

ВЕСТНИК
САРАТОВСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА
2006

№ 4 (19)
Выпуск 4

Научно-технический журнал

Издается с 2003 г.

Декабрь 2006 г.

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

Главный редактор	д.т.н., профессор Ю.В. Чеботаревский
Зам. главного редактора	д.э.н., профессор В.Р. Атоян
Ответственный секретарь	д.т.н., профессор А.А. Игнатъев

Редакционный совет: д.э.н. В.Р. Атоян (заместитель председателя), д.т.н. В.И. Волчихин, д.т.н. В.А. Голенков, д.и.н. В.А. Динес, д.х.н. В. Зеленский (Польша), д.т.н. В.А. Игнатъев, д.т.н. В.В. Калашников, д.ф.-м.н. Л.Ю. Коссович, д.т.н. И.А. Новаков, д.т.н. А.Ф. Резчиков, д.т.н. Ю.В. Чеботаревский (председатель), д.ф.-м.н. Ян Аврейцевич (Польша), д.э.н. Улли Арнольд (Германия), д.ф.-м.н. Энтони Мерсер (Великобритания), д.э.н. Э.де Соузе Феррейра (Португалия), д.т.н. Т. Чермак (Чехия), д.э.н. Ю.В. Шленов.

Редакционная коллегия: д.т.н. К.П. Андрейченко, д.т.н. А.И. Андриющенко, д.т.н. Ю.С. Архангельский, д.филос.н. А.С. Борщов, д.т.н. А.С. Денисов, д.т.н. Ю.Г. Иващенко, д.т.н. Ю.Н. Климочкин, д.т.н. В.А. Коломейцев, д.т.н. А.В. Королев, д.т.н. В.А. Крысько, д.т.н. В.И. Лысак, д.т.н. В.Н. Лясников, д.т.н. А.И. Финаенов, д.социол.н. А.Ю. Слепухин, д.т.н. М.А. Щербаков.

Редактор Л.А. Скворцова
Компьютерная верстка И.А. Житомирской

Адрес редакции:
Саратов, 410054, ул. Политехническая, 77
Телефон: (845 2) 52 74 02
E-mail: vestnik @ sstu. ru; vra @ sstu. ru
<http://dni.sstu.ru/vestnik.nsf>
Факс: (845 2) 50 67 40

Подписано в печать 15.12.06
Формат 60×84 1/8 Бум. офсет.
Усл. печ. л. 18,13 (19,5) Уч.-изд. л. 18,0
Тираж 500 экз. Заказ 604
Отпечатано в РИЦ СГТУ,
410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77

Подписной индекс 18378
(каталог «Газеты. Журналы» на 1-е полугодие 2007 г.)

ISBN 5-7433-1735-6

© Саратовский государственный
технический университет, 2006

**VESTNIK
SARATOV
STATE
TECHNICAL
UNIVERSITY**

2006

**№ 4 (19)
Edition 4**

Scientific Journal

Since 2003

December 2006

This journal is included into the list of the leading reviewed magazines and scientific periodicals approved by the Presidium of the HAC, Ministry of Education and Science of Russian Federation. Major scientific results of dissertations for the scientific degree competition, Doctor of Science, are published here.

Editor-in-chief	Doctor of Technical Sciences, Pr. Y.V. Chebotarevsky
Editor-in-chief assistant	Doctor of Economics, Pr. V.R. Atoyan
Executive secretary	Doctor of Technical Sciences, Pr. A.A. Ignatyev

Drafting committee: Pr. V.R. Atoyan (Vice of the Chairman), Pr. V.I. Volchihin, Pr. V.A. Golenkov, Pr. V.A. Dines, Pr. V. Zelensky (Poland), Pr. V.A. Ignatyev, Pr. V.V. Kalashnikov, Pr. L.Y. Kossovich, Pr. I.A. Novakov, Pr. A.F. Rezhnikov, Pr. Y.V. Chebotarevsky (the Chairman), Pr. Yan Avreytsevich (Poland), Pr. Ulli Arnold (Germany), Pr. Anthony Merser (UK), Pr. E. D'Sousa Ferreira (Portugal), Pr. T. Chermak (Chezh Republic), Pr. Y.V. Shlenov.

Editorial board: Pr. K.P. Andreychenko, Pr. A.I. Andryushenko, Pr. Y.S. Arkhangelsky, Pr. A.S. Borshov, Pr. A.S. Denisov, Pr. Y.G. Ivashenko, Pr. Y.N. Klimochkin, Pr. V.A. Kolomeitsev, Pr. A.V. Korolyov, Pr. V.A. Krysko, Pr. V.I. Lysak, Pr. V.N. Lyasnikov, Pr. A.I. Finaenov, Pr. A.Y. Slepukhin, Pr. M.A. Sherbakov.

Editor L.A. Skvortsova
Computer-based page-proof I.A. Zhitomirskaya

Editorial office: 77, Politechnicheskaya Street
Saratov, 410054
Russia

Telephone: +8452/52-74-02
E-mail: vestnik @ sstu. ru; vra @ sstu. ru
<http://dni.sstu.ru/vestnik.nsf>
Fax: +8452/50-67-40

Signed for publishing: 15.12.06
Format 60×84 1/8 Paper offset.
Apr. tp. l. 18,13 (19,5) Acc.-pbl. l. 18,0
Edition 500 psc. Order 604
Printed in EPC of SSTU,
77, Politechnicheskaya St., Saratov, 410054, Russia

Энергетика и электротехника

Этот выпуск «Вестника Саратовского государственного технического университета» является тематическим. В нем публикуются статьи ученых ведущей научной школы России НШ-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 НШ-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 НШ-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 НШ-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 г.

Руководитель научной школы
НШ-9553.2006.8,

УДК 621.314.2(075.8)

И.И.Артюхов, В.В.Тютманова, А.Г.Сошинов

НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ СВЧ ГЕНЕРАТОРОВ МАГНЕТРОННОГО ТИПА

Формулируются требования к источникам питания СВЧ генераторов магнетронного типа, анализируются существующие схемные решения и предлагаются новые технические решения, направленные на улучшение массогабаритных, энергетических, стоимостных и других характеристик магнетронных генераторов.

I.I. Artjukhov, V.V. Tjutmanova, A.G. Soshinov

DIRECTIONS OF PERFECTION TU POWER SUPPLIES OF MAGNETRON MICROWAVE FREQUENCY GENERATORS

Requirements to power supplies of microwave frequency generators of magnetron type are considered, present kinds of circuit are analyzed and new technical decisions, directed to improvement of mass-dimensional and energy, cost and other characteristic of magnetron generators are proposed.

Использование энергии электромагнитных колебаний микроволнового диапазона является перспективным направлением в области тепловой обработки диэлектриков. Благодаря ряду преимуществ установки СВЧ нагрева нашли широкое применение как в промышленности, так и в бытовой технике [1,2].

Одним из основных узлов установки диэлектрического нагрева является источник СВЧ энергии, который содержит генератор СВЧ колебаний и источник питания. СВЧ генератор – это прибор, в котором электрическая энергия постоянного или переменного тока преобразуется в энергию электромагнитного поля сверхвысоких частот. На современном этапе наиболее широкое применение получили генераторы магнетронного типа (магнетроны), которые работают в основном на частотах 915 и 2450 МГц [3]. Из приборов других типов наиболее перспективными считаются клистрон и СВЧ триод. Источник питания обеспечивает СВЧ генератор необходимой электрической энергией.

Основные требования, предъявляемые к источникам питания магнетронных генераторов

Для работы магнетрона к нему необходимо подвести энергию двух источников: анодного питания и питания цепи накала катода. Если эти источники подключены к электрической сети промышленной частоты 50 Гц, то блок-схема СВЧ генератора магнетронного типа может быть изображена так, как это показано на рис. 1. Для обеспечения работы магнетрона к нему подводится напряжение от двух источников: анодного питания и питания цепи накала катода.

Подводимая от источника анодного питания мощность определяется выбором точки на рабочей характеристике:

$$P_{подв} = I_a U_a. \quad (1)$$

Большая часть мощности выделяется на аноде, однако бомбардировке подвергается и

катод. В типичных эксплуатационных режимах мощность обратной бомбардировки катода составляет 4 – 6 % подводимой от источника анодного питания мощности.

Суммарная мощность источников анодного и катодного питания может быть определена по формуле:

$$P_a + P_H = P_{СВЧ} / \eta_m,$$

где $P_{СВЧ}$ – генерируемая мощность; η_m – КПД магнетрона.

Большая часть мощности выделяется на аноде, однако бомбардировке подвергается и катод. В типичных эксплуатационных режимах мощность обратной бомбардировки катода составляет 4 – 6 % подводимой от источника анодного питания мощности.

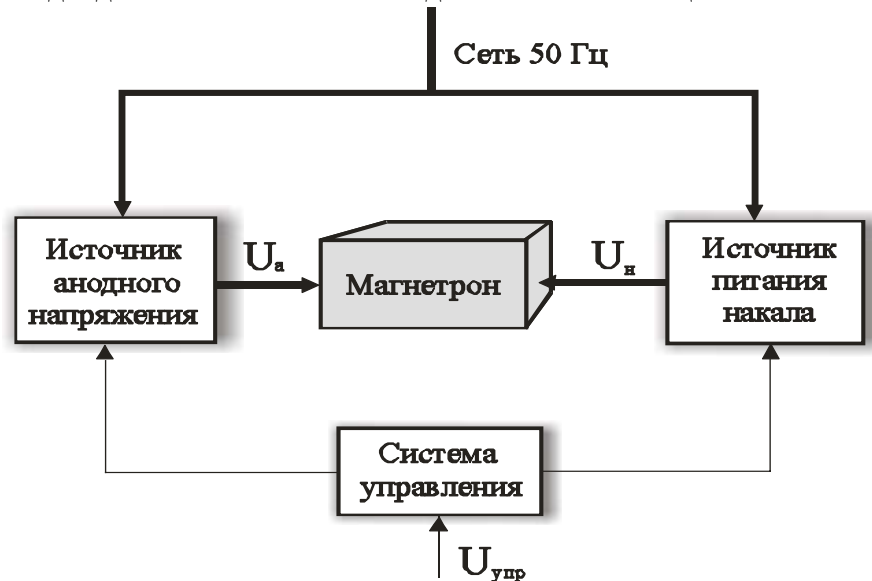


Рис. 1. Блок-схема СВЧ генератора магнетронного типа

Источник питания цепи накала обеспечивает разогрев катода. Надежная эмиссионная его способность достигается в ограниченном интервале температур. Ниже минимально допустимой температуры эмиссия становится недостаточной для получения необходимого уровня выходной мощности, выше верхней границы происходит быстрое истощение активного компонента эмиттера, что приводит к потере эмиссии. Например, для вольфрам-танталового катода рабочий интервал температур составляет 2100 – 2300⁰ К. Следовательно, при эксплуатации магнетрона подводимая мощность накала должна поддерживаться в заданных пределах.

Мощность, потребляемая от источника питания накала, составляет 3 – 4 % от мощности в цепи анодного питания. Как правило, данный уровень мощности необходим для ввода магнетрона в рабочий режим. После предварительного разогрева катода и подачи анодного напряжения мощность, потребляемая от источника питания накала, уменьшается, а в ряде случаев источник может отключаться совсем. Катод разогревается за счет выделяемой на нем мощности обратной бомбардировки. Время разогрева катода зависит от массы катода и обычно не превышает 1 – 3 мин. Для уменьшения этого времени часто используют форсированный режим разогрева катода. Например, время разогрева катода в магнетроне М-136-1 составляет 2 – 3 с, в магнетроне М-147 – 10 с, в магнетроне М-146 – от 2 до 3 мин. Если в процессе эксплуатации от магнетрона требуется изменение средней мощности, необходимо обеспечить соответствующую регулировку мощности накала.

Эксплуатационные особенности магнетрона характеризуются двумя видами графических зависимостей: нагрузочной и рабочей. Нагрузочные характеристики представляют собой зависимости выходной мощности и генерируемой частоты от модуля и фазы коэффици-

ента стоячей волны напряжения. К рабочим характеристикам относят вольт-амперные характеристики, снятые при фиксированных значениях магнитной индукции, а также зависимости выходной мощности, КПД и генерируемой частоты от анодного тока. Выбор тока, а не напряжения в качестве эксплуатационного параметра электрического режима в данном случае обусловлен тем, что в магнетроне анодный ток существенно изменяется при весьма малом изменении анодного напряжения. Такой выбор обеспечивает высокую точность установки рабочего режима магнетрона и контроль над ним в условиях эксплуатации. Рабочие характеристики снимаются при неизменных параметрах нагрузки [3].

На рис.2 представлена вольт-амперная характеристика магнетрона типа М152-1А5А, выходная мощность которого составляет не менее 1 кВт, анодное напряжение находится в диапазоне 4,4 – 4,6 кВ, ток анода может изменяться от 0,30 до 0,35 А.

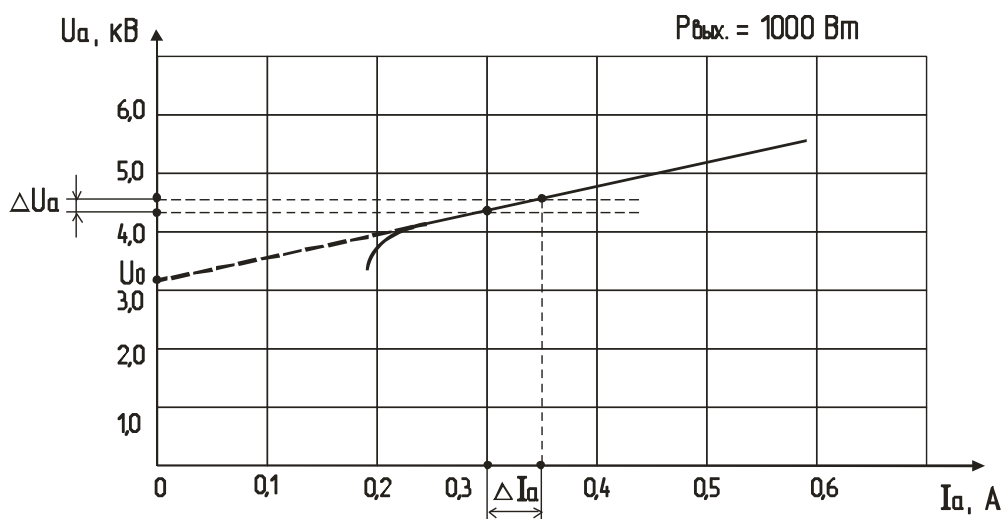


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика магнетрона М152–1А5А

На рис.3 представлена вольт-амперная характеристика магнетрона типа М163, выходная мощность которого составляет не менее 3 кВт. Анодное напряжение находится в диапазоне 4,45 – 4,5 кВ, ток анода может изменяться в пределах 1,1 – 1,3 А.

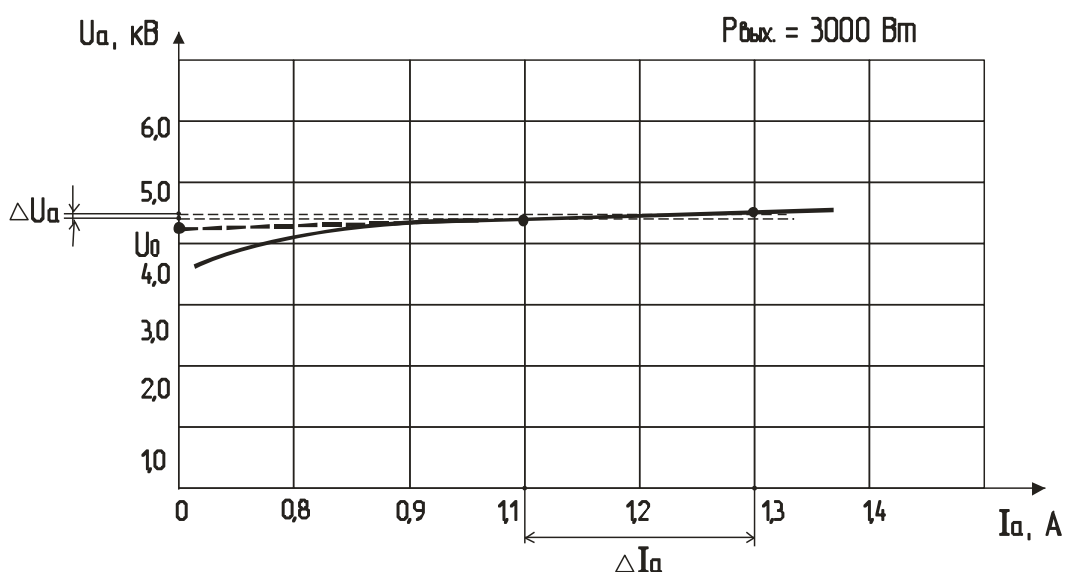


Рис.3. Вольт-амперная характеристика магнетрона М163

На рис. 4 представлены вольт-амперные характеристики магнетронов «Бокал» (производитель – Киевский завод «Генератор») и М 168 (производитель – ФГУП НПП «Исток», дочернее предприятие ГУНПП «Магратеп», г.Фрязино). Выходная мощность обоих магнетронов составляет 5 кВт. Анодное напряжение магнетрона типа «Бокал» имеет значение не более 6 кВ, а ток анода может изменяться в пределах от 1,5 до 2,0 А. У магнетрона типа М168 значение анодного напряжения не более 5 кВ, тока анода не должен превышать 1,65 А.

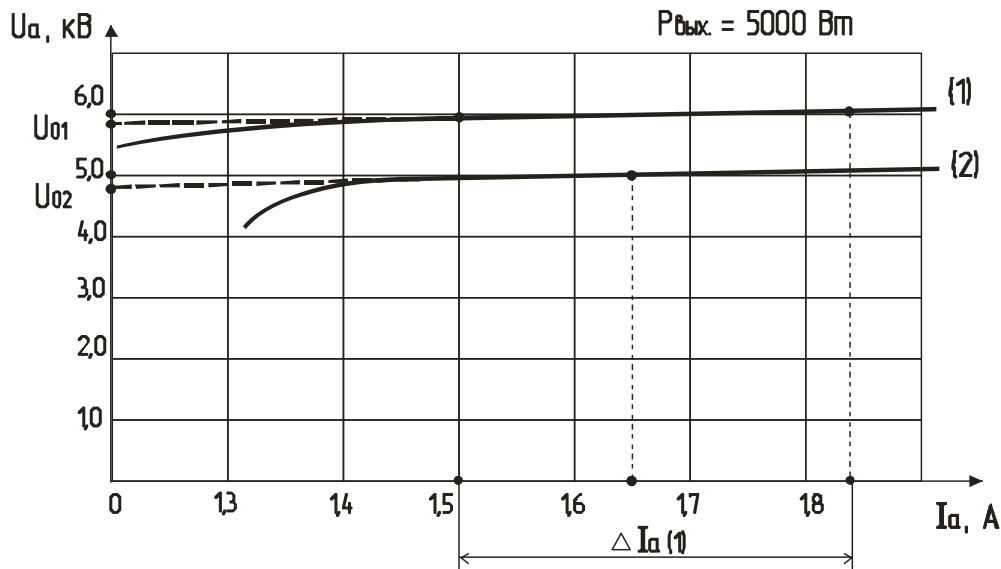


Рис.4. Вольт-амперные характеристики: 1 – магнетрона типа «Бокал», 2 – магнетрона типа М 168

Из приведенных графиков отчетливо видно, что для источника анодного питания магнетрон представляет собой нагрузку со специфическими свойствами, к числу которых относятся следующие:

- * узкая область рабочих значений анодного напряжения, зависящих от магнитной индукции и параметров нагрузки;
- * малая величина динамического сопротивления и существенная зависимость выходной мощности от анодного тока.

В этих условиях анодное питание магнетрона наиболее целесообразно осуществлять от источника с высокой стабильностью выходного тока.

Величины тока и напряжения, при которых магнетрон работает с источником анодного питания, в соответствии со вторым законом Кирхгофа, записанным для контура, включающего нагрузку и выход этого источника, определяются точкой пересечения вольт-амперной характеристики магнетрона и внешней характеристики источника.

Вольт-амперная характеристика магнетрона при кусочно-линейной аппроксимации имеет вид

$$U_a = I_a R_{дин} + U_0,$$

где $R_{дин}$, U_0 – соответственно динамическое сопротивление и пороговое напряжение магнетрона.

Внешняя характеристика источника питания описывается выражением

$$U_a = E - I_a R_{вн},$$

где $E, R_{вн}$ – ЭДС и внутреннее сопротивление источника соответственно.

Если внутреннее сопротивление $R_{км}$ источника анодного питания мало, то его внешняя характеристика имеет малый наклон к оси токов, как и вольт-амперная характеристика магнетрона. В этом случае даже небольшое изменение напряжения источника питания сопровождается существенным изменением анодного тока магнетрона, что иллюстрируется построениями на рис.5. Представленные здесь прямые соответствуют вольт-амперной характеристике магнетрона (1) и внешним характеристикам источника питания для двух значений напряжения (2 и 3). Изменения напряжения источника и тока магнетрона обозначены через ΔE и ΔI_a .

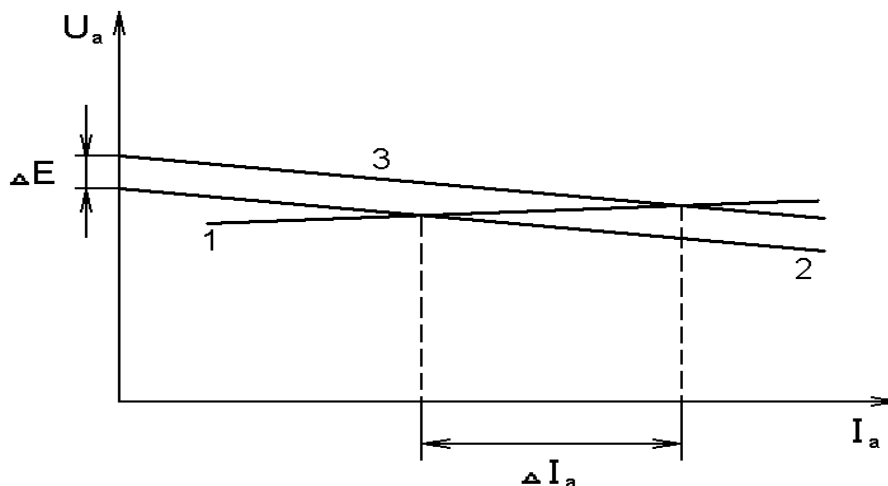


Рис. 5. Зависимость режима работы магнетрона от анодного напряжения

Установка заданного значения анодного тока магнетрона затруднена из-за зависимости хода вольт-амперной характеристики от магнитной индукции, при которой работает прибор. Например, увеличение магнитной индукции приводит к смещению характеристики в сторону больших значений анодного напряжения. Это, в свою очередь, сопровождается уменьшением анодного тока, что иллюстрируется построениями на рис.6. Следовательно, требуется регулировка выходного напряжения источника питания.

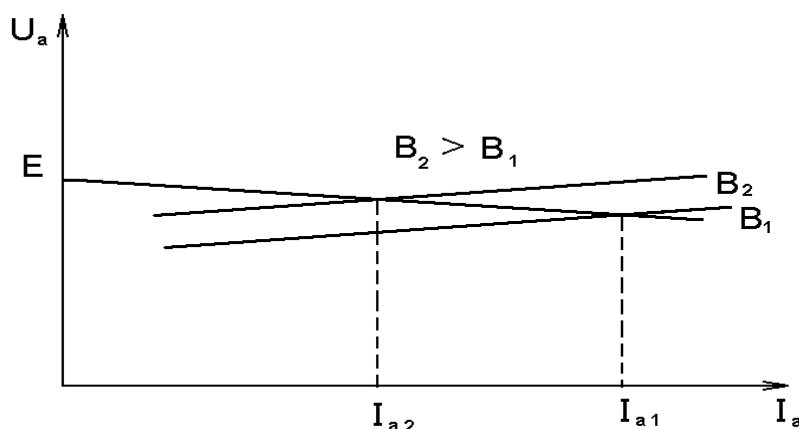


Рис.6. Зависимость режима работы магнетрона от магнитной индукции

В том случае, когда магнитное поле создается электромагнитом, требуемое значение

тока магнетрона можно обеспечить регулировкой тока электромагнита, поэтому необходимости регулировки источника питания нет. При использовании постоянного магнита имеют место технологические разбросы в величине магнитного поля. Для компенсации этих разбросов вместо регулировки источника питания часто делают несколько отводов от вторичной обмотки трансформатора, и опытным путем подбирается такой отвод, при котором достигается наименьшее отклонение анодного тока магнетрона от требуемого значения.

Критичность сопряжения магнетрона с выпрямителем, а также зависимость его анодного тока от изменения питающего напряжения могут быть уменьшены включением последовательно с прибором балластного резистора, что эквивалентно увеличению внутреннего сопротивления источника питания. Это приводит к увеличению наклона внешней характеристики к оси токов. Одновременно уменьшается величина анодного тока по сравнению с током при нулевом внутреннем сопротивлении источника, если его выходное напряжение остается неизменным.

Исходя из перечисленных выше особенностей работы генератора магнетронного типа, можно сформулировать следующие основные требования, предъявляемые к источнику электропитания.

1. Мощность источника питания должна быть такой, чтобы обеспечивалось функционирование анодной и катодной цепей магнетрона.
2. Напряжение на выходе источника питания должно строго соответствовать требуемому значению анодного напряжения магнетронного генератора.
3. Напряжение накала, подаваемое на катод от источника питания, должно поддерживаться в строго заданных пределах.
4. Источник питания должен иметь минимальные массу, габариты, стоимость и электрические потери.
5. Источник питания должен отличаться простотой конструкции, иметь длительный срок эксплуатации, потреблять ток, максимально приближенный по форме к синусоиде.

Технические решения, применяемые для построения источников питания СВЧ генераторов магнетронного типа

На рис.7 приведена традиционная электрическая схема источника питания магнетрона. Схема включает высоковольтный трансформатор Т1, высоковольтный выпрямитель В, трансформатор питания накала магнетрона Т2 и электромагнит Э магнетрона М (для непакетированного магнетрона).

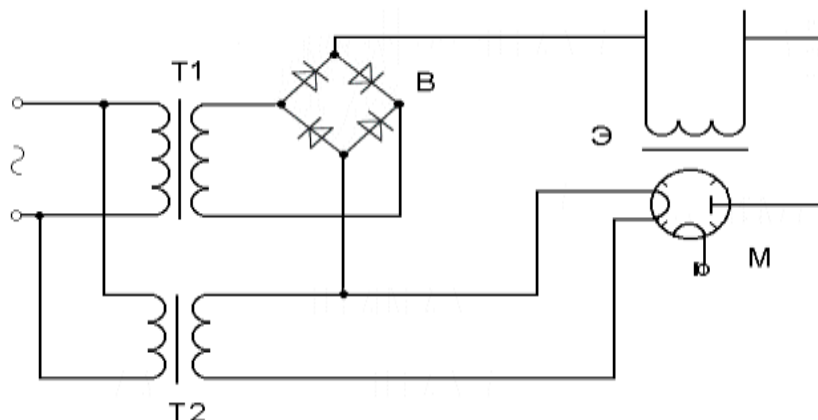


Рис.7. Схема источника питания магнетронного генератора

с высоковольтным выпрямителем

Для питания магнетронов в технологических установках часто используют несглаженное выпрямленное напряжение, так как применение сглаживающих фильтров усложняет конструкцию источника питания, увеличивает вес источника СВЧ энергии и делает СВЧ установку более дорогостоящей [1].

Для того, чтобы упростить и удешевить источник СВЧ энергии, для питания магнетронов непрерывного действия можно использовать непосредственно сеть переменного тока. Электрическая схема такого источника СВЧ энергии представлена на рис.8. Она содержит два магнетрона VL1 и VL2, высоковольтный трансформатор Т, два электромагнита Э, дроссель L_d .

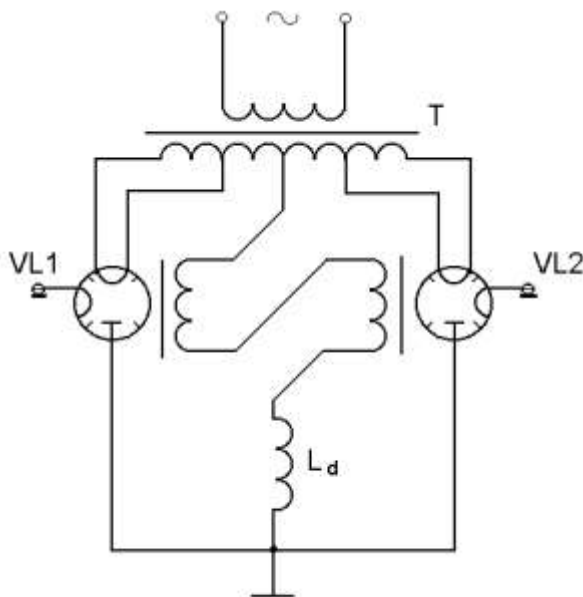


Рис.8. Схема безвыпрямительного питания двух магнетронов

Магнетроны VL1 и VL2, работающие на общую нагрузку, включены в схеме во вторичную обмотку высоковольтного трансформатора Т по схеме двухполупериодного выпрямления. Электромагниты, обозначенные на рисунке буквой Э, предназначены для создания рабочего магнитного поля магнетронов, включены между средней точкой вторичной обмотки трансформатора Т и последовательно соединены с анодами магнетронов. Последовательно с электромагнитами включен дроссель с большой индуктивностью L_d . Благодаря такому включению через обмотки электромагнитов и дроссель протекают анодные токи двух магнетронов. При достаточной индуктивности этой цепи происходит сглаживание нежелательных пульсаций тока, что позволяет поддерживать анодное напряжение практически неизменным в течение каждого полупериода, при этом каждый магнетрон работает в течение полупериода.

Основным достоинством такой схемы является то, что она позволяет автоматически поддерживать оптимальные режимы работы магнетронов, так как любому изменению анодного тока препятствует появляющееся при этом изменение напряженности магнитного поля. Это особенно важно при работе генераторов магнетронного типа на переменную нагрузку, так как дает возможность увеличить мощность и КПД. Применение электромагнитов уменьшает стоимость эксплуатации установок, так как замена магнетрона не сопровождается заменой магнитной системы, как это делается при использовании пакетированных приборов. Правда, при выходе из строя одного из магнетронов возможен пробой дросселя, служащего электромагнитом. Это может привести к выходу из строя второго магнетрона.

Недостаток электрической схемы безвыпрямительного источника питания двух магнетронов, приведенной на рис.8, удастся устранить, если первичную обмотку накального

трансформатора первого магнетрона соединить последовательно с первичной обмоткой накаливающего трансформатора второго магнетрона. Электрическая схема безвыпрямительного питания двух магнетронов с раздельным включением подогревателей катодов представлена на рис.9. Магнетроны VL1 и VL2 включены во вторичную обмотку высоковольтного трансформатора Т по схеме двухполупериодного выпрямления. Электромагниты Э1 и Э2 включены между средней точкой вторичной обмотки трансформатора Т и последовательно соединены с анодами магнетронов, дроссель L_d включен последовательно с электромагнитами, T_{H1} и T_{H2} накаливающие трансформаторы магнетронов VL1 и VL2. В случае перегорания подогревателя одного из катодов разрывается цепь вторичной обмотки соответствующего трансформатора, падение напряжения на его первичной обмотке резко возрастает, что приводит к исчезновению тока во вторичной обмотке трансформатора, то есть к прекращению подогрева второго магнетрона. Таким образом, оба подогревателя перестают работать одновременно. Ток через дроссель спадает плавно, поэтому возможность перенапряжения на дросселе исключается [1].

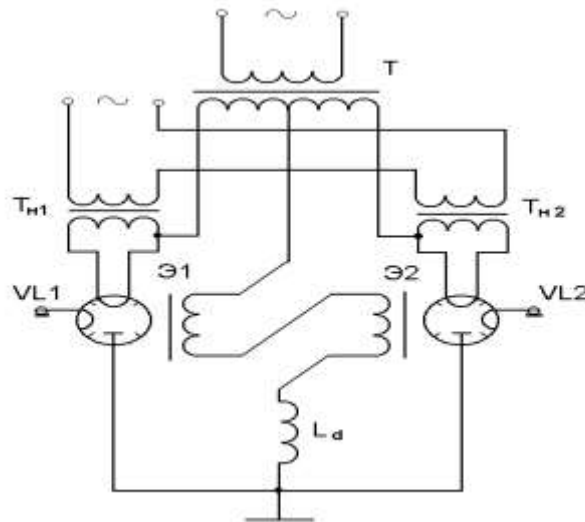


Рис.9. Схема безвыпрямительного питания двух магнетронов с раздельным включением подогревателей катодов

Схемы, представленные на рис.7 – 9, предназначены для источников СВЧ энергии, в которых используются непакетированные магнетронные генераторы.

При построении установок СВЧ нагрева с пакетированными магнетронами наиболее часто используется схема анодного питания, которая показана на рис.10.

Источник анодного питания магнетрона в установке промышленного типа включает повышающий трансформатор Т и высоковольтный выпрямитель на диодах VD1...VD6. «Минус» выпрямителя подается на катод магнетрона VL, «плюс» – через дроссель L_d и прибор контроля анодного тока (на схеме не показан) подключается к заземленному корпусу магнетрона. Для регулирования генерируемой мощности первичные обмотки трансформатора Т подключаются к фазам сети 380 В/50 Гц через тиристорный регулятор VS1...VS6.

Описанное выше техническое решение отличается простотой схемы, возможностью автоматического управления мощностью генератора СВЧ энергии и достаточно высоким КПД. Вместе с тем источник питания, построенный по такой схеме, не отвечает современным требованиям. Так, например, источник питания генератора «Хазар-3» мощностью 3 кВт имеет массу 200 кг, что больше массы высокочастотного блока в 5 раз. Объем источника питания этого

генератора со-
дм³ (при этом
частотного бло-
дм³).

ставляет 128
объем высоко-
ка меньше на 48

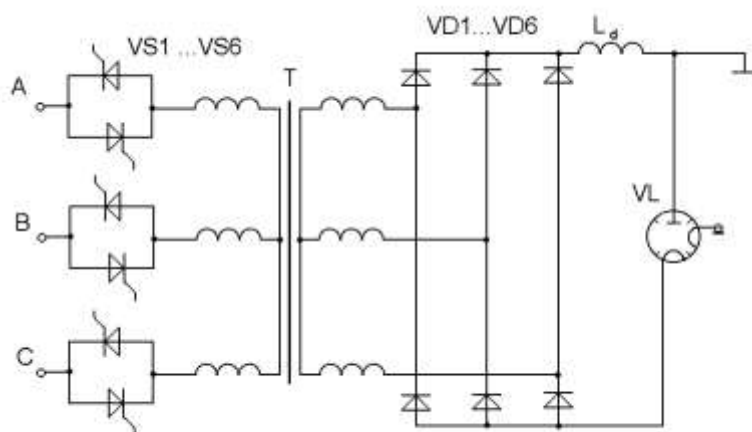


Рис.10. Схема источника питания с тиристорным регулятором напряжения

Высокочастотный блок генератора «Хазар-50/915» мощностью 50 кВт имеет массу 240 кг и объем около 400 дм³. Соответствующие показатели блока питания этого генератора – 1700 кг и 1836 дм³. Существенным недостатком схемы на рис.10 является искажающее влияние на питающую сеть за счет работы тиристорного регулятора.

Эволюция схем источников питания СВЧ генераторов магнетронного типа

На современном этапе развития СВЧ энергетики возрастают требования к энергоемкости установок диэлектрического нагрева с одновременным сокращением их объема и массы. В связи с этим значительно повышаются требования к средствам вторичного электропитания, которые в значительной степени определяют массогабаритные показатели установок СВЧ нагрева.

Эффективным средством улучшения массогабаритных показателей вторичных источников электропитания является повышение рабочей частоты токов и напряжений трансформаторов и сглаживающих фильтров [2]. Наиболее широкое распространение получила схема с бестрансформаторным входом, в которой 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), удается существенно улучшить массогабаритные показатели источника питания за счет резкого сокращения массы и габаритов трансформатора. Построенная в соответствии с изложенным принципом структурная схема источника питания магнетронного генератора показана на рис. 11.

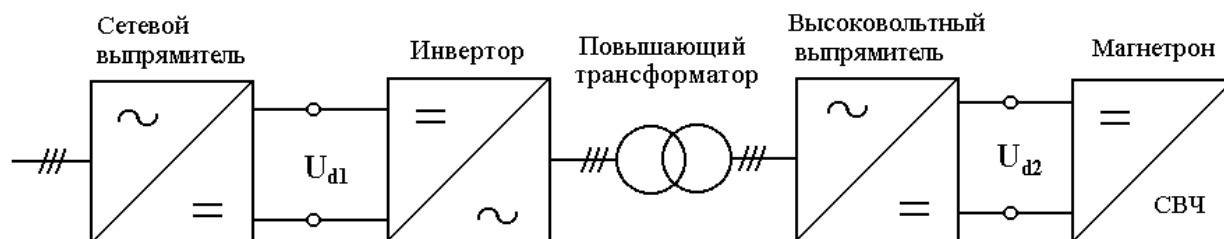


Рис.11. Схема источника питания с промежуточным звеном повышенной частоты

Необходимо отметить, что применительно к СВЧ генераторам магнетронного типа работы по применению схем электропитания с промежуточным звеном повышенной частоты проводятся, начиная с 90-х годов XX века [4 – 6].

Первый опыт реализации такой концепции дал положительные результаты, хотя оставались нерешенными многие задачи. В частности, при заметном снижении массы источника питания возрастала его стоимость и снижалась надежность работы. Это обстоятельство было вызвано, прежде всего, несовершенством на тот момент времени элементной базы. В качестве силовых полупроводниковых ключей использовались тиристоры, которые имеют ограниченную частоту коммутации и требуют для своего функционирования наличия электромагнитных элементов: коммутирующих конденсаторов, дросселей. Кроме того, большие проблемы возникают при конструировании повышающего трансформатора, работающего на повышенной частоте. Эти проблемы обусловлены не только выбором материала сердечника, но и обеспечением электрической прочности изоляции.

Эффективность технического решения по схеме рис.11 зависит от многих взаимно влияющих факторов:

- выбор схемы построения каждого из блоков;
- тип применяемых силовых полупроводниковых приборов;
- выбор материалов для изготовления повышающего трансформатора и сглаживающих фильтров.

Поэтому синтез источника с промежуточным звеном повышенной частоты является сложной многопараметрической задачей с большим количеством ограничений. Для решения такой задачи необходимо провести анализ существующей элементной базы, выбрать рабочую частоту и оценить ее влияние на массогабаритные показатели источника питания, произвести выбор схем построения сетевого выпрямителя, инвертора и высоковольтного выпрямителя [7].

Обозначим через m , V , C и η с соответствующими индексами массу, объем, стоимость и КПД сетевого выпрямителя ($B1$), инвертора (I), трансформатора (T) и высоковольтного выпрямителя ($B2$). С учетом этих обозначений выражения для оценки результирующих величин массы, объема, стоимости и КПД источника по схеме рис.11 будут иметь вид

$$m = m_{B1} + m_I + m_T + m_{B2};$$

$$V = V_{B1} + V_I + V_T + V_{B2};$$

$$C = C_{B1} + C_I + C_T + C_{B2};$$

$$\eta = \eta_{B1} \cdot \eta_I \cdot \eta_T \cdot \eta_{B2}.$$

Проанализируем влияние на эти показатели такого параметра, как частота f промежуточного преобразования энергии. Очевидно, что в наименьшей степени от частоты зависят показатели сетевого выпрямителя, которые при заданном значении выходной мощности источника определяются способом регулирования напряжения на магнетроне U_{d2} .

Если функции регулирования возлагаются на сетевой выпрямитель, то он должен

быть реализован на тиристорах или других управляемых приборах. При этом для выполнения условий по заданному коэффициенту пульсаций анодного тока магнетрона потребуются существенное увеличение массы, габаритов и стоимости сглаживающего фильтра в составе входного выпрямителя.

В том случае, когда регулирование выходных параметров источника питания магнетрона осуществляется за счет инвертора, необходимость в регулировании напряжения $U_{д1}$ сетевого выпрямителя отсутствует. Это существенно упрощает его схему и уменьшает массу, габариты и стоимость.

Необходимо отметить, что регулирование выходных параметров источника за счет импульсно-фазового управления сетевого выпрямителя приводит также к снижению входного коэффициента мощности и увеличению доли высших гармоник в кривой потребляемого тока. Поэтому при построении источника по схеме рис.11 целесообразно ограничиться вариантом с неуправляемым сетевым выпрямителем.

Основное влияние частота промежуточного преобразования оказывает на показатели инвертора и повышающего трансформатора. Несколько в меньшей степени – на показатели высоковольтного выпрямителя. Нетрудно предположить, что зависимости от частоты f массогабаритных и других показателей указанных функциональных блоков имеют нелинейный характер с множеством локальных экстремумов, поиск которых возможен только при наличии обширной базы данных по техническим решениям, материалам и комплектующим изделиям.

Разработанные в последнее время силовые полупроводниковые приборы позволяют строить источники питания с промежуточной частотой преобразования от 20 до 500 кГц и выше. Чтобы обеспечить высокий КПД при работе на этих частотах, для сердечников трансформаторов и дросселей необходимо использовать магнитные материалы с низкими потерями. Для этих целей разработаны такие специальные магнитомягкие материалы, как ферриты, аморфные и нанокристаллические сплавы. При этом представляется возможным уменьшить массу трансформаторов и дросселей с 10 – 15 кг/кВт на частоте 50 Гц до менее 0,5 кг/кВт на частотах выше 20 кГц [8,9].

Проведенный анализ существующих СВЧ генераторов позволяет оценить удельную массу их источников питания диапазоном 100 – 35 кг/кВт (большее значение соответствует источникам питания меньшей мощности). Применение промежуточного преобразования частоты делает возможным уменьшение массы источника питания до значений 1,0 – 2,0 кг/кВт.

В качестве примера рассмотрим перспективы построения генератора СВЧ колебаний на выходную мощность 50 кВт с источником питания инверторного типа. При самой пессимистичной оценке массогабаритных показателей величиной 2 кг/кВт планируемая масса блока питания магнетрона (с учетом того, что КПД магнетрона М-116 равен 0,75) составит

$$m_{БП} = \frac{2,0 \cdot 50}{0,75} = 133,3 \text{ кг} .$$

В этом случае суммарная масса источника СВЧ энергии будет равна 240+133,3=373,3 кг. Таким образом, существует реальная возможность уменьшения массы источника СВЧ энергии как минимум в 5 раз за счет того, что масса блока питания уменьшается более чем в 10 раз.

ЛИТЕРАТУРА

1. Архангельский Ю.С. СВЧ электротермия / Ю.С.Архангельский. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 1998. 408 с.
2. Современные энергосберегающие электротехнологии / Ю.И.Блинов, А.С.Васильев, А.Н.Никаноров и др. СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2000. 564 с.

3. Артюхов И.И. Магнетронные генераторы для установок СВЧ нагрева / И.И.Артюхов, М.А.Фурсаев. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2000. 48 с.
4. Система электропитания СВЧ генератора магнетронного типа с промежуточным звеном повышенной частоты / И.И.Артюхов, В.А.Серветник, Н.П.Митяшин, В.А.Сысуев // Вопросы преобразовательной техники и частотного электропривода: межвуз.науч.сб. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 1992. С.49 – 59.
5. Артюхов И.И. Источник питания промышленной установки СВЧ нагрева на базе трехфазного инвертора тока / И.И.Артюхов, В.А.Серветник, С.Ф.Степанов // Силовая электроника в решении проблем ресурсо- и энергосбережения: сб.трудов Междунар. науч.-техн. конф. Харьков, 1993. С. 9 – 12.
6. 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.
7. Артюхов И.И. К вопросу об улучшении массогабаритных показателей источников СВЧ энергии магнетронного типа /И.И.Артюхов, С.Ф.Степанов, В.В.Иванова //Функциональные системы и устройства низких и сверхвысоких частот: межвуз. науч. сб. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2003. С. 17 – 22.
8. Степанов С.Ф. Анализ элементной базы для построения высоковольтных источников питания с промежуточным звеном повышенной частоты /С.Ф.Степанов, В.В.Иванова, М.В.Жабский //Проблемы электроэнергетики: межвуз. науч. сб. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2004. С. 180 – 191.
9. Иванова В.В. К вопросу выбора высокочастотных транзисторов для источника питания электротехнологических установок средней мощности /В.В.Иванова //Проблемы электроэнергетики: межвуз. науч. сб. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2005. С. 87 – 91.

Артюхов Иван Иванович –

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

Тютманова Виктория Васильевна –

аспирант кафедры «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

УДК 621.365.46

Ю.С. Архангельский, В.В. Гордиенко, Н.В. Лалыкин

ПРИМЕНЕНИЕ ИК НАГРЕВА ПРИ ОТЖИГЕ ЛЕНТЫ СТЕКЛА

Рассматривается применение ИК-нагрева с целью исключения пороков стекла, связанных с неравномерным охлаждением по ширине ленты стекла, и в целом для повышения качества отжига.

Y.S. Arkhangelskiy, V.V. Gordienko, N.V. Lalykin

APPLICATION OF IR HEATING FOR ANNEALING OF GLASS RIBBON

Application of IR heating with the purpose of exception of glass defects, connected with non-uniform cooling on width of a tape of glass, and as a whole for improvement of annealing quality is considered.

Техническое перевооружение производства листового стекла на базе высокопроизводительного способа формования термически полированного стекла выдвинуло на первый план задачу разработки оптимально-эффективного технологического процесса отжига листового стекла. В представленной работе предлагается применять инфракрасный нагрев бортов движущейся ленты стекла в туннельной электрической печи (лер) с целью исключения пороков стекла, связанных с неравномерным распределением температур по ширине ленты стекла, для улучшения качества резки стекла и в целом для повышения качества готовой продукции. Необходимость оптимизации процесса отжига ленты стекла на промышленных линиях связана с повышением качества готовой продукции, что позволяет идти в ногу с постоянно изменяющимся спросом стекла на рынке. Этому свидетельствует появление новых промышленных линий по производству флоат-стекла, а также за счет введения интегрированной системы менеджмента (по качеству – ISO 9001, по экологии – ISO 14001, по безопасности – OHSAS 180001). Данная задача поставлена в виде нового решения по дополнительной термической обработке ленты стекла, т.к. существующие процессы отжига имеет свои недостатки, что не может удовлетворять потребностям рынка.

За счет того, что стекло по своим свойствам обладает низкой теплопроводностью, процесс отжига ленты стекла занимает достаточно длительное время.

Много работ посвящено применению проникающего инфракрасного (ИК) излучения с целью выравнивания температуры по сечению стенки стеклоизделий, что значительно ускоряет процесс нагрева и охлаждения ленты стекла [1]. Но в указанных работах речь идет о выравнивании температуры по толщине ленты стекла, что намного облегчает задачу по сравнению с выравниванием температурного поля по ширине лент стекла. Для того, чтобы добиться такого распределения температуры по ширине ленты стекла, чтобы не возникали градиенты температур, изменение во времени которых и приводило бы к появлению остаточных напряжений, необходимо воздействовать на стекло внешним излучателем. Вся сложность данной задачи заключается в том, что необходимо знать, какое именно распределение температурного поля, или, другими словами, какое напряжение стекла по ширине ленты необходимо получить.

В работе [1] реализована технология ИК отжига стеклоизделий с целью достижения быстрого выравнивания температур по толщине стенки стеклоизделий, что в значительной степени улучшает качество отжига. Также были получены технологические и конструктивные решения эффективных зон радиационного воздействия на изделия, позволяющие обеспечить высокую производительность процесса в сочетании со значительным сокращением энергопотребления за счет применения ИК нагревателей.

В качестве примера было рассмотрено строение общей конструкции печи для отжига листового стекла (в поперечном разрезе) (рис.1).

