погонной плотности тока по длине рельсового ускорителя (пунктиром обозначен срез электродов)

Характер изменения тока и погонной плотности тока в основных чертах одинаков для всех исследованных режимов и разрядных камер. В начальной стадии развития разряда (1-2 мкс) почти весь разрядный ток сосредоточен в узкой зоне около поверхности диэлектрика. Впереди неподвижного токового слоя у диэлектрика происходит формирование бегущих токовых слоев, захватывающих часть разрядного тока. Самый первый из этих слоев («быстрый» сгусток) регистрируется с помощью специальной токовой ловушки. «Быстрый» сгусток захватывает постоянный ток порядка нескольких процентов от максимального и движется равноускоренно, разгоняясь вдоль плазменных «продолжений» электродов до скорости  $1 \sim 4 \cdot 10^7$  см/с.

Оценка массы быстрого сгустка производится по формуле

$$m_{\delta} = \frac{1}{2} \cdot \frac{L'}{v'} I_{\delta}^2, \quad (1)$$

где  $I_{\delta}$  – ток, захваченный сгустком;  $L'$  – погонная индуктивность;  $v'$  – ускорение дает величину, соответствующую массе поджигаемой плазмы.

Таким образом, становится ясна природа «быстрого» сгустка. Уносимая им энергия невелика – порядка 1%  $W_k$ .

На рис.2 отчетливо виден следующий за этим форсгустком токовый слой («медленный» сгусток), который захватывает 20 – 30%  $I_{max}$  и, двигаясь вдоль электродов равноускоренно, достигает к срезу разрядной камеры  $\sim (2-3) \cdot 10^6$  см/с. Этот «медленный» сгусток уносит до 15% вкладываемой в разряд энергии.

Концентрация плазмы в зоне «медленного» сгустка порядка  $10^{14}$  см<sup>-3</sup>. Сопоставление этих данных с результатами измерения магнитного поля приводит к выводу, что на фронте токового распределения плазма полностью замагничена, т.е.

$$\omega_e \tau_e \gg \omega_i \tau_i > 1. \quad (2)$$

Перенос тока должен осуществляться в основном ионами, и прикатодная часть течения должна опережать прианодную. После выхода «медленного» токового слоя на срез разрядной камеры в плазменной струе происходит переход к режиму частичной замагниченности:

$$\omega_e \tau_e > 1 > \omega_i \tau_i. \quad (3)$$

На этой стадии разряда перенос тока должен осуществляться главным образом электронами, а прианодная часть линий тока должна опережать вследствие эффекта Холла прикатодную. Таким образом, частичный отрыв «медленного» сгустка от основной части плазменного течения, видимо, следует связать со сменой условий замагниченности в плазме.

После выхода «медленного» сгустка из разрядной камеры в нем устанавливается квазистационарное плазменное течение с практически равномерно распределенным разрядом вдоль электродов (рис.3).

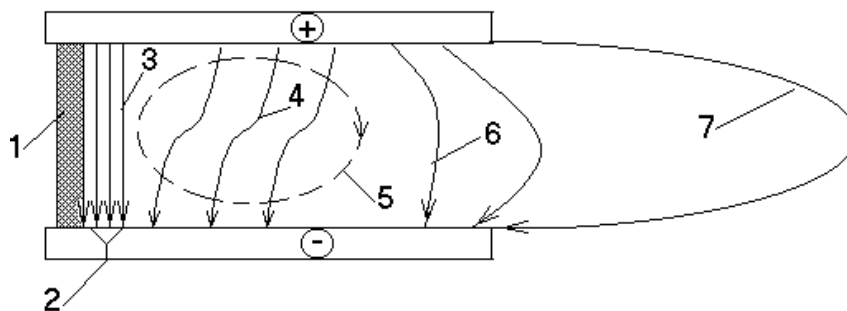


Рис.3. Характерные зоны в импульсной эрозионной разрядной камере:  
 1 – диэлектрик; 2 – поджигающее устройство; 3 – дефлаграционный токовый слой;  
 4 – распределенный разряд; 5 – замкнутая петля тока; 6 – «медленный» сгусток;  
 7 – «быстрый» сгусток

В азимутальном направлении на этой стадии разряда также в значительной степени симметризуется (за исключением зоны, непосредственно примыкающей к диэлектрику). Вдоль диэлектрика ток протекает в течение всего времени разряда. Оценки по осциллограммам тока и напряжения показывают, что основной вклад энергии – до 50-55%  $W_k$  – происходит именно в зоне неподвижного токового слоя вблизи диэлектрика. Таким образом, на этой

стадии квазистационарного течения плазменная струя, поступающая со стороны диэлектрика, проходит через неподвижный токовый слой у изолятора и через распределенный разряд в канале камеры. Ввиду того, что в слое вблизи диэлектрика происходит ускорение плазмы магнитными силами, а затем она испытывает магнитогидродинамическое расширение в зоне распределенного разряда, неподвижный токовый слой можно рассматривать как слой дефлаграционного типа.

С увеличением плотности плазмы позади «медленного» сгустка осуществляется переход к условию, при котором электрическое поле вдоль электродов меняет знак на обратный и его величина составляет  $\sim 300$  В/см.

После выхода «медленного» сгустка плотность плазмы быстро достигает значений  $10^{16} - 10^{17}$  см<sup>-3</sup>, а температура – 2~4 эВ (рис. 4). Нейтральные атомы в струе практически не наблюдаются, но в небольшом количестве имеются вторые и третьи ионы.

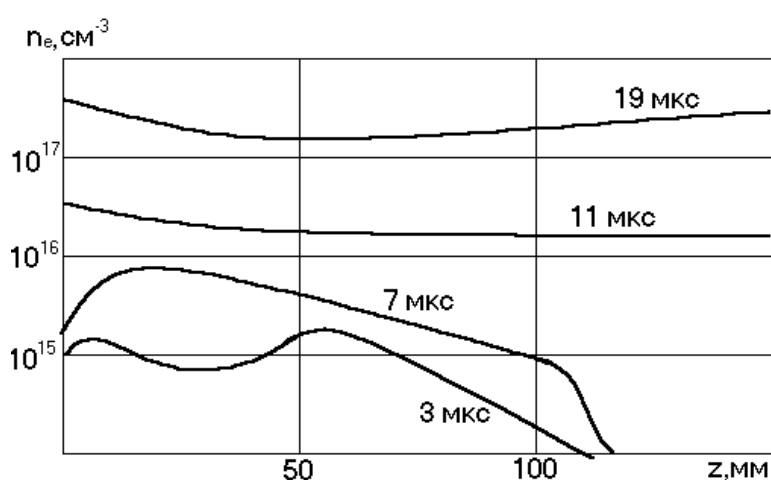


Рис.4. Распределение плотности плазмы вдоль электродов в различные моменты времени

Коэффициент Холла в плазме снижается до величины порядка единицы. Распределение магнитных полей вдоль электродов позволяет сделать вывод, что в плазме, в зоне распределенного разряда возникают замкнутые токовые петли, имеющие вид овалов, вложенных друг в друга, вытянутых вдоль электродов и замкнутых по азимуту. Возникновение токовых вихрей объясняется эффектом Холла. Их роль становится значительной после прохождения разрядного тока через максимальное значение. Вследствие высокой проводимости плазмы магнитное поле, «вмороженное» в ее электронную компоненту, оказывается не в состоянии «следить» за быстрым изменением тока. Магнитное поле и ток в замкнутых петлях продолжают наблюдаться и после прекращения основного разряда, когда  $I=0$  и  $U=0$ . Все это время продолжается испарение диэлектрика и ускорение образующейся плазмы магнитными силами. Таким образом, в импульсных разрядных камерах запасаемая в конденсаторе энергия первоначально переходит в энергию «вмороженного» в плазму магнитного поля и лишь на следующей стадии за счет работы продольного холловского поля трансформируется непосредственно в кинетическую энергию плазмы. На рис. 5 показано изменение во времени энергии, вложенной в разряд:

$$W_p = \int_0^{\tau_p} IU dt, \quad (4)$$

$W_M$  – энергии, запасенной в магнитном поле;  $W_{пл}$  – энергии, переданной плазме и рассчитанной по ее массе и скорости.

Видно, что к 10 мкс (максимум разрядного тока на 6 мкс) в разряд вложено около 70% всей энергии, однако лишь небольшая ее часть перешла в кинетическую энергию плазмы. Основная часть вложенной в разряд энергии сосредоточена в магнитном поле.

На заключительной стадии разряда, когда основная часть массы набирает энергию, проходя замкнутые токовые конфигурации, на оси перед центральным электродом наблюдается зона компрессионного течения повышенной плотности.

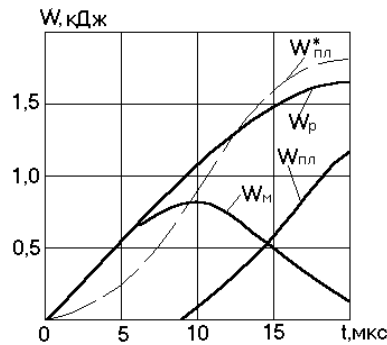


Рис. 5. График изменения энергии, вложенной в разряд, во времени

Из вышеизложенного можно сделать вывод, что в импульсных эрозионных разрядных камерах развитие процессов носит характер последовательных стадий, а само плазменное течение состоит из ряда характерных зон: дефлаграционный токовый слой у диэлектрика, распределенный разряд в межэлектродном зазоре, бегущие токовые слои – «быстрый» и «медленный», зона компрессионного течения плазмы на выходе из разрядной камеры.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Авраменко Р. Ф. Шаровая молния в лаборатории / Р.Ф. Авраменко. М.: Химия, 1994. 256 с.
2. Андерсон Дж. Э. Явления переноса в термической плазме / Дж.Э. Андерсон. М.: Энергия, 1972. 152 с.
3. Олдер Б. Вычислительные методы в физике плазмы / Б. Олдер. М.: Мир, 1974. – 520 с.
4. Вихрев В.В. Вопросы физики низкотемпературной плазмы / В.В Вихрев и др. Минск: Наука и техника, 1970 г.
5. Котельников В.А. Процессы переноса в пристеночных слоях плазмы / В.А Котельников, С.В. Ульданов, М.В. Котельников. М.: Наука, 2004. 422 с.
6. Довбня А.Н. Динамика энерговыделения в импульсной дуге с низким напряжением горения в воздухе / А.Н. Довбня и др. // ЖТФ. 2003. Т. 73. Вып. 12.
7. Энциклопедия низкотемпературной плазмы: вводный том / под ред. В.Е. Фортова. М.: Наука, 2000.
8. Импульсные разряды в диэлектрических камерах / А.М. Андрианов, А.И. Земсков, В.В. Прут и др. // ЖТФ. 1969. Т. 39. Вып. 3. С. 433-437.
9. Емелин С.Е., Семенов В.С., Бычков В.Л. и др. //ЖТФ. 1997. Т. 67. № 3. С. 19
10. Антонов И.Н. Экспериментальная установка для получения электроэрозионной плазмы / И.Н. Антонов, К.А. Чижов, А.Н. Чернышов // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2006. №4 (19). Вып. 4. С. 87-94.

**Антонов Игорь Николаевич –**



кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета

**Чижов Константин Александрович** –

аспирант кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета.

Статья поступила в редакцию 25 октября 2007г., принята к опубликованию 2 ноября 2007г.  
УДК 553.9.072

К.А. Чижов

### МЕТОД ПРИБЛИЖЕННОГО РАСЧЕТА ИМПУЛЬСНЫХ ЭРОЗИОННЫХ КАМЕР

*Приведен метод приближенного расчета импульсных эрозионных разрядных камер.*

К.А. Chizhov

### THE METHOD OF EVOLUTION CALCULATION OF THE IMPULSE EROSION DISCHARGE CAMERAS

*The method of evolution calculation of impulse erosive discharge cameras is described.*

Развитие процессов в эрозионных импульсных плазмотронах носит характер последовательных стадий, а само плазменное течение состоит из ряда зон. Поэтому теоретическое описание процессов требует не совсем обычного подхода: теоретические модели нужно применять не к системе в целом, а лишь к определенной стадии или зоне течения.

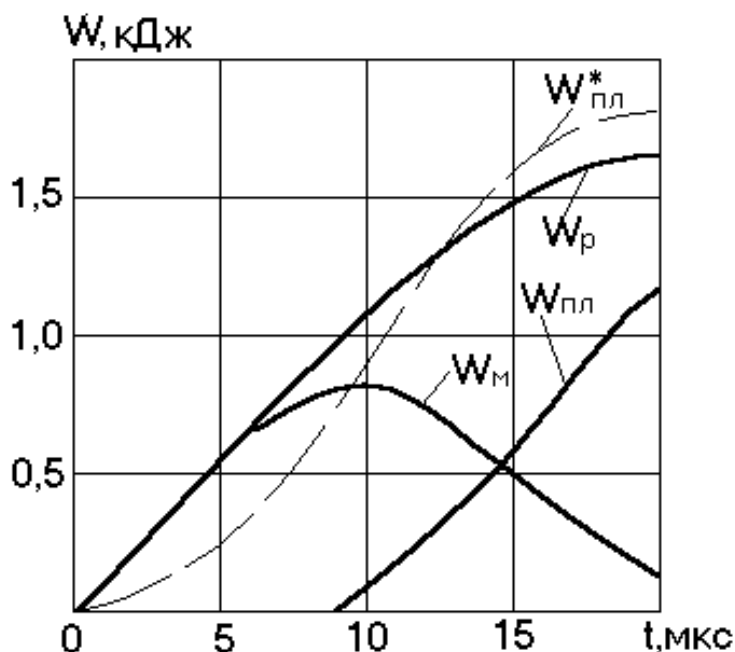


Рис. 1. График изменения энергии, вложенной в разряд, во времени

В качестве одного из методов расчета используют электродинамическое приближение. В основе этого приближения лежит упрощенный подход к импульсному плазмотрону как к электромеханической системе с токовой перемычкой, ускоряемой силой Ампера.

Конечно, это грубая модель, и главное, что объединяет ее с реальным плазмотроном, – это нестационарный характер процесса. В данном случае электродинамическое приближение фактически можно рассматривать как метод эквивалентного электрического контура, пригодный для оценки параметров импульсного эрозионного плазмотрона по порядку величины.

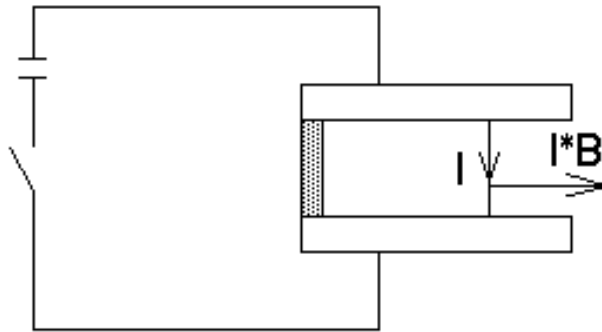


Рис. 2. Электродинамическая модель токовой перемычки

Допустимость оценки параметров импульсного эрозионного плазмотрона на основе электродинамического приближения проиллюстрированы графиками на рис.1, на котором отложены экспериментально полученные значения  $W_p$  – энергии, вложенной в разряд,  $W_M$  – магнитной энергии и  $W_{пл}$  – кинетической энергии плазмы. Приведем рассчитанные в приближении «плазменной» шайбы значения энергии плазмы

$$W_{пл}^* = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} m \left| \frac{L'}{2m} \int_0^t I^2(t) dt \right| \quad (1)$$

и магнитной энергии

$$W_M^* = \frac{1}{2} L I^2 = \frac{1}{2} (L_0' + L'z) I^2(t), \quad (2)$$

где  $z(t)$  – координата «шайбы» в момент времени  $t$ .

Видно, что сильно расходящиеся вначале значения  $W_{пл}$  и  $W_{пл}^*$  в конечном счете сближаются между собой.

В простейшем варианте электродинамического приближения, предложенном Л.А. Арцимовичем [7], рис. 1, масса ступка предполагается постоянной  $m = \text{const}$  и исходная система уравнений записывается в следующем виде:

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = \frac{1}{2} L' I^2, \quad (3)$$

$$I = -C \frac{du}{dt}, \quad (4)$$

$$U = \frac{d}{dt} (LI), \quad (5)$$

$$L = L_0 + L'z. \quad (6)$$

Здесь  $L$ ,  $L_0$  и  $L'$  – соответственно полная, начальная и погонная индуктивности плазмотрона.

В случае коаксиальных электродов погонная индуктивность определяется по формуле

$$L' = \frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1} = 2 \ln \frac{r_2}{r_1}. \quad (7)$$

В случае рельстрона с плоскими электродами

$$L' = \mu \frac{d_1}{d_2}, \quad (8)$$

а с цилиндрическими –

$$L \approx \frac{\mu}{\pi} \left( \ln \frac{d}{2r} + \frac{1}{4} \right). \quad (9)$$

Здесь  $d_1$  – расстояние между плоскими рельсами;  $d_2$  – ширина рельсов;  $r$  – радиус цилиндрических рельсов;  $d$  – расстояние между осями рельсов.

Начальная индуктивность определяется конденсаторами и токопроводами и может быть снижена до  $L_0 \cong 5 - 10$  нГн.

Уравнения (4) и (5) представляют собой первое и второе правила Кирхгофа, т.е. уравнение непрерывности тока и уравнение баланса потенциала.

Систему уравнений (3) – (6) следует решать с начальными условиями при  $t=0$ :

$$U=U_0; I=0; z=0; \frac{dz}{dt} = 0 \quad (10)$$

Переходя к безразмерным переменным

$$\varphi = \frac{U}{U_0}; \quad y = \frac{L'z}{L_0} \quad \tau = \omega_0 t = \frac{t}{\sqrt{L_0 C}}, \quad (11)$$

где  $\omega_0$  – собственная частота контура, перепишем уравнения (3) – (6) в виде

$$\frac{d^2 y}{d\tau^2} = \lambda_1 \left( \frac{d\omega}{d\tau} \right)^2, \quad (12)$$

$$\omega = \frac{d}{d\tau} \left[ (1+y) \frac{d\omega}{d\tau} \right]. \quad (13)$$

Безразмерный электрический параметр

$$\lambda_1 = \frac{L' C^2 U_0^2}{2mL_0}. \quad (14)$$

определяет отношение магнитных и инерционных сил.

Система уравнений (12) – (13) решается численно с начальными условиями

$$\begin{aligned} y(0) = 0; \quad \left. \frac{dy}{d\tau} \right|_{\tau=0} &= 0, \\ \varphi(0) = 0; \quad \left. \frac{d\varphi}{d\tau} \right|_{\tau=0} &= 0. \end{aligned} \quad (15)$$

Результаты численного решения приводятся в работах [3,8]. Из уравнения 14 следует, в частности, условие максимального ускорения:

$$\lambda_1 = \frac{L' C^2 U_0^2}{2mL_0} \gg 1. \quad (16)$$

Отсюда вытекают очевидные требования к выбору величин  $L_0$ ,  $L'$ ,  $m$  и др.

Рассмотрим другой вариант расчета электродинамического генератора плазмы, позволяющий оценивать его параметры, не прибегая к численному интегрированию. Для этого составим эквивалентный электрический контур эрозионного плазмотрона (рис.3) и предположим, что

$$R = R_{пл} + R_0 = \text{const}, \quad (17)$$

где  $R_{пл}$  – омическое сопротивление плазмы;  $R_0$  – суммарное сопротивление электродов, токопроводов и т.д.

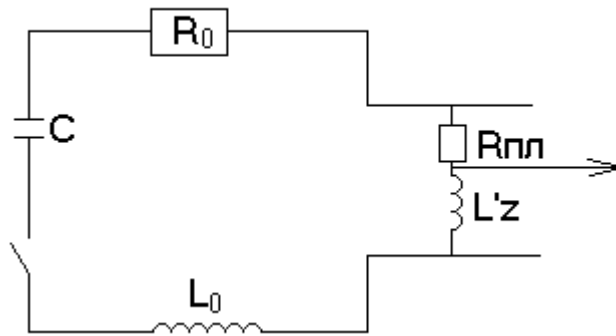


Рис. 3. Эквивалентная схема электродинамического генератора плазмы

Уравнение сохранения энергии для подобной разрядной камеры:

$$\frac{CU_0^2}{2} = \frac{CU^2}{2} + \frac{LI^2}{2} + \frac{mv^2}{2} + \int_0^t RI^2 dt. \quad (18)$$

Продифференцировав уравнение (18) с учетом выражения (17), получим

$$UI = LI \frac{dI}{dt} + \frac{1}{2} L' v I^2 + \frac{d}{dt} \left( \frac{mv^2}{2} \right) + RI^2 \quad (19)$$

В соответствии с уравнением (12)

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{mv^2}{2} \right) = mv \frac{dv}{dt} = \frac{1}{2} L' v I^2 \quad (20)$$

Тогда уравнение (18) принимает вид

$$UI = LI \frac{dI}{dt} + L' v I^2 + RI^2 = W_M + W_{пл} + W_{дж}. \quad (21)$$

Здесь  $W_{дж}$  – необратимые джоулевы потери в плазме или в элементах конструкции плазмотрона;  $W_{пл}$  – кинетическая энергия плазмы;  $W_M$  – энергия магнитного поля, имеющая промежуточный характер и в зависимости от соотношения параметров переходящая в  $W_{пл}$  и  $W_{дж}$ , либо возвращающаяся в виде электростатической энергии в батарею конденсаторов.

Выше указывалось, что плазменный сгусток способен развиваться и вне разрядной камеры вдоль плазменных «продолжений» электродов. С учетом этой особенности можно сделать при расчетах допущение, что в момент вылета сгустка разряд прекращается. Это предположение соответствует аperiодическому разряду и образованию в камере одного основного сгустка. Тогда на выходе уравнение (5) примет вид

$$\frac{CU_0^2}{2} = \frac{mv_a^2}{2} + \int_0^{\tau_p} RI^2 dt. \quad (22)$$

Интегрируя уравнение (12), находим скорость вылета плазменного сгустка

$$v_a = \frac{L'}{2m} \int_0^{\tau_p} I^2(t) dt. \quad (23)$$

Если общее сопротивление постоянно, то

$$\frac{CU_0^2}{2} = \frac{mv_a^2}{2} + \frac{2mR}{L'} v_a, \quad (24)$$

откуда

$$v_a = \frac{2R}{L'} (\sqrt{1 + \lambda_2} - 1), \quad (25)$$

где  $\lambda_2$  – второй электродинамический параметр

$$\lambda_2 = \frac{CU_0^2 L'^2}{4mR^2}. \quad (26)$$

КПД плазмотрона с учетом омических потерь

$$\eta = \frac{\sqrt{1 + \lambda_2} - 1}{\sqrt{1 + \lambda_2} + 1} \quad (27)$$

Формула (27) позволяет оценить соотношение между расчетной величиной КПД электродинамической расчетной камеры, с одной стороны, и энергетическим КПД – с другой.

Объединяя уравнения (21) и (24), можно найти аналитическую связь между КПД и скоростью

$$\eta = \frac{1}{\left(1 + \frac{4R}{L'v_a}\right)}. \quad (28)$$

Если предположить, во-первых, что максимальное ускорение сгустка соответствует максимуму разрядного тока

$$\left(\frac{dv}{dt}\right)_{MAX} = \frac{L'}{2m} I_{MAX}^2, \quad (29)$$

во-вторых, что величина  $I_{MAX}$  определяется из уравнения сохранения энергии типа (22) при  $U=0$ , т.е.

$$\frac{CU_0^2}{2} \cong \frac{1}{2} LI_{MAX}^2 + \frac{mv^2}{2} + \frac{2mR}{L'} v. \quad (30)$$

Исходя из этих предположений для КПД можно получить выражение

$$\left\{1 - \left(\frac{\lambda_2}{\eta}\right)^{1/2} + \sqrt{\lambda_2 + 1}\right\}^{1/\sqrt{\lambda_2 + 1}} = \left(\sqrt{2\lambda_2 + 1}\right) \left[1 - \eta + 2\sqrt{\frac{\eta}{\lambda_2}}\right]. \quad (31)$$

Если  $\lambda_2$  стремится к бесконечности, то формула принимает простой вид:

$$\eta_{PP} \cong 1 - \frac{1}{\sqrt{2\lambda_1 + 1}}. \quad (32)$$

На основании приведенных соотношений может быть предложен простой способ оценки параметров импульсной эрозионной разрядной камеры в электродинамическом приближении по заданным значениям КПД и удельного импульса (скорости истечения плазмы).

Так, зная КПД, можно найти параметр  $\lambda_2$  по следующей формуле:

$$\lambda_2 = \frac{4\eta}{(1-\eta^2)} \quad (33)$$

Из выражений (26) и (27) можно выразить активное сопротивление через заданные значения КПД  $\eta$  и скорости  $v_a$

$$R \leq R_{ПП} = \frac{1}{4} v_a L' \left( \frac{1}{\eta} - 1 \right). \quad (34)$$

Записав формулу (20) в виде

$$\lambda_1 = \frac{l_0 L'}{L_0}, \quad (35)$$

где  $l_0$  – характерная длина ускорения, равная для идеального электродинамического плазмотрона

$$l_0 = \frac{C^2 U_0^2 L'}{2m} \approx v_a \tau_p, \quad (36)$$

где  $\tau_p$  – продолжительность аperiodического разряда.

Из определения КПД по формуле (27), а также формулой (36), найдем для оптимальной ёмкости выражение

$$C \geq C_{ПП} = \frac{2\eta l_0}{L' v_a^2}. \quad (37)$$

По заданному значению тяги возможно найти электрическую мощность

$$N_{эл} = \frac{F v_a}{2\eta} \quad (38)$$

и частоту повторения

$$\nu = \frac{2N_{эл}}{C U_0^2}. \quad (39)$$

Таким образом, электродинамическое приближение можно считать приемлемым для оценки интегральных параметров импульсной эрозионной разрядной камеры. Недостаток этого приближения известен – оно не дает тонкой структуры плазменных сгустков и, очевидно, не может давать ввиду вышеуказанных допущений.

Более детальный анализ процессов в эрозионных импульсных плазмотронах целесообразно проводить, имея в виду отдельные стадии или зоны плазменного течения. Так, для зоны неподвижного токового слоя у диэлектрика пригодна модель дефлагционного токового слоя [7]. Зону квазистационарного течения плазмы в канале разрядной камеры можно исследовать в рамках двумерной теории, учитывающей эффект Холла [2].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Авраменко Р. Ф. Шаровая молния в лаборатории / Р.Ф. Авраменко. М.: Химия, 1994. 256 с.
2. Андерсон Дж. Э. Явления переноса в термической плазме / Дж.Э. Андерсон. М.: Энергия, 1972. 152 с.

3. Олдер Б. Вычислительные методы в физике плазмы / Б. Олдер. М.: Мир, 1974. 520 с.
4. Вопросы физики низкотемпературной плазмы / В.В. Вихрев и др. Минск: Наука и техника, 1970.
5. Котельников В.А. Процессы переноса в пристеночных слоях плазмы / В.А. Котельников, С.В. Ульданов, М.В. Котельников. М.: Наука, 2004. 422 с.
6. Динамика энерговыделения в импульсной дуге с низким напряжением горения в воздухе / А.Н. Довбня и др. // ЖТФ. 2003. Т. 73. Вып. 12.
7. Энциклопедия низкотемпературной плазмы: вводный том / под ред. В.Е. Фортова. М.: Наука, 2000.
8. Импульсные разряды в диэлектрических камерах / А.М. Андрианов, А.И. Земсков, В.В. Прут и др. //ЖТФ. 1969. Т. 39. Вып. 3. С. 433-437.
9. Емелин С.Е., Семенов В.С., Бычков В.Л. и др. //ЖТФ. 1997. Т. 67. № 3. С. 19.
10. Антонов И.Н. Экспериментальная установка для получения электроэрозионной плазмы / И.Н. Антонов, К.А. Чижев, А.Н. Чернышов // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2006. №4 (19). Вып. 4.

**Чижев Константин Александрович** –

аспирант кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета.

*Статья поступила в редакцию 25 октября 2007г., принята к опубликованию 2 ноября 2007г.*

УДК 553.9.072

Д.А. Давыдов

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ЖИДКОГО СТЕКЛА**

*Объектом исследования является теплоизоляционный материал на основе жидкого стекла, широко применяемый в строительной промышленности.*

*В статье рассматривается возможность получения теплоизоляционного материала на основе жидкого стекла методом СВЧ диэлектрического нагрева. Проводится сравнительный анализ эффективности традиционного и СВЧ нагрева.*

D.A. Davidov

## **RESEARCH OF DIELECTRIC PROPERTIES THE WARMLYISOLATION MATERIAL ON THE BASIS OF LIQUID GLASS**

*Object of research is warmlyisolation a material on the basis of the liquid glass, widely used in a building industry.*

*The purpose of work: to investigate properties and an opportunity of reception warmlyisolation a material on the basis of a liquid glass a method of dielectric heating. To investigate the received material with various kinds binding.*

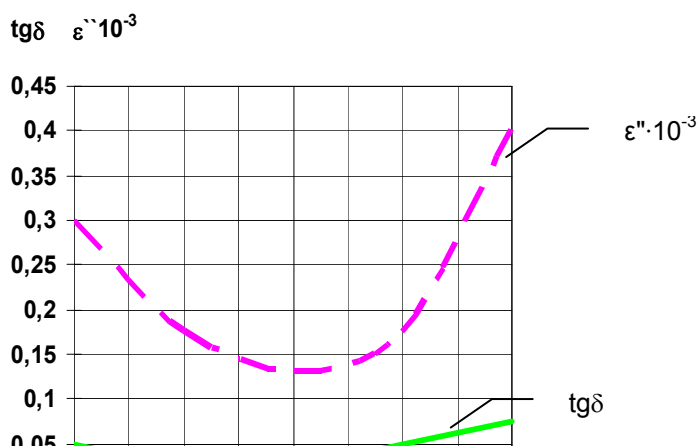
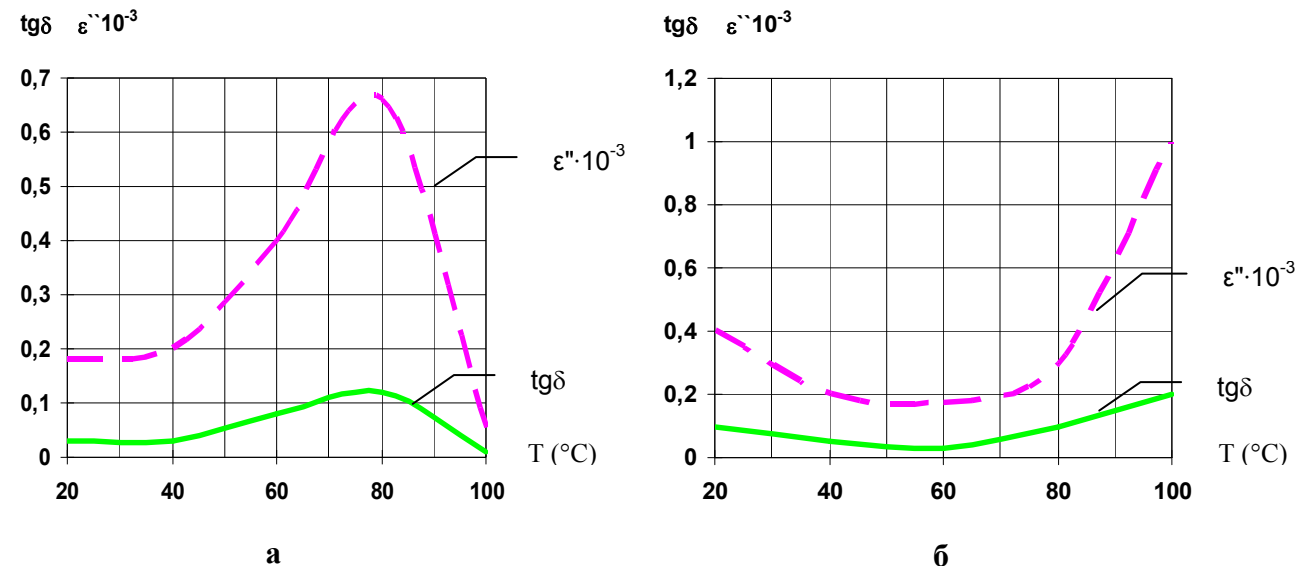
*During designing dielectric properties warmisolation a material, his physicomechanical properties are investigated, and also necessary parameters for his reception are defined.*

Теплоизоляционные материалы играют одну из важнейших ролей в повышении эффективности использования энергоресурсов. Одним из таких перспективных материалов является материал на основе жидкого стекла, представляющий собой смесь жидкого стекла с измельченными горными породами.

По сравнению с существующими естественными природными материалами и искусственными полимерными, теплоизоляционный материал на основе жидкого стекла имеет ряд преимуществ, в первую очередь такие как: высокие теплоизоляционные свойства (теплопроводность ниже, чем у дерева), низкая стоимость производства (в его составе используются простые и доступные компоненты, главным из которых является опока, имеющаяся в больших объемах во многих регионах), экологическая безопасность и безопасность для здоровья людей (материал не горюч и не выделяет токсичных компонентов).

Исследуемый теплоизоляционный материал представляет собой гранулы жидкого стекла с каким-либо наполнителем (опока, песок, кремнезём), которые при нагреве увеличиваются в объёме за счёт образования в них внутренних пустот. Традиционный способ получения на основе конвекционного нагрева отличается значительными энергозатратами. С целью их снижения предлагается технология получения данного материала с помощью СВЧ нагрева.

Определение диэлектрических параметров материала производилось методом полного заполнения сечения волновода. При этом исследовались изменения значений  $\epsilon'$  и  $\text{tg}\delta$  в зависимости от концентрации жидкого стекла, типа наполнителя (опока, кремнезём, песок) и времени нагрева. Обработка результатов экспериментов осуществлялась методами регрессионного анализа на основе критериев Фишера и Кохрена [1]. Полученные результаты представлены на рисунке.





Экспериментальным путём определено время, необходимое для нагрева исходной сырой смеси и получения готового материала. Оно составляет интервал в пределах 1 - 2 минут. То есть определены основные параметры (диэлектрические показатели, время нагрева, соотношение жидкого стекла и наполнителя) технологии для промышленного производства теплоизоляционного материала на основе жидкого стекла с использованием СВЧ нагрева.

Полученный гранулированный теплоизоляционный материал обладает следующими свойствами:

- теплопроводность готового материала – 0,07-0,09 Вт/(м °С);
- объемная масса - 280-320 кг/м<sup>3</sup>;
- увеличение объёма (относительно сырой смеси) – 2-4 раза;
- пористость - 80-88% (характер пор преимущественно замкнутый);
- прочность - 3-4 МПа;
- водопоглощение (в течение 1 ч в % по массе) - не более 20%;
- морозостойкость - не менее 15 теплосмен с потерей в весе не более 8%;
- отпускная влажность - не более 2%.

При этом расход энергии, необходимой для готового материала в случае использования СВЧ нагрева, сократился в 16 раз по сравнению с конвекционным нагревом.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Адлер Ю.П. Введение в планирование эксперимента / Ю.П. Адлер. М.: Metallurgy, 1968.
2. Архангельский Ю.С. СВЧ электротермия / Ю.С. Архангельский. Саратов: СГТУ, 1998.
3. Бранд А.А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах / А.А. Бранд. М.: Физматгиз, 1963.
4. Болотов А.В. Электротехнологические установки / А.В. Болотов, Г.А. Шепель. М.: Высшая школа, 1988.
5. Губкин А.И. Физика диэлектриков / А.И. Губкина. М.: Высшая школа, 1975.
6. СВЧ печь для сушки керамической шихты / И.И. Девяткин и др. // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. 1971. №8.
7. СВЧ энергетика. Т.2. Применение энергии сверхвысоких частот в промышленности / под ред. Э. Окресса. М., 1971.
8. Пюшнер Г. Нагрев энергией сверхвысоких частот / Г. Пюшнер. М.: Энергия, 1968.
9. Электротехнологические промышленные установки / под ред. А.Д. Свенчанского. М.: Энергоиздат, 1982.

**Давыдов Дмитрий Алексеевич –**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета

Статья поступила в редакцию 26 октября 2007г., принята к опубликованию 2 ноября 2007г.

УДК621.385

И.Б. Яковлева, Д.А. Ватрушкин, Д.А. Сальникова, А.В. Скоробогатова

## ГАРМОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИМПУЛЬСОВ КАТОДНОГО ТОКА В КЛИСТРОДЕ

*Приводятся алгоритм расчета и описание программы численного гармонического анализа, позволяющей находить гармонические компоненты катодного тока клистрода при произвольной форме импульсов тока.*

I.B. Yakovleva, D.A. Vatrushkin, D.A. Salnikova, A.V. Skorobogatova

## THE HARMONIOUS ANALYSIS OF PULSES OF THE CATHODIC CURRENT IN KLYSTROD

*The algorithm of calculation and the description of the program of the numerical harmonious analysis, allowing to find harmonious components of a klystrode cathodic current at the any form of pulses of a current are presented.*

Клистрод относится к СВЧ приборам гибридного типа и может быть использован как мощный источник СВЧ энергии. Характерная особенность конструкции прибора в том, что его катод расположен непосредственно в области действия переменного электрического поля. В режиме с отсечкой тока образуются сгустки с высокими значениями амплитуд гармоник тока, что без дополнительной группировки дает высокие значения КПД [1].

Проведем гармонический анализ импульсов катодного тока в клистроде. Гармонический анализ определяет процесс разложения периодической функции на отдельные гармоники. Определение спектральных составляющих тока играет важную роль для оценки КПД прибора.

Результаты подобного анализа известны для случая изменения импульса тока по закону косинуса [2].

Разработанная на Delphi программа гармонического анализа позволяет находить гармонические компоненты катодного тока при произвольной форме импульсов тока.

Чтобы найти спектр последовательности импульсов тока  $i(t)$ , следующих с периодом  $T = 2\pi / \Omega$ , где  $\Omega$  – круговая частота, разложим  $i(t)$  как периодическую функцию в ряд Фурье [3]:

$$i(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \dot{i}_n e^{jn\Omega t}, \quad (1)$$

где

$$\dot{i}_n = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i(t) e^{-jn\Omega t} d(\Omega t) \quad (2)$$

– комплексная амплитуда.

Амплитуды и фазы гармоник тока определяются как

$$|i_n| = \sqrt{(\operatorname{Re} i_n)^2 + (\operatorname{Im} i_n)^2}, \quad (3)$$

$$\varphi_n = \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Im} i_n}{\operatorname{Re} i_n}. \quad (4)$$

Таким образом, для нахождения амплитуд гармоник тока необходимо знать зависимость  $i(t)$ , которая задается табличным способом.

Из известных методов спектрального анализа (дискретное, быстрое преобразования Фурье) был выбран полуаналитический метод Файлона, который обеспечивает высокую точность вычислений при малых затратах машинного времени.

Метод Файлона [4] представляет собой разновидность метода Симпсона и позволяет вычислять интегралы вида

$$\int_a^b f(t) \cos ktdt \quad \int_a^b f(t) \sin ktdt \quad (5)$$

Отрезок  $[ab]$  разбивается на чётное число интервалов  $2N$ , и на каждом двойном интервале функция  $f(t)$ , как и в методе Симпсона, аппроксимируется полиномом 2-го порядка. После этого интегралы (5) берутся аналитически. Расчётные формулы метода Файлона приведены в [4]:

$$\int_a^b f(t) \cos ktdt = h\{\alpha[f(b) \sin kb - f(a) \sin ka] + \beta C_{2N} + \gamma C_{2N-1}\},$$

$$\int_a^b f(t) \sin ktdt = h\{-\alpha[f(b) \cos kb - f(a) \cos ka] + \beta S_{2N} + \gamma S_{2N-1}\},$$

где

$$\alpha = \frac{\theta^2 + \theta \sin \theta \cos \theta - 2 \sin^2 \theta}{\theta^3},$$

$$\beta = \frac{2[\theta(1 + \cos^2 \theta) - 2 \sin \theta \cos \theta]}{\theta^3},$$

$$\gamma = \frac{4(\sin \theta - \theta \cos \theta)}{\theta^3};$$

$$\theta = kh; \quad h = \frac{b-a}{2N};$$

$$C_{2N} = \frac{1}{2} f(a) \cos ka + f(a+2h) \cos k(a+2h) + f(a+4h) \cos k(a+4h) + \dots + \frac{1}{2} f(b) \cos kb.$$

$$C_{2N-1} = f(a+h) \cos k(a+h) + f(a+3h) \cos k(a+3h) + \dots + f(b-h) \cos k(b-h).$$

$$S_{2N} = \frac{1}{2} f(a) \sin ka + f(a+2h) \sin k(a+2h) + f(a+4h) \sin k(a+4h) + \dots + \frac{1}{2} f(b) \sin kb.$$

$$S_{2N-1} = f(a+h) \sin k(a+h) + f(a+3h) \sin k(a+3h) + \dots + f(b-h) \sin k(b-h).$$

Для применения метода Файлона интеграл (2) преобразуем к виду

$$\operatorname{Re} i_n = \int_0^{2\pi} i(t) \cos n\Omega t d(\Omega t),$$

$$\operatorname{Im} i_n = -\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i(t) \sin n\Omega t d(\Omega t).$$

Погрешность вычисления спектра по данной методике определяется только точностью аппроксимации полиномами 2-го порядка на двойном интервале разбиения закона  $i(t)$ , поскольку сами интегралы берутся аналитически. Выбирая количество интервалов разбиения, можно добиться необходимой точности вычислений.

При формировании задания на расчет пользователем в форме импульса тока выделяются характерные временные участки, соответствующие особенностям импульса. Количество этих участков и их временные координаты задаются в программе. В свою очередь, каждый из характерных участков разбивается на четное число временных интервалов.

Закон изменения тока задается его значениями в узлах интерполяции.

В окне *ввода параметров* вводятся следующие величины:

- круговая частота, ГГц;
- количество характерных участков (максимальное значение 10) в форме импульса тока;
- количество интервалов интерполяции на каждом из характерных участков (максимальное значение 10, всегда четное);
- значения текущего времени в узлах интерполяции, мкс;
- значения тока в узлах интерполяции.

После задания всех параметров пользователь нажимает кнопку «Расчет», после чего начинается процесс вычисления выходных параметров. По его окончании в отдельном окне выводятся таблицы с результатами расчета.

*Выходными данными программы* являются параметры гармоник: номер, частота, амплитуда, относительная амплитуда (в виде некоторой доли от максимального значения импульса) для каждой составляющей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Оценка современного состояния мощных электровакуумных СВЧ приборов для применения в электроэнергетике / В.А. Царев, И.Б. Яковлева, Д.А. Сальникова, Р.Ю. Кузнецов // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2006. №4(19). С.72-84.
2. Расчет и проектирование клистродного усилителя мощных электромагнитных колебаний: методические указания / сост: В. А.Царёв, М. В.Майорова. Саратов: СГТУ, 1999. 28 с.
3. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы / И.С.Гоноровский. М.: Радио и связь, 1986. 512 с.
4. Хемминг Р.В. Численные методы для научных работников и инженеров / Р.В. Хемминг; пер. с англ. 2-е изд., испр. М.: Наука, 1972. 400 с.

### **Яковлева Ирина Борисовна –**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронные приборы и устройства» Саратовского государственного технического университета

### **Ватрушкин Дмитрий Александрович –**

студент IV курса специальности ЭПУ кафедры «Электронные приборы и устройства» Саратовского государственного технического университета

### **Сальникова Дина Анатольевна –**

аспирант кафедры «Электронные приборы и устройства» Саратовского государственного технического университета

**Скоробогатова Анастасия Владимировна** –  
студент IV курса специальности ЭПУ кафедры «Электронные приборы и устройства»  
Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 26 октября 2007г., принята к опубликованию 2 ноября 2007г.*

УДК 621.365.5

С. К. Слепцова, В.А. Лаврентьев

### **МОДИФИКАЦИЯ ВОЛОКНИСТОГО ПОЛИКАПРОАМИДА В СВЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ**

*В статье представляются результаты экспериментальных исследований прочностных характеристик волокнистого поликапроамида (ПКА) в СВЧ электромагнитном поле.*

S.K. Sleptsova, V.A. Lavrentiev

### **MODIFICATION OF POLYCAPROAMID IN THE ELECTROMAGNETIC FIELD OF SHF**

*This article is present the results of experimental researches of the strength characteristics of stringy polycaproamide in the electromagnetic field of SHF.*

Среди перспективных методов модификации химических волокон находятся нетрадиционные способы физико-химической активации электромагнитными излучениями ИК, УФ, ВЧ и СВЧ диапазонов, магнитным полем, низкотемпературной плазмой [1]. Метод электрофизической модификации химических волокон в СВЧ электромагнитном поле [2] заключается в нетепловой обработке нитей на стадии доотделочного производства, тогда как существующие методы электрофизической модификации всегда носят тепловой характер.

Под нетепловым действием СВЧ электромагнитных колебаний следует понимать кратковременную обработку объекта в СВЧ электромагнитном поле при фиксированном постоянном уровне мощности, когда его температура остается практически постоянной.

Объектом исследования являлись профилированные поликапроамидные (ПКА) нити круглого сечения. СВЧ воздействие электромагнитных колебаний на объект осуществлялось на установке для исследования модифицирующего СВЧ и теплового воздействия на исследуемые объекты [3] при генерируемой мощности от 100 до 200 Вт.

Исследовано влияние времени СВЧ ( $\tau_{СВЧ}$ ) обработки ПКА нитей на их физико-механические свойства.

Установлено увеличение фактической линейной плотности  $T_{\phi}$  (г/м) обработанных в СВЧ поле ПКА при разной мощности на 2,5-13,9 %, по сравнению с исходными, необлученными волокнами. Линейная плотность нитей прямо пропорциональна их площади поперечного сечения (то есть чем больше числовое значение линейной плотности, тем толще нити

[4]) и определяется

$$T = \frac{1000m}{l}, \quad (1)$$

где  $m$  – масса нитей (г),  $l$  – длина нитей (м).

Следует отметить, что эффект наблюдается при кратковременном СВЧ воздействии в 6-15 с. Этот факт свидетельствует о нетепловой природе влияния СВЧ электромагнитных колебаний на полимерную структуру поликапроамидного волокна.

Результаты исследований показали уменьшение удельной относительной разрывной нагрузки ( $P_{уд}$ ) (2) [4], обработанных в СВЧ поле ПКА нитей на 2,7-10 % по сравнению с исходными, необлученными волокнами

$$P_{уд} = \frac{P_{\phi}}{T}, \quad (2)$$

где  $P_{\phi}$  – фактическая разрывная нагрузка одиночных нитей (сН).

Все волокна при растяжении дают остаточное удлинение, по крайней мере, часть которого обратима во времени (высокоэластическая деформация<sup>1</sup>). Волокно, имеющее полностью обратимое во времени остаточное удлинение, является высокоэластичным, но не абсолютно упругим. Полиамидные волокна обладают почти полной обратимостью деформации даже после очень больших нагрузок. Необратимая деформация у них очень невелика, за исключением случаев весьма больших нагрузок и высоких температур; обычно принимается, что эта пластическая деформация собственно является эластической, но с малой скоростью исчезновения [5].

В процессе нетепловой СВЧ обработки установлено увеличение относительного разрывного удлинения ( $\varepsilon_p$ ) на 4,8-25 %, что свидетельствует об увеличении эластичности волокна.

Также исследования проводились на разрывную характеристику облученного поликапроамида при термическом нагреве. Результаты показали, что у облученного поликапроамида при температуре нагрева  $T=195-197$  °С время разрыва  $t_{разр.}$  варьировалось от 149 до 720 с и выше, что в 2,5-12 раз больше по сравнению с исходными, необлученными нитями (рис.1).

Исследования влияния различной ориентации ПКА волокон в СВЧ рабочей камере показывают, что при расположении образца вдоль вектора напряженности электрического поля  $\vec{E}$  в процессе обработки при 8-15 с наблюдается большее увеличение времени разрыва ПКА волокон, чем при расположении перпендикулярно напряженности электрического поля  $\vec{E}$ . Этот факт доказывает влияние напряженности электрического поля электромагнитной волны на модификацию свойств волокнистого полимера (рис.2).

<sup>1</sup> Поскольку величина высокоэластической деформации у волокон обычно невелика, её часто называют просто эластической деформацией [5].

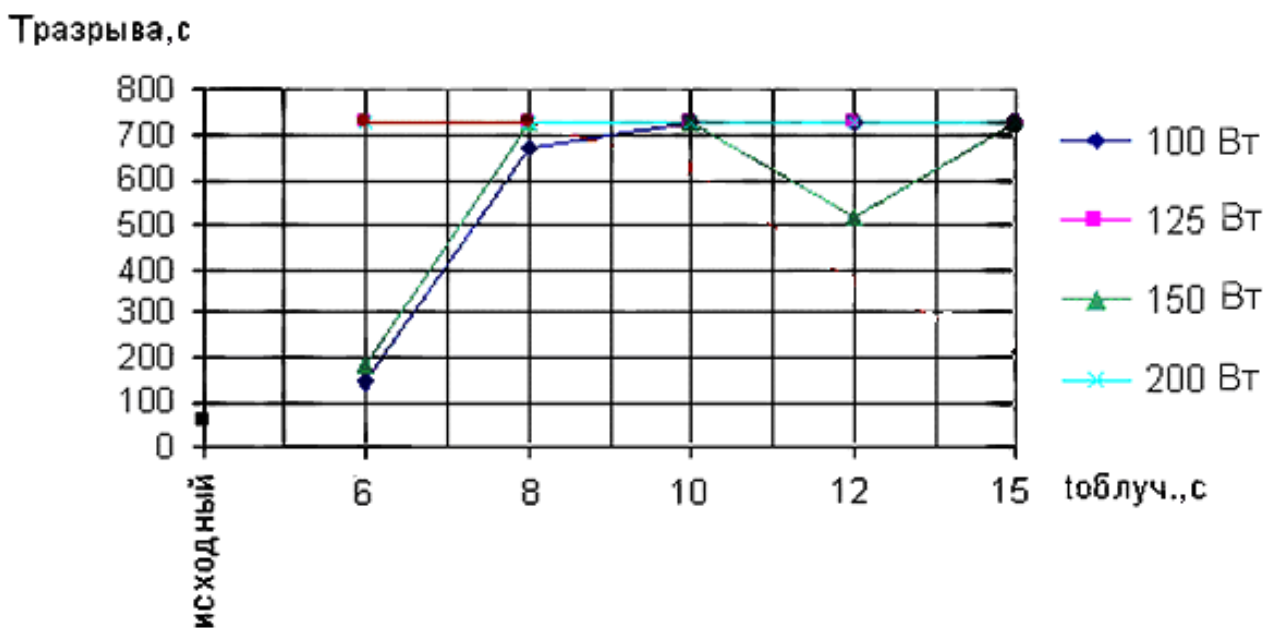


Рис.1. График зависимости времени разрыва T от времени облучения t при термическом нагреве для генерируемой мощности 100, 125, 150, 200 Вт

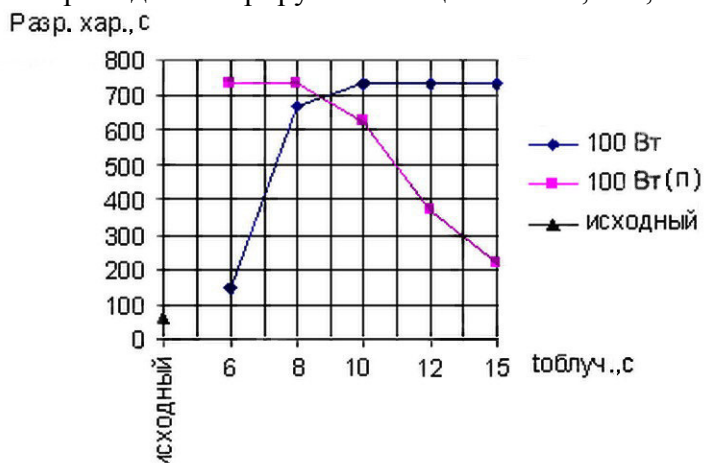


Рис.2. Влияние различной ориентации ПКА волокон в СВЧ рабочей камере на разрывную характеристику:

- а – при расположении образца вдоль вектора напряженности электрического поля  $\vec{E}$ ,
- б – перпендикулярно напряженности электрического поля  $\vec{E}$

### Вывод

Установлено наличие нетеплового модифицирующего воздействия СВЧ электромагнитных колебаний на волокнистый поликапроамид.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Никифоров А.Л. Применение токов высокой частоты в текстильном производстве / А.Л. Никифоров, Б.Н. Мельников // Техника и технология. 2001, № 5. С. 27-30.

2. Калганова С.Г. Влияние СВЧ электромагнитных колебаний на свойства поликапроамидных нитей / С.Г. Калганова, М.Ю. Морозова, С.К. Слепцова // Электромеханика, электротехнологии и электроматериаловедение. МКЭЭЭ-2003: труды 5-й Междунар. науч. конф. Ч.1. Алушта, 2003. С. 62-66.

3. Калганова С.Г. Установка для исследования модифицирующего СВЧ и теплового воздействия на исследуемые объекты / С.Г. Калганова, В.А.Лаврентьев, С.К. Слепцова // Элементы и устройства систем низких и сверхвысоких частот: межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ, 2004. С.33-36.

4. Лабораторный практикум по материаловедению швейного производства: учеб. пособие для высш. учеб. заведений легкой пром-ти / Б.А. Бузов, Н.Н. Пожидаев, Т.А. Модестова и др.; под общ. ред. Б.А. Бузова. 3-е изд., испр., доп. М.: Легкая индустрия, 1979. 360 с.

5. Кудрявцев Г.И. Полиамидные волокна / Г.И. Кудрявцев, М.П. Носов, А.В. Волохина. М.: Химия, 1976.

**Слепцова Салима Курмангалиевна** –

соискатель кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета.

**Лаврентьев Владимир Александрович** –

ассистент кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета.

*Статья поступила в редакцию 26 октября 2007г., принята к опубликованию 2 ноября 2007г.*  
УДК 621.314.2

С.Ф. Степанов, В.В. Курдя

### **РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ АВТОНОМНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ДЛЯ МОБИЛЬНЫХ СВЧ УСТАНОВОК**

*Рассмотрены некоторые вопросы повышения эффективности процесса генерирования электроэнергии автономными источниками для мобильных СВЧ установок.*

S.F. Stepanov, V.V. Kurdia

### **ELABORATION ENERGOEFFECTIVE AUTONOMOUS SOURCES OF ELECTROSUPPLIES FOR MOBILE MICROWAVES OF DEVICES**

*The article describes the considerably increases the efficiency of a generation of the electric power by autonomous sources for mobile microwave of devices.*

Внедрение СВЧ-электроники в различные сферы деятельности человека является одним из бурно развивающихся направлений современной электротехники. Специалисты говорят о формировании особой области в энергетике страны – СВЧ-энергетики.

Основные преимущества СВЧ-энергетики, к числу которых относятся: большая гибкость, с которой СВЧ-энергия трансформируется в другие виды энергии, возможность сосредоточения большой электромагнитной энергии в малых объемах и возможности её кон-



центрации в нужном месте, являются основой разработки новых энергосберегающих технологий.

Уже сегодня СВЧ-энергетика играет существенную роль как в быту, так и в различных отраслях народного хозяйства, связанных с обработкой пищевых продуктов и пластмасс, сушкой продуктов сельского хозяйства и древесины, затвердеванием и раскалыванием бетона и многих других применениях. Это позволяет в значительной степени снизить энергопотребление в этих технологиях.

Величина энергозатрат на выработку единицы конечного продукта является одним из важнейших показателей эффективности любого технологического процесса. К сожалению, по этому параметру Россия сильно отстаёт от передовых промышленных стран, и поэтому проблема энергосбережения является одной из важнейших проблем энергетики страны.

По своей сути СВЧ-энергетика относится к числу энергосберегающих и поэтому её широкое внедрение будет способствовать уменьшению энергозатрат на единицу конечного продукта в различных технологических процессах.

При этом не следует забывать, что для уменьшения общих энергозатрат при выпуске какого-либо продукта следует стремиться к снижению энергозатрат во всех агрегатах электротехнического комплекса и на всех этапах технологического процесса.

Для современного периода развития СВЧ-энергетики характерно появление мобильных СВЧ установок различного применения значительной мощности в десятки и сотни киловатт, например: установки глубокого обезвоживания и обессоливания нефти с производительностью 50 (500,1500) м<sup>3</sup> обрабатываемой нефти в сутки на основе комплексной технологии, включающей использование энергии микроволновых полей, мобильные СВЧ установки очистки нефтяных «озёр» и нефтяных «амбаров» с переработкой их содержимого в товарную нефть и мазут, установки предпосевной обработки почвы в сельском хозяйстве и ряд других установок. Все эти установки в отличие от стационарных установок имеют автономные источники электропитания (дизель-генераторные автономные электростанции), позволяющие им работать в местах без централизованного электроснабжения.

В связи с возрастающим объемом применения автономных источников питания и ростом их мощности, все чаще встает вопрос об их эффективности по сравнению с централизованными энергосистемами. В перечне современных требований, предъявляемых к автономным электростанциям, работающим в составе мобильных технологических установок, выделяют два основных момента. Во-первых, автономная электростанция должна вырабатывать электроэнергию с параметрами, отвечающими требованиям ГОСТ по качеству генерируемой электроэнергии. Во-вторых, автономная электростанция должна вырабатывать электроэнергию при минимальном расходе первичного топлива.

Вопросы качества электроэнергии применительно к автономным электростанциям не являются новыми. Новым является то, что специалисты теперь пытаются решать эти проблемы системно.

Имеются четыре главные причины, связанные с современным взглядом на проблемы генерируемой электроэнергии.

1. В настоящее время в связи с появлением различного нового оборудования изменился состав электропотребителей. Множество новых потребителей оказалось очень чувствительным к снижению качества электроэнергии.

2. Возрастающее внимание к КПД энергогенерирующего оборудования и эффективности использования национальных энергоресурсов требует создания высокоэффективного оборудования.

3. Многие приборы и установки сегодня объединены в локальные сети. Интегрированные процессы в них таковы, что отказ любой компоненты приводит к важным последствиям для многих потребителей.

4. Энергопотребители становятся более информированными о негативных явлениях электроснабжения и требуют улучшить качество поставляемой энергии.

Качество поставляемой потребителям электроэнергии и надёжность электроснабжения неразрывно связаны с другой чрезвычайно важной задачей, а именно задачей эффективного использования национальных энергоресурсов, в частности для производства электроэнергии.

Особенностью же российской энергетики настоящего периода является низкий коэффициент использования различных видов топлива по сравнению с развитыми в техническом отношении странами. Это в определённой степени относится и к использованию дизельного топлива и газа при производстве электроэнергии на автономных электростанциях.

Кроме того, существующие дизель-генераторные автономные электростанции малой мощности обладают целым рядом недостатков. Это низкая стабильность выходного напряжения по величине и частоте при изменении параметров нагрузки, а также большой расход горючего при работе в режимах отличных от номинального, что напрямую влияет на величину энергозатрат на выработку единицы конечного продукта.

Анализируя графики потребления электроэнергии для различных нагрузок, можно сделать следующие выводы. Потребление электроэнергии во многих технологических процессах имеет явно выраженный неравномерный характер. Продолжительность максимальной нагрузки в течение смены работы установки не превышает 10 %. Остальной период времени автономная электростанция работает с коэффициентом загрузки  $K_3 = 0,35 - 0,5$ .

Для группы приемников, состоящей из подгрупп приемников с разными режимами работы, средневзвешенные коэффициенты использования активной и реактивной мощности  $K_{u,a,c}$ ,  $K_{u,p,c}$  определяются с достаточным для практических расчетов приближением по формулам:

$$K_{u,a,c} = \frac{\sum_1^n P_{см}}{\sum_1^n P_{ном}}, \quad K_{u,p,c} = \frac{\sum_1^n k_{u,p} P_{ном}}{\sum_1^n P_{ном}}, \quad (1)$$

где  $n$  – число подгрупп приемников с разными режимами работы, входящих в данную группу;  $P_{см}$  – средняя мощность подгруппы;  $P_{ном}$  – номинальная мощность подгруппы приемников;  $k_{u,p}$  – средневзвешенные коэффициенты реактивной мощности подгрупп приемников.

При этом следует учитывать, что для обеспечения работы электростанции в наиболее щадящих режимах и экономии ее ресурса проектировщики выбирают номинальную мощность электростанции с таким расчетом, чтобы она превышала суммарную электрическую мощность потребителей не менее чем на 20-30%.

Это позволяет:

- исключить возможность продолжительного функционирования электростанции на предельных режимах, когда интенсивно расходуется ресурс ее работы;
- иметь возможность подключения не предусмотренных ранее потребителей электроэнергии без приобретения дополнительных ее источников;
- электростанции легче справиться с пусковыми токами мощных потребителей.

Электрическая мощность потребителя в режиме его включения или запуска обычно не указывается в технических паспортах электротоваров, но в сети автономной электростанции режимы запуска этих потребителей необходимо учитывать.

Для автономной электростанции это означает только одно: режим работы с точки зрения удельного расхода топлива является неоптимальным. В среднем удельный расход топлива при загрузке дизеля менее 50% увеличивается на 15-25 % по сравнению с работой электростанции при нагрузке, равной номинальной.

Для иллюстрации сказанного рассмотрим более подробно режимы работы двигателя внутреннего сгорания (ДВС).

Технико-экономические показатели работы первичных ДВС автономных электростанций, как правило, оценивают по характеристикам, получаемым при стендовых испытаниях.

Классификация характеристик определяется назначением и показателями, положенными в основу их получения. Различают, например, типовые, специальные и другие характеристики.

Типовые характеристики ДВС представляют собой графическое изображение закономерностей изменения показателей двигателя от частоты вращения коленчатого вала.

К типовым характеристикам относят: скоростные (внешние и частичные), нагрузочные, регуляторные, внутренних потерь и холостого хода.

Нагрузочные характеристики представляют собой графическое изображение закономерностей изменения ряда параметров двигателя в зависимости от изменения нагрузки при заданной постоянной частоте вращения коленчатого вала. В качестве независимого переменного параметра ГОСТы рекомендуют в этом случае принимать мощность, развиваемую двигателем.

Для этого должна быть решена задача выработки таких входных управляющих воздействий, при которых обеспечивается работа двигателя с минимально возможным расходом топлива при всех скоростных и нагрузочных режимах работы.

На графиках [1] удельного расхода видно, что они имеют нелинейный характер с явно выраженным минимумом, причём с уменьшением цикловой подачи топлива минимум удельного расхода топлива на соответствующей характеристике смещается в сторону более низких оборотов.

Для снижения показателей удельного расхода топлива при переменной нагрузке необходимо с изменением нагрузки менять и величину оборотов двигателя. При реализации данного скоростного режима работы ДВС обеспечение требуемых параметров качества электроэнергии (по частоте и стабильности напряжения), возможно, реализовать только в том случае, если в составе автономной электростанции есть преобразователь частоты (ПЧ).

В этом случае постоянство частоты генерируемого напряжения будет определяться стабильностью работы задающего генератора преобразователя частоты. В качестве задающего генератора в ПЧ используется кварцевый генератор, стабильность которого чрезвычайно высока, поэтому каких-либо проблем со стабильностью частоты при данной реализации схемы автономного источника электроснабжения не возникает.

Постоянство генерируемого напряжения при скачкообразных изменениях нагрузки обеспечивается работой электронных устройств управления преобразователя частоты. Так как в этих устройствах нет электромеханических элементов с большой инерционностью, то скорость отработки возмущающих воздействий получается максимально высокой.

Применение в автономных электростанциях устройств силовой преобразовательной техники позволяет эффективно решать не только проблемы электротехнического плана, но и проблемы энерго- и ресурсосбережения, хотя это и связано с дополнительными затратами.

Принимая во внимание вышеизложенное, можно констатировать, что разработка и создание высокоэффективных, надёжных, полностью автоматизированных, с минимальными массогабаритными параметрами электрогенерирующих агрегатов, а также аварийных, резервных и передвижных автономных электростанций с бензиновыми, дизельными и газовыми

ми ДВС, с широким использованием современной силовой преобразовательной техники, микропроцессорных систем управления и защиты является актуальной задачей.

Основные предлагаемые пути решения поставленной задачи:

- изменение структуры автономной электростанции (введение новых блоков – преобразователей частоты, создание новых структурных связей в системе управления ДВС);
- изменение функционального назначения основного силового агрегата (ДВС не отвечает за стабильность частоты генерируемого напряжения);
- обеспечение основного параметра генерируемого напряжения – частоты, не за счёт стабилизации скорости вращения ДВС, а средствами электроники ПЧ.
- использование высокоскоростных двигателей и генераторов для генерирования электроэнергии;
- отказ от использования первичного двигателя в качестве частотоопределяющего органа для системы электроснабжения;
- получение электроэнергии стандартной частоты и заданного качества за счет применения ПЧ.

Из всего многообразия существующих схем ПЧ для применения в автономных электростанциях найдут применение только те, которые могут выдавать электроэнергию заданного качества. При этом одним из важнейших параметров качества преобразованной электроэнергии является синусоидальность выходного напряжения. Для построения преобразователей частоты с синусоидальной кривой выходного напряжения был сформулирован принцип построения  $n$ -мостовых  $s$ -фазных бестрансформаторных схем многоуровневых инверторов тока. Принцип заключается в построении структурно-симметричной схемы многомостового инвертора тока, представляющего собой многоуровневую «пирамиду».

В качестве базовой ячейки схемы выбрана одномостовая тиристорная схема с шестиэлементной конденсаторной батареей, соединенной в кольцо (рис. 1).

Эта схема обладает свойствами, аналогичными свойствам параллельно-последовательного инвертора. Однако ей присущи и существенные отличия, заключающиеся в том, что конденсаторная батарея выполняет две функции. Во-первых, является коммутирующей. Во-вторых, выполняет роль фазосдвигающего устройства. В-третьих, при коротком замыкании нагрузки все конденсаторы остаются в работе.

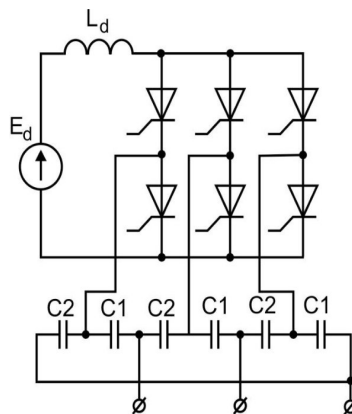


Рис. 1. Схема исходного модуля

Назовем данную схему исходным модулем, а батарею конденсаторов – фазосдвигающим конденсаторным блоком (ФСКБ). Выражения для определения действующих значений фазного тока  $I_1$  и напряжения на выводах переменного тока тиристорного моста  $U_1$ , а также напряжения на нагрузке  $U_2$ , полученные методом основной гармоники, имеют вид

$$J1 = \frac{\pi \cdot Ud}{3\sqrt{6} \operatorname{Re} \left( \frac{(B1 + B2 + YH)}{(3 \cdot B1 \cdot B2 + B1 \cdot YH + B2 \cdot YH)} \right)}; \quad (2)$$

$$U1 = (1/18 \pi \sqrt{6} Ud) \sqrt{1 - \left[ \frac{d \cdot d1 - y \cos(\varphi) \cdot d2}{y \cos(\varphi) \cdot d1 + d \cdot d2} \right]^2}; \quad (3)$$

$$U2 = \frac{\pi U_d}{3\sqrt{6} (y \cos(\varphi) d1 + d \cdot d2)} \sqrt{(d6 \cdot d2 - d1 \cdot \omega \cdot C1)^2 + (d6 \cdot d1 + \omega \cdot d2 \cdot C1)^2}, \quad (4)$$

где  $B1 = I \cdot \omega \cdot C1$ ;  $B2 = I \cdot \omega \cdot C2$ ;  $YH = y \cdot \cos(\varphi) - y \cdot I \cdot \sin(\varphi)$ ;  $a = -1/2 + \sqrt{3/2} \cdot I$ ;

$$d = (\omega \cdot C1 + \omega \cdot C2 - y \cdot \sin(\varphi));$$

$$d1 = (3 \cdot \omega^2 \cdot C1 \cdot C2 - \omega \cdot C1 \cdot y \cdot \sin(\varphi) - \omega \cdot C2 \cdot y \cdot \sin(\varphi));$$

$$d2 = (-\omega \cdot C1 \cdot y \cdot \cos(\varphi) - \omega \cdot C2 \cdot y \cdot \cos(\varphi)); \quad d3 = y \cdot \cos(\varphi) \cdot d1 / d4;$$

$$d4 = (d1^2 + d2^2); \quad d6 = (\omega \cdot C2 - 1/2 \cdot \omega \cdot C1).$$

Угол запитания тиристорных инверторного моста находится из выражения:

$$\operatorname{tg}(\varepsilon) = \frac{d \cdot \pi \cdot Ud \cdot d1 / ((d3 + d \cdot d2 / d4) \cdot d4) - y \cdot \cos(\varphi) \cdot \pi \cdot Ud \cdot d2 / ((d3 + d \cdot d2 / d4) \cdot d4)}{y \cdot \cos(\varphi) \cdot \pi \cdot Ud \cdot d1 / ((d3 + d \cdot d2 / d4) \cdot d4) + d \cdot \pi \cdot Ud \cdot d2 / ((d3 + d \cdot d2 / d4) \cdot d4)} \quad (5)$$

Одним из параметров фазосдвигающих конденсаторных блоков является отношение составляющих емкостей  $X = C1 / C2$ . Данное отношение определяет величину фазового сдвига между напряжением на нагрузке и напряжением на выходных выводах тиристорного моста.

При  $X \neq 1$  два модуля с взаимно-обратными значениями  $X$  можно объединить на зажимах нагрузки только в том случае, если фазные напряжения на зажимах первого моста равны по величине и фазе соответствующим напряжениям и фазе второго моста. Добиться этого можно, вводя угол фазового рассогласования  $\varepsilon$  между тиристорными мостами. Выражение, связывающее параметры  $X$  и  $\varepsilon$ , при котором обеспечивается равномерная загрузка тиристорных мостов, имеет вид (6):

$$X = \frac{-\operatorname{tg}(\varepsilon / 2) + \sqrt{3}}{\operatorname{tg}(\varepsilon / 2) + \sqrt{3}}. \quad (6)$$

В многомостовых схемах соответствующим выбором  $\varepsilon$  и  $X$  можно влиять на формирование желательного гармонического состава выходного напряжения. Анализ разработанных схем показывает, что для двухмостовой схемы при  $\varepsilon = 30, 90, 150, 210, 270, 330$  эл. град. (и соответствующем выборе  $X$ ) происходит полная компенсация 5-й и 7-й гармоник. Причем для углов 30, 150 и 270 эл. град. значение  $X = \sqrt{3} - 1$ , а для углов 90, 210, 330 эл. град.

$$X = (\sqrt{3} - 1) / (1 + \sqrt{3}). \quad (7)$$

Объединение данных модулей с помощью дополнительных ФСКБ в единую схему позволяет создать  $n$ -мостовую  $s$ -фазную бестрансформаторную схему многоуровневого инвертора тока. Структура дополнительных ФСКБ аналогична структуре конденсаторной коммутирующей батареи базовой ячейки.

Структура многоуровневого инвертора тока, представляющего собой  $N$ -мостовую схему с расщепленной конденсаторной батареей, имеет вид пирамиды. В связи с этим принцип построения таких схем был назван «принципом пирамиды».

Вершиной «пирамиды» является нагрузка. Выводы нагрузки соединены с объединенными между собой выходными выводами двух фазосдвигающих конденсаторных блоков (ФСКБ) первого уровня компенсации.

Каждый уровень «пирамиды» (уровень компенсации) содержит четное число ФСКБ.

Входные выводы самого нижнего уровня соединены с выводами переменного тока тиристорных мостов. Количество тиристорных мостов является четным числом и равно количеству ФСКБ нижнего уровня.

Каждый ФСКБ выполнен в виде шестиэлементной конденсаторной батареи, соединенной в кольцо по схеме  $C_1 - C_2 - C_1 - C_2 - C_1 - C_2$ .

На рис. 2 представлена структурная схема восьмимостового инвертора тока, поясняющая принцип объединения исходных модулей (принцип «пирамиды»).

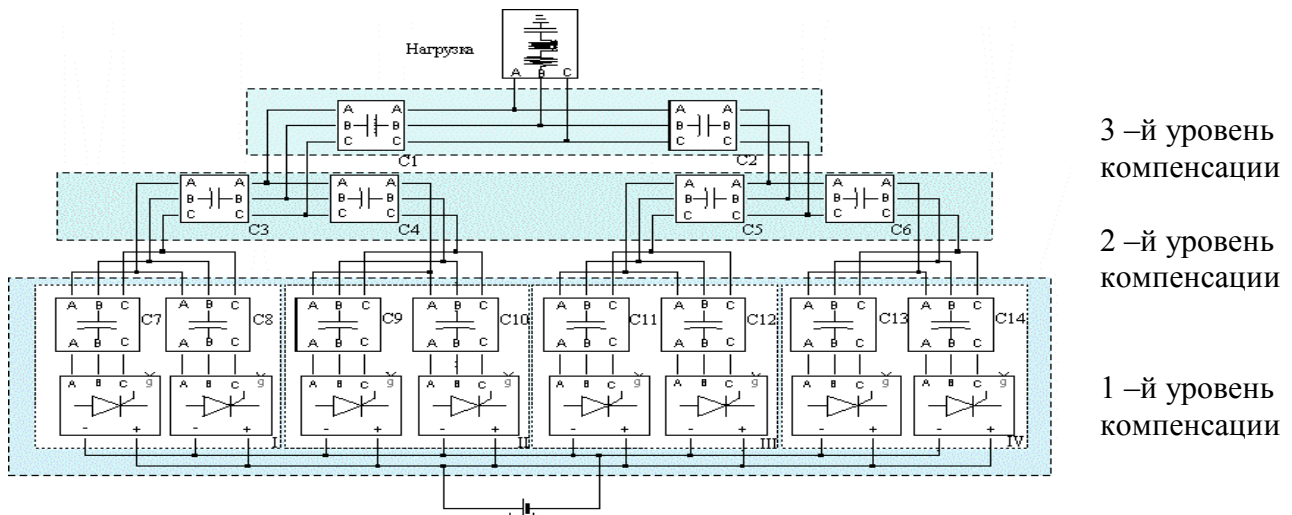


Рис. 2. Структурная схема восьмимостового инвертора тока

Схема содержит восемь тиристорных модулей и четырнадцать конденсаторных блоков и имеет три уровня компенсации высших гармоник. На первом уровне компенсируются 5-я и 7-я гармоники, на втором – 11-я и 13-я, а на третьем – 23-я и 25-я. Первой значащей гармоникой в кривой выходного напряжения является 47-я гармоника.

Отношение составляющих емкостей  $C_{k1}/C_{k2}$  в ФСКБ каждого уровня определяется из выражения

$$X_k = \frac{-\operatorname{tg}(\varepsilon_k / 2) + \sqrt{3}}{\operatorname{tg}(\varepsilon_k / 2) + \sqrt{3}}, \quad (8)$$

где  $k$  – текущий номер уровня компенсации,  $k = 1, 2, 3 \dots N$ ;  $N$  – количество уровней компенсации;  $\varepsilon_k$  – угол сдвига ФСКБ для каждого уровня компенсации.

Выполнение фазосдвигающих блоков в виде шести конденсаторов (индуктивностей), соединенных в замкнутое кольцо, позволяет производить суммирование мощности инверторов тока (напряжения) без суммирующего трансформатора.

Разработанный принцип построения многоуровневых силовых схем, инверторов тока и напряжения на базе  $N$ -мостовых схем без суммирующего трансформатора с улучшенным гармоническим составом выходного напряжения позволяет:

- повысить выходную мощность преобразователя частоты в единице оборудования;
- осуществить режим компенсации высших гармоник в кривой выходного напряжения (в четырехмостовых схемах до 23-й гармоники, в восьмимостовых – до 47-й) без применения выходных фильтров;

- повысить динамические свойства схемы за счет уменьшения времени чистого запаздывания с  $\tau = T_o/6$  - для однофазных схем до  $\tau = T_o/6 \cdot k$  – для многофазных. Здесь  $T_o$  – период основной частоты;  $k$  – количество тиристорных мостов;
- обеспечить работоспособность схемы в аварийных режимах работы: при коротких замыканиях в нагрузке, при выходе из строя отдельных конденсаторов, при пробое тиристора одного из инверторных мостов.

На рис. 3 представлена схема двухуровневого четырехмостового автономного инвертора с компенсаторами выпрямительного типа.

Представленная модель позволяет исследовать переходные, установившиеся и аварийные режимы работы с получением графиков электромагнитных процессов во всех блоках системы. В структуру модели входят: трехфазный источник питания, четыре управляемых выпрямителя с LC фильтрами, подключенные к инверторным мостам 1 - 4. К выходу каждого инвертора подключены тиристорные мосты компенсаторов реактивной мощности, нагруженные на реакторы  $Lk1 - Lk4$ . Это позволяет обеспечить жесткую внешнюю характеристику преобразователя частоты. К выходу преобразователя подключены коммутаторы, позволяющие моделировать наброс и сброс активно-индуктивной нагрузки, пуск асинхронного электродвигателя. Третий коммутатор позволяет моделировать однофазные, двухфазные и трехфазные короткие замыкания в линии электропередач.

Кроме того, в ней предусмотрена возможность подключения до десяти потребителей с любым графиком включения – отключения нагрузки. Нагрузка преобразователя характеризуется величиной сопротивления  $R$  и коэффициентом мощности по основной гармонике  $\cos \varphi$ .

Основными параметрами преобразователя являются углы  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  сдвига между коммутациями одноименных тиристорных инверторных мостов. Угол  $\varepsilon_1$  для мостов M1 и M2 (M3 и M4) и угол  $\varepsilon_2$  для мостов M1 и M3, угол сдвига коммутаций в компенсаторах реактивной мощности относительно коммутаций опережающего инвертора  $\alpha$ , а также величины  $X_1 = C_1/C_2$  и  $X_2 = C_3/C_4$ .

Рис.!!! в отдельном файле



Величины индуктивностей в цепях постоянного тока мостов выбраны достаточно большими, чтобы можно было пренебречь их влиянием.

Результаты моделирования приведены на рис. 6-8. На рис.6 приведено семейство внешних характеристик инвертора, рассчитанных при  $\varepsilon_1 = 30^\circ$ ,  $\varepsilon_2 = 15^\circ$  и  $\cos \varphi = 0,7$ . Каждая из характеристик отвечает некоторому значению угла  $\alpha = 280, 290, 300$  эл. град.

Вид внешних характеристик определяется из внешних характеристик совместно работающих инвертора и компенсатора и является сопряжением двух кривых: участка внешней характеристики самого инвертора в области малых значений  $R_{нагр}$  и практически линейного участка в области больших значений  $R_{нагр}$ . Сопряжения участков имеет место в точке, имеющей тем меньшую ординату и большую абсциссу, чем большее значение  $\alpha$ . Смысл этого очевиден: при большой нагрузке инвертора отсутствует избыток реактивной мощности емкостного характера и индуктивный компенсатор автоматически выключается из работы. При разгрузке преобразователя появляется избыток реактивной мощности, компенсация которой реактивным выпрямителем и приводит к пологому (жесткому) участку внешней характеристики. С изменением угла  $\alpha$  изменяется уровень избыточной реактивной мощности коммутирующей батареи, начиная с которого проявляется «срезающее» действие компенсатора.

На рис. 4-6 представлены графики действующих значений напряжений на конденсаторах С1, С2, С3, С4, линейного напряжения на выводах переменного тока тиристорного моста и фазного напряжения нагрузки. При изменении угла управления компенсатора реактивной мощности с  $280^\circ$  до  $300^\circ$  выходное напряжение увеличивается с 30,9 до 40,2 В при  $U_d$  равном 100 В, что в процентном отношении составляет 30%.

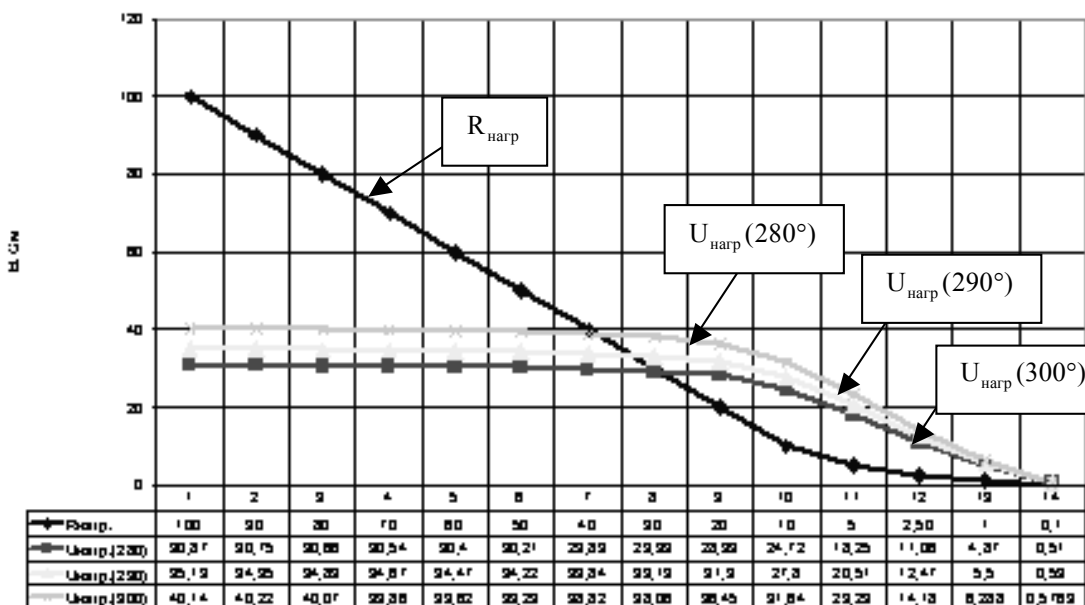


Рис. 4. Внешние характеристики АИТ, рассчитанные при  $\varepsilon_1 = 30^\circ$ ,  $\varepsilon_2 = 15^\circ$  и  $\cos \varphi = 0,7$

Для режима  $\alpha = 280^\circ$  действующее напряжение на выводах переменного тока тиристорного моста изменяется от 85 до 86,8 В при изменении нагрузки от Х.Х до К.З. Так как это напряжение определяет класс используемых тиристоров, то можно сказать, что максимальное напряжение на тиристорах при изменении нагрузки от Х.Х. до К.З. остается практически постоянным и составляет 121 В. Напряжения на конденсаторах на участке стабилиза-

ции выходного напряжения остаются практически постоянными. При переходе в режим больших нагрузок вплоть до режима К.З. напряжения на конденсаторах С2 и С4 начинают увеличиваться а на конденсаторах С1 и С3 уменьшаться. Это говорит о том, что выбор конденсаторов С1 и С3 следует производить по режиму Х.Х., а конденсаторов по режиму К.З.

График мощности передаваемой в нагрузку, имеет явно выраженный максимум. Максимум приходится на начало спада выходной характеристики.

При наличии в схеме двух пар взаимосвязанных конденсаторных пар (С1, С2) и (С3, С) встает вопрос, как будут меняться выходные характеристики при перераспределении емкости между этими парами.