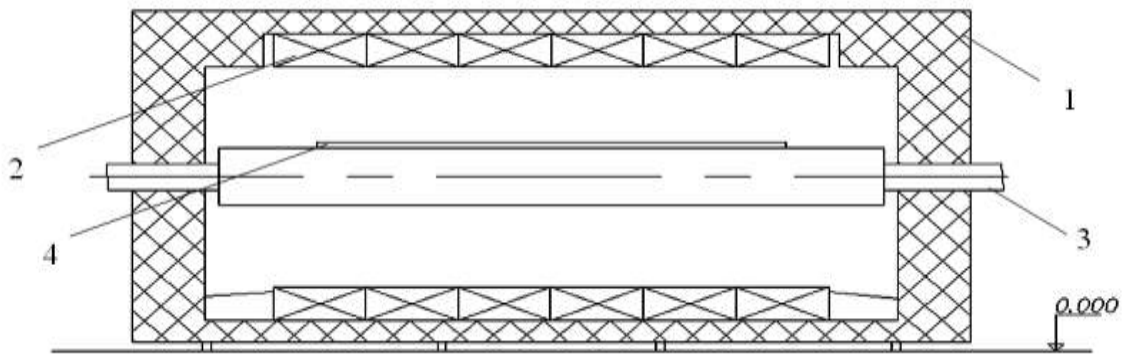


Рис.1. Общая конструкция печи отжига: 1 – корпус с теплоизолирующей каолиновой ватой; 2 – прямоугольные короба с охлаждающим воздухом; 3 – металлические валы; 4 – лента стекла

За счет возникновения перепада температур при термической обработке ленты стекла образуются градиенты температур, их изменение во времени и определяет возникающие в стекле напряжения, что существенно ухудшает резку стекла. Неравномерное остывание поверхностных и внутренних слоёв стекла вызывает возникновение напряжений сжатия и растяжения.

Графически напряжения в стекле можно представить в виде рис.2.

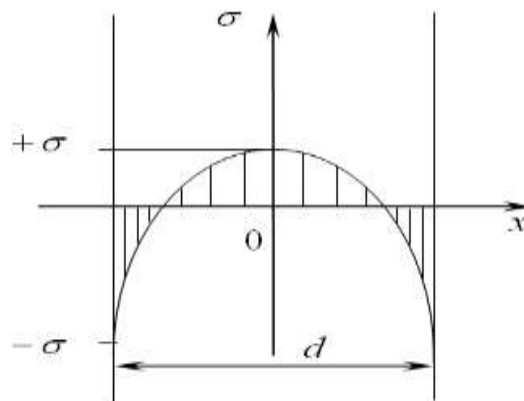


Рис. 2. Распределение напряжений по ширине ленты стекла

В большинстве случаев функция $\sigma(x)$ в листовых стеклах с удовлетворительным приближением описывается параболой (d – ширина ленты стекла). Если процесс отжига протекает правильно, то получается по форме парабола с растянутой серединой и с небольшими напряжениями сжатия на бортах. В этом случае идет нормальная резка стекла.

Предполагается использовать ИК нагреватели, установленные под бортами ленты стекла между валами в печи отжига (1 зона), что должно обеспечивать дополнительный нагрев по ширине ленты с боков, что существенно снижает отвод тепла через боковые стенки и валы печи. Тем самым распределение температур по поверхностным и внутренним слоям ленты стекла будет более равномерным, не будут появляться температурные градиенты, а следовательно, и внутренних напряжений в стекле (рис.3).

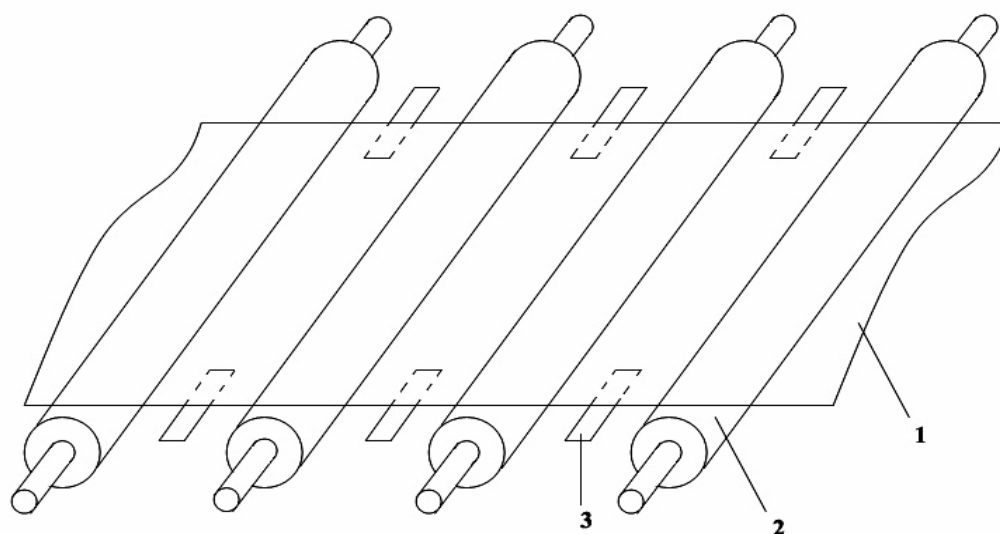


Рис.3. Схема расположения ИК нагревателей в печи отжига (1 зона): 1 – лента стекла; 2 – металлические валы; 3 – ИК нагреватели

В большинстве существующих конструкциях печей процесс отжига ленты стекла происходит не равномерно, т.е. боковые части (кромки стекла) охлаждаются быстрее средней части за счёт отвода тепла к стенкам печи, а также за счет конвективных потоков воздуха в боковых участках вдоль печи, качество стекла при порезке существенно ухудшается. Для устранения этой проблемы существуют разные способы. Одни из них связаны с изменением температуры и скорости движения воздушного потока в коробах, другие, наоборот, с подводом дополнительного тепла для нагрева боковой части ленты стекла с целью компенсации тепловой энергии путём нагрева боковых частей ленты. В первом случае в корне меняется режим термического отжига ленты стекла, что нарушает технологию производстве стекла.

Для охлаждения ленты стекла используются цилиндрические короба (муфеля) с движущимся по ним воздухом. Недостаток данной конструкции заключается в том, что график охлаждения не линеен. Коэффициент теплоотдачи от трубы к стеклу переменен. В настоящее время возникает большая сложность получить равномерное охлаждение стекла за счет муфелей. Помимо принудительного охлаждения ленты стекла за счет муфелей, существует проблема отвода тепла от кромок ленты стекла к боковым стенкам кожуха печи и валам.

Начальный этап исследования заключался в решении задачи теплопроводности для системы тел для определения распределения температурного поля по ширине движущейся ленты стекла, а также выявления граничных условий по теплоотдаче.

Можно выделить два основных направления исследования температурного поля в стекле:

- составление интегро-дифференциальных уравнений, достаточно полно описывающих физические процессы лучистой и молекулярной проводимости, и численное решение этих уравнений с использованием истинных теплофизических и спектральных характеристик стекла [3];

- приближенное описание лучисто-кондуктивного теплообмена с помощью дифференциального уравнения теплопроводности Фурье; аналитическое и численное решение уравнения с применением коэффициентов эффективной теплопроводности, в которых учтен суммарный перенос тепла излучением и молекулярной теплопроводностью [3].

По первому направлению достаточно полные и четкие обзоры исследований приведены в работах [4,5,6]. Впервые нестационарный теплообмен пластины стекла при нагревании и охлаждении изучен Гардоном, который составил уравнение теплового баланса для элемен-

тарного слоя стекла. Скорость изменения температуры этого тонкого слоя (Δx) определяется суммарным эффектом поступления и потерь энергии слоем:

$$\frac{\partial T(x)}{\partial t} = \frac{1}{\rho c_p} [Q_C(x) + Q_A(x) - Q_E(x) + Q_R(x)], \quad (1)$$

где $Q_C(x)$ – поток, подводимый или отводимый от слоя за счет молекулярной теплопроводности; $Q_A(x)$ – поглощаемый слоем поток внешнего излучения; $Q_E(x)$ – поток собственного излучения слоя; $Q_R(x)$ – поглощаемое слоем излучение других слоев стекла.

Для поверхностных слоев необходимо дополнительно учесть поток тепла, передаваемый конвекцией и излучением в области длин волн больше 4,5 мкм, где стекло непрозрачно. Все величины $Q(x)$ зависят от толщины, отражательной способности поверхностей, теплофизических и спектральных свойств стекла. Кроме того, $Q_A(x)$ зависит от природы внешнего излучения, $Q_E(x)$ – от температуры рассматриваемого слоя, а $Q_C(x)$, $Q_R(x)$ – от распределения температур по толщине пластины стекла. В работе [10] приведены уравнения для расчета нестационарного теплообмена в стекле на ЭВМ по конечно-разностной сетке. Теплопроводность, плотность, удельная теплоемкость, показатель преломления приняты в расчетах постоянными, показатель поглощения – в виде ступенчатой функции температуры и длины волны. Метод расчета нестационарного температурного поля в стекле на основе интегродифференциальных уравнений получил дальнейшее развитие в виде конечно-разностной схемы [3] и с использованием вектора потока излучения [5, 6]. Последний метод более четко обоснован математически, позволяет легче решать задачи в области режимов и с асимметричным теплообменом. В этом случае для бесконечной пластины интегродифференциальное уравнение записывается в следующем виде:

$$\frac{\partial T(x)}{\partial t} = \frac{1}{\rho c_p} \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda \frac{\partial T(x)}{\partial t} - Q(x) \right], \quad (2)$$

где $\lambda \frac{\partial T(x)}{\partial x}$ – теплопередача молекулярной теплопроводностью; $Q(x)$ – поток излучения [6].

Граничные условия для уравнений (1) и (2) одинаковы. Решение уравнений (1) и (2) очень сложное и выполняется различными численными методами на ЭВМ с той или иной степенью приближения. В некоторых случаях решение упрощается, например, при абсолютно черном внешнем излучении, диффузных границах, оптически толстом слое. Для выполнения таких расчетов необходима подробная информация о температурной зависимости термических свойств и спектральных характеристик стекла, спектральных характеристик внешних источников и приемников энергии излучения. В настоящее время из-за отсутствия достаточного количества надежных данных по вышеперечисленным параметрам, как правило, решение уравнений (1) и (2) анализируется с помощью ЭВМ на соответствие экспериментальным результатам путем перебора и уточнения данных по свойствам и спектральным характеристикам. В результате создается математическая модель, приближенно описывающая физические процессы переноса энергии в стекле и вне его.

Однако в некоторых случаях решение задачи нестационарного теплообмена в пластине стекла можно значительно упростить, не снижая точности полученных результатов. При этом, как уже было указано ранее, применяется приближенное описание лучисто-кондуктивного переноса энергии в пластине стекла уравнением теплопроводности Фурье:

$$\frac{\partial T(x)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\lambda_{эф}}{\rho c_p} \frac{\partial T(x)}{\partial x} \right]. \quad (3)$$

Преимущество такого описания заключается в возможности использования простых численных [7] или аналитических [8] методов решения уравнения (3). Для полупрозрачной среды с диффузионным переносом энергии, то есть в случае изотропного характера интенсивности излучения, возможны градиентные представления потока излучения и переход к дифференциальному уравнению теплопроводности. Впервые такой подход рассмотрен в работе Росселанда [9], где введено понятие лучистой теплопроводности и получена широко известная формула для коэффициента:

$$\lambda_{\text{луч}} = \frac{16n^2c_0}{3\bar{j}}T^3, \quad (4)$$

где n – показатель преломления стекла; \bar{j} – усредненный показатель поглощения по всему спектру излучения.

Рассматривая стекло в качестве полупрозрачной среды, Келлет, а также Черни и Генцель вывели выражение (4) при математическом описании процесса теплопереноса в стекловаренных печах. Краткий обзор таких работ выполнен Гардоном. Наличие в выражении (4) величины T^3 показывает возрастающую роль теплопередачи излучением с повышением температуры среды. Так, например, в стекловаренной печи теплообмен излучением в стекломасе в десятки раз превышает молекулярную теплопроводность.

Отжиг стекла характеризуется относительно низкими температурами (менее 650 °С), малыми градиентами температур по толщине пластины, сопоставимыми значениями теплопереноса за счет теплопроводности и излучения. В описании этого процесса возможно использование уравнения теплопроводности Фурье и понятия эффективной теплопроводности, характеризующей суммарный перенос энергии молекулярной теплопроводностью и излучением [3].

Использование дополнительного нагрева ленты стекла с бортов посредством ИК нагрева позволит существенно снизить отвод тепла к валам и стенкам печи, выровнять температуру по ширине ленты стекла и в целом улучшить качество отжига.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тютюнник В.Е. Технология ИК отжига стеклоизделий /В.Е. Тютюнник, Ю.А. Гуляян //Стекло и керамика. 2000. № 8. С. 33 – 36.
2. Гордиенко В.В. Применение инфракрасного нагрева для управления процессом отжига ленты стекла / В.В. Гордиенко, Ю.С. Архангельский, Н.В. Лалыкин // Физика и технические приложения волновых процессов: тезисы докладов V Международной научно-технической конференции. Самара: Самарское кн. изд-во, 2006. С. 271 – 272.
3. Лалыкин Н.В. Исследование и оптимизация процесса отжига ленты термически полированного стекла: дис... канд. техн. наук /Н.В.Лалыкин. Саратов, 1985. 227 с.
4. Фридкин Р.З. Исследование временных и остаточных напряжений в процессе термической обработки стекла: дис... канд. техн. наук /Р.З.Фридкин. М., 1972. 62 с.
5. Сперрой Э.М. Теплообмен излучением / Э.М. Сперрой, Р.Д. Сесс. Л.: Энергия, 1971. 296 с.
6. Сергеев О.А. Теплофизические свойства полупрозрачных материалов / О.А. Сергеев, А.А. Мень. М.: Изд-во стандартов, 1977. 288 с.
7. Исаченко В.П. Теплопередача /В.П.Исаченко, В.А.Осипов, А.С.Сукомел. М.: Энергия, 1969. 440 с.
8. Лыков А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. М.: ГИТТЛ, 1952. 392 с.

9. Росселанд С. Астрофизика на основе теории атома /С.Росселанд. М., Л.: ОНТИ, 1936. 302 с.

10. Gardon R. Calculation of Temperature Distribution in Glass Plates Undergoing Heat-Treatment /R. Gardon //J.Amer. Ceram. Sec. 1958. V. 41. № 5. P. 200–209.

Архангельский Юрий Сергеевич –

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

Гордиенко Владислав Валерьевич –

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

Лалыкин Николай Васильевич –

кандидат технических наук, главный инженер ОАО «Саратовстройстекло»
УДК 621.365.5

Ю.С. Архангельский, Е.М. Гришина

**СОГЛАСОВАНИЕ ОБРАБАТЫВАЕМОГО ДИЭЛЕКТРИКА
С РУПОРНЫМ ИЗЛУЧАТЕЛЕМ КАМЕРЫ ЛУЧЕВОГО ТИПА
СВЧ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ**

Приведены соотношения для расчета четвертьволнового согласующего трансформатора между рупорным излучателем и обрабатываемым диэлектриком в камере лучевого типа СВЧ электротермической установки.

Y.S. Arkhangelskiy, E.M. Grishina

**CO-ORDINATION PROCESSED DIELECTRIC WITH MEGAPHONE
ANTENNA CAMERAS OF THE BEAM TYPE MICROWAVE
ELECTROTHERMAL INSTALLATION**

The brought correlations for calculation quarter-wavelength agreeing transformer between megaphone antenna and processed dielectric in camera of the beam type microwave electrothermal installation.

Для передачи энергии СВЧ электромагнитных колебаний от источника энергии СВЧ электротермической установки (СВЧ ЭТУ) к камере лучевого типа (КЛТ) весьма часто используется прямоугольный волновод, заканчивающийся рупорным излучателем (рисунок).

Традиционно в СВЧ электротермии принято считать, что от излучателя к обрабатываемому диэлектрику распространяется плоская электромагнитная волна [1]. Обычно рупорный излучатель хорошо согласован с линией передачи, связывающей его с СВЧ генератором источника энергии СВЧ ЭТУ и с воздушным пространством с характеристическим сопротивлением $Z_{0в}$. Падая на обрабатываемый диэлектрик с диэлектрическими свойствами ε' и

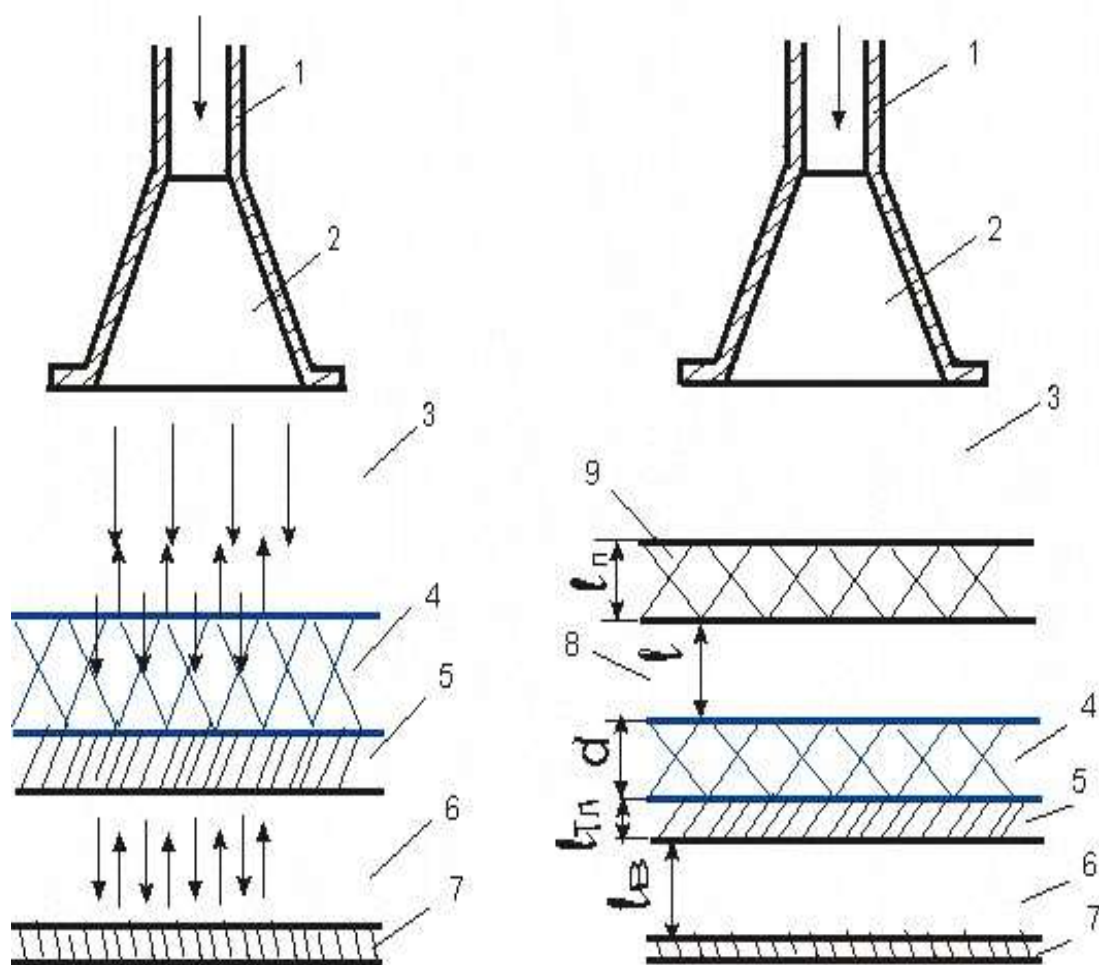
$\operatorname{tg}\delta_{\partial}$ (характеристическое сопротивление $Z_{o\partial} = \frac{Z_{o\partial\partial}}{\sqrt{\epsilon_{\partial}}}$), электромагнитная волна частично от-

ражается, поступает в рупорный излучатель, а затем по линии передачи – в СВЧ генератор. Если коэффициент стоячей волны (K_{cmV}) КЛТ в апертуре излучателя больше допустимого для данного типа генератора значения (для магнетронов ≈ 3), то приходящая от КЛТ мощность СВЧ может вывести СВЧ генератор из строя, не говоря уже об уменьшении КПД по передаче СВЧ мощности в обрабатываемый диэлектрик.

Рассмотрим возможность применения четвертьволнового согласующего трансформатора для согласования обрабатываемого диэлектрика с рупорным излучателем с целью предотвращения аварии СВЧ генератора и более полного использования СВЧ энергии в технологическом процессе. Теория таких трансформаторов приведена, например, в [2, 3]. Особенностью реализации этой идеи является необходимость учета подложки (транспортной ленты), воздушных слоев над обрабатываемым диэлектриком и над подложкой, а также металлического короткозамкнутого дна КЛТ.

Так как входное сопротивление, попадающее на обрабатываемый диэлектрик плоской волны, в этом случае имеет как активную, так и реактивную составляющие, согласно [2] между обрабатываемым диэлектриком и рупорным излучателем должен быть предусмотрен отрезок линии с воздушным заполнением 8 (рис. б), на входе которого нагрузка для четвертьволнового трансформатора будет чисто активной. В таком случае роль, в конечном счете, сводится к расчету длины l этого воздушного слоя и относительной диэлектрической проницаемости диэлектрика без потерь 9 (рис. б) заполняющего четвертьволновый трансформатор.

от источника энергии



а

б

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

Итак, входное сопротивление отрезка длиной линии, представляющий собой слой воздуха толщиной l_6 , короткозамкнутый на конце, равно [4]

$$Z_{ex\ 6} = j Z_{06} \operatorname{tg} \beta l, \quad (1)$$

где $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$ – фазовая постоянная коэффициента распространения в слое воздуха; λ – длина волны СВЧ генератора; l_6 – толщина воздушного слоя 7 (рис. б).

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

$$Z_{ex\ ml} = Z_{0\ ml} \frac{Z_{ex\ 6} + j Z_{0\ ml} \operatorname{tg} \beta_{ml} l_{ml}}{Z_{0\ 6} + j Z_{ex\ ml} \operatorname{tg} \beta_{ml} l_{ml}}, \quad (2)$$

где $Z_{0\ ml} = \frac{377}{\sqrt{\varepsilon'_{ml}}}$; ε'_{ml} – относительная диэлектрическая проницаемость материала подложки;

$Z_{ex\ 6}$ определяется по (1); $\beta_{ml} = \frac{2\pi\sqrt{\varepsilon'_{ml}}}{\lambda}$ – фазовая постоянная коэффициента распространения в подложке; l_{ml} – толщина слоя подложки 6 (рис. б)

В свою очередь, $Z_{ex\ ml}$ является нагрузкой отрезка длиной линии, представляющей собой обрабатываемый диэлектрик. На входе этого слоя

$$Z_H = Z_{0\ d} \frac{Z_{ex\ ml} + Z_{0\ d} \operatorname{th} \gamma h}{Z_{0\ l} + Z_{ex\ ml} \operatorname{th} \gamma h} = R_H + jX_H, \quad (3)$$

где $Z_{0\ d} = \frac{377}{\sqrt{\varepsilon'_d(1 - j \operatorname{tg} \delta_d)}}$; ε'_d – относительная диэлектрическая проницаемость; $\operatorname{tg} \delta_d$ – тангенс угла диэлектрических потерь материала обрабатываемого диэлектрика; $\gamma = \alpha + j\beta$ – постоянная распространения в обрабатываемом диэлектрике; α – постоянная затухания

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon'_d} \sqrt{\frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta_d} - 1 \right)}, \quad (4)$$

β – фазовая постоянная

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon'_d} \sqrt{\frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta_d} + 1 \right)}, \quad (5)$$

d – толщина слоя обрабатываемого диэлектрика 5 (рис. б); $Z_{ex\ ml}$ определяется по (2), где R_H и X_H – активная и реактивная составляющие Z_H .

На расстоянии l от поверхности обрабатываемого объекта (рис. б) входное сопротивление для плоской волны, идущей от рупорного излучателя, равно

$$Z_{\text{вх}X} = Z_{0X} \frac{Z_H + j Z_{0X} \operatorname{tg} \beta l}{Z_{0X} + j Z_H \operatorname{tg} \beta l} = \operatorname{Re} Z_{\text{вх}X} + j \operatorname{Im} Z_{\text{вх}X}, \quad (6)$$

где Z_X определяется по (3); $Z_{0X} = 377$ Ом.

Чтобы применить четвертьволновый трансформатор для согласования рупорного излучателя и обрабатываемого диэлектрика, необходимо выполнение условия

$$\operatorname{Im} Z_{\text{вх}X} = 0. \quad (7)$$

Из условия (5) с учетом (1) – (4) получим уравнение для нахождения $\operatorname{tg} \beta l$ и далее l :

$$Z_{0X} X_H \operatorname{tg}^2 \beta l + (R_H^2 + X_H^2 - Z_{0X}^2) \operatorname{tg} \beta l - X_H Z_{0X} = 0, \quad (8)$$

Таким образом, при l , удовлетворяющем уравнению (9), на этом расстоянии от поверхности обрабатываемого диэлектрика

$$Z_{\text{вх}X} = \operatorname{Re} Z_{\text{вх}X}. \quad (9)$$

Так что характеристическое сопротивление в четвертьволновом слое 9 (рис. б) равно

$$Z_{0\lambda/4} = \sqrt{Z_{0\epsilon} \operatorname{Re} Z_{\text{вх}X}}, \quad (10)$$

но в (10) $Z_{0\lambda/4} = \frac{377}{\sqrt{\epsilon'_{\lambda/4}}}$ и тогда

$$\epsilon'_{\lambda/4} = \frac{377^2}{Z_{0\epsilon} \operatorname{Re} Z_{\text{вх}X}} = \frac{377^2}{\operatorname{Re} Z_{\text{вх}X}}. \quad (11)$$

При этом длина четвертьволнового трансформатора

$$l_{\Pi} = \frac{\lambda}{4} = \frac{\lambda}{4 \sqrt{\epsilon'_{\lambda/4}}}. \quad (12)$$

В практике применения таких четвертьволновых трансформаторов, в конечном счете, все сводится к тому, удастся ли подобрать диэлектрик без потерь и ϵ' , удовлетворяющие соотношению (11).

Выводы

1. В КЛТ с рупорными излучателями из-за отражения электромагнитной волны от поверхности обрабатываемого диэлектрика возможна авария СВЧ генератора и неизбежно уменьшение КПД по передаче СВЧ энергии от генератора в обрабатываемый диэлектрик.

2. Предотвратить аварию СВЧ генератора и обеспечить максимальную передачу СВЧ энергии в обрабатываемый диэлектрик можно с помощью четвертьволнового согласующего трансформатора, заполненного диэлектриком без потерь.

3. Приведенные в работе соотношения позволяют рассчитать расстояние от поверхности обрабатываемого диэлектрика, на котором должен находиться слой диэлектрика без потерь, представляющий собой четвертьволновый трансформатор, а также относительную диэлектрическую проницаемость этого диэлектрика.

ЛИТЕРАТУРА

1. Архангельский Ю.С. СВЧ Электротехнологические установки лучевого типа /Ю.С. Архангельский, С.В. Тригорлый. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2000. 123 с.
2. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ /И.В. Лебедев. М.: Высш. шк., 1970. Т.1. 435 с.
3. Фельдштейн А.Л. Справочник по элементам волноводной техники /А.Л.Фельдштейн, Л.Р. Явич, В.П. Смирнов. М.: Сов. радио, 1967. 183 с.
4. Зевеке Г.В. Основы теории цепей /Г.В. Зевеке и др.– М.; Л.; Госэнергоиздат, 1963. 456 с.

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.

УДК 621.365.5

Ю.С. Архангельский, А.В. Доценко

НАДЕЖНОСТЬ, УЩЕРБ И РЕЗЕРВИРОВАНИЕ В СВЧ ЭЛЕКТРОТЕРМИИ

Рассмотрены вопросы надежности, сформулированы причины ущерба и предложены варианты резервирования в СВЧ электротермических установках.

Y.S. Arkhangelskiy, A.V. Dozenko

RELIABILITY, DAMAGE AND STANDBY IN MICROWAVE ELECTROTHERMY

The considered questions to reliability, is worded reasons of the damage and offered variants of the standby in microwave electrothermal installation.

Впервые проблема надежности СВЧ электротермических установок (СВЧ ЭТУ) (СВЧ печей бытового назначения) была затронута в работе [1]. В ней речь идет о наблюдении всего лишь 18 печей «Волжанка-2000» в течение 1,5 лет. Для эксплуатации этих первых отечественных СВЧ печей в полном исполнении не было квалифицированного персонала, а срок службы магнетронов был всего 500 часов, так что сведений о надежности СВЧ печей пока недостаточно.

С переходом к рыночным отношениям вопросы надежности СВЧ ЭТУ, ущерба, наносимого производству неплановой остановкой СВЧ ЭТУ, и возможности уменьшения ущерба с помощью резервирования представляются весьма актуальными.

Надежность – комплексный показатель, определяющий свойства технических устройств длительно сохранять и устойчиво воспроизводить в процессе эксплуатации рабочие характеристики и параметры. Надежность как комплексный показатель включает такие

свойства, как качество, живучесть, безопасность, безотказность, ремонтпригодность и долговечность оборудования.

Качество СВЧ ЭТУ существенно зависит от способа эксплуатации установки: при недостаточно квалифицированном обслуживающем персонале может произойти частичная или полная потеря их функциональных свойств. Например, если в установке с камерой с бегущей волной (КБВ) на нерегулярном волноводе обрабатывать объект, габариты и диэлектрические свойства которого не соответствуют тем, на которые рассчитаны рабочие камеры, то эта установка не обеспечит требуемого качества ее работы.

В СВЧ ЭТУ для обеспечения живучести главным образом нужно защитить источник СВЧ энергии от недопустимо высокой отраженной от рабочей камеры мощности. Это достигается применением технических средств (ферритовый вентиль, датчик отраженной мощности), а также надлежащим выбором типа СВЧ генератора и рабочей камеры.

Известно, например, что наименьшую отраженную мощность можно получить в КБВ, возможно получение хорошего согласования с линией передачи от генератора к рабочей камере, если используется камера лучевого типа (КЛТ), а наиболее сложно обеспечить согласование генератора с камерой со стоячей волной (КСВ).

Безопасность – свойство СВЧ ЭТУ исключить возможность возникновения ситуаций, опасных для людей и окружающей среды. Она обеспечивается правильным конструированием СВЧ установок. Наибольшую сложность при этом, как известно, представляет конструирование шлюзов в установках методического действия.

Надо стремиться получить длительную безотказную работу СВЧ ЭТУ. Эти установки по своей структуре являются цепной системой, при отказе любого элемента наступает отказ установки. Некоторые элементы установки (например, волновод линии передач) можно считать безотказными, а в других элементах возможны полные отказы, когда наступает полная потеря работоспособности установки. В этом отношении наиболее уязвимы источники СВЧ энергии. Если рабочая камера установки запитывается от нескольких СВЧ генераторов, то отказ даже одного из них полностью нарушает требуемый технологический режим. По этой причине предпочтительнее применение СВЧ электротермического оборудования (СВЧ ЭТО), обеспечивающего требуемую производительность не одной, а несколькими однотипными СВЧ ЭТУ. В случае СВЧ ЭТО полный отказ одного СВЧ генератора означает всего лишь частичный отказ оборудования, из-за чего теряется лишь часть от запланированного объема продукции.

Отказы СВЧ генератора по своему характеру бывают внезапными и постепенными. Первые наступают в случае аварии (отключение системы охлаждения генератора, включение на незагруженную рабочую камеру), вторые возникают из-за износа деталей генератора (старение катода и вакуумного уплотнения вывода энергии).

В качестве СВЧ генератора обычно используют магнетроны. Эти приборы являются невосстанавливаемыми и ремонту не подлежат, в то же время отказ магнетрона не препятствует восстановлению работоспособности установки: надо вышедший из строя магнетрон заменить на резервный. В этой части вопросы надежности СВЧ установок смыкаются с проблемой резервирования в СВЧ электротермии.

Что касается долговечности установки (входящих в нее элементов), то она определяется временем такого износа (старение), устранение которого невозможно или нецелесообразно (предельное состояние). Сведения о полном ресурсе СВЧ электротермических уста-

новок в литературе отсутствуют, но наработка до предельного состояния, по-видимому, больше, чем требуется для разработки новой элементной базы или смены выпускаемой продукции.

Поскольку в настоящее время нет сведений о серьезных статистических исследованиях проблемы надежности СВЧ ЭТУ, единственным, на наш взгляд, показателем надежности, который может быть определен в ограниченный срок, является безотказность. К сожалению, в нынешних условиях постановка эксперимента по исследованию наработки на отказ затруднена дороговизной этих установок, отсутствием на одном производстве достаточного количества однотипных установок, позволяющих провести серьезные статистические исследования этой проблемы.

В таком случае остается говорить лишь об экспертной оценке этого параметра надежности. По общему мнению разработчиков и владельцев СВЧ ЭТУ, в профессионально разработанной, изготовленной и отлаженной установке при надлежащей ее эксплуатации наработка на первый отказ равна сроку службы магнетрона. Обычно изготовители магнетронов технологического назначения определяют срок службы не более двух тысяч часов, тогда как по экспертной оценке эта величина в два раза больше, если СВЧ генератор работает на допустимой для него K_{cmU} рабочей камеры.

Внеплановый перерыв в работе СВЧ ЭТУ вызывает убытки производства, то есть приводит к ущербу. Впервые об ущербе при термообработке вопрос поставлен в работе [2], однако дальнейшего изучения этой проблемы до сих пор нет.

Под ущербом подразумевают потери, измеряемые в стоимостном выражении, которые наносятся предприятию в результате аварий или повреждений в энергосистеме, в системе энергоснабжения предприятия, дефицита мощности в системе в определенное время суток, неисправности технологического оборудования, ошибок и недостатков в хозяйственной деятельности персонала и руководства предприятия. Поскольку ущерб по вине энергосистемы, из-за аварий во внутреннем энергообеспечении, из-за организационных упущений и ошибок административного и технического персонала не зависит от самой СВЧ ЭТУ, в дальнейшем его рассматривать не будем.

Величина ущерба зависит от времени устранения аварии, то есть возвращения технологического оборудования к работе. Это время, в свою очередь, существенно зависит от того, как решена проблема резервирования. В свою очередь, проблема резервирования должна решаться с учетом структуры и режима работы (СВЧ ЭТО).

Рассмотрим главную причину ущерба, наносимого предприятию, – отказ самого СВЧ ЭТО или его составных частей, поломки которых приводят к выходу из строя оборудования или технологической линии в целом.

СВЧ ЭТО может работать как автономно, если его работа не влияет на другие участки производства, а те, в свою очередь, не влияют на работу СВЧ ЭТО, так и в технологической линии, если его работа влияет на другие установки (участки производства), а те, в свою очередь, влияют на работу СВЧ ЭТО.

Заданный объем продукции может быть реализован в установках периодического (рис. 1а) или методического (рис. 1б) действия, работающих автономно или в технологической линии (рис. 2, 3).

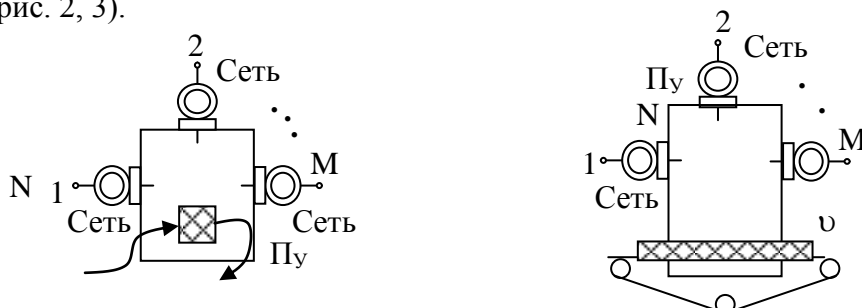


Рис. 1. Схемы и режимы работы автономных СВЧ ЭТУ, работающих в периодическом (а) и методическом (б) режимах

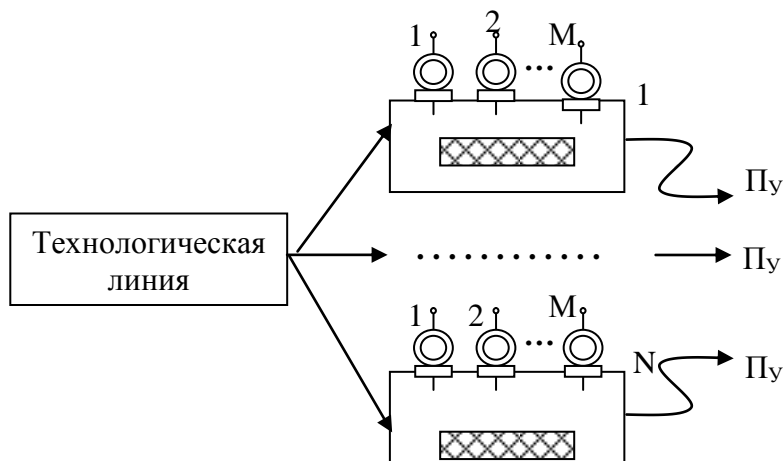


Рис. 2. Схема СВЧ ЭТО, работающего в технологической линии в периодическом режиме
 Выпуск заданного объема продукции Π можно обеспечить, используя одну установку, снабженную одним мощным магнетроном с мощностью $P_{СВЧ}$ или с M магнетронами с мощностью $P_{СВЧ}/M$ каждый, а также с помощью N независимых друг от друга установок с годовой производительностью Π/N каждая, в которых используют по одному магнетрону в каждой установке мощностью $P_{СВЧ}/N$ или по M магнетронов в каждой установке с мощностью $P_{СВЧ}/NM$.

Если СВЧ ЭТУ работает в технологической линии, то необходимо учитывать схемы его объединения с другим технологическим оборудованием (рис. 4). СВЧ ЭТО в каждом из этих случаев может работать в периодическом и методическом режиме. При этом могут быть реализованы следующие технологические процессы:

- без фазового перехода;
- с фазовым переходом с выраженным массопереносом;
- с фазовым переходом без выраженного массопереноса.

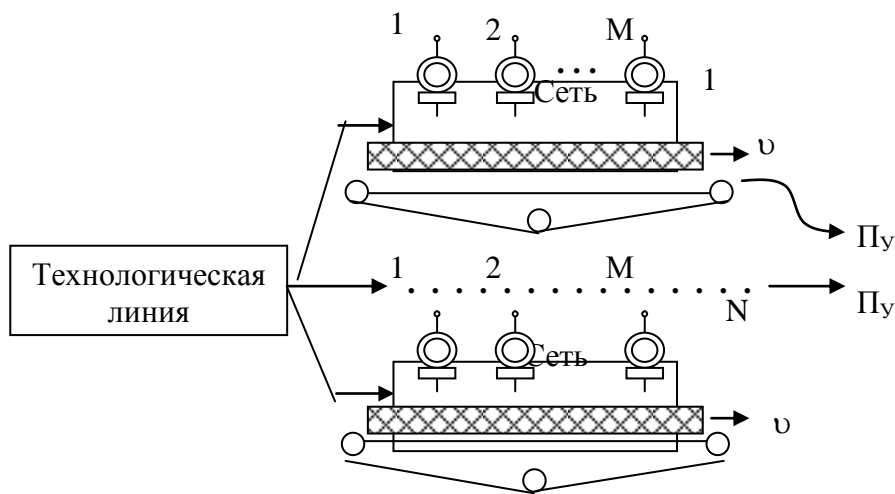


Рис. 3. Схема СВЧ ЭТО, работающего в технологической линии в методическом режиме

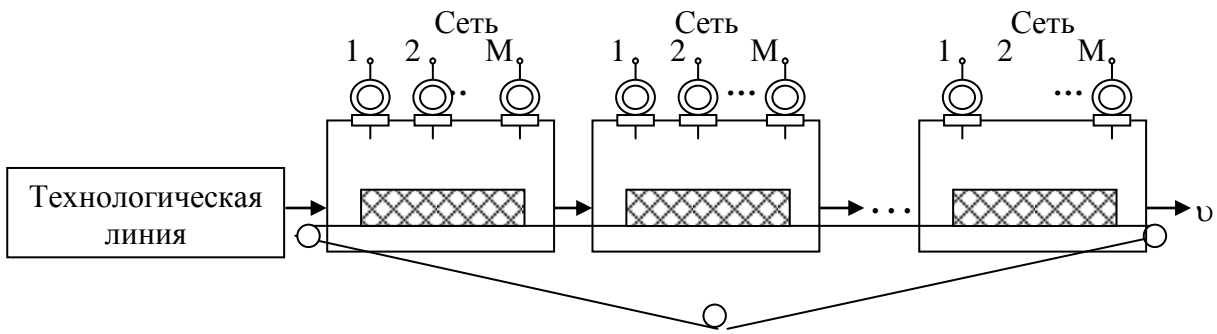


Рис. 4. Схема У СВЧ ДН, собранного в технологическую линию

Величину ущерба в общем случае можно рассчитать как

$$Y = P_y t_0 C, \quad (1)$$

где C – цена единицы продукции, t_0 – время остановки технологического оборудования; P_y – годовой объем продукции.

Цена определяется условиями рынка, P_y определяется структурой и режимом работы установки. Рассчитаем P_y для упомянутых режимов работы СВЧ ЭТУ.

1. СВЧ ЭТУ работает в автономном режиме:

• в СВЧ ЭТУ реализуется технологический процесс без фазового перехода и работает в периодическом режиме. Тогда

$$P_y = D t_p G = D (t_c - t_{36c}) G = D G \left(t_c - t_{36c} \frac{t_c}{t_{об} + t_{36c}} \right) = D t_c G \frac{t_{об}}{t_{об} + t_{36c}}, \quad (2)$$

где D – число дней в году по выпуску продукции, дн/год; t_p – время работы СВЧ ЭТУ в течение суток, с/дн; t_{36c} – время загрузки-выгрузки за смену, с/дн; $t_{об}$ – время обработки одной порции продукции, с; t_{36c} – время загрузки-выгрузки одной порции продукции, с; G – производительность СВЧ ЭТУ, t_c – время работы СВЧ ЭТУ в течение суток, с/дн;

• в СВЧ ЭТУ реализуется технологический процесс без фазового перехода в методическом режиме. Тогда

$$P_y = D t_p G, \quad (3)$$

• в СВЧ ЭТУ реализуется технологический процесс с фазовым переходом с выраженным массопереносом, а установка работает в периодическом режиме. В этом случае P_y можно рассчитать по (2), и все сводится к определению времени обработки $t_{об}$;

• в СВЧ ЭТУ реализуется процесс с фазовым переходом с выраженным массопереносом в методическом режиме. В этом случае справедливо соотношение (3);

• в СВЧ ЭТУ реализуется в периодическом режиме технологический процесс с фазовым переходом без выраженного массопереноса. В этом случае P_y определяется соотношением (2) и, как прежде, все сводится к определению времени обработки $t_{об}$;

• в СВЧ ЭТУ реализуется технологический процесс с фазовым переходом без выраженного массопереноса и работает в методическом режиме. В этом случае также можно воспользоваться соотношением (3).

2. СВЧ ЭТУ работает в технологической линии. Тогда

$$P_y = \frac{P}{N}, \quad (4)$$

где P – количество производимой в год продукции, N – число установок.

3. СВЧ ЭТУ работает в технологической линии, то есть производительность этой линии, как и каждой СВЧ ЭТУ, определяется заданной производительностью всего оборудования.

Время остановки t_0 может определяться разными причинами. Так, в СВЧ ЭТУ остановка происходит чаще всего по выходу из строя генератора СВЧ энергии. Современные СВЧ генераторы, согласно их паспортным данным, имеют срок службы 2000 часов, что означает годовую потребность при круглосуточной работе в 5 магнетронов. На самом деле количество остановок технологического оборудования на замену СВЧ генераторов может быть значительно больше, если предъявляются высокие требования к стабильности мощности (с приближением окончания срока службы генерируемая СВЧ мощность постепенно снижается).

Другой причиной могут быть отказы иных элементов СВЧ ЭТУ, таких как источники питания СВЧ генераторов; транспортные системы СВЧ ЭТУ, работающих в методическом режиме; системы загрузки-выгрузки СВЧ ЭТУ, работающих в периодическом режиме; системы удаления паров при реализации технологического процесса с фазовым переходом при выраженном массопереносе (СВЧ сушка, в том числе сублимационная).

Во всех этих случаях t_0 складывается из времени на замену аварийных элементов СВЧ ЭТУ. Сокращения времени t_0 можно достигнуть, разработав СВЧ генераторы с большим сроком службы, но в современных условиях это весьма дорогостоящее мероприятие.

Другим способом снижения ущерба от остановки СВЧ ЭТУ является создание резерва, т.е. дополнительного оборудования, позволяющего с минимальным перерывом в работе установки продолжать выпуск продукции.

Проблема резервирования достаточно полно исследована, например, в машиностроении и энергетике, однако в СВЧ электротермии эта проблема пока практически никем не рассматривалась. Для СВЧ ЭТУ существенны следующие виды резерва:

- аварийный, предназначенный для выполнения плана выпуска продукции с учетом отказов и аварийного снижения мощности СВЧ генератора;
- ремонтный, предназначенный для вывода в плановый ремонт всей установки или её элементов;
- развития, предназначенный для развития производства с применением СВЧ диэлектрического нагрева.

Все эти виды резервов представляют собой полный резерв, который, в свою очередь, состоит из явного и скрытого резервов. Явный резерв представляет собой готовую к работе СВЧ ЭТУ или ее элементы. Скрытый резерв заключен в работающей установке. Наконец, можно говорить о горячем режиме резерва, если оборудование находится в состоянии холодного хода, и о холодном режиме, если оборудование находится в рабочем положении (состоянии), но на него не подано питание.

Резерв развития в нынешней экономической обстановке обычно не планируется из-за зачастую отсутствующей гарантированной перспективы сбыта готовой продукции.

Пока не создают и ремонтный резерв, а ремонт проводят в свободное от выпуска продукции время.

Многие заказчики СВЧ ЭТУ не создают, экономя средства, и аварийного резерва. Это чревато большим ущербом из-за простоя технологического оборудования, так что аварийный резерв необходим и должен быть учтен при технико-экономической оптимизации структуры, параметров и режимов работы установок.

Уменьшить ущерб и увеличить доход можно, уменьшая t_0 . Это можно обеспечить, совершенствуя организацию ремонтных работ на стадии разработки СВЧ генератора – конструкторскими решениями, облегчающими замену магнетронов СВЧ генератора. В нынешних конструкциях СВЧ генератора СВЧ ЭТУ замена магнетрона – задача не сложная, но трудоемкая.

Большее сокращение времени t_0 можно обеспечить, имея резервный СВЧ генератор в холодном режиме. Тогда величина t_0 будет определяться временем замены СВЧ генератора с вышедшим из строя магнетроном на резервный. Замена отработавшего свой срок службы магнетрона на резервный, проверка работоспособности отремонтированного СВЧ генератора в этом случае не влияет на работоспособность СВЧ ЭТУ и ее работу по выпуску готовой продукции. Отремонтированный СВЧ генератор выводится в резерв (холодный режим). В этом случае при определении целевой функции для технико-экономической оптимизации следует учесть дополнительные затраты на ремонтные работы со снятым с эксплуатации СВЧ генератором и на создание явного резерва в холодном режиме (дополнительного СВЧ генератора).

Что касается источника питания СВЧ генератора, то его резервирование повышает надежность СВЧ установки. Отказ источника питания случается реже, чем отказ магнетрона, но причины отказа могут быть весьма разнообразными, и в связи с этим рекомендуется выводить источник питания в ремонт, а затем в резерв, заменяя его в установке на резервный.

Еще меньше время t_0 , если резервировать источник энергии (СВЧ генератор и источник его питания) или целиком всю СВЧ ЭТУ. В этом случае необходимы дополнительные затраты на приобретение резервного источника энергии или резервной СВЧ ЭТУ.

Отметим важное обстоятельство: время t_0 тем меньше, чем более дорогой вариант резервирования используется в СВЧ ЭТУ. Таким образом, мы приходим к задаче технико-экономической оптимизации установки с учетом ущерба и резервирования.

Задача технико-экономической оптимизации СВЧ ЭТУ сформулирована в работе [2], а в качестве целевой функции можно использовать чистый дисконтированный доход (интегральный эффект)

$$B_1 = \sum_{t=0}^{t_{cl}} \left[\sum_{i=0}^n (P_i C_i)_t - V_t + H_t + S_t + M_t - Z_t \right] (1+E)^{-t} + \Phi_t (1+E)^{-t_{cl}}, \quad (5)$$

где P_i, C_i – количество и цена единицы i -й продукции, выпускаемой проектируемой установкой в t -й год его эксплуатации; n – число видов выпускаемой за время t_{cl} продукции; t_{cl} – срок эксплуатации (службы) установки; V_t – величина ущерба в t -й год эксплуатации; H_t – стоимостная оценка сопутствующего эффекта в производственной сфере в t -й год эксплуатации; S_t – стоимостная оценка социального эффекта в t -й год эксплуатации; M_t – остаточная стоимость основных фондов производственной инфраструктуры, исключаемых из эксплуатации в t -й год; Z_t – эксплуатационные издержки на работу объекта, включая налоги, сборы и платежи, в t -й год эксплуатации; E – норма дисконта (определяется финансовой политикой

государства и меняется в пределах 0,08–0,12); $\Phi_{t_{cl}}$ – остаточная на момент времени t_{cl} стоимость основных фондов.

Чаще всего СВЧ ЭТУ выпускает один вид продукции, так что в (5) $n = 1$, кредит в банке на реализацию проекта – краткосрочный, не более одного года, по истечении года установка не демонтируется и не реализуется, сопутствующие эффекты в производственной и социальной сферах отсутствуют или их определение представляет самостоятельную задачу, далеко выходящую за пределы собственно электротехнологии. По этим причинам в качестве целевой функции задачи оптимизации ущерба и резервирования в СВЧ ЭТУ можно использовать частный случай соотношения (5).

$$B_1 = (ПЦ - C_{cm})(1 - \gamma_n - \gamma_{ндс})(1 - \gamma_y) - (C_{zn} + C_{\vartheta} + C_{зч} + Y + C_{\delta p} + 0,14K) * (1 - \gamma_n)(1 - \gamma_y) + K(1 + i_{кр}) \quad (6)$$

Поскольку

$$B_{1const} = (ПЦ - C_{cm})(1 - \gamma_n - \gamma_{ндс})(1 - \gamma_y),$$

$$B_{1var} = -[(C_{zn} + C_{\vartheta} + C_{зч} + Y + C_{\delta p} + C_a)(1 - \gamma_n)(1 - \gamma_y) + C_{ни} + K(1 + i_{кр})],$$

где B_{1var} – интегральный эффект, величина которого может быть оптимизирована варьированием переменных параметров задачи, а B_{1const} – величина, зависящая только от нормативных параметров задачи, причем $B_{1var} < 0$, решение задачи оптимизации ущерба и резервирования сводится к нахождению оптимальных значений независимых параметров, при которых $B_{1var} = B_{1var \min}$.

Входящие в (6) величины рассмотрены в [2], так что определению подлежат ущерб Y и затраты на резервирование. Соотношения для расчета ущерба приведены выше, а затраты на резервирование определены в [3].

Для каждого типа резервирования $B_{1var \min}$, т.е. B_{1max} имеет свою величину сопоставления по сравнительному интегральному эффекту

$$\Delta B_1 = B_{1i} - B_{1j}, \quad (7)$$

где i и j – номера сравниваемых вариантов резервирования, знак величины ΔB_1 определит предпочтительность того или иного варианта.

Как показали расчеты, сопоставление с помощью (7) аналитических выражений для B_{1i} , B_{1j} не позволяет определить предпочтительность варианта резервирования, поэтому в практических расчетах рекомендуется с помощью (7) проводить численное сопоставление.

Разумеется, необходимо перебрать все сочетания из вариантов резервирования по два сравниваемых. Поскольку общее число вариантов резервирования невелико, например при четырех вариантах резервирования следует произвести шесть сравнений и выбрать варианты, у которых B_{1max} наибольший.

Выводы

1. При проектировании СВЧ ЭТУ необходимо ориентироваться на достижение оптимального сочетания величины ущерба, затрат на резервирование с учетом наиболее востребованного критерия надежности – наработка на первый отказ СВЧ генератора.

2. Приведены соотношения для расчета ущерба при различной компоновке СВЧ ЭТУ и режимов ее работы.

3. Предложено в качестве целевой функции технико-экономической оптимизации ущерба и резервирования использовать выражения для чистого дисконтированного дохода (интегрального эффекта) на интервале один год без последующего демонтажа и реализации установки.

4. Предложено при выполнении оптимизационных процедур использовать численное сопоставление сравнительного интегрального эффекта вариантов резервирования. При общем числе резервирования, равном четырем, количество численных экспериментов составит C_2^4 .

ЛИТЕРАТУРА

1. Рогов И.А. Техника СВЧ нагрева пищевых продуктов / И.А. Рогов, С.В. Некрутман, Г.В. Лысов. М.: Агропромиздат, 1981. 346 с.

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

3. Доценко А.В. Оптимизация ущерба и резервирования при СВЧ диэлектрическом нагреве /А.В.Доценко // Вестник СГТУ. 2006. № 1 (10). Вып.1. – С. 131–137.

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
УДК 621.314.2(075.8)

С.Ф. Степанов, В.В. Тютманова, В.В. Курдя

АНАЛИЗ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ С ПРОМЕЖУТОЧНЫМ ЗВЕНОМ ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ

Рассмотрены вопросы улучшения массогабаритных показателей вторичных источников питания с промежуточным звеном повышенной частоты. Проведен анализ современной элементной базы для рассматриваемого класса устройств. Определены наиболее эффективные типы полупроводниковых приборов, магнитных материалов для создания вторичных источников питания с промежуточным звеном повышенной частоты для диапазона частот от 20 до 100 кГц.

S. F. Stepanov, V.V. Tjutmanova, V.V. Kurdya

THE ANALYSIS OF ELEMENT BASE FOR CONSTRUCTION OF HIGH-VOLTAGE POWER SUPPLIES WITH AN INTERMEDIATE LINK OF THE HIGH FREQUENCY

Questions of improvement mass-dimensional parameters of secondary power supplies with an intermediate link of the increased frequency are considered. The analysis of modern element base for a considered class of devices is carried out. The most effective types of semi-conductor de-

vices, magnetic materials for creation of secondary power supplies with an intermediate link of the high frequency for a range of frequencies from 20 up to 100 kHz are determined.

Существующие в настоящее время высоковольтные источники питания электротехнологических установок в большинстве случаев морально и технически устарели и не удовлетворяют современным технико-экономическим требованиям по величине КПД, массогабаритным показателям и ряду других показателей. В частности, это относится и к источникам питания промышленных СВЧ установок диэлектрического нагрева. Диэлектрический нагрев считается одним из перспективных видов нагрева. Широкому применению диэлектрического нагрева в промышленности препятствует, с одной стороны, высокая стоимость этих установок, с другой – не последнюю роль играют чрезвычайно большие масса и габариты этих установок. Основной вклад в массогабаритные показатели вносят источники питания.

Эффективным направлением улучшения технико-экономических показателей промышленных СВЧ установок является построение источников питания этих устройств по схеме с промежуточным звеном повышенной частоты (ПЗПЧ). Создание высокоэффективных источников питания возможно за счёт применения современных силовых полупроводниковых и магнитных материалов с низкими потерями на перемагничивание, а также высокоинтеллектуальных интегральных схем управления, контроля и защиты. Благодаря созданию быстродействующих силовых транзисторов, специальных интегральных схем для управления, контроля и защиты, быстродействующих диодов, ферритов с низкими потерями на перемагничивание, аморфных и нанокристаллических сплавов, конденсаторов с малыми диэлектрическими потерями были созданы и нашли широкое применение источники питания с ПЗПЧ для электроустановок малой мощности.

Основные преимущества таких источников питания по сравнению с источниками, выполненными по классической схеме с сетевой частотой 50 Гц, следующие:

- более высокий КПД (до 95%);
- уменьшенная масса и габариты трансформаторов и дросселей;
- бесшумная работа вследствие высокой частоты;
- уменьшенные габариты сглаживающих фильтров.

На основе современной элементной базы возможно построение и высоковольтных источников питания с ПЗПЧ. На рис. 1 показана структурная схема высоковольтного источника питания с ПЗПЧ.

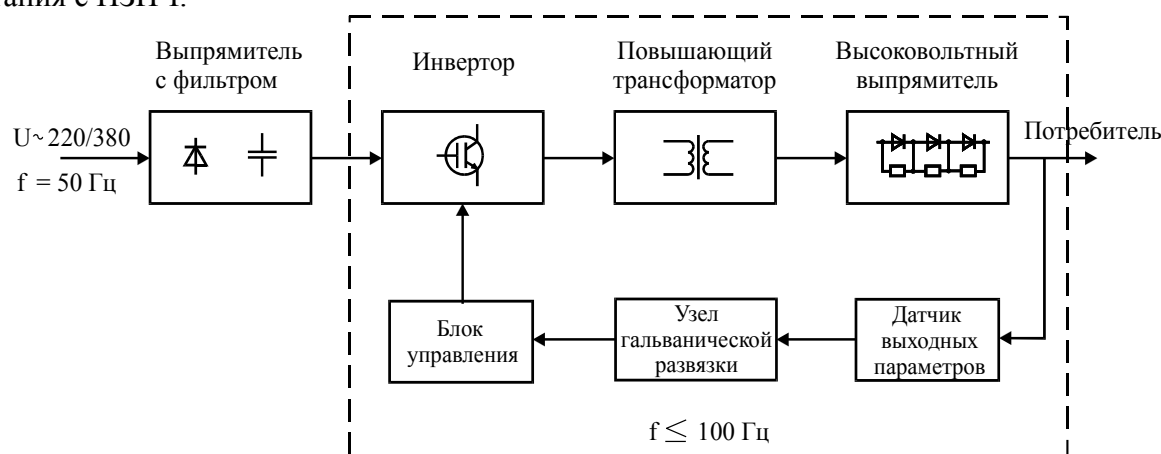


Рис.1. Структурная схема высоковольтного источника питания с ПЗПЧ

Схема состоит из следующих функциональных блоков: сетевого выпрямителя с фильтром, инвертора, повышающего трансформатора и высоковольтного выпрямителя. Управление источником питания осуществляется с помощью регулирования выходных па-

раметров инвертора. Несмотря на наличие двух дополнительных преобразователей (инвертор и сетевой выпрямитель), удастся существенно улучшить массогабаритные показатели источника питания за счет резкого сокращения массы и габаритов трансформатора и других электромагнитных элементов [1].

При построении сетевого выпрямителя целесообразно ограничиться вариантом с неуправляемым сетевым выпрямителем, построенным по трехфазной мостовой схеме, это позволит получить сравнительно низкий коэффициент пульсации выпрямленного напряжения. Это существенно уменьшит массу, габариты сглаживающего фильтра. Использование для построения сетевого и высоковольтного выпрямителя быстродействующих диодов, которые в последнее время широко применяются в силовой электронике, как для пропускания обратного тока в ячейках полупроводниковых приборов и защитных цепочек, так и для выпрямления прямоугольных напряжений высокой частоты, позволит значительно увеличить КПД. Современные быстродействующие диоды обладают рядом важных свойств: низкое значение прямого падения напряжения, малое время восстановления (от 30 до 400 нс) при высоком обратном напряжении (от 200 до 1200 В). Одним из известных производителей таких диодов является International Rectifier. В табл. 1 представлены основные параметры некоторых быстродействующих диодов HEXFET, производимых International Rectifier.

Следующей важной проблемой, возникающей при проектировании эффективного источника питания (ИП) для промышленных электротехнологических установок на основе высокочастотных транзисторных преобразователей, является выбор типа полупроводниковых элементов используемых, в качестве силовых ключей инверторной части.

На рис. 2 представлены рабочие области частот и мощности, достигнутые современными преобразователями частоты, построенные с использованием различных типов полупроводниковых приборов.

Пределные параметры запираемых тиристоров, на базе которых также можно осуществить построение инвертора, составляют по прямому току до 2,5 кА, по напряжению до 6 кВ, по частоте переключения до 1 кГц. На более высоких частотах целесообразно использовать транзисторы. В последнее время широкое распространение получили полевые транзисторы с изолированным затвором MOSFET.

Таблица 1

Основные параметры диодов HEXFET

Тип диода	Пиковое обратное напряжение, В	Значение выпрямленного тока, при T_c , А	Температура корпуса, $^{\circ}\text{C}$	Время восстановления сопротивления, нс
8EWF04S	400	8	96	140
10ETF04S	400	10	128	145
30CPF04	400	30	98	160
8EWF06S	600	8	96	140
HFA16TA60C	600	16	90	55
HFA30TA60C	600	30	100	60
HFA25PB60	600	25	100	75
20ETF08	800	20	97	400

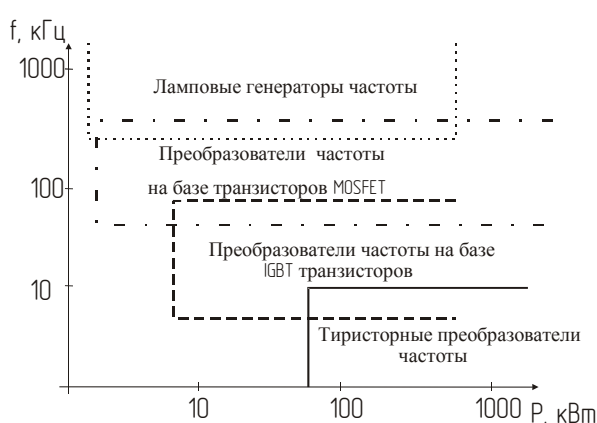
20ETF10	1000	20	97	400
HFA30PB120	1200	30	84	37
20ETF12	1200	20	97	400
HFA16TB120	1200	16	98	30

Основными достоинствами этих транзисторов являются отсутствие затрат мощности на управление и высокое быстродействие в результате переноса тока основными носителями заряда. Но по предельным значениям выходных напряжений и тока полевые транзисторы заметно уступают биполярным, что определяет их использование в низковольтных устройствах силовой электроники с высокими частотами процессов преобразования электрической энергии.

Появившийся в последние годы биполярный транзистор с изолированным затвором (IGBT – транзистор) конструктивно объединяет в себе полевой транзистор с изолированным затвором (на входе) и биполярный транзистор (на выходе). Он имеет высокое входное сопротивление и не требует в статике мощности на управление, как полевой транзистор. Параметры выходных напряжения и тока у него выше, чем у биполярного транзистора, рабочая частота может достигать 100 кГц. В настоящее время за рубежом выпускаются IGBT – транзисторы четвертого поколения с выходным током до 1200 А и напряжением до 6500 кВ [3].

Особый интерес представляет анализ эффективности применения того или иного класса современных транзисторов в преобразователях с напряжением питания от 600 до 1200 В мощностью до 10 кВт, с частотой преобразования от 50 Гц до 100 кГц, предназначенных для высоковольтных источников питания с улучшенными массогабаритными показателями.

В последние годы ведущие производители компонентов особое внимание уделяют разработке новых изделий, позволяющих решать проблемы повышения эффективности преобразователей на качественно новом уровне. Так, на напряжениях питания до 300 В и на частотах переключения от 100 кГц и выше применяются транзисторы MOSFET, на напряжениях от 300 до 1200 В и частотах переключения до 30 кГц предпочтение отдается IGBT-транзисторам. Но при этом диапазон 300 – 800 В, 50 – 100 кГц остается спорным с позиции эффективности использования того или иного прибора. Это связано с тем, что у IGBT-транзисторов существенную роль начинают играть динамические потери, а у MOSFET – статические потери. Важным фактором является специфика работы преобразователя на индуктивную нагрузку, при этом ходимо устанавливать параллельные диоды, характеристики обратного восстановления которых вносят значительный вклад в динамические потери транзисторов.



ным
спе-
разо-
необ-
анти-
ха-
го
рых
вклад
тран-

Рис. 2. Рабочие области современных преобразователей частоты для различных типов электронных приборов

Транзисторы MOSFET напряжением 600 и 800 В, обладающие сверхнизкими статическими потерями, были представлены компанией Infineon Technologies в 1998 году под торговой маркой CoolMOS. Уменьшения потерь удалось достичь за счет снижения сопротивления в открытом состоянии более чем в 5 раз по сравнению с обычными полевыми транзисторами. Кроме сверхнизких статических потерь, эти транзисторы обеспечивают более высокую скорость переключения, чем у обычных транзисторов MOSFET, что позволило снизить потери переключения.

Второй подход к решению данной проблемы заключается в блокировке паразитного диода последовательным с транзистором диодом Шоттки и подключением встречно-параллельно ULTRAFAST-диода и SiC-диода. Транзисторы MOSFET, базирующиеся на этом подходе, были выпущены компанией Advanced Power Technology, но наличие последовательного диода резко увеличивает статические потери по сравнению с одиночным MOSFET.

В табл. 2 приведены основные характеристики новых транзисторов MOSFET напряжением 800 В и током стока до 55 А, изготовленных по различным технологиям.

Таблица 2

Характеристики транзисторов MOSFET

Тип	Технология	$U_{си\ max}$, В	$I_{си\ max}$, А, при 25°C	$R_{си}$, Ом, при 25°C	t_r/t_f , нс	$t_{гр}$, нс	$Q_{гр}$, мкКл
APT8011JLL	PowerMOS7 [®] StandardMOSFET	800	51	0,110	23/19	1000	34
IXFN50N80Q2	HiPerFET™	800	50	0,150	25/13	300	1,1
IXKN45N80C	CoolMOS™	800	44	0,074	15/10	855	30

Другое решение – IGBT-транзистор, который условно представляют как комбинацию биполярного p-n-p-транзистора и транзистора MOSFET. У IGBT-транзистора нет паразитного обратного диода, при необходимости можно использовать внешний антипараллельный ULTRAFAST-диод или SiC-диод. Структурно IGBT делят на транзисторы? изготовленные по PT-технологии и NPT-технологии. Транзисторы на базе NPT-технологии допускают частоты переключения до 300 кГц для напряжений от 600 до 1200 В, при этом имеют малые потери [2].

В табл. 3 приведены характеристики некоторых современных IGBT-транзисторов напряжением 1200 В, постоянным током коллектора 50 А и антипараллельным диодом.

Таблица 3

Характеристики высокоскоростных PT и NPT IGBT-транзисторов

Тип	Технология	$U_{кз\ max}$, В	$I_{к\ max}$, А, при 25°C	$U_{кз\ нас}$, Ом, при	t_r/t_f , нс	E_{tot} , мДж	$Q_{гр}$, нКл
-----	------------	-------------------	----------------------------	-------------------------	----------------	-----------------	----------------

				125°C, В			
APT35GP120B2 DF2	Power MOS7® PT IGBT+FRD	1200	46 при 110 °С	3,0	20/40	1,43	162
APT50GF120JRD	NPT IGBT+FRD	1200	50 при 105 °С	3,5	178/190	10,8	630
IXDH30N120D1	NPT IGBT+FRD	1200	38 при 90 °С	3,1	70/70	8,0	3300

Выбор полупроводникового прибора определяется конкретными электрическими характеристиками установки в целом. При этом выделяются два критерия:

- уменьшение уровня суммарных потерь в преобразователе при заданных параметрах питания и мощности нагрузки;
- увеличение стоимости преобразователя до максимально допустимого предела.

Полная мощность, выделяющаяся на транзисторе во время его переключения, определяется из выражения

$$P = P_{nep} + P_{np} + P_{ynp} + P_{ym},$$

где P – полная рассеиваемая мощность; P_{nep} – динамические потери или потери мощности при переключении; P_{np} – статические потери или потери на активном сопротивлении открытого транзистора; P_{ynp} – потери на управление в цепи затвора; P_{ym} – потери мощности за счет тока утечки в закрытом состоянии.

Потери мощности, вызванные током утечки (P_{ym}) и потери на управление в цепи затвора (P_{ynp}) пренебрежимо малы, поэтому из расчетов их можно исключить [3].

Для оценки потерь в преобразователе, работающем в «жестком» режиме, будем считать, что за время открытого состояния транзистора ток, протекающий через него, остается приблизительно постоянным, скорость нарастания напряжения при выключении определяется величиной времени спада, коэффициент заполнения равен 0,5.

Мощность статических потерь определяется выражениями:

- для транзисторов MOSFET

$$P_{cm\ MOSFET} = \frac{1}{2} I_{sw} R_{on},$$

- для IGBT-транзисторов

$$P_{cm\ IGBT} = \frac{1}{2} I_{sw} U_{sat},$$

где I_{sw} – ток, протекающий через транзистор; U_{sat} – прямое падение напряжения на IGBT; R_{on} – сопротивление в открытом состоянии.

Мощность динамических потерь складывается из трех составляющих: «жесткое» переключение при токе I_{sw} , разряд выходной емкости C_{oss} транзистора, заряженной до уровня напряжения питания, и обратное восстановление антипараллельного диода с зарядом Q_r .

Для MOSFET-транзисторов мощности динамических потерь определяются по формулам:

- для транзисторов MOSFET:

$$P_{дин\ MOSFET} = \frac{1}{2} I_{sw} U_0 f_s (t_f + t_r) + \frac{1}{2} C_{oss} U_0^2 f_s + Q_{rr} U_0 f_s,$$

- для IGBT транзисторов со встроенным антипараллельным диодом:

$$P_{дин\ IGBT} = \frac{1}{2} E_{t0t} f_s + \frac{1}{2} C_{oss} U_0^2 f_s + Q_{rr} U_0 f_s,$$

где U_0 – напряжение питания; f_s – частота преобразования; t_f , t_r – время нарастания и спада тока через транзистор; E_{tot} – суммарная энергия переключения IGBT [3].

В табл. 4 приведены результаты расчетов величин полных потерь для транзисторов MOSFET и IGBT, работающих в преобразователях с $U_0 = 540$ В, $P_0 = 10$ кВт на частоте $f_s = 50$ кГц и $U_0 = 600$ В, $P_0 = 10$ кВт на частоте $f_s = 100$ кГц.

Таблица 4

Результаты расчетов величин полных потерь для разных режимов

Вид	Тип	$P_{ст}$, Вт	$P_{дин}$, Вт	$P_{пр}$, Вт	P , Вт
$U_0 = 600$ В, $P_0 = 10$ кВт, $f_s = 50$ кГц					
MOSFET	APT8011JLL	18,8	28,6	1020,0	1067,4
	IXFN50N80Q2	24,3	21,5	33,0	78,8
	IXKN45N80C	12,0	29,5	900,0	941,5
IGBT	APT35GP120B2DF2	27,7	34,8	4,8	67,3
	APT50GF120JRD	31,5	252,1	18,5	302,1
	IXDH30N120D1	27,9	187,5	97,3	312,7
$U_0 = 540$ В, $P_0 = 10$ кВт, $f_s = 100$ кГц					
MOSFET	APT8011JLL	18,8	48,0	1836,0	1902,8
	IXFN50N80Q2	24,3	36,0	59,4	119,7
	IXKN45N80C	12,0	48,8	1620,0	1680,8
IGBT	APT35GP120B2DF2	27,7	75,1	8,8	111,6
	APT50GF120JRD	31,5	542,1	34,0	607,6
	IXDH30N120D1	27,9	403,2	178,2	609,3

Выбор таких параметров преобразователя продиктован нагрузкой, например серийно выпускаемый магнетрон мощностью 3 кВт имеет напряжение на аноде 4,6 кВ при токе анода 1,3 А, а ток накала составляет 18 А при напряжении накала 8,8 В.

Полученные результаты расчетов показали, что у новых IGBT-транзисторов с ростом рабочей частоты преобразования растут динамические потери. Статические потери у представленных транзисторов с ростом частоты не изменяются, за исключением HiPerFET™, у которых динамические потери ниже статических на частоте до 50 кГц, а на частоте 100 кГц выше.

Величина суммарных потерь определяется также обратным восстановлением антипараллельного диода, которое является составляющей динамических потерь. У двух из рассмотренных транзисторов MOSFET она в 10 раз больше чем у IGBT-транзисторов. Использование CoolMOS™ транзисторов с антипараллельным диодом из карбида кремния дает ощутимое преимущество только на частоте от 100 кГц и выше, но при этом значительно возрастает стоимость инвертора с \$30 за четыре транзистора до \$160 за тиристорный модуль.

Возвращаясь к вопросу выбора транзистора для спорного диапазона напряжений и частот, можно с уверенностью утверждать, что в ближайшем будущем предпочтение будет отдано IGBT-транзисторам.

Выбор диапазона рабочей частоты преобразователя определяется также рабочей частотой магнитопровода высокочастотного трансформатора напряжения.

Амплитуда рабочей индукции у современных магнитных материалов, эффективно работающих в рассматриваемом диапазоне частот существенно зависит от частоты. С ростом частоты преобразования рабочая индукция сердечника трансформатора резко снижается: если на частоте 10 кГц она составляет около 1,0 Тл, то при частоте 100 кГц уже 0,2 Тл. Подобное снижение рабочей индукции повлечет за собой увеличение массогабаритных показателей не только самого трансформатора, но и источника питания в целом.

Предлагаемый высоковольтный источник питания будет работать в диапазоне частот от 20 до 150 кГц и даже выше. Чтобы обеспечить высокий КПД, необходимо использовать для сердечников трансформаторов и дросселей магнитные материалы с низкими потерями на перемагничивание. Для этих целей разработаны такие специальные магнитомягкие материалы, как ферриты, аморфные и нанокристаллические сплавы. Одновременно применение таких материалов позволяет уменьшить массу трансформатора и дросселя с 10 – 15 кг/кВт на частоте 50 Гц до менее 0,5 кг/кВт при частотах выше 20 кГц. Таким образом, повышается КПД источника питания с менее чем 80 % на частоте 50 Гц до 95 % на высоких частотах, снижается масса источника питания до 1 – 2 кг/кВт и вследствие этого уменьшаются эксплуатационные расходы на 15 %.

В настоящее время имеется возможность выбирать для каждого конкретного применения оптимальный магнитный материал и вид сердечника трансформатора и дросселя. При этом необходимо учитывать передаваемую мощность, схему источника питания, частоту, максимальный нагрев, а также максимальный объем. Выбор магнитного материала определяется диапазоном частот. Наиболее часто применяемыми в силовой электронике и особенно выгодными являются E-сердечники с кружным средним стержнем типа ER и ETD. Коэффициент исполнения $f \cdot B_{max}$ является мерой для передаваемой мощности феррита, на рис.3 показана зависимость коэффициента исполнения в зависимости от частоты для различных ферритовых материалов фирмы SIEMENS.

Трансформаторы со стандартным ETD-сердечником из феррита N87 позволяют передавать мощность 12 кВт при частотах 500 кГц. Простые двойные U-сердечники из феррита N27 допускают передачу около 5 кВт на частоте 150 кГц. PM-сердечники работают в мощных трансформаторах до 20 кВт; ER-сердечники большого размера, например, ER 178, от 50 до 120 кВт. Названные сердечники применяют для дросселей мощностью до 10 кВт [2].

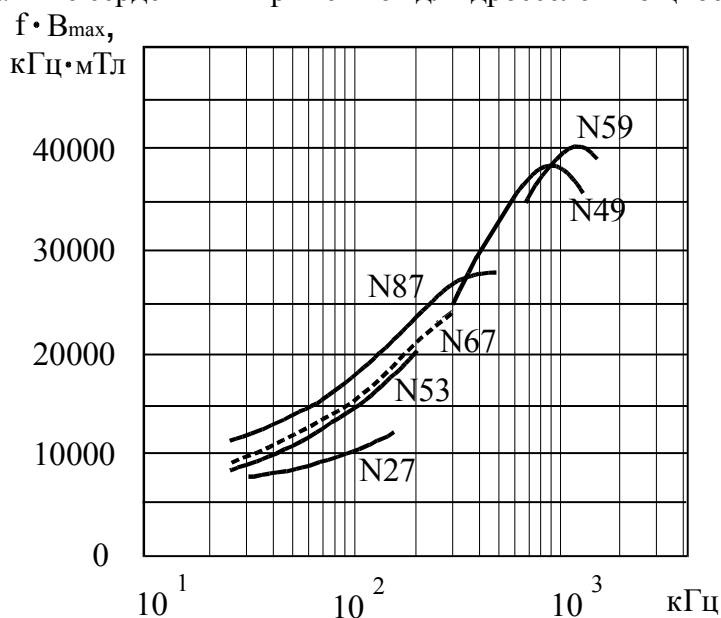


Рис. 3. Коэффициент исполнения в зависимости от частоты для различных ферромагнитных материалов

Трансформаторы с кольцевым ленточным сердечником из нанокристаллического материала, например VITRORPERM, выполняются на мощности до 40 кВт при рабочих частотах около 20 кГц, при помощи параллельного включения можно повышать передаваемую мощность до нескольких сотен киловатт. В табл. 5 представлены данные, характеризующие свойства феррита марки НМ, материала магнитопровода ГМ 411 (ГАММАМЕТ), аморфного VITROVAC, нанокристаллического материала VITRORPERM. На основе данных, представленных в табл. 3, можно сделать вывод, что аморфные и нанокристаллические сплавы обладают более высокими значениями начальной и максимальной магнитной проницаемости и большой индукцией насыщения по сравнению с ферритами.

Кроме того, эти материалы характеризуются более низкими удельными магнитными потерями по сравнению с другими электротехническими материалами. На рис.3 представлены зависимости удельных магнитных потерь от амплитуды индукции B_m для сплава ГМ 411, для ряда частот, там же для сравнения приведены кривые для магнитных материалов (пермаллоя 2000НМА, феррита 79НМ и стали).

Таблица 5

Основные свойства магнитных материалов

Структура	Поликристаллическая	Нанокристаллическая	Аморфная	Нанокристаллическая
Тип сплава	Феррит 2000НМ	ГМ 411	VITROVAC 6030F	VITRORPERM500F
$\mu_{нач}$	2000	50000	4000	30000
μ_{max}	3500	300000	–	80000
$B_{нас}$, Тл	0,38	1,20	0,82	1,20
Тем-ра Кюри, °С	200	590	365	600

Кривые для магнитных материалов, представленных на рис. 4, рассчитаны по формулам, приведенным в [4]; из рис. 4 следует, что быстрозакаленный магнитный сплав ГМ 411 имеет наименьшие магнитные потери по сравнению с традиционными материалами во всей области частот от 50 Гц до 100 кГц.

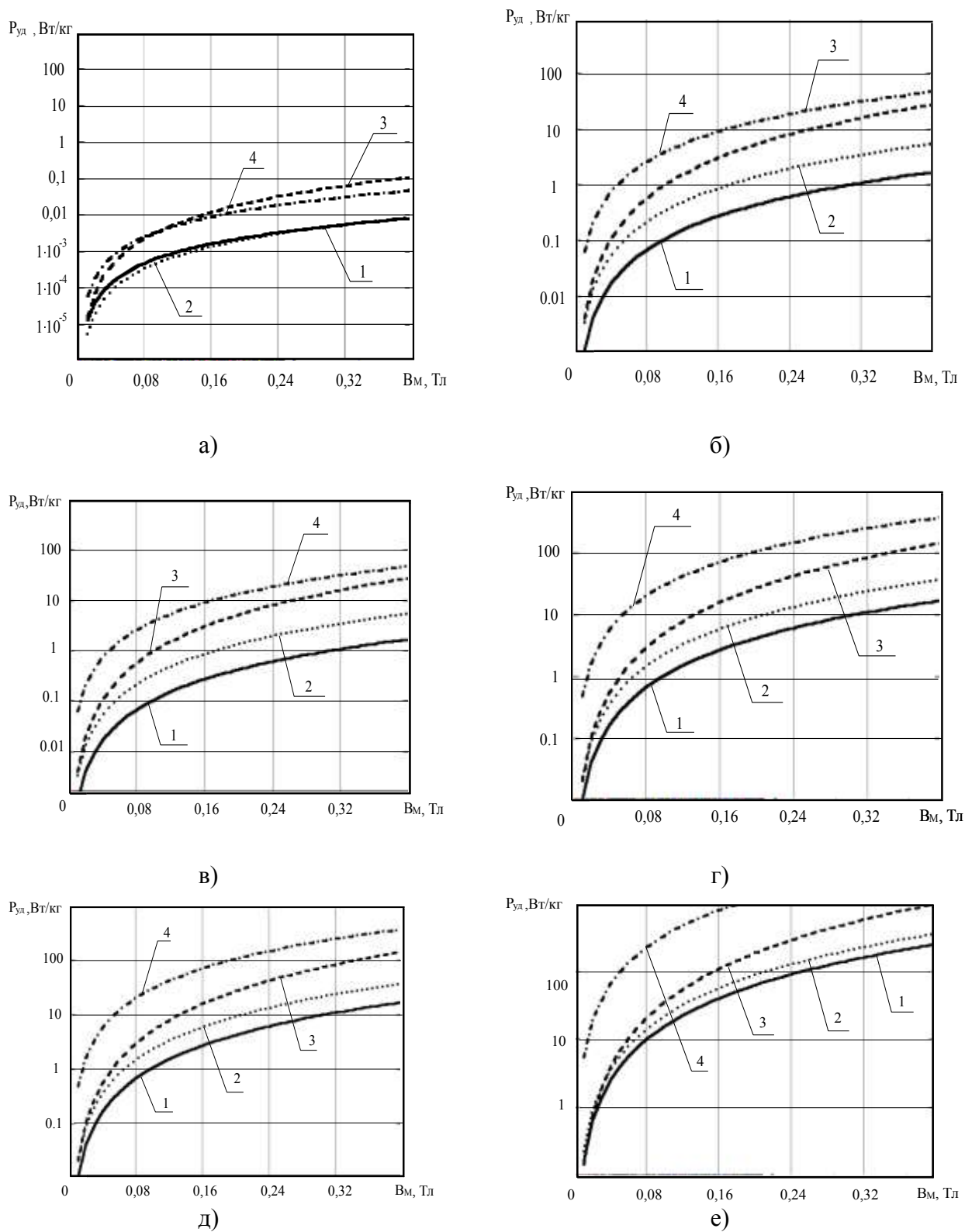


Рис.4. Удельные магнитные потери $P_{уд}$ в зависимости от амплитуды индукции B_m в магнитных материалах: 1 – ГМ 411; 2 – пермаллой 79НМ (0,02 мм); 3 – феррит 2000НМА; 4 – электротехническая сталь 3406 (0,08 мм) для ряда частот: а) 50 Гц, б) 400 Гц, в) 5 кГц, г) 20 кГц, д) 50 кГц, е) 100 кГц

Конденсаторы служат в силовой электронике для фильтрации нежелательных высших гармоник, сглаживания и поддержания постоянного напряжения, подавления нежелательных пиков напряжения, формирования импульсов тока или коммутации токов. Конденсаторы должны обладать следующими свойствами: держать высокую пиковую нагрузку по току, высокую прочность по напряжению, низкую собственную индуктивность, большую накопительную способность по энергии, большую надежность при термической нагрузке. На рис. 5 представлен обзор областей применения конденсаторов, в источниках питания чаще всего применяют электролитические и пленочные конденсаторы [2].

Алюминиевые электролитические конденсаторы выпускаются в различных корпусах для низких напряжений от 5 до 100 В емкостью от 100 до 100000 мкФ, а для более высоких напряжений 160 – 500 В емкостью от 47 до 22000 мкФ. Срок службы зависит от нагрузки и рабочей температуры и находится в пределах от 3000 ($I_{ном}$, 125 °С) до 200000 часов ($3,5I_{ном}$, 40 °С) [SIKOREL 125, SIEMENS,1].

С применением новых полупроводниковых приборов (транзисторов MOSFET, IGBT) и повышением рабочей частоты до 500 кГц появились новые критерии эксплуатации для конденсаторов переменного напряжения и импульсных конденсаторов. Диэлектрик из бумаги не удовлетворяет этим требованиям, поэтому применяют синтетические пленки, которые по сравнению с бумагой имеют ряд преимуществ: высокое сопротивление изоляции, высокая прочность на пробой, маленькая толщина, меньше дефектов и минимальное содержание влаги.

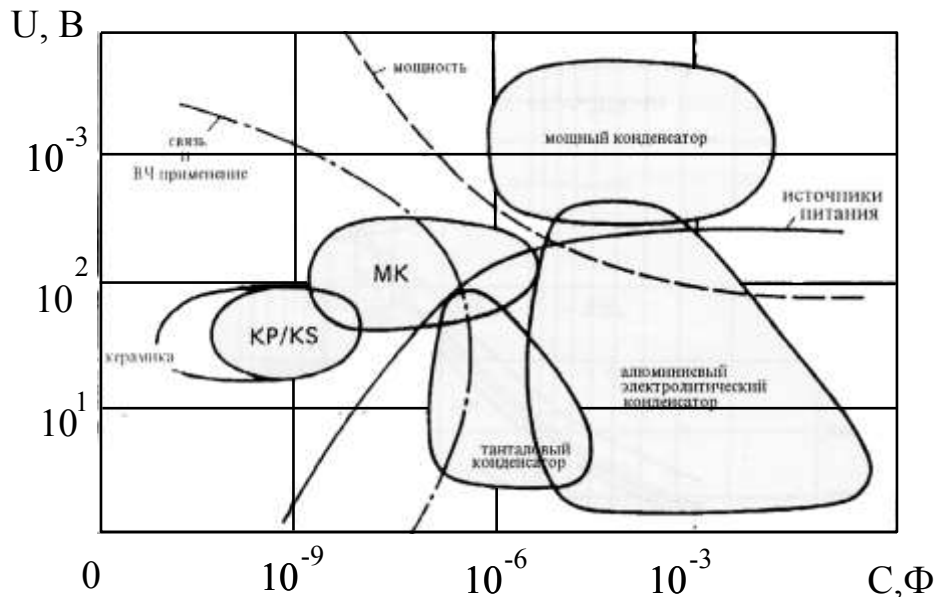


Рис. 5. Напряжение и емкость различных конденсаторов

В источниках питания главным образом находят применение металлопленочные конденсаторы (МК-конденсаторы) с полиэтилентерефталатным (МКТ-конденсатор) или полипропиленовым диэлектриком (МПК-конденсатор). Пленочные конденсаторы изготавливаются в виде слоистых или рулонных конденсаторов (рис. 5). В отличие от конденсаторов из металлических фольг МК-конденсаторы являются самовосстанавливающимися.

Выпускают МКТ-конденсаторы емкостью от 1 нФ до 22 мкФ при номинальных напряжениях постоянного тока 63 – 400 В, МКР-конденсаторы от 1 нФ до 4,7 мкФ при 250 – 2000 В и от 1 до 4 мкФ при 250 – 400 В. Показатель удельной массы у перечисленных конденсаторов на 1 – 2 порядка лучше, чем у отечественных аналогов.

Для управления, регулирования, контроля и защиты источников энергии существует большой набор стандартных интегральных схем (например, фирмы SIEMENS, TDA 4949 на частоту до 300 кГц). Они разрешают прямое управление транзисторами методом ШИМ и содержат важные функциональные блоки, такие как интегральные выходные усилители, компараторы, регулирующие усилители, схему плавного пуска, отключение при пониженном напряжении и перенапряжении, ограничитель тока и т.д.

Для разрабатываемого в СГТУ высоковольтного источника питания с ПЗПЧ изготовлен высокочастотный трансформатор (рабочая частота 50 кГц), который при массе сердечника не более 0,7 кг позволяет получить мощность до 18 кВА. Этот трансформатор позволит создать источники питания для генераторов СВЧ-энергии магнетронного типа выходная мощность, которых составляет 3 – 5 кВт, которые используются в промышленности.

Вполне закономерен вопрос о стоимости предлагаемых источников питания, так как новые материалы могут оказаться дорогостоящими, и стоимость источника питания будет сравнима и уже имеющимися. Исследование рынка современных силовых полупроводниковых приборов показал, что стоимость необходимых диодов и транзисторов и колеблется в интервале от \$ 5 до 50. Магнитопроводы производит отечественное предприятие и цены на них тоже сравнительно невысоки.

В табл. 6 представлен выбор компонентов для основных элементов источника питания с ПЗПЧ для указанных магнетронов, массогабаритные показатели и расчетная стоимость.

Таблица 6

Источники питания с ПЗПЧ ($f = 50$ кГц)

Название блока	Марка п/п	Объем, дм ³	Расчетная стоимость, \$	Масса, кг
Магнетрон М-163 $P_{вых} = 3$ кВт				
Сетевой выпрямитель	20ETF08	1,6	62,4	0,3
Высоковольтный выпрямитель	40ETF12S	8,0	395,2	0,7
Высокочастотный трансформатор	ГМ42ДС0, 128x0,1x0,02	10,0	390,0	1,5
Инвертор	IRG4PH50WD, 100 кГц	55,0	223,6	0,7
Источник питания мощностью 6 кВт		24,6	1071,2	5,2
Магнетрон Хоста $P_{вых} = 5$ кВт				
Сетевой выпрямитель	20ETF08	1,6	62,4	0,3
Высоковольтный выпрямитель	40HF160	12,0	1222,0	1,5
Высокочастотный трансформатор ГМ 42ДС 0,128x0,1x0,02		15,0	468,0	2,5
Инвертор	IRG4PH50WD, 100 кГц	5,0	245,96	0,7
Источник питания мощностью 12 кВт		43,0	1998,36	8,5
ELECTRO-AUTOMATIK EA-HV-900-6K-2000, 2 кВт		19,0	8300	7,0

Из данных, приведенных в табл. 1 и 3, видно, что самый близкий по приведенным характеристикам зарубежный источник питания ELECTRO-AUTOMATIK EA-HV-900-6K-2000 мощностью 2 кВт при схожих характеристиках стоит в 4 – 8 раз дороже.

Выводы

1. Для вторичных источников мощностью до 10 кВт и выходным напряжением до 6 – 8 кВ наиболее предпочтительным диапазоном промежуточной частоты является диапазон от 20000 до 100000 Гц.

2. Наиболее эффективными для работы в данном частотном диапазоне являются IGBT-транзисторы последнего поколения.

3. Из магнитных материалов отечественного производства наиболее эффективными для работы на частотах 20 – 100 кГц являются нанокристаллические материалы типа ГАММАМЕТ.

4. В качестве диодов целесообразно применение быстродействующих диодов с малым временем восстановления.

5. Построение вторичных высоковольтных источников питания на основе современной элементной базы по схеме с промежуточным звеном повышенной частоты позволяет получить снижение массы источников питания в 5 – 10 раз (большее значение соответствует источникам питания меньшей мощности).

ЛИТЕРАТУРА

1. Артюхов И.И. К вопросу об улучшении массогабаритных показателей источников СВЧ энергии магнетронного типа / И.И.Артюхов, С.Ф.Степанов, В.В.Иванова // Функциональные устройства низких и сверхвысоких частот: межвуз. науч. сб. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2003. С. 86.

2. Современные энергосберегающие электротехнологии: учеб. пособие для вузов / Ю.И. Блинов, А.С. Васильев, А.Н. Никаноров и др. – СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2000. – 564 с.

3. Полищук А. А. Выбор ключевых транзисторов для преобразователей с жестким переключением / Полищук А. А. // Современная электроника. 2004. № 1. С. 13 – 18.

4. Стародубцев Ю.Н. Трансформаторы напряжения на кольцевых магнитопроводах ГАММАМЕТ 411 / Ю.Н.Стародубцев // Электричество. 1995. № 10. С. 63 – 67.

Степанов Сергей Федорович –

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

Тютманова Виктория Васильевна –

аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета

Курдя Василина Васильевна –

аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета

Г.Г. Угаров, А.А. Егоров, Д.А. Вырыханов

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ЛИНЕЙНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ПРЕССОВАНИЯ СВЧ-ФЕРРИТОВ

В статье изложены результаты моделирования линейного электромагнитного двигателя цилиндрической магнитной системы для прессования СВЧ-ферритов с использованием метода конечных элементов.

G.G. Ugarov, A.A. Egorov, D.A. Vyrychanov

MODELLING AND DESIGN OF MAGNETIC SYSTEM OF THE LINEAR ELECTROMAGNETIC ENGINE FOR PRESSING THE MICROWAVE-FERRITE

In article the research of the linear electromagnetic engine model with a cylindrical ferromagnetic systems for pressing the microwave-ferrite, using a finite element method. The article demonstrates the consideration of these problems.

Использование ферритов в СВЧ технике позволяет создавать устройства, характеризующиеся малыми потерями энергии, высокой стабильностью, практически неограниченным сроком службы и низкой стоимостью [1]. К числу основных характеристик ферритовых материалов для СВЧ устройств относятся потери магнитной, электрической энергий в феррите и зависимость угла поворота плоскости поляризации СВЧ поля, распространяющегося через ферритовый образец, намагниченный до насыщения, от частоты и величины намагничивающего поля. Оптимальное сочетание указанных характеристик ферритов для СВЧ устройств обеспечивается их высокими плотностью, однородностью и электрическим сопротивлением. Чем выше плотность образца, тем меньше потери энергии электромагнитного поля вне области ферромагнитного резонанса. Одним из эффективных методов получения высокоплотных СВЧ ферритовых изделий является метод горячего прессования.

Для прессования СВЧ-ферритов используют прессы с различными приводами: гидравлический, пневматический, механический (эксцентриковый) и реже ручной. Как показали исследования [2], перспективным типом привода с широким диапазоном технологической приемлемости во многих отраслях для операций прессования может служить линейный электромагнитный привод (ЛЭМП). При использовании метода горячего прессования в производстве СВЧ-ферритов требуются значительно меньшие давления (до 1 кН/см^2), чем при других методах прессования, что позволяет применить в данном методе ЛЭМП. Необходимая форма тяговой характеристики привода и характеристика противодействующих усилий при горячем прессовании СВЧ-ферритов представлен на рис.1.

Целью настоящего исследования является задача синтеза конструкции магнитной системы (МС) линейного электромагнитного двигателя (ЛЭМД), в котором за счет целенаправленного изменения геометрических параметров отдельных конструктивных элементов МС можно сформировать тяговую характеристику двигателя, удовлетворяющую технологическому требованию по тяговой силе в технологических процессах прессования СВЧ-ферритов.

Анализ тяговых характеристик различных типов ЛЭМД позволяет считать перспективными для целей силового привода в данных технологических операциях цилиндрические броневые ЛЭМД укороченной МС, обладающие высокими энергетическими показателями, простотой и технологичностью изготовления.

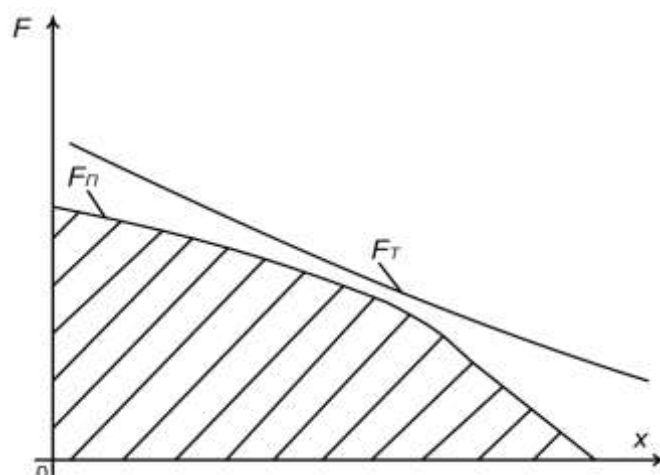


Рис. 1. Силовые характеристики по перемещению x штампа прессы:
 $F_{П}$ – противодействующая, F_{T} – требуемая тяговая

С целью обоснования конфигурации магнитной цепи ЛЭМД, обладающей необходимой работоспособностью, максимальным тяговым усилием в соответствующей точке противодействующей характеристики, проведём анализ тяговых характеристик броневого ЛЭМД цилиндрической структуры укороченной МС (рис. 2).