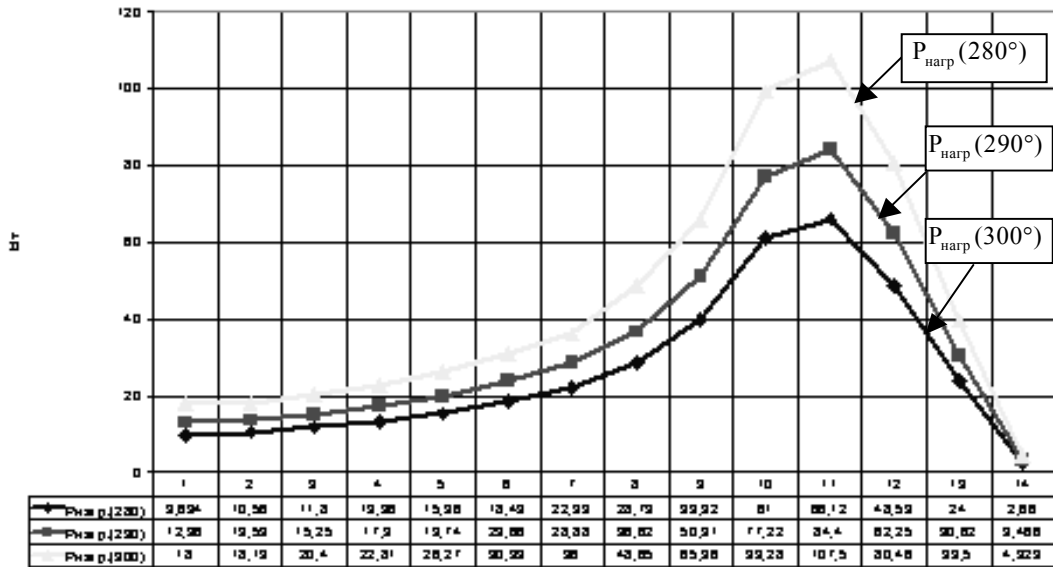


Рис. 5. Графики потребляемой мощности при углах компенсации  $\alpha = 280, 290, 300$  эл. град

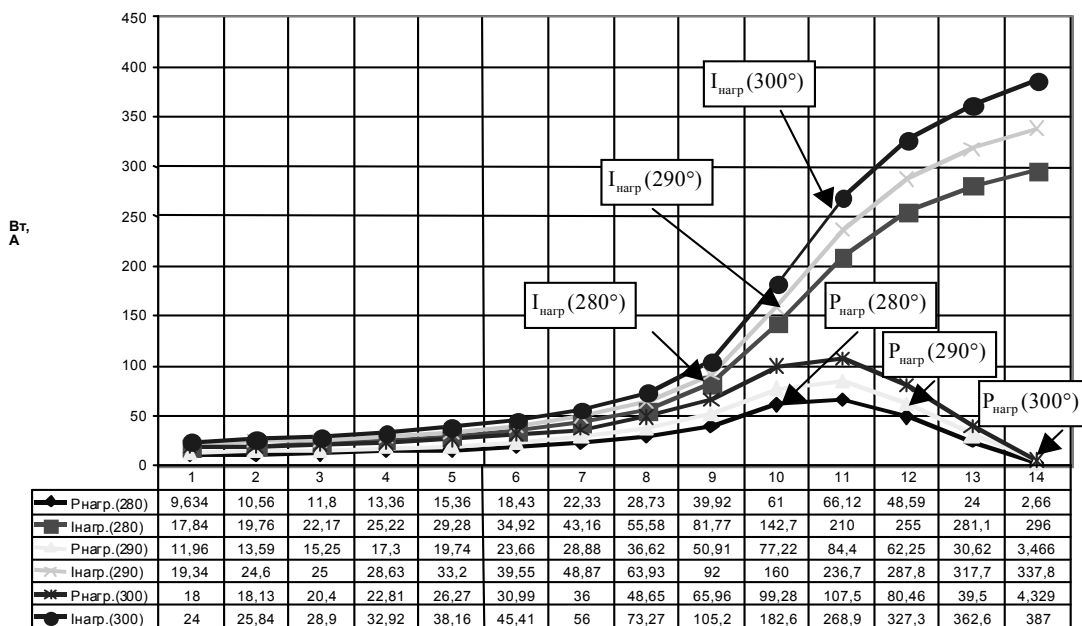


Рис. 6. Графики токов  $I_{нгр}$  и мощности нагрузки  $P_{нгр}$  при  $\alpha = 280, 290, 300$  эл. град

Данная схема позволяет довольно легко реализовать режим работы с токами КЗ, равными трехкратной величине рабочего тока. Это важно при построении систем селективной аварийной защиты потребителей и самого преобразователя.

В качестве входного звена преобразователей частоты широко применяются выпрямители переменного напряжения.

Выполнение выпрямителя по условно многофазной схеме является логичным решением при использовании многомостовой инверторной части преобразователя частоты. В качестве многофазного выпрямителя с улучшенным гармоническим составом потребляемого тока целесообразно использовать схему 24-фазного выпрямителя [3].

Сдерживающим фактором построения автономных источников электроснабжения с применением силовой преобразовательной техники было отсутствие надёжных, экономичных и относительно недорогих преобразователей частоты. За последнее десятилетие силовая электроника достигла значительных успехов в создании высоконадёжных, экономичных преобразователей частоты с прекрасными массогабаритными показателями. При чём стоимость таких преобразователей быстро снижается. Так стоимость одного кВт мощности преобразователя составляет сегодня менее 100 \$, а массогабаритные показатели имеют величину не более одного килограмма и 2 дм<sup>3</sup> на 1 кВт выходной мощности. В стоимостном выражении введение преобразователя частоты в схему автономного источника увеличивает его стоимость не более чем на 7-10 %.

### Вывод

Применение преобразователей частоты с улучшенными выходными характеристиками кривых токов и напряжений в автономных источниках электроснабжения для мобильных СВЧ установок позволит привести к минимуму риск возникновения отказа технологического оборудования, а также к возрастанию КПД энергогенерирующего оборудования и эффективному использованию энергоресурсов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Степанов С.Ф. Некоторые аспекты применения силовой преобразовательной техники в автономных источниках электроснабжения / С.Ф. Степанов // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2004. №4(5). С. 91-95.
2. Степанов С.Ф. Многомостовые преобразователи частоты с конденсаторным суммированием выходных сигналов / С.Ф. Степанов, Н.П. Митяшин, И.И. Артюхов // Вопросы преобразовательной техники и частотного электропривода: межвуз. науч. сб. Саратов: Саратов. политехн. ин-т, 1983. С. 87-92.
3. Степанов С.Ф. Составные многоуровневые инверторы тока на базе  $n$ -мостовых схем с бестрансформаторным суммированием выходной мощности / С.Ф. Степанов, В.В. Курдя, И.И. Артюхова // Актуальные проблемы электронного приборостроения: сб. науч. ст. по материалам Междунар. конф. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2006. С. 463-471.

**Степанов Сергей Федорович** –

доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета

**Курдя Василина Васильевна** –

аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 26 октября 2007г., принята к опубликованию 2 ноября 2007г.*

УДК 621.313.13.004.13

В.Ю. Нейман, Г.Г. Угаров, А.А. Егоров

## ФОРСИРОВАННЫЕ ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ ДЛЯ ИМПУЛЬСНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

*Рассмотрены способы интенсификации рабочих процессов линейных электромагнитных двигателей с учетом влияния начального противодействующего усилия для повышения энергетических и динамических показателей.*

V.U. Nayman, G.G. Ugarov, A.A. Yegorov

## THE FORCED LINEAR ELECTROMAGNETIC ENGINES FOR PULSED TECHNOLOGY

*The analysis of the performance of the pulsed linear electromagnetic engine has been carried out considering influence of initial counteracting effort on power and dynamic parameters for various forced mode of cumulation magnetic energy is considered.*

Одним из путей повышения силовых и энергетических показателей линейных электромагнитных двигателей (ЛЭМД) является интенсификация их рабочих процессов за счет форсированных режимов [1]. В настоящей статье анализируется эффективность этих режимов.

Рассмотрим уравнения баланса сил, действующих на якорь ЛЭМД в период трогания, когда подвижная система находится в состоянии покоя

$$\begin{aligned} [F_{ЭМ}(x) - F_{П}(x)]_{t=t_1} &= 0; \\ m \frac{d^2 x}{dt^2} \Big|_{t=t_1} &= 0, \end{aligned}$$

где  $F_{ЭМ}$ ,  $F_{П}$  – мгновенные значения электромагнитного и противодействующего усилия;  $m$  – масса якоря;  $x$  – текущая координата перемещения.

После начала движения уравнение баланса сил описывается уравнением

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = F_{ЭМ}(x) - F_{П}(x). \quad (1)$$

Механическую работу двигателя за время движения якоря определим из уравнения энергетического баланса

$$A = \int dW_{ЭМ} - \int dW'_{ЭМ} = \Delta W_{ЭМ} - \Delta W'_{ЭМ},$$

где  $W_{ЭМ}$  – электромагнитная энергия;  $W'_{ЭМ}$  – приращение энергии магнитного поля.

Если известны начальное значение тока и потокосцепления в момент трогания ( $i_1$ ,  $\Psi_1$ ) и значения этих же величин в момент окончания движения ( $i_2$ ,  $\Psi_2$ ), то для линейной магнитной системы справедливо:

$$\begin{aligned} d\Psi &= \frac{\Psi_2 - \Psi_1}{i_2 - i_1} di, \\ \Delta W_M &= \int_{i_1}^{i_2} id\Psi = \int_{i_1}^{i_2} \frac{\Psi_2 - \Psi_1}{i_2 - i_1} idi = \frac{1}{2} (\Psi_2 - \Psi_1) \cdot (i_2 - i_1). \end{aligned}$$

При этом  $\Delta W'_{\text{ЭМ}}$  определяется приращением энергии магнитного поля:

$$\Delta W'_{\text{ЭМ}} = \Delta W_M = \frac{\Psi_2 \cdot i_2}{2} - \frac{\Psi_1 \cdot i_1}{2}.$$

В результате интегральная механическая работа за время движения представляется в виде площади магнитного цикла:

$$A = \frac{1}{2}(i_1 \Psi_2 - i_2 \Psi_1). \quad (2)$$

Представим ток и потокосцепление в момент трогания в виде:

$$i_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot F_0 \cdot x_1}{L_1}}, \quad (3)$$

$$\Psi_1 = \sqrt{2 \cdot F_0 \cdot x_1 \cdot L_1}, \quad (4)$$

где  $L_1$  – начальная индуктивность, соответствующая начальному рабочему воздушному зазору  $x_1$ ,  $F_0$  – сила сопротивления движению якоря в момент трогания.

Положим, что сила противодействия изменяется следующим образом:

$$F_{\Pi} = \begin{cases} F_0 \text{ нпу } t \leq t_0 \text{ и } x = x_1; \\ F_{\Pi}(x) \text{ нпу } t \geq t_0 \text{ и } x \leq x_1. \end{cases} \quad (5)$$

Умножая (1) на  $dx$ , с учетом (5) получим уравнение энергетического баланса

$$\int_{V_1}^{V_2} mV dV = \int_{x_1}^{x_2} F_{\text{ЭМ}}(x) dx - \int_{x_1}^{x_2} F_{\Pi}(x) dx, \quad (6)$$

где  $V_1, V_2$  – начальная и конечная скорости движения якоря.

Первый член правой части (6) определяет полезную механическую работу, которую может совершить двигатель при полном согласовании тяговой характеристики с характеристикой противодействующей силы и равен площади, ограниченной этой характеристикой на интервале  $x_1 \dots x_2$  и осью абсцисс, при определенном значении тока:

$$\int_{x_1}^{x_2} F_{\text{ЭМ}}(x) dx = \frac{1}{2}(i_1 \Psi_2 - i_2 \Psi_1). \quad (7)$$

Если перемещение якоря происходит при постоянном токе, тогда при постоянном напряжении питающей сети этот режим будет осуществляться, когда сила сопротивления движению будет почти равна движущей силе. В этом случае под электромагнитной силой  $F_{\text{ЭМ}}(x)$  понимается статическая сила  $F_{\text{СТ}}(x)$  – движущая сила, приблизительно равная статической силе тяги, а кинетическая энергия якоря в конце хода будет равна нулю. Тогда уравнение (6) примет вид

$$\int_{x_1}^{x_2} F_{\text{СТ}}(x) dx = \int_{x_1}^{x_2} F_{\Pi}(x) dx. \quad (8)$$

В этом случае вся энергия магнитного поля превращается в механическую работу и идет на преодоление силы сопротивления движению. Из (8) следует, что, чем больше сила  $F_{\Pi}(x)$ , тем должна быть больше сила  $F_{\text{СТ}}(x)$ .

Если равенство (8) не выполняется, то к концу хода якорь приобретет некоторую скорость  $V_2$ . При этом движущая сила будет равна некоторой динамической силе тяги. В этом случае выражение (6) после интегрирования левой части уравнения можно представить в виде

$$\frac{mV_2^2}{2} - \frac{mV_1^2}{2} = \int_{x_1}^{x_2} F_{\text{ЭМ ДИН}}(x) dx - \int_{x_1}^{x_2} F_{\text{П}}(x) dx .$$

Согласно начальному условию ( $V_1=0$ ), получим

$$\frac{mV_2^2}{2} = \int_{x_1}^{x_2} F_{\text{ЭМ ДИН}}(x) dx - \int_{x_1}^{x_2} F_{\text{П}}(x) dx . \quad (9)$$

После замены первого члена правой части (9), согласно (7) и в результате дальнейших преобразований с учетом (3) и (4) получим

$$\frac{mV_2^2}{2} = \frac{1}{2} \sqrt{2 \cdot F_0 \cdot x_1} \left( \Psi_2 \sqrt{\frac{1}{L_1}} - i_2 \sqrt{L_1} \right) - \int_{x_1}^{x_2} F_{\text{П}}(x) dx . \quad (10)$$

При  $i = \text{const}$ ,  $i_1 = i_2$ ,  $\Psi_2 = L_2 \cdot i_2 = L_2 \cdot i_1$  выражение (10) примет вид

$$\frac{mV_2^2}{2} = (k_M - 1) \cdot F_0 \cdot x_1 - \int_{x_1}^{x_2} F_{\text{П}}(x) dx , \quad (11)$$

где  $k_M = L_2/L_1$ .

Первый член правой части (11) определяет работу электромагнитных сил, совершаемую при переходе якоря из начального положения в конечное. Эта работа затрачивается на преодоление силы сопротивления движению и накопления кинетической энергии. Если принять, что на участке движения якоря от  $x_1$  до  $x_2$   $F_{\text{П}}(x) = 0$ , то вся работа электромагнитных сил идет на сообщение якорю кинетической энергии

$$\frac{mV_2^2}{2} = \int_{x_1}^{x_2} F_{\text{ЭМ ДИН}}(x) dx = (k_M - 1) \cdot F_0 \cdot x_1 . \quad (12)$$

Из (7), (11) и (12) видно, что, чем больше сила сопротивления движению якоря  $F_0$  в момент трогания, тем больше площадь переходной динамической характеристики магнитного цикла, пропорциональная интегральной работе. Следовательно, будет больше энергии, сосредоточенной в объеме машины. Увеличение энергии в конце процесса энергопреобразования связано с увеличением тока трогания и энергии, накопленной в магнитном поле к моменту трогания. Однако при движении якоря сила сопротивления  $F_{\text{П}}(x) = 0$  должна быть минимальной, иначе, согласно (11), энергия удара будет уменьшаться.

Из (12) можно определить конечную скорость якоря:

$$V_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot (k_M - 1) \cdot F_0 \cdot x_1}{m}} . \quad (13)$$

Считая движение якоря равноускоренным, время его движения можно определить так:

$$t_{\text{ДВ}} = \frac{x_1 - x_2}{V_2} = x_1 / \sqrt{\frac{2 \cdot (k_M - 1) \cdot F_0 \cdot x_1}{m}} = \sqrt{\frac{x_1 \cdot m}{2 \cdot (k_M - 1) \cdot F_0}} . \quad (14)$$

Из выражения (14) следует, что при увеличении удерживающего усилия  $F_0$  в момент трогания якоря, время движения его уменьшается, что при той же величине хода обуславливает большую конечную скорость  $V_2$ , и большую кинетическую энергию, развиваемую якорем ЛЭМД.

Выражения (12)...(14) показывают, что удерживающее усилие влияет на рабочие процессы ЛЭМД не только на этапе трогания, но и движения.

Графики нормированной скорости  $V_2^* = V_2 / V_{2\max}$  и времени движения  $t_{\text{ДВ}}^* = 1 - \frac{t_{\text{ДВ}}}{t_{\text{ДВ}\max}}$  при изменении удерживающего усилия приведены на рис. 1. Здесь полагаем  $F_{0\max} = F_0|_{i=i_{\text{уст}}}$  ;  
 $F_{0\max}^* = \frac{F_0}{F_{0\max}}$  ;  $t_{\text{ДВ}\max} = t_{\text{ДВ}}|_{F \rightarrow 0}$  .

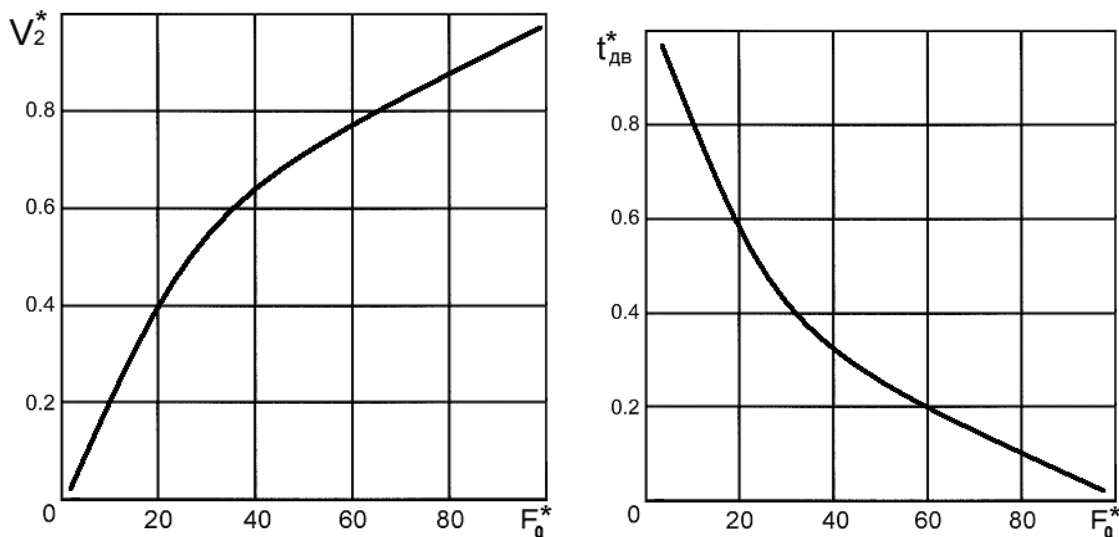


Рис. 12. Графики нормированной скорости и времени движения

Сравним эффективность рассмотренного способа форсировки ЛЭМД в режиме статического индуктивного накопителя электромагнитной энергии и при питании его от источника повышенного напряжения, например, от емкостного накопителя энергии. Для корректности сравнения будем считать, что ЛЭМД в сравниваемых способах имеет одинаковую конфигурацию магнитной цепи, линейные размеры и массу подвижных частей. Примем также, что величины начального воздушного зазора, начальной индуктивности и сопротивления катушек одинаковы. Сравнение будем осуществлять по фиксированному значению начального тягового усилия, которое характеризуется единым равенством для обоих способов форсировки:

$$F_{\text{ЭМ}}(x) = F_0 = \frac{1}{2} i_1^2 \frac{L_1}{x_1} . \tag{15}$$

Из (15) видно, что величина начального тягового усилия определяется противодействующим усилием. Ввиду идентичности сравниваемых ЛЭМД начальное тяговое усилие является только функцией тока. Поэтому сравнение целесообразно выполнить относительно начальных значений токов, обеспечивающих необходимое превышение тягового усилия над противодействующим усилием.

Рассматривая ЛЭМД на границе области трогания, когда его подвижная система находится еще в состоянии покоя, при способе форсировки напряжением имеем

$$i_1 = \frac{U_{\phi}}{r} \left( 1 - e^{-\frac{r}{L_1} t_1} \right) , \tag{16}$$

где  $U_{\phi}$  – форсированное напряжение, приложенное к катушке;  $r$  – активное сопротивление катушки.

Из (16) следует, что при постоянстве противодействующей силы значение тока трогания  $i_l$  будет зависеть только от величины приложенного напряжения.

При способе форсировки за счет искусственного удержания якоря в режиме аккумуляции магнитной энергии получаем

$$i_l|_{F \rightarrow 0} = \frac{U}{r}. \quad (17)$$

В этом случае процесс трогания якоря осуществляется при номинальном значении напряжения и установившемся токе. Данное значение тока трогания может быть достигнуто и при способе форсировки напряжением, но при значении, превышающем номинальное. При условии равенства получаемых токов в сравниваемых способах форсировки, приравнявая (16) и (17), получим

$$\frac{U_\phi}{U} = \frac{1}{1 - e^{-\frac{r}{L_1} t_1}}. \quad (18)$$

Соотношение (18) устанавливает равноценность условий работы в сравниваемых способах форсировки по начальному усилию за счет превышения напряжения источника по отношению к режиму с аккумуляцией магнитной энергии, когда движение якоря осуществляется при установившемся значении тока катушки и номинальном напряжении.

В (18) выражение  $U_\phi/U = K_U$  определяет коэффициент кратности по напряжению. Переходя к безразмерным величинам и нормируя время трогания к постоянной времени  $t^* = t_1 / \tau$ , получим

$$K_U^* = \frac{1}{1 - e^{-t^*}}.$$

График нормированного коэффициента кратности по напряжению сравниваемых способов представлен на рис. 2.

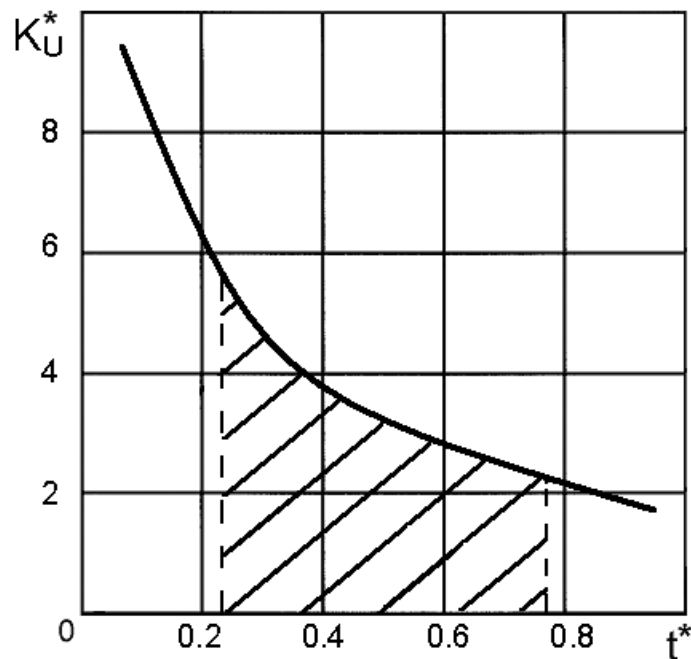


Рис. 2. Графики нормированного коэффициента кратности по напряжению



Соотношение (18) и график на рис. 2 указывает на преимущество использования способа форсировки с аккумулярованием электромагнитной энергии в рабочем цикле по сравнению со способом питания повышенным напряжением. На практике это означает, что в диапазоне изменения постоянной времени реальных ЛЭМД (заштрихованная область на рис. 1) возникает необходимость 2...5 – кратного повышения питающего напряжения по отношению к номинальному для получения сравнимого эффекта.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ряшенцев Н.П. Электромагнитные прессы / Н.П. Ряшенцев, Г.Г. Угаров, А.В. Львицын. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1989. 216 с.

**Нейман Владимир Юрьевич –**

доктор технических наук, заведующий кафедрой «Теоретические основы электротехники» Новосибирского государственного технического университета.

**Угаров Геннадий Григорьевич –**

доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета.

**Егоров Андрей Александрович –**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета.

*Статья поступила в редакцию 26 октября 2007г., принята к опубликованию 2 ноября 2007г.*

УДК 621.314

И.И.Артюхов, А.Г. Сошинов, И.И.Артюхова

#### **ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ УСТАНОВОК СВЧ НАГРЕВА С ИСТОЧНИКАМИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

*Установки СВЧ нагрева являются источниками искажающего влияния на форму питающего напряжения. В работе анализируется это влияние, предлагаются способы и технические средства для его уменьшения.*

I.I. Artjukhov, A.G. Soshinov, I.I. Artjukhova

#### **ENSURING OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF MICROWAVE DEVICES OF HEATING WITH SOURCES OF ELECTROSUPPLY**

*Microwave of heating are sources of deforming influence to voltage wave. In our work that influence is analyzed, methods and technical means for voltage's decrease are offered.*

Установка СВЧ нагрева представляет собой совокупность узлов, для функционирования которых необходима электрическая энергия различного вида. При этом в структуре современных установок СВЧ нагрева доля потребителей тока промышленной частоты, как правило, невелика. Для функционирования значительной доли электрооборудования требуется

электроэнергия с иными параметрами. В частности, для работы магнетронных генераторов необходимо иметь источники постоянного тока с напряжением в несколько киловольт [1]. Энергосберегающие технологии перемещения обрабатываемых материалов используют частотно-регулируемый электропривод. Таким образом, в состав установки СВЧ нагрева обязательно входят преобразовательные устройства, которые являются источниками искажающего влияния на форму питающего напряжения.

Установки СВЧ нагрева мощностью до 1 кВт, например, бытовые СВЧ печи предназначены для работы от однофазной сети. Наиболее часто источник анодного напряжения магнетронного генератора в этих печах выполняется по упрощенной схеме удвоения напряжения, которая показана на рис.1. Принцип действия этой схемы предполагает несинусоидальную форму потребляемого тока.

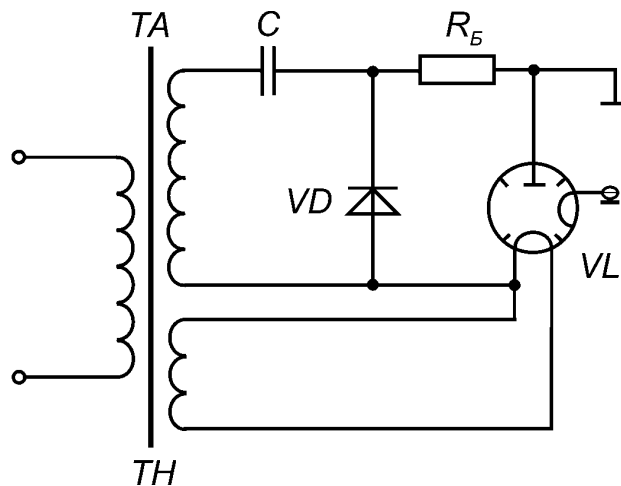


Рис.1. Схема источника анодного напряжения бытовой печи СВЧ нагрева

Для получения количественных показателей, характеризующих влияние бытовых печей СВЧ нагрева на питающую сеть, было проведено экспериментальное исследование процессов с помощью цифрового запоминающего осциллографа Fluke 196C, который имеет два гальванически изолированных входа с входным сопротивлением 1 МОм. На вход «А» осциллографа подавалось напряжение сети, на вход «В» – сигнал с датчика тока, который был выполнен в виде трансформатора тока, нагруженного на прецизионный резистор с сопротивлением 0,2 Ом. При протекании в контролируемой цепи тока 1,5 А выходной сигнал датчика составлял 100 мВ.

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®.

В качестве объекта исследования была выбрана СВЧ печь LG MS-2322W, для которой в инструкции по применению заявлены следующие технические параметры: выходная мощность – 800 Вт; источник питания – сеть 230 В с частотой 50 Гц; потребляемая мощность – 1200 Вт.

Результаты экспериментального исследования приведены на рис.2 и 3, на которых показаны осциллограммы сетевого напряжения и потребляемого тока, а также спектры этих переменных. Амплитуды основных гармоник приняты за 100 %.

Действующее значение напряжения питающей сети в момент проведения замеров составляло 221 В, коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения был равен 5,46 %. Основной вклад в искажение формы напряжения вносили 3-я и 5-я гармоники. Коэффициенты этих гармоник составляли соответственно 4,3 и 3,1 %.

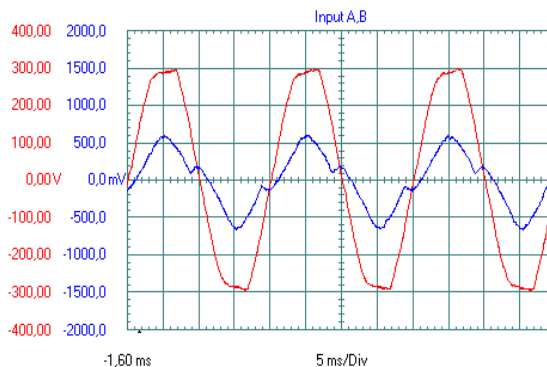


Рис.2. Осциллограммы сетевого напряжения и входного тока СВЧ печи LG MS-2322W

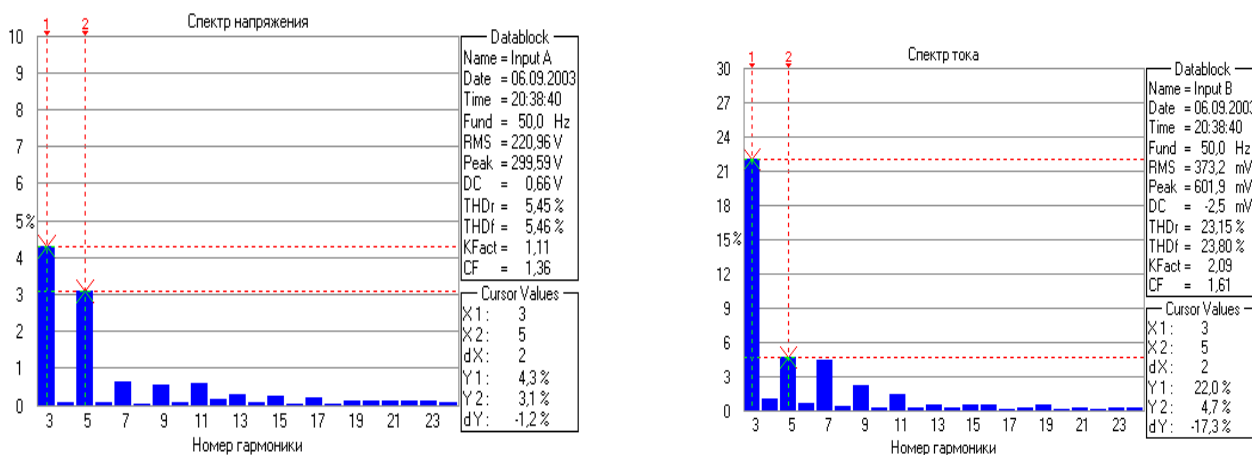


Рис.3. Спектральный состав сетевого напряжения и входного тока

Как видно из рис.2, кривая тока, потребляемого СВЧ печью, смещена относительно кривой сетевого напряжения в сторону запаздывания на угол, который ориентировочно составляет 25 эл. град. Действующее значение тока – 5,59 А. Форма кривой тока отличается от синусоиды в основном за счет 3-й гармоники, коэффициент которой равен 22 %. Суммарный коэффициент искажения синусоидальности кривой тока составляет 23,8 %.

Таким образом, бытовая печь СВЧ нагрева как нагрузка системы электроснабжения является потребителем трех составляющих полной мощности S: активной P, реактивной Q, искажения T. Выражение для ее расчета имеет вид

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + T^2} = U \cdot I, \tag{1}$$

где U, I – действующие значения напряжения и потребляемого тока.

В рассматриваемом случае полная мощность

$$S = 221 \cdot 5,59 = 1235,4 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

Активная мощность рассчитывается по формуле

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) i(t) dt, \tag{2}$$

где u(t), i(t) – мгновенные значения напряжения и тока; T – период сетевого напряжения.

Встроенное математическое обеспечение осциллографа Fluke 196C позволяет производить оперативное перемножение величин, соответствующих сигналам на входах «А» и «В», с последующей записью полученных результатов в буфер памяти. В результате анализа графика мгновенной мощности было получено, что из сети потребляется активная мощность 1102 Вт.

Коэффициент мощности электроприемника в общем случае рассчитывается по формуле

$$\chi = \frac{P}{S} = v \cdot \cos \varphi, \tag{3}$$

где  $\varphi$  – угол сдвига фаз между напряжением и током;  $v$  – коэффициент искажения тока, который определяется как отношение действующего значения первой гармоники тока  $I_{(1)}$  к действующему значению  $I$  всей кривой

$$v = \frac{I_{(1)}}{I}. \tag{4}$$

На основании полученных результатов имеем, что коэффициент искажения входного тока исследуемой СВЧ печи  $v = 0,975$ . При этом коэффициент мощности составляет 0,89.

Известно, что массогабаритные показатели установок СВЧ нагрева, блоки электропитания которых выполнены по схеме рис.1, по сегодняшним критериям далеки от удовлетворительных. Поэтому все чаще производители СВЧ печей применяют так называемые инверторные схемы, позволяющие уменьшить массу и габариты электромагнитных элементов за счет повышения их рабочей частоты [2].

Структурная схема блока питания магнетронного генератора с промежуточным звеном повышенной частоты показана на рис. 4. Переменное напряжение сети сначала выпрямляется и сглаживается, затем с помощью инвертора преобразуется в переменное напряжение повышенной частоты. Это напряжение с помощью высокочастотного трансформатора повышается до необходимой величины и снова выпрямляется. Несмотря на наличие двух дополнительных преобразователей (инвертор и выпрямитель), удастся существенно улучшить массогабаритные показатели блока питания за счет резкого сокращения массы и габаритов трансформатора.

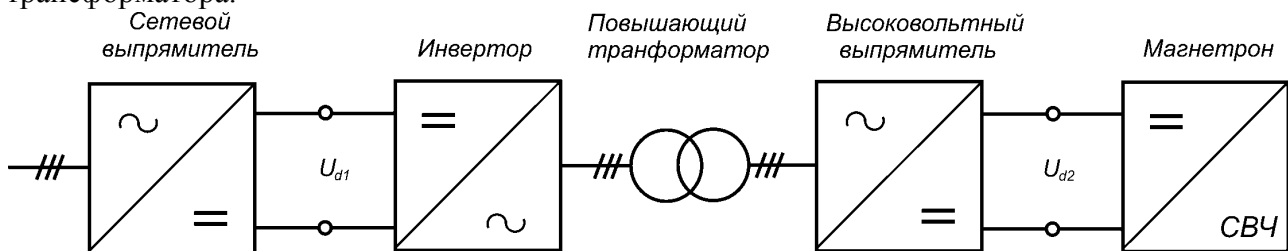


Рис.4. Схема блока питания с промежуточным звеном повышенной частоты

Необходимо заметить, что применение инверторных схем питания магнетронных генераторов, наряду с решением задачи улучшения массогабаритных показателей установок СВЧ нагрева приводит к усилению их искажающего влияния на источник электроснабжения. Для анализа этого влияния воспользуемся схемой замещения, которая показана на рис.5. На этой схеме:  $e(t)$ ,  $R_0$ ,  $L_0$  – соответственно ЭДС, активное и индуктивное сопротивления питающей сети;  $C$  – емкость фильтрующего конденсатора;  $R_H$  – эквивалентное сопротивление нагрузки выпрямителя.

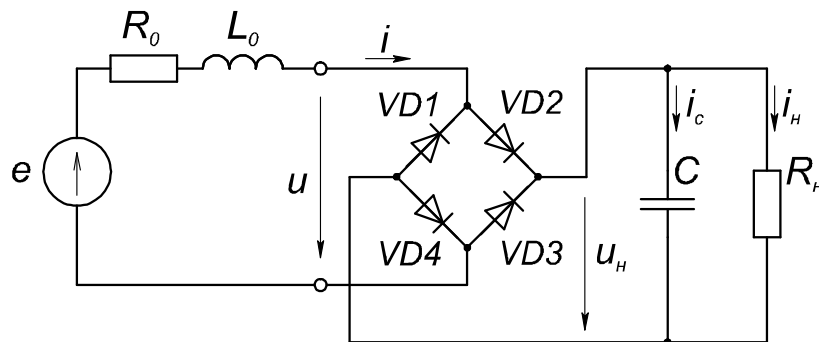


Рис.5. Схема замещения источника питания с входным выпрямителем

Так как в блоке питания при изменении напряжения сети производится стабилизация напряжения на аноде магнетрона за счет широтно-импульсной модуляции инвертируемого напряжения, то величина  $R_H$  зависит от режима работы блока питания. При минимальном значении сетевого напряжения эквивалентное сопротивление нагрузки выпрямителя также имеет минимальное значение.

В каждый из полупериодов входного напряжения в проводящем состоянии может находиться соответствующая пара диодов (VD2,VD4 или VD1,VD3). Открытие диодов происходит в моменты  $\vartheta_1 + k\pi$  (рис.6), когда напряжение  $u(t)$  на входе выпрямителя по модулю становится больше, чем напряжение  $u_H(t)$  на конденсаторе. Контур, состоящий из параллельно соединенных конденсатора  $C$  и сопротивления нагрузки  $R_H$ , подключается к питающей сети. Происходит интенсивный подзаряд конденсатора за счет импульса тока  $i(t)$ , протекающего через элементы питающей сети.

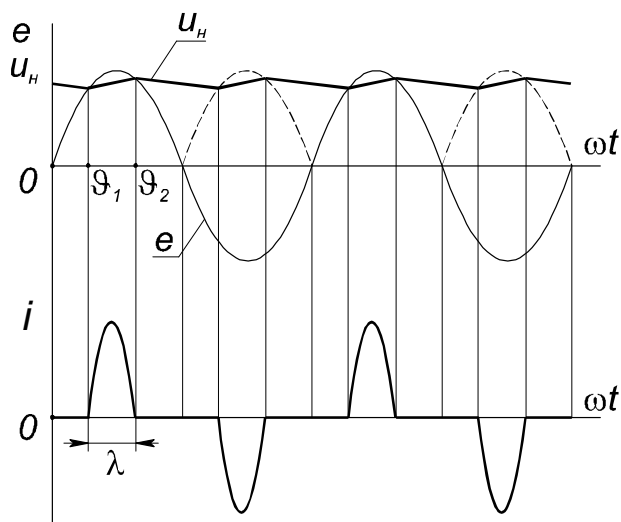


Рис.6. Временные диаграммы работы блока питания с входным выпрямителем

Система дифференциальных уравнений для рассмотренного состояния схемы имеет следующий вид

$$L_0 \frac{di}{dt} + R_0 i + u_H = e; \tag{5}$$

$$C \frac{du_H}{dt} + \frac{1}{R} u_H = i. \tag{6}$$

Диоды остаются открытыми на интервале фаз  $\vartheta_1 + k\pi \div \vartheta_2 + k\pi$  до того момента, пока напряжение  $u(t)$  по модулю не сравняется с напряжением  $u_H(t)$  на конденсаторе  $C$ . После этого цепь нагрузки выпрямителя отключается от питающей сети, вследствие чего происходит разряд конденсатора  $C$  на сопротивление нагрузки  $R_H$ . Этому состоянию схемы соответствуют следующие уравнения:

$$i = 0; \tag{7}$$

$$C \frac{du_H}{dt} + \frac{1}{R} u_H = 0. \tag{8}$$

Из графиков на рис.6 видно, что ток  $i(t)$ , потребляемый выпрямителем из питающей сети, состоит из разнополярных импульсов, длительность которых  $\lambda \ll \pi$ . Ряд Фурье такого тока содержит нечетные гармоники. Экспериментальные исследования ряда бытовых СВЧ печей с инверторными блока питания показали, что коэффициент искажения синусоидальности кривой входного тока может приближаться к 100 %. Наибольший вклад в искажение тока вносят 3-я и кратные ей гармоники. При этом амплитуда тока превышает действующее значение примерно в 4 раза. Коэффициент мощности СВЧ установки как нагрузки системы электроснабжения при указанной форме тока составляет 0,5 – 0,6, что говорит о необходимости принятия решений по обеспечению ЭМС.

Электроснабжение промышленных установок СВЧ нагрева осуществляется по трехфазным схемам. Одна из них, с тиристорным регулятором напряжения в первичной цепи высоковольтного трансформатора, которая широко использовалась в конце прошлого века, показана на рис. 7. Существенным недостатком этой схемы наряду с большой материалоемкостью является низкий коэффициент мощности как за счет фазового управления тиристорами, так и за счет искажения формы потребляемого тока.

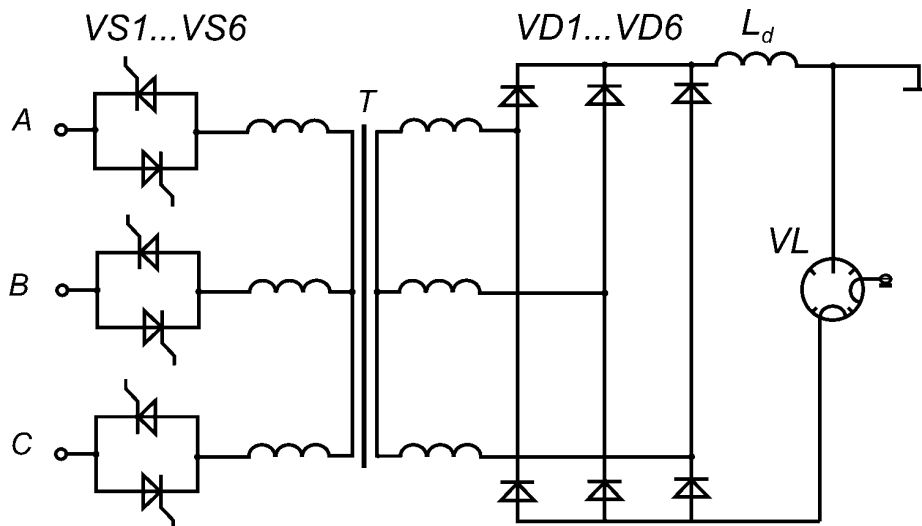


Рис.7. Схема источника анодного напряжения с тиристорным регулятором

Схема электроснабжения установки СВЧ нагрева, в которой использованы современные достижения силовой электроники, показана на рис.8. Переменное напряжение сети сначала преобразуется в постоянное напряжение, которое затем подается на группу инверторов. Одна группа формирует переменные напряжения высокой частоты, которые трансформируются до заданной величины и используются либо непосредственно, либо преобразуются в ряд напряжений постоянного тока. Другие инверторы формируют напряжения с регулируемой частотой и служат для управления электродвигателями вспомогательных механизмов.