При разработке новых и исследовании известных, но малоизученных МС авторами был применен следующий подход. Стремление получить тяговую характеристику с высокими значениями начальных усилий привело к идее совмещения положительных качеств у конструкций МС ЛЭМД с продольным магнитным полем и у ЛЭМД с поперечным магнитным полем.

Для моделирования тяговых характеристик рассматриваемого класса ЛЭМД был выбран метод конечных элементов, и использована одна из множества реализаций данного метода – программа FEMM [3].

Математическая модель основана на следующих допущениях. Модель является двумерной. Для ферромагнитных материалов нелинейность магнитной проницаемости учитывается посредством таблицы заданных значений индукции и напряженности магнитного поля, которая аппроксимируется с помощью кубических сплайнов в функциональную зависимость $B = f(H)$. Магнитопровод и якорь выполнены массивными из стальной поковки (сталь 10). Рассмотренные конструкции МС (рис. 2) имеют одинаковые массогабаритные показатели и равные значения магнитодвижущей силы. На рис. 3 приведены статические тяговые характеристики этих ЛЭМД.

Сила тяги ЛЭМД с притягивающимся якорем (рис. 2 а) обусловлена магнитным потоком в рабочем зазоре и потоками выпучивания. Потоки рассеяния между центральным полюсом и ярмом не участвуют в создании тягового усилия и приводят к потере МДС, поэтому характеристика тяговой силы имеет вид резко падающей кривой с малым значением усилия в начале рабочего хода (рис. 3, кривая 1).

С целью максимального использования магнитного потока системы, увеличения запасаемой магнитной энергии, исключения паразитных зазоров, увеличения поверхности якоря, взаимодействующего со статором, предложены [2] ЛЭМД с комбинированным якорем и двумя рабочими зазорами (рис. 2 б – г).

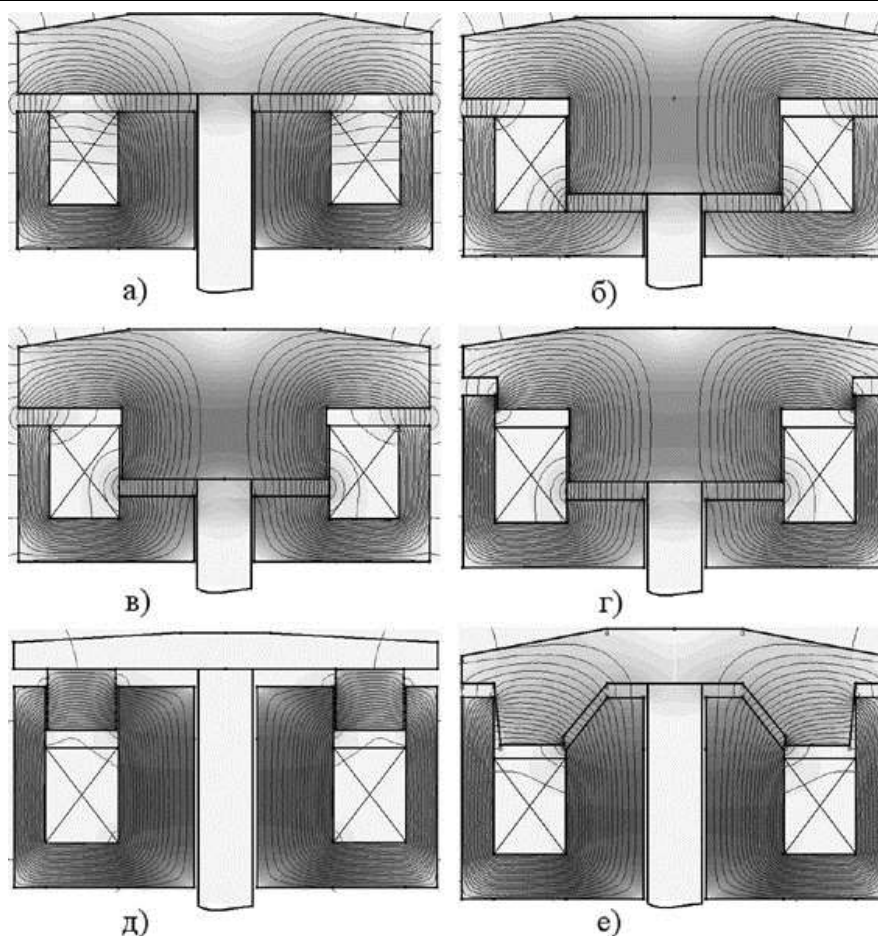


Рис.2. Принципиальные схемы основных исследуемых конструкций магнитных систем ЛЭМД с распределением магнитных потоков: а – с притягивающимся плоским якорем; б – с комбинированным якорем без стопа; в – со стопом и с комбинированным якорем; г – со стопом и с комбинированным якорем, имеющим выступ; д – с поперечным магнитным полем и кольцеобразным якорем; е – с продольно-поперечным магнитным полем и конусно-усеченным полюсом и якорем

Дальнейшим развитием ЛЭМД с комбинированным якорем и стопом служит ЛЭМД, на якоре которого имеется кольцеобразный втяжной выступ (рис. 3, кривая 4). На большей части хода сила тяги такого ЛЭМД на 10–20 % выше, чем у ЛЭМД без характерного выступа (рис. 2 в). Такое увеличение тягового усилия объясняется тем, что кольцеобразный втяжной выступ играет роль магнитного шунта, благодаря которому при приближении якоря ЛЭМД к статору значительно возрастает проводимость рабочего зазора, увеличивается рабочий магнитный поток за счёт потоков рассеяния и выпучивания, текущих с цилиндрической части якоря на статор.

Наряду с электромагнитами, имеющими втягивающийся внутрь катушки якорь, внешний притягивающийся или комбинированный якорь, применение находят также электромагниты с внешним якорем, движущимся поперечно по отношению к направлению рабочего магнитного потока (рис. 2 д). Подобные электромагниты обладают худшими показателями добротности конструкции (отношениями веса электромагнита к его условной полезной работе), чем электромагниты, рассмотренные выше, но характеристика тяговой силы имеет большие значения усилия в начале рабочего хода (рис. 3, кривая 6).

Конструкции МС ЛЭМД (рис. 2 а – г) обладают высокими технико-экономическими показателями, но применительно к процессу горячего прессования имеют существенный недостаток – их тяговая характеристика имеет малые начальные тяговые силы, к концу рабочего хода резко возрастающие. Исследование магнитных цепей различных типов электромагнитных систем показало, что тяговую характеристику двигателя, имеющую схожий вид с механической характеристикой для технологического процесса прессования СВЧ-ферритов, можно получить лишь у ЛЭМД с продольно-поперечным магнитным полем.

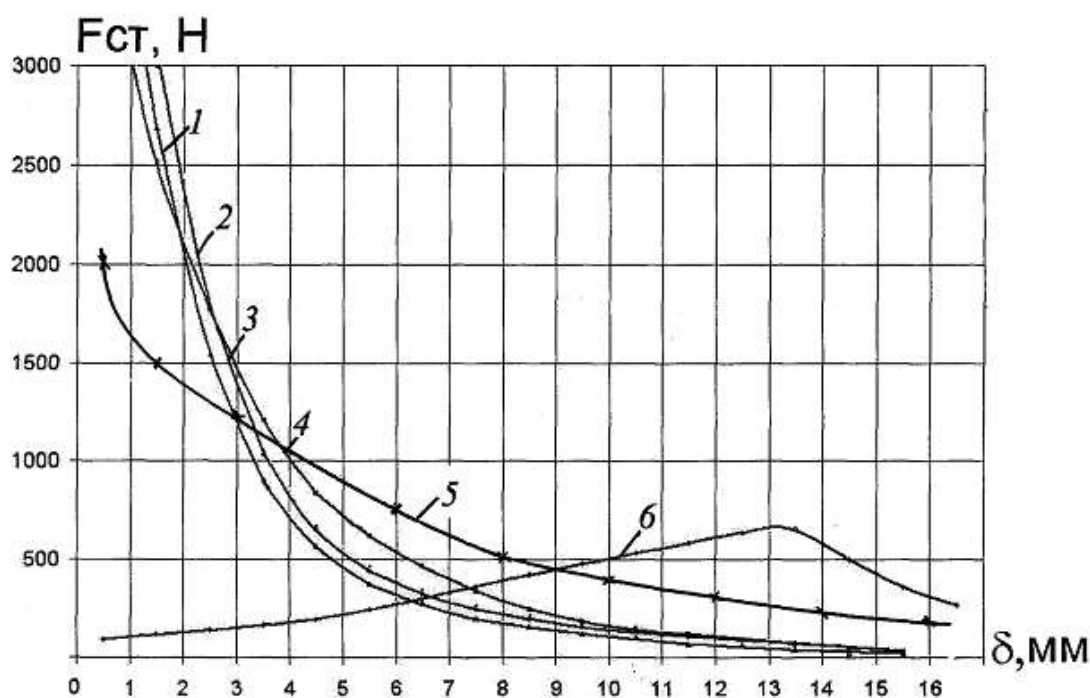


Рис. 3. Статические тяговые характеристики основных конструкций магнитных систем ЛЭМД цилиндрической структуры: 1 – с притягивающимся плоским якорем; 2 – с комбинированным якорем без стопа; 3 – с комбинированным якорем со стопом; 4 – со стопом и с комбинированным якорем, имеющим выступ; 5 – с продольно-поперечным магнитным полем и конусно-усеченным полюсом и якорем; 6 – с поперечным магнитным полем и кольцеобразным якорем

Поэтому для дальнейшего исследования авторами была предложена конструкция МС броневое ЛЭМД цилиндрической структуры укороченной МС с продольно-поперечным полем и конусно-усеченным полюсом и якорем (рис. 2 е), обладающая повышенной начальной тяговой силой (рис. 3, кривая 5). Данный тип МС ЛЭМД позволяет получить тяговую характеристику двигателя, удовлетворяющую требованиям технологического процесса прессования СВЧ-ферритов (рис.1). В результате моделирования был синтезирован новый тип МС ЛЭМД укороченной МС продольно-поперечного поля с конусно-усеченным полюсом и якорем и выполнена его физическая модель (рис. 4 а).

По результатам анализа полученных статических тяговых характеристик была изготовлена физическая модель ЛЭМД с продольно-поперечным магнитным полем и конусно-усеченным полюсом и якорем ($\alpha = 30^\circ$). Расчетная статическая тяговая характеристика удовлетворительно совпадает с экспериментальной (рис.4 б). Расхождение в параметрах между теоретическими и экспериментальными данными обусловлено как существующими погрешностями измерений, так и разбросом параметров магнитных характеристик стали магнитной системы ЛЭМД. В данной конструкции ЛЭМД объединены несколько видов магнитных по-

токов (продольного, поперечного, рассеяния и выпучивания), действующих одновременно в пределах определенной части рабочего хода. Статические тяговые характеристики ЛЭМД продольно-поперечного поля с конусно-усеченным полюсом и якорем при различных углах образующей представлены на рис. 4 б.

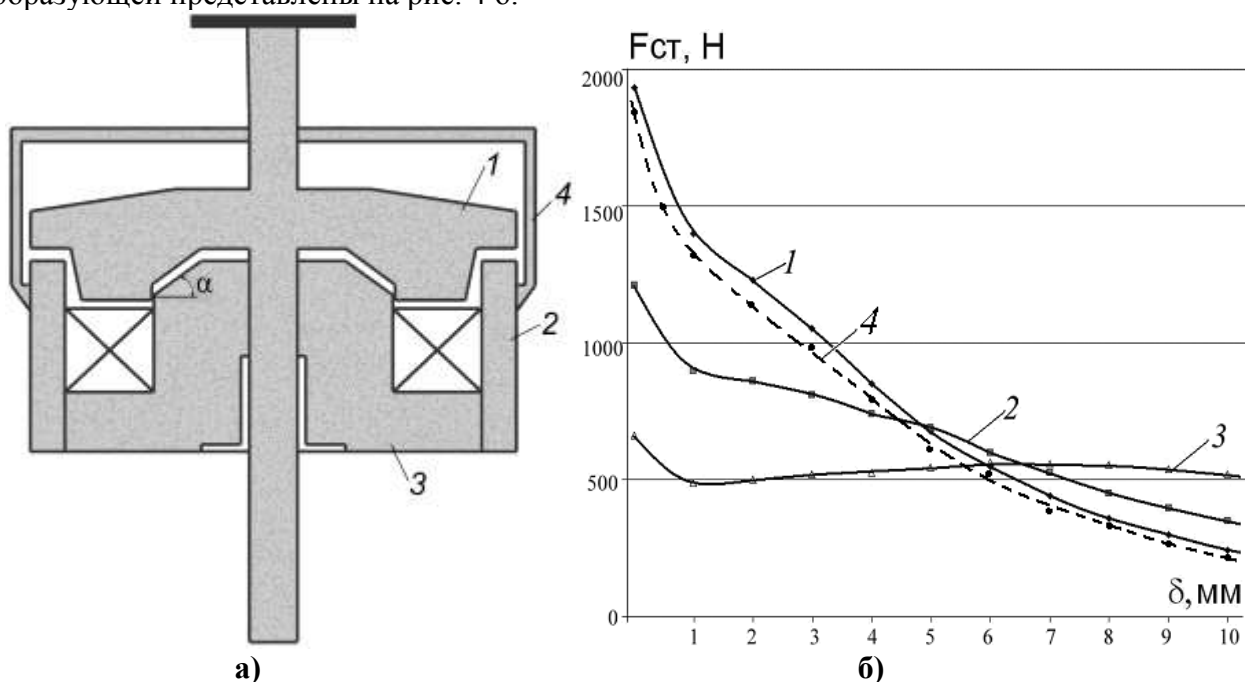


Рис. 4. Схема ЛЭМД продольно-поперечного поля с конусно-усеченным полюсом и якорем (а) и его статические тяговые характеристики при токе в обмотке 20 А (б): а) 1, 3 – якорь и статор, 2 – обмотка возбуждения, 4 – корпус, α – угол образующей; б) результаты моделирования: 1 – $\alpha = 30^\circ$, 2 – $\alpha = 60^\circ$, 3 – $\alpha = 80^\circ$; результаты эксперимента: 4 – $\alpha = 30^\circ$

При увеличении угла образующей α характеристика тягового усилия приближается к характеристике МС ЛЭМД с поперечным полем, а при уменьшении – с продольным полем. Зависимость 3 имеет относительно постоянную силу тяги на всем рабочем диапазоне ходов. Расчетная статическая тяговая характеристика удовлетворительно совпадает с экспериментальной (рис. 4 б).

Разработанная конструкция МС ЛЭМД продольно-поперечного поля обеспечивает требуемую тяговую характеристику для технологического процесса горячего прессования СВЧ-ферритовых деталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бабич Э.А. Технология производства ферритов и радиокерамики /Э.А.Бабич, Б.М.Улановский – М.: Высш. шк., 1984. – 223 с.
2. Ряшенцев Н.П. Электромагнитные прессы /Н.П. Ряшенцев, Г.Г. Угаров, А.В. Львицын – Новосибирск: Наука, 1989. – 216 с.
3. Meeker D. C. Optimal realization of arbitrary forces in a magnetic stereotaxis system in program Femm. /D.C.Meeker //IEEE Transactions on Magnetics. Vol. 32. No. 2. pp. 320–328, March 1996.

Угаров Геннадий Григорьевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета

Егоров Андрей Александрович –

ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета

Вырыханов Денис Александрович –

аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета

УДК 621.375.026

М.А.Фурсаев

ПРОБЛЕМЫ СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТРАНЗИСТОРНЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЧ ЭНЕРГИИ

Обсуждены проблемы схемотехнического проектирования транзисторных генераторов СВЧ диапазона, являющиеся основными при проектировании источников СВЧ энергии на этих полупроводниковых приборах. Рассмотрены схемы построения таких генераторов как с внешней, так и с внутренней обратной связью.

М.А.Fursaev

SCHEMATIC-TECHNICAL PROJECTING PROBLEMS OF TRANSISTORS SOURCES OF MW ENERGY

This research investigates schematic-technical projecting problems of transistors generators with MW range, which more possible to project MW saucses on the base of semi-conductive devices. It discusses problems connected with the construction of such generators both with internal and external feedback.

Источники СВЧ энергии с уровнем средней мощности до нескольких сотен ватт, используемые в устройствах воздействия этой энергии на диэлектрические материалы, можно создавать на базе не только электронных приборов, но и на полупроводниковых, которыми являются биполярные и полевые транзисторы. Основным преимуществом таких источников является низкое напряжение, при котором проще обеспечиваются требования техники безопасности, а их питание может осуществляться от аккумуляторных батарей. В работе [1] сообщается об источнике СВЧ энергии на транзисторах с выходной мощностью 100 Вт мало-мощной СВЧ печи для мобильных транспортных средств.

Схемы построения источников СВЧ энергии на транзисторах определяются уровнем требуемой выходной мощности и зависят от электрических параметров используемых полупроводниковых приборов, т.е. уровнем имеющейся в настоящее время номенклатуры выпускаемых промышленностью транзисторов. Так, например, рекламируется транзистор для использования в диапазоне 1025 – 1150 МГц, работающий в режиме класса С выходной мощностью до 125 Вт и коэффициентом усиления до 10,6 Дб.

Если требуется уровень мощности, который может быть обеспечен одним транзистором, то источник СВЧ энергии строится на одном транзисторном генераторе. Если же требу-

емый уровень выходной мощности не может быть обеспечен одним генератором, то источник СВЧ энергии должен представлять собой многокаскадную структуру. Его первым каскадом является транзисторный генератор, а последующие каскады – усилители на транзисторах. Их число, а также схема соединения по СВЧ цепи определяются не только требуемой выходной мощностью, но и величиной коэффициента усиления отдельных каскадов. В этом случае КПД источника СВЧ энергии будет определяться в основном КПД транзисторов выходного усилительного каскада, что снижает требования к КПД генераторного каскада. При многокаскадном построении источника питание всех транзисторов, входящих в его состав, осуществляется от одного источника. Сам же источник СВЧ энергии конструктивно выполняется в виде отдельного модуля, имеющего выходной коаксиальный разъем и клеммы для подключения источника питания транзисторов. В виде такого модуля выполнен источник, описанный в работе [1].

В соответствии с назначением транзисторный источник СВЧ энергии должен работать на фиксированной частоте, а к ее стабильности не предъявляется особых требований. Однако из этого не следует отсутствие проблем при схемотехническом проектировании, предшествующем непосредственному созданию опытных образцов таких устройств. Накоплен большой опыт по созданию усилителей на транзисторе, в том числе и усилительных модулей. Основные проблемы при создании источников СВЧ энергии на транзисторах связаны с разработкой транзисторных генераторов. Обсуждению данных проблем посвящена настоящая работа.

Методика схемотехнического проектирования транзисторных генераторов существенно отличается от методики проектирования транзисторных усилителей. Дело в том, что проектирование усилителей проводится, как правило, с использованием программного обеспечения моделирования электрического режима транзистора, разработанного на базе математических моделей. Это обеспечение ориентировано на решение задачи анализа прибора в составе усилительного каскада, когда считаются известными величина входной мощности, а также значения параметров элементов цепи постоянного тока и электродинамической системы.

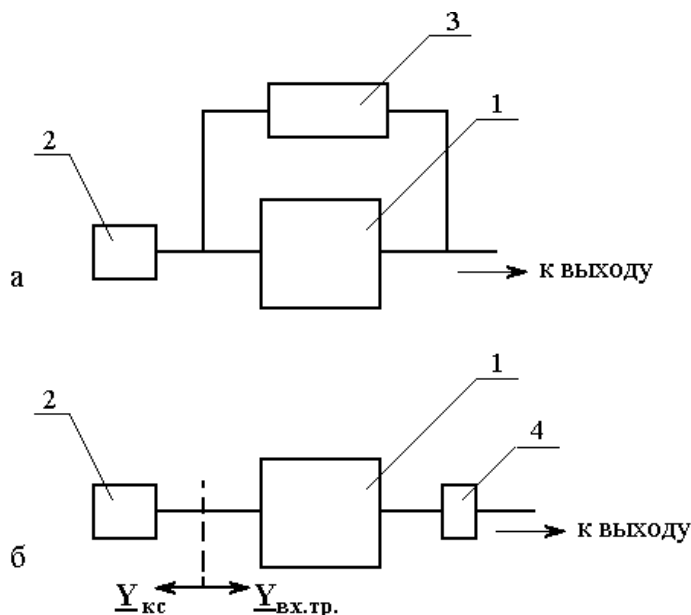


Рис.1. Схемы построения СВЧ транзисторных генераторов с внешней (а) и внутренней (б) обратной связью (1 – транзистор, 2 – колебательная система, 3 – цепь внешней обратной связи, 4 – отражатель)

Подобная методика схемотехнического проектирования транзисторных генераторов не пригодна, поскольку очень мала вероятность при фиксированном наборе значений пара-

метров элементов цепи постоянного тока и электродинамической системы, а также напряжения на входе транзистора, получить режим, при котором обеспечивается его работа в составе генератора. Это обусловлено тем, что величина напряжения на входе транзистора в составе генератора является функцией значений параметров электрического режима прибора и электродинамической системы генератора. Проектирование генератора на базе моделирования электрического режима транзистора возможно лишь при решении задачи синтеза, при котором определяются не только параметры этого режима, но и исходные данные для проектирования элементов электродинамической системы.

СВЧ транзисторные генераторы могут выполняться как с внешней, так и с внутренней обратной связью. В генераторе первого типа часть мощности с выхода транзистора к его входу передается по специально введенной цепи, вне прибора, как показано на эквивалентной схеме рис.1 а. В генераторах второго типа такой специальной цепи нет, передача соответствующей части мощности осуществляется через транзистор. С этой целью на его выходе обеспечивается отражение части выходной мощности, что иллюстрируется схемой рис.1 б. Во входной части СВЧ цепи генератора как с внешней, так и с внутренней обратной связью, как правило, включается колебательная система. Именно она определяет частоту генерируемой мощности. Как видно, кроме транзистора, являющегося активным элементом, в состав генератора входят ряд пассивных элементов, к числу которых относится колебательная система. Эти элементы выполняются на отрезках микрополосковой линии (МПЛ) и определяют топологию генератора.

Разработка генератора ведется с учетом того, что в нем используется определенный тип транзистора, выбранный заранее. Весьма важным представляется вопрос выбора типа транзистора для использования в составе генератора в зависимости от вида обратной связи. Дело в том, что при внутренней обратной связи из-за отражения на выходе транзистора в цепи генератора имеют место встречные потоки мощности, в результате чего внутри транзистора создаются перенапряжения. Это не позволяет достигать номинального уровня мощности, на которой разработан прибор. Как правило, транзисторы разрабатываются для применения в составе усилительных каскадов, т.е. для работы в условиях передачи мощности в одном направлении. В генераторе с внешней обратной связью встречных потоков мощности нет, и условия работы транзистора в такой схеме во многом аналогичны тем, которые характерны для его работы в схеме усилительного каскада. Поэтому в таких генераторах можно использовать приборы в их номинальном режиме. Следовательно, для получения высокого уровня выходной мощности большую перспективу имеют генераторы с внешней обратной связью. Однако при этом необходимо иметь в виду, что топология транзисторного генератора с внутренней обратной связью существенно проще топологии генератора с внешней обратной связью.

На основании изложенного можно считать, что при создании источника СВЧ мощности с одним генераторным каскадом схема с внешней обратной связью имеет определенные преимущества. Если в составе источника необходимо использовать усилительные каскады, генератор целесообразно строить с использованием внутренней обратной связи.

В общем случае схемотехническое проектирование СВЧ транзисторного генератора предполагает совместное решение следующих уравнений:

- уравнения математической модели транзистора, используемого в генераторе;
- уравнений, описывающих пассивную часть генератора электродинамической системы;
- условия стационарного режима генератора в виде, зависящем от типа обратной связи.

Решение такой системы уравнений представляет собой весьма трудную задачу даже в том случае, если имеется программное обеспечение расчета электрических параметров транзистора и отдельных элементов электродинамической системы.

Амплитудное и фазное условия стационарного режима генератора с внешней обратной связью записываются в виде, которое используется при проектировании низкочастотных генераторов на базе усилителя [2]:

$$K_U \chi_U = 1, \quad (1)$$

$$\varphi_{mp} + \varphi_{oc} = 2\pi k, \quad (2)$$

где K_U – коэффициент усиления по напряжению транзистора, φ_{mp} – его электрическая длина, χ_U – коэффициент передачи напряжения по цепи обратной связи, φ_{oc} – электрическая длина этой цепи, k – целое число. Величины параметров K_U и φ_{mp} определяются с использованием математической модели транзистора, а величины параметров χ_U и φ_{oc} – с помощью уравнений, связывающих электрические параметры отдельных элементов цепи обратной связи с их геометрическими параметрами.

При схемотехническом проектировании генератора с внешней обратной связью можно независимо решать задачи определения электрического режима работы транзистора в составе генератора и определения топологии пассивной части его электродинамической системы. Но при этом определяемая топология должна обеспечивать условия, при которых решалась задача определения электрического режима транзистора, в том числе значений импедансов цепей, являющихся нагрузкой со сторон его входа и выхода. Кроме того, следует иметь в виду, что не любой режим работы транзистора в составе усилительного каскада может быть реализован в схеме генератора с внешней обратной связью. Например, для обеспечения устойчивости генератора необходимо выполнение условия

$$\frac{dK_U}{dU_{ex}} < 0, \quad (3)$$

где U_{ex} – напряжение входного сигнала. Данное условие выполняется при работе транзистора в нелинейном режиме, при котором происходит насыщение его амплитудной характеристики.

В результате определения электрического режима работы транзистора в составе генератора, которое можно проводить с использованием программного обеспечения для анализа работы транзистора в составе усилительного каскада, рассчитываются величины коэффициента усиления по напряжению, электрической длины прибора, входного и выходного его сопротивлений.

Вычисленные значения параметров транзистора K_U и φ_{mp} , входящие в соотношения (1) и (2) условия стационарного режима работы генератора, позволяют определить значения коэффициента передачи напряжения по цепи обратной связи и электрической длины этой цепи, которые являются исходными данными при проектировании топологии пассивной части электродинамической системы генератора. Исходными данными также являются величины сопротивлений на входе и выходе транзистора, при которых определялись значения параметров его электрического режима. Эти сопротивления, по существу, представляют собой сопротивления цепи обратной связи, измеренные с обоих концов, когда к противоположным концам присоединены нагрузки, величины сопротивлений которых равны определенным значениям входного и выходного сопротивлений прибора.

Таким образом, схемотехническое проектирование СВЧ транзисторного генератора сводится к решению задачи синтеза цепи обратной связи [3]. Аналогичный подход предлагается использовать в работе [4] при синтезе транзисторных генераторов, схема которых составлена из элементов со сосредоточенными параметрами. Задача синтеза цепи обратной связи генератора, состоящая из достаточно большого числа пассивных элементов электродинамической системы, представляется весьма сложной. Алгоритмы ее решения, зависящие от состава цепи обратной связи, а также используемой математической модели транзистора, еще предстоит разработать.

Эффективность работы генератора с цепью внешней обратной связи достигается лишь при наличии в этой цепи развязки. При ее отсутствии, как показано в [5], транзистор может работать с коэффициентом усиления не более 3 дБ. В качестве развязки может быть использован либо направленный ответвитель, либо ферритовая развязка. Очевидно, что при идеальной развязке устраняется влияние ВЧ входа транзистора на величину сопротивления, на которую нагружен его ВЧ выход, а необходимое значение этого сопротивления достигается выбором параметров элементов выходной цепи генератора. При неидеальной развязке влияние ВЧ входа транзистора будет проявляться. В связи с этим представляется необходимым определить допустимый уровень развязки в цепи обратной связи, обеспечивающий задаваемую величину коэффициента усиления, с которым транзистор будет работать в составе генератора.

Направленный ответвитель может быть выполнен на отрезках МПЛ на той же диэлектрической подложке, что и остальные пассивные элементы электродинамической системы. Его введение в схему генератора не изменяет принцип конструктивного выполнения генераторного модуля, а только несколько усложняет топологию генератора.

Введение ферритовой развязки в схему генератора может быть осуществлено двумя способами. Наиболее простым представляется выполнение развязки в виде отдельного узла, связанного с генераторным модулем с помощью внешних разъемов. При втором способе возможны два варианта. В первом варианте в качестве развязки используется отрезок МПЛ цепи обратной связи, выполненный на гиротропной подложке, которая, как и основная диэлектрическая подложка, монтируется в едином модуле, который на участке гиротропной подложки должен включать постоянные магниты. Во втором варианте все пассивные элементы электродинамической системы выполняются на гиротропной подложке, а постоянные магниты устанавливаются в том месте линии обратной связи, где должна находиться развязка. Кроме того, при таком решении с помощью дополнительных магнитов может быть осуществлено построение отдельных элементов электродинамической системы для получения требуемых параметров генератора.

Введение направленного ответвителя на МПЛ в цепь обратной связи не должно внести принципиальных осложнений в процесс решения задачи синтеза электродинамической системы генератора, поскольку имеется необходимое программное обеспечение расчета этого элемента. При применении ферритовой развязки, выполненной на гиротропной подложке и являющейся частью топологии генератора, решение задачи синтеза электродинамической системы усложняется существенно. Дело в том, что отсутствуют программы расчета параметров МПЛ на гиротропной подложке, учитывающего их зависимость от величины магнитного поля, и эквивалентных параметров стыка отрезков МПЛ, выполненных на подложках с различными свойствами. Использование ферритовой развязки в виде отдельного узла не вносит особых корректировок в методику синтеза электродинамической системы генератора. Однако к самому конструктивному элементу ужесточаются требования по стабильности величины его электрической длины.

Методика схемотехнического проектирования транзисторного генератора с внутренней обратной связью отличается от соответствующей методики для генератора с внешней обратной связью. Это отличие связано с тем, что определение коэффициента передачи напряжения через транзистор в обратном направлении весьма затруднено. Проектирование такого генератора целесообразно проводить на базе метода эквивалентных двухполюсников [6]. Согласно этому методу генератор представляется в виде параллельного соединения активного и пассивного двухполюсников. При таком представлении условие стационарного режима генератора записывается как

$$Y_{акт} + Y_{пасс} = 0, \quad (4)$$

где $Y_{акт} = G_{акт} + jB_{акт}$ и $Y_{пасс} = G_{пасс} + jB_{пасс}$ – проводимости активного и пассивного двухполюсников соответственно.

Физически более обоснованным является представление, при котором за сечение между активным и пассивным двухполюсниками при схематехническом проектировании транзисторного генератора с внутренней обратной связью принимается место соединения колебательной системы и транзистора (см. рис.1 б). В этом случае проводимостью пассивного двухполюсника является проводимость колебательной системы, а проводимость активного двухполюсника – входная проводимость транзистора, величина которого зависит от проводимости цепи на выходе прибора.

С учетом изложенного выше условия амплитудное и фазное условия стационарного режима генератора с внутренней обратной связью записываются как

$$G_{вх\ mp} + G_{кк} = 0, \quad (5)$$

$$B_{вх\ mp} + B_{кк} = 0, \quad (6)$$

где $Y_{вх\ mp} = G_{вх\ mp} + jB_{вх\ mp}$ – входная проводимость транзистора, $Y_{кк} = G_{кк} + jB_{кк}$ – проводимость колебательной системы. Согласно соотношению (5) активная компонента входной проводимости транзистора в составе генератора с внутренней обратной связью в отличие от соответствующей проводимости прибора в составе усилительного каскада или генератора с внешней обратной связью должна быть отрицательной величиной, что свидетельствует о наличии на его входе сигнала, распространяющегося в направлении к колебательной системе.

Активная и реактивная компоненты входной проводимости транзистора определяются с использованием его математической модели, а активная и реактивная проводимости колебательной системы – с использованием уравнений, связывающих величины этих параметров с геометрическими параметрами колебательной системы. При определении входной проводимости транзистора должна быть известна величина проводимости цепи, на которую нагружен выход прибора. Последняя величина также определяется геометрией топологии соответствующей цепи.

Процесс схематехнического проектирования транзисторного генератора с внутренней обратной связью более сложен, чем генератора с внешней обратной связью. Это обусловлено тем, что существующее программное обеспечение ориентировано на решение задачи анализа работы транзистора в усилительном режиме, когда исходными данными являются уровень входного сигнала и величины сопротивлений цепей на входе и выходе прибора. Очевидно, при внутренней обратной связи уровень сигнала на входе транзистора определяется не только параметрами цепи на выходе прибора, но и параметрами его электрического режима. Поэтому должна решаться задача поиска путей использования существующего программного обеспечения моделирования электрического режима транзистора для целей проектирования генератора с внутренней обратной связью. Попытки решения данной задачи предприняты в работах [7, 8], в которых основное внимание уделено поиску условий, обеспечивающих работу транзистора в таком генераторе, и не рассматриваются вопросы его устойчивости и получения требуемых значений электрических параметров.

Алгоритм схематехнического проектирования генератора с внутренней обратной связью может быть построен следующим образом. В соответствии с амплитудным условием стационарного режима работы генератора (4) с помощью соответствующего программного обеспечения определяется режим транзистора, при котором получается не только отрицательная величина активной компоненты входной проводимости транзистора, но и необходимый уровень его выходной мощности. При этом варьируемыми параметрами являются активная и реактивная проводимости цепи на выходе прибора. Следовательно, вместе с определением электрического режима транзистора в составе генератора выявляются исходные данные для последующего проектирования топологии выходного трансформатора связи. Одновременно определяется реактивная компонента входной проводимости транзистора, которая вместе с активной компонентой этой проводимости входит в состав исходных данных для проектирования топологии колебательной системы.

Важным является вопрос обеспечения устойчивости генератора при выбранном режиме работы транзистора. Для генератора с внутренней обратной связью условие устойчивости его работы по аналогии с [6] может быть представлено как

$$\frac{d |G_{ex}|}{d |U_{ex}|} < 0, \quad (7)$$

где U_{ex} – напряжение, действующее на входе транзистора.

Из этого неравенства, в частности, следует, что транзистор в составе генератора с внутренней обратной связью, как и в случае генератора с внешней обратной связью, должен работать в нелинейном режиме, поскольку в линейном режиме его входная проводимость не зависит от уровня ВЧ сигнала на входе.

В случае биполярного транзистора нелинейный режим имеет место не только при работе в режиме класса А при открытом коллекторном переходе, но и в режимах классов В и С, когда этот переход закрыт. Следовательно, такие режимы могут использоваться при построении генераторов на биполярных транзисторах. Аналогичные режимы полевых транзисторов также пригодны при их использовании при построении таких генераторов.

При построении транзисторных генераторов следует иметь в виду, что если транзистор в его составе работает в режиме класса А, обеспечение условия стационарного режима (3) и (7) при «мягком самовозбуждении», когда ввод в генераторный режим обеспечивается за счет флуктуационных явлений, достигается без применения специальных схемных решений только при работе транзистора в режиме класса А. При использовании транзистора, работающего в режимах классов В и С, «мягкий» ввод генератора в рабочий режим возможен лишь при применении таких решений, каким, например, является введение резистора автосмещения во входную цепь постоянного тока. Поэтому проектирование генераторов, в которых транзисторы будут работать в режимах таких классов, должны содержать этапы по отработке схемных решений, позволяющих осуществить ввод генератора в стационарный режим. Оперативное решение этих вопросов может быть получено лишь при наличии необходимого программного обеспечения.

Окончательным этапом схемотехнического проектирования СВЧ транзисторного генератора как с внешней, так и с внутренней обратной связью должна быть проверка влияния дестабилизирующих факторов условий эксплуатации на его работу при режиме работы транзистора, определенного в результате решения задачи синтеза. В частности, она необходима для определения параметров ферритовой развязки, которая должна быть установлена на выходе генератора, если источник СВЧ энергии не содержит усилительных каскадов. Проверка предполагает решение задачи анализа, для реализации которой требуется создание специального программного обеспечения, зависящего от используемого в генераторе вида обратной связи.

Таким образом, обсуждение основных проблем схемотехнического проектирования СВЧ транзисторных генераторов, от решения которых во многом зависит успех разработки источников СВЧ энергии на этих приборах, показало необходимость создания комплекта программ, обеспечивающих решение вопроса на каждом этапе проектирования. В частности, для первого этапа необходимо программное обеспечение решения задач синтеза для определения параметров электрического режима транзистора в составе генератора с внутренней обратной связью и ВЧ цепей такого генератора, а также топологии пассивных элементов электродинамической системы генератора с внешней обратной связью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анашкин А.А. Малогабаритная транзисторная СВЧ печь /А.А.Анашкин, М.Я.Демьянович // Радиотехника и связь: Материалы Международной науч.-техн. конференции, апрель 2004 г. Саратов. СГТУ. 2004. С. 180 – 186.
2. Забродин Ю.С. Промышленная электроника / Ю.С.Забродин. М.: Высш. шк. 1982. 496 с.

3. Мазеева Е.М. Моделирование СВЧ генераторов / Е.М.Мазеева, М.А.Фурсаев //Электронная промышленность. 1999. № 4. С. 19–20.
4. Аблин А.Н. Транзисторные и варакторные устройства /А.Н.Аблин, Л.Я.Могилевская, Ю.Л.Хотунцев. М.: Радио и связь, 1995. 158 с.
5. Мазеева Е.М. Распределение мощности в выходной цепи СВЧ генератора на активном четырехполюснике / Е.М.Мазеева, М.А.Фурсаев / Изв. вузов России. Радиоэлектроника. № 1. 2001. С. 19–124.
6. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ /Лебедев И.В. М.: Высш. шк., 1972. Т.2. С. 616.
7. Grebennikov A.V. Microwave Transistor Oscillators: An. Analytic Approach to Simplify Computer-aided Design Microwave Journal. Vol.42. № 5. 1999. Pp. 292–300.
8. Grebennikov A.V. Microwave FET Oscillators: An. Analytic Approach to Simplify Computer-aided Design / Grebennikov A.V. //Microwave Journal. Vol.43. № 4. 2000. Pp. 100–110.

Фурсаев Михаил Александрович –

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

УДК 621.375.026

М.А.Фурсаев, Д.М.Горбачев

**АЛГОРИТМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СВЧ ТРАНЗИСТОРНОГО ГЕНЕРАТОРА
С ВНУТРЕННЕЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ**

Предложен алгоритм схемотехнического проектирования СВЧ генератора с внутренней обратной связью на биполярном транзисторе, работающем в недонапряженном режиме с отсечкой тока. Он предусматривает определение условий, обеспечивающих работу транзистора в составе такого генератора, а также решение вопросов устойчивости работы самого генератора.

M.A.Fursaev, D.M.Gorbachev

**ALGORITHM OF THE MICROWAVE TRANSISTOR GENERATOR'S
WITH AN INTERNAL FEEDBACK DESIGNING**

The algorithm of the microwave generator with an internal feedback on the bipolar transistor working in the understressed mode with current's closing schematic design is offered. In provides for definition of the conditions supporting transistor's work in structure of such generator, and also the decision of generator's steady work questions.

При проектировании СВЧ генератора с внутренней обратной связью часто определяется значение проводимости цепи на выходе прибора, при котором обеспечивается отрицательная величина активной компоненты его входной проводимости, что является предпосылкой обеспечения стационарного режима работы генератора. Определенные значения проводимости цепи, на которую должен быть нагружен транзистор, и его входной проводимости

мости являются исходными данными для проектирования топологии пассивных элементов электродинамической системы генератора. Необходимые процедуры по поиску значений этих проводимостей в случае проектирования генератора на биполярном транзисторе, работающем в режиме класса А при открытом коллекторном переходе, могут выполняться на базе линейной модели транзистора. Однако такой подход не дает представления относительно значений электрических параметров генератора, поскольку их определение возможно лишь при использовании нелинейной модели.

В генераторах с повышенным уровнем выходной мощности биполярный транзистор должен работать в режимах класса В или С. В этом случае, а также при работе транзистора в режиме АВ с закрытым коллекторным переходом линейная модель не может быть использована при поиске условий обеспечения стационарного режима работы генератора и его устойчивости, а процедура такого поиска на базе нелинейной модели весьма сложна.

Ниже предложен алгоритм схемотехнического проектирования СВЧ генератора с внутренней обратной связью на биполярном транзисторе, работающем в режимах с отсечкой тока и закрытым коллекторным переходом. Рассмотрение проводится с использованием кусочно-квазилинейной модели транзистора [1], на примере транзистора типа КТ-919А, включенного по схеме ОБ. Частота генератора 1 МГц. При этом полагается, что проектируемый генератор должен обеспечивать заданный уровень выходной мощности.

При проектировании считается, что генератор строится на выбранном типе транзистора, для которого известны значения эквивалентных параметров используемой модели. Модели транзистора обычно ориентированы на решение задачи анализа его работы в составе усилительного каскада. Поэтому параметрами, определяющими режим работы транзистора, являются величины входной мощности, активных и реактивных компонент проводимости цепей, подключенных к входу и выходу прибора, а также параметров, характеризующих элементы цепей постоянного тока. Проектирование генератора с внутренней обратной связью, эквивалентная схема которого приведена на рис.1 и в котором величина ВЧ мощности на входе транзистора является функцией его электрического режима, предполагает решение задачи синтеза, а значения компонент проводимости цепи на входе транзистора, т.е. колебательной системы в соответствии с условием стационарного режима работы генератора определяются значениями соответствующих компонент входной проводимости транзистора.

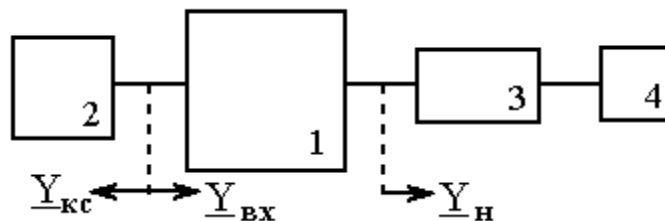


Рис.1. Схема СВЧ транзисторного генератора с внутренней обратной связью (1 – транзистор, 2 – колебательная система, 3 – выходной трансформатор связи, 4 – внешняя нагрузка)

На первом этапе проектирования генератора проводится поиск совокупности значений параметров, обеспечивающих отрицательную величину входной проводимости транзистора. Поиск осуществляется при варьировании значениями активной и реактивной компонент проводимости цепи на выходе транзистора, напряжений источников питания входной и выходной цепей постоянного тока, а также параметра, характеризующего электрический режим прибора. Таким параметром в кусочно-квазилинейной модели является амплитуда ВЧ напряжения на открытом эмиттерном переходе. При поиске одновременно рассчитываются величины реактивной компоненты входной проводимости транзистора, а также выходной мощности и постоянного эмиттерного тока.

Результаты поиска целесообразно представлять в виде зависимости активной составляющей входной проводимости транзистора $G_{ВХ}$ от реактивной компоненты проводимости цепи на его выходе B_H . Такая зависимость приведена на рис.2. При ее расчете полагалось, что транзистор работает в режиме класса АВ (напряжение источника в эмиттерной цепи постоянного тока $U_{ЭБ} = 0,525$ В), и постоянство величины барьерной емкости коллекторного перехода ($C_K = 0,2 \cdot 10^{-10}$ Ф), а активная компонента проводимости цепи на выходе транзистора $G_H = 0,02$ См. Из рис. 2 видно, что в интервале значений $B_H -0,3 \div -0,57$ См возможно обеспечение работы генератора с внутренней обратной связью. Именно внутри этого интервала выбирается «рабочее» значение реактивной компоненты проводимости цепи на выходе транзистора, которая, в свою очередь, определяет выходную мощность генератора и постоянный эмиттерный ток транзистора. Критерием выбора «рабочего» значения B_H является обеспечение требуемого уровня выходной мощности, а величину активной компоненты входной проводимости транзистора целесообразно выбрать в интервале $0,3 \div 0,7$ от максимально-отрицательного значения этой величины, полученной в расчете ($-0,025$ См на рис. 2). Последнее должно гарантировать устойчивость работы генератора при действии дестабилизирующих факторов условий эксплуатации.

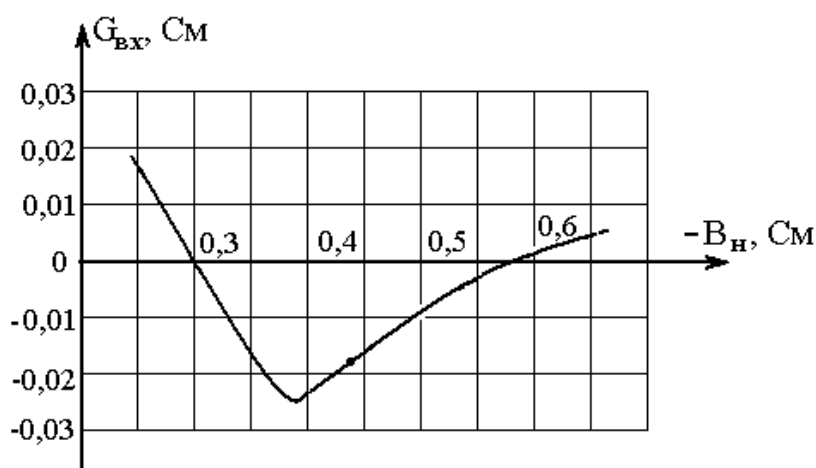


Рис.2. Расчетная зависимость активной компоненты входной проводимости транзистора от реактивной проводимости цепи на его выходе

В качестве примера выбрано «рабочее» значение реактивной компоненты проводимости цепи на выходе транзистора $-0,44$ См, обеспечивающее выходную мощность генератора не менее 1,5 Вт при постоянной составляющей эмиттерного тока 0,71 А. При этом входная проводимость транзистора $Y_{ВХ} = -0,0185 - j 0,147$ См. Из последнего следует, что проводимость колебательной системы должна быть равной $Y_{КС} = 0,0185 + j 0,147$ См.

Для обеспечения «мягкого» ввода в режим генератора¹, в котором транзистор работает с закрытым коллекторным переходом, и условия устойчивости работы входная цепь постоянного тока, кроме источника напряжения, должна включать резистор смещения [2]. Поэтому вторым этапом схемотехнического проектирования СВЧ транзисторного генератора является выбор величин напряжения источника смещения, $U_{СМ}$, и сопротивления резистора смещения, $R_{СМ}$. Эти величины выбираются с учетом обеспечения неизменности ранее выбранного режима работы транзистора на основе соотношения

$$U_{ЭБ} = U_{СМ} - R_{СМ} I_{ЭО}, \quad (1)$$

где $I_{ЭО}$ – величина постоянного эмиттерного тока, определенная на первом этапе проектирования.

¹ В случае работы транзистора в режиме класса С.

Выбором значений U_{CM} и R_{CM} должен обеспечиваться такой ход кривой зависимости величины активной компоненты входной проводимости транзистора от амплитуды напряжения на открытом эмиттерном переходе, чтобы для выбранного «рабочего» значения этой амплитуды, $U_{Пм РАБ}$ выполнялось условие устойчивости работы генератора [3]

$$\frac{d |G_{вх}|}{d U_{Пм}} < 0. \quad (3)$$

На рис. 3 представлены результаты расчета зависимости активной компоненты входной проводимости транзистора от амплитуды напряжения на его открытом эмиттерном переходе для ряда сочетаний значений U_{CM} и R_{CM} (при сохранении неизменными значений других параметров, полученных при расчете на первом этапе). Как видно из этого рисунка, в отсутствие резистора смещения условие устойчивости работы генератора не выполняется.