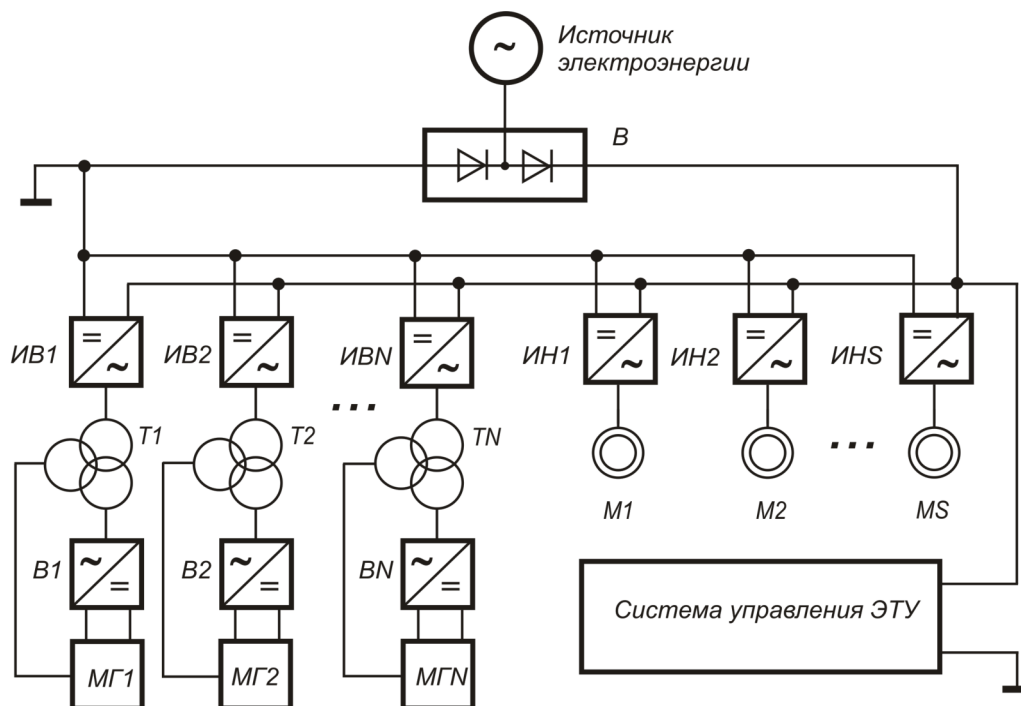


Рис. 8. Схема электроснабжения установки СВЧ нагрева

СВЧ колебания возбуждаются магнетронами  $МГ_1, МГ_2, \dots, МГ_N$ . Питание магнетронов осуществляется от вторичных источников, каждый из которых содержит высокочастотный инвертор  $ИВ_k$ , трансформатор  $T_k$  и выпрямитель  $В_k$ . Управление электродвигателями  $М_1, М_2, \dots, М_S$  осуществляется низкочастотными инверторами  $ИН_1, ИН_2, \dots, ИН_S$ , которые вместе с инверторами  $ИВ_1, ИВ_2, \dots, ИВ_S$  запитаны от выпрямителя  $В$ , подключенного к источнику электроэнергии. От шин постоянного тока запитывается также система управления.

Портом, через который установка СВЧ нагрева по схеме рис.8 получает электроэнергию от источника, является трехфазный мостовой выпрямитель. Наиболее интенсивными гармониками во входном токе такого выпрямителя являются 5-я и 7-я. При номинальной нагрузке установки коэффициент искажения синусоидальности тока составляет 30-35 %. Снижение нагрузки сопровождается ростом искажения входного тока.

Наиболее универсальным средством обеспечения ЭМС в настоящее время считается применение электромагнитных (пассивных) фильтров [4]. В простейшем случае – это линейные дроссели, которые устанавливаются на входе выпрямителя. Индуктивное сопротивление дросселя прямо пропорционально частоте протекающего через него тока, поэтому для основной гармоники питающей сети оно имеет значительно меньшее значение, чем для высших гармоник, ослабляя тем самым их негативное влияние на источник питания.

Необходимо отметить, что эффективность применения линейных дросселей невысока. Многие фирмы-изготовители преобразовательного оборудования рекомендуют применять дроссели, у которых относительное индуктивное сопротивление составляет 3-5 %. Дальнейшее увеличение индуктивности дросселя к существенному снижению уровня высших гармоник не приводит. Однако увеличивается вероятность того, что инверторы рассматриваемой схемы электропитания установки СВЧ нагрева выйдут из диапазона допустимых значений питающего напряжения, и произойдет перегрузка силовых полупроводниковых ключей по току.

По сравнению с линейными дросселями в ряде случаев более эффективным может оказаться применение резонансных LC фильтров. Наиболее распространены фильтры, которые

состоят из цепочек последовательно соединенных конденсаторов и дросселей, настроенных на различные резонансные частоты. При использовании LC фильтров совместно с АИЭ необходим тщательный расчет реактивной мощности. Следует убедиться в каждом конкретном случае, что мощность генератора будет достаточной во всех режимах его работы, а уровень емкостной составляющей во входном сопротивлении не превышает допустимого значения.

Существенное улучшение формы тока, потребляемого мобильной ЭТУ из питающей сети, может дать применение условно-многофазных схем. Однако для их построения требуются специальные трансформаторы, например, с двумя вторичными обмотками, одна из которых соединена по схеме «звезда», а другая – по схеме «треугольник». Стоимость такого схемного решения значительно превышает стоимость обычного шестипульсного выпрямителя в комплекте с любым из пассивных фильтров. Вместе с тем применение условно-многофазных схем является эффективным средством повышения энергетических характеристик ЭТУ при комплексном подходе к ее проектированию, когда генератор АИЭ и устройства для преобразования параметров электроэнергии рассматриваются как единое целое. Может оказаться целесообразным выполнить генератор с двумя трехфазными якорными обмотками, смещенными относительно друг друга на 30 эл. град., что позволит реализовать двенадцатипульсное выпрямление.

Перспективным методом уменьшения высших гармоник в системе электроснабжения с потребителями несинусоидального тока является применение так называемых активных фильтров [4]. Их принцип действия состоит в том, что на основе анализа тока нелинейной нагрузки в питающую сеть генерируются такие же гармоники тока, но в противоположной фазе. В результате этого в точке подключения активного фильтра происходит компенсация высших гармоник.

Активные фильтры могут подключаться либо параллельно потребителям несинусоидального тока, либо последовательно – в рассечку линии питания. Для рассматриваемого объекта целесообразно предложить параллельную схему подключения активных фильтров. На сегодняшний день основным ограничением по применению активных фильтров является их достаточно высокая цена.

Альтернативным решением является использование так называемых гибридных фильтров, в которых активный фильтр включается последовательно либо параллельно резонансным фильтрам. Активный фильтр в этом случае играет роль вспомогательного устройства, обеспечивающего дополнительную «подчистку» кривых напряжения и тока источника питания, искажаемых нелинейным потребителем. Поэтому установленная мощность активного фильтра оказывается значительно меньше, чем при использовании только его одного, без резонансных фильтров.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Артюхов И.И. Магнетронные генераторы для установок СВЧ нагрева / И.И.Артюхов, М.А.Фурсаев. Саратов: СГТУ, 2000. 48 с.
2. Артюхов И.И. Направления совершенствования источников питания СВЧ генераторов магнетронного типа / И.И. Артюхов, В.В. Тютманова, А.Г. Сошинов // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2006. № 4(19). Вып. 4. С. 6-16.
3. Артюхов И.И. Особенности построения источников питания для мобильных электротехнологических установок / И.И.Артюхов, В.В.Тютманова, А.Г.Сошинов // Анализ, синтез и управление в сложных системах: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2007. С. 104-109.
4. Жежеленко И.В. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях / И.В.Жежеленко, Ю.Л. Саенко. М.: Энергоатомиздат, 2005. 261 с.



**Артюхов Иван Иванович –**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета.

**Сошинов Анатолий Григорьевич –**

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

**Артюхова Ирина Ивановна –**

магистрант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета.

*Статья поступила в редакцию 26 октября 2007г., принята к опубликованию 2 ноября 2007г.*

УДК 621.382

Д.А. Сальникова, В.А. Царев

**ОЦЕНКА ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ МНОГОЛУЧЕВОГО КЛИСТРОДА  
С ТРУБЧАТЫМИ ЭЛЕКТРОННЫМИ ПУЧКАМИ**

*Исследованы возможности создания и применения в промышленных установках СВЧ энергетики, работающих на частоте 433 МГц, мощного клистрода с многолучевыми трубчатыми пучками и выходным пространственно-развитым двухзональным резонатором. Рассчитаны параметры электронно-оптической системы. Произведено сравнение основных характеристик и параметров многолучевых клистродов со сплошным и полым пучками.*

D.A. Salnikova, V.A. Tsarev

**ESTIMATION OF TARGET PARAMETERS MULTIBEAM KLYSTROD WITH  
TUBULAR ELECTRONIC BEAMS**

*Opportunities of creation and application in the plants of the UHF energy working on frequency of 433 MHz, powerful klystron with multibeam tubular beams and target spatially - advanced the two-shameful resonator are investigated. Parameters of electron-optical system are designed. Comparison of the basic characteristics and parameters multibeam klystrods with continuous and tubular beams is made.*

Введение

Возрастающее использование энергии СВЧ в качестве средства быстрого разогрева и сушки материалов (например, для сушки древесины, разрушения твердых пород) сулит мощным электровакуумным приборам СВЧ хорошие перспективы. Для работы в таком оборудовании такие приборы должны работать на частоте 433 МГц и генерировать мощности до нескольких десятков киловатт с высоким КПД. Предпочтительнее применение приборов с

воздушным охлаждением в связи с тем, что горячий воздух может быть использован для дополнительной конвекционной сушки или подогрева продукта. Кроме того, промышленные установки СВЧ сушки должны иметь сравнительно небольшие габариты, массу и стоимость [1-3].

Указанным выше требованиям в наибольшей степени отвечают новые типы ЭВП – многолучевые клистроны [4]. По сравнению с магнетронами многолучевые клистроны позволяют значительно увеличить долговечность и выходную мощность в дециметровом диапазоне при тех же, что и у магнетронов, величинах КПД и напряжениях. У клистронов, так же как и у клистронов, продольный размер коллектора не связан с длиной волны, однако по сравнению с клистрономы они имеют меньшие габариты и массу из-за малого числа резонаторов. В случае использования клистронов на уровень выходной мощности 30-50 кВт необходимо только один прибор и один блок питания, а выходная мощность может легко управляться от минимального уровня до максимального. Общая стоимость системы СВЧ нагрева, построенной на клистроне, также значительно ниже, чем та же самая система, построенная из нескольких синхронизированных магнетронов [1,2].

В разработанных конструкциях многолучевых клистронов обычно используются пушки с управляющими электродами (сетками), формирующие сплошной электронный поток.

Представляет интерес создание клистронов с трубчатыми электронными потоками. Такие приборы могут иметь более высокие значения КПД и выходной мощности, чем приборы со сплошными пучками. Это объясняется меньшим влиянием пространственного заряда на процессы взаимодействия и уменьшением эффекта провисания потенциала в пролетные трубы.

Целью работы является исследование возможности создания и применения в промышленных установках СВЧ энергетики, работающих на частоте 433 МГц, мощного клистрода с многолучевыми трубчатыми пучками и выходным пространственно-развитым двухззорным резонатором.

## 1. Расчет параметров электронно-оптической системы

Конструирование систем формирования электронных пучков в многолучевом клистроне с высоким первеансом обладает рядом особенностей, связанных с усилением влияния сетки и анодного отверстия на первеанс и ход траекторий в пучке. В пучках со сходящимся потоком, основанных на использовании части сферического диода (в пушках Пирса) для увеличения первеанса необходимо увеличивать угол сходимости потока и приближать сетку и анод к катоду. По мере приближения анода к катоду и роста отношения диаметра анодного отверстия к расстоянию между катодом и анодом наблюдаются следующие явления: плотность тока эмиссии катода становится неравномерной, снижается величина первеанса, появляются сильные aberrации, приводящие к пересечению траекторий (к неламинарности потока).

Электронные пушки с сеточным управлением, предназначенные для формирования сплошных электронных пучков, более просты в расчетном и конструктивном отношении. Их электронно-оптические свойства достаточно хорошо изучены в составе конструкции многолучевого клистрода, как теоретически, так и экспериментально. Конструкция одной такой пушки (№1) показана на рис. 1, а на рис. 2 приведен ход электронных траекторий в такой пушке. Из этого рисунка видно, что при малых расстояниях «катод-анод», требуемых для повышения первеанса пушки, появляются заметные aberrации, приводящие к неламинарности потока.

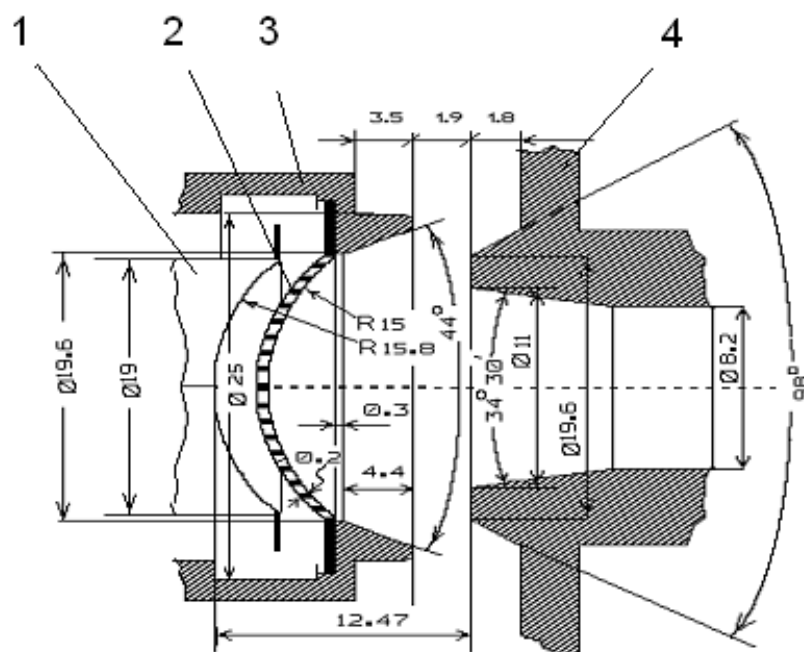


Рис. 1. Конструкция пушки №1 для формирования сплошного сходящегося аксиально-симметричного пучка:  
 1- катод, 2- управляющая сетка, 3- фокусирующий электрод, 4- анод

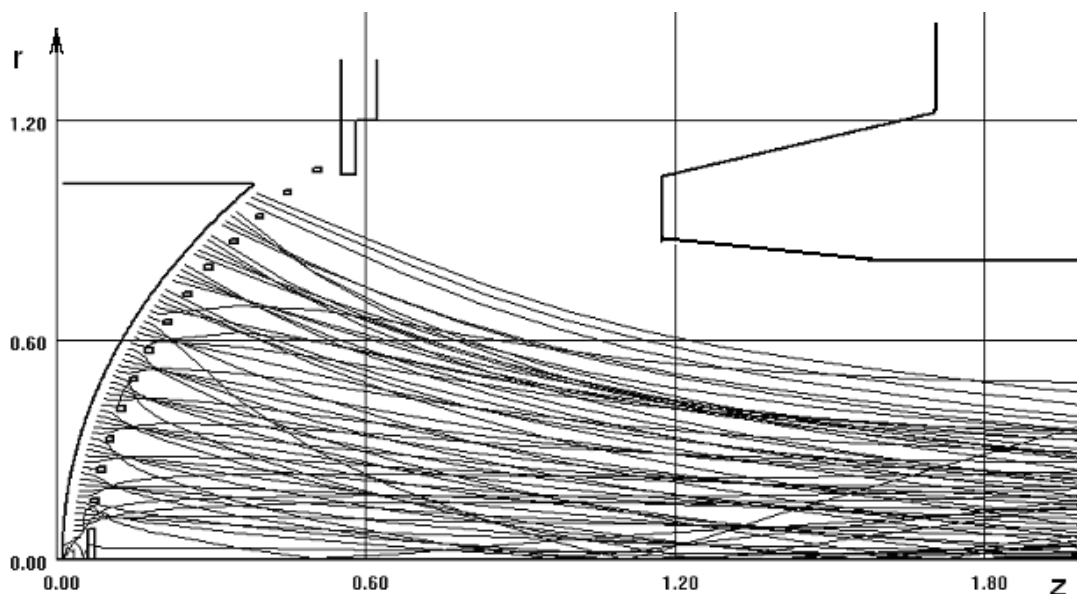


Рис. 2. Ход электронных траекторий в пушке №1 при параметрах:  
 $U_a = 18 \text{ кВ}$ , радиус пролетного канала 8.2 мм,  $d_{c-k} = 0.48 \text{ мм}$ ,  $B_{\text{макс}} = 0.03 \text{ Тл}$

Конструкция новой пушки, предназначенной для формирования сходящегося трубчатого пучка, показана на рис. 3, а на рис. 4 приведен ход электронных траекторий в такой пушке. Из рис. 4 видно, что при одинаковых расстояниях «катод-анод» неламинарность потока, вызванная сеткой, проявляется в меньшей степени.

Эти результаты были получены расчетным путем с помощью программы «Кит», разработанной в СГТУ [5].

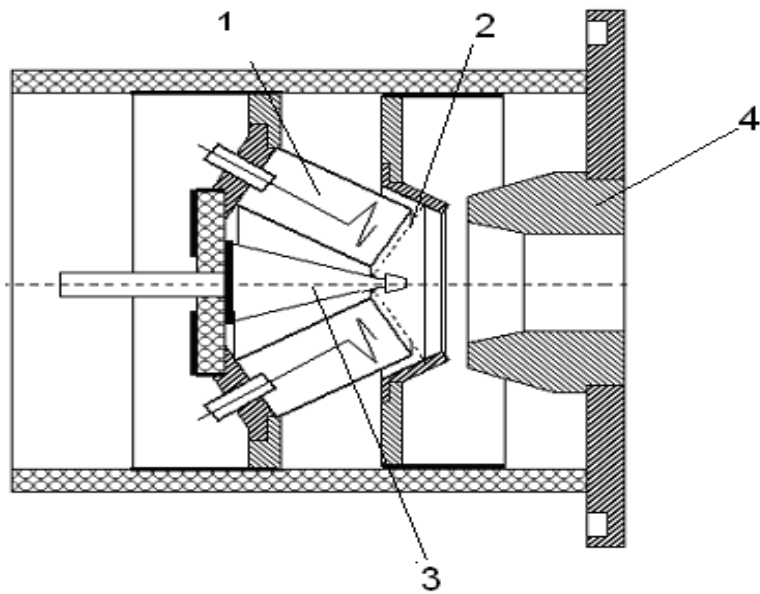


Рис. 3. Конструкция пушки №2 для формирования сходящегося трубчатого пучка:  
1- кольцевой катод, 2- управляющая сетка, 3- управляющий штырь, 4- анод

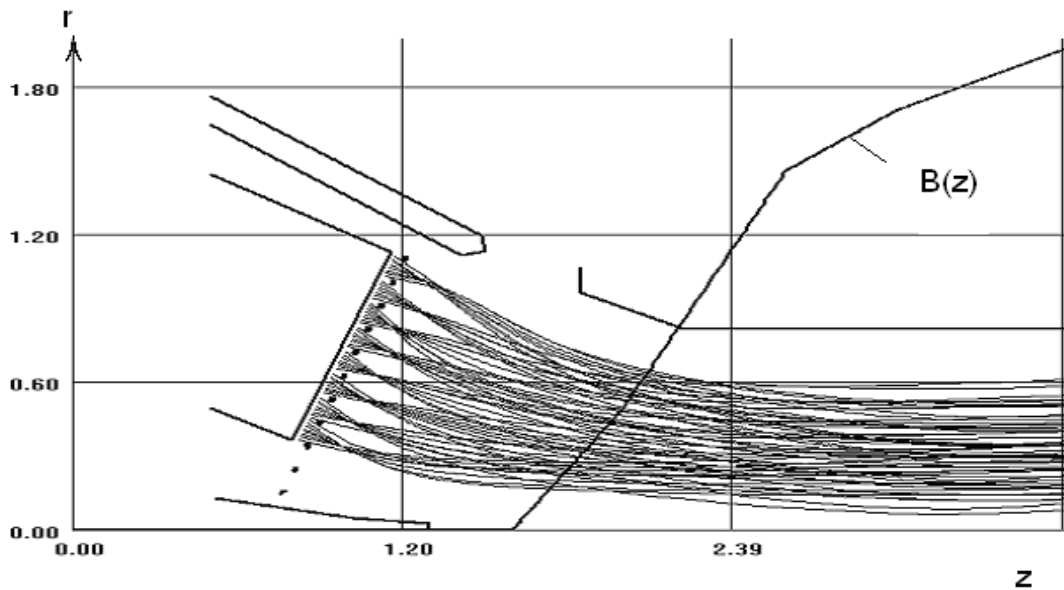


Рис. 4. Ход электронных траекторий в пушке № 2 при параметрах:  
 $U_a = 18 \text{ кВ}$ , радиус пролетного канала 8.2 мм,  $d_{c-k} = 0.48 \text{ мм}$ ,  $B_{\text{макс}} = 0.03 \text{ Тл}$

На рис. 5 показаны катодно-сеточные характеристики и их аппроксимации при разных напряжениях на аноде. Для выбранного значения ускоряющего напряжения 18 кВ эти аппроксимации могут быть представлены следующими зависимостями:

$$I_{k(\text{max})} = 1.175 \cdot 10^{-4} \cdot U_c^3 + 0.09197 \cdot U_c^2 + 24.31 \cdot U_c + 2148, \quad (1)$$

$$I_{k(\text{appr})} = 15.6 \cdot U_c + 2025.66. \quad (2)$$

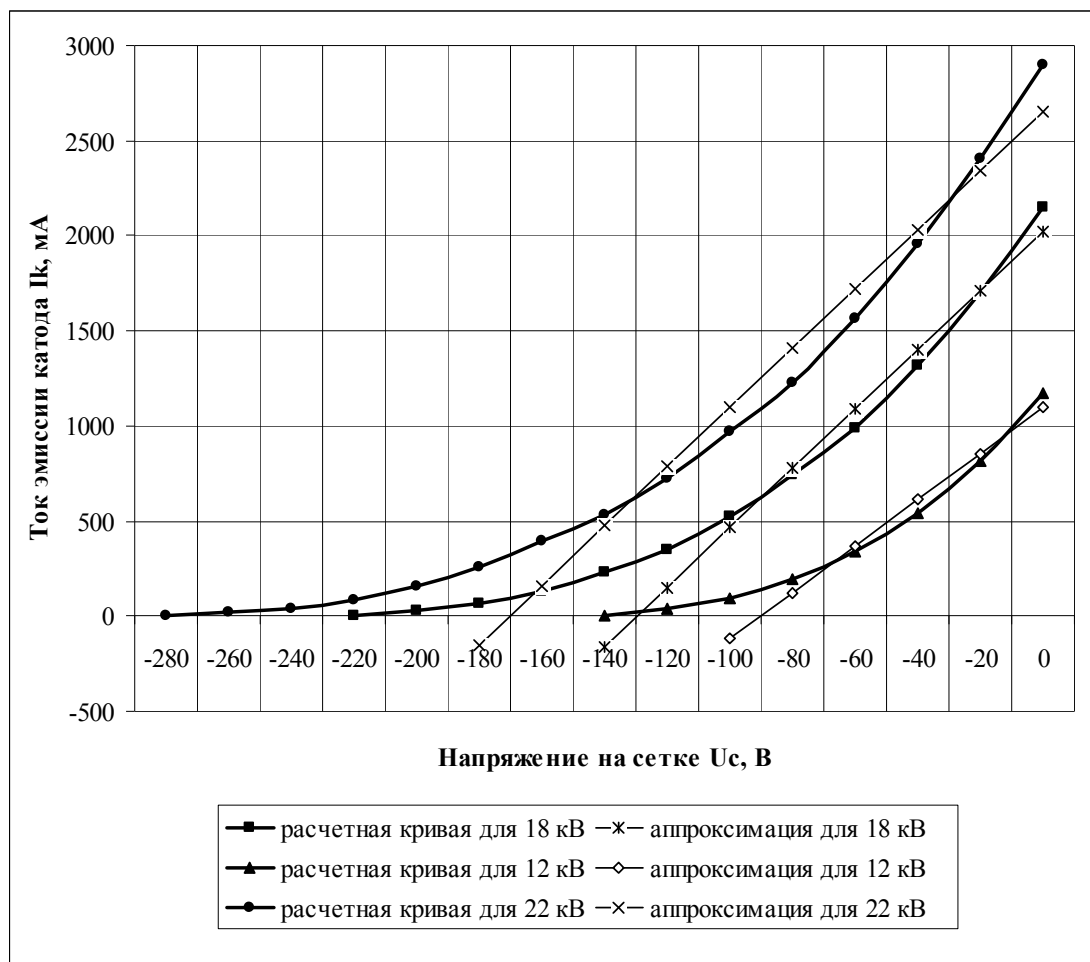


Рис. 5. Катодно-сеточные характеристики и их аппроксимации при разных напряжениях на аноде

Из практики проектирования СВЧ триодов и тетродов известно, что переход от зависимости, описываемой уравнением (1) к зависимости (2) намного упрощает расчеты. Переход к идеализированной катодно-сеточной характеристике, как показано на рис. 6, возможен, если параметр  $\nu = \frac{e'}{e''}$  больше 0,5. Из уравнений (1), (2) определяем величины  $e'$ ,

$e''$  и их отношение:

$$e'' = -129 \text{ В} \qquad e' = -90.5 \text{ В} \qquad \nu = \frac{e'}{e''} = \frac{-90.5}{-129} = 0.697.$$

Таким образом, вместо уравнения (1) будем пользоваться уравнением (2), из которого определяется величина потенциала запирания  $e'' = -129 \text{ В}$  и крутизна  $S = 15.6 \text{ mA/V}$ . Амплитуду модулирующего напряжения ( $U_{mc} = 129 \text{ В}$ ) выберем из условия, что максимальный потенциал на сетке не превышает нулевого значения. При этом сеточные токи будут отсутствовать. Выберем угол отсечки катодного тока  $\theta = 90^\circ$  для получения высокого КПД. В результате численного расчета по разработанной программе для заданных геометрических и электрических параметров пушки с сеточным управлением определяется максимальное значение импульса катодного тока электронного сгустка, сформированного в пространстве «сетка-катод» за счет модуляции эмиссии катода внешним входным сигналом с максимальной амплитудой, соответствующей нулевому потенциалу на сетке в статическом режиме.

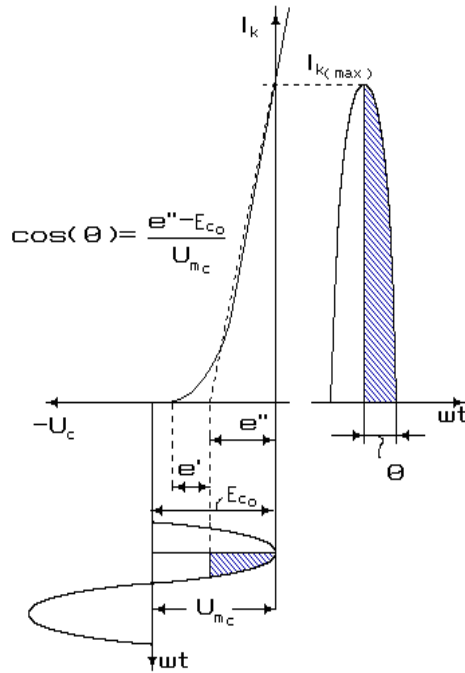


Рис. 6. Переход к идеализированной катодно-сеточной характеристике

Из рис. 7 следует, что переход от пушки со сплошным пучком к пушке с полым пучком при равных остальных условиях позволяет получить для пушки №2 большее значение тока  $I_{k(\max)}$  примерно в полтора раза. Из полученных анодно-сеточных характеристик известным методом гармоник, в зависимости от угла отсечки катодного тока  $\theta = 90^\circ$  вычисляется амплитуда первой гармоники конвекционного тока на выходе из сетки и постоянная составляющая тока луча [5].

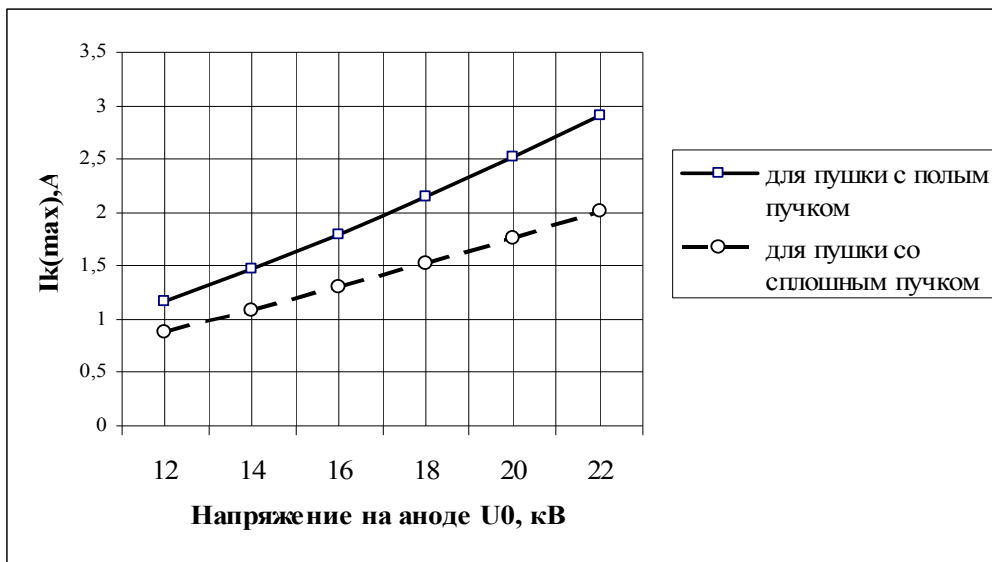


Рис. 7. Сравнение зависимостей максимальной амплитуды импульса катодного тока от напряжения на аноде (при сеточном потенциале, равном нулю) для пушек со сплошным и полым пучками

Для расчетов клистронной части прибора необходимы данные о конструкции и параметрах выходного резонатора [6]. Конструкция выходного резонатора для четырех лучей приведена на рис. 8. Представляет интерес исследование характеристик резонатора для разного числа лучей  $N = 1,3,4,6$ . С увеличением числа лучей изменяется характеристическое сопротивление резонатора  $\rho$ , как показано на рис. 9.

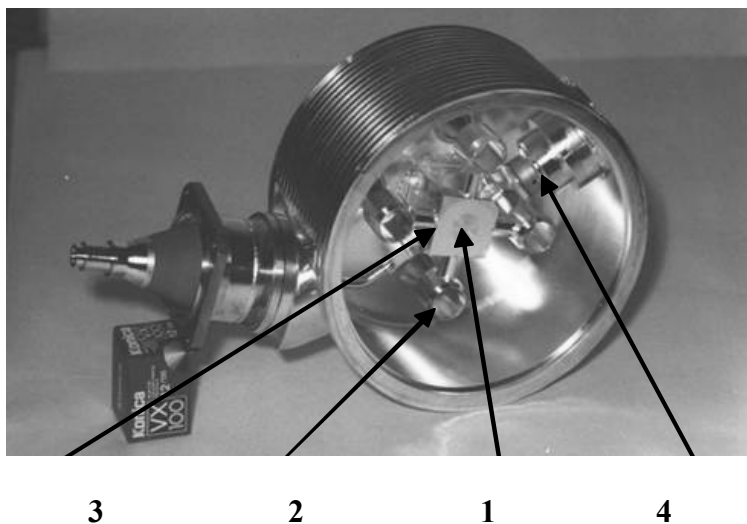


Рис. 8. Выходной двухззорный пространственно-развитый резонатор четырехлучевого клистрода: 1- центральный проводник (опорный ствол), 2- центральные пролетные трубы, 3- радиальные проводники (ветви), 4- механизм перестройки частоты

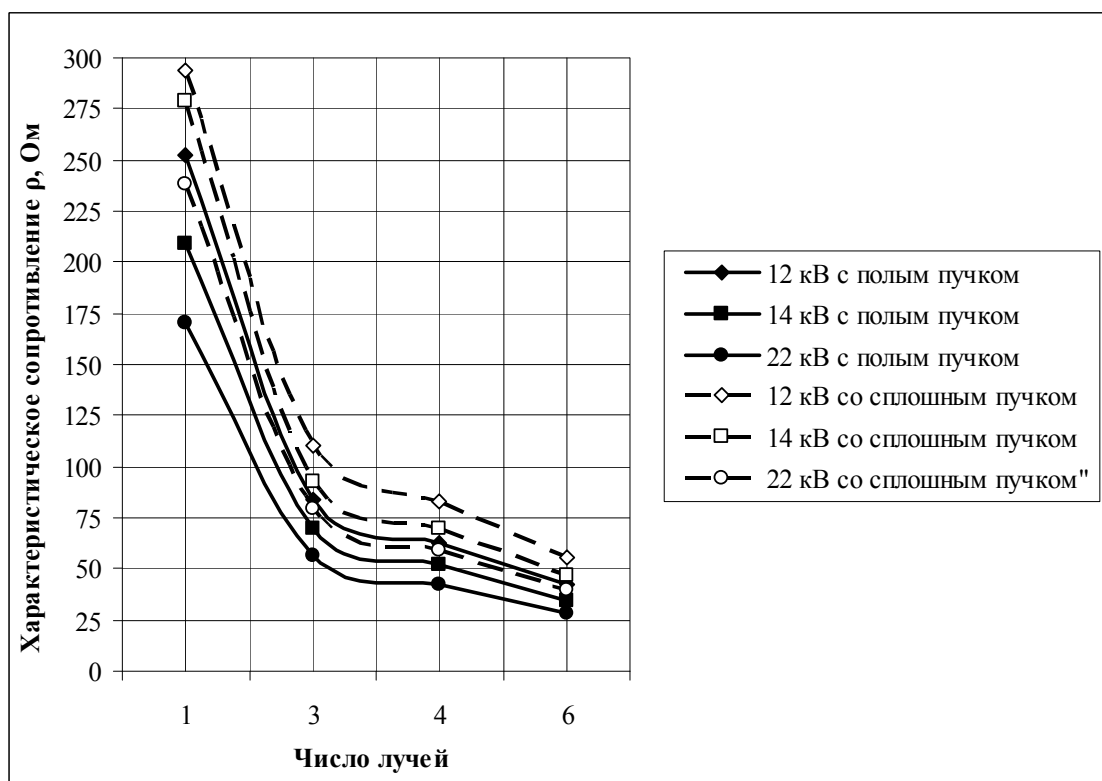


Рис. 9. Зависимость характеристического сопротивления от числа лучей

2. Сравнение основных характеристик и параметров многолучевых клистронов со сплошным и полым пучками

На рис. 10 представлена схема пространства взаимодействия для одного луча. Размеры пространства взаимодействия оптимизировались из условия получения максимального электронного КПД, определяемого соотношением [7]

$$\eta_{эл.} = 0,5 \left( I_1' \cdot M_n \cdot U_1' - (U_1')^2 \cdot G_n' \right) \cdot F_{П.З.}, \quad (3)$$

где  $I_1'$  – нормированная первая гармоника конвекционного тока;

$M_n$  – нелинейный коэффициент эффективности взаимодействия;

$U_1'$  – коэффициент использования напряжения;

$G_n'$  – относительная активная составляющая шунтирующей электронной проводимости;

$F_{П.З.}$  – функция влияния пространственного заряда на КПД.

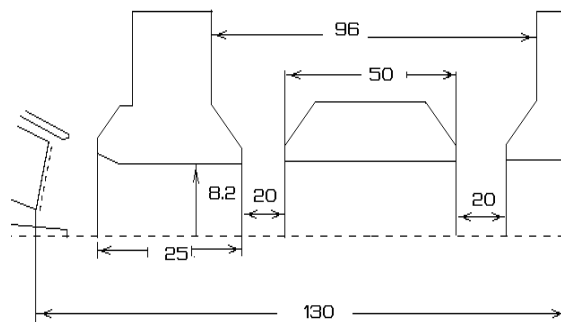


Рис. 10. Схематическое изображение пространства взаимодействия с указанием характерных размеров электродов

Результаты расчета по разработанной численно-аналитической модели многолучевого клистрода показаны на рис. 11.

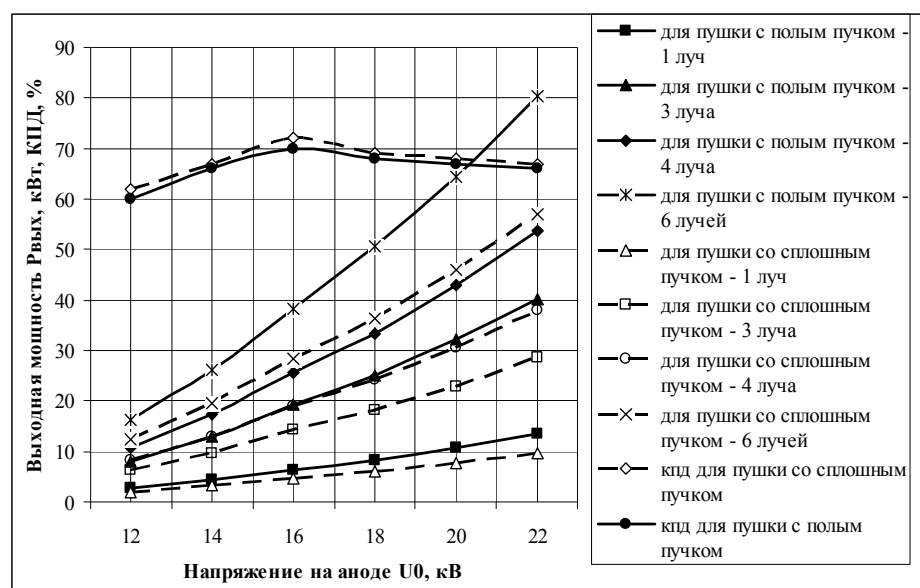


Рис. 11. Зависимость выходной мощности и КПД от напряжения на аноде для различного числа лучей и разных конструкций пушек



**Выводы.** Показана возможность получения КПД около 70% для различных конструкций электронных пушек. При напряжении 18 кВ и количестве лучей  $N = 6$  можно получить с трубчатым пучком уровень выходной мощности  $P_{вых} = 50 \text{ кВт}$ , что в полтора раза больше чем для прибора со сплошными пучками. Для  $N = 4$   $P_{вых} = 34 \text{ кВт}$ . Таким образом, показана целесообразность создания и применения в промышленных установках СВЧ энергетики, работающих на частоте 433 МГц, мощного клистрода с многолучевыми трубчатыми пучками и выходным пространственно-развитым двухазорным резонатором.

Настоящая работа выполнена в рамках гранта Президента РФ НШ-9953..2006.8 по СВЧ электротехнологии.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. СВЧ энергетика / под ред. Э. Окреса. Т. 1. М.: Мир, 1971.
2. Мощные высокоэффективные клистроны для установок промышленного нагрева. High-power, high-efficiency klystrons for industrial heating / Arai Shintaro, Maruyama Yo shifumi, Tomikawa Kunihiro, Makino Toshimoto // NEC Res. and Dev. 1995. 36. №3. С. 400-405.
3. Пчелинцев Г.А. Перспектива применения клистронов для целей СВЧ энергетики / Г.А. Пчелинцев, Д.А. Сальникова, В.А. Царев // Радиотехника и связь: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Саратов, 18-20 мая 2005г. Саратов: СГТУ, 2005. С. 382-385.
4. Мощный высокоэффективный многолучевой клистрод / В.А. Царев, В.В. Перов, И.А. Шаталин, О.В. Казаков, А.С. Семенов, В.К. Семенов // Актуальные проблемы электронного приборостроения: материалы 5 Междунар. науч.-техн. конф., Саратов, 18-19 сент. 2002: АПЭП – 2002. Саратов: СГТУ, 2002. С. 128-136.
5. Кармазин В. Ю. Моделирование и расчет электронно-оптических систем / В. Ю. Кармазин, В. А. Царев // Труды Четвертой Междунар. науч.-техн. конф. Ульяновск, 2001. С. 254-257.
6. Казаков О.В. Исследование особенностей нелинейного процесса отбора энергии в клистроне с выходным многоазорным резонатором / О.В. Казаков, М.В. Майорова, В.А. Царев // Машинное проектирование в прикладной электродинамике и электронике: труды 5-го рабочего семинара IEEE Saratov-Penza Chapter. Саратов: СГТУ, 2001. С. 55-61.
7. Кармазин В.Ю. Математическое моделирование режимов работы катодно-сеточного узла в многолучевом клистроне / В.Ю. Кармазин, В.А. Царев // Актуальные проблемы электронного приборостроения: материалы 5 междунар. науч.-техн. конф. Саратов, 18-19 сент. 2002 г. Саратов: СГТУ, 2002.

**Сальникова Дина Анатольевна** –

аспирант кафедры «Электронные приборы и устройства» Саратовского государственного технического университета

**Царев Владислав Алексеевич** –

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электронные приборы и устройства» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 26 октября 2007г., принята к опубликованию 2 ноября 2007г.*

УДК 621.316

И.И. Артюхов, И.А. Вокин

**ДВУХКАНАЛЬНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ  
БЛОКА «АСИНХРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР – ВЫПРЯМИТЕЛЬ»**

*Рассмотрена возможность двухканального регулирования выходного напряжения блока «асинхронный генератор – выпрямитель». Описывается экспериментальная установка и приведены результаты ее исследования.*

I.I. Artjukhov, I.A. Vokin

**TWO-CHANNEL REGULATION OF THE TARGET VOLTAGE OF THE BLOCK  
«THE ASYNCHRONOUS GENERATOR - THE RECTIFIER»**

*The opportunity of the two-channel regulation of a target voltage of the block «the asynchronous generator - the rectifier» is considered. Experimental installation is described and results of its research are given.*

Асинхронные генераторы обладают целым рядом преимуществ, и в настоящее время имеются все предпосылки для их широкого применения [1]. В частности, на основе асинхронных генераторов могут быть построены автономные системы электропитания СВЧ и других электротехнологических установок.

Асинхронный генератор – это асинхронная электрическая машина, работающая в генераторном режиме, то есть с отрицательным скольжением. Обычно в качестве генератора используется асинхронный двигатель, однако для улучшения экономических показателей целесообразно использовать именно асинхронный генератор, имеющий некоторые особенности. Асинхронная машина во всех режимах потребляет реактивную мощность, поэтому необходимо предусматривать её источники. Возможно роторное возбуждение асинхронного генератора и статорное. Однако целесообразно применение машины с короткозамкнутым ротором как наиболее дешёвой и надёжной, к тому же лучше работающей на повышенных оборотах.

Одним из существенных недостатков асинхронного генератора является сложность стабилизации выходного напряжения и частоты, зависящих от нагрузки. Практически все существующие методы управления режимами асинхронного генератора направлены на изменение выходного напряжения посредством регулирования реактивной мощности возбуждения при постоянной частоте вращения ротора [1-4]. Рассмотрим некоторые из них [1].

1. Метод регулирования напряжения с использованием подмагничивания спинки статора генератора. Недостатком этого способа является то, что генератор должен иметь специальное исполнение, и при этом не обеспечивается стабилизация напряжения в широком диапазоне изменения нагрузки.

2. Изменение напряжения на конденсаторах посредством реостата или трансформатора с регулируемым коэффициентом трансформации. Недостатки этого метода очевидны: снижение КПД установки, наличие коммутационной аппаратуры и необходимость компенсации дополнительной реактивной мощности в варианте с установкой трансформатора.

3. Схема с использованием феррорезонансного стабилизатора напряжения. При этом в цепь статора включается реактор, настроенный в резонанс токов с конденсаторной батареей возбуждения. Недостатки – незначительный диапазон регулирования, значительное увеличение стоимостных и массогабаритных показателей.

4. Компаундирование возбуждения генератора. Такие схемы недостаточно надёжны и имеют ограниченное применение.

Как видно, существующие способы регулирования напряжения на статоре асинхронного генератора довольно сложны и не всегда применимы. Наиболее простым и эффективным методом является изменение реактивной мощности возбуждения путём использования нескольких конденсаторных батарей. Однако при этом достигается дискретное изменение напряжения, что неприемлемо с точки зрения точности регулирования, а увеличение числа ступеней приводит к увеличению количества коммутационной аппаратуры, что усложняет эксплуатацию всей системы.

В то же время скорость вращения вала приводного двигателя внутреннего сгорания в автономной системе электроснабжения может изменяться плавно и в широких пределах, что даёт возможность плавного изменения напряжения на статоре асинхронного генератора, поскольку оно напрямую зависит от скорости вращения ротора генератора. В автономных силовых установках, построенных по традиционной схеме, такая зависимость является скорее негативным фактором, поскольку со стороны нагрузки, получающей питание на переменном напряжении, выдвигается требование по поддержанию постоянной частоты 50 Гц, то есть скорость приводного двигателя должна быть стабильной.

Если выдавать потребителям электроэнергию на постоянном токе, то требование по стабилизации частоты на статоре генератора отпадает. При этом скорость вращения вала приводного двигателя превращается из возмущающего воздействия в управляющее. Таким образом, создаются предпосылки к созданию дискретно-непрерывной системы управления напряжением автономной системы электроснабжения на базе асинхронного генератора с короткозамкнутым ротором. Возникает необходимость в исследовании двухканального регулирования выходного напряжения блока «асинхронный генератор – выпрямитель» по двум каналам: скорости вращения вала приводного двигателя и реактивной мощности возбуждения.

Рассмотрим схему блока «автономный асинхронный генератор – выпрямитель», которая показана на рис. 1.

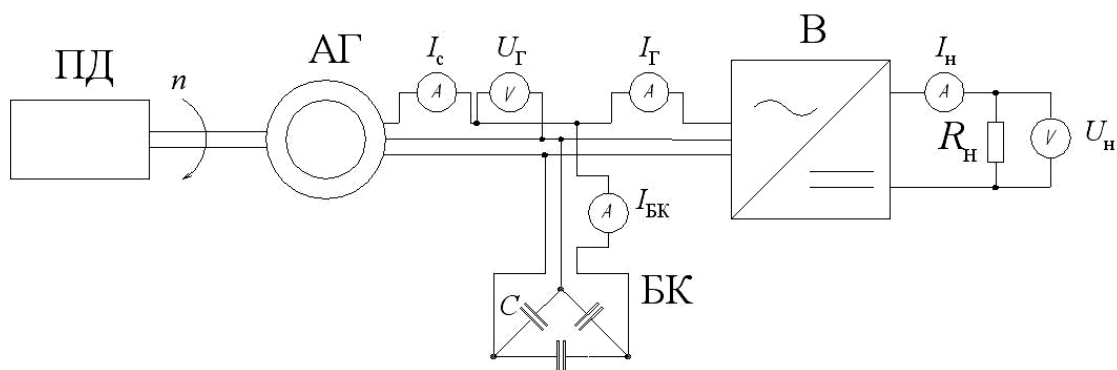


Рис. 1. Схема блока «Автономный асинхронный генератор – выпрямитель»

Блок состоит из следующих основных элементов: приводного двигателя ПД, асинхронного генератора АГ, батареи конденсаторов возбуждения БК, соединённых в треугольник и выпрямителя В.

В качестве приводного двигателя в автономных силовых установках, как правило, используются двигатели внутреннего сгорания, в основном работающие на дизельном топливе. Дизельные двигатели надёжны, неприхотливы и экономичны. Приводной двигатель имеет свою систему управления скоростью вращения вала, а также различные системы контроля параметров собственных режимов.

В качестве источника реактивной мощности используются конденсаторные батареи. Величина реактивной мощности возбуждения может регулироваться посредством изменения количества подключенных параллельных батарей. Ориентировочно ёмкость конденсаторов основной батареи можно определить по формуле

$$C = \frac{P_{\Gamma}(tg\varphi_{\Gamma} + tg\varphi_{\text{н}})}{2\pi f m U_C^2}, \quad (1)$$

где  $P_{\Gamma}$  – мощность, отдаваемая генератором;  $U_C$  – напряжение на конденсаторах;  $f$  – частота тока;  $\varphi_{\Gamma}$  и  $\varphi_{\text{н}}$  – углы сдвига фаз между напряжениями и токами генератора и нагрузки;  $m$  – число фаз.

Выпрямитель в данной схеме неуправляемый, поскольку нет необходимости в дополнительном канале управления напряжением. При этом конструкция блока значительно упрощается, поскольку не требуется установки дополнительных устройств.

По схеме рис. 1 для изучения свойств блока «Автономный асинхронный генератор – выпрямитель» была собрана экспериментальная установка.

В качестве приводного двигателя использовался двигатель постоянного тока с независимым возбуждением типа 2ПН100ЛУХЛ4 со следующими параметрами: номинальное напряжение  $U_{\text{н}}=220$  В; номинальная активная мощность  $P_{\text{н}}=2,2$  кВт; номинальный ток  $I_{\text{н}}=11,8$  А; номинальная частота вращения  $n_{\text{н}}=3150$  об/мин. Частота вращения ПД изменялась при помощи автотрансформатора в обмотке возбуждения.

Роль асинхронного генератора выполняла асинхронная машина АИР80А2У3 с короткозамкнутым ротором. Её параметры: номинальное напряжение  $U_{\text{ном}}=380$  В; номинальная активная мощность  $P_{\text{ном}}=1,5$  кВт; номинальный ток фазы статора  $I_{\text{ном}}=3,26$  А; номинальная частота вращения  $n_{\text{ном}}=2880$  об/мин; номинальная частота питающей сети  $f=50$  Гц; номинальный коэффициент мощности  $\cos\varphi=0,85$ .

Для возбуждения асинхронного генератора в качестве источника реактивной мощности использовалась батарея конденсаторов со схемой соединения треугольник, имелась возможность изменения ёмкости в пределах от 8 до 16 мкФ с шагом 2 мкФ. К статорной обмотке генератора был подключен неуправляемый выпрямитель, собранный по трёхфазной мостовой схеме на диодах КД202Р. Выпрямитель работал на активную нагрузку, которая изменялась в широких пределах.

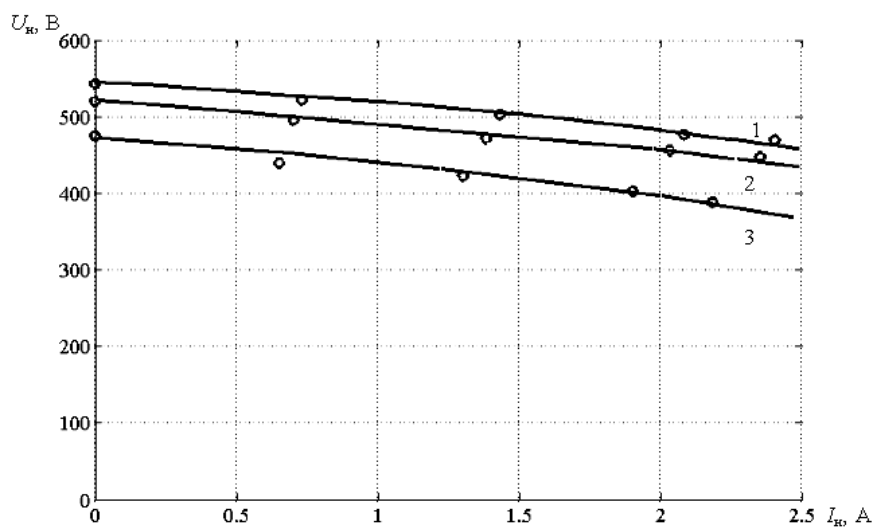


Рис. 2. Экспериментальные внешние характеристики блока «асинхронный генератор – выпрямитель» при скорости вращения ротора  $n=3010$  об/мин: 1 – при  $C=12$  мкФ; 2 – при  $C=10$  мкФ; 3 – при  $C=8$  мкФ

В ходе экспериментов посредством универсального измерительного прибора ДМК22, мультиметров М890G с классом точности 1,5 и тахогенератора ППЭ-Д2 измерялись следующие параметры: ток статора генератора  $I_c$ , напряжение генератора  $U_G$ , ток генератора  $I_G$ , ток батареи конденсаторов  $I_{БК}$ , скорость вращения ротора генератора  $n$ , частота тока в статоре  $f_c$ , ток нагрузки  $I_n$  и напряжение на нагрузке  $U_n$ . На рис. 2 изображены внешние характеристики блока, полученные в результате опытов, проведённых на экспериментальной установке. Результаты опытов хорошо согласуются с общей теорией асинхронных машин. Как видно, внешние характеристики асинхронного генератора обладают большим статизмом по сравнению с внешними характеристиками синхронного генератора.

Однако наибольший интерес для настоящего исследования представляют характеристики, отражающие зависимость выходного напряжения блока от скорости вращения приводного двигателя и ёмкости конденсаторов возбуждения при изменяющейся нагрузке.

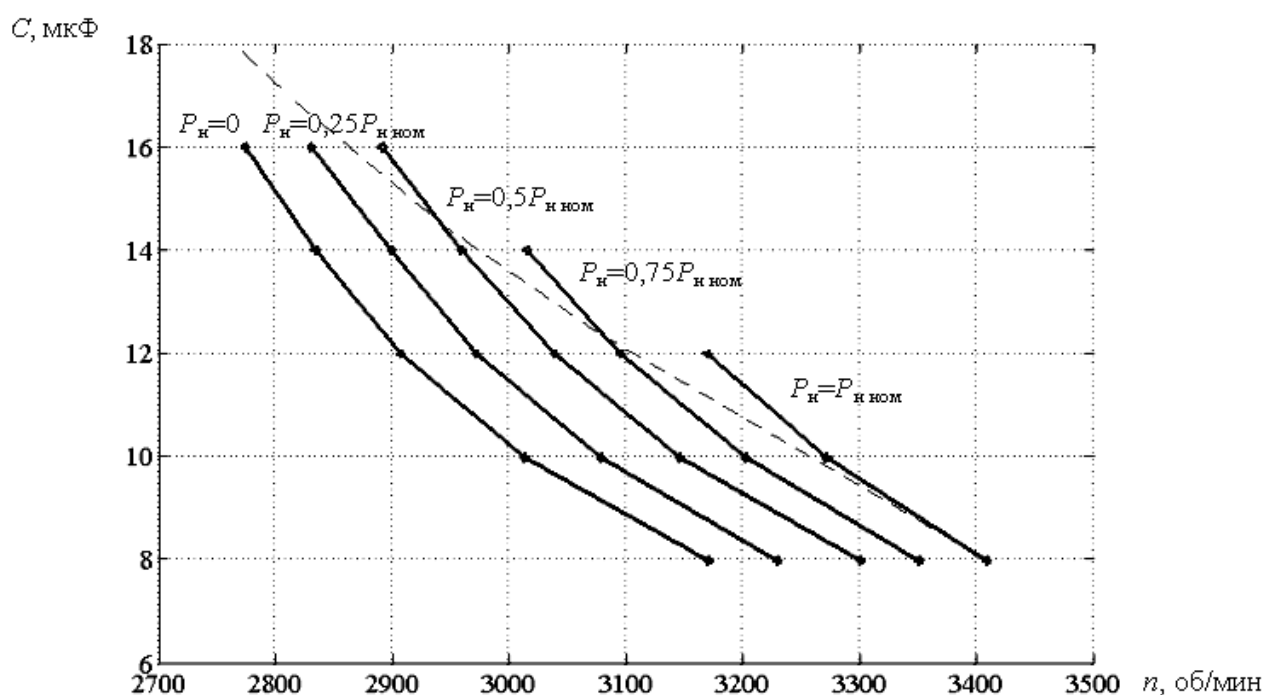


Рис. 3. Кривые зависимостей для  $U_{n \text{ ном}}=515$  В при  $C=\text{var}$ ,  $n=\text{var}$ ,  $P_n=\text{var}$

На рис. 3 приведены кривые, соответствующие номинальному напряжению нагрузки  $U_{n \text{ ном}}=515$  В при различной мощности нагрузки. Как видно, каждой нагрузке соответствует несколько вариантов сочетания ёмкости конденсаторов возбуждения  $C$  и скорости вращения ротора генератора  $n$ . Возникает задача выбора оптимального варианта. Критерием оптимальности должен служить минимум расхода топлива приводного двигателя. Вместе с тем необходимо учитывать некоторые технические ограничения.

На рис. 3 пунктирная кривая соответствует номинальному току статора  $I_{c \text{ ном}}=3,26$  А, то есть режимы работы блока на характеристиках, расположенных выше этой кривой, приводят к перегрузке генератора и не могут являться длительными. Например, длительное поддержание выходного напряжения блока на уровне номинального при мощности нагрузки  $P_n=P_{n \text{ ном}}$  возможно только при  $n=3400$  об/мин (рис.3). Перегрузка генератора по току статора в номинальном режиме объясняется тем, что ток статора складывается из тока генератора и тока батареи конденсаторов (рис. 1).

$$I_c = I_r + I_{BK}, \quad (2)$$

то есть чем больше ёмкость конденсаторной батареи, тем выше ток статора. Это обстоятельство необходимо также учитывать и при выборе мощности силовой установки на базе асинхронного генератора. Кроме того, существуют ограничения по максимальной скорости вращения ротора генератора со стороны приводного двигателя.

**Выводы.** Проведённые исследования показали, что регулирование напряжения на выходе блока «асинхронный генератор – выпрямитель» достижимо посредством управления по двум каналам: скорости вращения приводного двигателя и реактивной мощности возбуждения. Управление по каналу реактивной мощности возбуждения является дискретным. Точность регулирования достигается за счёт плавного изменения скорости вращения вала приводного двигателя. В дальнейшем необходимо теоретическое обоснование такого способа регулирования напряжения для создания возможности синтеза системы управления режимами силовой установки на базе асинхронного двигателя с учётом всех ограничений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Торопцев Н.Д. Асинхронные генераторы для автономных электроэнергетических установок / Н.Д. Торопцев. М.: НТФ «Энергопрогресс», 2004. 87 с.
2. Теория и методы расчёта асинхронных турбогенераторов / И.М. Постников, А.В. Новиков, Ю.А. Прокофьев и др. Киев: Наукова думка, 1977. 175 с.
3. Григораш О.В. Асинхронные генераторы в системах автономного электроснабжения / О.В. Григораш // Электротехника. 2002. №1. С.30 – 34.
4. Джендубаев А-З.Р. Стабилизация напряжения автономного асинхронного генератора путём использования электроприёмников с индивидуальными конденсаторами / А-З.Р. Джендубаев // Электротехника. 2001. №7. С.30 – 33.
5. Вокин И.А. Применение асинхронных генераторов в автономных системах электроснабжения с перестраиваемой структурой / И.А. Вокин // Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности: материалы V Рос. науч.-техн. конф. Т.1. Ульяновск, 2006. С. 144 – 147.
6. Артюхов И.И. Повышение эффективности систем автономного электроснабжения на объектах нефтегазовой промышленности / И.И. Артюхов, А.В. Коротков // Проблемы электроэнергетики: межвуз. науч. сб. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2006. С. 4 – 16.

**Артюхова Ирина Ивановна** –

магистрант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета.

**Вокин Игорь Александрович** –

аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета.

*Статья поступила в редакцию 27 октября 2007г., принята к опубликованию 3 ноября 2007г.*

УДК 621.365.5.

Е.В. Анфиногорова

### **ПРИМЕНЕНИЕ СВЧ ЭНЕРГОПОДВОДА В СУШИЛКАХ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ СРЕД**

*Рассмотрены перспективы применения энергии СВЧ электромагнитных колебаний в сушилках мелкодисперсных материалов.*

E.V. Anfinogenova

### **USING UHF POWER PROVIDING IN DRYER FINE-DYSPERSATED AMBIENCES**

*The considered prospects of the using to energy UHF electromagnetic fluctuations in dryer fine-dyspersated material.*

При производстве мелкодисперсных материалов, например цемента [1], всегда имеется стадия сушки. Если сушке подвергается сырье (до помола), то наиболее эффективным способом энергоподвода является облучение обрабатываемого материала мощным СВЧ излучением [2], так как в этом случае можно интенсифицировать процесс сушки за счет объемного тепловыделения. СВЧ сушка должна сопровождаться продувкой рабочей камеры, чтобы обеспечить конвективную составляющую сушки, с помощью которой удаляются вышедшие из обрабатываемого объекта пары жидкости.

Ситуация существенно усложняется, если речь идет о сушке мелкодисперсного материала. В этом случае поток воздуха в рабочей камере, создаваемый воздуходувкой, будет уносить с собой высушиваемый мелкодисперсный материал. В то же время отказ от конвективной составляющей при СВЧ энергоподводе приводит к существенному повышению плотности водяных паров у поверхности обрабатываемого материала, что, в свою очередь, затруднит перенос влаги диффузией изнутри обрабатываемого материала в окружающую среду.

Указанную проблему можно разрешить следующим образом (рис.1). С помощью воздуходувки в трубе, выполненной из влагопоглощающего материала, создается турбулентный поток воздуха с мелкодисперсным материалом. Благодаря турбулентности потока влагосодержание материала за счет соприкосновения с трубой будет уменьшаться. Если поместить влагопоглощающую трубу в СВЧ электромагнитное поле, то за счет СВЧ энергоподвода эта труба будет нагреваться и при наличии достаточного воздушного потока, создаваемого второй воздуходувкой вдоль внешней поверхности трубы, полученная ею влага будет испаряться с наружной поверхности.

Чтобы увеличить эффективность этой схемы сушки, труба может быть многократно изогнута. Производительность сушилки увеличится, если в одной рабочей камере применить необходимое количество изогнутых труб.

СВЧ электромагнитное поле создается с помощью источников СВЧ энергии, собранных на магнетронах в качестве СВЧ генераторов, а равномерный СВЧ энергоподвод можно обеспечить, применив систему рупорных или волноводно-щелевых излучателей [3].

При реализации этой идеи необходимо решить ряд задач:

– выбрать материал трубы, способный поглощать влагу при соприкосновении с ним турбулентного потока воздуха, содержащего влажный мелкодисперсный материал;

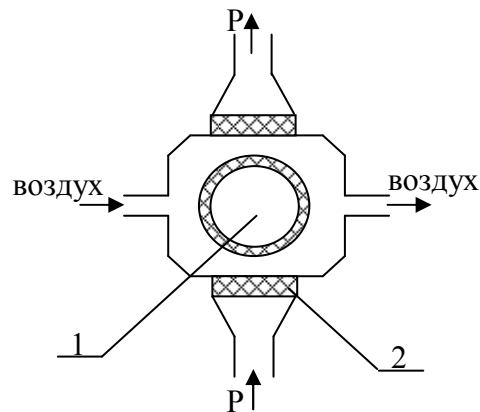


Рис.1. Конструкция СВЧ сушилки мелкодисперсного влажного материала:  
1 – турбулентный поток; 2 – радиопроницаемые диэлектрические пластины

- экспериментально определить уменьшение влагосодержания на единице длины влагопоглощающей трубы в зависимости от ее температуры, влагосодержания мелкодисперсного материала и параметров турбулентного потока;
- рассчитать длину влагопоглощающей трубы и количество ее поворотов, при которых будет достигнута наибольшая компактность конструкции;
- рассчитать количество изогнутых труб, обеспечивающих заданную производительность сушилки;
- спроектировать камеру лучевого типа для сушки изогнутых труб; исследовать СВЧ нагрев влажного мелкодисперсного материала в турбулентном потоке внутри трубы;
- на базе системного подхода провести технико-экономическое сопоставление СВЧ сушилки мелкодисперсного влажного материала с традиционными сушилками.

### Выводы

1. Предложена конструкция СВЧ сушилки мелкодисперсного материала на базе водопоглощающей трубы, по которой высушиваемый материал перемещается в турбулентном потоке воздуха.
2. Сформулированы экспериментальные, теоретические и технико-экономические задачи, которые надо решить для построения такой СВЧ сушилки.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Дуда В. Цемент / В. Дуда; под ред. Б.Ю. Юдовича. М.: Стройиздат, 1981. 464 с.
2. Архангельский Ю.С. СВЧ электротермия / Ю.С. Архангельский. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 1998. 408 с.
3. Огурцов К.Н. Разработка методов проектирования СВЧ камер лучевого типа для нагрева диэлектриков больших объемов и площадей / К.Н. Огурцов // Электро- и теплотехнологические процессы и установки: межвуз. науч. сб. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2003. С. 47-54.

### Анфиногорова Евгения Владимировна –

студентка специальности «Электротехнологические установки и системы» кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета

Статья поступила в редакцию 27 октября 2007г., принята к опубликованию 3 ноября 2007г.



Е.В. Колесников

## ЦЕНЫ, ТАРИФЫ И КОММЕРЧЕСКИЙ РАСЧЕТ В ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

*Рассмотрено влияние цен, тарифов и коммерческого расчета на эффективность электротехнологических установок.*

E.V.Kolesnikov

## THE PRICES, TARIFFS AND COMMERCIAL PAYMENT IN ELECTROTECHNICS

*The considered influence of the prices, tariff and commercial payment on efficiency electro-technics installation.*

Вопросы ценообразования в электротехнологии и установления тарифов на электроэнергию и холодную воду находятся за рамками проектирования электротехнологических установок, но разговор о ценах и тарифах необходим, так же как цены установки, сырья и готовой продукции, а также в тарифы входят в выражение интегрального эффекта [1]:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{\Sigma} = & (ПЦ + П_g C_g - C_c)(1 - \gamma_n - \gamma_{ндс})(1 - \gamma_y) - \\ & - (C_{\text{э}} + C_{\text{зн}} + C_{\text{зч}} + C_a + C_{\text{бр}})(1 - \gamma_n)(1 - \gamma_y) - C_{\text{ни}} - K(1 + i_{\text{кр}}), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $П, П_g$  – количество основной и дополнительной продукции;  $C_{\text{зч}}$  – затраты на запасные части;  $Ц, C_g$  – цены единицы основной и дополнительной продукции;  $C_c$  – затраты на сырье;  $\gamma_n, \gamma_{ндс}, \gamma_y$  – коэффициенты, учитывающие налоги и выплату дивидендов;  $C_{\text{э}}$  – затраты на электроэнергию и воду, потребляемые установкой;  $C_{\text{зн}}$  – затраты на заработную плату.

Пусть  $П_g C_g = Q_{\text{эв}} T_{\text{эв}}$ ;  $C_c = ПЦ_c / \mathcal{E}_{\phi}$ ;  $C_{\text{э}} = Q_{\text{э}} T_{\text{эв}}$ ;  $C_{\text{зч}} = K_{\text{зч}} K$ ;  $C_a = K_a K$ , тогда соотношение (1) примет вид

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{\Sigma} = & \left[ П \left( Ц - \frac{Ц_c}{\mathcal{E}_{\phi}} \right) + Q_{\text{эв}} T_{\text{эв}} \right] (1 - \gamma_n - \gamma_{ндс})(1 - \gamma_y) - \\ & - (Q_{\text{э}} T_{\text{э}} + Q_{\text{эв}} T_{\text{эв}} + C_{\text{зн}} + K_{\text{зн}} K + Y + K_a K + C_{\text{бр}})(1 - \gamma_n)(1 - \gamma_y) - C_{\text{ни}} - K(1 + i_{\text{кр}}) \end{aligned} \quad (2)$$

;

где  $Q_{\text{э}}, Q_{\text{эв}}, Q_{\text{эв}}$  – расходы электроэнергии, холодной и горячей воды в год;  $T_{\text{э}}, T_{\text{эв}}, T_{\text{эв}}$  – тарифы на электроэнергию, холодную и горячую воду;  $K_{\text{зч}}, K_a$  – коэффициенты, учитывающие долю капитальных затрат  $K$ , приходящуюся на запасные части (резервирование) и на амортизационные расходы;  $Ц_c$  – цена единицы сырья;  $\mathcal{E}_{\phi}$  – физическая эффективность установки, причем в технико-экономических оптимизационных процедурах цены, входящие в (2), следует представить в виде аппроксимации:

$$Ц = aP^2 + bP + c. \quad (3)$$

Согласно (2), интегральный эффект (экономическая эффективность) тем больше, чем меньше цена установки (проекта), то есть чем меньше приходится брать банковский кредит, необходимый для реализации проекта.

На стадии обоснования целесообразности проекта желательно знать величину капиталовложений  $K$ , при которых установка будет приносить прибыль. Если установка выпускает один вид продукции, свою цену имеет горячая вода, получаемая при охлаждении установки, кредит взят на один год в начале реализации проекта, установка через год не демонтируется,  $Q_{zv} = Q_{xv} = Q_g$ , то из соотношения (2) при  $\mathcal{E}_\Sigma = 0$  получим

$$K_{\max} = \frac{\left[ P \left( C - \frac{C_c}{\mathcal{E}_\phi} \right) + Q_g T_{zv} \right] (1 - \gamma_n - \gamma_{ндс}) (1 - \gamma_y)}{1 + i_{кр} + (K_a + K_{zn}) (1 - \gamma_n) (1 - \gamma_y)} - \frac{(Q_g T_\varepsilon + Q_g T_{xv} + C_{zn} + Y + C_{бр}) (1 - \gamma_n) (1 - \gamma_y) - C_{ни}}{1 + i_{кр} + (K_a + K_{zn}) (1 - \gamma_n) (1 - \gamma_y)}. \quad (4)$$

Соотношение (4) определяет максимальную цену установки (проекта), при которой инвестор может в течение первого года эксплуатации установки вернуть банку кредит, выплатить налоги и дивиденды при условии стабильности цены на сырье  $C_c$  и тарифов на электроэнергию  $T_\varepsilon$  и воду  $T_{xv}$ . Если эти цены и тарифы вырастут, то для выполнения своей инвестиционной политики инвестор должен будет увеличить цену выпускаемой установкой продукции. Проект будет тем более экономически эффективным, чем меньше реальные капиталовложения, то есть при условии  $K < K_{\max}$ .

Соотношение (4) позволяет учесть влияние на величину максимально допустимой цены установки затраты на научные исследования, неизбежный брак (методический режим работы), величины банковского процента, действующей системы налогов и выплаты дивидендов. Рост тарифов на электроэнергию и воду, цены на элементы электротехнологических установок существенно влияют на экономическую эффективность технологических процессов и реализующих их установок. В последние десятилетия по этой причине спрос на СВЧ электротермические установки упал. Таким образом, ценообразование в электротехнологии превратилось в серьезную проблему. Ее решение можно искать на базе коммерческого расчета как эффективного метода хозяйствования [2].

Этот метод включает функцию управления, экономические рычаги и направлен на соизмерение затрат и прибыли. В рамках этого метода политика ценообразования должна быть ориентирована на приспособление уровня цен к требованиям и условиям рынка, первостепенное значение получает снижение затрат за счет совершенствования технологий производства, внедрения новой продукции, отличающейся новыми потребительскими свойствами и повышенным качеством, совершенствование форм хозяйственных связей со смежными фирмами, повышение производительности труда, экономии на транспортных и других накладных расходов.

Коммерческий расчет как метод хозяйствования при рыночной экономике реализуется в условиях монополизации в сфере производства. Динамика рыночной экономики такова, что порождаемая ею монополизация наносит ей серьезные потери, поскольку порождает тенденцию к торможению научного прогресса: монополисту не нужно снижать затраты, заботиться об освоении новых технологий, поскольку ему проще и прибыльнее установить монопольно высокие цены, продавать товары в ограниченном количестве, не повышая их качества.

В этих условиях в рамках коммерческого расчета изготовители электротехнологических установок для получения устойчивой прибыли должны координировать свою деятельность, стремясь обеспечить приемлемый для потенциальных заказчиков уровень цен. Требу-

емые для производства дорогостоящее оборудование, большие капиталовложения, окупающиеся при массовом производстве продукции, являются основой для сотрудничества изготовителя и заказчиков.

### Выводы

1. Получено выражение для максимально допустимой величины капиталовложений в проект электротехнологической установки, при котором эта установка в процессе эксплуатации позволит в течение первого года расплатиться с кредиторами и будет экономически эффективной.

2. Проанализировано влияние цен, тарифов и коммерческого расчета на экономическую эффективность электротехнологического оборудования. Показано, что коммерческий расчет позволяет гармонизировать отношения производителя электротехнологического оборудования и заказчиков.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Колесников Е.В. Проектирование электротехнологических установок / Е.В. Колесников. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2006. 282 с.
2. Герчикова И.Н. Менеджмент / И.Н. Герчикова. М.: Банки и биржи, ЮНИТИ, 1997. 502 с.

#### **Колесников Евгений Владимирович –**

заместитель начальника управления Ростехнадзора по Саратовской области, доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета

*Статья поступила в редакцию 27 октября 2007г., принята к опубликованию 3 ноября 2007г.*

УДК. 621.365.5

Е.В. Колесников

### **ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ УСТАНОВОК СВЧ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАГРЕВА**

*Рассмотрены системы загрузки и выгрузки обрабатываемого объекта, удаление паров из рабочей камеры, управления и транспортировки объекта в установках СВЧ диэлектрического нагрева.*

E.V.Kolesnikov

### **ACCESSORY OF THE INSTALLATION UHF DIELECTRIC HEATING**

*The considered systems of the loading and unloading the processed object, removing the working chamber of management and transportations of the object in installation UHF dielectric heating.*

Вспомогательное оборудование СВЧ диэлектрического нагрева (У СВЧ ДН) состоит из систем загрузки и выгрузки обрабатываемого объекта, удаления паров из рабочей камеры, управления и транспортировки объекта.

Системных исследований вспомогательного оборудования пока нет [1], а имеются лишь отдельные публикации, носящие фрагментарный характер [2, 3]. Среди проектировщиков бытует мнение, что для удешевления установки следует минимизировать вспомогательное оборудование. В то же время в установках, работающих в методическом режиме или реализующих, например, сушку, особенно биологически активных сред, роль вспомогательного оборудования велика. Рассмотрим имеющиеся здесь проблемы и возможные пути их решения. В отношении системы загрузки и выгрузки У СВЧ ДН, работающих в периодическом режиме, никаких оптимизационных задач не возникает. В этом случае она представляет собой дверцу или крышку в одной из стенок рабочей камеры, и от нее требуется лишь обеспечить загрузку обрабатываемого объекта заданных габаритов и не превышающий предельно допустимый уровень излучений из рабочей камеры. Обе задачи легко решаются при конструировании рабочей камеры. Совсем другое дело – система загрузки и выгрузки У СВЧ ДН, работающей в методическом режиме. В этом случае при проектировании установки следует учитывать взаимосвязь параметров транспортной системы и в первую очередь скорости перемещения объекта в рабочей камере с СВЧ мощностью, генерируемой источником энергии, и параметрами входного и выходного шлюзов.

Классификация транспортных систем У СВЧ ДН появилась лишь в последние годы [4]. Реально в системах загрузки и выгрузки У СВЧ ДН, работающих в методическом режиме, используются ленточные конвейеры для штучных объектов или для насыпного материала, напорные гидравлические системы для жидких материалов и самотечные системы для сыпучих материалов. Во всех этих случаях приходится оптимизировать в первую очередь скорость транспортировки обрабатываемого объекта, так как от нее зависит изменение температуры объекта при его перемещении и, как следствие, длина рабочей камеры. Если, например, по результатам технико-экономической оптимизации структуры и параметров У СВЧ ДН одна установка должна иметь оптимальную объемную производительность  $G_{opt}$ , то оптимальная скорость транспортировки обрабатываемого объекта равна:

$$v_{opt} = \frac{G_{opt}}{S}, \quad (1)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения обрабатываемого объекта в транспортной системе, рассчитываемая из условий согласований рабочей камеры с СВЧ генератором и эффективно-го тепловыделения в объекте.

Пусть температура объекта в рабочей камере

$$T_n = \frac{\Delta\theta}{\tau_n}, \quad (2)$$

где  $\Delta\theta = \theta_{зад} - \theta_0$ ;  $\theta_{зад}$ ,  $\theta_0$  – заданная и начальная температуры в процессе термообработки;  $\tau_n = \ell / v_{opt}$  – время пребывания (нагрева) обрабатываемого объекта в рабочей камере, тогда из (2):

$$\ell_{opt} = \frac{v_{opt}\Delta\theta}{T_n}. \quad (3)$$

Если расчеты проводятся для  $T_{n\max}$ ,  $T_0$ ,  $\ell_{opt\min}$  и минимальных затрат на изготовление рабочей камеры, то это позволяет обеспечить максимальную экономическую эффективность всей установки.

Особого внимания при проектировании У СВЧ ДН, работающих в методическом режиме, требуют шлюзы системы загрузки и выгрузки. Недопустимо большой уровень излучения через эти шлюзы в окружающее установочное пространство делает ее попросту непригодной к эксплуатации. Длина шлюза должна удовлетворять соотношению

$$P_m e^{-2\alpha\ell} = S_m P_{\text{дон}}, \quad (4)$$

где  $P_m = (1 - |\Gamma|^2) K_{\text{ш}} P$  – мощность СВЧ на входе в шлюз со стороны рабочей камеры;  $\alpha$  – коэффициент затухания того типа электромагнитной волны, возбуждаемой в шлюзе, который переносит наибольшую мощность;  $\ell$  – длина шлюза;  $S_m$  – площадь поперечного сечения шлюза;  $P_{\text{дон}} = 10 \text{ мк} \cdot \text{В/см}^2$  при работе У СВЧ ДН полную смену;  $\Gamma$  – коэффициент отражения от рабочей камеры;  $P$  – мощность СВЧ генератора;  $K_{\text{ш}}$  – доля мощности СВЧ генератора, поступающей в шлюз со стороны рабочей камеры.

Из (4)

$$\ell = \frac{1}{2\alpha} \ell_n \frac{(1 - |\Gamma|^2) K_{\text{ш}} P}{S_m P_{\text{дон}}}. \quad (5)$$

Широкому применению соотношения (5) мешает сложность в определении  $\alpha, K_{\text{ш}}$ . По этой причине длина шлюза обычно подбирается экспериментально.

Что касается движения сыпучих материалов в самотечных системах и жидких материалов в напорных системах, то оно рассмотрено в [5].

Мощность электродвигателя транспортной системы  $P_{\text{мп}}$  можно рассчитать по соотношению

$$P_{\text{мп}} = \frac{\kappa_3 G (\kappa_c L \pm H_0) g \rho}{1000 \eta_3}, \quad (6)$$

где  $\kappa_3 = 1,15 \div 1,25$  – коэффициент запаса мощности;  $\kappa_c = 0,1 \div 4,2$  – обобщенный коэффициент сопротивления, зависящий от сопротивления опорных элементов, приводных, загрузочных и очистительных устройств конвейера (меньшие значения относятся к ленточным и другим несущим конвейерам, большие – к винтовым и другим конвейерам, работающим по принципу волочения);  $L$  – длина транспортной системы;  $H_0$  – высота подъема груза;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $\rho$  – плотность обрабатываемого объекта;  $\eta_3 = 0,75 \div 0,8$  – КПД передаточного механизма. Здесь  $P_{\text{мп}}$  в кВт, если  $G$  в м<sup>3</sup>/с,  $L$  и  $H_0$  в м,  $g$  в м/с<sup>2</sup>,  $\rho$  в кг/м<sup>3</sup>.

При  $\theta < 80^\circ\text{C}$  обычно коэффициенты теплоотдачи конвекцией  $h_k$  и излучением  $h_A$  невелики, так что

$$\frac{h_k + h_A}{(1 - |\Gamma|^2) P} < 1, \quad (7)$$

но тогда в установившемся режиме

$$G = \frac{(1 - |\Gamma|^2) P}{c \rho \theta_{\text{зад}}}, \quad (8)$$

так что соотношение (6) примет вид

$$P_{\text{мп}} = \frac{\kappa_3 g \rho (1 - |\Gamma|^2) (\kappa_c L \pm H_0)}{1000 \eta_3 c \theta_{\text{зад}}}. \quad (9)$$

Это соотношение позволяет рассчитывать затраты на электроэнергию, потребляемую электродвигателем транспортной системы.

Наиболее приспособленными для применения ленточных конвейеров являются камеры лучевого типа (КЛТ). В электроприводе транспортной системы можно использовать асинхронный электродвигатель и электродвигатель постоянного тока. В первом случае требуется редуктор, а во втором – управляемый преобразователь переменного тока в постоянный. При выборе между ними надо учитывать два обстоятельства:

- всегда желательно иметь возможность регулировать скорость транспортировки.

Это наряду с регулировкой СВЧ мощности даёт возможность построения многоцелевых КЛТ;

- цена электропривода.

Входящие в состав системы загрузки и выгрузки конвейерная лента, опорные ролики из не поглощающего СВЧ энергию материала, другие элементы, располагаемые вне рабочей камеры, каким-либо специальным образом не оптимизируются, но их размеры, конечно, зависят от габаритов рабочей камеры, а затраты на их изготовление учитываются при технико-экономической оптимизации структуры и параметров СВЧ электротермического оборудования и влияют на его экономическую эффективность.

Система удаления паров нужна главным образом при сушке обрабатываемого объекта, так как без конвективной составляющей СВЧ сушка оказывается малоэффективной. От этой системы зависит коэффициент теплоотдачи конвекцией.

Мощность электродвигателя воздуходувки можно рассчитать по соотношению

$$P_{\text{возд}} = \frac{\kappa_3 G_{\text{возд}} \Delta p}{1000 \eta_{\text{возд}}},$$

где  $G_{\text{возд}}$  – расход воздуха;  $\Delta p$  – потери давления в рабочей камере;  $\eta_{\text{возд}} = 0,8 \div 0,9$  – КПД вентилятора. Здесь  $P_{\text{возд}}$  в кВт, если  $G_{\text{возд}}$  в м<sup>3</sup>/с,  $\Delta p$  в Н/м<sup>2</sup>, причём

$$G_{\text{возд}} = v_{\text{возд}} S_n,$$

где  $S_n$  – площадь, с которой происходит испарение,  $v_{\text{возд}}$  – скорость воздуха в рабочей камере (направление потока воздуха перпендикулярно к поверхности  $S_n$ ), а потери давления находим из уравнения Бернулли

$$\Delta p = g \rho_{\text{возд}} \left( \frac{v_{\text{возд вых}}^2 - v_{\text{возд вх}}^2}{2g} + H \right),$$

где  $\rho_{\text{возд}}$  – плотность воздуха;  $v_{\text{возд вых}}$ ,  $v_{\text{возд вх}}$  – скорость воздушного потока на выходе и входе рабочей камеры по воздушному потоку;  $H$  – потери напора на воздуховоде. Здесь  $\rho$  в кг/м<sup>3</sup>;  $g$  в м/с<sup>2</sup>;  $v_{\text{возд}}$  в м/с;  $H$  в м.

Расчёт  $\Delta p$  сводится к определению путевых и местных потерь напора в воздуховоде, а потому может быть проведён только для конкретной конструкции.

Наконец, подачу воздуха в рабочую камеру нужно проводить через систему отрезков запредельных круглых волноводов, длины которых могут быть рассчитаны по соотношению (5).

Что касается системы управления, то для удешевления УСВЧ ДН стремятся спроектировать ее так, чтобы не требовалось контрольно-измерительных средств и специальной системы управления. Если установка рассчитана на ту мощность, которую генерирует источник энергии и не требуется регулировка мощности СВЧ, рабочая камера хорошо согласо-

вана с СВЧ генератором и не требуется его автоматическая защита от больших отражений, установка работает в методическом режиме и не надо автоматической блокировки генератора из-за неплотно закрытой дверцы, то в У СВЧ ДН от системы управления остаются лишь тумблеры включения и выключения источника энергии, электродвигателей транспортной системы и удаления паров. В этом случае затраты на систему управления минимальна, а экономическая эффективность У СВЧ ДН выше.

Система управления существенно усложняется при обработке биологически активных сред (сельскохозяйственной продукции). Например, если при СВЧ пастеризации температура молока на выходе меньше температуры пастеризации, то молоко не должно поступать в камеру охлаждения готовой продукции. Без контроля начальной и конечной влажности сыпучего материала можно получить на выходе СВЧ сушилки неисправимый брак. Таким образом, в СВЧ пастеризаторе нужна система с распределенными по структурным частям элементами управления, а в СВЧ сушилке – система регулирования СВЧ мощности и производительности вентилятора.