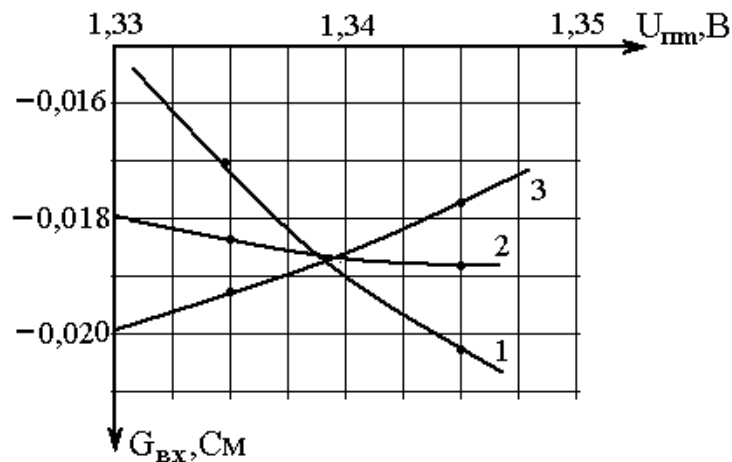


Рис.3. Расчетная зависимость активной компоненты входной проводимости транзистора от амплитуды напряжения на открытом эмиттерном переходе для ряда сочетаний значений U_{CM} и R_{CM} (1 – $U_{CM} = 0,525$ В, $R_{CM} = 0$; 2 – $U_{CM} = 1,093$ В, $R_{CM} = 0,8$ Ом; 3 – $U_{CM} = 1,590$ В, $R_{CM} = 1,5$ Ом)

Следовательно, после выбора на базе анализа данных рис.3 величин напряжения источника смещения и сопротивления резистора смещения можно считать решенными задачи выбора рабочего режима транзистора в составе генератора с внутренней обратной связью и обеспечения условия устойчивости работы генератора. Очевидно, оговоренные выше вычислительные процедуры и поиск варианта должны выполняться в диалоге с ЭВМ. При этом программное обеспечение должно осуществлять:

- на первом этапе проектирования – расчет основных электрических параметров транзистора при варьировании значениями реактивной компоненты проводимости цепи на выходе прибора и фиксированных значениях активной компоненты этой проводимости, напряжения источников во входной и выходной цепях постоянного тока (резистор смещения отсутствует), а также значения параметра, определяющего электрический режим прибора (например, амплитуды напряжения на открытом эмиттерном переходе транзистора при использовании кусочно-квазилинейной модели [1]);

- на втором этапе проектирования – расчет зависимости величины активной компоненты входной проводимости транзистора от значения параметра, определяющего электрический режим прибора, и при фиксированных значениях активной и реактивной компонент проводимости цепи на выходе транзистора, напряжения источника в коллекторной цепи постоянного тока, а также напряжения источника смещения и сопротивления резистора смещения во входной цепи постоянного тока, удовлетворяющих условию (1).

Заключительным этапом схемотехнического проектирования СВЧ транзисторного генератора должна быть проверка устойчивости его работы с выбранными значениями пара-

метров электрического режима транзистора, эквивалентных параметров пассивных элементов электродинамической системы генератора и параметров элементов цепей постоянного тока при действии дестабилизирующих факторов условий эксплуатации. Выполнение расчетов на этом этапе предполагает знание топологии пассивных элементов электродинамической системы генератора, которая должна быть заранее определена на основе полученных данных относительно величин их эквивалентных параметров, полученных на первом этапе проектирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фурсаев М.А. Расчет электрических характеристик СВЧ усилителя мощности на биполярном транзисторе / М.А.Фурсаев //Электронная техника. Сер.1. СВЧ техника. Вып.5–6. 1993, с. 40 – 45.
2. Фартушнов С.А. О роли резистора автосмещения в СВЧ транзисторном генераторе /С.А.Фартушнов, М.А.Фурсаев //Технологические СВЧ установки, функциональные электродинамические устройства: Межвуз. науч.сб. Саратов: СГТУ, 1998. С.113–117.
3. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ /И.В.Лебедев. М.: Высш. шк. 1972. Т.2. С.616.

Фурсаев Михаил Александрович –

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

Горбачев Денис Михайлович –

аспирант кафедры «Электротехника и электроника» Саратовского государственного технического университета

УДК 621.385.6, 621.389 (088.8)

В.А.Царев, Р.Ю. Кузнецов, А. Ю. Мирошниченко

СХЕМЫ СВЧ ПРИБОРОВ С БЕЗВЫПРЯМИТЕЛЬНЫМ И БЕСТРАНСФОРМАТОРНЫМ ПИТАНИЕМ ОТ СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Исследованы особенности функционирования многолучевых клистродов при бестрансформаторном и безвыпрямительном питании и дана оценка перспектив их применения в СВЧ энергетике.

V.A. Tzarev, R.Yu. Kuznetsov, A.Yu. Miroshnichenko

UHF DEVICE SCHEMES WITH RECTIFIRLESS AND TRANSFORMLESS POWER SUPPLIES WITH NETWORK OF ALTERNATING CURRENT

Multibeam klystrodes with transformerless and rectifierless power supplies were investigated. Availability of application these devices in microwave power engineering also were estimated.

В настоящее время все большее внимание разработчиков СВЧ приборов привлекает концепция системного проектирования, заключающаяся в совместном проектировании прибора и обслуживающих его систем (фокусирующей системы и системы питания). Такой подход дает возможность создания систем с высокой степенью компактности.

Если вопрос об уменьшении габаритов фокусирующих систем и их совместной оптимизации с прибором в той или иной степени рассматривался в научной литературе, то вопрос об оптимальном проектировании комплекса «СВЧ прибор – источник питания» практически не ставился. Стоимость, габариты и масса источников СВЧ энергии во многом определяется сложностью устройств силового электропитания, включающего высоковольтные выпрямители и фильтры.

В связи с этим представляет интерес разработка электронных приборов с безвыпрямительной схемой питания от сети переменного тока промышленной частоты с использованием односторонней проводимости промежутка катод-анод (или катод-коллектор) самого прибора. Это дает возможность упростить схему питания, исключив из неё выпрямительные вентили и фильтры.

Известны СВЧ устройства, питаемые от сети переменного тока промышленной частоты без выпрямителей. Например, широко известна система питания переменным током двух магнетронов с использованием двух дополнительных дросселей, что дает возможность работы каждого из магнетронов в течение полупериода [1].

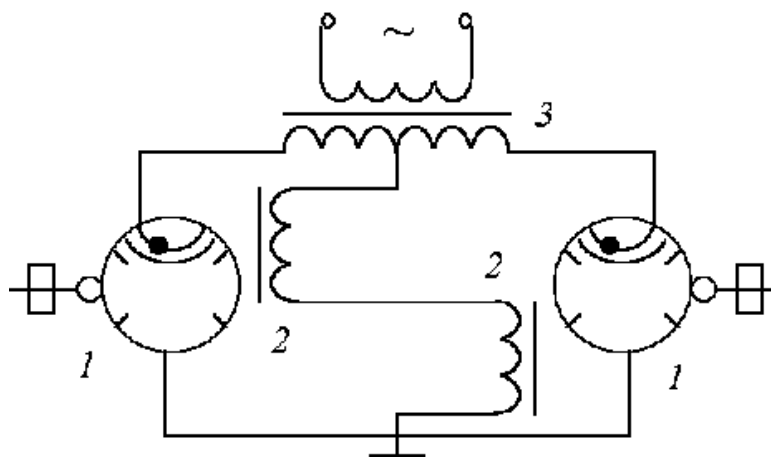


Рис. 1. Схема безвыпрямительного питания магнетронов с последовательными электромагнитами от сети переменного тока промышленной частоты: 1 – магнетрон; 2 – электромагнит; 3 – высоковольтный трансформатор

В установке работают два магнетрона, а через обмотки электромагнита протекает слегка пульсирующий постоянный анодный ток поочередно генерирующих магнетронов (рис. 1). Переменная составляющая анодного тока может быть значительно уменьшена за счет увеличения индуктивности дросселя и электромагнитов. При этом имеют место пульсации напряжения питания от нуля до амплитудного значения U_m .

В электронной технике широко применяются трехфазные двухтактные выпрямители [2], в которых используются положительный и отрицательный полупериоды трехфазной сети, образующие шестифазную систему однополярных полувольт с частотой колебаний переменного тока. При этом имеют место пульсации от $0,86 U_m$ до U_m , где U_m – амплитудное значение напряжения. Схема такого выпрямителя приведена на рис. 2.

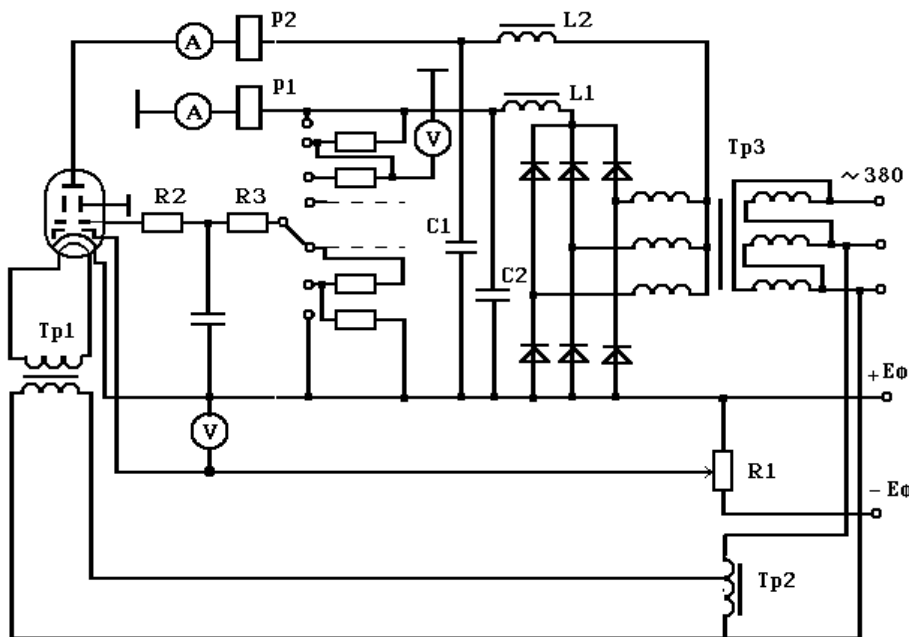


Рис. 2. Классическая схема электропитания ЭВП

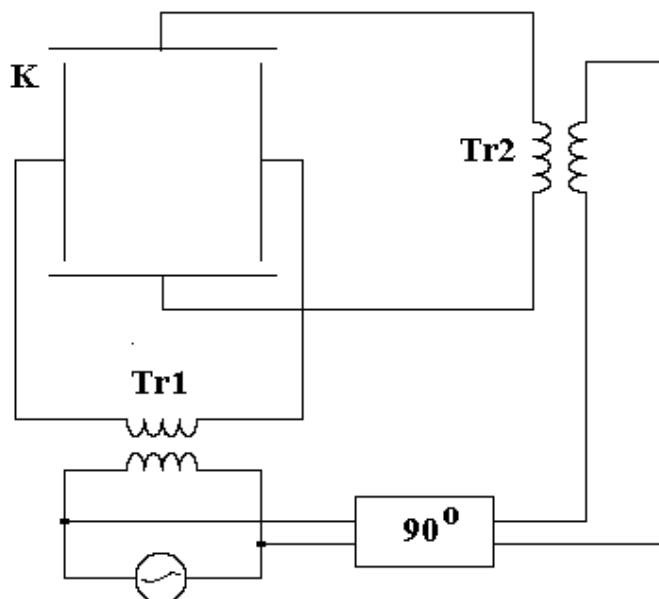


Рис.3. СВЧ прибор с питанием от четырехфазной цепи переменного тока

Известен также СВЧ прибор с питанием от четырехфазной цепи переменного тока [3] (рис. 3). Питание такого прибора осуществляется от сети переменного тока через два трансформатора – один подключен к сети непосредственно, а второй – через фазовращатель, обеспечивающий сдвиг по фазе на четверть периода. Вторичные обмотки обоих трансформаторов имеют отводы от середины. Коллектор выполнен разрезанным на четыре секции, к которым присоединены крайние выводы вторичных обмоток. Средние отводы присоединены к катоду, являющемуся общим электродом устройства, и заземлены. При такой системе питания одна из секций коллектора всегда будет под положительным относительно катода напряжением, большим $0,707 U_m$ (U_m – амплитудное значение напряжения сети). Недостатком системы питания этого устройства в целом является наличие значительных пульсаций напряжения на коллекторе (от $0,707 U_m$ до U_m), что приводит к пульсации тока электронного

луча и, соответственно, к пульсациям выходной мощности. Кроме того, для работы прибора необходимо применение фазовращателя в силовой цепи.

В то же время из работы [2] известна шестифазная схема электропитания (эквивалентная схема показана на рис. 4), в которой полезно используются как положительный, так и отрицательный полупериоды трехфазной сети. Временная зависимость огибающей выходного напряжения показана на рис. 5.

Форма сигнала на выходе устройства составляет шестифазную систему однополярных полувольт с частотой колебаний сети переменного тока; в такой схеме имеют место пульсации от $0,86 U_m$ до U_m , где U_m – амплитудное значение напряжения.

По нашим сведениям, такая схема для питания СВЧ устройств до настоящего времени не использовалась.

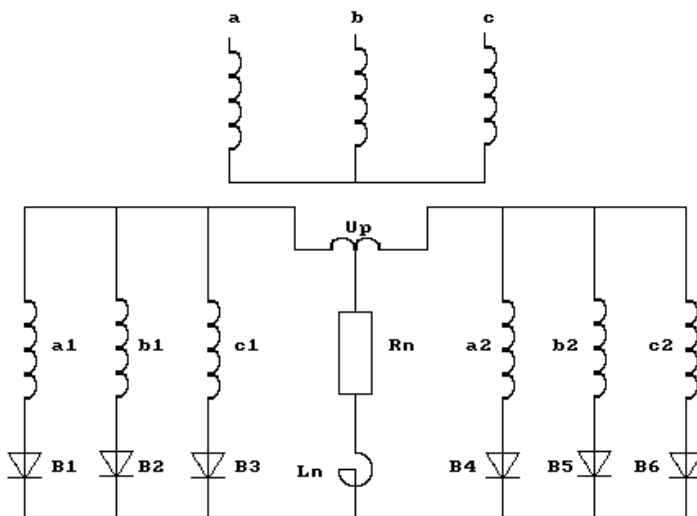


Рис.4. Эквивалентная шестифазная схема электропитания

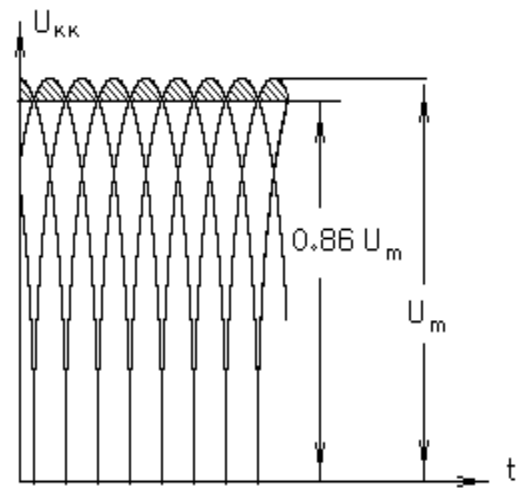


Рис. 5. Временная зависимость огибающей выходного напряжения

Проведенный анализ показал, что наиболее целесообразно использование безвыпрямительной схемы питания в многолучевых приборах с сеточным управлением, например в генераторных лампах и клистродах. Для снижения уровня пульсаций с частотой сети, естественных для такой системы, предложена новая концепция построения многолучевых приборов клистронного типа с непосредственным питанием от трехфазной сети и цепью стабилизирующей обратной связи [4].

Предложено большое разнообразие возможных компоновок прибора, которым присущи свои преимущества и недостатки. Так, радиальная структура с катодами внутри и с коллекторами снаружи обеспечивает интенсивный отвод тепла от прибора, позволяет облегчить фокусировку лучей. Кроме того, такая конструкция позволяет наращивать мощность прибора путем расположения таких структур слоями друг над другом, то есть своеобразными «этажами». При этом требуется обеспечение хорошей изоляции катодов друг от друга. На базе подобной компоновки могут быть реализованы различные типы СВЧ устройств, в которых взаимодействие может осуществляться как со стоячей, так и с бегущей волной.

Однако наиболее перспективно создание на этом принципе усилительных и генераторных СВЧ приборов клистронного типа с пространственно-развитыми резонансными системами и бестрансформаторным питанием от высоковольтной сети переменного тока (0,4 кВ, 6 кВ, 10 кВ, 30 кВ). В качестве примера приведена двухфазная схема, однако принцип работы сохраняется и при использовании 3 фаз.

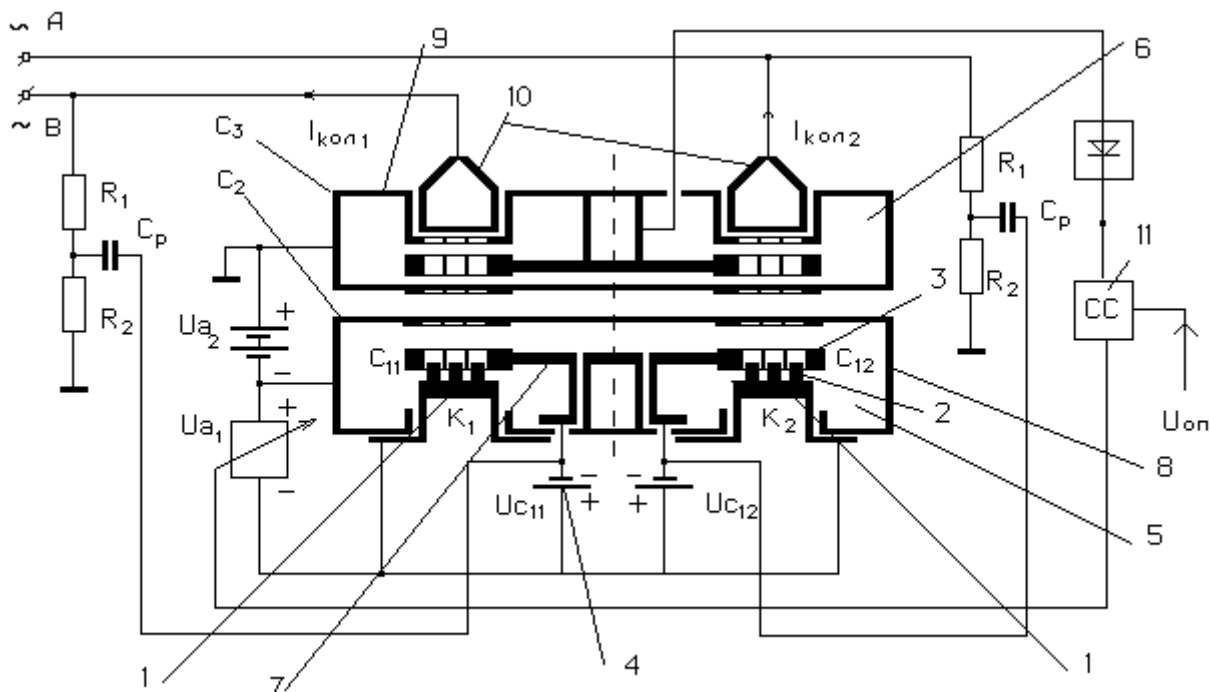


Рис. 6. Схема питания клистрода от двухфазной сети переменного тока

На рис. 6 показана схема многолучевого клистрода с питанием от двухфазной сети переменного тока, напряжения которой $U_{\phi 1}$ и $U_{\phi 2}$ сдвинуты друг относительно друга на 90° . Катодный блок состоит из двух установленных на одном основании катодных систем 1, содержащих ряд отдельных катодов 2 и снабженных изолированным управляющим электродом 3 (сеткой C_1), на который подан отрицательный потенциал от маломощного источника напряжения смещения 4. Электродинамическая система представлена входным и выходным резонаторами 5 и 6 соответственно. Управляющие электроды 3 являются центральными электродами двухзазорного резонатора «древовидного типа». Индуктивные «ветви» 7 имеют электрический контакт с корпусом входного резонатора 8 (сетка C_2) через блокировочную емкость. Между катодными системами 1 и корпусом входного резонатора 8 включен электрически управляемый маломощный источник постоянного ускоряющего напряжения U_{a1} , а между корпусом 8 входного резонатора и корпусом 9 выходного резонатора – дополнительный источник ускоряющего напряжения U_{a2} . Коллекторы (аноды) изолированы от корпуса 10 и подключены к соответствующей фазе напряжения сети $U_{\phi 1}$ и $U_{\phi 2}$. Для того, чтобы исключить эмиссию электронов из соответствующего коллектора, когда на нем действует отрицательный полупериод сетевого напряжения, на сетку 1 (через резистивный делитель напряжения R_1 , R_2 и разделительный конденсатор C_p) одновременно подается управляющий сигнал $U_{сетки}$, фаза которого совпадает с соответствующей фазой сетевого напряжения. Таким образом, отрицательный запирающий потенциал в соответствующий момент времени присутствует на одной из сеток (например, на сетке C_{11}), а на другой сетке (C_{12}) в это время действует положительный и одна из катодных систем эмиттирует многолучевой электронный поток.

После прохождения резонаторов, где электроны отдают свою энергию СВЧ полю, они попадают на соответствующие коллекторы, создавая в их цепи импульсы токов $I_{кол1}$, $I_{кол2}$.

Для получения стабильных по амплитуде СВЧ колебаний (не промодулированных частотой питания) в прибор дополнительно введена система управления амплитудой выходно-

го СВЧ сигнала 11, которая содержит детектор уровня СВЧ сигнала, присоединенный выходом к схеме электронного управления амплитудой источника U_{a1} .

Введение схемы обратной связи обеспечивает стабилизацию выходной мощности за счет управления усилительными свойствами прибора в течение периода частоты питания. При работе устройства с выходного высокочастотного разъема поступает на вход системы управления 11, которая изменяет уровень СВЧ сигнала, поступающего во входной резонатор по цепи обратной связи таким образом, чтобы общий уровень выходного СВЧ сигнала остался неизменным, несмотря на наличие пульсаций напряжения на катодах. Очевидно, что предложенная схема будет эффективнее работать при питании от многофазной цепи (трех- или шестифазной).

На рис. 7 представлена принципиальная схема электронно-лучевого СВЧ прибора с питанием непосредственно от трехфазной сети переменного тока через шестифазный трансформатор.

Увеличение эффективности использования энергии сети переменного тока обеспечивается тем, что при питании многолучевого прибора от трехфазной сети через трансформатор со вторичными обмотками, имеющими отводы от середины (они подключены к общему электроду – коллекторной системе), образуется шестифазная система напряжений для питания катодов, каждый из которых эмиттирует луч вдоль оси эмиссии. При этом в любой момент времени отрицательное напряжение на одном из катодов превышает $0,866 U_m$ относительно коллектора. Этим достигается снижение величины пульсаций по сравнению с четырехфазной схемой питания и устраняется необходимость использования в системе питания дополнительного фазовращателя.

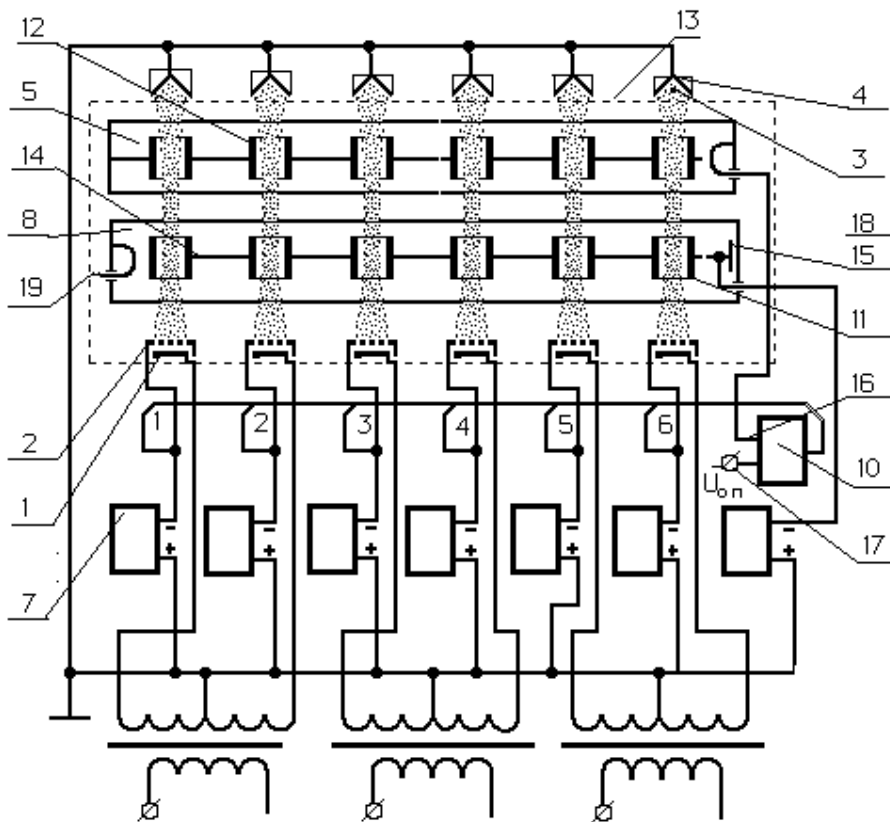


Рис. 7. Принципиальная схема электронно-лучевого СВЧ прибора с питанием от трехфазной сети переменного тока через шестифазный трансформатор

Катодная система может быть выполнена в виде изолированных друг от друга катодов 1, каждый со своим управляющим электродом 2 (сеткой) и маломощным источником напряжения смещения 7. Амплитуда напряжения смещения выбрана так, чтобы ток через каждый из катодов протекал при условии

$$U_{kk} > (0,75 - 0,86) U_m, \quad (1)$$

где U_{kk} – мгновенное значение напряжения питания между катодом и коллектором; U_m – амплитудное значение напряжения питания U_{kk} .

Введение отрицательного напряжения смещения на управляющие электроды обеспечивает протекание тока через каждый из катодов только в области режимов с высоким КПД.

Число катодов равно числу лучей, причем число лучей выбрано равным шести – по числу фаз, образованных выходными обмотками трехфазного трансформатора с отводом от середины у каждой. Катоды поочередно в течение $1/6$ периода колебаний в сети эмиттируют электронные лучи, которые проходят в электродинамическую систему, где взаимодействуют с созданными в электродинамической системе полями. Электродинамическая система представлена на рисунке входным и выходным резонаторами 1 и 6 соответственно. Выбор электродинамической системы обусловлен назначением и параметрами прибора.

В результате взаимодействия происходит генерирование или усиление СВЧ-сигнала и передача его на выходной разъем 19.

Как видно из рис. 7, отрицательное напряжение в разные моменты времени присутствует одновременно на двух или трех катодах. При этом мгновенное значение отрицательного напряжения на катодной системе (на одном из катодов) всегда не меньше $0,86 U_m$. Таким образом, по крайней мере, один из катодов в любой момент времени имеет режим, соответствующий оптимальному, для получения номинальной мощности на выходе при высоком КПД.

После прохождения электродинамической системы электроны попадают на коллекторную систему, образующую единый коллекторный блок. Он является общим электродом устройства и соединен с «землей» и средними отводами всех обмоток трансформатора.

Входом устройства является петля связи 19. Выходной сигнал снимается с выходного резонатора с помощью устройства связи 10, имеющейся в выходном резонаторе 6.

На пролетные втулки входного резонатора подано ускоряющее напряжение от маломощного источника 17.

Как показал анализ, в шестифазной системе питания прибора (без применения фильтров) напряжение на активном луче изменяется от амплитудного значения до значения, составляющего $0,86$ этого значения, то есть размах пульсаций с частотой 300 Гц не превышает 14% от амплитуды. Однако такие пульсации приводят к модуляции уровня выходного СВЧ сигнала.

Для получения стабильных по амплитуде СВЧ колебаний (не промодулированных частотой питания) в прибор дополнительно введена система управления амплитудой выходного СВЧ сигнала, которая содержит детектор уровня СВЧ сигнала, присоединенный выходом к первому входу схемы сравнения (на схеме не показан). Причем, второй вход схемы сравнения присоединен к выходу источника опорного напряжения, а выход схемы сравнения соединен со входом управления аттенюатора СВЧ сигнала.

Введение схемы обратной связи обеспечивает стабилизацию выходной мощности за счет управления усилительными свойствами прибора в течение периода частоты питания. При работе устройства в качестве генератора СВЧ сигнал с выходного высокочастотного разъема поступает на вход системы управления 10, которая изменяет уровень СВЧ сигнала, поступающего с нее на входной высокочастотный разъем таким образом, чтобы уровень выходного СВЧ сигнала оставался неизменным, несмотря на наличие пульсаций напряжения на катодах.

Лучи в приборе могут быть расположены параллельно друг другу (рис. 8) или звездообразно (радиальная) схема (рис. 9). В последнем случае возможно создание как прямой (с

внутренним расположением катодов), так и обращенной (с внешним расположением катодов) конструкций.

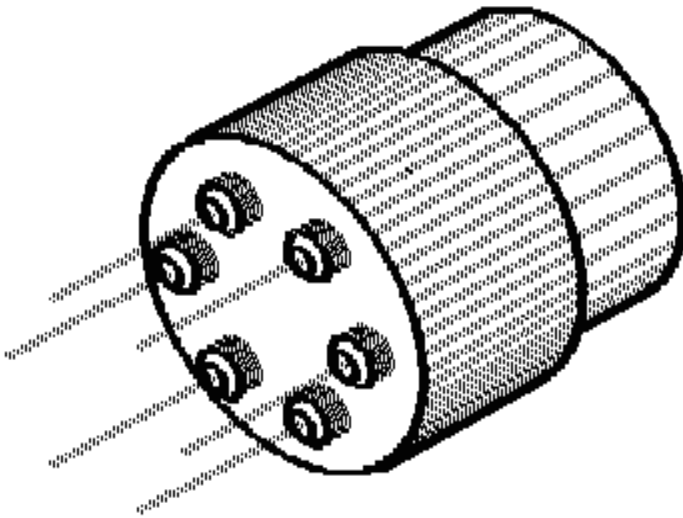


Рис. 8. Конструкция СВЧ прибора с параллельным расположением лучей.

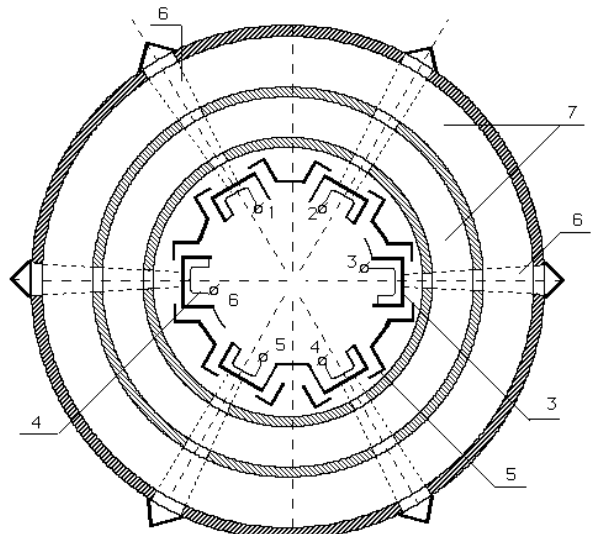


Рис. 9. Радиальная конструкция СВЧ прибора.

Повышение долговечности катодов в СВЧ приборе с безвыпрямительным питанием обеспечивается за счет уменьшения нагрузки на катоды, каждый из которых эффективно работает в течение $1/6$ периода питающей сети. Кроме того, при числе лучеобразующих катодов более шести (двенадцать, восемнадцать и т.д.) обеспечивается снижение тока каждого луча. Соответственно уменьшается эффект расфокусировки луча из-за действия кулоновских сил, что приводит к упрощению требований к устройствам фокусировки и сопровождения луча и повышению электронного КПД. При реализации устройства с радиальной компоновкой лучей геометрия электродинамической системы такова, что ее поперечные размеры и радиусы пролетного канала естественным образом увеличиваются с увеличением радиуса, что избавляет от необходимости использования магнитной фокусирующей системы. Кроме того, для такой компоновки характерна развитая поверхность коллекторной системы, которая обеспечивает интенсивный отвод тепла.

Для экспериментального подтверждения такой возможности проведено аналоговое моделирование генераторного режима работы трехлучевого СВЧ прибора с питанием непосредственно от трехфазной сети переменного тока. Был собран специальный макет ВЧ генератора, выполненный на радиолампах 6Ж9П [5].

На рис. 10 представлена схема этого макета. Для стабилизации амплитуды в схему введен блок управления выходным напряжением. Как видно из рисунка, генератор выполнен по классической схеме индуктивной трехточки с дополнительным усилителем выходного сигнала в анодной цепи. Управление амплитудой ведется путем изменения напряжения на второй сетке. Как показал эксперимент, кроме стабилизации амплитуды, предложенная схема может обеспечивать также возможность амплитудной модуляции выходного ВЧ-сигнала по произвольно заданному закону. Это достигается путем соответствующего изменения амплитуды опорного напряжения U_{on} , подведенного к блоку управления.

Исследованы особенности работы и измерена амплитуда пульсаций выходного сигнала при питании ламп от одно- и многофазной сети. Показано, что при введении в схему питания системы с отрицательной обратной связью возможно получение на выходе постоянной амплитуды высокочастотных колебаний [6] (как и при классической схеме питания, включающей мощные силовые выпрямители).

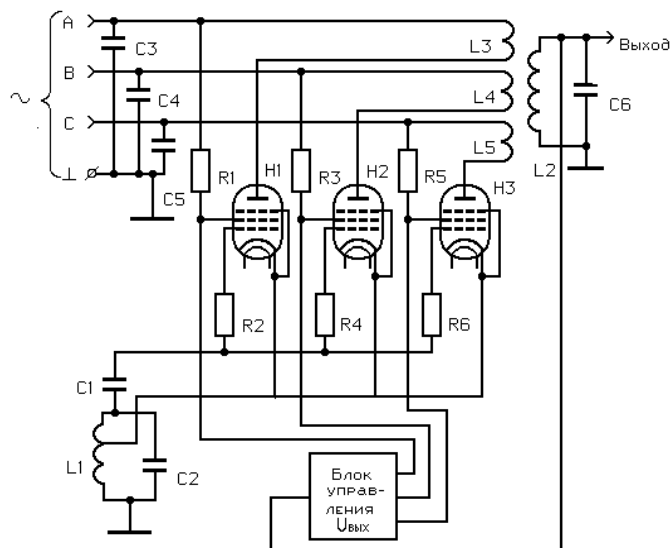


Рис. 10. Макет ВЧ генератора, выполненного на лампах 6Ж9П

Предложенные новые конструктивные схемы СВЧ-приборов с непосредственным питанием от сети переменного тока открывают большие перспективы для дальнейших исследований с целью изучения возможности применения таких устройств при создании мощных автономных источников СВЧ энергии. При их использовании в промышленных системах СВЧ энергетики ожидается: повышение эффективности использования энергии сети переменного тока, сохранение высоких значений КПД, повышение долговечности, а также улучшение надежности, массогабаритных и эксплуатационных показателей.

Таким образом, предложенное СВЧ устройство характеризуется:

- высокой эффективностью использования энергии сети переменного тока;
- высоким КПД (до 70 – 80 %);
- малым размахом пульсаций (ниже 5 %);
- возможностью амплитудной модуляции уровня выходного СВЧ сигнала;
- увеличенной долговечностью катода ориентировочно в 5–6 раз;
- снижением требований к устройствам фокусировки и сопровождения электронного луча.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пчельников Ю.Н. Электроника сверхвысоких частот /Ю.Н.Пчельников Ю.Н., В.Т. Свиридов – М.: Радио и связь , 1981. – С.56.
2. Горбачев Г.Н. Промышленная электроника /Г.Н. Горбачев, Е.Е. Чаплыгин – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 245 с.
3. Патент 3,172,006 US НКИ G 315/830. Collector circuit electron beam devices /H.L.McDowell; Bell. Telph.Lab .N.Y. (USA).
4. С1 2073283 RU Н01 J25/02 // Н02 М 5/16//Н03 F 3/56. Электронно-лучевое СВЧ устройство /Е.Ф. Кузнецов, В.А. Царев (СГТУ) – № 4. //Бюлл. изобретений – 1997. –№ 4.

5. Кузнецов Е.Ф. Особенности питания СВЧ приборов от сети переменного тока /Е.Ф.Кузнецов, А.Ю.Мирошниченко, В.А.Царев // "Актуальные проблемы электронного приборостроения". – Тез. докл. междунар. науч.-технич. конф. Саратов, 4 – 7 окт. 1994 г. – Саратов, 1994. – С. 15.

6. Кузнецов Е.Ф. Улучшение массогабаритных показателей комплекса «СВЧ прибор – источник питания» /Е.Ф. Кузнецов, А.Ю. Мирошниченко, В.А. Царев //Научно-исследовательские разработки и высокие технологии двойного применения: Материалы 1-й Поволжской научно-исследовательской конференции. – Самара, 1995. – С. 37.

Царев Владислав Алексеевич –

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

Кузнецов Роман Юрьевич –

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

Мирошниченко Алексей Юрьевич –

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

УДК 621.385.6, 621.389 (088.8)

В.А. Царев, И.Б. Яковлева, Д.А. Сальникова, Р.Ю. Кузнецов

ОЦЕНКА СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ МОЩНЫХ ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫХ СВЧ ПРИБОРОВ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Исследованы возможности применения различных типов электровакуумных приборов для устройств СВЧ энергетики. Рассмотрены конструкции СВЧ приборов, их основные параметры и возможные области применения.

V.A. Tzarev, I.B. Yakovleva, D.A. Salnikova, R.Yu. Kuznetsov

ESTIMATION OF THE MODERN CONDITION OF POWERFUL ELECTROVACUUM UHF DEVICES FOR USING IN POWER ENGINEERING

Different types of electrovacuum devices for instruments of UHF energy were investigated. Constructions UHF devices, their main parameters and their possible applications were considered.

Трудно назвать области деятельности человека, где бы не использовалась СВЧ техника. Прежде всего, СВЧ техника нашла применение в радиолокации, радиовещании, телевидении, телеметрической связи, радиоастрономии, радиоспектроскопии, ядерной физике (ускорителях элементарных частиц); сотовой телефонной связи; промышленной технологии в качестве средства быстрого разогрева и сушки материалов; горнодобывающей промышленности для теплового разрушения твердых пород; пищевой промышленности для ускоренного приготовления пищи, пастеризации, стерилизации и обезвоживания продуктов; в меди-

цине для глубоких локальных прогревов тканей с целью ускоренного лечения и разрушения новообразований.

Ведутся интенсивные исследования по СВЧ нагреву плазмы в токамаках и стеллараторах, являющихся прототипами будущих термоядерных реакторов. Изучается проблема канализации большой СВЧ энергии через атмосферу: Земля-спутник, спутник-Земля. Исследуется вопрос создания искусственного ионизованного облака в верхней атмосфере с помощью направленных пучков СВЧ радиоволн для решения экологической проблемы защиты озонового слоя Земли.

В последние десятилетия СВЧ техника находит широкое применение в технологических процессах плазменной обработки поверхности твердого тела для очистки, травления и модификации свойств поверхности при производстве полупроводников, интегральных схем, в процессах плазмохимического осаждения поликристаллических пленок, а также получения пластинок алмаза и других материалов на поверхности твердого тела, в плазмохимии для получения новых химических продуктов в газовых разрядах [1].

Чтобы применение СВЧ энергии было экономически оправданно, необходимо выбирать такие СВЧ приборы, которые имели бы в сочетании следующие характеристики: высокий КПД преобразования энергии промышленной частоты в СВЧ энергию (желательно 70 – 90%); высокий уровень выходной мощности в непрерывном режиме (около 1 кВт и более); простые и дешевые источники питания (желательно питать СВЧ прибор, непосредственно подключая его к вторичной обмотке силового трансформатора промышленной электросети без выпрямителей и фильтров); простота конструкции, надежность, большой срок службы (не менее 2 – 5 тысяч часов); возможность эффективной работы при переменной нагрузке.

Наиболее распространенными и дешевыми сегодня источниками СВЧ энергии являются магнетроны бытовых микроволновых печей, освоенные в массовом производстве во многих странах.

Магнетроны как источники СВЧ энергии

В современной электронной технике магнетроном называется сверхвысокочастотный генераторный вакуумный электронный прибор, работающий при наличии постоянных скрещенных взаимно перпендикулярных полей: электрического и магнитного. Среди различных разновидностей магнетронов наиболее распространенным является многорезонаторный магнетрон [2].

В магнетроне в отличие, например, от клистрона нет разделенных в пространстве областей формирования, управления и преобразования энергии электронного потока. Все эти процессы, определяющие принципы действия вакуумных электронных приборов, происходят в одном и том же пространстве взаимодействия: в промежутке катод-анод.

Создание магнетрона с КПД больше 80% достигается выбором геометрии пространства взаимодействия. Размеры пространства взаимодействия выбирается в соответствии с выходными параметрами магнетрона (мощностью и анодным напряжением) и возможностью реализовать необходимые электродинамические характеристики резонаторной системы (волновое сопротивление и частотное разделение видов колебаний) [3].

Однако на частотах 433 и 915 МГц при мощностях свыше 1 кВт магнетроны обладают недостатком, обусловленным особенностью их работы: магнетроны мощностью свыше 10 кВт имеют малый срок службы из-за тепловых потерь на аноде и катоде. Разогрев катода происходит вследствие обратной бомбардировки катода. При мощностях свыше 1 кВт необходимо водяное охлаждение. Это создает неудобства в эксплуатации, возможен выход из строя каналов охлаждения [4].

Возрастающее использование энергии СВЧ в технологическом оборудовании сулит магнетронам хорошие перспективы. Для работы в таком оборудовании магнетроны должны генерировать мощности до нескольких сотен киловатт. Предельная мощность импульсных магнетронов может достигать 39 МВт при длительности импульса 2 мкс и 390 МВт – при длительности 200 нс. Уже разработаны магнетроны этого типа, генерирующие мощность до

нескольких десятков киловатт. Установки нагрева энергией СВЧ, в которых требуется получить очень высокую мощность, часто конструируют таким образом, чтобы энергия в рабочий объем поступала от нескольких генераторов меньшей мощности через отдельные рупорные облучатели. Однако в типичном случае применения магнетрона в СВЧ печи бывает достаточно мощности одного магнетрона. Часто такие магнетроны работают без специального выпрямителя непосредственно от сети переменного тока стандартной частоты (50 ÷ 60 Гц) и подключаются через трансформатор. Для работы в низкочастотной части диапазона, отведенного для установок СВЧ нагрева, сконструированы низковольтные магнетроны, которые подключают через полупроводниковый выпрямитель – удвоитель непосредственно к сети 220 В.

В настоящее время отечественной промышленностью выпускаются магнетроны непрерывного режима мощностью 50–100 кВт. Параметры непрерывных магнетронов представлены в табл. 1 – 4.

СВЧ сушилки комплектуются одним или несколькими источниками СВЧ энергии. Если в первом варианте применяются мощные промышленные магнетроны с рабочей частотой 433 и 915 МГц с мощностью 25 – 100 кВт, то во втором варианте в качестве источника СВЧ энергии используются маломощные магнетроны от бытовых СВЧ печей, работающие на частоте 2450 МГц с мощностью 0,6 – 0,8 кВт. При применении источников большой мощности после магнетрона устанавливается циркулятор или согласующее устройство. При подаче СВЧ энергии в сушилку часть энергии поглощается диэлектриком, а вторая часть, отражаясь от камеры, возвращается к магнетрону. Эта отраженная волна оказывает вредное влияние на магнетрон: снижается его мощность и уменьшается срок службы. Согласующее устройство уменьшает амплитуду отраженной волны или исключает отражение полностью. При использовании циркулятора отраженная волна поглощается в циркуляторе и не попадает в магнетрон.

Таблица 1
Параметры магнетронов, выпускаемых ФГУП «НПП "Исток"»

Тип СВЧ прибора	Магнетрон	Магнетрон	Магнетрон	Магнетрон
Выходная мощность, кВт	0,6	5,0	5,0	3,0
Потребляемая мощность, кВт	1,2	10,0	10,0	6,0
Рабочая частота, МГц	2450±50	2450±50	2450±50	2450±50
Макс. КСВН	4,5	∞	∞	∞
Номинал питающей сети, В	220	220	3×380	3×380
Охлаждение (расход воды), л/мин	–	5	автономное	автономное
Габариты, мм	330×300×140	630×800×500	720×700×1100	400×500×900
Масса, кг	6	350	90	60
Выходной волновод, мм	90×45	90×45	90×45	90×45

Таблица 2
Магнетроны ГУНПП ««Магратеп»»

Тип СВЧ прибора	Магнетрон	Магнетрон	Магнетрон
Выходная мощность, кВт	50,0	100,0	100,0
Потребляемая мощность, кВт	80,0	120	120
Рабочая частота, МГц	915±25	915±25	433
Макс. КСВН	∞	∞	4
Номинал питающей сети, В	3×380	3×380	3×380
Охлаждение (расход воды), л/мин	50	100	100
Габариты, мм	3600×800×2200	2400×800×2200	2400×800×2200
Масса, кг	1800	Выпрямитель наружной	Выпрямитель наружной

		установки	установки
Выходной волновод, мм	220×104	220×104	500×250

Таблица 3

Основные технические характеристики магнетрона фирмы «Тантал»

Рабочая частота (фиксированная), МГц	2450±50
Выходная мощность (на нагрузку с КСВН ≤ 1,15), кВт	не менее 50
Анодный ток, А	не более 5
Анодное напряжение, кВ	не более 20
КПД, %	не менее 60
Напряжение накала, В	не более 10
Ток накала, А	не более 50
Долговечность, ч	не менее 1000
Максимальная КСВН СВЧ нагрузки	2

Таблица 4

Стабилизированные источники микроволновой энергии ФГУП «НПП «Контакт»»

Параметр	Источник МВ-энергии и тип используемого магнетрона					
	ХАЗАР-3, М-141 и М-168	ХАЗАР-5, Выпь	ХАЗАР-25, М-93	ХАЗАР-50/915, М-116	ХАЗАР-50/460, М-137	ХАЗАР-0.6, М-156
Рабочая частота, МГц±1%	2450	2450	915	915	460	2450
Микроволновая регулируемая мощность, кВт	0,8–3,0	1,5–5,0	5–25	15–50	15–50	0,1–0,62
Потребляемая мощность от сети 220/380 В	7,5	12	40	90	90	1,43
КСВН нагрузки, не более	1,6; 3,0	3,0	2,6	2,6	2,6	4,4
Охлаждение водяное, расход воды, л/мин, не более	3	5	15	40	40	воздуш.
Масса: высокочастотный блок, кг, блок питания, кг	40 200	100 400	240 1000	240 1700	240 1700	15 70
Сечение волноводного канала, мм	90×45	90×45	220×104	220×104	520×260	90×45
Габариты, мм: высокочастотный блок, блок питания	500x400 x300, 900x600 x600	500x400 x300, 900x600 x600	560x700 x1000, 700x1200 x1700	560x700 x1000, 900x1200 x1700	560x700 x1000, 900x1200 x1700	200x275 x385, 420x720 x400

Цена, долл. США	15000	23000	45000	90000	85000	3000
-----------------	-------	-------	-------	-------	-------	------

В камерах, где применяются несколько бытовых магнетронов с рабочей частотой 2450 МГц, согласующие устройства, циркуляторы не применяются, и отраженная энергия попадает обратно в магнетрон, он нагревается и поэтому срок службы магнетронов уменьшается. Еще одним недостатком магнетронов с частотой 2450 МГц является малая глубина проникновения электромагнитных волн в диэлектрик (например, в древесину). Но сушильные камеры на СВЧ источниках с рабочей частотой 2450 МГц нагревают диэлектрик неравномерно и с большими энергетическими затратами.