Пока отсутствие адаптированных к задачам У СВЧ ДН датчиков не позволяет в полной мере реализовать систему динамического управления, когда на базе микропроцессорной техники обеспечивалась бы автоматическая настройка установки в зависимости от параметров объекта на выходе и входе установки (его габаритов, влажности, электрофизических и теплофизических свойств, зависимостей этих параметров от температуры и влажности).

### Выводы

1. Рассмотрены проблемы вспомогательного оборудования установок СВЧ диэлектрического нагрева и пути их решения.
2. Приведены соотношения для расчета оптимальной скорости транспортной системы, длины туннеля методической установки, длины ее входного и выходного шлюза, мощностей электродвигателей транспортной системы и воздуходувки.
3. В целях удешевления установки в ряде случаев установку СВЧ диэлектрического нагрева можно спроектировать так, что система управления сводится лишь к тумблерам включения и выключения. Крупной проблемой при проектировании систем управления является отсутствие датчиков, адаптированных к задачам реализуемого электрического процесса.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Архангельский Ю.С. Элементная база СВЧ электротермического оборудования / Ю.С. Архангельский, В.А. Воронкин. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2003. 213 с.
2. Архангельский Ю.С. СВЧ электротермия / Ю.С. Архангельский. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 1998. 408 с.
3. Сатаров И.К. Микроволновые устройства с бегущей волной для термообработки материалов / И.К. Сатаров, В.В. Комаров. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2000. 120 с.
4. Петров Д.Ю. Классификация транспортных систем СВЧ технологических установок / Д.Ю. Петров // Электротехнология на рубеже веков: сб. науч. статей по материалам науч.-техн. конф. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2001. С. 21-23.
5. Колесников Е.В. Проектирование электротехнологических установок / Е.В. Колесников. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2006. 282 с.

**Колесников Евгений Владимирович –**

заместитель руководителя Ростехнадзора по Саратовской области, доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета.

Статья поступила в редакцию 27 октября 2007г., принята к опубликованию 3 ноября 2007г.  
УДК 621.365:519.711.3

В.Ю. Кожевников

## МОНИТОРИНГ СПЕКАНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В СВЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ

*Рассматривается мониторинг спекания керамических материалов в сверхвысококачественном электромагнитном поле с учетом зависимости диэлектрических характеристик от температуры. На основании результатов численного моделирования, выполненного на базе математической модели спекания, анализируется распределение температур в спеке керамик.*

V.Y. Kozhevnikov

## MONITORING OF MICROWAVE ELECTROMAGNETIC SINTERING OF CERAMIC SOLIDS

*Monitoring of microwave electromagnetic sintering of ceramic solids considering dependence of dielectric parameters on temperature is observed here. Allocation of temperature in ceramic sinter is analyzed on basis of numerical modeling results obtainusing the given model.*

Оксид алюминия, являясь одним из наиболее перспективных керамических материалов для широкого спектра конструкционных применений с энергонапряженными условиями эксплуатации, обладает высокой твердостью, термостойкостью, химической инертностью, с одной стороны, и доступностью – с другой. На основе  $Al_2O_3$  целесообразно разрабатывать керамики, подвергающиеся интенсивному воздействию эрозийного, абразивного и ударного характера, в том числе в агрессивных средах при высоких давлениях. Керамики на основе  $Al_2O_3$  с крупнокристаллической структурой характеризуются хрупкостью, низкой трещиностойкостью и высокой чувствительностью к эрозионному и абразивному воздействию, что ограничивает их износостойкие применения.

Известно, что многократное повышение износостойкости керамик, в том числе на основе  $Al_2O_3$  может быть реализовано на пути создания материала с наименьшим наноразмерным масштабом структуры при высокой однородности, оптимальной пористости и с хорошо сформированными межкристаллитными границами, предельной плотностью, высокой твердостью и трещиностойкостью. Создание и использование прочной керамики оксида алюминия приведет к многократному улучшению эксплуатационных характеристик широкого спектра объектов техники. Потенциальные предсказываемые возможности наноструктурных керамик стимулировали широкий поиск методов для получения керамик на основе  $Al_2O_3$  с оптимальным соотношением «микротвердость-трещиностойкость».

Проектирование новых керамических материалов с наперед заданными свойствами и оптимизация технологии изготовления существующих, выдвигают на первый план создание мониторинга свойств керамик [1], который предполагает:

1) моделирование процессов, определяющих формирование и потерю прочности материала;



- 2) оценку изменения микроструктурных и прочностных характеристик;
- 3) прогнозирование свойств готового изделия в зависимости от основных структурных параметров и технологических особенностей процесса изготовления.

Метод вычислительного эксперимента позволяет перейти к осуществлению мониторинга свойств керамики с учетом существующих структурных превращений и механизмов разрушения. Решение этой задачи особенно актуально для керамик, обладающих хрупкостью, в отличие, например, от металлов плохо поддающихся корректировке физико-механических свойств после изготовления. Проблему мониторинга свойств хрупких материалов в силу сложности и многогранности возможно рассматривать при ряде упрощающих допущений: пористость материала пренебрежимо мала по сравнению с зернистой фазой; образование и разрушение зерен мостиков за фронтом трещины - наиболее эффективный механизм сопротивления разрушению керамики  $Al_2O_3$ , определяемый анизотропией КТР; расчет параметров, по которым вычисляются микроструктурные и прочностные характеристики, производится путем оценки торможения (стагнации) роста зерен; керамика может быть получена методом горячего прессования, подразумевающего, что характер изменения давления и изменения температуры влияет на аномальный рост зерен, обусловленный примесями, вытесняемыми в процессе первичной рекристаллизации на межзеренные границы, и текстурой материала.

Полное рассмотрение задачи мониторинга предусматривает последовательное моделирование при спекании, остывании и разрушении керамики следующих процессов:

- 1) распространения теплового фронта в заготовке образца;
- 2) рекристаллизации пресспорошка;
- 3) вторичной рекристаллизации или аномального роста зерен при существовании процессов стагнации;
- 4) растрескивания межзеренных границ при остывании;
- 5) процессов мостикообразования за фронтом трещины, изменяющих присущие прочностные характеристики керамики.

Изучение механизма воздействия СВЧ-излучения на материалы различной природы является одним из приоритетных направлений исследований фундаментальной физики и микроэлектроники [2]. В последние годы в мире проявляется повышенный интерес к использованию СВЧ-излучения как способа интенсификации физико-химических процессов и формирования структур материалов. По сравнению с другими способами нагрева вещества СВЧ-нагрев имеет ряд преимуществ, наиболее значимыми из которых являются мгновенная управляемость нагревом, практически исключая возможность превышения заданной температуры. Процесс нагрева может быть и саморегулирующимся, в случае уменьшения тангенса угла диэлектрических потерь.

Математическое описание термообработки спеков керамик в электромагнитном поле сверхвысоких частот дано в работах [3-5] и представляет собой взаимосвязанную самосогласованную задачу электродинамики, теплопроводности, теплопереноса, кинетики химических реакций.

При рассмотрении процессов СВЧ нагрева прекурсоров керамик, когда температурными деформациями и напряжениями можно пренебречь, система уравнений, описывающих процесс спекания керамик в поле СВЧ, сводится к уравнениям Максвелла и теплопереноса.

Для изотропной среды материальные уравнения записываются в виде

$$D = \varepsilon E \quad B = \mu H \quad j = \delta_3 E, \quad (1)$$

где  $D$ ,  $B$  – векторы электрической и магнитной индукции;  $E$ ,  $H$  – векторы напряженности электрического и магнитного полей;  $\varepsilon$ ,  $\mu$  – абсолютная диэлектрическая и магнитная проницаемость среды;  $\delta_3$  – электрическая проводимость;  $j$  – плотность тока проводимости.

$$\operatorname{rot} H = j + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2)$$

$$\operatorname{rot} E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (3)$$

$$\operatorname{div} D = 0 \quad (4)$$

$$\operatorname{div} B = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \nu \nabla T = a \nabla^2 T + \frac{q_v}{c\rho} - \frac{(3l + 2m)\alpha_T T_0}{\lambda} \operatorname{div} u, \quad (6)$$

где  $T$  – температура;  $c, \rho$  – удельная теплоемкость при постоянном давлении и плотность диэлектрика ( $\rho = \sum_{\beta=1}^B \rho_{\beta}$ );  $t$  – время;  $\alpha_T$  – средние коэффициенты термического расширения в интервалах температур  $[T, T_0]$ ;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности.

Решение уравнений электродинамики, теплопереноса возможно при задании соответствующих начальных и граничных условий: на поверхностях раздела сред электромагнитные поля сопрягаются следующими граничными условиями

$$\begin{aligned} [H_2 - H_1, n] = 0, \quad [n, E_2 - E_1] = 0 \\ n(D_2 - D_1) = 0, \quad n(B_2 - B_1) = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

где  $n$  – единичный вектор, направленный из среды 2 в среду 1.

При отсутствии массопереноса на наружной поверхности тела действуют граничные условия четвертого рода (условия сопряжения), которые сводятся к одновременному заданию равенства температур и тепловых потоков на границе раздела сред

$$\begin{aligned} T_{1|S} = T_{2|S}, \\ -\lambda_1 \left( \frac{\partial T_1}{\partial n} \right)_S = -\lambda_2 \left( \frac{\partial T_2}{\partial n} \right)_S, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $T_1$  и  $T_2$  – температуры соприкасающихся сред на границе раздела;  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – коэффициенты теплопроводности;  $n$  – нормаль к поверхности  $S$ .

Решение самосогласованной краевой задачи электродинамики, теплопереноса будем проводить в следующей последовательности: определив зависимости (экспериментально или теоретически) электро-, теплофизических свойств нагреваемого спека керамики от температуры, разбиваем время термообработки на интервалы  $\Delta t$ , в пределах которых эти свойства можно считать постоянными. Решением краевой задачи электродинамики (1)–(6) на каждом интервале определяем функцию мощности внутренних источников тепла в объеме диэлектрика.

По результатам вычислений температур определяются физические свойства материала для последующего интервала времени. Повторением расчетов для новых временных интервалов моделируем динамику процесса с учетом изменяющихся во времени физических свойств обрабатываемого спека керамики.

Для спекания керамики на основе  $Al_2O_3$  необходимо достижение температур порядка  $1500^\circ C$ , которое может быть получено в камере, описанной в [3].

Рабочее пространство камеры, в котором происходит нагрев спека керамики, представляет отрезок волновода квадратного поперечного сечения, который возбуждается совокупностями волноводов связи, расположенными на боковой стенке.

Характер распределения электромагнитного поля в зоне излучателя определяется взаимным расположением волноводов связи и удалением обрабатываемого спека.

Ограничимся рассмотрением простейшего типа плоской электромагнитной волны, тогда краевая задача электродинамики сведется к решению уравнений

$$\frac{dE_x}{dz} = j\omega\mu H_y, \quad \frac{dH_y}{dz} = j\omega\epsilon E_x \quad (9)$$

или

$$\frac{d^2 E_x}{dz^2} = -\omega^2 \epsilon\mu E_x, \quad \frac{d^2 H_y}{dz^2} = -\omega^2 \epsilon\mu H_y. \quad (10)$$

Решение этих уравнений имеет вид

$$\begin{aligned} E_x &= E_{np} + E_{об} = A_1 e^{-\gamma z} + A_2 e^{-\gamma z}, \\ H_y &= H_{np} + H_{об} = \frac{E_{np}}{\eta} + \frac{E_{об}}{\eta}, \end{aligned} \quad (11)$$

где  $E_{np}$ ,  $H_{np}$ ,  $E_{об}$ ,  $H_{об}$ ,  $A_1$ ,  $A_2$  – напряженности и амплитуды прямой и обратной волн.

Если,  $\mu' = 1$ , то постоянную затухания  $\alpha$ , фазовый коэффициент  $\beta$ , постоянную распространения плоской волны  $\gamma$  и характеристическое сопротивление  $\eta$  среды, в которой распространяется волна, можно записать в виде

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{377}{\sqrt{\epsilon}}; \quad \gamma = \alpha + j\beta = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon\mu} \\ \alpha &= \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon'} \sqrt{\frac{1}{2}(\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} - 1)}; \quad \beta = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon'} \sqrt{\frac{1}{2}(\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} + 1)}. \end{aligned} \quad (11)$$

В соответствии с рассмотренными плотность активной мощности определится выражением

$$P(z) = P \frac{\left(1 - |\Gamma_2|^2\right) \left|1 - \Gamma_3 \Gamma(l_1)\right|^2 \left|1 + \Gamma(z)\right|^2 \operatorname{Re} Z_{ex_2}(z) \left|Z_{ex_2}(l_1)\right|^2 \left|e^{-\gamma_2(z-l_1)}\right|^2}{\left|1 - \Gamma_1 \Gamma_2 e^{-2\gamma_1 l_1}\right|^2 \left|1 - \Gamma_3 \Gamma(z) e^{-2\gamma_2(z-l_1)}\right|^2 \left|1 + \Gamma(l_1)\right|^2 \operatorname{Re} Z_{ex_2}(l_1) \left|Z_{ex_2}(z)\right|^2}. \quad (13)$$

Для расчета зависимости превышения температуры объекта над температурой окружающей среды  $T = T(z, t)$  используем метод элементарных тепловых балансов [5]. В соответствии с данным методом разобьем весь объем объекта на элементарные слои толщиной  $\Delta l_i$ . Для внутренних и наружных слоев с номерами  $i$  на шаге  $j$  по времени температура может быть найдена соответственно по соотношениям

$$\begin{aligned} T_{i,j+1} &= T_{i,j} + \left( q_{vi} \Delta l - k_{Ti} (T_{i,j} - T_{i-1,j}) - k_{Ti} (T_{i,j} - T_{i+1,j}) \right) \frac{\Delta \tau}{c_i \rho_i \Delta l}, \\ T_{i,j+1} &= T_{i,j} + \left( q_{vi} \Delta l - k_{Ti} (T_{i,j} - T_{i-1,j}) - k_{ci} (T_{i,j} - T_e) \right) \frac{\Delta \tau}{c_i \rho_i \Delta l}. \end{aligned} \quad (14)$$

Здесь  $q_{vi} = \frac{|P(z_i) - P(z_{i-1})|}{\Delta l}$  – мощность потерь в  $i$ -м слое объекта;  $c_i, \rho_i$  – удельная теплоемкость и плотность;  $\Delta l$  – толщина слоя;  $\Delta t$  – интервал времени нагрева;  $T_B$  – температура окружающей среды;  $k_{Ti}, k_{ci}$  – тепловые проводимости соответственно между внутренними слоями и между телом и окружающей средой, для плоской одномерной задачи их можно определить по формулам

$$k_{Ti} = \frac{\lambda_i}{\Delta l}, \quad k_{ci} = \frac{1}{\frac{\Delta l}{2\lambda_i} + \frac{1}{h_\kappa}},$$

где  $\lambda_i$  – коэффициент теплопроводности.

Расчеты по (14) проводятся для  $i$  плоских слоев, на которые разбивается объект для все новых шагов по времени  $j$  с учетом зависимостей  $\varepsilon'_2(T)$ ,  $\operatorname{tg}\delta_2(T)$  до тех пор, пока температура какого-либо слоя не достигает допустимого для данного технологического процесса значения. При этом с учетом (13) от слоя к слою рассчитывается  $Z_{BX2}$  для каждого интервала времени.

В процессе термообработки спека керамики  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с изменением температуры изменяются диэлектрические параметры.

Зависимости диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь от температуры представлены на рис.1.

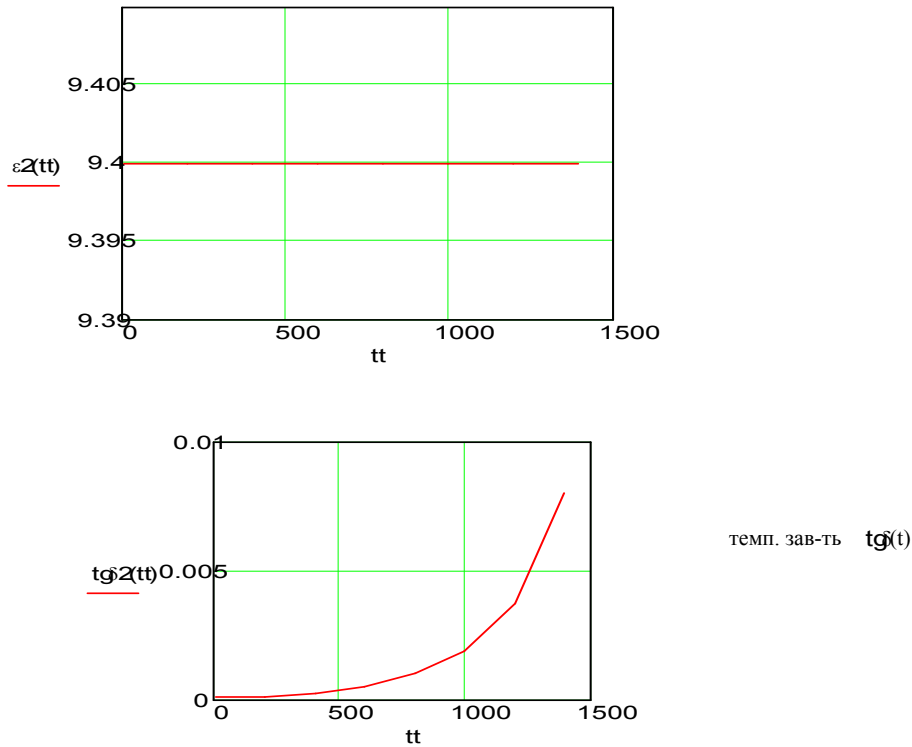


Рис.1. Зависимости диэлектрических характеристик  $\text{Al}_2\text{O}_3$  от температуры

Результаты моделирования поля температур при нагревании спеков керамик  $\text{Al}_2\text{O}_3$  представлены на рис.2.

### Распределение температур по толщине объекта

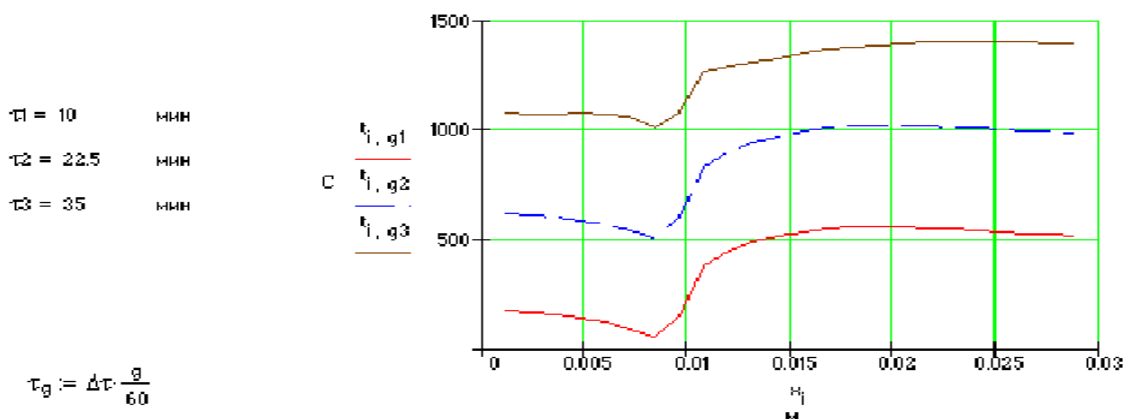


Рис.2. Распределение температуры в объеме спека  $Al_2O_3$  процессе нагревания в поле СВЧ

Анализ температурного поля указывает на незначительную неоднородность распределения температуры по объему спека керамики по сравнению с аналогичным процессом нагрева, проводимым традиционными методами в печи сопротивления. Дополнительное выравнивание распределения температуры может быть получено регулированием темпа нарастания температуры, варьированием мощности источника СВЧ энергии.

Таким образом, этап мониторинга производства керамики на основе анализа температурного поля показывает на существование мощного резерва в управлении параметрами керамических материалов, получаемых спеканием в СВЧ электромагнитном поле.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Карпинский Д.Н. Исследование процесса формирования микроструктуры пьезокерамики методом численного эксперимента Д.Н. Карпинский, И.А. Паринов // ПМТФ. 1992. №1. С. 150-154.
2. Архангельский Ю.С. СВЧ электротермия / Ю.С. Архангельский. Саратов: СГТУ, 1998. 408 с.
3. Кожевников В.Ю. Спекание пьезокерамических материалов в сверхвысокочастотной камере на шлейфовых волноводных разветвлениях / В.Ю. Кожевников // Технологические СВЧ установки, функциональные электродинамические устройства: межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ, 1998. С 66-70.
4. Кожевников В.Ю. Спекание керамических материалов в сверхвысокочастотном электромагнитном поле / В.Ю. Кожевников // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2006 №1(10). Вып. 1. С. 99-104.
5. Кожевников В.Ю. Математическое моделирование спекания керамических материалов в СВЧ электромагнитном поле / В.Ю. Кожевников // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2006. №4(19). Вып 4. С. 109-118.

#### Кожевников Вячеслав Юрьевич –

кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета

Статья поступила в редакцию 27 октября 2007г., принята к опубликованию 3 ноября 2007г.

УДК 621.365:519.711.3

К. Н. Огурцов, М.В. Брюханов

**СВЧ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ  
ДЛЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО НАГРЕВА ДИЭЛЕКТРИКОВ**

*Рассмотрены возможности реализации высокотемпературных процессов нагрева диэлектриков. Проанализированы возможные методы нагрева диэлектриков до высоких температур. Предложены варианты рабочих камер для реализации высокотемпературных процессов нагрева диэлектриков в СВЧ электромагнитном поле.*

K. N. Ogurtsov, M.V. Bruchanov

**MICROWAVE ELECTROTECHNOLOGICAL PLANTS  
FOR HIGH TEMPERATURE HEATING OF DIELECTRICS**

*Considered possibilities to realization high-temperature processes of the heating dielectrics. The possible methods of the heating dielectrics will analysed before high temperature. Offered variants worker cameras for realization high-temperature processes of the heating dielectrics in microwave electromagnetic sintering.*

Современную промышленность невозможно представить без использования диэлектрических материалов. Показатели качества диэлектрических изделий сопоставимы с показателями металлических аналогов, а в некоторых случаях превосходят их. Кроме того, в некоторых случаях диэлектрики незаменимы. Для получения некоторых диэлектриков требуется нагревать исходный материал до высоких температур с высокой степенью равномерности нагрева. Такие высокотемпературные процессы возникают при получении монокристаллов полупроводниковых материалов для нужд микроэлектроники, при получении корундов, как технических (абразивы), так и драгоценных (рубины, сапфиры), при получении огнеупорных материалов, спекании керамики, получении наноматериалов.

Как известно, высокотемпературный нагрев диэлектрика можно осуществить с помощью:

1. Дугового нагрева.
2. Плазменно-дугового нагрева.
3. ВЧ нагрева.
4. Нагрева сопротивлением.
5. Нагрева лазером.
6. Электронно-лучевого нагрева.
7. СВЧ нагрева.

Каждый из этих методов имеет свои достоинства и недостатки [1].

При дуговом и плазменно-дуговом нагреве в диэлектрике возникают большие температурные перепады. Спектр материалов, нагреваемых в ВЧ поле, ограничен. При нагреве в печах сопротивления максимальная температура нагрева ограничена температурой разрушения нагревателя. При использовании лазерного и электронно-лучевого нагревов объем нагреваемого диэлектрика невелик, и имеется большой температурный перепад.

На наш взгляд, наиболее перспективным видом нагрева диэлектриков до высоких температур является СВЧ диэлектрический нагрев. Он позволяет добиться максимально равномерного распределения температуры в диэлектрике.

Традиционно СВЧ диэлектрический нагрев использовался для низкотемпературных процессов (менее  $500^{\circ}\text{C}$ ), а вопрос о максимальных температурах, получаемых в СВЧ поле, практически не исследован [2-4]. Следовательно, определение верхнего температурного предела при СВЧ термообработке является важной и актуальной задачей.

Исследуя рабочие камеры СВЧ электротехнологических установок, можно сделать следующие выводы о проблемах реализации в них высокотемпературных процессов:

КБВ – максимальная равномерность нагрева, но ограничена температура нагрева за счет температуры плавления самого волновода;

КСВ – температуры нагрева более высокие, чем КБВ, за счет теплоизоляции тигля и удалении объекта от стенок камеры. Остро стоит проблема согласования нескольких источников энергии ввода;

КЛТ – согласование источников энергии легче, проблема равномерности нагрева.

Таким образом, наиболее перспективны для реализации высокотемпературных процессов СВЧ рабочие камеры лучевого типа.

Для увеличения максимальной температуры в рабочей камере лучевого типа нами предложено:

1. Помещать нагреваемый диэлектрик в радиопрозрачный теплоизоляционный тигель (рис.1).
2. Использовать несколько источников СВЧ энергии (рис. 2).

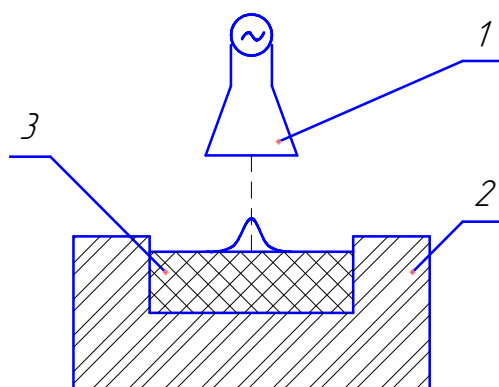


Рис 1. 1 – источник энергии, 2 – тигель, 3 – нагреваемый объект

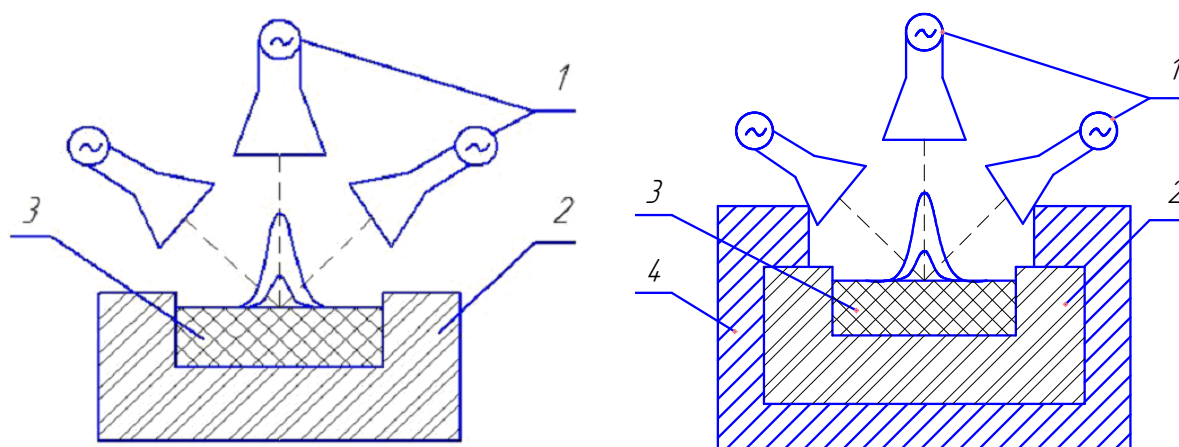


Рис 2. 1 – источник энергии, 2 – тигель, 3 – нагреваемый объект, 4 – теплоизоляция

3. В случае больших коэффициентов отражения от поверхности диэлектрика использовать наклонный отражатель СВЧ энергии (рис. 3).

4. Использовать комбинированный теплоподвод: подогрев стенок рабочей камеры ТЭНами (рис. 4) или индуктором (рис. 5).

Аналогичные методы можно рекомендовать для повышения температуры в рабочих камерах со стоячей волной (рис. 6-9).

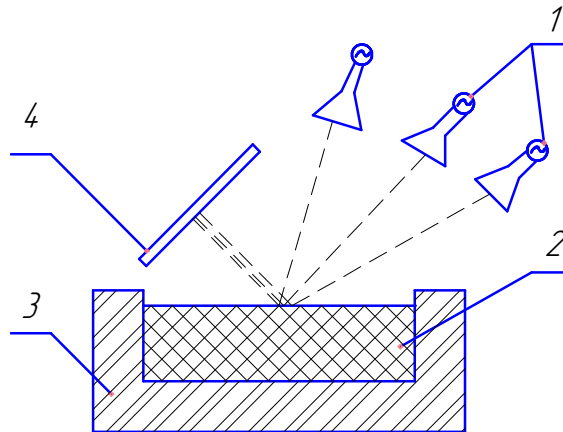


Рис 3. 1 – источник энергии, 2 – тигель, 3 – нагреваемый объект, 4 – отражатель

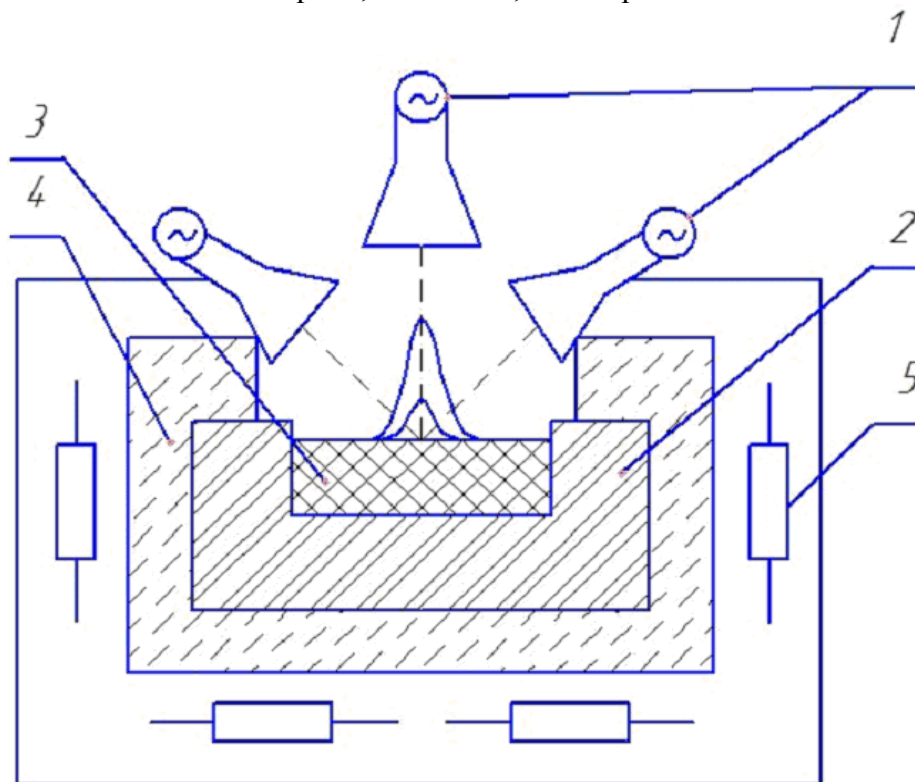


Рис 4. 1 – источник энергии, 2 – тигель, 3 – нагреваемый объект, 4 – теплоизоляция, 5 – ТЭН



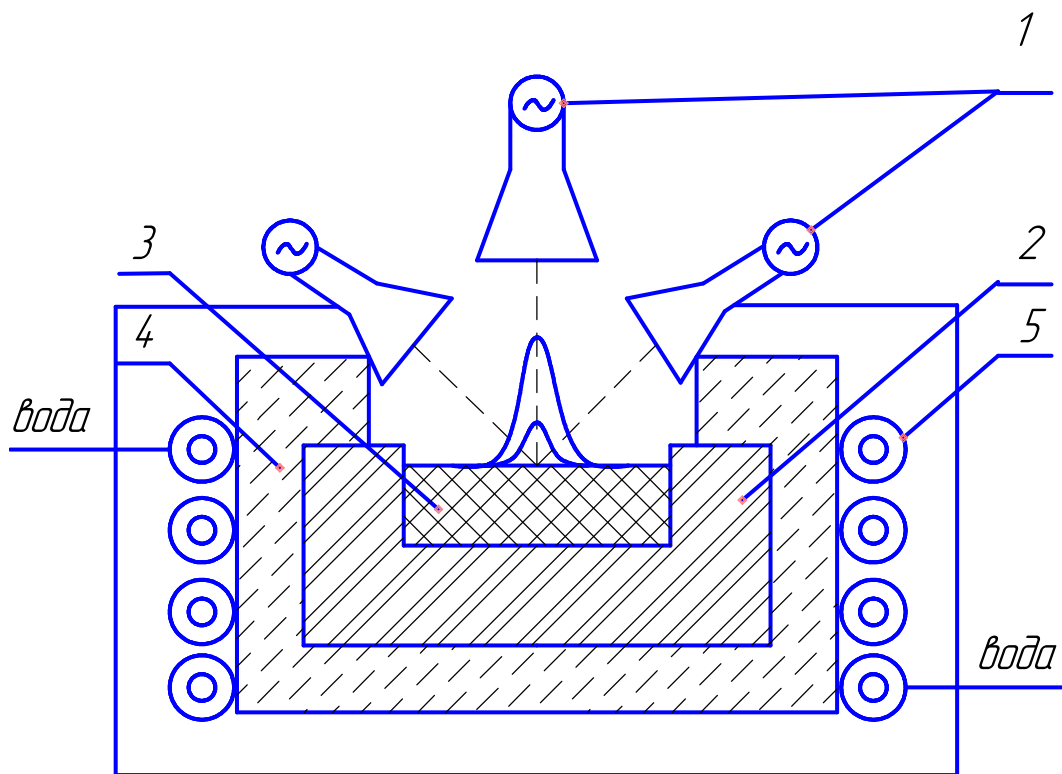


Рис 5. 1 – источник энергии, 2 – тигель, 3 – нагреваемый объект, 4 – теплоизоляция, 5 – водоохлаждаемый индуктор

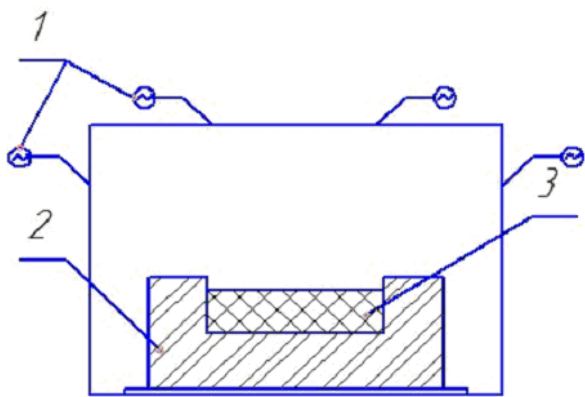


Рис. 6

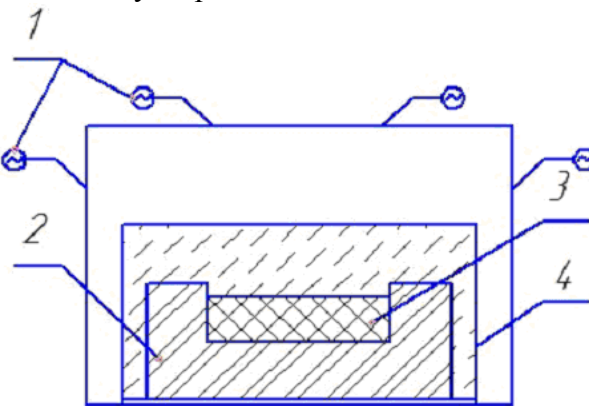


Рис. 7

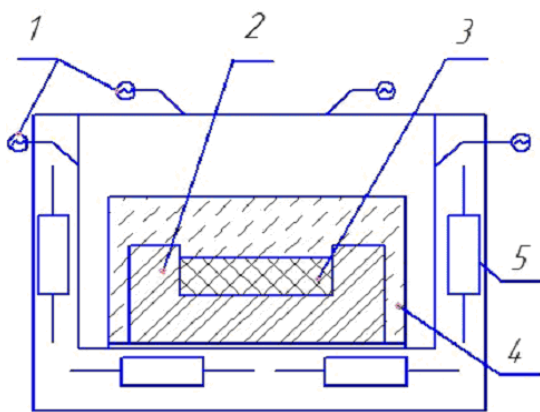


Рис. 8

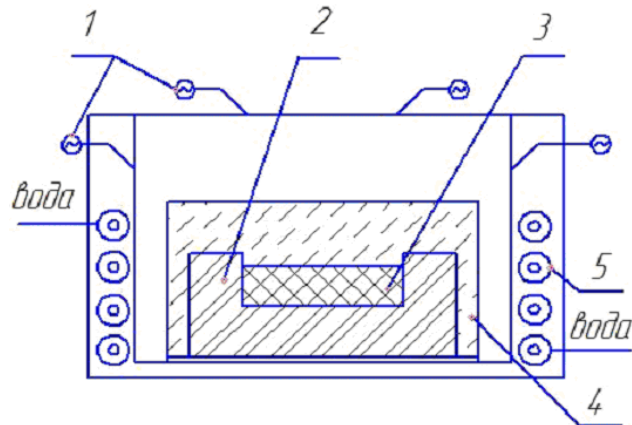


Рис. 9

## ЛИТЕРАТУРА

1. Огурцов К.Н. Разработка методов расчета электротермических установок и математического моделирования процессов термообработки диэлектриков с большими объемами и поверхностями: Дис.канд. тех. Наук. / К.Н. Огурцов. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2004. 198 с.
2. Архангельский Ю.С. СВЧ электротермия / Ю.С. Архангельский. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 1998. 408 с.
3. Рогов И.А. Техника сверхвысокочастотного нагрева пищевых продуктов / И.А. Рогов, С.В. Некрутман, Г.В. Лысов. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. 199 с.

**Огурцов Константин Николаевич –**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета.

**Брюханов Михаил Владимирович –**

студента специальности «Электротехнологические установки и системы» кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета.

Статья поступила в редакцию 27 октября 2007г., принята к опубликованию 3 ноября 2007г.  
УДК 541.123:546.21

Д.М. Кульбацкий, Д.В. Нефедов, С.И. Семенов, Р.К. Яфаров

### **ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА СИНТЕЗА В НЕРАВНОВЕСНОЙ ПЛАЗМЕ СВЧ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА НА ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА НАНОРАЗМЕРНОГО ПЛЕНОЧНОГО КРЕМНИЯ И ЕГО СОЕДИНЕНИЙ**

*Исследованы фундаментальные и оптоэлектронные свойства наноразмерных пленочных структур аморфного гидrogenезированного кремния и его твердых растворов различного стехиометрического состава с углеродом и азотом, полученных в неравновесной плазме СВЧ газового разряда. Установлены закономерности влияния параметров процесса синтеза*

*на оптическую ширину щели подвижности, время жизни неосновных носителей, а также плотность локализованных состояний и их распределение в щели подвижности. Показано, что изменение оптической ширины щели подвижности гидрогенизированного кремния в зависимости от условий синтеза в СВЧ плазме может достигать 50%, что в 4-5 раз больше, чем при использовании других методов синтеза.*

D.M. Kulbatskiy, D.V. Nefedov, S.I. Semenov, R.K. Yafarov

### **THE INFLUENCE OF SYNTHESIS REGIME IN NONEQUILIBRIUM MICROWAVE PLASMA ON FUNDAMENTAL PROPERTIES OF NANOSIZED THIN FILM SILICON AND ITS COMPOUNDS**

*The fundamental and optoelectronic properties of amorphous silicon, carbide silicon and nitride silicon nanosized thin films structures are investigated. These structures are produced in microwave plasma. The influence of process parameters on band gap, carrier lifetime and density of located states and its distribution are established. Changing of band gap are reached 50% that 4-5 times more than other methods of synthesis.*

Актуальной проблемой современного полупроводникового материаловедения является создание на основе известных полупроводниковых и диэлектрических материалов многослойных гетероструктур с размерным квантованием – сверхрешеток, модифицирующих их зонные структуры и приводящих к появлению новых полезных электрических и оптических свойств. Интерес к ним существует уже не только теоретический, но и практический. Это связано с тем, что совсем недавно была показана принципиальная возможность создания приборов на основе этих квантовых объектов, например лазеров с параметрами, лучшими, чем у существующих в настоящее время [1].

Большой практический интерес представляют аморфные сверхрешетки на основе наноразмерного тонкопленочного кремния и его соединений. Такие квантовые системы в зависимости от способа получения могут обладать неограниченно широким спектром полупроводниковых свойств и по признакам цена-качество существенно превосходить сверхрешетки, созданные на основе монокристаллических материалов с применением молекулярно-лучевой эпитаксии или других уникальных и дорогостоящих технологий [2].

Особый и в значительной степени самостоятельный научный и практический интерес представляют разработка технологии получения и изучение свойств гидрогенизированного аморфного кремния ( $a-Si:H$ ). Наноразмерные пленки  $a-Si:H$  обычно используются в полупроводниковых сверхрешеточных структурах в качестве узкозонного материала и во многом определяют как фундаментальные, так и оптоэлектронные свойства таких структур. Научный интерес к этому материалу, существенно возросший в последние годы, связан также с надеждой, что применение  $a-Si:H$  позволит получать дешевую электроэнергию путем прямого преобразования солнечной энергии в электрическую с помощью фотоэлектрического эффекта. Основными параметрами, определяющими эффективность фотоэлектрического преобразования, являются ширина запрещенной зоны и время жизни фотогенерированных носителей. Возрастание рекомбинационного времени жизни носителей обычно приводит к увеличению всех фотоэлектрических параметров ( $V_{oc}$ ,  $J_{sc}$  и FF) [3].

Гидрогенизированный аморфный кремний – стеклообразный полупроводниковый материал, представляющий собой разупорядоченный сплав кремния с водородом, концентрация которого может изменяться от 1 до 50 ат.% в зависимости от способа получения. Пленки

аморфного кремния получали множеством способов [2]. Главный их недостаток состоит в том, что полученные пленки имеют, как правило, слишком высокую плотность локализованных состояний в щели подвижности. Это существенно ограничивает области их практического использования. Поэтому задача улучшения качества пленок аморфного гидрогенизированного кремния остается актуальной.

Целью настоящей работы являлось разработка технологии получения и изучение влияния параметров режима СВЧ плазмохимического осаждения на фундаментальные и оптоэлектронные свойства наноразмерных пленочных структур на основе кремния и его соединений, в частности,  $a - Si : H$ , карбидов и нитридов кремния различных стехиометрических составов.

Осаждение пленок аморфного кремния и его соединений осуществлялось на стеклянную подложку методом разложения моносилана в неравновесной плазме высокоионизованного СВЧ газового разряда низкого давления в магнитном поле с индукцией 875 Гс. Давление моносилана в процессе осаждения составляло 0,1 Па и соответствовало выполнению условия электронно-циклотронного резонанса, при котором степень ионизации плазмы составляла не менее 5% [4]. Наноразмерные пленки карбида и нитрида кремния получали в СВЧ плазме разложением моносилана в присутствии этанола и азота. Изменяемыми параметрами режима осаждения кремниевых структур являлись температура образца ( $T$ ), которая измерялась термопарой с точностью  $\pm 5$  °С, и величина электрического смещения на подложкодержателе ( $U_{\text{уск.}}$ ). Толщина пленок ( $h$ ) варьировалась от 100 до 300 нм.

Оптическая ширина запрещенной зоны ( $E_g$ ) полученных пленочных образцов определялась согласно выражению Тауца. Для этого из измеренных оптических спектров поглощения при комнатной температуре на двухлучевом спектроанализаторе, собранном на базе монохроматора МДР-23 (ЛОМО, Russia) и специально изготовленной интегрирующей оптической сферы в диапазоне длин волн от 200 до 1200 нм, были рассчитаны соответствующие спектры поглощения. Погрешность измерения не превышала 1 %. В пленках  $a - Si : H$ , кроме оптической ширины запрещенной зоны, исследовались спектральные зависимости фототока и время жизни неравновесных носителей.

На рис.1 приведены рассчитанные с использованием выражения Тауца зависимости оптической ширины запрещенной зоны карбида кремния от стехиометрического состава для температуры осаждения 100 и 300 °С при ускоряющем потенциале на подложкодержателе - 200 В. Можно видеть, что механизм образования твердого раствора карбида кремния при отрицательном потенциале практически не зависит от температуры подложки, а оптическая ширина запрещенной зоны с увеличением содержания кремния в  $Si_xC_{1-x}$  имеет устойчивую тенденцию к уменьшению от 4,5-4,8 эВ для алмазной пленки ( $x=0$ ) до минимального значения, соответствующего чистому кремниевому материалу ( $x=1$ ). Из зависимости  $E_g$  от ускоряющего потенциала для стехиометрического состава  $Si_{0,2}C_{0,8}$ , приведенной на рис.2, следует, что этот фундаментальный параметр твердого раствора кремния в углероде зависит от селекции частиц плазмы в процессе синтеза. Возможно, что причиной увеличения  $E_g$  при положительном потенциале является, кроме увеличения содержания углерода в его твердом растворе с кремнием, появление в структуре кремния его окислов за счет кислорода остаточной атмосферы в вакуумной камере установки.

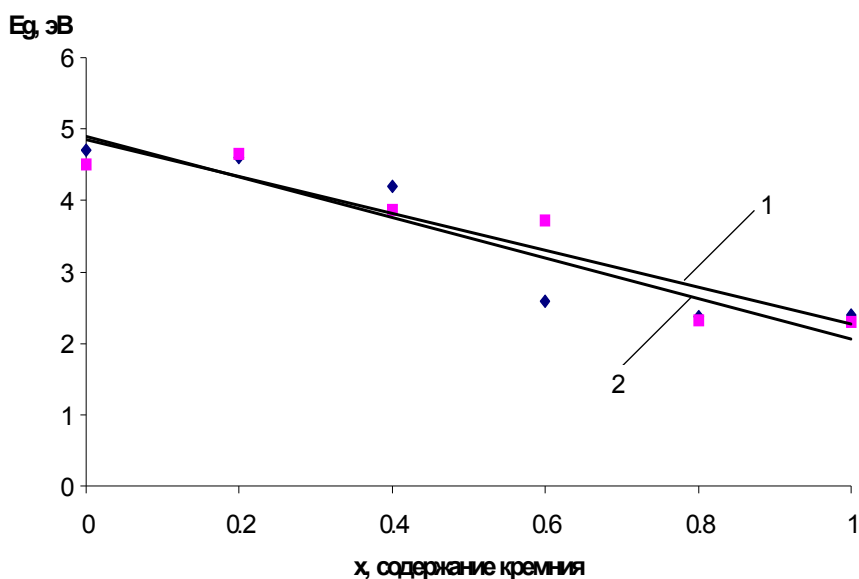


Рис. 1. Зависимости оптической ширины запрещенной зоны  $a - Si_xC_{1-x}$  от стехиометрического состава при ускоряющем потенциале на подложкодержателе  $U=-200$  В и различных температурах осаждения: 1-  $T=300$  C<sup>0</sup>; 2-  $T=100$  C<sup>0</sup>

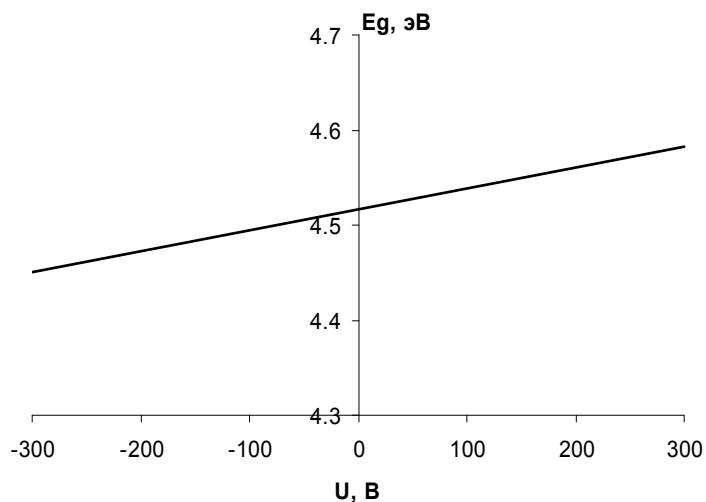


Рис. 2. Зависимости оптической ширины запрещенной зоны  $a - Si_{0,2}C_{0,8}$  от ускоряющего потенциала на подложкодержателе при температуре осаждения  $300$  C<sup>0</sup>

На рис.3 приведены зависимости оптической ширины запрещенной зоны нитрида кремния стехиометрических составов  $Si_{0,2}N_{0,8}$  и  $Si_{0,8}N_{0,2}$  от температуры осаждения для ускоряющих потенциалов на подложкодержателе  $-200$  В и  $+200$  В. Можно видеть, что  $E_g$  для нитрида кремния является параметром, более зависимым от режима синтеза в плазме СВЧ газового разряда, чем карбид кремния. Это обусловлено, в частности, более сильной зависимостью летучести азота от температуры. Поэтому его оптическая ширина запрещенной зоны значительно более сильно, чем у карбида кремния, зависит от температуры подложки и потенциала на подложкодержателе. Эта зависимость тем сильнее, чем больше азота участвует в

образовании твердого раствора нитрида кремния. И наоборот, чем меньше азота в твердом растворе нитрида кремния данного стехиометрического состава, тем меньше величина  $E_g$  и ее зависимость от температуры и ускоряющего потенциала. Так,  $E_g$  для  $Si_{0,8}N_{0,2}$ , согласно данным, приведенным на рис.3, не зависит ни от потенциала на подложкодержателе, ни от температуры синтеза (кривые 3 и 4 совпадают).

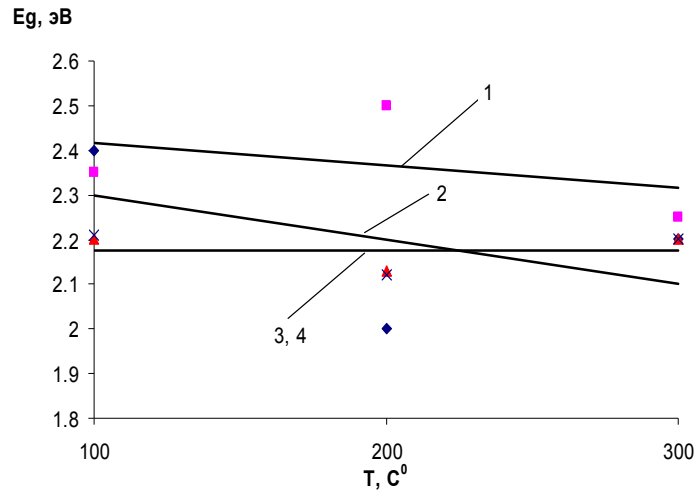


Рис. 3. Зависимости оптической ширины запрещенной зоны  $a-Si_3N_4$  различного стехиометрического состава от температуры осаждения в СВЧ плазме при различных ускоряющих потенциалах на подложкодержателе:

- 1-  $Si_{0,2}N_{0,8}$ ,  $U = +200$  В; 2-  $Si_{0,2}N_{0,8}$ ,  $U = -200$  В; 3-  $Si_{0,8}N_{0,2}$ ,  $U = +200$  В;  
4-  $Si_{0,8}N_{0,2}$ ,  $U = -200$  В

На рис. 4 приведены зависимости оптической ширины запрещенной зоны от температуры осаждения  $a-Si:H$  при различных потенциалах на подложкодержателе. Можно видеть, что с увеличением температуры подложки оптическая ширина запрещенной зоны при обоих потенциалах уменьшается. Однако, для -200 В она больше по величине и меньше зависит от температуры. При отрицательном смещении расчетный температурный коэффициент изменения  $E_g$  составляет  $1,7 \cdot 10^{-3}$  эВ/град. При положительном потенциале +200 В уменьшение  $E_g$  в интервале от 1,9 до 0,9 эВ с ростом температуры от 50°C до 350 °C характеризуется коэффициентом, в два раза большим -  $3,4 \cdot 10^{-3}$  эВ/град.

На рис. 5 приведены спектральные зависимости фототока для различных толщин пленок гидрогенизированного кремния и технологических режимов осаждения в ЭЦР плазме СВЧ газового разряда. Можно видеть, что в пленках  $a-Si:H$ , осажденных при положительном смещении, наблюдается зависимость величины фототока от температуры синтеза и толщины пленки. Чем они больше, тем выше уровень фототока.

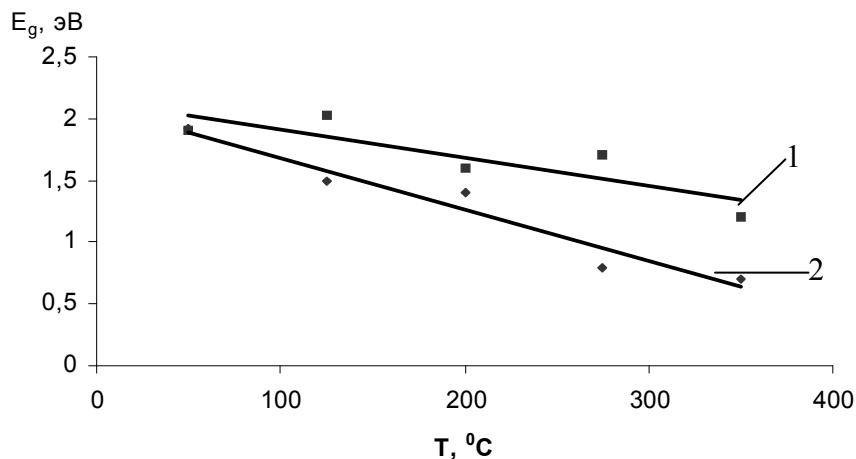


Рис. 4. Зависимости оптической ширины запрещенной зоны  $a-Si:H$  от температуры осаждения в СВЧ плазме с ЭЦР для различных ускоряющих потенциалов на подложкодержателе: 1- -200 В; 2- +200 В

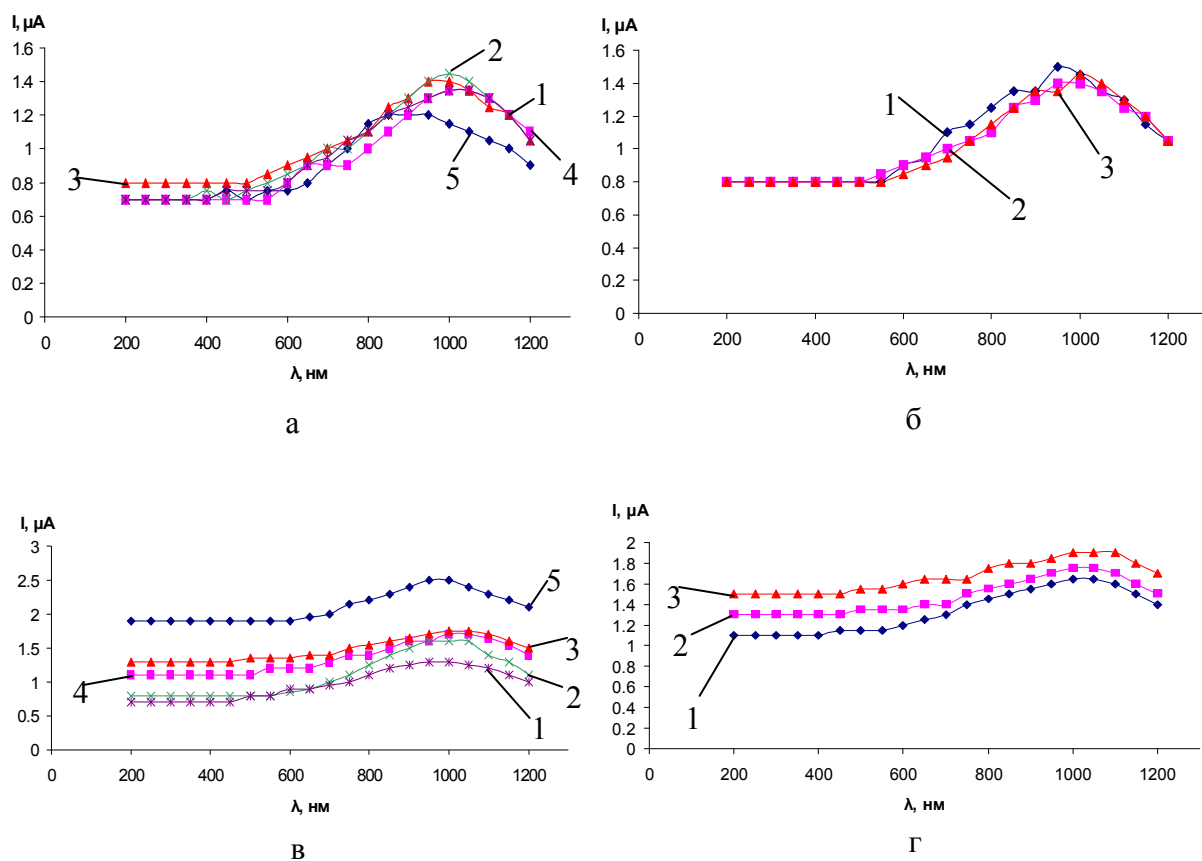


Рис.5. Спектральные зависимости фототока в образцах  $a-Si:H$  от толщины пленок и технологических режимов осаждения в плазме СВЧ газового разряда:  
 а -  $U_{\text{уск.}} = -200$  В,  $h = 200$  нм,  $T = 50^\circ\text{C}$  (1),  $125^\circ\text{C}$  (2),  $200^\circ\text{C}$  (3),  $275^\circ\text{C}$  (4),  $350^\circ\text{C}$  (5);  
 б -  $U_{\text{уск.}} = -200$  В,  $T = 200^\circ\text{C}$ ,  $h = 100$  нм (1),  $200$  нм (2),  $300$  нм (3);  
 в -  $U_{\text{уск.}} = +200$  В,  $h = 200$  нм,  $T = 50^\circ\text{C}$  (1),  $125^\circ\text{C}$  (2),  $200^\circ\text{C}$  (3),  $275^\circ\text{C}$  (4),  $350^\circ\text{C}$  (5);

$$U_{\text{уск.}} = +200 \text{ В}, T = 200^\circ\text{C}, h = 100 \text{ нм (1), } 200 \text{ нм (2), } 300 \text{ нм (3)}$$

В случае отрицательного смещения величина фототока образцов в 2-3 ниже, чем при положительном потенциале. Спектральные зависимости фототока в диапазоне длин волн от 200 до 600 нм идут с одного уровня, т.е. не зависят ни от температуры осаждения, ни от толщины пленки. При больших длинах волн в инфракрасной области, они, так же как спектральные зависимости для +200 В, имеют экстремумы. Однако характер расположения зависимостей по величине фототока в экстремуме при этом кардинально изменяется: больший фототок имеют образцы с наименьшей толщиной и минимальной температурой осаждения. Экстремумы фототока для наибольших толщины пленки и температуры имеют при этом тенденцию к смещению в область больших энергий фотонного излучения. Кроме того, из сравнения положений экстремумов фототоков на рис. 5 а,б и в,г можно видеть, что при ускоряющем потенциале +200 В область экстремумов фототоков достигается при 1000-1100 нм, а при ускоряющем потенциале -200 В экстремумы достигаются при 900-1000 нм, т.е. смещаются в более коротковолновую часть спектра.

Измерения времени жизни неравновесных носителей в зависимости от условий получения пленок а – Si : H показали (рис.6), что при отрицательном смещении на подложкодержателе время жизни носителей в 5-6 раз больше, чем при положительном. Оно практически не зависит от температуры при отрицательном потенциале и очень слабо возрастает с увеличением температуры образца при положительном потенциале.

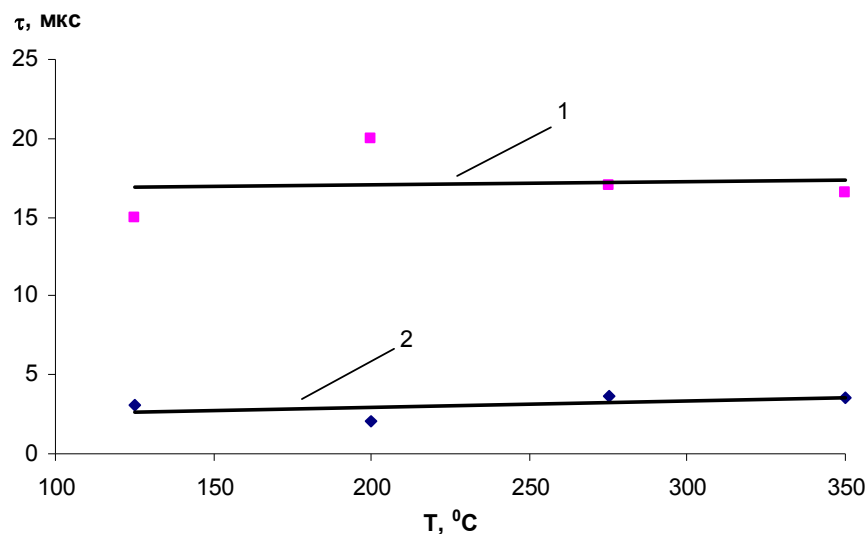


Рис.6. Зависимость времени жизни неравновесных носителей от температуры синтеза образцов а – Si : H для различных значений ускоряющего потенциала: 1- -200 В; 2 - + 200 В

Согласно современным представлениям, оптоэлектронные свойства аморфного гидрированного кремния определяются в основном количеством содержащегося в пленках водорода и структурой, которую он образует при вхождении в кристаллическую решетку кремния. Оба этих фактора регулируются изменением условий синтеза, в частности температуры подложки, давления рабочего газа, степени ионизации плазмы, энергии и вида ионов, бомбардирующих поверхность пленки в процессе роста. Увеличение содержания водорода в твердом растворе с кремнием вызывает увеличение ширины запрещенной зоны полупровод-



ника. Однако и его отсутствие делает аморфный кремний непригодным к практическому использованию. Причиной этого является высокая плотность локализованных состояний в щели подвижности, обусловленная большим количеством оборванных связей Si-Si. Считается, что одна из основных причин появления у сплавов на основе a-Si : H хороших фотоэлектрических свойств заключается в полном закреплении большинства оборванных связей водородом с образованием моногидридной структуры. При повышенном содержании водорода в кремниевых пленках, которое имеет место, как правило, при низких температурах осаждения, образуется структура полимерного типа. Такая структура a-Si : H характеризуется высокой плотностью локализованных состояний и также является непригодной для практического применения.

В соответствии с этими представлениями полученные экспериментальные результаты можно интерпретировать следующим образом. Подача на образец положительного смещения приводит, как известно, к уменьшению поступления из плазмы положительных ионов водорода в растущую пленку и увеличению интенсивности бомбардировки ее поверхности отрицательными ионами и электронами. Рост пленки осуществляется за счет поступления на ее поверхность атомарного или ионизированного кремния и радикальных групп типа SiH<sub>x</sub>, где x = 0,1,2,3, которые могут создавать структуру полимерного типа, содержащую наряду с Si-H, цепи SiH<sub>2</sub> и SiH<sub>3</sub>. При осаждении на подложку с большей температурой избыточная насыщенность кремния этими радикалами быстро снижается. В результате этого уменьшаются содержание водорода в пленке и оптическая ширина щели подвижности (рис. 4, кривая 2).

При отрицательном смещении, напротив, увеличивается интенсивность бомбардировки поверхности растущей пленки ионами водорода и уменьшается поступление водорода в виде групп SiH<sub>2</sub> и SiH<sub>3</sub>. В результате этого, с одной стороны, увеличивается вероятность разрыва поверхностных и относительных слабых связей типа Si – Si, а, с другой – вероятность образования сильных моногидридных связей Si – H, которые более устойчивы к нагреву подложки. В результате образования кремний-водородного сплава оптическая ширина щели подвижности увеличивается, а температурный коэффициент изменения E<sub>g</sub> при отрицательном смещении оказывается меньшим, чем при положительном смещении (рис.4, кривая 1).

Из приведенных на рис.5 спектральных зависимостей фототока от температуры и толщины пленки при различных электрических смещениях в процессе синтеза пленок a – Si : H можно заключить, что энергетические состояния дефектов, связанных с преимущественным присутствием моногидридных и дигидридных связей в кремнии, существенно различаются. Так, преимущественное присутствие моногидридных связей в образцах, полученных при отрицательном смещении, кроме увеличения ширины щели подвижности, приводит к увеличению сопротивления образцов при комнатной температуре. Поэтому эти пленки имеют низкие темновые токи. Дефекты структуры, связанные с избыточным содержанием групп SiH<sub>x</sub>, где x = 2,3, имеют, по-видимому, преимущественно, примесный характер и располагаются по краям щели подвижности. Поэтому в отличие от пленок, полученных при отрицательном смещении, пленки, полученные при положительном смещении, имеют преимущественно активационный механизм переноса носителей и при комнатной температуре обладают более высокой электропроводностью, которая зависит и от температуры и от длительности ее синтеза (толщины пленки) (рис.5 а, б). Увеличение темнового фототока в таких об-

разцах с увеличением температуры и времени синтеза свидетельствует о том, что плотность рекомбинационных центров связана с названными параметрами процесса прямой зависимостью. Поэтому время жизни неравновесных носителей в образцах, полученных при положительном смещении, меньше.

Таким образом, электрическое смещение при синтезе аморфного гидрогенизированного кремния и его соединений в высокоионизованной плазме СВЧ газового разряда оказывает существенное влияние на оптическую ширину щели подвижности, плотность локализованных состояний и их распределение в щели подвижности. Температурный коэффициент изменения оптической ширины щели подвижности при синтезе  $a - Si : H$  в высокоионизованной СВЧ плазме более чем на порядок превосходит эту величину при синтезе в высокочастотном тлеющем разряде [2], а изменение  $E_g$  в зависимости от условий синтеза в СВЧ плазме может достигать 50%, что в 4-5 раз больше, чем при использовании других методов синтеза [5,6]. Ловушечные группы  $SiH_x$ , где  $x = 2,3$ , оказывают существенное влияние на рекомбинационное время жизни неравновесных носителей и способствуют ухудшению оптоэлектронных свойств  $a - Si : H$  в связи с увеличением темновой проводимости при комнатной температуре.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Алферов Ж.И. История и будущее полупроводниковых гетероструктур / Ж.И. Алферов // ФТП. 1998. Т. 32. № 1. С.3-18.
2. Меден А. Физика и применение аморфных полупроводников: пер. с англ. / А. Меден, М. Шо. М.: Мир, 1991. 670 с.
3. Джоунопулос Дж. Физика гидрогенизированного аморфного кремния / Дж. Джоунопулос, Дж. Люковски. Вып. 1. М.: Мир, 1988.
4. 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. N 1. С.77-120.
5. Голикова О.А., Кузнецов А.Н., Кудоярова В.Х., Казанин М.М. // ФТП. 1997. Т.31. №7. С. 816-819.
6. Голикова О.А., Богданова Е.В., Бабаходжаев У.С. // ФТП. 2002. Т.36. №10. С. 1259-1262.

#### **Кульбацкий Дмитрий Михайлович –**

аспирант кафедры «Радиотехника» Саратовского государственного технического университета.

#### **Нефедов Денис Владимирович –**

аспирант – РАН.

#### **Семенов Сергей Иванович –**

студент кафедры «Электронные приборы и устройства» Саратовского государственного технического университета.

#### **Яфаров Равиль Кяшшафович –**

зав. лабораторией, доктор технических наук, старший научный сотрудник, СО ИРЭ РАН.

Статья поступила в редакцию 27 октября 2007г., принята к опубликованию 3 ноября 2007г.  
УДК 541.123:546.21

В.Я. Шаныгин, Р.К. Яфаров

### **МЕХАНИЗМ И КАЧЕСТВО ТРАВЛЕНИЯ КРЕМНИЯ РАЗЛИЧНЫХ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКИХ ОРИЕНТАЦИЙ В ПЛАЗМЕ СВЧ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ**

*Впервые экспериментально установлено различие в скорости и микроморфологии поверхности плазмохимического травления кремния различных кристаллографических ориентаций в условиях низкого рабочего давления и интенсивной низкоэнергетичной электронно-ионной бомбардировки. Рассмотрен механизм травления кремния во фторсодержащей плазме и показано, что это различие обусловлено различной плотностью оборванных связей на поверхности кремния различных кристаллографических ориентаций.*

V.Y. Shanigin, R.K. Yafarov

### **MECHANISM AND QUALITY OF SILICON ETCHING WITH DIFFERENT CRYSTALLOGRAPHIC ORIENTATION IN MICROWAVE PLASMA**

*The first experimentally are established difference in rate and micromorphology of surface of plasma etching. The mechanism of etching in fluorine-containing plasma are considered. Distinction of rate are conditioned different density of torn bonds on the surface of silicon are shown.*

#### **Введение**

На современном этапе развития полупроводникового материаловедения актуальными становятся задачи получения атомарночистых поверхностей полупроводников, создания туннельно-тонких пленок и гетерограниц с заданными составом, уровнем легирования и высоким качеством структуры границ раздела, что вызвано высокой чувствительностью электронных свойств материалов к дефектам и неоднородностям структуры. Важным представляется рассмотрение структурного аспекта проблем полупроводниковой поверхности: контролируемое создание микроморфологии поверхности кристаллов-подложек, что необходимо для управления плотностью стоков для адатомов; определение механизмов формирования субмонослойных покрытий в процессах получения низкоразмерных эпитаксиальных структур; определение принципиально новых возможностей создания квантово-размерных систем, примером которых могут служить самоорганизующиеся системы при создании квантовых проволок, латеральных поверхностных сверхрешеток и квантовых точек. Все эти задачи обусловлены тенденциями развития твердотельной электроники, направленными на повышение степени интеграции, и переходом к использованию квантово-размерных явлений в двумерных кристаллах.

Существуют различные методы получения атомарно чистых поверхностей материалов [1]. Каждый из них имеет определенные преимущества и недостатки. Поэтому универсальной процедуры очистки не существует. Для каждого материала, как правило, требуется индивидуальная методика или даже комбинация нескольких методик. В настоящее время наиболее перспективным методом получения атомарно чистых поверхностей является низкоэнергетичное ионное травление.

Целью работы является разработка метода получения с использованием низкоэнергетичной плазмы СВЧ газового разряда низкого давления и исследование влияния режима плазменного воздействия на микроморфологию атомарно чистой поверхности монокристаллического кремния различных кристаллографических ориентаций.

### 1. Экспериментальная установка и методики исследований

Эксперименты проводились в вакуумной установке с использованием СВЧ ионно-плазменного источника (рис.1), в котором для увеличения диаметра обрабатываемой пластины применялся ступенчатый согласованный переход с одномодового волновода для низшего типа волны  $H_{11}$  на частоте 2,45 ГГц на открытый многомодовый волновод диаметром 178 мм. Магнитное поле вдоль оси плазмотрона создавалось с помощью двухсекционного электромагнита, установленного на одномодовой части волновода в зоне керамического окна, через которое осуществляется регулируемый ввод СВЧ энергии. Керамическое окно отделяет часть пространства одномодового волновода от атмосферного воздуха и обеспечивает возможность создания с помощью вакуумных средств откачки в операционной камере установки давление в диапазоне от  $10^{-3}$  до 1 Па. Ввод плазмообразующих газов в вакуумную камеру установки осуществляется с помощью регуляторов расхода газа РРГ-1 с пределами регулирования 0,2-10 л/ч. Контроль падающей и отраженной СВЧ мощности производится ваттметрами типа МЗ-54 с использованием направленных ответвителей с ослаблением 40 дБ.

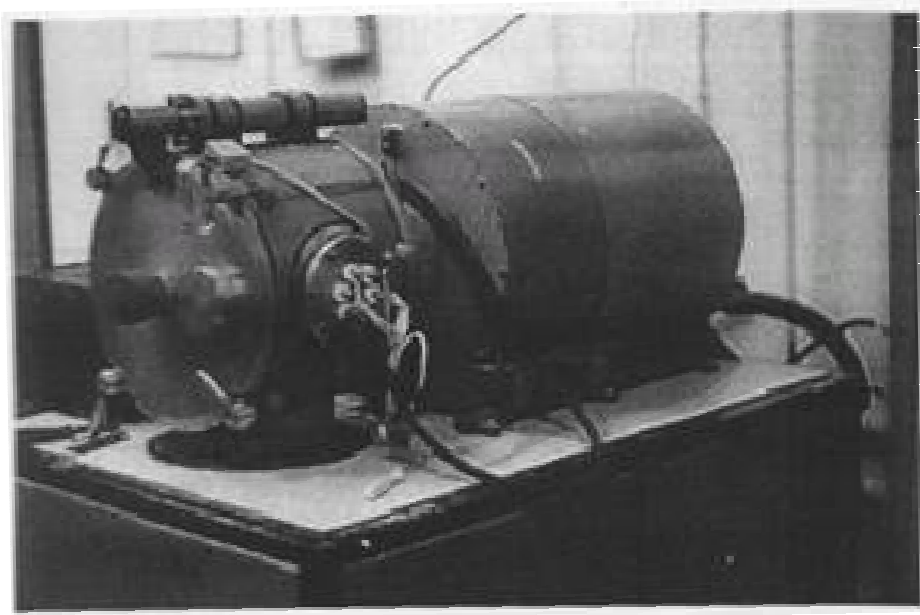


Рис. 1. Экспериментальная установка СВЧ вакуумно-плазменного травления

Плазменный процесс осуществляется следующим образом. После предварительного вакуумирования через цилиндрический реактор производится прокачка плазмообразующего газа. В разрядном пространстве плазмотрона под действием СВЧ-электромагнитных волн круговой поляризации с определенной напряженностью электрического поля и внешнего магнитного поля происходит электрический газовый пробой. В созданной продольно намагниченной плазме электроны, ионы, радикалы плазмообразующего газа переносятся потоком или дрейфуют при приложении внешнего электрического поля к пластине и осуществляют ее обработку. Образующиеся летучие продукты реакций откачиваются вакуумной системой.

В качестве плазмообразующего газа использовался хладон-14. Мощность СВЧ излучения составляла 250 Вт. Индукция магнитного поля в зоне газового разряда составляла 875 Гс. Давление  $CF_4$  в процессе сухого травления кремния составляло 0,1 Па и соответствовало выполнению условия электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР), при котором степень ионизации плазмы составляла около 5% [2]. Вольт-амперная характеристика СВЧ газового разряда, полученного при этих условиях, приведена на рис. 2. Осуществлялось плазмохимическое травление кремния кристаллографических ориентаций  $\langle 111 \rangle$  и  $\langle 100 \rangle$ . Для определения толщины стравленного слоя использовался интерференционный микроскоп МИИ-4. Микроморфология поверхности кремния после плазмохимического травления изучалась с использованием сканирующего атомно-силового микроскопа Р4-SPM-MDT. Обработка результатов исследований производилась с использованием статистических методов на ЭВМ.

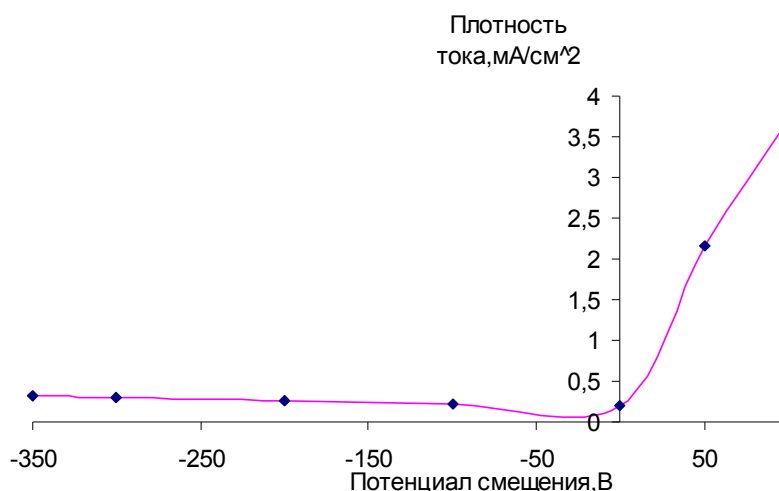


Рис.2. Вольт-амперная характеристика СВЧ газового разряда при ЭЦР в хладоне-14

## 2. Результаты экспериментов

На рис.3 приведены зависимости от электрического смещения на подложкодержателе скоростей травления в СВЧ плазме  $CF_4$  монокристаллического кремния кристаллографических ориентаций  $\langle 100 \rangle$  и  $\langle 111 \rangle$ . В зависимости от величины смещения можно выделить три участка, в которых скорость травления кремния различных ориентаций изменяется относительно друг друга.

При положительном смещении (участок 1) скорость травления кремния ориентации  $\langle 111 \rangle$  выше, чем  $\langle 100 \rangle$ . При низких отрицательных смещениях (от 0 до -300 В – участок 2), напротив, скорость травления кремния с ориентацией  $\langle 100 \rangle$  выше. На третьем участке, при смещениях более -350 В вновь наблюдается превышение скорости травления кремния ориентации  $\langle 111 \rangle$  над скоростью травления кремния  $\langle 100 \rangle$ . При этом скорость травления кремния  $\langle 100 \rangle$  при увеличении смещения имеет тенденцию к насыщению.

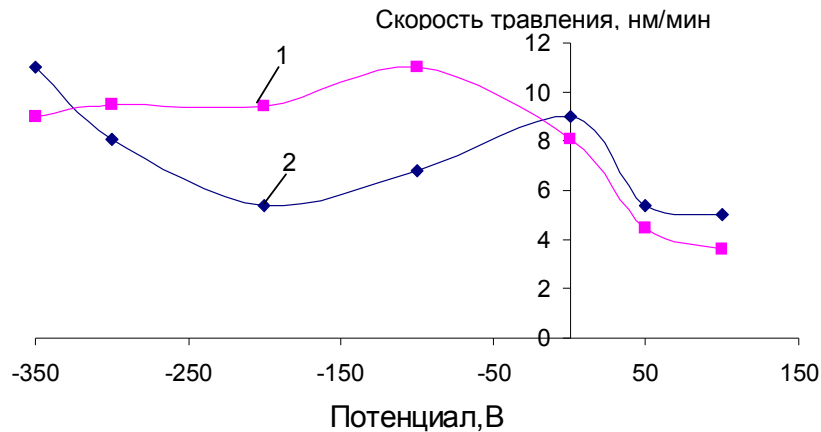


Рис. 3. Зависимости скоростей травления кремния ориентации  $\langle 100 \rangle$  (1) и  $\langle 111 \rangle$  (2) от потенциала смещения в процессе СВЧ ВПТ

На рис. 4 приведены зависимости шероховатости поверхности кремния ориентации  $\langle 100 \rangle$  и  $\langle 111 \rangle$  от ускоряющего потенциала на подложкодержателе. Можно видеть, что шероховатость поверхности кремния ориентации  $\langle 100 \rangle$  во всех исследованных режимах СВЧ плазменного травления выше, чем у кремния ориентации  $\langle 111 \rangle$ . Различие в шероховатости увеличивается при увеличении смещения в сторону более положительных их значений.

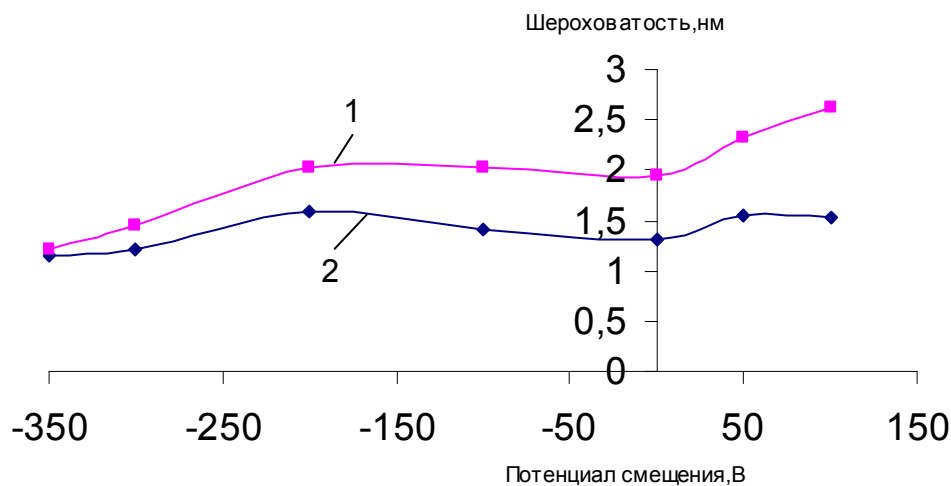
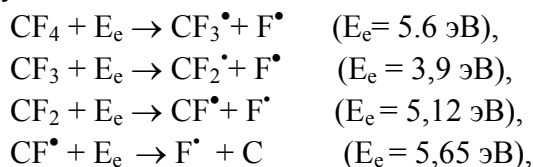


Рис. 4. Зависимость шероховатости поверхностей кремния ориентации  $\langle 100 \rangle$  (1) и  $\langle 111 \rangle$  (2) от ускоряющего потенциала на подложкодержателе в процессе СВЧ ВПТ

### 3. Обсуждение результатов

Как известно, процесс вакуумно-плазменного травления с использованием химически активных газов, к которым, в частности, относится хладон-14, при травлении кремния осуществляется в результате протекания гетерогенных химических реакций на поверхности обрабатываемого материала. Процессы на поверхности происходят за счет поступления из плазмы ионов, радикалов и нейтральных атомов рабочих газов, химически активных по отношению к поверхностным атомам обрабатываемого материала. Вид и энергия ионов, поступивших на поверхность обработки, зависят от величины и знака потенциала смещения на подложкодержателе. Интегральным результатом протекания химических процессов между поверхностными атомами и структурными частицами плазмы является ослабление связей поверхностных атомов с подложкой и их удаление в результате образования летучих продуктов реакций или активированной десорбции под воздействием ионной или электронной бомбардировки.

Параллельными исследованиями с использованием методов масс-спектрометрии и эмиссионной спектроскопии установлено [3], что при СВЧ вакуумно-плазменном травлении кремния в  $CF_4$  в составе газовой фазы фиксируются следующие фрагменты молекул рабочего газа и продуктов травления кремния: радикалы  $F$  и  $CF_n$ , где  $n=0,1,2,3$ , которые являются продуктами ступенчатой диссоциации  $CF_4$ :



а также  $CO$  с длиной волны излучения 515 нм и  $SiF$  ( $\lambda = 440$  нм), которые, очевидно, являются продуктами гетерогенных химических реакций.

Кроме диссоциации, в плазме СВЧ газового разряда в условиях ЭЦР, имеющей группы электронов с энергией до 90-100 эВ [3], не менее эффективными могут быть также процессы ионизации этих частиц газовой фазы. Соответствующие значения энергии ионизации молекулы  $CF_4$  и продуктов ее диссоциации приведены в таблице.

Энергии ионизации молекулы  $CF_4$  и ее производных

Ион	$CF_4^+$	$CF_3^+$	$CF_2^+$	$CF^+$	$F^+$
Энергия ионизации, эВ	17,8	9,5	13,3	13,81	17,42

Согласно этим данным, наиболее вероятным ионным составом газовой фазы являются: ионы  $CF_n^+$ , где  $n=1,2,3$ , а также в связи с высокой электротрицательностью фтора ионы  $F^-$ .

Таким образом, в зависимости от знака электрического смещения на подложкодержателе на обрабатываемую подложку кремния могут поступать:

1- при положительном смещении преимущественно электроны в связи с высокой их подвижностью и отрицательные ионы фтора, а также нейтральные и активированные частицы фтора и  $CF_n$ , где  $n=0,1,2,3,4$ ; 2- при отрицательном смещении – ионы  $CF_n^+$ , где  $n=0,1,2,3$ , а также те же нейтральные и активированные частицы фтора и  $CF_n$ , где  $n=0,1,2,3,4$ .