Значительно большей непрерывной мощностью обладают магнетронные усилители – амплитроны или ВУМы (волноводный усилитель магнетронный). В дециметровом диапазоне они обеспечивают мощности 0,5–1,0 МВт в непрерывном режиме и 10 МВт в импульсном при КПД 55 – 85 %.

Клистроны как источники энергии СВЧ

Улучшение таких параметров мощных клистронов, как мощность, КПД, надежность и долговечность, позволили им занять весьма важное место среди других электровакуумных приборов СВЧ.

Основной областью применения клистронов являются мощные радиолокационные станции и системы связи, кроме того, их применяли для СВЧ нагрева.

Одна их главных особенностей клистрона – возможность получения очень больших мощностей в импульсном и непрерывном режимах. Благодаря хорошим энергетическим характеристикам клистрон успешно конкурирует с магнетроном в таких установках для СВЧ нагрева, где нужны очень высокие средние мощности.

Для телевизионных передатчиков ФГУП «НПП «Контакт»» выпускаются многорезонаторные клистроны серии «Вега», «Висла» с выходной мощностью 5–10 кВт, которые после усовершенствования, возможно, окажутся применимыми и в энергетике. На рис. 2 показан внешний вид клистрона «Висла». КПД однолучевого клистрона ниже, чем у магнетрона, но он может отдавать такую высокую среднюю мощность, для получения которой потребовалось бы несколько магнетронов.

Использование систем распределенного взаимодействия вместо выходного резонатора привело к существенному увеличению КПД и средней мощности клистрона. Так, клистрон трехсантиметрового диапазона в непрерывном режиме имеет выходную мощность 500 кВт на частоте 7946 МГц, а в импульсном режиме – 2 МВт при КПД 61%.

Одним из направлений развития пролетных клистронов является создание относительно низковольтных приборов, т. е. приборов с пониженным ускоряющим напряжением. Мощные пролетные клистроны обычно работают при высоких ускоряющих напряжениях в несколько десятков и даже сотен киловольт. Это объясняется тем, что высокие энергетические параметры могут быть обеспечены только за счет ускоряющего напряжения U_0 . Снижение U_0 , например, вдвое при постоянной средней мощности потребует двукратного повышения тока I_0 , что приведет к значительному увеличению электростатических сил продольного расталкивания группирующихся электронов.

Проблема создания низковольтных пролетных клистронов была решена путем использования в клистронах не одиночных электронных пучков, а систем тонких взаимно параллельных электронных лучей, которые называют многолучевыми пучками, а клистроны, использующие такие пучки – многолучевыми клистроном. Общее представление о конструкции многолучевого усилительного пролетного клистрона дает рис. 1.

Многолучевой электронный пучок создает пушка с теневой сеткой, выполненной в виде тонкой диафрагмы с числом отверстий, равным числу электронных лучей. В зазорах

резонаторов все лучи пучка одновременно взаимодействуют с высокочастотным полем, поэтому энергетический эффект взаимодействия будет определяться общим током пучка. В дрейфовой трубе электронные лучи распространяются каждый в своем канале, изолированном от всех других. Малые токи и поперечные размеры лучей обеспечивают предельно малые кулоновские силы продольного расталкивания и, следовательно, достижение высокой эффективности группирования электронов.

Многолучевые пролетные клистроны позволяют генерировать высокочастотные мощности до нескольких десятков киловатт при ускоряющих напряжениях в 2–3 раза меньших, чем у обычных однолучевых клистронов. Снижение ускоряющих напряжений ведет к уменьшению габаритов приборов.

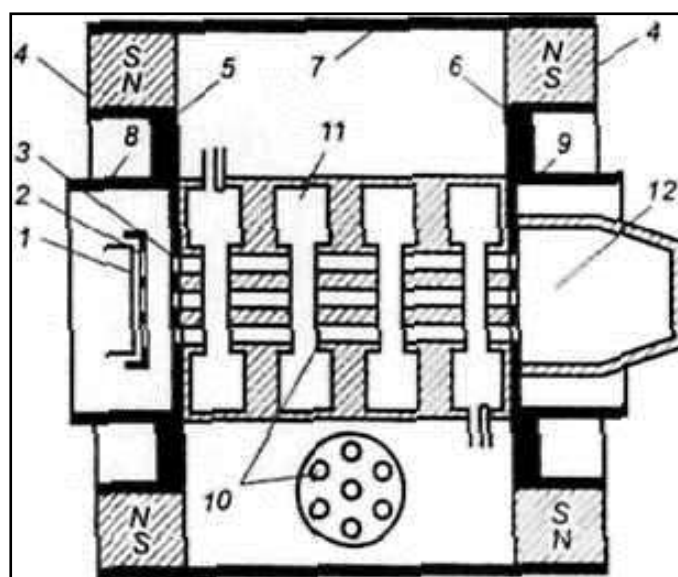


Рис.1. Конструкция многолучевого клистрона: 1 – катод, 2 – теневая сетка, 3 – анод, 4 – кольцевой постоянный магнит, 5 и 6 – кольцевые полюсные наконечники, 7 – магнитный экран – оболочка прибора, 8 и 9 – экраны электронной пушки и коллектора, 10 – многоканальная дрейфовая труба, 11 – объемный резонатор, 12 – коллектор

ФГУП «НПП "Исток"» предлагает многолучевые клистроны с жидкостным охлаждением мощностью 60 кВт и с воздушным охлаждением на 30 кВт (частоты 470 – 810 МГц, выход коаксиальный, средняя наработка на отказ – 15 000 ч). Клистроны могут иметь мощность до 100 кВт при КПД ~ 45 – 50%.

Многолучевые клистроны с периодическим расположением по азимуту электронных лучей, использующие кольцевые резонаторы на азимутально-однородном виде колебаний могут служить основанием для суммирования больших выходных мощностей при достаточно низких ускоряющих напряжениях. ФГУП «НПП «Исток»» предлагается клистрон на 250 кВт выходной мощности в непрерывном или квазинепрерывном режиме, работающий на частоте 2,45 ГГц при напряжении 10кВ и общем токе 50 А.

В работе [5] рассмотрены результаты разработок усилительных клистронов в объединении «Светлана», изложены методы улучшения параметров и эксплуатационных характеристик усилительных клистронов и дальнейшие пути их усовершенствования, а в работе [6] проведено сопоставление перспектив применения клистронов и магнетронов в промышленных технологических установках для нагрева с уровнем мощности до 100 кВт. В непрерывном режиме современные магнетроны, предназначенные для такого применения (рабочая

частота 2,45 ГГц), имеют мощность < 10 кВт, КПД $\sim 60 - 70\%$, срок службы 2000 – 3000 ч и низкую стабильность. Клистроны аналогичного назначения имеют выходную мощность от 15 до 100 кВт, КПД $\sim 70 - 80\%$, срок службы 30000 – 50000 ч и хорошую стабильность. Для создания установок промышленного нагрева мощностью до 100 кВт необходимо использовать несколько синхронизированных магнетронов, что связано с большими техническими трудностями, а разработанные в настоящее время клистроны с мощностью 80 кВт позволяют гораздо проще и надежнее разрешить эту проблему.

Клистры как источники энергии СВЧ

Клистрод относится к СВЧ-приборам гибридного типа. В нем во входном резонаторе используется квазиэлектростатический способ управления катодным током (модуляция по плотности), а в выходном резонаторе клистронного типа кинетическая энергия электронного пучка за счет эффекта индукции непосредственно преобразуется в энергию выходного сигнала без перехвата электронов на стенки резонатора. Неиспользованная часть энергии электронного пучка рассеивается в коллекторе, вынесенном за пределы области взаимодействия. Такие приборы получили название ламп с индукционным взаимодействием или ИОТ. Характерная особенность их конструкции в том, что катод расположен непосредственно в области действия переменного электрического поля, и в режиме с отсечкой тока образуются сгустки с высокими значениями амплитуд гармоник тока, что без дополнительной группировки дает высокие значения КПД.

Они широко применяются в качестве оконечных усилителей телевизионных передатчиков и имеют определенные перспективы применения в разнообразных установках СВЧ энергетики [8].

Известны конструкции однолучевых клистродов – ИОТ [9]. Управляющий электрод в этих приборах выполнен из пиролитического графита в виде мелкоструктурной сетки, размеры ячейки которой значительно меньше размера катода и меньше расстояния катод-сетка. Анод лампы выполнен с отверстием, через которое проходят электроны. Входная электродинамическая система представляет собой коаксиальный резонатор. Схематично конструкция однолучевого клистрода показана на рис. 2, а общий вид приборов фирмы Thompson и CPI изображен на рис. 3. Параметры клистродов фирмы CPI приведены в табл. 5.

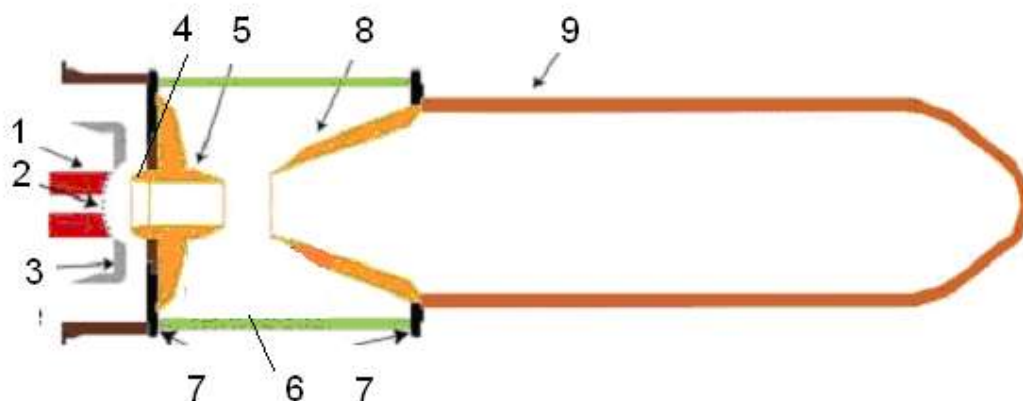


Рис. 2. Конструкция однолучевого клистрода: 1 – катод; 2 – управляющая сетка; 3 – фокусирующий электрод; 4 – анод; 5 – труба дрейфа; 6 – керамическое окно; 7 – полюсные наконечники; 8 – предколлектор; 9 – коллектор

Серия клистронов с сетками из ПГ, работающих на частотах 425, 725 и 850 МГц и предназначенных для телевизионных центров, имела выходную мощность 30 – 50 кВт в непрерывном режиме и 300 – 500 кВт импульсной мощности. КПД ~ 55 – 75 %. Размеры прибора были в два раза меньше, чем у аналогичных клистронов.

Однако в однолучевой конструкции мощного клистрода с одним катодом требуется использование высокоперевансного электронного пучка, что приводит к уменьшению электронного КПД из-за влияния на процессы взаимодействия собственного пространственного заряда этого пучка. От этого недостатка свободны многолучевые клистроны.

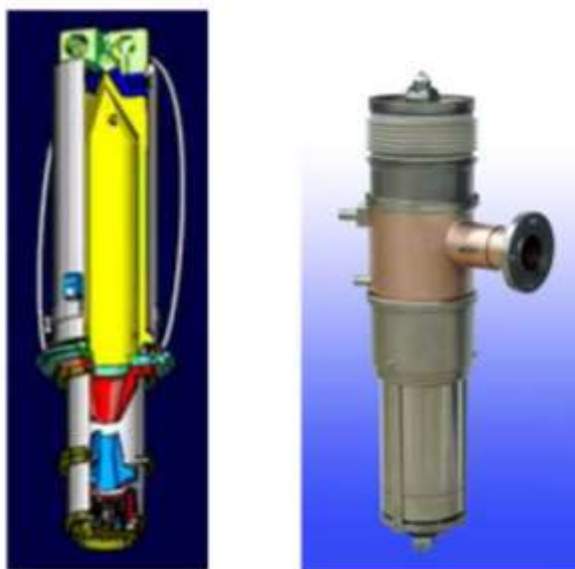


Рис. 3. Схематическое изображение клистрода. Общий вид клистронов

Таблица 5

Сравнительные характеристики зарубежных клистронов

Типичные значения параметров	Единицы измерения	K2D40W	K2D60W	K2D75W	K2D110W
Импульсная выходная мощность	кВт	44	64	80	110
Средняя выходная мощность	кВт	11	16	20	28
Напряжение пучка	кВ	27	30	33	34
Ток пучка	А	1,2	1,4	1,6	2,2
Мощность, рассеиваемая на коллекторе	кВт	22	26	34	47

Напряжение смещения на сетке	В	-50	-55	-60	-65
------------------------------	---	-----	-----	-----	-----

В клистроде, разработанном в ФГУП «НПП «Исток»» [10], катод выполнен в виде совокупности отдельных эмиттирующих поверхностей, формирующих индивидуальные электронные пучки.

Труба дрейфа такого прибора содержит совокупность отдельных продольных каналов с плотной упаковкой для пролета индивидуальных электронных пучков, а электродинамическая система выполнена в виде двух внешних съемных однозачорных резонаторов с механической перестройкой частоты. При плотной упаковке большого числа лучей в пределах одной пролетной трубы усложняется конструкция катодной системы, затрудняется фокусировка лучей, вследствие чего увеличиваются тепловые потери.

Все это вызывает необходимость создания многолучевых гибридных СВЧ приборов клистродного типа с пространственно-развитыми электронными лучами. Впервые многолучевой клистрод с внутренним выходным двухзачорным пространственно-развитым резонатором, резонансные элементы которого имеют симметричную древовидную структуру, был предложен в патенте [11]. На рис. 4 схематически изображен разрез прибора.

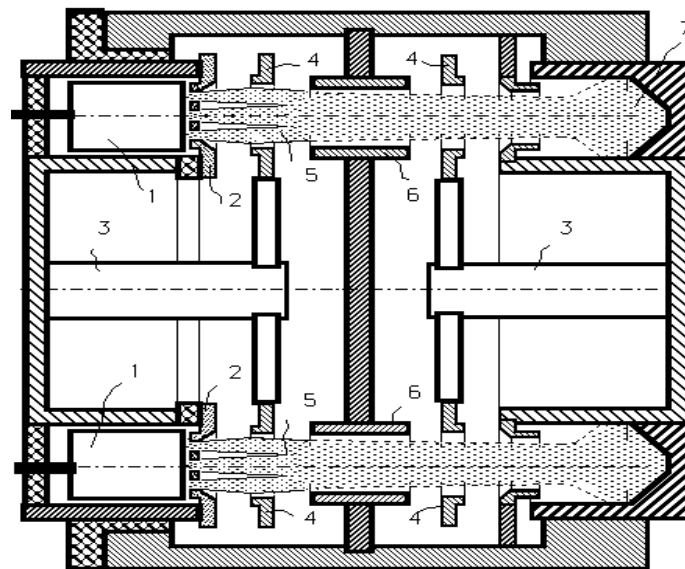


Рис. 4. Конструкция многолучевого клистрода с внутренними двухзачорными пространственно-развитыми резонаторами: 1 – катоды, 2 – управляющий электрод с сетками, индуктивный элемент резонатора, 4 – центральный электрод резонатора (штулка), 5 – электронный поток, 6 – труба дрейфа, 7 – коллектор

Дальнейшим развитием этой конструкции явилась схема тристрода – многолучевого клистрода, имеющего дополнительный группирующий резонатор (рис. 5) [12].

Сравнение выходных параметров многолучевого тристрода с лучшими отечественными и зарубежными аналогами показывает, что этот прибор имеет следующие преимущества:

- уменьшенные токовые и тепловые нагрузки на катодно-сеточную систему и более благоприятные условия рассеяния теплоты;
- повышенная эксплуатационная надежность прибора;
- КПД до 90 % при уровне выходной мощности до 15 кВт.

Для уменьшения массы и габаритов прибора в работе [13] предложена схема клистрода с одним общим резонатором, имеющим неодинаковые амплитуды ВЧ напряжения на входном и выходном участках взаимодействия, разделенных трубкой дрейфа. Это позволило обеспечить ВЧ напряжение большей амплитуды в выходной области взаимодействия, чем во

входной. Выполнение этих требований обеспечивает получение оптимальных условий отбора энергии от электронного потока и получения высокого КПД. Использование этого прибора в качестве высокоэффективного малогабаритного источника энергии ВЧ и СВЧ диапазонов многолучевого однорезонаторного клистрода позволяет устранить характерные недостатки классических двухрезонаторных клистронных генераторов и магнетронов.



Рис. 5. Общий вид тристрода

Новым применением многолучевого клистрода является применение его в установках СВЧ нагрева. Описание одной из конструкций многолучевого клистрода технологического назначения представлено в патентном описании [14].

Цены на клистроны и клистроды примерно сопоставимы.

Произведенный обзор продукции, выпускаемой как в нашей стране, так и за ее пределами, позволяет сделать вывод о том, что деятельность отечественных производителей направлена в большинстве случаев на проектирование и дальнейшее производство конкурентоспособных клистронов, по своим показателям не только не уступающих зарубежным аналогам, но и превосходящих их [16].

Виркаторы как источники СВЧ энергии

Виркаторы являются самыми распространенными и популярными из большого семейства сверхмощных СВЧ генераторов с виртуальным катодом (ВК). Существенным преимуществом виркатора является его простота, связанная с отсутствием замедляющей системы и фокусирующего магнитного поля. Недостаток прибора – некогерентность излучения – несущественен для энергетики. Созданные к настоящему времени виркаторы имеют мощности до 2 ГВт на частоте 3 ГГц, при длительности импульса 30 нс и КПД, равном 7,5% [17]. Вне сомнения, эти параметры будут скоро улучшены.

Одним из путей решения этой проблемы является переход к низковольтным многолучевым виркаторам.

Принцип работы виркатора основан на инжекции в эквипотенциальную полость электронного пучка такой силы тока, при которой пространственный заряд пучка формирует в полости потенциальный барьер – ВК, препятствующий дальнейшей инжекции электронов и отражающий часть электронов назад, к месту их инжекции. Положение ВК и его суммарный электрический заряд осциллируют во времени, их колебания являются источником мощного электромагнитного излучения СВЧ диапазона.

Упрощенная конструкция виркатора, показанная на рис. 6, содержит катод и анод в виде прозрачной для электронов сетки или фольги, к которым подключен источник высоковольтного питания. За анодом находится эквипотенциальная полость (резонатор), в которой формируется ВК и генерируется СВЧ излучение. Резонатор также снабжен устройством вывода излучения, в качестве которого используют рупорную антенну.

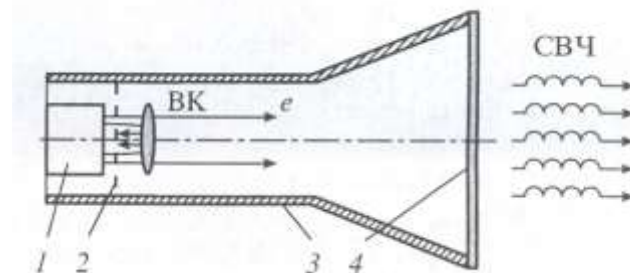


Рис. 6. Схема типичного виркатора: 1 – катод, 2 – анодная сетка или фольга, 3 – труба дрейфа (резонатор), 4 – рупорная антенна с окном вывода СВЧ излучения

Как видно из рисунка, конструкция виркатора достаточно проста. К достоинствам виркаторов относятся:

- низкие требования к качеству электронного пучка;
- возможность управления внешним сигналом сравнительно небольшой мощности;
- возможность работы без магнитного сопровождения электронного пучка, что обуславливает высокую конкурентоспособность виркаторов среди других классов сверхмощных СВЧ приборов. Отсутствие соленоида позволяет существенно снизить массу всего устройства. Это объясняется исключением из схемы генератора громоздких соленоидов, необходимых для создания сильного магнитного поля. За счет этого из схемы электропитания исключаются системы питания, синхронизации и охлаждения соленоидов.

ЛИТЕРАТУРА

1. СВЧ энергетика /под ред. Э. Окресса. Т. 1. М.: «Мир». 1971.
2. Сушков А. Д. Вакуумная электроника. Физико-технические основы. /А.Д.Сушков. СПб.: Лань, 2004.

3. Пат. 2143767 Россия, МПК⁶ Н 01 J 25/50 Магнетрон для СВЧ нагрева /Адамович В.А., Еремин В.П., Перовский Э.В., Старец Я.А.; ЗАО «ОКБ Тантал». – № 98110452/09; Заявл. 02.06.1998; Опубл. 27.12.1999, Бюл. № 36.

4. Пчелинцев Г.А. Перспектива применения клистронов для целей СВЧ энергетики /Пчелинцев Г.А., Сальникова Д.А., Царев В.А. // Радиотехника и связь: Саратов, 18–20 мая, 2005: Радиотехника и связь 2005. Материалы Междунар. науч.-техн. конф. Саратов: СГТУ, 2005. С. 382–385.

5. Ю.Р. Бесов, И.И. Зильберман, Г.И. Каяльянц, В.Н. Муратов, Г.С. Петров, В.А. Савминский, А.А. Тув, М.А. Харит Усилительные клистроны Объединения «Светлана» // Радиотехника (Москва). – 2000. – №2. – С. 4–8. – Рус.; рез. англ.

6. 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 – 4005.

7. Информация по зарубежной электронной технике. Вып. 4 (61), – М., 1989. С. 12–13.

8. Прист Д.Х. Клистрод – необычайно мощная лампа, потенциально пригодная для ТВ-вещания в УВЧ-диапазоне / Д.Х.Прист //ТИИЭР. Т.70. 1982. С.84–92.

9. Пат. GB № 2277193 А1. кл. Н01 J 23/26 Электронный СВЧ-прибор О-типа. /Sobieradski E.S. Опубл. 19.10.1994 г.

10. Пат. RU № 2152102 С1, МКП. Н01 J 23/26 Электровакuumный прибор СВЧ, ИСТРОН, /Лопин М.И. и др. Опубл. 27.06. 2000г.

11. Пат. 2084042 RU МКП Н01 J 25/02//Н01 J 25/04. Клистрод/А.Ю. Мирошниченко, В.А. Царев; Сарат. гос. техн. ун-т (Россия). Опубл. В БИ. №19. 10.10.1997 г.

12. 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., АПЭП-2002. Саратов, 18–19 сент., 2002. Саратов: СГТУ, 2002. С. 128–136.

13. Майорова М.В. Перспективы создания многолучевого однорезонаторного клистрода для систем равномерного объемного нагрева /Майорова М.В. //Функциональные электродинамические системы и устройства, линии передачи СВЧ: Межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ, 1999. С.14–18.

14. RU (11)2 144 239 (13)С1. Генератор энергии микроволновой частоты/ Дзае-Су Ким (KR), Хонг-ву Ли (KR) (Дэу Электроникс Ко., Лтд. (KR)). - № 97122331/09; Заявл. 26.12.1997.

15. A. Zolfghari, P. MacGibbon, B. North. Comparizon of klystron and inductive output tubes (IOT) vacuum-elect5ron deviceez for RF amplifier serivice in free-electron laser

16. Пчелинцев Г.А., Сальникова Д.А., Царев В.А. Перспектива применения клистронов для целей СВЧ энергетики// Радиотехника и связь: Материалы Междунар. науч.-техн. конф., Саратов 18–20 мая, 2005. Саратов: СГТУ, 2005. С. 382–385.

17. Фомичев К., Юдин Л.// Электроника: Наука, технология, бизнес. 1999. № 6. С. 40.

Царев Владислав Алексеевич –

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

Яковлева Ирина Борисовна –

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

Сальникова Дина Анатольевна –

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

Кузнецов Роман Юрьевич –

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

УДК 538.3:51

И.Н. Антонов, А.Г. Лавкин, М.Б. Мысенко

О РАСПАДЕ СИСТЕМЫ НЕЛИНЕЙНО-СВЯЗАННЫХ ЧАСТИЦ ВО ВНЕШНИХ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ПОЛЯХ

Диффузионный (хаотичный) механизм распада системы нелинейно-связанных частиц в высокочастотных полях исследован методами сечений Пуанкаре и максимальных ляпуновских показателей. Полученные результаты представляют интерес для электродинамики процессов диссоциации атомов и молекул, образования электрон-позитронных пар и распада ядерных систем во внешних высокочастотных полях.

I.N. Antonov, A.G. Lavkin, M.B. Misenko

ABOUT DISINTEGRATION OF SYSTEM OF THE NONLINED-CONNECTED PARTICLES IN EXTERNAL HIGH-FREQUENCY FIELDS

Diffusion (chaotic) mechanism of disintegration of system of the nonlined-connected particles in high-frequency fields is investigated by methods of sections of Poincare and maximal liapunov's parameters. The received results are of interest for electrodynamics (electrochanges) of processes dissothiathion atoms and molecules, formation (education) electron-positron pairs and disintegration of nuclear systems in external high-frequency fields.

Диффузионный (хаотичный) механизм распада системы нелинейно-связанных частиц в интенсивных внешних полях достаточно подробно исследован для высоковозбужденных атомов водорода в СВЧ диапазоне [1–4].

При этом электрон в атоме водорода движется согласно классической механике. Нелинейные осцилляции электрона в атоме водорода хаотичны и в достаточно сильном СВЧ поле наблюдается диффузионная ионизация атомов водорода – энергия электронов повышается медленно, и время ионизации атома водорода много больше периода вращения электрона на орбите.

Диффузионная ионизация максимальна в поле с напряженностью $E_c \sim \Omega_n / (w n^4)$ ($\Omega_n = n^{-3}$ – частота движения электрона по орбите). E_c является функцией частоты w и поляризации СВЧ поля и зависит от параметров внешних статических полей [3]. Величина E_c минимальна при $w \sim \Omega_n$. При более низких частотах $w \ll \Omega_n$ диффузионная ионизация мала и преобладает туннельный механизм ионизации. Напротив, при $w \gg \Omega_n$ наблюдается механизм многофотонной ионизации. Время ионизации атома по каналам туннельного и много-

фотонного механизмов много меньше периода движения электрона по орбите.

Для молекул диффузионная диссоциация также наблюдается в поле ИК лазера ($\lambda \sim 3500$ нм, $\tau \sim 1$ пс) [4].

Аналогичные эффекты, по-видимому, имеют место и для ядерных систем и их исследование представляет интерес в связи с планируемыми экспериментами на пучке гамма-лазера ($\lambda \sim 0,1$ нм, $\tau \sim 80$ пс) [5, 6].

В данной работе изучается диффузионный механизм распада двухнуклонной системы в поле гамма-лазера, определена зависимость скорости распада системы от интенсивности и поляризации (P) лазерного излучения, от энергии колебаний (E_v^0) и вращения (E_r^0) в рамках простой модели системы ядерных частиц.

Уравнения движения нуклонной системы в (x, y) – плоскости, нормальной к волновому вектору поля гамма-лазера, имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \mu \ddot{r} &= \mu \dot{\theta}^2 r - \frac{dU}{dr} + q(E_x \cos \theta \cos wt + E_y \sin \theta \sin wt) \\ \mu r \ddot{\theta} &= -2\mu \dot{\theta} \dot{r} - q(E_x \sin \theta \cos wt - E_y \cos \theta \sin wt) \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь точкой обозначена производная по времени, $\mu = M_p$ и $q = 0,8 \cdot 10^{-10}$ CGSE – эффективная масса и заряд нуклонов, r – расстояние между нуклонами (равновесное значение составляет $r_e = 1,29 \cdot 10^{-6}$ нм), w и E – частота и напряженность электрического поля гамма-лазера (поляризация излучения определяется как $P = E_y/E_x$), θ – фаза вектора \vec{r} , U – нелинейный межнуклонный потенциал (типа потенциала Морзе) с глубиной $D = 2,0$ MeV.

Уравнения движения нуклонной системы (1) решались численно, при этом частота лазерного излучения w выбиралась равной характерной частоте колебаний нуклонной системы $w_{ve} = 2,2 \cdot 10^6$ ТГц. Скорость диффузионной диссоциации оценивалась по времени τ увеличения межнуклонного расстояния (в момент распада системы) до удвоенного равновесного значения.

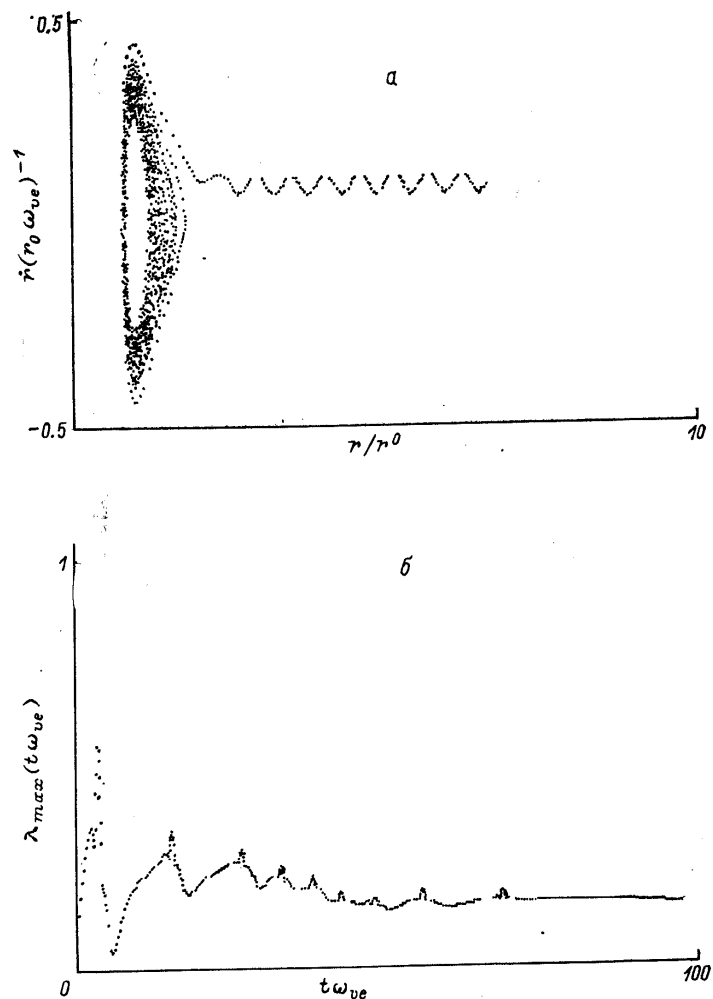
На рис. а представлена $(r, dr/dt)$ -диаграмма нуклонной системы, диссоциирующей в поле линейно поляризованного излучения. Здесь и далее энергия колебаний и вращения системы нуклонов положительна и отсчитывается от нулевого значения. Из рис. а видно, что траектория нуклонной системы не описывается регулярной кривой. Предельное множество сечения Пуанкаре [2] является подмножеством этой нерегулярной диаграммы и это позволяет сделать вывод о хаотичности динамики нуклонной системы. Об этом же свидетельствует и положительное значение максимального ляпуновского показателя (рис. Б).

Численное моделирование показывает, что время диссоциации нуклонной системы составляет $\tau \sim (50-100)/w_{ve}$ и имеет пороговую зависимость от интенсивности излучения. Так, для линейно поляризованного излучения ($E_v^0 = 1,3$ MeV, $E_r^0 = E_v^0 \cdot 10^{-5}$) пороговое значение напряженности электрического поля излучения имеет величину $E_c \sim 1,2 \cdot 10^{13}$ V/m.

Расчеты также, что время τ диссоциации нуклонной системы имеет пороговую зависимость от начальной энергии колебаний $E_v^0 \sim 1,1$ MeV и вращения нуклонной системы $E_r^0 \sim 0,01$ MeV (известный эффект гироскопической стабилизации), от эллиптичности поляризации лазерного излучения $P \sim 0,48$.

Таким образом, в данной работе методами численного моделирования показано, что скорость диффузионной диссоциации нуклонной системы в поле гамма-лазера имеет пороговую зависимость от интенсивности излучения, начальной энергии колебаний и вращения

нуклонной системы и уменьшается по мере перехода от линейной поляризации излучения к циркулярной.



Неустойчивость нуклонной системы: а – $(r, dr/dt)$ -диаграмма нуклонной системы, диссоциирующей в поле линейно поляризованного лазерного излучения; б – временная зависимость инкремента неустойчивости нуклонной системы, диссоциирующей в поле эллиптически поляризованного лазерного излучения ($P = 0,23$)

ЛИТЕРАТУРА

1. Делоне Н.Б. Успехи физических наук / Н.Б. Делоне. М., 1983. Т. 140. С. 355.
2. Заславский Г.М. Введение в нелинейную физику / Г.М. Заславский, Р.З.Сагдеев. М., Наука, 1988.
3. Halard F. Physical Reports. / F. Halard. 1989. V.183. N 2. P.37.
4. Летохов В.С. Нелинейные волны /В.С. Летохов; ред. М.И.Рабинович. М.: Наука, 1989. С.288.
5. Болотин Ю.Л. Физика элементарных частиц и атомного ядра / Ю.Л. Болотин, М., 1989. Т. 20. С. 878.
6. Alkofer R. Phys. Rev. / R. Alkofer, et al Lett. 87 (2001) 193902.

Антонов Игорь Николаевич –

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

Лавкин Александр Георгиевич –

доктор физико-математических наук, доцент кафедры «Теоретическая и математическая физика» Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского

Мысенко Михаил Борисович –

старший преподаватель кафедры «Теоретическая и математическая физика» Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского

УДК 553.9.072

И.Н. Антонов, К.А. Чижов, А.Н. Чернышов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ПЛАЗМЫ

Рассмотрен электрический разряд в канале с испаряющимися стенками (эрозионный разряд) и эрозионный разряд на поверхности воды. Описана экспериментальная установка для получения эрозионной плазмы. Показаны возможность создания плазменных образований в форме плазменной струи и шара. Исследованы процессы взаимодействия эрозионной плазмы с различными материалами.

I.N. Antonov, K.A. Chizhov, A.N. Chernishov

EXPERIMENTAL INSTALLATION FOR RECEPTION OF ELECTROEROSIVE PLASMA

The electric discharge in the channel with evaporating walls (the erosive discharge) and the erosive discharge on a surface of water are considered. Experimental installation for reception of erosive plasma is described. An opportunity of creation of plasma formations in the form of a plasma jet and a sphere are shown. Processes of interaction of erosive plasma with various materials are investigated.

Импульсный электрический разряд внутри канала с испаряющимися стенками (эрозионный разряд) исследовали достаточно подробно, с целью создания, например, высокотемпературных эталонных источников излучения, получения долгоживущих плазменных образований, сверхзвуковых плазменных струй. С помощью эрозионного разряда получены энергоемкие плазменные образования (ЭПО) с необычным сочетанием свойств. ЭПО имеют плотность, близкую к плотности окружающего воздуха, низкую газовую температуру, слабую интенсивность излучения, высокую плотность энергии, высокую концентрацию заряженных частиц; отличаются избирательным воздействием на материалы, стремлением сохранить сполу целостность при встрече препятствий, возможностью автономного существования аномально долгое время по сравнению с идеальной плазмой. Однако отмеченные особенности плазменных образований очень

чувствительны к небольшим изменениям геометрии разрядника и электрической схемы разрядного контура.

Подобный набор свойств встречается при описании наблюдений за шаровыми молниями, поэтому полученные ЭПО можно рассматривать в качестве лабораторного аналога шаровой молнии.

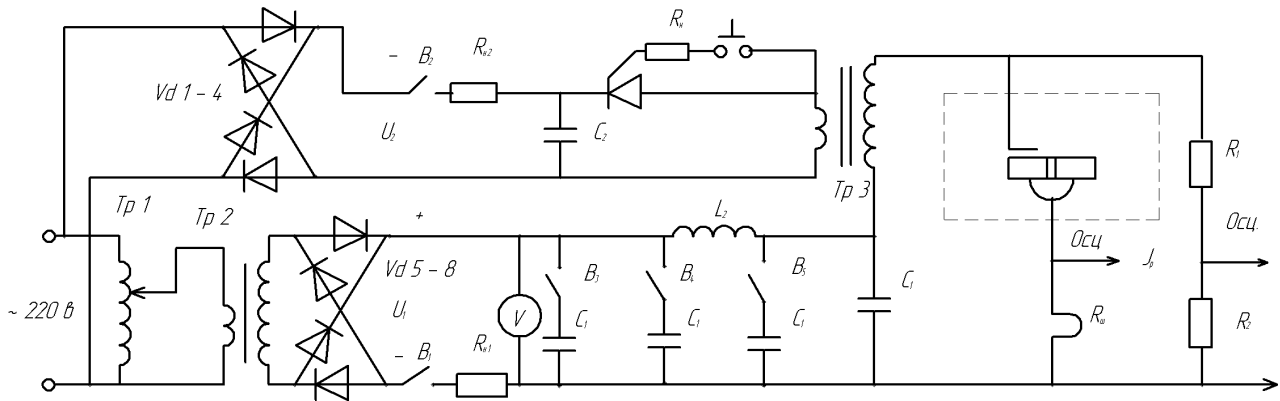


Рис. 1. Упрощенная принципиальная схема установки

Для получения ЭПО использован импульсный генератор плазмы. Электрическая энергия запасается в конденсаторах C_1 (20 мкФ, 4 кВ), которые разряжаются при пропускании через канал поджигающего импульса от конденсатора C_2 (5 мкФ, 400 В) через повышающий трансформатор ТР 3.

В разрядную цепь введены индуктивности L_1 и L_2 для обеспечения требуемой формы и длительности разрядного импульса. Тиристор цепи поджига позволяет синхронизировать работу генератора и измерительной аппаратуры. Электрический импульс на открывание тиристора подается ключом Кн, через сопротивление R_H . Конденсаторы C_1 и C_2 заряжаются при замыкании ключей B_1 и B_2 соответственно через нагрузочные сопротивления R_{H1} R_{H2} . Конденсатор C_1 заряжается от источника питания, выполненного на основе повышающего трансформатора от бытовой СВЧ печи с номинальным напряжением 3,5 кВ. C_2 заряжается выпрямленным сетевым напряжением. Повышающий трансформатор включен в сеть через ЛАТР для возможности регулирования напряжения заряда конденсатора C_1 и соответственно энергии, запасенной в нем. Напряжение зарядки U конденсаторов C_1 контролируется вольтметром, разрядный ток I_p регистрируется электронным осциллографом с помощью бифилярного шунта с сопротивлением $R_{ш}$, а разрядное напряжение U_p – с помощью делителя напряжения (R_1 R_2).

Особенность разрядного тока состоит в плавном его росте: скорость нарастания не должна превышать -10^5 А/с, а продолжительность нарастания должна составлять примерно половину длительности разряда. Скорость нарастания тока должна быть такой, чтобы успевало установиться дозвуковое ламинарное истечение продуктов разрушения при равномерном уносе материала стенок канала и асимметричном распределении разрядного тока (в течение всего времени разряда) в канале [1].

Вводимая в разряд мощность на единицу объема канала не должна превышать 5 МВт/см^3 при среднем удельном расходе продуктов разрушения диэлектрической стенки $20 - 50 \text{ г/см}^2\text{с}$. Если вводимая мощность выше 5 МВт/см^3 или расход продуктов разрушения более $50 \text{ г/см}^2\text{с}$, то плазменное образование не формируется, так как из ламинарного переходит в турбулентное. При малом удельном расходе продуктов разрушения ($<10 \text{ г/см}^2\text{с}$) длина плазменного образования существенно уменьшается.

При разряде генератора в атмосфере сухого воздуха и газов (аргон, гелий) на выходе разрядного канала возникает светящееся цилиндрическое образование с заостренным концом и четко различимыми световыми границами. Диаметр светящейся зоны ЭПО составляет 6 – 10 м, длина – 400 мм [1, 2].

В отличие от обычных газовых струй ЭПО не обнаруживает следов расходимости при распространении в газе. Цвет плазменного образования зависит от внешней среды: в воздухе ЭПО имеет голубой опенок, в гелии и аргоне – бирюзовый. Описанная форма ЭПО сохраняется при генерации его в воздухе под давлением от 10 атм ($10,1325 \cdot 10^5$ Па) до 25 мм рт.ст. ($3,3310^3$ Па) [1, 2].

При генерации разряда в воздухе, содержащем мелкодисперсный водяной аэрозоль, наблюдается появление автономного (отделенного от генератора) плазменного образования (АПО), имеющего форму, близкую к сферической или тороидальной. Особенность такого образования – движение в воздухе с сохранением формы и размеров (без расширения и расплывания). АПО после окончания разряда существует некоторое время (~ 3 мс), аномально долгое для идеальной плазмы.

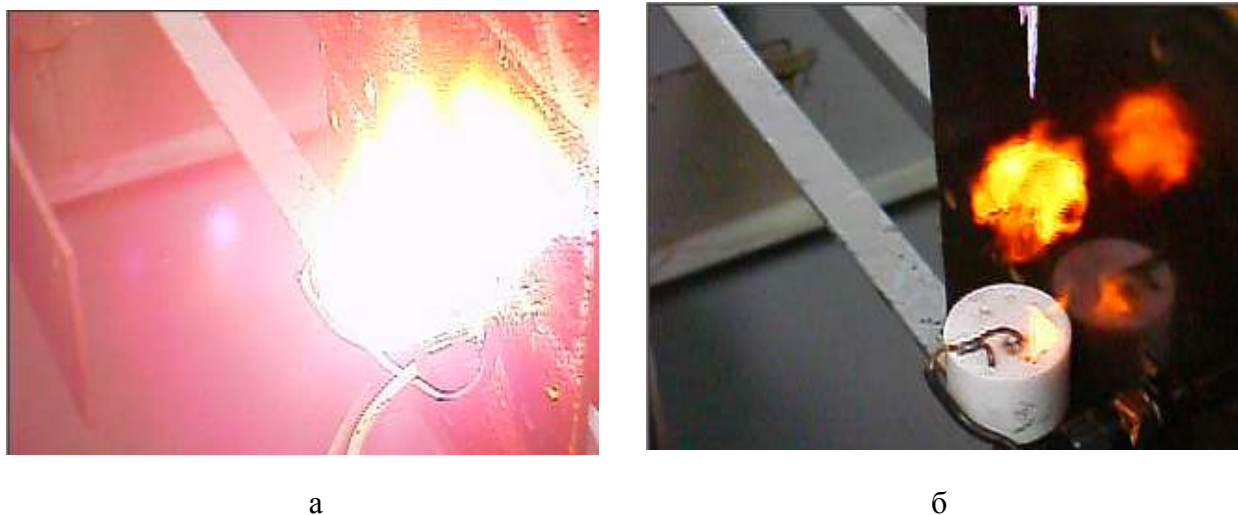


Рис. 2. Разряд при добавлении в канал частиц NaCl: а – формирование плазменной струи, б – отделение шарообразного АПО

АПО можно также получить, если вблизи от разрядника перпендикулярно оси разрядного канала расположить нить, смоченную раствором легко ионизируемого вещества, например NaCl. Форма АПО в этом случае близка к цилиндрической, а период существования после окончания разряда возрастает до ~ 6 мс [2].

Разрядные камеры

В экспериментальной установке использованы сменные разрядные камеры двух типов:

- 1) для получения долгоживущих плазмоидов – эрозионный разряд на поверхности воды;
- 2) для получения ЭПО типа «плазменная струя» – эрозионный разряд в канале с испаряющимися стенками.

Разрядные камеры первого типа (рис.3) представляют собой полиэтиленовый сосуд диаметром 18 см, который наполняется на 15 см слабо проводящей водопроводной водой. На дне сосуда находится кольцевой медный электрод, соединенный изолированной медной шиной с одним полюсом конденсаторной батареи. Второй полюс батареи соединяется с цилиндрическим электродом, расположенным в центре сосуда у поверхности воды. В качестве центрального электрода использовался угольный электрод из гальванического

элемента типа С (R14) диаметром 6,5 мм. Керамическая трубка, которая окружала центральный электрод, возвышалась над ним на 2 – 4 мм и над поверхностью воды на 3 – 8 мм.

Для получения искусственной шаровой молнии на центральный электрод из угля наносили 2 – 3 капли (примерно 0,1 мл) воды. При подаче поджигающего импульса из центрального электрода с легким хлопком вылетает плазменная струя, от которой отделяется автономный светящийся плазмоид. Он медленно всплывает в воздухе и через 0,2 – 0,5 с исчезает, распадаясь на части.

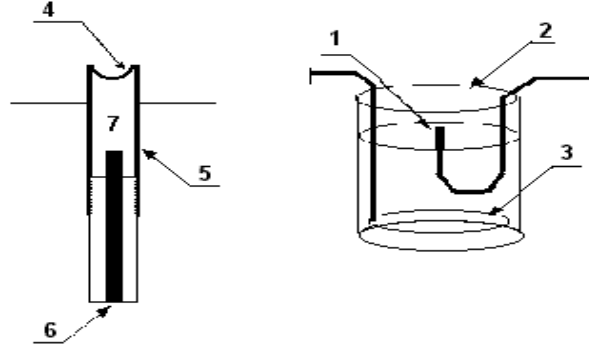


Рис.3. Конструкция электродов для получения долгоживущих плазмоидов: 1 – центральный электрод; 2 – полиэтиленовая емкость; 3 – кольцевой электрод; 4 – капля воды или водной суспензии; 5 – керамическая трубка; 6 – медная шина; 7 – угольный или металлический электрод [6]

Разрядные камеры второго типа (рис.4) представляют собой брусок или цилиндр из диэлектрика. В качестве диэлектрика использовались фторопласт и склеенные вместе пластинки оргстекла. В центре диэлектрика просверлено отверстие, в которое внатяг вставлены керамическая трубка и угольный электрод. Трубка должна очень плотно прилегать к стенкам отверстия, так как во время разряда на нее действуют значительные динамические усилия, и она может расколоться или выскочить из отверстия. К выходу трубки подведен металлический анод. Перед проведением разряда на внутреннюю поверхность трубки наносится несколько капель воды. При подаче поджигающего импульса происходит пробой пространства в трубке и из отверстия вылетает плазменная струя с характерным хлопком.

Был изготовлен набор сменных разрядных камер с различными внутренними диаметрами трубок и различной длиной для изучения влияния этих параметров на форму получаемых ЭПО.