Поступление из плазмы на кремний двух видов частиц – нейтральных и ионизированных – определяет и два вида взаимодействия этих частиц с поверхностными атомами материала: гетерогенные химические реакции с образованием стабильных летучих соединений и физические эффекты, связанные с ионной бомбардировкой. В любом случае травление крем-

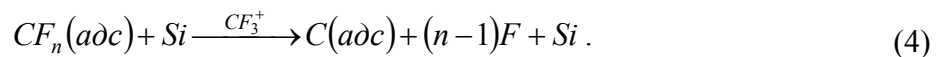
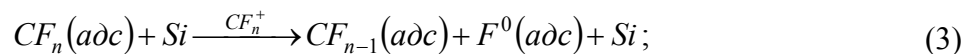
ния во фторсодержащей плазме может начаться только в результате образования связи Si-F, которая значительно сильнее связей Si-Si и F-F [4]. Однако удаление комплексов Si-F с поверхности кремния по той же причине является сложной задачей. Поэтому наиболее вероятными вариантами дальнейшего развития процесса травления кремния являются: образование промежуточных продуктов химических реакций – адкомплексов  $\text{SiF}_2$ , которые сравнительно легко (пороговая энергия радиационно-стимулированной десорбции для него составляет менее 10 эВ) могут быть десорбированы с поверхности кремния ионным ударом:



где:  $E_i$ - энергия иона, необходимая для десорбции  $\text{SiF}_{2\text{пов}}$ , а также образования летучего соединения  $\text{SiF}_4$  в результате взаимодействия двух адкомплексов  $\text{SiF}_2$  между собой. В первом варианте скорость травления кремния, очевидно, будет пропорциональна плотности тока на подложку и степени заполнения поверхности адкомплексами  $\text{SiF}_2$ . Кремний удаляется с поверхности материала при этом в виде ненасыщенных соединений  $\text{SiF}_2$ . Второй вариант процесса является преимущественным в случае избытка фтора на поверхности кремния и слабом электронно-ионном воздействии плазмы на поверхность обрабатываемого материала.

Таким образом, в случае положительного смещения на подложкодержателе, когда идет преимущественное поступление из плазмы на поверхность кремния электронов, отрицательных ионов фтора и различных нейтральных частиц плазмы, процесс травления осуществляется согласно реакции (1). Данный процесс по своей сути является чисто химическим и происходит он в условиях недостаточного поступления ионов фтора, в связи с низкой их подвижностью по сравнению с электронами. Электроны заряжают поверхность кремния и тормозят поступление на поверхность отрицательных ионов фтора. В результате этого скорость травления кремния обеих кристаллографических ориентаций при положительном смещении является наиболее низкой (см. рис. 3), а шероховатость поверхности травления в результате протекания изотропных химических реакций, имеющих сравнительно низкую поверхностную плотность очагов реакций, наиболее высокая. Перепад высот между «наноямками» и остальной поверхностью кремния в этом случае достигает 15-20 Å (рис.4).

При отрицательном смещении ионы фтора, как отмечалось выше, на поверхность кремния не поступают. Его поверхность покрывается адсорбционными слоями преимущественно  $\text{CF}_n$ , где  $n=0,1,2,3,4$ , и непосредственное образование связей Si-F затруднено. В этом случае развитие процесса травления кремния в плазме  $\text{CF}_4$  может происходить благодаря адсорбции и ударной диссоциации как другими ионами, так и самого молекулярного иона следующим образом.

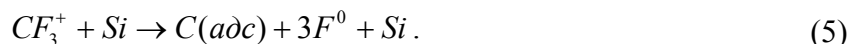


Реакции 3 и 4 происходят преимущественно в случае так называемой сильной адсорбции молекул рабочего газа или молекул продуктов реакции. При этом в отсутствие ионной бомбардировки скорость травления резко снижается.

В случае слабой адсорбции молекул рабочего газа к бомбардируемой поверхности (низкие рабочие давления) более вероятным является процесс, при котором молекулярный ион, например  $\text{CF}_3^+$ , при ударе о поверхность диссоциирует на атомы углерода и фтора, ко-



которые адсорбируются на активных центрах (ударная диссоциация самого молекулярного иона):



Далее процесс травления кремния идет уже известным путем через образование связей Si-F и адкомплексов SiF<sub>2</sub> с последующей их десорбцией в результате низкоэнергетичной ионной бомбардировки или образования летучего соединения SiF<sub>4</sub>. Однако из реакций (4) и (5) можно видеть, что в процессе травления кремния при отрицательном смещении на его поверхности идет накопление атомов углерода, который в результате поверхностной миграции может образовывать nanoостровки, препятствующие травлению кремния. В результате этого скорость травления кремния при небольших отрицательных смещениях снижается (рис.3, кривая 2). При увеличении плотности потока и энергии бомбардирующих ионов CF<sub>n</sub><sup>+</sup> за счет увеличения отрицательного смещения превалирующим становится процесс физического распыления атомов углерода. В результате этого скорость травления кремния вновь возрастает или стабилизируется (в зависимости от кристаллографической ориентации кремния (см. рис.3)), а шероховатость поверхности травления уменьшается (рис. 4 при потенциале смещения больше -200 В).

Данный механизм травления кремния в низкоэнергетичной высокоионизованной плазме СВЧ газового разряда низкого давления, очевидно, носит универсальный характер и не зависит от кристаллографической ориентации. Наблюдаемое же различие в скоростях и шероховатости поверхности травления кремния различных ориентаций, полученных в одних и тех же режимах СВЧ плазменного воздействия, обусловлено, по нашему мнению, различной плотностью оборванных связей на поверхностях кремния различных кристаллографических ориентаций. Различие в их плотности может по-разному влиять на протекание одной из важнейших стадий процесса травления, связанной с образованием на поверхности травления кремния адкомплексов SiF<sub>2</sub>. Известно, например, что у кремния ориентации <100> количество оборванных связей на поверхности больше, чем у кремния ориентации <111>. В результате этого при положительном смещении в условиях нехватки атомарного фтора скорость травления кремния <100> меньше, а шероховатость поверхности после травления больше. Напротив, в условиях избытка фтора на поверхности при небольших положительных смещениях скорость травления кремния ориентации <100> из-за высокой плотности оборванных связей должна быть выше. Это подтверждается экспериментальными данными, приведенными на рис. 3, при величинах электрических смещений в диапазоне от -50 до -300 В.

Результаты проведенных исследований и разработанная технология были использованы для создания решеток из магнитных микро- и наночастиц, используемых для записи информации с высокой плотностью. На рис. 5 приведено АСМ-изображение нанотопографии поверхности монокристаллического кремния (100), полученной низкоэнергетичным СВЧ плазмохимическим травлением во фторсодержащей плазме для осаждения на нее пленки магнитного материала.

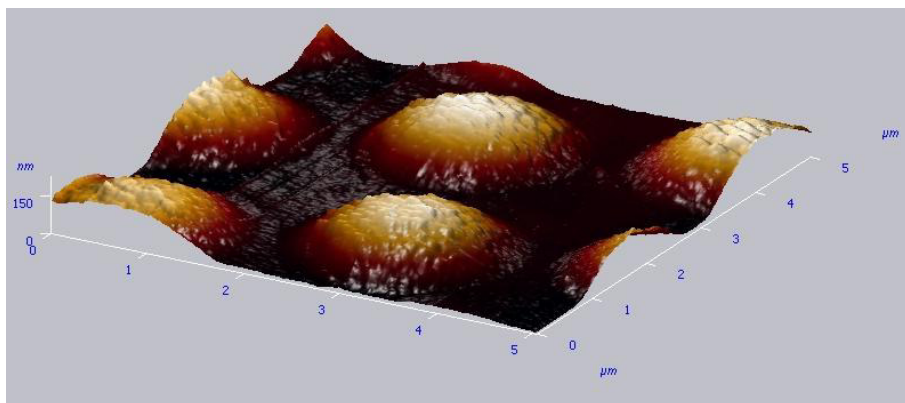


Рис.5. АСМ –изображение микротопографии кремния ориентации (100), полученной низко-энергетичным СВЧ плазмохимическим травлением во фторсодержащей плазме

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 06-07-89341

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Введение в физику поверхности / К. Оура, В.Г. Лифшиц, А.А. Саранин, А.В. Зотов, М. Катаяма М.: Наука, 2006. 490 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. N 1. С.77-120.
3. Гуляев Ю.В. Эффективность использования мощности в установках СВЧ ВПО структур микроэлектроники: Препринт / Ю.В. Гуляев, Р.К. Яфаров. №15 (516). М.: ИРЭ АН СССР, 1989. 53 с.
4. Меден А. Физика и применение аморфных полупроводников: пер. с англ. / А. Меден, М. Шо. М.: Мир, 1991. 670 с.

**Шаныгин Виталий Яковлевич** –

магистрант кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета.

**Яфаров Равиль Кяшшафович** –

доктор технических наук, старший научный сотрудник, зав. лабораторией, СО ИРЭ РАН.

*Статья поступила в редакцию 27 октября 2007г., принята к опубликованию 3 ноября 2007г.*

УДК 621.365.5

Ю.С. Архангельский, Е.М. Гришина

#### **К ВОПРОСУ О ПОЛУЧЕНИИ МАКСИМАЛЬНОЙ УДЕЛЬНОЙ ПОГЛОЩЕННОЙ МОЩНОСТИ В КАМЕРАХ ЛУЧЕВОГО ТИПА**

*Рассмотрен способ получения максимальной мощности, поглощаемой в камерах лучевого типа, с помощью многогенераторной схемы энергоподвода.*

Y.S. Arkhangel'skiy, E.M. Grishina

#### **TO QUESTION ABOUT RECEPTION MAXIMUM SPECIFIC POWER IN CAMERA OF THE BEAM TYPE**

*The considered way of the reception to maximum power, absorbed in camera of the beam type by means of much producer of the scheme power feeder.*

Для реализации технологических процессов в камерах лучевого типа (КЛТ) при наличии высокотемпературных фазовых переходов необходимо в обрабатываемом диэлектрике обеспечить максимально возможное тепловыделение, т. е. максимальную так называемую удельную поглощаемую мощность СВЧ  $P_{уд}$ . Задача может быть решена применением многогенераторной схемы энергоподвода (рис.1).

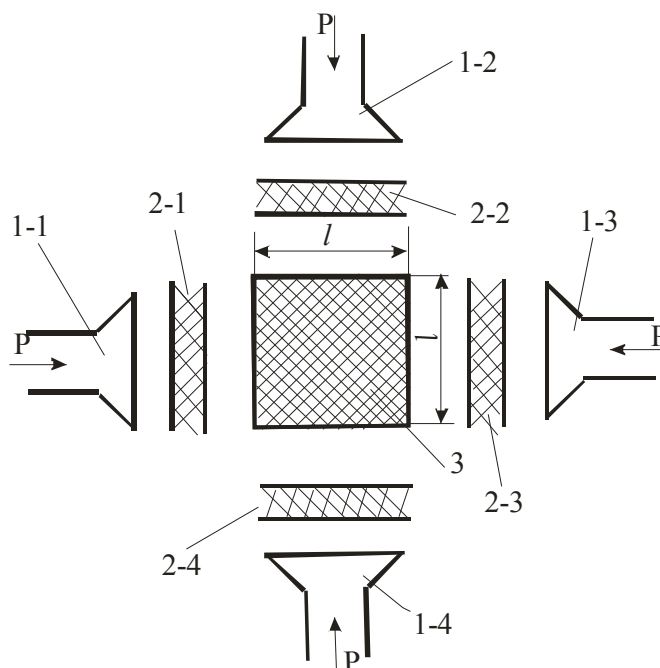


Рис.1. Многогенераторная схема энергоподвода: 1-1; 1-2; 1-3; 1-4 – рупорные излучатели; 2-1; 2-2; 2-3; 2-4 – согласующие четвертьволновые трансформаторы; 3 – обрабатываемый диэлектрик

Для согласования рупорных излучателей 1 с обрабатываемым объектом 3 в КЛТ должны быть использованы четвертьволновые согласующие трансформаторы 2 [1], причем эти трансформаторы должны быть рассчитаны с учетом элементов конструкции КЛТ, находящихся за обрабатываемым объектом по направлению распространения электромагнитной волны от каждого рупора. Если рупорные излучатели идеально согласованы с воздушной средой, СВЧ мощность, подводимая от СВЧ генератора к каждому рупору, равна  $P$ , генераторы работают на одной и той же частоте, от рупорного излучателя распространяется плоская волна с коэффициентом затухания в обрабатываемом объекте  $\alpha$ , то при квадратном поперечном сечении обрабатываемого объекта и в пренебрежении отраженными волнами внутри обрабатываемого объекта на границе раздела объект-воздух распределение СВЧ мощности по объему диэлектрика определяется соотношением

$$\frac{P_{\Sigma}}{P} = M_1 + M_2, \quad (1)$$

где

$$M_1 = f(y) \left[ e^{-a\xi_1} + e^{-a(1-\xi_1)} \right], \quad (2)$$

$$M_2 = f(x) \left[ e^{-a\xi_2} + e^{-a(1-\xi_2)} \right], \quad (3)$$

$$a = 2\alpha l, \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon'} \sqrt{\frac{1}{2}(\sqrt{1+tg^2\delta} - 1)}, \quad (5)$$

Здесь  $l$  – габаритный размер, диэлектрические параметры обрабатываемого объекта  $\varepsilon'$ ,  $tg\delta$ ;  $\lambda$  – длина волны СВЧ генератора.

Для исследования особенностей распределения мощности в обрабатываемом объекте удобно вместо учета диэлектрических параметров обрабатываемого объекта, длины волны СВЧ генератора и габаритов диэлектрика воспользоваться понятием КПД по использованию СВЧ энергии, который для показанной на рис.1 схемы в силу её симметричности можно определить как

$$\eta = 1 - e^{-2\alpha l}, \quad (6)$$

откуда

$$2\alpha l = \ln \frac{1}{1-\eta} \Rightarrow a = \ln \frac{1}{1-\eta}. \quad (7)$$

С другой стороны, обрабатываемый объект – СВЧ электромагнитная волна от рупорного излучателя 1-1 имеет нагрузкой четвертьволновый согласующий трансформатор 2-3 и рупорный излучатель 1-3 с воздушным промежутком между ними. Прошедшая в эту нагрузку СВЧ мощность может привести к выходу из строя магнетрона СВЧ генератора, питающего СВЧ энергией рупорный излучатель 1-3. Принято считать, что безопасная работа магнетрона может быть при  $K_{cmu} \leq 3$ , т.е. при  $|\Gamma| \leq 0,5$ . Поскольку четвертьволновый трансформатор 2-3 согласовывает антенный излучатель 1-3 с рабочей камерой, опасность для магнетрона представляет электромагнитная волна, пришедшая на вход рупорного излучателя 1-3. Величина этой мощности зависит от  $K_{cmu}$  нагрузки (согласующий трансформатор 2-3, рупорный излучатель 1-3 и воздушный промежуток между ними) и величины СВЧ мощности, прошедшей объект обработки.

Уровень предельно допустимой мощности, поступающей от рупорного излучателя 1-1 в рупорный излучатель 1-3, определяется, в конечном счете, конструкцией, теплоизоляционными параметрами и условиями теплообмена на поверхности катода, магнетрона, СВЧ генератора, запитывающего рупорный излучатель 1-3.

Рис.2 иллюстрирует распределение СВЧ мощности в объеме обрабатываемого объекта в произвольный момент времени, в установившемся режиме без учета зависимости диэлектрических параметров обрабатываемого объекта от температуры.

Расчеты зависимостей  $P_{\Sigma}/P$  от  $x$  и  $y$  приведены при  $f(x)$  и  $f(y)$  при  $f(x) = f(y) = 1$ , т.е. в предложении о равномерном распределении излучаемой энергии по апертуре рупорного излучателя.

Анализ рис.2 показывает, что проходящая через обрабатываемый объект мощность распределена неравномерно. На рис.3 приведена зависимость максимальной неравномерности этого распределения в зависимости от КПД по использованию СВЧ энергии.

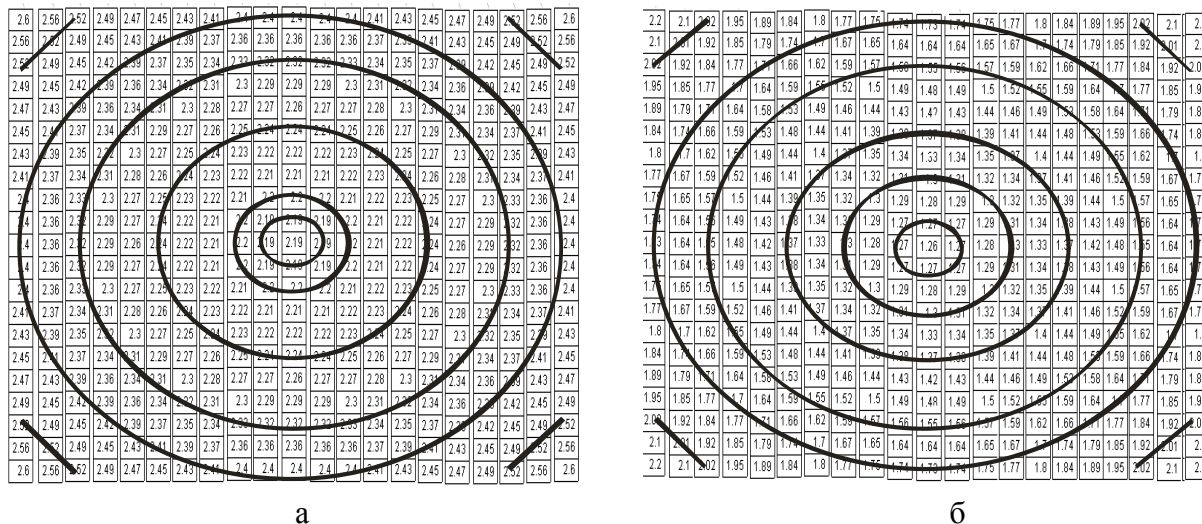


Рис.2. Линии постоянной относительной мощности в обрабатываемом объекте:  
а – при  $\eta = 0,7$ ; б - при  $\eta = 0,9$

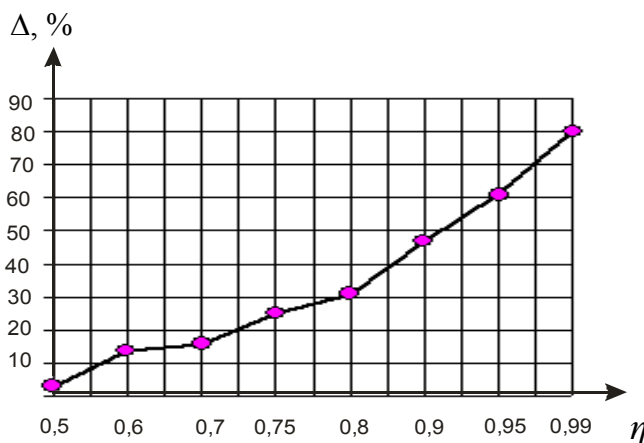


Рис.3. Зависимость максимальной неравномерности распределения СВЧ мощности в объеме обрабатываемого объекта от КПД по использованию СВЧ энергии

где

$$\Delta = \frac{\left(\frac{P_{\Sigma}}{P}\right)_{\max} - \left(\frac{P_{\Sigma}}{P}\right)_{\min}}{\left(\frac{P_{\Sigma}}{P}\right)_{\max} + \left(\frac{P_{\Sigma}}{P}\right)_{\min}} \cdot 100\% . \quad (8)$$

Что касается распределения СВЧ мощности по координате  $z$ , то при  $0 \leq z \leq l$  оно не отличается от показанного на рис.2. Разумеется, вдоль этой координаты можно было бы расположить ещё два излучателя, подводящих СВЧ энергию к плоскостям обрабатываемого объекта при  $x = 0; l$ . В этом случае величина  $P_{\Sigma}$  стало бы ещё больше, однако в такой конструкции можно было бы обрабатывать только неподвижный объект (периодический режим работы КЛТ).

Для реализации более производительного методического режима направление  $z$  должно быть свободно от рупорных излучателей для транспортировки обрабатываемого объекта через КЛТ.

### Выводы

1. В КЛТ с рупорными излучателями наибольшую мощность, поглощаемую в обрабатываемом объекте с заданными диэлектрическими свойствами, можно получить, если обрабатываемый объект в поперечном сечении имеет форму квадрата, к каждой стороне которого с применением четвертьволнового согласующего трансформатора падает СВЧ энергия от четырех некогерентных СВЧ генераторов.

2. На неравномерность распределения мощности в объеме диэлектрика влияет КПД по использованию СВЧ энергии.

3. КПД по использованию СВЧ энергии зависит от длины волны СВЧ генератора, относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь обрабатываемого объекта.

4. Применение четырех СВЧ генераторов позволяет обеспечить работу КЛТ в методическом режиме.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Архангельский Ю.С. Согласование обрабатываемого диэлектрика с рупорными излучателями камеры лучевого типа СВЧ электротермической установки / Ю.С. Архангельский, Е.М. Гришина // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2006. № 4 (19). Вып.4. С.23 – 26.

#### Архангельский Юрий Сергеевич –

доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, заведующий кафедрой «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета.

#### Гришина Екатерина Михайловна –

аспирант кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета.

*Статья поступила в редакцию 27 октября 2007г., принята к опубликованию 3 ноября 2007г.*

УДК 621.365.5

С. К. Слепцова, Д.М. Кульбацкий

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛИКАПРОАМИДНЫХ НИТЕЙ В СВЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ**

*Представлены результаты экспериментальных исследований ИК спектроскопии волоконистого поликапроамида в СВЧ электромагнитном поле.*

S.K. Sleptsova, D.M. Kulbatskiy

## **EXPLORATION OF STRINGY POLYCAPROAMIDE IN THE ELECTROMAGNETIC FIELD OF SHF**

*This article is present the results of experimental researches of the IR strength characteristics of stringy polycaproamide in the electromagnetic field of SHF.*

Поликапроамид (ПКА) является представителем большой группы полимеров, называемых полиамидами. Полиамидные волокна – ценный материал, широко применяемый для производства высококачественных товаров народного потребления (чулки, носки, трикотаж, тонкие ткани и т.п.) и технических изделий [1].

Полиамидное волокно используется в технике главным образом как каркасный материал в различных резинотехнических изделиях (тяжелые транспортерные ленты, приводные ремни и т.п.) и в пневматических авто- и авиашинах (уточный и безуточный корд). Из этих волокон изготавливаются легкие и очень прочные канаты, рыболовные сети и снасти. По мере увеличения производства полиамидных волокон области их применения непрерывно расширяются [1].

Поликапроамидные нити применяются для бельевого и верхнего трикотажа, блузочных, галстучных, платьево-костюмных тканей, хирургических нитей, фильтровальных сепарационных тканей, тканей для красящих лент ЭВМ, пишущих машин, кассовых аппаратов и телетайпов; подкладочных, платочных, корсетных, зонтичных, парусных тканей, кружевного и тюлевого полотна; лент для электротехнической промышленности, для изоляции монтажных и обмоточных проводов и т.п.

К важнейшим свойствам, обеспечивающим широкое применение волокон в народном хозяйстве, относятся прочность, удлинение, эластичность, устойчивость к многократному изгибу, устойчивость к истиранию, стойкость к низким и высоким температурам, термостабильность.

Среди перспективных методов модификации полиамидных волокон находятся нетрадиционные способы физико-химической активации электромагнитными излучениями ИК, УФ, ВЧ и СВЧ диапазонов, магнитным полем, низкотемпературной плазмой [2].

Предложен метод электрофизической модификации поликапроамидного волокна в СВЧ электромагнитном поле, новизна которого заключается в нетепловой обработке волокна

ПКА на стадии его производства, тогда как существующие методы электрофизической модификации всегда носят тепловой характер, чаще всего осуществляются в жидкофазной среде [3]. Кроме этого, СВЧ метод отличается обработкой диэлектрика за счет объемного проникновения электромагнитной волны в объект, равномерностью и быстротой воздействия.

Под нетепловым воздействием СВЧ электромагнитных колебаний следует понимать кратковременную обработку объекта в СВЧ электромагнитном поле при фиксированном постоянном уровне мощности, когда его температура остается практически неизменной.

Исследования показали, что при облучении ПКА нитей их температура не изменялась с увеличением времени СВЧ обработки. По сравнению с необлученным образцом у облученных образцов увеличилась линейная плотность  $T_\phi$  на 2,5-13,9%, относительное разрывное удлинение  $\varepsilon_p$  на 4,8-25 %, уменьшилась удельная относительная разрывная нагрузка  $P_0$  на 2,7-10 %.

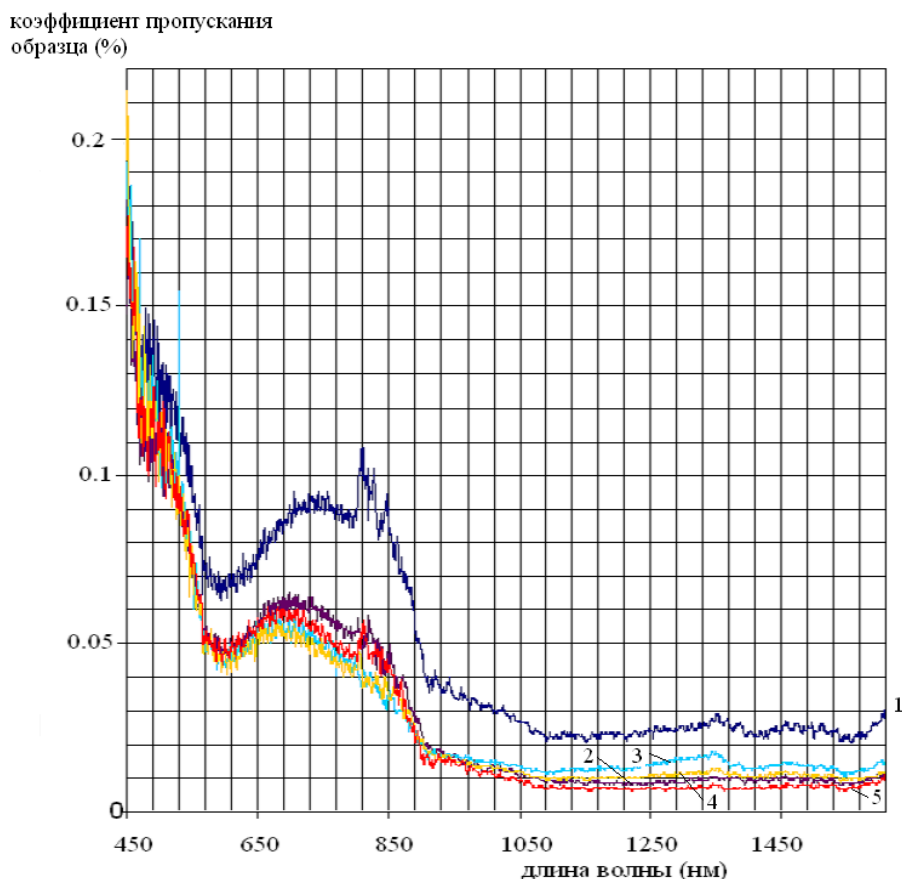
В результате исследования влияния ориентации образца в СВЧ электромагнитном поле относительно вектора напряженности  $\vec{E}$  установлено, что при ориентации ПКА нитей в СВЧ электромагнитном поле параллельно вектору напряженности  $\vec{E}$  разрывное удлинение  $\varepsilon_p$  увеличилось на 36,4-46,2%, чем при ориентации перпендикулярно вектору напряженности  $\vec{E}$ , линейная плотность  $T_\phi$  больше на 4,2-12,7%, фактическая разрывная нагрузка  $P_\phi$  больше на 2,4-9,2%, удельная относительная разрывная нагрузка  $P_0$  меньше на 3,7-7%. Этот факт доказывает влияние ориентации волокон относительно вектора напряженности  $\vec{E}$  электрического поля электромагнитной волны на модификацию свойств полимера.

Результаты измерений физико-механических свойств ПКА нитей подтверждены исследованиями их ИК-спектров в диапазоне 450-1610 нм с помощью двухлучевого оптического спектроанализатора, собранного на базе монохроматора МДР-23.

Коэффициенты оптического пропускания для четырех образцов с разным значением уровня воздействия переменным СВЧ электромагнитным полем (100, 125, 150, 200 Вт) приведены на рисунке. Из графика следует, что образцы волокна, подверженные СВЧ облучению, отличаются от необлученного (исходного) образца по 2 основным параметрам:

1. Уменьшение коэффициента пропускания на всем диапазоне измеряемых оптических длин волн.
2. Смещение функции зависимости коэффициента оптического пропускания от длины волны в сторону более коротких волн.





ИК спектроскопия ПКА нитей при генерируемой мощности СВЧ:

1 – без СВЧ облучения, 2 – 100 Вт, 3 – 125 Вт, 4 – 150 Вт, 5 – 200 Вт

Основной причиной смещения зависимости коэффициента оптического пропускания от длины волны в сторону более коротких волн является уменьшение запрещенной зоны материала волокна предположительно из-за воздействия электромагнитного поля СВЧ диапазона на полярные дефекты внутри структуры материала волокна (учитывая, что образец поглотил сравнительно малую часть энергии электромагнитного излучения).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Волокна из синтетических полимеров / под ред. Р.Хилла. М.: Изд-во иностр. лит., 1957.
2. Морыганов А.П. Разработка и освоение перспективных процессов облагораживания текстильных материалов / А.П. Морыганов, В.Н. Галашина, Э.А. Коломейцева // Техника и технология. 2001. № 5. С. 31-34.
3. Калганова С.Г. Влияние СВЧ электромагнитных колебаний на свойства поликапроамидных нитей. / С.Г. Калганова, М.Ю. Морозова, С.К. Слепцова // Труды V Междунар. конф. МКЭЭЭ-2003. Ч. 1. Крым, Алушта, 2003. С.62-66.

**Слепцова Салима Курмангалиевна** –

соискатель кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета.

**Кульбацкий Дмитрий Михайлович** – аспирант кафедры «Радиотехника» Саратовского государственного технического университета.

*Статья поступила в редакцию 27 октября 2007г., принята к опубликованию 3 ноября 2007г.*

УДК 621.365.5

С. К. Слепцова, Д.М. Кульбацкий

### **МОДИФИКАЦИЯ ПОЛИКАПРОАМИДНЫХ НИТЕЙ В СВЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ**

*В статье представлен обзор основных методов модификации и результаты экспериментальных исследований ИК спектроскопии поликапроамидных (ПКА) нитей в СВЧ электромагнитном поле.*

S.K. Sleptsova, D.M. Kulbatskiy

### **MODIFICATION OF STRINGY POLYCAPROAMIDE IN THE ELECTROMAGNETIC FIELD OF SHF**

*This article is present the results of experimental researches of IR the strength characteristics of stringy polycaproamide in the electromagnetic field of SHF.*

В настоящее время основными способами модификации полимерных материалов являются способы, обеспечивающие изменение формы, размеров, улучшающие качество и расширение ассортимента [1]. Можно говорить о физической, химической и электрофизической модификациях.

*Физическая модификация* – это направленное изменение физических (прежде всего механических) свойств полимеров, осуществляемое преобразованием их надмолекулярной структуры под влиянием физических воздействий.

Применительно к полимерным нитям ее можно осуществлять на стадии приготовления исходных полимеров, при формовании нитей, их отделке и текстильной обработке. Целью физической модификации полимерных нитей является повышение технических параметров нитей и текстильных изделий, вырабатываемых на их основе.

*Химическая модификация* полимерных нитей может быть двух типов:

- химическая модификация, основанная на реакциях в цепях полимера;
- структурно-химическая модификация, основным направлением которой является формование волокон из смесей или дисперсных полимеров [1].

Известны воздействия на среду, которые приводят к изменению ее физико-механических, физико-химических свойств и даже к полной модификации вещества, получившие название электрофизическая модификация [2-6].

Так, воздействие *лазерного* излучения на вещество проявляется в таких процессах, как теплопроводность, конвекция, переизлучение, изменение агрегатного состояния, образова-

ние ударных и звуковых волн в веществе, его ионизация, фотоэлектрические и фотохимические процессы [3].

Малый размер пятна облучения дает возможность обрабатывать и нагревать тонкие нити. Лазерное излучение широко используется при предварительной подготовке шерсти, при фиксации красителей термопластичных волокон, для текстурирования нитей, релаксации, активации химических превращений и других целей [3].

*Ионизирующее* излучение – поток элементарных частиц и (или) квантов электромагнитного излучения, который создается при радиоактивном распаде, ядерных превращениях, торможении заряженных частиц в веществе. Например, при  $\gamma$ -облучении поликапроамидных нитей происходит изменение их разрывных характеристик, выявлена стадия усадки, которая по мере увеличения дозы сменяется стадией спонтанного удлинения [2].

В текстильной промышленности используют также для воздействия на нити тлеющий разряд (низкотемпературная плазма) [4]. Совокупность частиц, разнообразных по химической активности, энергии и проникающей способности, делает низкотемпературную плазму мощным инструментом модифицирования свойств полимерных материалов, сочетающим в себе элементы как химических, так и физических факторов.

Ткани, обработанные в плазме, имеют высокую капиллярность, достаточную для нанесения рисунка, у них более высокая по сравнению с хлорированными степень белизны, такая ткань обладает более мягким грифом [5].

Но все эти методы электрофизической модификации в основном направлены на активацию реакционной способности жидкофазных систем, используемых на стадии отделки волокон или создания композиционных материалов [7]. Кроме этого, необходимость в альтернативных технологиях модификации полимерных волокон связана в некоторых случаях с многостадийностью традиционных процессов, высокими энерго- и трудозатратами, экологической напряженностью производства.

Новизна электрофизической модификации поликапроамидного (ПКА) волокна в СВЧ электромагнитном поле – в нетепловой обработке ПКА волокна на стадии его производства, тогда как существующие методы электрофизической модификации всегда носят тепловой характер [8]. Кроме этого, СВЧ метод отличается обработкой диэлектрика за счет объемного проникновения электромагнитной волны в объект, равномерностью и быстротой воздействия.

Поликапроамид является представителем большой группы полимеров, называемых полиамидами. Полиамидные волокна являются ценным материалом, широко применяемым для производства высококачественных товаров народного потребления (чулки, носки, трикотаж, тонкие ткани и т.п.) и технических изделий [1].

Под нетепловым воздействием СВЧ электромагнитных колебаний следует понимать кратковременную обработку объекта в СВЧ электромагнитном поле при фиксированном постоянном уровне мощности, когда его температура остается практически постоянной.

Исследования показали, что при облучении ПКА нитей температура с увеличением времени СВЧ обработки не изменялась.

Исследования влияния различной ориентации ПКА нитей в СВЧ электромагнитном поле относительно вектора напряженности  $\vec{E}$  показывают, что при ориентации ПКА нитей параллельно вектору напряженности  $\vec{E}$  разрывное удлинение  $\varepsilon_p$  увеличилось на 36,4-46,2%, по сравнению с ориентацией перпендикулярно вектору напряженности  $\vec{E}$ , линейная плот-

ность  $T_{\phi}$  больше на 4,2-12,7%, фактическая разрывная нагрузка  $P_{\phi}$  больше на 2,4-9,2%, удельная относительная разрывная нагрузка  $P_0$  меньше на 3,7-7%.

Показано, что при расположении нити параллельно вектору напряженности электрического поля  $\vec{E}$  в процессе обработки при  $t_{СВЧ} = 8-15$  с наблюдается увеличение времени разрыва  $T_{разрыва}$  ПКА нитей по сравнению с нитью, расположенной перпендикулярно вектору напряженности электрического поля  $\vec{E}$  [9]. Эти факты доказывают влияние ориентации волокон относительно вектора напряженности  $\vec{E}$  электрического поля электромагнитной волны на модификацию свойств полимера.

Влияние различной ориентации ПКА нитей в СВЧ электромагнитном поле относительно вектора напряженности  $\vec{E}$  на их структуру наблюдалось также с помощью ИК спектроскопии ПКА нитей.

Оптическое пропускание поликапроамидного волокна измерялось на двухлучевом оптическом спектроанализаторе, собранном на базе монохроматора МДР-23 в диапазоне 450-1610 нм (пояснение отличия №1,2,3). Результаты измерений приведены на рисунке, из которого можно сделать следующие выводы:

1. Величину оптического пропускания для трех исследованных образцов можно разделить на три основных интервала (I – 450÷570 нм; II – 570÷900 нм; III -- 900÷1610 нм).
2. Исходный образец №1 отмечается по коэффициенту пропускания от образцов №2, 3, подверженных СВЧ обработке, повышенным значением прозрачности во всем диапазоне измеряемых длин волн.
3. Образцы №2, 3 имеют более сглаженную функцию оптического пропускания во всех интервалах измеряемых длин волн.
4. На I интервале длин волн образцы №2, 3 имеют практически одинаковое значение коэффициента оптического пропускания.
5. В интервале II у образцов №2, 3 становится заметным расхождение по абсолютному уровню оптического пропускания, но не по виду функции.
6. Интервал III для образцов №2, 3 характеризуется более равномерной функцией. При этом отчетливо наблюдается увеличение интервала коэффициента пропускания между двумя образцами с ростом длины волны.

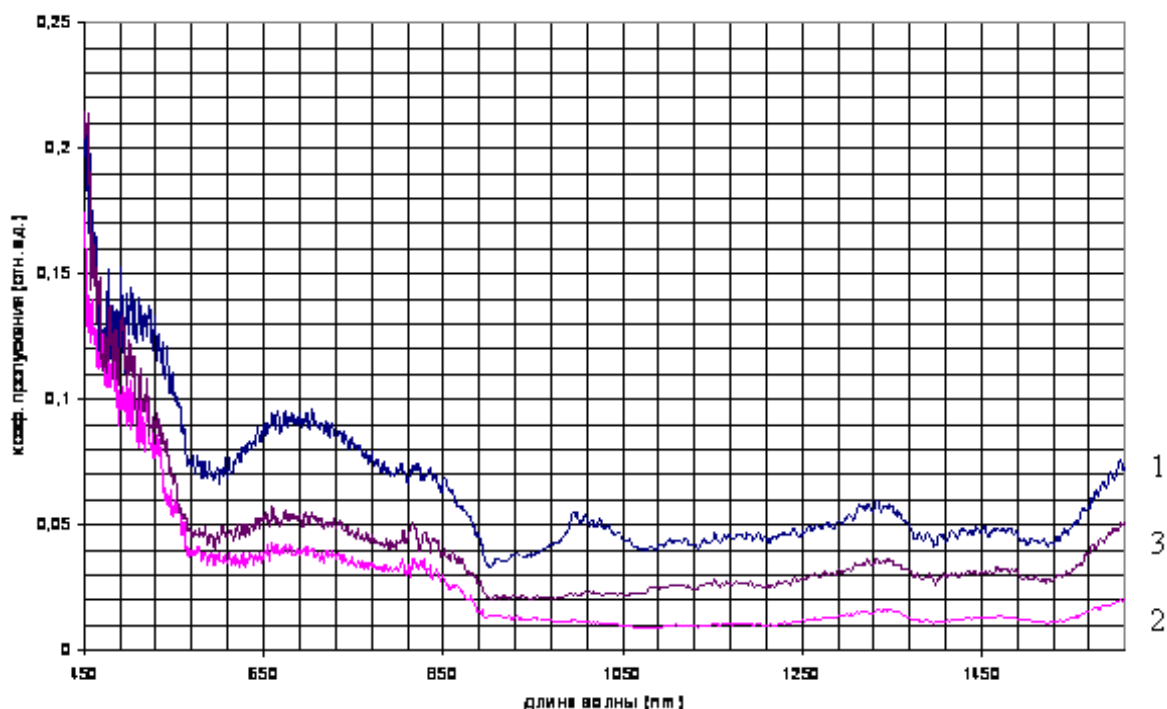


Рис. 1. Оптический коэффициент пропускания полимерных нитей (№1 – без воздействия СВЧ электромагнитного поля, №2 – обработанный перпендикулярно вектору напряженности  $\vec{E}$  электромагнитной волны электрического поля, №3 – параллельно вектору напряженности  $\vec{E}$  электромагнитной волны электрического поля)

Возможной причиной этого эффекта является изменение числа дефектов поликапроамидного волокна. На образце №1, не подверженном воздействию СВЧ электромагнитного поля, плотность дефектов минимальна, проявляются только две энергетические полосы залегания дефектов. Поглощение на этих участках спектрального диапазона проявляется в функции оптического пропускания и характеризуется оптическими резонансами на внутренних дефектах. После воздействия СВЧ энергией на образцы №2, 3 произошло изменение внутренней структуры поликапроамида, что характеризуется более сглаженной функцией по сравнению с первоначальной (образец №1). Сглаженность спектральной кривой и рост оптического поглощения свидетельствуют об увеличении плотности внутренних дефектов в образцах.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Волокна из синтетических полимеров / под ред. Р.Хилла. М.: Изд-во иностр. лит., 1957.
2. Тараканов Б.М. Влияние  $\gamma$ -облучения на структуру и механические свойства нитей из поликапроамида / Б.М. Тараканов, Е.С. Громова, Ю.И. Соколов // Химические волокна. 1998. №2. С.47-50.
3. Воздействие лазерного излучения на материалы / Р.В.Арутюнян, В.Ю.Баранов, Л.А. Большов и др. М.: Наука, 1989.
4. Шарнина Л.В. Применение низкотемпературной плазмы при обработке текстиль-

ных материалов / Л.В. Шарнина, Б.Н. Мельников, И.Б. Блиничева // Химические волокна. 1996. №4. С. 48-51.

5. Вольфсон С.А. Основные направления развития технологии полимерных материалов / С.А. Вольфсон, Г.И. Фойдель. М.: Знание, 1980.

6. Морыганов А.П. Разработка и освоение перспективных процессов облагораживания текстильных материалов / А.П. Морыганов, В.Н.Галашина, Э.А. Коломейцева // Техника и технология. 2001. №5. С. 31-34.

7. Морозова М.Ю. Физико-химические основы технологии модифицирования полимерных композиционных материалов / М.Ю. Морозова, С.Е. Артеменко, Т.П. Устинова // Химические волокна. 1998. № 4. С. 7.-17.

8. Калганова С.Г. Влияние СВЧ электромагнитных колебаний на свойства поликапроамидных нитей / С.Г. Калганова, М.Ю. Морозова, С.К. Слепцова // Электромеханика, электротехнологии и электроматериаловедение: МКЭЭЭ-2003: труды 5-й Междунар. науч. конф., Ч.1. Крым, Алушта, 2003. С. 62-66.

9. Слепцова С.К. Модификация волокнистого поликапроамида в СВЧ электромагнитном поле / С.К. Слепцова, В.А. Лаврентьев // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2006. №4(19). Вып. 4. С. 144-147.

**Слепцова Салима Курмангалиевна –**

соискатель кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета.

**Кульбацкий Дмитрий Михайлович –**

аспирант кафедры «Радиотехника» Саратовского государственного технического университета.

*Статья поступила в редакцию 27 октября 2007г., принята к опубликованию 3 ноября 2007г.*