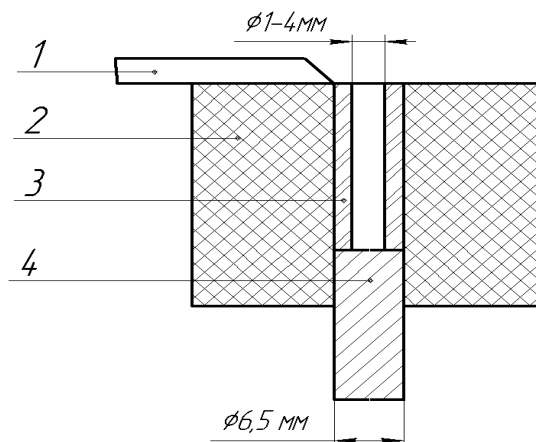


Рис. 4. Конструкция электродов для получения ЭПО типа «плазменная струя»:

1 – металлический (медный) анод; 2 – диэлектрик (фторопласт или оргстекло);
3 – керамическая трубка; 4 – угольный катод

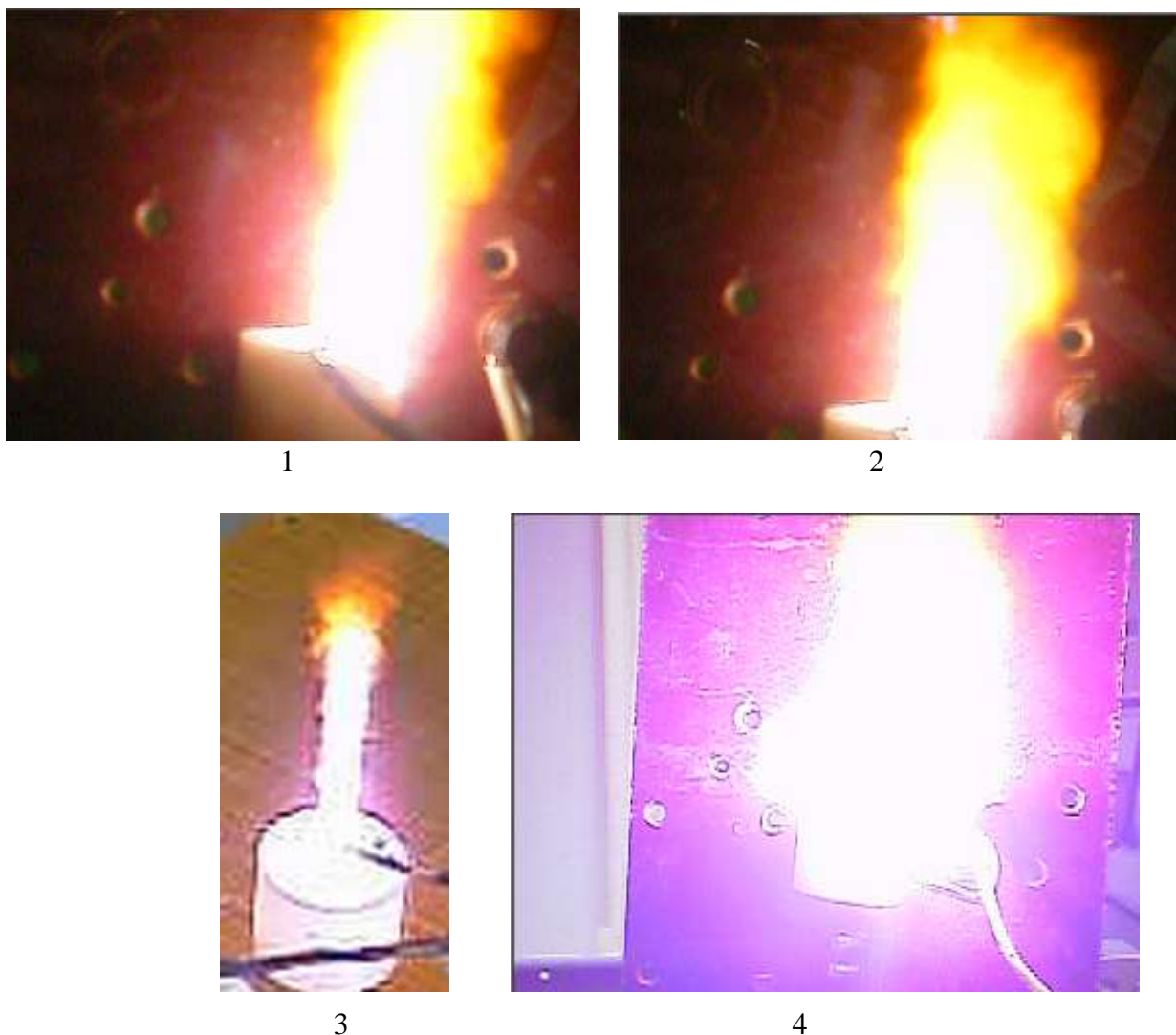


Рис. 5. Формирование плазменной струи

Свойства ЭПО (АПО)

Обнаружен ряд аномальных свойств энергоемких плазменных образований, к которым прежде всего можно отнести следующие:

- ЭПО слабо увлекаются газовым потоком (даже при сверхзвуковых скоростях последнего);
- во время движения ЭПО не возмущают за собой газ;
- ЭПО «обволакивают» движущиеся объекты, для них, похоже, не существует отрывных, застойных, теневых зон;
- ЭПО легко проникают в узкие щели, причем из двух близко расположенных щелей в экране предпочитают только одну (что подтверждается экспериментами Р.Ф. Авраменко и В.И. Николаевой);
- ЭПО могут исчезать в одном месте пространства и одновременно возникать в другом (рис. 2 б, рис. 6), при этом происходит перекачка энергии от одного плазмоида к другому;

- скорость распространения звуковых возмущений в ЭПО значительно превосходит скорость звука в газе и может достигать 1600 м/с;
- плазма внутри ЭПО достаточно холодная, менее 1000 К;
- ЭПО селективно воздействуют на различные материалы, причем практически не влияют на диэлектрики, но прожигают тонкие металлические листы, оставляя в них отверстия.

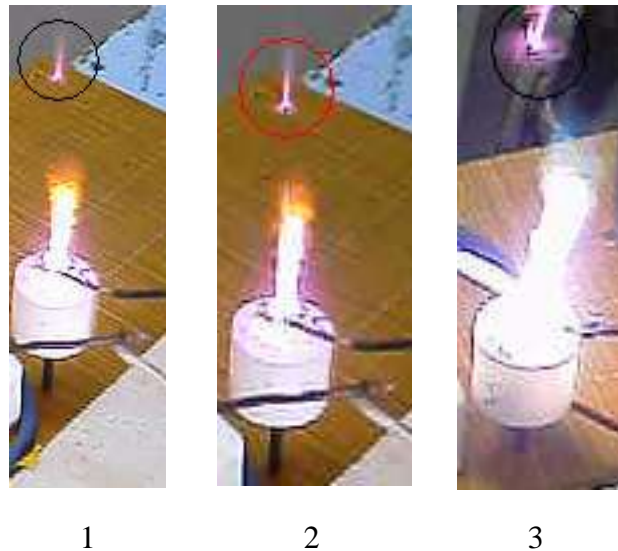


Рис. 6. Разделение ЭПО

Представленный перечень аномальных свойств ЭПО роднит их с природными шаровыми молниями.

Из экспериментов, проводившихся авторами работ [1, 2], известно, что в отличие от обычных газовых струй, ЭПО не обнаруживает следов расходимости при распространении в газе, скорость движения светящейся головной части ЭПО лежит в пределах 60 – 100 м/с. Цвет плазменного образования зависит от внешней среды: так, например, в воздухе ЭПО имеет голубой оттенок, в гелии и аргоне – бирюзовый.

При генерации разряда в воздухе, содержащем мелкодисперсный водяной аэрозоль, наблюдается появление автономного (отделенного от генератора) плазменного образования (АПО), имеющего форму, близкую к сферической или тороидальной (рис. 3). Особенность такого образования – движение в воздухе с сохранением формы и размеров (без расширения и расплывания). АПО после окончания разряда существует некоторое время (~ 3 мс), что аномально долго для идеальной плазмы [1].

Необычные результаты получены авторами работы [1] при измерении лучистых потоков ЭПО. Максимальная мощность излучения в диапазоне длин волн λ -- 0,2+10 мкм оказалась незначительной (~30 Вт). За период разряда ЭПО излучает не более 1% содержащейся в нем энергии при запасенной энергии порядка 50 Дж, причем почти половина измеренной энергии обусловлена излучением ЭПО в инфракрасной области спектра, причем ИК излучение ЭПО в воздушной среде продолжается после окончания разряда еще в течение 10 мс. Видимое же излучение наблюдается только во время разряда.

Одна из необычных особенностей ЭПО – его избирательный характер воздействия на материалы. Электропроводные материалы интенсивно разрушаются, тогда как диэлектрики подвергаются относительно слабому тепловому воздействию. Так, при прожиге тонкой мишени $d = 0,025$ мм ЭПО легко проходит через нее, при более толстой мишени ($d = 0,1$ мм)

виден взрывной характер процесса. Продукты разрушения в виде светящихся частиц разного размера уносятся в направлении распространения ЭПО. Таким образом, ЭПО взаимодействует с металлами очень интенсивно. В случае еще более толстых ($d > 1$ мм) мишеней из электропроводных материалов прожига не наблюдалось [1, 2].

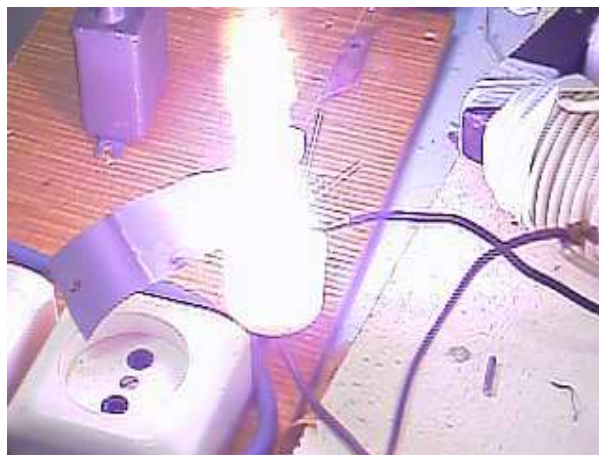
Проженные отверстия имеют круглую форму. Прожиг металла начинается с центральной части, где удельная мощность плазменного луча достигает $5-10^4$ Вт/см².

Воздействие ЭПО на некоторые диэлектрические материалы – бумагу, фторопласт, поливинилхлорид: ЭПО не прожигает бумагу толщиной 0,1 мм, приставленную вплотную к разряднику, оставляет след в виде легкого обугливания поверхности мишени. Фторопластовая пленка толщиной 0,1 мм нагревается, слабо деформируется, но не прогорает. На пленке из поливинилхлорида следы воздействия ЭПО выглядят следующим образом: центральная часть имеет очень слабый налет копоти, далее идет кольцо желтоватого цвета, затем светлое кольцо и, наконец, более темное кольцо копоти с размытыми внешними границами.

Таким образом, ЭПО интенсивно воздействует на электропроводные материалы и оказывает слабое тепловое воздействие на диэлектрические материалы, причем основной механизм нагрева и разрушения испытуемых металлических образцов, по-видимому, не связан с конвективной теплопередачей [1].



1



2

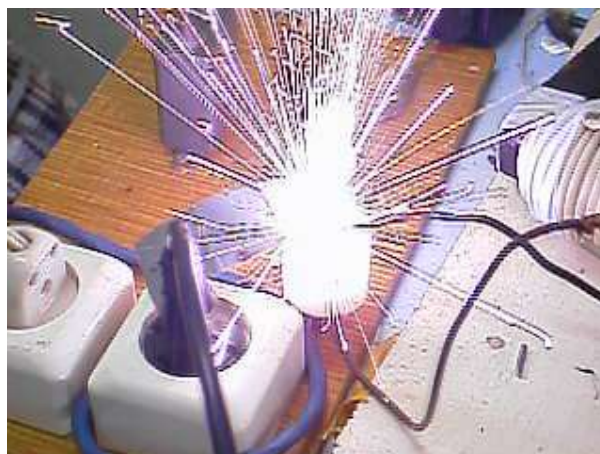


Рис. 8. Взаимодействие плазменной струи с металлической пластинкой $d = 0,15$ мм
Планируется исследование взаимодействия ЭПО с полупроводниковыми материалами.

Заключение

Целью работы является разработка и испытание экспериментальной установки для получения электронно-эрозионной плазмы. При этом использованы материалы работ [1, 6]. Установка может быть использована для получения не только ЭЭП, но и для генерации долгоживущих плазменных образований (лабораторного аналога шаровой молнии). Были проведены эксперименты по получению электроэрозионной плазмы и по её взаимодействию с материалами различной природы (проводники и диэлектрики).

В ходе дальнейшего развития работы планируется проведение экспериментов по взаимодействию ЭЭП с полупроводниковыми материалами. Возможно использование полученных результатов в практических целях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авраменко Р.Ф. Энергоемкие плазменные образования, инициируемые эрозионным разрядом, – лабораторный аналог шаровой молнии /Р.Ф.Авраменко, В.П.Николаева, Л.П.Поскачеева // Шаровая молния. 1994.
2. Авраменко Р.Ф. Экспериментальное изучение энергоемких контактных плазменных образований /Р.Ф.Авраменко, А.Ю.Гридни, А.Л.Климов, В.П.Николаева // Шаровая молния. 1994.
3. Климов А.Л. Долгоживущие энергоемкие возбужденные образования и плазмойды в жидком азоте /А.Л.Климов, Д.А.Мельниченко, И.П.Суковаткин // Шаровая молния. 1994.
4. Возникновение светящихся образований при взаимодействии факела капиллярного разряда с водой и жидким азотом /С.К. Димитров, С.К.Жданов, Д.Л.Кирко, К.Н.Коротаев, А.А.Мартынов, А.Ф.Окатрин, А.С.Савелов, И.В.Самончев, В.М.Смирнов // Шаровая молния. 1994.
5. Некоторые условия образования неидеальной плазмы эрозионного разряда /С.Е. Емелин, В.С.Семенов, А.П.Эйквальд, А.К.Хассани // Шаровая молния. 1994.
6. Моделирование шаровой молнии с помощью электрического разряда через поверхность слабого водного раствора /С.Е.Емелин, А.Л.Приозерский, С.И.Степанов, В.Л. Бычков

Антонов Игорь Николаевич –

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

Чижев Константин Александрович –

студент V курса специальности ЭТС кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета

Чернышов Алексей Николаевич –

студент V курса специальности ЭТС кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета

УДК 699.8.86

Д.А. Давыдов

ПОЛУЧЕНИЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ЖИДКОГО СТЕКЛА НА ОСНОВЕ СВЧ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАГРЕВА

Объектом исследования является теплоизоляционный материал на основе жидкого стекла, широко применяемый в строительной промышленности. Рассматривается возможность получения теплоизоляционного материала на основе жидкого стекла методом СВЧ диэлектрического нагрева. Проводится сравнительный анализ эффективности традиционного и СВЧ нагрева.

D.A. Davidov

RECEIVING THE WARMISOLATION MATERIAL ON LIQUID GLASS BASING ON MICROWAVE DIELECTRICAL HEATING

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 warmlyisolation a material, his physicomechanical properties are investigated, and also necessary parameters for his reception are defined.

Развитие рыночных отношений в экономике России вызвало быстрый и значительный рост цен на все виды энергоносителей. Это, в свою очередь, привело к существенному увеличению затрат на строительство за счет удорожания строительных материалов и конструкций и на эксплуатацию зданий.

Значительное снижение энергозатрат как при производстве строительных материалов и конструкций, так и при эксплуатации зданий – важная задача, стоящая перед строительным комплексом России. Одним из основных путей решения данной задачи является существенное повышение термического сопротивления ограждающих конструкций вновь строящихся и существующих зданий и сооружений.

Анализ данных показывает, что при проектировании необходимо ориентироваться не только на типы утеплителей и конструктивно-теплоизоляционных материалов импортного производства, но и на отечественные теплоизоляционные материалы с учетом технико-экономического сравнения по параметрам стоимости, теплотехнических свойств и долговечности.

Расчеты и практика строительного проектирования показали, что эффективным в России может считаться теплоизоляционный материал, теплопроводность которого не превышает $0,09 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$

С учетом достижений в развитии фундаментальных положений в области современного материаловедения создание новых эффективных теплоизоляционных и стеновых материалов из композиционных составов, отвечающих требованиям по теплозащите зданий и сооружений, является приоритетным.

В данной работе рассматривается вариант производства гранулированного теплоизоляционного материала на основе жидкого стекла и связующего (опока, песок, кремнезем) методом СВЧ нагрева.

Жидкие стекла обладают вязкими свойствами, хорошей адгезией ко многим материалам, малым поверхностным натяжением, защитными антикоррозионными свойствами, и др. Это вязущее используется в качестве связующего в композиционных строительных материалах различного назначения. Однако сравнительно малая водостойкость и относительно низкая прочность материалов на основе жидкого стекла являются сдерживающими факторами их более широкого применения. Разработки в области направленного регулирования структурообразования и свойств композиций на основе водных растворов щелочных силикатов требуют своего развития. Учитывая распространенность в Поволжском регионе кремнистых пород, являющихся потенциально перспективными сырьевыми материалами в производстве строительных изделий, становится необходимым решение вопросов научно-практической направленности по разработке композиций на основе жидкого стекла связующего и кремнеземсодержащего наполнителя для получения гранулированного термовспученного материала, обладающего эффективными теплоизоляционными свойствами.

Производство материала включает следующие технологические этапы: перемешивание компонентов (жидкого стекла и наполнителя); частичная дегидратация полученной сырьевой композиции (подвяливание); диспергирование (гранулирование) смеси; термическая обработка (вспучивание) материала.

С точки зрения возможности использования СВЧ обработки при получении подобного материала наиболее перспективно его применение на этапе термической обработки. Для определения перспективности такого направления было проведено исследование, в ходе которого термическая обработка материала проводилась традиционным способом (в муфельной печи при температуре обжига 550 – 600 °С) и в СВЧ установке мощностью 850 Вт с частотой 2450 МГц. Полученные результаты приведены в таблице.

Физико-механические свойства теплоизоляционных гранулированных материалов на основе жидкого стекла

Способ термообработки	Средняя насыпная плотность, г/см ³	Предел прочности на сжатие в стандартном цилиндре, МПа	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·°С)
Муфельная печь (5 – 7 мин)	210	0,63	0,057
СВЧ установка (1 – 2 мин)	220	0,77	0,06

При этом в ходе анализа структурных изменений, возникающих при различных способах термической обработки материала, установлено следующее.

Образцам, подвергнутым термообработке конвекционным способом (в муфельной печи), присуща структурная неоднородность по глубине (объему) образца, что наглядно демонстрируют данные интенсивностей аналитического рефлекса, характеризующего основное

структурообразующее соединение – SiO_2 . В этом случае на дифрактограммах наблюдается постепенное перераспределение интенсивностей полос поглощения, а именно: увеличение интенсивности соединения низкотемпературного $\beta\text{-SiO}_2$ (с температурой устойчивости менее 575°C) по направлению от поверхностного слоя сферы гранулы к ее центру, с одновременным уменьшением интенсивности рефлекса, характеризующего более упорядоченное, с точки зрения кристаллографии, структурное образование низкотемпературного $\alpha\text{-SiO}_2$ (с температурой устойчивости $575 - 870^\circ\text{C}$).

При рассмотрении дифрактограмм срезов гранул, полученных при термообработке в СВЧ установке, можно отметить, что структура материала отличается большей однородностью по объему материала, причем соединения кварца в этом случае характеризуются большей упорядоченностью структуры.

Повышение времени обработки материала в СВЧ установке практически не вызывает каких-либо значительных изменений структуры материала.

Повышение времени термообработки в муфельной печи практически не приводит к увеличению интенсивности пиков кристаллических образований. Напротив, отмечается разрушение (появление трещин) поверхностного слоя гранул, что, наиболее вероятно, связано с продолжением процесса дегидратации (удаления свободной влаги) из глубинной части объема гранул.

Кроме того, при исследовании материала, подвергнутого СВЧ обработке, на дифрактограммах отмечены рефлексы, характеризующие цеолиты, предположительно – $\text{Na}_8[(\text{Al}_2\text{O}_3)_8(\text{SiO}_2)_{40}]_{24}\text{H}_2\text{O}$ – цеолит-модернит, габитус – листовидные или волокнистые кристаллы. Наличие в структуре игольчатых кристаллов – фибрилл, возникающих в результате «распираания» агрегатов структуры изнутри, при увеличении объема гранул и их рекристаллизации. Такие образования по своей сути представляют собой объемные перемычки, выполняющие роль структурообразующего каркаса, воспринимающего внешние механические воздействия, чем можно объяснить повышенные физико-механические характеристики материала, подвергнутого СВЧ обработке.

Таким образом, можно выделить ряд основных преимуществ использования СВЧ обработки по сравнению с традиционным способом (в электрических печах сопротивления) прогрева в печи:

- уменьшение длительности процесса термообработки;
- материалы, подвергшиеся СВЧ обработке, отличаются более высокими физико-механическими характеристиками и большей упорядоченностью структуры;
- значительное снижение энергоемкости производства и, следовательно, себестоимости продукции.

Анализ приведенных выше результатов исследований позволяет сделать вывод о перспективности применения СВЧ нагрева для термообработки некоторых видов композиционных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Архангельский Ю.С. СВЧ электротермия /Ю.С.Архангельский. – Саратов: СГТУ, 1998.
2. Болотов А.В. Электротехнологические установки /А.В.Болотов, Г.А.Шепель – М.: Высш. шк., 1988.
3. СВЧ энергетика. Т.2. Применение энергии сверхвысоких частот в промышленности //под ред. Э. Окресса. – М., 1971.
4. Девяткин И.И. СВЧ печь для сушки керамической шихты /И.И.Девяткин и др. //Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. 1971. № 8.

Давыдов Дмитрий Алексеевич –

кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета
УДК 621.365.5

С.Г. Калганова

СОЗДАНИЕ НАУЧНЫХ ОСНОВ МОДИФИЦИРУЮЩЕГО НЕТЕПЛООВОГО СВЧ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Рассмотрены основные элементы методологии развития нового научного направления, которая показывает путь исследователя в рамках этого направления, а именно в области нетеплых воздействий СВЧ электромагнитных колебаний на полимерные материалы с целью модификации их свойств.

S.G. Kalganova

CREATION OF SCIENTIFIC BASES MODIFYING NOT THERMAL MICROWAVE OF INFLUENCE ON POLYMERIC MATERIALS

Basic elements of methodology of development of a new scientific direction which shows a way of the researcher within the limits of this direction, namely in the field of not warm influences of the microwave of electromagnetic fluctuations on polymeric materials with the purpose of updating of their properties are considered.

Появление новых или модифицированных материалов всегда становится новой вехой в развитии техники. Применение бетона в строительстве, асфальта в сооружении автомобильных дорог, полупроводников в радиоэлектронике, алюминиевых сплавов в авиастроении привели к революционным изменениям в технике. Таким образом, можно уверенно сказать, что улучшение эксплуатационных свойств изделий и конструкций, повышение их конкурентоспособности напрямую связано с использованием новых видов модифицированных материалов, в том числе полимеров.

Среди перспективных методов модификации полимеров находятся нетрадиционные способы физико-химической активации электромагнитными излучениями ИК, УФ, ВЧ и СВЧ диапазонов, магнитным полем, низкотемпературной плазмой [1–4]. Необходимость в альтернативных технологиях модификации полимеров связана в некоторых случаях с многостадийностью традиционных процессов, высокими энерго- и трудовыми затратами, экологической напряженностью производства.

В последние годы продолжается расширение области применения СВЧ технологий в разных сферах производства. СВЧ электротехнологические установки нашли широкое применение при тепловой обработке различных материалов, включая полимерные. Этот способ нагрева диэлектриков позволяет существенно интенсифицировать нагрев материалов за счет тепловыделения в материальной среде по сравнению с традиционной термообработкой, поэтому получил весьма широкое распространение [4].

В Саратовском государственном техническом университете (СГТУ) работы в области СВЧ нагрева были начаты в 1967 году по инициативе Ю.С. Архангельского. Однако основное внимание в работах в области СВЧ диэлектрического нагрева, проводимых в СГТУ, уделялось разработке теории подобного рода электротермических установок, и в меньшей мере технологическим процессам, для реализации которых они предназначены.

В то же время совершенно не исследовался все эти годы материаловедческий аспект применения СВЧ энергии в технологических целях. В лучшем случае материаловедческие вопросы решались для конкретных технических задач, но системного подхода к проблеме изучения свойств диэлектриков, побывавших в СВЧ электромагнитном поле, до сих пор нет.

В последние годы на кафедре «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» СГТУ активно проводятся исследования в принципиально новом научном направлении. Речь идет об использовании нетеплового воздействия СВЧ электромагнитных колебаний на диэлектрики, в частности на полимеры. Основанием для выполнения работы послужили отдельные разрозненные и неполные сведения о модификации свойств некоторых полимеров в результате нетеплового или, возможно, комбинированного воздействия СВЧ электромагнитного поля и имеющийся опыт проектирования СВЧ электротермических установок различных типов и назначений.

Разработка методологии исследования является важным аспектом для успешного развития нового научного направления. Методология, как любая система, отражает совокупность элементов, находящихся в отношениях и связях друг с другом, поэтому приведенная структурная схема методологии исследования (рис. 1) показывает путь исследователя в рамках нового научного направления, а именно в области нетеплых воздействий СВЧ электромагнитных колебаний на полимерные материалы с целью модификации их свойств.

Направление настоящих исследований можно определить как системное решение проблемы модификации полимерных материалов с помощью альтернативной технологии обработки в СВЧ электромагнитном поле.

Система принципов методологии базируется на описании и анализе областей наблюдения СВЧ воздействий на полимеры живой и неживой природы, их сходств и различий.

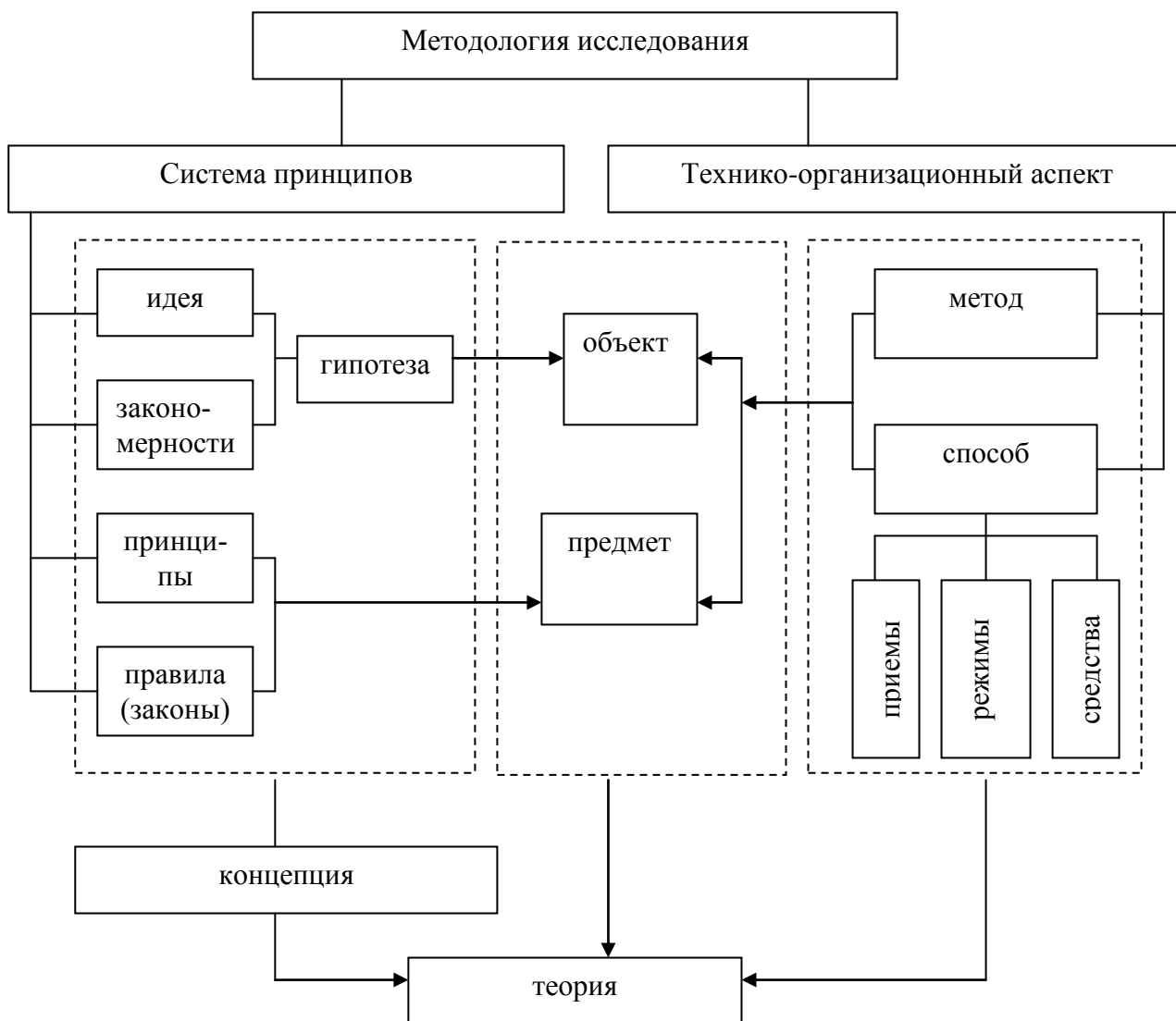


Рис.1. Методология исследования

В отличие от теплового действия СВЧ электромагнитного поля его нетепловое воздействие на диэлектрики относится, на наш взгляд, к разряду исключений.

О нетепловом действии СВЧ электромагнитных колебаний на биополимеры, описанном в работах В.И.Панасенко, В.В.Игнатова, В.М.Суминова, С.В.Некрутмана, Н.Д.Роземблюма, А.С.Прессмана и др. первыми заговорили микробиологи, биофизики и технологи пищевых производств, в связи с применением СВЧ генераторов для пастеризации (стерилизации) жидких сред, в частности молока [1 – 4].

В первых обобщающих работах обращалось внимание на необходимость детального изучения механизма воздействия СВЧ электромагнитных колебаний на бактериальную клетку, тем более что нетепловое действие СВЧ электромагнитных колебаний долгое время ставилось под сомнение некоторыми исследователями, так как по их мнению в публикациях о таком действии не содержалось полной информации об условиях экспериментов и научного обоснования этого эффекта.

Сейчас наличие нетеплового действия СВЧ электромагнитных колебаний на бактериальную клетку (на биополимеры) видимо можно считать доказанным.

Современные взгляды и механизмы биологического действия СВЧ колебаний на живые системы представлены, например, в работах Игнатова В.В., Панасенко В.И. и зарубежных авторов Stuchly M. A. и Shlinger K. H. В высокоорганизованных живых системах наблюдаются при этом только им присущие эффекты. Так, основываясь на рассмотрении дипольных и механических свойств молекул биополимеров, показана возможность возникновения колебаний в системе биологических макромолекул в диапазоне частот $10^4 - 10^{12}$ Гц, от которых у таких систем изменяются функциональные свойства. Экспериментально показано влияние импульсно-модулированных СВЧ электромагнитных колебаний на поведенческие реакции животных по сравнению с влиянием немодулированных колебаний при одной и той же средней удельной поглощаемой мощности $\sim 0,1 - 1$ Вт/см². Эти эффекты обычно рассматриваются как доказательства нетеплового действия СВЧ электромагнитных колебаний.

Исследования Девяткова Н. Д., Хургина Ю. Н., Севастьяновой Л. А., проведенные на молекулярном, клеточном и органном уровнях показали, что живые системы независимо от уровня их организации весьма чувствительны к действиям СВЧ электромагнитных колебаний миллиметрового диапазона нетепловой интенсивности, причем существуют общие закономерности биологических реакций на это действие для микроорганизмов, растений и млекопитающих. Медики впервые исследовали нетепловое влияние СВЧ колебаний на форму полимера и высокомолекулярных соединений, участвующих в сложных химических реакциях, таких как образование полимеров из мономеров, образование и разрыв химических связей.

Идея заключается в построении гипотезы существования нетеплового воздействия СВЧ электромагнитных колебаний на полимерные объекты, а также в изложении общих понятий, объясняющих логику и описывающих комплекс существующих воздействий, которые приводят к модификации свойств полимеров. Биологические объекты являются биополимерами, и их отклик на нетепловое действие СВЧ колебаний, естественно ставит вопрос о наличии такого действия на неживые органические материалы и полимеры.

Разрабатываемое новое научное направление, даже в рамках традиционных технологий, связано с обнаружением новых явлений, эффектов и т.п. Это в свою очередь ставит перед исследователями проблему терминологической базы, связанной с поиском непротиворечивых терминов, определяющих новые факты.

Для решения терминологической проблемы, связанной с обнаруженным нетепловым модифицирующим эффектом под воздействием СВЧ электромагнитного поля на полимерные материалы, необходимо определить место этого явления в СВЧ электротехнологии. Если

говорить о взаимодействии как о философской категории, то оно отражает процессы воздействия объектов друг на друга, их взаимную обусловленность и порождение одним объектом другого.

Традиционно СВЧ воздействия, в которых модифицирующий эффект достигается только за счет нагрева объекта обработки (сушка, сублимация и т.п), называются термическими (СВЧ ТО). Кратковременное воздействие СВЧ электромагнитных колебаний на объект обработки при фиксированном постоянном уровне генерируемой мощности, когда температура объекта остается постоянной, будем называть СВЧ нетепловой обработкой (СВЧ НО), если модифицирующий эффект достигается при нетепловом воздействии, но при наличии незначительного нагрева объекта, то – СВЧ комбинированной обработкой (СВЧ КО) [1].

Подобная классификация лежит в основе принципиально нового взгляда на процесс обработки объектов в СВЧ электромагнитном поле. В отличие от теплового воздействия СВЧ электромагнитного поля его нетепловое или комбинированное воздействие на полимер относится, на наш взгляд, к разряду исключений.

В настоящее время нами установлена возможность модификации свойств при нетепловой или комбинированной обработке в СВЧ электромагнитном поле некоторых полимерных материалов, разного технологического назначения [5–7]. Это смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ), вязкие смазочные материалы, применяемые в машиностроительной отрасли; термореактивные смолы, в частности эпоксидные; текстильные материалы и волокна на основе поликапроамида (ПКА).

Результаты исследований показали увеличение удельной разрывной нагрузки ($P_{уд}$) обработанных в СВЧ поле ПКА нитей на 12 – 15 %, по сравнению с исходными, необлученными волокнами. Следует отметить, что эффект наблюдается при кратковременном СВЧ воздействии в 5 – 10 с, когда температура объекта в процессе обработки остается постоянной. Нетепловую природу влияния СВЧ электромагнитных колебаний на полимерную структуру ПКА волокна подтверждают и результаты методом ИК-спектроскопии, который был применен в области $400 - 4000 \text{ см}^{-1}$ для исследования воздействия СВЧ излучения на полимер. Наблюдаемые изменения в ИК спектрах связаны в частности с изменением количественного соотношения мономера и низкомолекулярных соединений в полимере. На структурном уровне они связаны как с внутримолекулярными, так и межмолекулярными водородными связями и конформационными изменениями молекулы полимера.

Установлено, что время отверждения смолы при кратковременном воздействии СВЧ электромагнитных колебаний сокращается в 10 – 50 раз. Оптимальные режимы обработки позволяют получить компаунд с высокими технологическими показателями, не уступающий контрольным образцам смолы, отвержденной на воздухе в естественных условиях.

Таким образом, новые возможности получения модифицированных материалов с заданным комплексом свойств подчеркивают актуальность исследований в области нетеплового воздействия СВЧ электромагнитных колебаний на полимеры.

Заключительным этапом на пути реализации методологии исследования нового научного направления является построение теории нетеплового воздействия СВЧ ЭМП на полимеры с целью модификации их свойств и разработка теории нового класса электротехнологических установок, реализующих это воздействие. Теория, как заключительный объединяющий элемент методологии исследования, предусматривает создание системы знаний о нетепловом модифицирующем влиянии СВЧ электромагнитных колебаний на полимерные материалы, объясняющих технологические эффекты от реализации новой технологии и электротехнологических установок нового класса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Суминов В. М. Влияние низкоинтенсивного лазерного излучения на физико-химические свойства растворов и жидкостей /В.М.Суминов Новые материалы и технологии. //Тез. докл. Всерос. науч.-техн. конф. – М., 1997. – с. 10.
2. Игнатов В. В. Влияние электромагнитных полей сверхвысокочастотного диапазона на микроорганизмы /В.В.Игнатов, В.И.Панасенко и др. – Саратов: Изд-во. Сарат. ун-та, 1978.
3. Девятков Н.Д. Нетепловые эффекты миллиметрового излучения /Н.Д.Девятков – М.: Ротапринт ИРЭ, 1981.
4. Архангельский Ю. С. СВЧ электротермия /Ю.С.Архангельский – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 1998. – 408 с.
5. Калганова С.Г. Применение нетеплового действия СВЧ электромагнитных колебаний для модификации поликапроамидных волокон /С.Г.Калганова, М.Ю.Морозова // Электричество. 2004. №.5. С. 44 – 46.
6. 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.
7. Калганова С.Г. Влияние СВЧ электромагнитного поля на диэлектрические показатели смазочной среды /С.Г.Калганова //Перспективы и тенденции развития электротехнического оборудования «Элмаш-2004», Труды межд. симпозиума 11–15 октября 2004 г. М., 2004. С. 72 – 74.
8. Гильманова В. А. Влияние СВЧ электромагнитных колебаний на физико-химические свойства полимерного сепарационного материала из полисульфоновой смолы и применение СВЧ электротехнологической установки для обработки сепараторов химических источников тока: дис... канд. техн. наук /В.А.Гильманова. Саратов, 2000.

Калганова Светлана Геннадьевна –

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

УДК 621.365.5

С.Г. Калганова

ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКАЯ БАЗА ПРОБЛЕМЫ

Рассмотрена проблема терминологической базы нового научного направления в области нетепловых модифицирующих воздействий СВЧ электромагнитного поля на объект обработки. Показаны различные варианты терминов, определяющих понятие «нетепловое воздействие».

S.G.Kalганova

TERMINOLOGICAL BASE OF THE PROBLEM

The problem of terminological base of a new scientific direction is considered in the field of not thermal modifying influences of the microwave of an electromagnetic field on object of processing. Various variants of the terms determining concept « not thermal influence » are shown.

Разрабатываемое новое научное направление, даже в рамках традиционных технологий, связано с обнаружением новых явлений, эффектов и т.п. Это, в свою очередь, ставит перед исследователями проблему терминологической базы, связанной с поиском непротиворечивых терминов, определяющих новые факты.

Для решения терминологической проблемы, связанной с обнаруженным нетепловым модифицирующим эффектом под воздействием СВЧ электромагнитного поля на полимерные материалы, необходимо определить место этого явления в СВЧ электротехнологии.

В настоящее время способы применения СВЧ энергии в технологических целях настолько разнообразны, что не существует даже единой классификации, которая охватила бы все аспекты и области использования СВЧ электромагнитных колебаний [1 – 4].

По мнению Э. Окресса, фактически полная классификация должна состоять из четырех подклассификаций, в которых за основу положены:

- тип заказчика (промышленность, коммерческая сеть или бытовой потребитель);
- выполняемый процесс (приготовление пищевых продуктов, обработка лесоматериалов, полимеризация и т. д.);
- результирующий эффект (обезвоживание, полимеризация т.д.);
- способ связи генератора с обрабатываемым изделием (непосредственное облучение антеннами и др.) [3].

Любые попытки технической классификации не могут быть исчерпывающими, но они очень полезны.

Так, в работе [4] автор приводит классификацию, в которой тепловые эффекты можно разделить на две группы: эффекты, связанные с общим повышением температуры, обусловленные поглощением энергии в объеме (объемный нагрев), и эффекты, связанные со специфическим повышением температуры некоторой части объема относительно окружающей среды (табл. 1).

Среди нетепловых эффектов различают сильные и слабые взаимодействия ЭМП со средой [4].

Таблица 1

Взаимодействия диэлектрических сред с ЭМП

Тепловые	Нетепловые
Нагрев всего объема Специфический (локальный нагрев)	Сильные взаимодействия Слабые взаимодействия

Явления, связанные с нахождением диэлектрической среды в электрическом поле, следует классифицировать как сильные взаимодействия, поскольку для наблюдения их проявления требуются большие напряженности электрического поля. Слабыми взаимодействиями принято считать такие, которые наблюдаются при напряженностях поля и интенсивностях потока, не вызывающих заметного повышения температуры среды (рис.1) [4, 5].

Если говорить о взаимодействии как о философской категории, то оно отражает процессы воздействия объектов друг на друга, их взаимную обусловленность и порождение одним объектом другого. Воздействие – объективная и универсальная форма движения, развития, определяет существование и структурную организацию любой материальной системы.

В физике известны 4 типа фундаментальных взаимодействий: сильное взаимодействие, электромагнитное взаимодействие, слабое взаимодействие и гравитационное; для протонов при энергии ~ 1 ГэВ интенсивности обусловленных фундаментальных взаимодействий относятся соответственно как $1; 10^{-2}; 10^{-10}; 10^{-38}$.

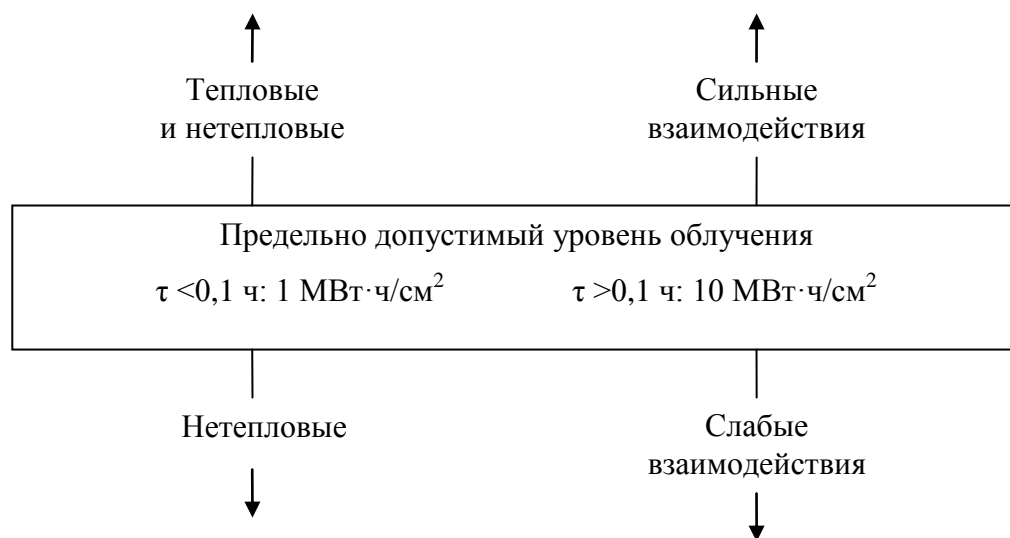


Рис.1. Классификация сильных и слабых нетепловых взаимодействий электромагнитных полей с биологической средой

Сильное взаимодействие, самое сильное из фундаментальных взаимодействий элементарных частиц, которое превосходит электромагнитное взаимодействие в ~ 100 раз, радиус действия 10^{-13} см (частный случай сильных взаимодействий – ядерные силы).

Электромагнитное взаимодействие – фундаментальное взаимодействие, в котором участвуют частицы, имеющие заряд (или магнитный момент). Переносчиком электромагнитного взаимодействия (ЭМВ) между заряженными частицами является электромагнитное поле. ЭМВ занимает по «силе» промежуточное положение между слабым и сильным взаимодействием и является дальнедействующим, оно определяет взаимосвязь между ядрами и электронами в атомах и молекулах, поэтому к электромагнитным взаимодействиям сводится большинство сил, проявляющихся в макроскопических явлениях: силы упругости, трения, химические связи т.д. ЭМВ приводит также и к излучению электромагнитных волн. В 1960-х годах создана единая теория электромагнитного и слабого взаимодействия (электрослабое взаимодействие) [6].

Слабое взаимодействие – сильнее гравитационного, но слабее ЭМВ. Радиус действия примерно $2 \cdot 10^{-16}$ см обуславливает большинство распадов элементарных частиц.

Существует другой взгляд на классификацию СВЧ воздействий, предложенный авторами в работе [7], посвященной проблемам и реализациям СВЧ технологий. Бурный количественный и качественный рост различных технических средств, основанных на использовании электромагнитной энергии радиочастотного диапазона, породил и ряд негативных последствий, связанных с преднамеренным влиянием электромагнитных полей (ЭМП) на технику, материалы, человека и окружающую среду (табл. 2).

Намеренное воздействие ЭМП, создаваемых искусственными источниками, на технические средства составляет содержание обширной области науки и техники – радиоэлектроники. Непреднамеренные воздействия на технические средства рассматриваются в рамках проблемы электромагнитной совместимости технических средств. Непреднамеренные ЭМВ технических средств на биологические объекты составляют самостоятельную область, за которой в последние годы закрепилось название электромагнитная экология. Область, относящаяся к непреднамеренному влиянию ЭМП на материалы и вещества, обычно не выделяется в самостоятельную область. Область деятельности, рассматривающая намеренные воздействия ЭМП на вещества, материалы и биологические объекты с целью изменения их свойств

или придания им некоторых качеств, в англоязычной литературе получила название Microwave application. В отечественной литературе терминология пока окончательно не сформировалась. Чаще всего используется понятие СВЧ обработка, а также СВЧ сушка, СВЧ нагрев, иногда СВЧ электротермия [1, 7, 8].

Таблица 2

Обобщенная картина и характер воздействий ЭМП

		Объект воздействия		
		Техническое средство	Материал, вещество	Биологический объект
Характер или результат воздействия	Намеренное воздействие	Обусловленное или умышленное нарушение процессов передачи, приема и обработки информации	Целенаправленное изменение свойств	Целенаправленное изменение хода биологических процессов
	Непреднамеренное воздействие	Неумышленное нарушение процессов передачи, приема и обработки информации	Непреднамеренное изменение свойств	Непреднамеренное изменение хода биологических процессов

Широкие пределы варьирования напряженности ЭМП, длительности обработки и её результаты (изменения свойств обрабатываемого объекта) являются признаками классификации, приведенной в работе [7]. Авторы выделяют два характерных класса: низкоинтенсивные и высокоинтенсивные СВЧ технологические процессы.

К классу низкоинтенсивных СВЧ процессов относят следующие группы:

- обработка производится ЭМП в течение относительно короткого промежутка времени с нагревом материала (например, стимуляция семян), но в силу малой продолжительности процесса эффекты теплопередачи и тем более теплообмена с окружающей средой не играют решающей роли. В результате пространственные распределения удельной мощности $P_{уд}$ и температуры близки друг к другу, что позволяет ограничиться анализом ЭМП, т.е. решением электродинамических задач;

- обработка осуществляется ЭМП в течение продолжительного промежутка времени. Характерным для этой группы воздействий является то, что процессы теплопередачи играют существенную роль, в результате чего пространственные распределения температуры и удельной мощности $P_{уд}$ ЭМП существенно отличаются. В результате нагрева в этом случае не происходит существенного изменения электрических параметров среды, её массы и фазового состояния (например, обеззараживание пищевых продуктов).

К высокоинтенсивным СВЧ технологиям относятся различные случаи, для которых характерна принципиальная необходимость совместного рассмотрения электродинамических и теплофизических аспектов (например, нагрев, вулканизация резины, сушка, плавление). Это требует совместного решения соответствующих задач анализа ЭМП с учетом их изменений вследствие нагрева и тепловых полей с учетом изменяющейся массы материала, его теплофизических параметров и условий нагрева при изменяющихся распределениях удельной мощности $P_{уд}$ [7, 8].

При любом СВЧ воздействии происходит изменение свойств обрабатываемого объекта, например, при приготовлении пищи, сушке древесины, вулканизации резины и др. (табл. 3) [1, 3, 9, 10]. На наш взгляд, более эффективен другой подход при классификации СВЧ обработки материалов. Если модификация есть изменение свойств обрабатываемого объекта, то можно считать, что любое воздействие СВЧ электромагнитного поля является модифицирующим.

Таблица 3

Области применения СВЧ технологий

Область применения	Технологические процессы
Бытовые приборы	Приготовление пищи, стерилизация и пастеризация консервов и других продуктов питания, дефростация замороженных продуктов
Пищевая промышленность	Сушка (в том числе сублимационная) фруктов, чая, сахара, соли, мяса и др., варка мяса, колбас и т.п. Стерилизация хлеба, консервов и др., пастеризация молока, вина, пива, соков, фруктовых пюре. Хлебопечение, выпаривание концентрированных растворов, инаktivация ферментов, обжарка зерен кофе, плавление и карамелизация, дефростация мяса, рыбы, масла, кулинарных изделий, дезинсекция муки и круп, закупорка синтетической тары
Строительство, производство строительных материалов	Сушка леса и строительных материалов, производство фанеры, кирпича, сварка пластмасс, отверждение бетона, раскалывание бетона
Сельское хозяйство	Сушка семян, зерна, овощей, пастеризация (стерилизация) молока, предпосевная обработка посевного материала и почвы для подавления (или провокации) сорняков
Кинематография	Производство кинокопий
Научно-исследовательские институты, заводы, учебные лаборатории	Физические, химические, механические, биологические и технологические исследования и испытания
Микробиологическая и фармацевтическая промышленность	Стерилизация питательных сред, производство кормовых дрожжей, аминокислот, ферментных препаратов, антибиотиков, лекарственных препаратов
Текстильная и легкая промышленность	Производство тканей (в том числе синтетических), бумаги, картона, нагрев пластмасс и др. диэлектрических материалов
Химическая промышленность	Производство пластмасс, синтетических смол, нитей, канатов, вулканизация резины
Медицина и ветеринария	Диатермия, рефлексотерапия, диагностика, дефростация клеток, тканей и органов при низкотемпературной консервации
Машиностроение	Нагрев пластмасс и различных изоляционных материалов

Традиционно СВЧ воздействия, в которых модифицирующий эффект достигается только за счет нагрева объекта обработки, называются термическими (СВЧ ТО). Кратковременное воздействие СВЧ электромагнитных колебаний на объект обработки при фиксированном постоянном уровне генерируемой мощности, когда температура объекта остается постоянной, будем называть СВЧ нетепловой обработкой (СВЧ НО), если модифицирующий

эффект достигается при нетепловом воздействии, но при наличии незначительного нагрева объекта, то – СВЧ комбинированной обработкой (СВЧ КО) [11, 12].

Подобная классификация лежит в основе принципиально нового взгляда на процесс обработки объектов в СВЧ электромагнитном поле (рис. 2).

В рамках этой терминологии можно считать, что СВЧ модифицирующее воздействие (СВЧ МВ) делится на три класса: термическое (тепловое), нетепловое и комбинированное воздействия на объект обработки. Классификация предусматривает рассмотрение только двух групп материалов: биополимеров, нетепловое воздействие ЭМП на которые можно считать доказанным, и полимеров небиологического происхождения, которые представляют наибольший интерес в качестве объектов исследования.

Дальнейшее разделение материалов по агрегатному состоянию, виду, форме целесообразно с учетом конструирования СВЧ установок нетеплового и комбинированного воздействия.

Как всякая техническая классификация, она не единственная, возможны и другие, но ее достаточно, чтобы систематизировать известные последствия воздействия СВЧ электромагнитного поля на диэлектрические среды и определить направление поиска новых, пока что не обнаруженных результатов такого воздействия.

Таким образом, термин «нетепловое СВЧ воздействие» определяет группу технологических процессов, при реализации которых происходит изменение физико-механических или физико-химических свойств объекта без регистрируемого нагрева материала. Необходимо отметить, что выделение нетеплового СВЧ воздействия на фоне теплового воздействия составляет самостоятельную задачу, решение которой зависит от объяснения принципа и физической природы нетеплового воздействия СВЧ электромагнитного поля на полимеры. Так, например, специалисты пищевых технологий, обсуждая эффект пастеризации молока в СВЧ ЭМП, говорят о «резонансном действии СВЧ энергии» [1, 3].

Термин «низкоинтенсивное воздействие ЭМП», в том числе и СВЧ диапазона, характеризует в основном процессы инактивации или стимуляции различных микроорганизмов при указании порогового значения интенсивности ЭМП ($\text{мкВт}/\text{см}^3$) или удельной электромагнитной энергии ($\text{Дж}/\text{см}^3$), однако изменение температуры объекта не является определяющим [7, 8]. Так, в работе [13] приведены результаты исследований, подтверждающие наличие стимулирующего действия излучения СВЧ диапазона на микроорганизмы, при этом речь идет о «нетепловой» интенсивности, т.е. без регистрируемого нагрева объекта.

На наш взгляд, «низкоинтенсивное воздействие ЭМП» в большей степени характеризует комбинированную обработку объекта при условии низких значений удельной мощности $P_{уд}$ ЭМП, непродолжительной экспозиции в ЭМП и регистрируемом повышении температуры материала.

Таким образом, в настоящее время наиболее удачным и реально отражающими результаты нетрадиционного кратковременного воздействия СВЧ ЭМП на полимерные материалы с нагревом или при наличии незначительного нагрева, являются термины «нетепловое» и «комбинированное» воздействие СВЧ электромагнитных колебаний.

Наличие развитой, общепризнанной и соблюдаемой терминологической базы – признак успешно развивающегося научно-технического направления.

В то же время терминологическая база не является чем-то постоянным, навсегда заданным. Появление новых идей, подходов, экспериментальных результатов, размежевание научных школ, смена поколений исследователей и разработчиков и другие причины приводят к появлению новых терминов и понятий, к пересмотру тех или иных привычных составляющих терминологической базы. При этом, безусловно, необходимо соблюдать меру, не загрязнять терминологическую базу случайными или модными синонимами исторически сложившихся терминов, особенно если речь идет о заимствованиях из других языков.

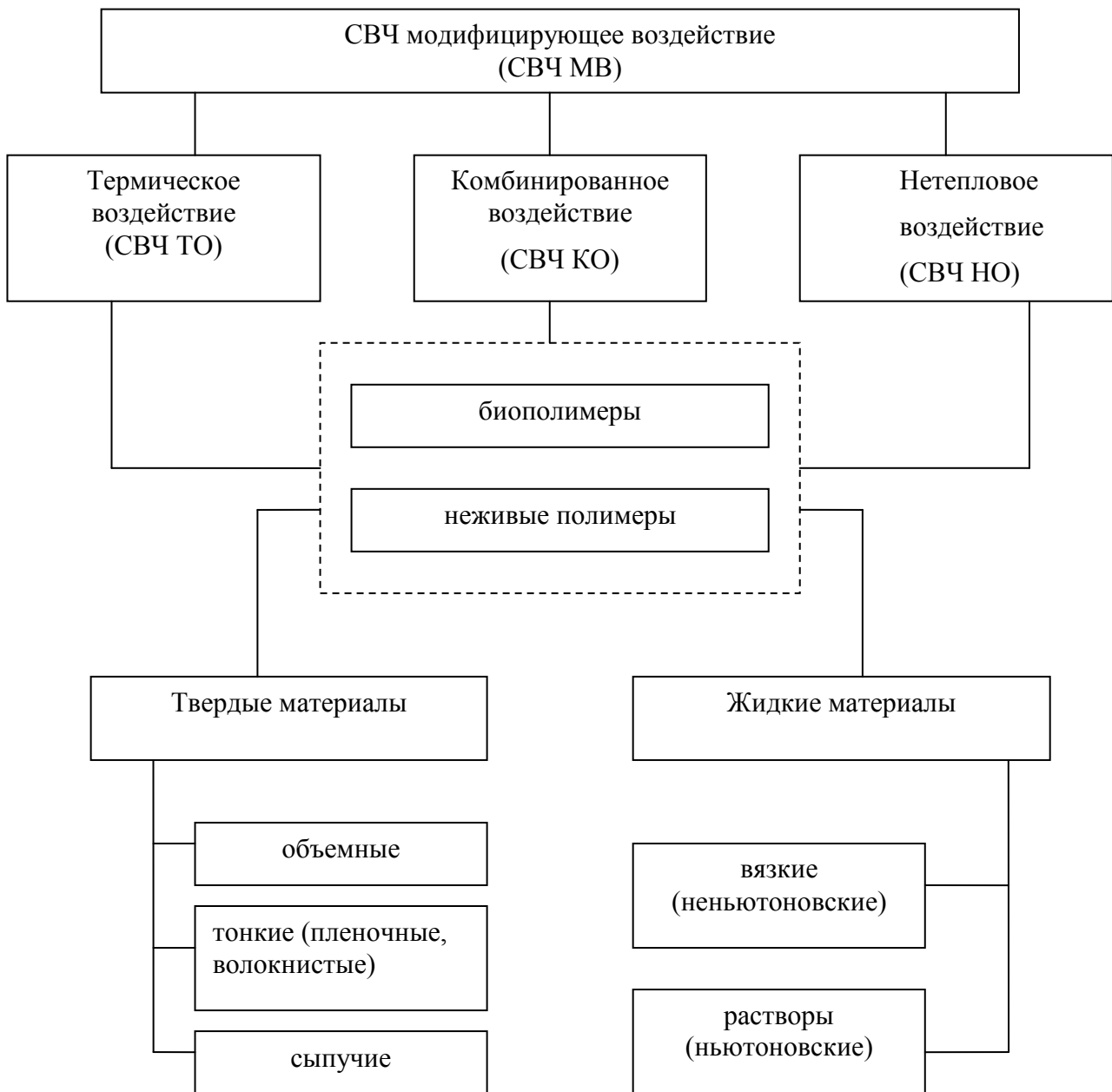


Рис. 2. Классификация модифицирующих воздействий СВЧ электромагнитного поля на объекты обработки

ЛИТЕРАТУРА

1. Архангельский Ю. С. СВЧ электротермия /Ю.С.Архангельский. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 1998.
2. Рогов И. А. Сверхвысокочастотный и инфракрасный нагрев пищевых продуктов / И.А.Рогов, С.В.Некрутман. – М.: Пищевая промышленность, 1976.
3. СВЧ энергетика / под ред. Э. Окресса. Т.2. М.: Мир, 1971. 271 с.

4. СВЧ-энергетика. Применение энергии сверхвысоких частот в медицине, науке и технике. Т. 3 /под ред. Э.Окресса. М.: Мир, 1971.
5. Saito M. Response of nonspherical biological particles to alternating electric fields /Saito M., Schwan H.P., Schwarz G. Biofis. I., 6, p. 313, 1966.
6. Детлаф А.А. Курс физики: учеб. пособие для втузов /А.А.Детлаф, Б.М.Яворский. – М.: Высш. шк., 1989. – 608 с.
7. Низкоинтенсивные СВЧ технологии (проблемы и реализации) /под ред. Г.А. Морозова и Ю.Е. Седельникова. – М.: Радиотехника, 2003. – 112 с.
8. Morozov G.A. Optimization Criteria for Materials Handling Regimens in Low Intensity Microwave Technologies / Morozov G.A., Sedelnikov Yu.E. VII Scientific Exchange Seminar, Munich, Germany, Technische Universitat Munchen, 2000, pp. 41–43.
9. Калганова С.Г. Применение нетеплового действия СВЧ электромагнитных колебаний для модификации поликапроамидных волокон /С.Г.Калганова, М.Ю.Морозова //Электричество. 2004. № 5. С. 44–46.
10. Калганова С.Г. Влияние СВЧ электромагнитного поля на диэлектрические показатели смазочной среды /С.Г.Калганова //Перспективы и тенденции развития электротехнического оборудования «Элмаш – 2004». Труды междунар. симпозиума 11–15 октября 2004 г. М., 2004. С. 72–74.
11. Слепцова С.К. Нетепловое модифицирующее воздействие СВЧ электромагнитных колебаний /С.К.Слепцова, С.Г.Калганова //Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. – Красноярск: КГТУ, 2004. С. 272–274.
12. Калганова С.Г. СВЧ электротехнологические установки модифицирующего воздействия /С.Г.Калганова //Проблемы электроэнергетики: межвуз. науч. сб. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2004. С. 258–263.
13. Влияние когерентного КВЧ-излучения нетепловой интенсивности на рост *Vas. subt.* /А.Ю. Криницкая, М.Н. Астраханцева, В.С. Гамаюрова, А.П. Монахов, Ю.В. Глазырина. Биомедицинская радиоэлектроника. 2001. № 2. С. 49–53.

Калганова Светлана Геннадьевна –

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

УДК 621.365:519.711.3

В.Ю. Кожевников

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКАНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В СВЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ

Рассматривается математическая модель спекания керамических материалов в сверхвысокочастотном электромагнитном поле с учетом зависимости диэлектрических характеристик от температуры. На основании результатов численного моделирования выполнено на базе этой модели анализируется распределение температур в спеке керамик.

V.Y. Kozhevnikov

MATHEMATICAL MODELLING OF MICROWAVE ELECTROMAGNETIC SINTERING OF CERAMIC SOLIDS

Mathematical model 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 modelling results obtained using the given model.

Непрерывное расширение исследований в области применения СВЧ излучения для высокотемпературной обработки материалов характерно для последнего времени. Спекание керамик является одной из перспективных областей применения СВЧ. В ряде экспериментов показано, что при СВЧ обработке спеков керамик снижается температура активации процессов и сокращается необходимое время обработки. Во многих случаях это может способствовать созданию материалов с улучшенными функциональными свойствами. Причиной увеличения скорости процессов и снижения энергий активации в ряде случаев является «упорядоченность» взаимодействия СВЧ энергии с веществом. Разработанная модель пондеромоторного нелинейного выпрямления потоков массы и заряда, индуцированных СВЧ излучением, получившая экспериментальное подтверждение, описана в работе [1]. Однако «упорядоченность» воздействия СВЧ энергии на процессы переноса, кристаллизации и фазовые переходы в спеке керамик по-прежнему нуждается в тщательном экспериментальном и теоретическом осмыслении.

При термообработке спеков керамик в электромагнитном поле сверхвысоких частот вследствие диэлектрических потерь происходит ряд взаимосвязанных процессов: увеличивается температура объекта, появляются температурные деформации и напряжения, могут происходить фазовые и химические превращения вещества. Математическое описание с учетом перечисленных ниже допущений дано в работах [2, 3] и представляет собой взаимосвязанную самосогласованную задачу электродинамики, теплопроводности, тепломассопереноса, кинетики химических реакций. Данная модель учитывает, что электрофизические свойства не зависят от напряженности электрического E и магнитного H полей, воздействие СВЧ электромагнитного поля на спек керамики вызывает появление нестационарных полей температур и концентраций компонентов. Вследствие этого, а также из-за нестационарных внешних механических воздействий, в спеке керамики появляются деформации и напряжения. С другой стороны, эти деформации приводят к изменению температуры и концентрации компонентов.

Взаимосвязь рассматриваемых процессов обусловлена также тем, что физические свойства многих диэлектриков зависят от температуры.

При рассмотрении процессов СВЧ нагрева пористых спеков 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

$$D = \varepsilon E \quad B = \mu H \quad j = \delta E, \quad (1)$$

где D , B – векторы электрической и магнитной индукции; E , H – векторы напряженности электрического и магнитного полей; ε , μ – абсолютная диэлектрическая и магнитная проницаемость среды; δ , – электрическая проводимость; j – плотность тока проводимости.

$$\operatorname{rot} H = j + \frac{\partial D}{\partial t}, \quad (2)$$

$$\operatorname{rot} E = -\frac{\partial B}{\partial t}, \quad (3)$$

$$\operatorname{div} D = 0, \quad (4)$$

$$\operatorname{div} B = 0, \quad (5)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \nu \nabla T = a \nabla^2 T + \frac{q_v}{c\rho} - \frac{(3l + 2m) \alpha_r T_0}{\lambda} \operatorname{div} u, \quad (6)$$

где T – температура; c, ρ – удельная теплоемкость при постоянном давлении и плотность диэлектрика ($\rho = \sum_{\beta=1}^B \rho_{\beta}$); t – время; α_T, α_{β} – средние коэффициенты термического и концентрационного расширения в интервалах температур (T, T_0); λ – коэффициент теплопроводности.

Решения 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 задаются классические граничные условия четвертого рода (условия сопряжения) сводятся к одновременному заданию равенства температур и теплых 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; λ_1 и λ_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 Δt , в пределах которых эти свойства можно считать постоянными. Решением краевой задачи электродинамики (1) – (6) на этом временном интервале определяем функцию мощности внутренних источников тепла в объеме диэлектрика.

По результатам вычислений температур и определяются физические свойства материала для следующего интервала времени.

Повторяя расчеты для новых интервалов времени до момента достижения требуемой величины температуры, температурных напряжений, смоделируем динамику процесса с учетом изменяющихся во времени физических свойств обрабатываемого спека керамики, исследуем влияние характеристик СВЧ устройства на параметры технологического процесса.

Для спекания керамических материалов с использованием источника СВЧ колебаний большой мощности может быть использована камера, описанная в работе [4].

Рассмотрим метод нагрева с использованием одного источника СВЧ энергии.

Для реализации этого варианта предлагается использовать в качестве рабочего пространства, в котором происходит нагрев спека керамики, отрезок волновода квадратного поперечного сечения, который возбуждается совокупностями волноводов связи, расположенными на боковой стенке (рис.1).

Рис.1. Камера для спекания керамических материалов в поле СВЧ

Совокупность возбуждающих волноводов связи представляет собой область связи шлейфового ответвителя с переходным ослаблением менее одного дБ, первичным каналом которого является волновод, подключенный к источнику СВЧ колебаний, а вторичным – камера (отрезок волновода квадратного поперечного сечения). Размеры волновода квадратного поперечного сечения выбираются такими, чтобы в отсутствие диэлектрических вставок и обрабатываемого материала в нем возбуждались волны доминантного типа обеим областям связи. Тогда можно считать, что возбуждающий волновод с квадратным сечением и стандартный прямоугольный волновод развязаны относительно друг друга на 20 – 25 дБ.

К этому волноводу с одной стороны подключается источник СВЧ колебаний. С другой стороны этот волновод соединяется с нагрузкой, коэффициент стоячей волны которой не более 2, то есть допускается существенное рассогласование рабочей камеры и источника СВЧ мощности.

Отрезок волновода квадратного сечения с обеих сторон имеет импедансные нагрузки, которые представляют собой решетки из предельных волноводов. Длина предельных волноводов выбрана такой, чтобы сигнал на рабочей частоте СВЧ камеры ослаблялся на 100 и более дБ.

Характер импедансной нагрузки зависит от типа волны, возбуждаемой в квадратном волноводе, что приводит к соответствующему удлинению или укорочению электрической длины квадратного волновода.

Вопросы устранения излучения в окружающее пространство из рабочей камеры целесообразно связаны с конструктивным решением загрузки и контроля технологических параметров.

Характер распределения электромагнитного поля в ближней зоне излучателя определяется взаимным расположением волноводов связи и удалением обрабатываемого спека керамик от поверхности боковой стенки волновода, на которой расположены волноводы связи.

Решение краевой задачи электродинамики из-за сложности нахождения электромагнитного поля в ближней зоне излучателя целесообразно ограничить рассмотрением простейшего типа плоской электромагнитной волны [2].

Поведение плоской электромагнитной волны описывается уравнениями [2]:

$$\frac{dE_x}{dz} = j\omega\mu H_y, \quad \frac{dH_y}{dz} = j\omega\varepsilon E_x, \quad (9)$$

или

$$\frac{d^2 E_x}{dz^2} = -\omega^2 \varepsilon \mu E_x, \quad \frac{d^2 H_y}{dz^2} = -\omega^2 \varepsilon \mu H_y. \quad (10)$$

Решение этих уравнений имеет вид

$$E_x = E_{np} + E_{об} = A_1 e^{-\gamma z} + A_2 e^{\gamma z}, \quad (11)$$

$$H_y = H_{np} + H_{об} = \frac{E_{np}}{\eta} + \frac{E_{об}}{\eta},$$

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 α , фазовый коэффициент β , постоянную распространения плоской волны γ и характеристическое сопротивление η среды, в которой распространяется волна, можно записать в виде

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon'} \sqrt{\frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} - 1 \right)}, \quad \beta = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon'} \sqrt{\frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} + 1 \right)}, \quad (12)$$

$$\gamma = \alpha + j\beta = \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon \mu}, \quad \eta = \frac{377}{\sqrt{\varepsilon}}.$$

В случае падения плоской волны на границу раздела двух сред с η_1 и η_2 под углом 90° коэффициент отражения от этой границы равен

$$\Gamma = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1} = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}}, \quad (13)$$

где ε_1 , ε_2 – абсолютные комплексные диэлектрические проницаемости сред. Если же волна падает на границу раздела этих сред под углом φ , то коэффициент отражения зависит от поляризации падающей волны относительно плоскости падения.

В случае, когда плоская волна затухает в спеке керамики не полностью и после отражения от другой границы этой среды (в общем случае после многократных отражений) покидает ее, параметры электромагнитной волны следующие: амплитуда a_0 в сечении $z = 0$. Распространение плоской электромагнитной волны от излучателя по оси z ($\varphi = 0$) до границы раздела воздух-объект и отражается от нее с коэффициентом отражения [5]

$$\Gamma_2 = \frac{Z_{ex2} - \eta_1}{Z_{ex2} + \eta_1}, \quad (14)$$

где $\eta_1 = 377$ Ом – характеристическое сопротивление воздуха, а согласно теории длинных линий

$$Z_{\text{ex2}} = \eta_2 \frac{Z_{H2} + \eta_2 \operatorname{th}\gamma_2(l_2 - l_1)}{\eta_2 + Z_{H2} \operatorname{th}\gamma_2(l_2 - l_1)}, \quad (15)$$

где $\eta_2 = \frac{377e^{j\frac{\delta_2}{2}}}{\sqrt{\varepsilon'_2 \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta_2}}}$ – характеристическое сопротивление обрабатываемого объекта;

$\gamma_2 = \alpha_2 + j\beta_2$ – постоянная распространения в объекте обработки, α_2 и β_2 определяются по (12) при $\varepsilon' = \varepsilon'_2$, $\operatorname{tg}\delta = \operatorname{tg}\delta_2$, а ε' и $\operatorname{tg}\delta_2$ – относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь обрабатываемого объекта, Z_{H2} – входное сопротивление короткозамкнутой длинной линии длиной $(l - l_2)$

$$Z_{H2} = \eta_1 \operatorname{th}\gamma_1(l - l_2), \quad (16)$$

$\gamma_1 = \alpha_1 + j\beta_1$ – постоянная распространения в воздухе, $\alpha_1 = 0$, $\beta_1 = \frac{2\pi}{\lambda}$.

Если в плоскости $z = 0$ коэффициент отражения для волны, пришедшей в эту плоскость после отражения от границы в плоскости $z = l_1$, равен

$$\Gamma_1 = \frac{Z_{H1} - \eta_1}{Z_{H1} + \eta_1}, \quad (17)$$

где Z_{H1} – сопротивление нагрузки, которой является для электромагнитной волны плоскость $z = 0$ со стороны рабочей камеры, то из-за многократных отражений электромагнитной волны от границ раздела $z = l_1$ и $z = 0$ на границу раздела $z = l_1$ придет волна с амплитудой

$$a_1 = \frac{a_0 e^{-\gamma_1 l_1}}{1 - \Gamma_1 \Gamma_2 e^{-2\gamma_1 l_1}}. \quad (18)$$

Отраженная от границы раздела $z = l_1$ волна имеет амплитуду

$$a_2 = \frac{a_0 \Gamma_2 e^{-\gamma_1 l_1}}{1 - \Gamma_1 \Gamma_2 e^{-2\gamma_1 l_1}}. \quad (19)$$

Амплитуда волны, пришедшей в плоскость $z = 0$ после отражения от объекта обработки, равна

$$c_1 = \frac{a_0 \Gamma_2 e^{-2\gamma_1 l_1}}{1 - \Gamma_1 \Gamma_2 e^{-2\gamma_1 l_1}}, \quad (20)$$

а отраженная от плоскости $z = 0$

$$c_2 = \frac{a_0 \Gamma_1 \Gamma_2 e^{-2\gamma_1 l_1}}{1 - \Gamma_1 \Gamma_2 e^{-2\gamma_1 l_1}}, \quad (21)$$

тогда амплитуда в плоскости $z = 0$ равна

$$c = c_1 + c_2 = \frac{a_0(1 + \Gamma_1)\Gamma_2 e^{-\gamma_1 l_1}}{1 - \Gamma_1 \Gamma_2 e^{-2\gamma_1 l_1}}. \quad (22)$$

В таком случае плотность активной мощности на сопротивлении Z_{H1} можно записать в виде

$$P_{H1} = \frac{|c|^2 \operatorname{Re} Z_{H1}}{|Z_{H1}|^2} = \frac{|a_0|^2 |1 + \Gamma_1|^2 |\Gamma_2|^2}{|1 - \Gamma_1 \Gamma_2 e^{-2\gamma_1 l_1}|^2} |e^{-\gamma_1 l_1}|^2. \quad (23)$$

Если учесть, что

$$|a_0|^2 = P\eta_1, \quad |e^{-2\gamma_1 l_1}|^2 = 1, \quad \frac{1 - |\Gamma_1|^2}{|1 + \Gamma_1|^2} = \frac{\eta_1 \operatorname{Re} Z_{H1}}{|Z_{H1}|^2}, \quad (24)$$

то (23) примет вид

$$P_{H1} = \frac{(1 - |\Gamma_2|)^2 |\Gamma_2|^2}{|1 - \Gamma_1 \Gamma_2 e^{-2\gamma_1 l_1}|^2}. \quad (25)$$

В процессе термообработки у объекта с изменением температуры изменяются диэлектрические параметры. Для расчета эффективной диэлектрической проницаемости смеси предполагается, что ее отдельные компоненты не вступают друг с другом в химические реакции, т.е. смесь является физической. Для расчета статистической смеси исходных компонентов спека керамики (хаотической, неупорядоченной в пространстве) представим зависимость диэлектрической проницаемости смеси в виде зависимости

$$\lg \varepsilon^* = \sum_{i=1}^m y_i \lg \varepsilon_i. \quad (26)$$

Для «вспененных» материалов (пенокерамики и др.), заполненных большим количеством мелких пор, из последней формулы, считая, что для газов: $\varepsilon = 1$, а плотность равна нулю, получается уравнение

$$\lg \varepsilon^* = \frac{D^*}{D_T} \lg \varepsilon_T, \quad (27)$$

где ε_T и D_T – диэлектрическая проницаемость и плотность сплошного, твердого диэлектрика; ε^* и D^* – диэлектрическая проницаемость и плотность вспененного материала.

Изменение диэлектрических параметров приведет к изменению Γ_2 . Тогда, принимая во внимание (18) и (19), запишем амплитуду волны на границе $z = l_1$ в виде

$$A = a_1 + a_2 = \frac{a_0(1 + \Gamma_2)e^{-\gamma_1 l_1}}{1 - \Gamma_1 \Gamma_2 e^{-2\gamma_1 l_1}}.$$

По аналогии с (21) – (23) плотность активной мощности равна

$$P(l_1) = \frac{|A|^2 \operatorname{Re} Z_{\varepsilon x2}}{|Z_{\varepsilon x2}|^2} = P \frac{1 - |\Gamma_2|^2}{|1 - \Gamma_1 \Gamma_2 e^{-2\gamma_1 l_1}|^2}. \quad (28)$$

Пусть теперь в обрабатываемом объекте в плоскости $z = l_1$ имеем волну с начальной амплитудой b_0 . Рассмотрим многократные отражения этой волны от некоторого произвольно выбранного входного сопротивления при $l_1 \leq z \leq l_2$

$$Z_{\varepsilon x2}(z) = \eta_2 \frac{Z_{H2} + \eta_2 \operatorname{th} \gamma_2 (l_2 - z)}{\eta_2 + Z_{H2} \operatorname{th} \gamma_2 (l_2 - z)}. \quad (29)$$

Амплитуды падающей и отраженной волны в сечении z равны соответственно

$$b_1 = \frac{b_0 \Gamma(z) e^{-\gamma_2 z}}{1 - \Gamma_3 \Gamma(z) e^{-2\gamma_2 z}}, \quad b_2 = \frac{b_0 \Gamma(z) e^{-\gamma_2 z}}{1 - \Gamma_3 \Gamma(z) e^{-2\gamma_2 z}},$$

где

$$\Gamma(z) = \frac{Z_{\varepsilon x2}(z) - \eta_2}{Z_{\varepsilon x2}(z) + \eta_2}, \quad \Gamma_3 = \frac{Z_{\varepsilon x1} - \eta_2}{Z_{\varepsilon x1} + \eta_2}, \quad Z_{\varepsilon x1} = \eta_1 \frac{Z_{H1} + \eta_1 \operatorname{th} \gamma_1 l_1}{\eta_1 + Z_{H1} \operatorname{th} \gamma_1 l_1}.$$

Наконец, плотность активной мощности в сечении z по аналогии с (23) имеет вид

$$P(z) = \frac{|b_0|^2 |1 + \Gamma(z)|^2 \operatorname{Re} Z_{\text{ex2}}(z) e^{-\gamma_2(z-l_1)}}{|1 - \Gamma_3 \Gamma(z) e^{-2\gamma_2(z-l_1)}|^2 |Z_{\text{ex2}}(z)|^2}. \quad (30)$$

Сравнивая (28) при $z = l_1$ с (26), найдем $|b_0|^2$ и тогда (30) перепишем как

$$P(z) = P \frac{(1 - |\Gamma_2|^2) |1 - \Gamma_3 \Gamma(l_1) e^{-2\gamma_2 l_1}|^2 |1 + \Gamma(z)|^2 \operatorname{Re} Z_{\text{ex2}}(z) |Z_{\text{ex2}}(l_1)|^2 |e^{-\gamma_2(z-l_1)}|^2}{|1 - \Gamma_1 \Gamma_2 e^{-2\gamma_1 l_1}|^2 |1 - \Gamma_3 \Gamma(z) e^{-2\gamma_2(z-l_1)}|^2 |1 + \Gamma(l_1)|^2 \operatorname{Re} Z_{\text{ex2}}(l_1) |Z_{\text{ex2}}(z)|^2}. \quad (31)$$

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 Δl_i . Для внутренних и наружных слоев с номерами i на шаге j по времени температура может быть найдена соответственно по соотношениям

$$\begin{aligned} T_{i,j+1} &= T_{i,j} + \left(q_{v_i} \Delta l - k_{T_i} (T_{i,j} - T_{i-1,j}) - k_{T_i} (T_{i,j} - T_{i+1,j}) \right) \frac{\Delta \tau}{c_i \rho_i \Delta l}, \\ T_{i,j+1} &= T_{i,j} + \left(q_{v_i} \Delta l - k_{T_i} (T_{i,j} - T_{i-1,j}) - k_{T_i} (T_{i,j} - T_{i+1,j}) \right) \frac{\Delta \tau}{c_i \rho_i \Delta l}. \end{aligned} \quad (32)$$

Здесь $q_{v_i} = \frac{|P(z_i) - P(z_{i-1})|}{\Delta l}$ – мощность потерь в i -м слое объекта; c_i, ρ_i – удельная

теплоемкость и плотность; Δl – толщина слоя; Δt – интервал времени нагрева; T_B – температура окружающей среды; k_{T_i}, k_{c_i} – тепловые проводимости соответственно между внутренними слоями и между телом и окружающей средой, для плоской одномерной задачи их можно определить по формулам

$$k_{T_i} = \frac{\lambda_i}{\Delta \lambda}, \quad k_{c_i} = \frac{1}{\frac{\Delta \lambda}{2\lambda_i} + \frac{1}{h_k}},$$

где λ_i – коэффициент теплопроводности.

Расчеты по (31) проводятся для i плоских слоев, на которые разбивается объект для все новых шагов по времени j с учетом зависимостей $\varepsilon'_2(T), \operatorname{tg} \delta(T)$ до тех пор, пока температура кого-либо слоя не достигает допустимого для данного технологического процесса значения. При этом с учетом (30) от слоя к слою рассчитывается для каждого интервала времени Z_{ex2} (29).

Результаты моделирования поля температур для нагрева спеков керамик SiO_2 представлены на рис.2.

Анализ температурного поля указывает на неоднородный характер распределения температуры по объему спека керамики. Выравнивание распределения температуры возможно подбором темпа нарастания температуры, путем задания скорости изменения мощности СВЧ энергии, либо изменением конструкции камеры СВЧ нагрева.

Рис.2. Зависимости температуры в процессе спекания керамик в поле СВЧ

ЛИТЕРАТУРА

1. Вуков Y.V., Rybakov K.I., Semenov V.E. //J. Phys D: Appl. Phys. 2001. V. 34. P.R 55.
2. Архангельский Ю.С. СВЧ электротермия /Ю.С. Архангельский. Саратов: СГТУ, 1998. 408 с.
3. Кожевников В.Ю. Спекание керамических материалов в сверхвысокочастотном электромагнитном поле /В.Ю.Кожевников. //Вестник СГТУ. 2006. №1 (10). Вып. 1. С.99–104.
4. 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.
5. Марков Г.Т. Математические методы прикладной электродинамики /Г.Т.Марков, Е.Н. Васильев. М.: Машиностроение, 1990. 204 с.
6. Лыков А.В. Теория тепло- и массопереноса /А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963.472 с.

Кожевников Вячеслав Юрьевич –

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

УДК 621.365.5

К.Н. Огурцов

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ СВЧ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК
ДЛЯ РАВНОМЕРНОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

Рассмотрены основные вопросы проектирования СВЧ электротехнологических установок. Предложены критерии выбора рабочих камер. Рассмотрены вопросы проектирования СВЧ электротермических установок с несколькими излучателями.

K. N. Ogurtsov

**THE PROJECTION OF MICROWAVE PLANTS FOR UNIFORMLY HEAT
TREATMENT OF LARGE DIELECTRICS**

The questions of projection microwave plants, the criterion of process chamber choice, the projection microwave plants with several radiators were under review in this article.

Требование равномерного нагрева – одно из главных требований к технологическому процессу обработки диэлектриков. Исключение составляет разве что задача разрушения диэлектрического материала (изделия), для чего требуется локальный неравномерный нагрев, вызывающий в теле механические напряжения, приводящие, в конечном счете, к нарушению его целостности. Нередко технология конкретных производств задает разработчикам электротермических установок весьма жесткие требования по допустимой неравномерности нагрева. И эти допуски бывают весьма жесткими. Так, в пищевой промышленности и при производстве фармацевтической продукции неравномерность нагрева по объему тела не должна превышать $\pm 2-3\%$ [1].

Решить эту проблему можно двумя путями. При теплоподводе к нагреваемому телу по его поверхности (конвективный нагрев и нагрев тепловым излучением) можно обеспечить заданную равномерность нагрева, периодически прерывая теплоподвод с тем, чтобы температура тела выровнялась за счет его теплопроводности. Такой способ достижения равномерного нагрева диэлектриков решает проблему, но имеет серьезный недостаток: существенно увеличивается время термообработки. Другой способ – объемное тепловыделение, которое можно получить с помощью высокочастотного и сверхвысокочастотного диэлектрического нагрева [1–3].

Выбор типа рабочей камеры

Температурный режим, а следовательно, и время нагрева определяется технологическим процессом и, таким образом, должно быть задано конструктору печи технологами на основе имеющегося опыта нагрева аналогичных деталей в уже эксплуатирующихся печах. Часто, однако, эти данные являются весьма ориентировочными и требуют проверки. Кроме того, иногда технологи ограничиваются тем, что задают лишь конечную температуру нагреваемого изделия, максимальные допустимые скорости нагрева и максимально допустимые перепады температур внутри тела.

Критерии массивности нагреваемых объектов, используемые в «классической» электротермии [4], не могут использоваться при СВЧ диэлектрическом нагреве, поскольку они не

учитывают его специфику. Как было предложено в [5], при разработке СВЧ электротермических установок удобнее использовать критерии массивности:

$$K_{\delta} = \frac{l}{\Delta p}, \quad (1)$$

где Δp – глубина проникновения электромагнитной волны по мощности; l – размер диэлектрика.

Критерий большой площади поверхности:

$$K_S = \frac{S}{S_p}, \quad (2)$$

где S – площадь обрабатываемой поверхности; S_p – площадь, облучаемая рупорной антенной.

Если $K_{\delta} < 0,3$, можно считать, что объем диэлектрика мал, если $K_{\delta} > 0,6$ – велик [6].

Если K_{δ} находится в диапазоне от 0,3 до 0,6, то объем диэлектрика можно считать как большим, так и малым.

Таким образом, если $K_S > 1$, то можно считать, что диэлектрик имеет большую поверхность, если $K_S < 1$ – малую.

Алгоритмы расчета рупорных и волноводно-щелевых антенн приведены в [5].

Проектирование СВЧ рабочих камер лучевого типа с несколькими излучателями

Для равномерного нагрева всего объема диэлектрика в первую очередь требуется равномерное распределение удельной СВЧ мощности по поверхности нагреваемого диэлектрика [5]. На практике получить равномерное распределение удельной мощности по поверхности достаточно сложно, поскольку излучающие системы рабочих камер лучевого типа (рупорные, волноводно-щелевые антенны) имеют сложные диаграммы направленности, т.е. излучаемые мощности в разных направлениях различаются.

При проектировании камер лучевого типа с волноводно-щелевыми резонансными антеннами проблемы равномерности распределения СВЧ мощности по поверхности нагреваемого объекта не возникает, поскольку такие антенны имеют равномерную диаграмму направленности вдоль оси волновода. Располагая несколько таких антенн параллельно, можно получить равномерное распределение СВЧ мощности по любой площади.

Рупорные антенны не дают равномерного распределения СВЧ мощности по поверхности диэлектрика [7], однако если разместить однотипные рупорные излучатели на определенном расстоянии друг от друга, то суммарное распределение СВЧ мощности будет близко к равномерному.

На практике для термообработки больших поверхностей приходится применять совокупность нескольких излучающих систем, запитывая их от разных генераторов (рис. 1 а). При этом удельные поверхностные мощности от разных антенн будут складываться алгебраически (рис. 1 б, в), поскольку источники некогерентные. На рис. 2 представлено семейство кривых, описывающих распределение удельной СВЧ мощности при расположении пяти рупоров на одинаковом расстоянии друг от друга, при наложении энергетических «пятен» рупоров в плоскости Е.

Как видно, равномерность распределения удельной суммарной мощности от нескольких антенн сильно зависит от расстояния между рупорами. Нахождение оптимального расстояния между рупорами удобнее решать численно с помощью ЭВМ. При решении этой задачи необходимо учитывать, что расстояние между двумя ближайшими рупорами может лежать в диапазоне от ширины широкой стенки в раскрытие рупора до расстояния, при котором наложения мощности практически не происходит [7]. Поскольку при угле $\theta = \frac{\lambda}{b}$ (в плоско-

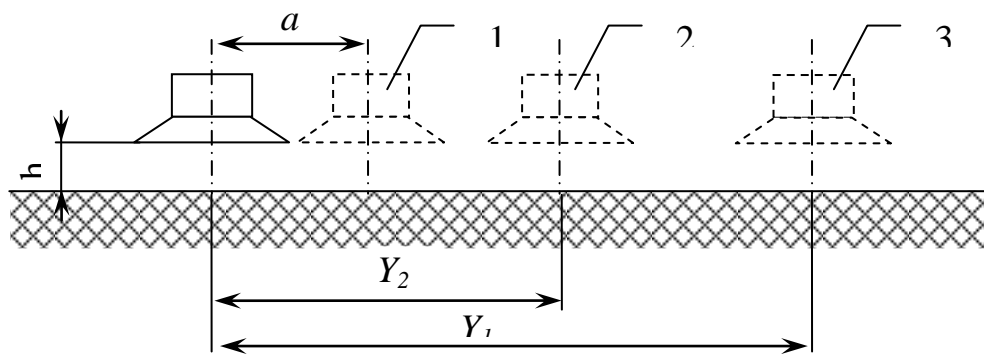
сти E) и $\theta = 1,5 \frac{\lambda}{a}$ (в плоскости H) СВЧ мощность практически равна нулю, то на практике максимальное расстояние для плоскости E удобно брать

$$Y_1 = \operatorname{tg}\left(\frac{\lambda}{b}\right) \cdot h, \quad (3)$$

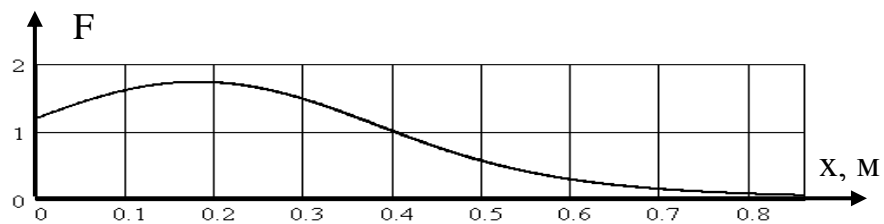
для плоскости H

$$X_1 = \operatorname{tg}\left(1,5 \frac{\lambda}{a}\right) \cdot h, \quad (4)$$

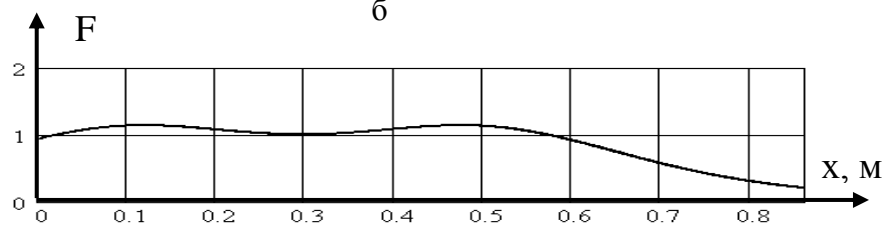
где h – расстояние от антенны до поверхности обрабатываемого диэлектрика.



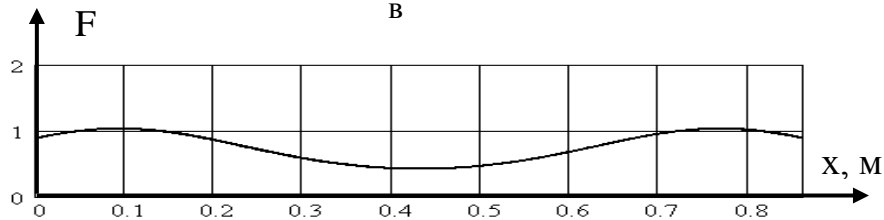
а



б



в



г

Рис. 1. Излучающая система, состоящая из двух рупоров (а), положение второго рупора

показано пунктиром, и распределение поверхностной мощности по обрабатываемому объекту при различных расстояниях между рупорами $\Delta l = a$ (б), $\Delta l = 2,4a$ (в), $\Delta l = 4,5a$ (г)

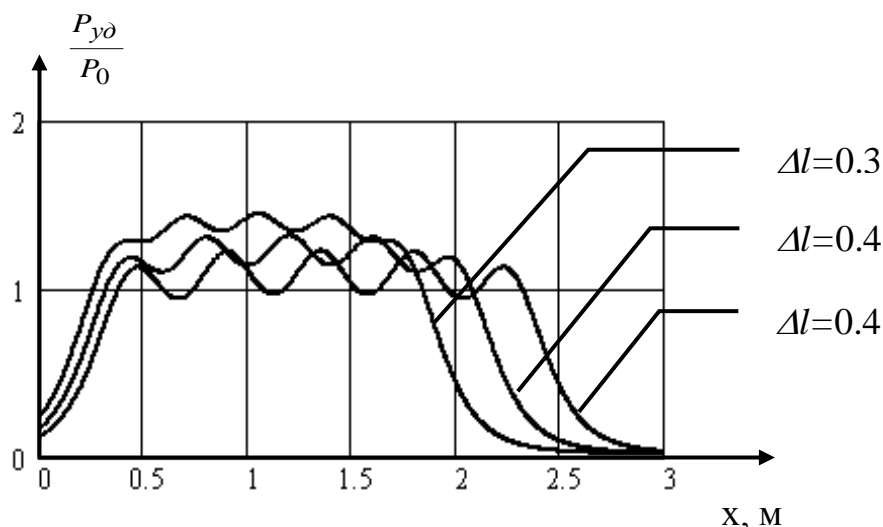


Рис. 2. Распределения относительной удельной поверхностной мощности при различных расстояниях между рупорами Δl

Поскольку на больших расстояниях от рупоров диаграмма направленности определяет распределение удельной поверхностной мощности, то по ней можно его найти.

Введем параметр γ , определяющий равномерность распределения удельной мощности [7]:

$$\gamma(\Delta l) = \frac{P_{\max}(\Delta l) - P_{\min}(\Delta l)}{P_{\max}(\Delta l)}, \quad (5)$$

где $P_{\max}(\Delta l)$ и $P_{\min}(\Delta l)$ – максимальное и минимальное значение функции распределения мощности на участке относительно равномерного распределения (от максимума первой антенны до максимума от последней антенны), при фиксированном расстоянии Δl между рупорами.

Зависимость γ от расстояния между рупорами (рис. 3) имеет минимум, который и является оптимальным расстоянием между рупорами.

На рис. 4 представлено оптимальное (с точки зрения равномерности) распределение удельной мощности в плоскости E по поверхности диэлектрика при пяти излучающих рупорах в случае, когда диэлектрик расположен на расстоянии 0,5 м от излучателей.

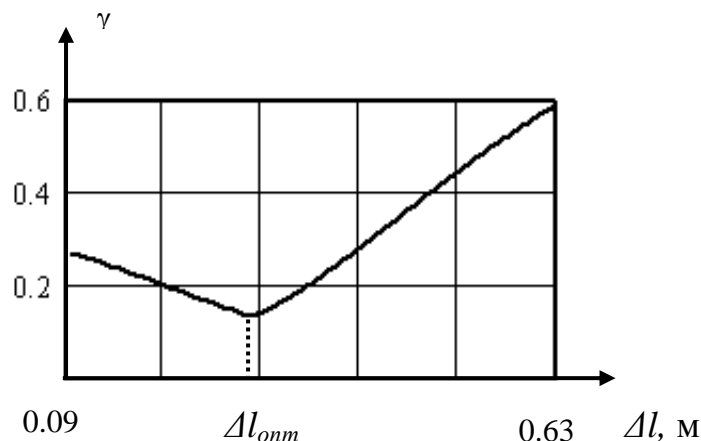


Рис. 3. Зависимость относительной неравномерности γ от расстояния между рупорами

($a = 90$ мм, $b = 45$ мм, расстояние от рупора до диэлектрика $h = 500$ мм),
для пяти рупоров в плоскости E

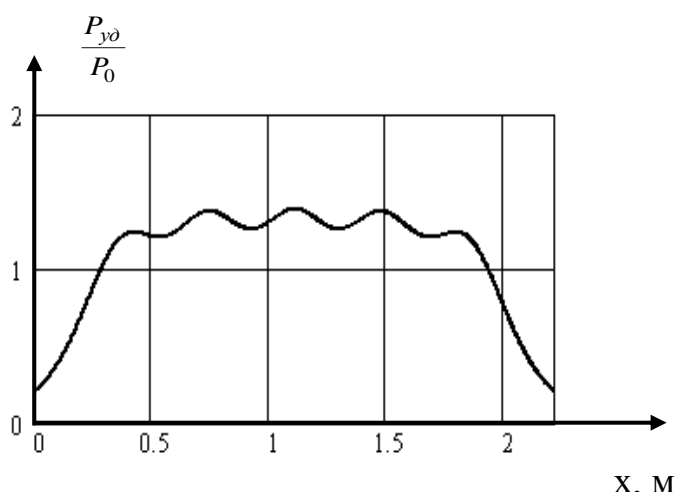


Рис. 4. Распределение относительной удельной поверхностной мощности при оптимальном ($\Delta l = 0,37$ м) расстоянии между пятью рупорами

Аналогичную задачу можно решить и для рупоров, секториальных в плоскости H.

Таким образом, в случае выбора рупоров в качестве излучающей системы проектировщику установки СВЧ диэлектрического нагрева необходимо после расчета геометрии рупоров решить задачу оптимального (с точки зрения наиболее равномерного распределения СВЧ мощности) размещения последних относительно друг друга.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рогов И.А. Электрофизические методы обработки пищевых продуктов /И.А.Рогов. М.: Агропромиздат, 1988. 342 с.
2. Нетушил А.В. Высокочастотный нагрев в электрическом поле /А.В.Нетушил и др. М.: Высшая школа, 1961. 305 с.
3. Архангельский Ю.С. СВЧ электротермия /Ю.С.Архангельский. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 1998. 408 с.
4. Свенчанский А.Д. Электрические промышленные печи. Ч.1 /под ред. А.Д. Свенчанского. М.: Энергоиздат, 1981. 296 с.
5. Огурцов К.Н. Разработка методов расчета электротермических установок и математического моделирования процессов термообработки диэлектриков с большими объемами и поверхностями: дис. ... канд. техн. наук /К.Н.Огурцов. Саратов, 2004. 203 с.
6. Огурцов К.Н. Диэлектрики с большими объемами /К.Н.Огурцов. //Электро- и теплотехнологические процессы и установки: межвуз. науч. сб. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2003. С. 22 – 25.
7. Огурцов К.Н. Распределение удельной СВЧ мощности по поверхности нагреваемого диэлектрика при наличии нескольких излучающих систем в камере лучевого типа /К.Н.Огурцов. //Электротехника, электромеханика и электротехнологии: материалы науч.-техн. конф. с междунар. участием /под ред. В.А. Тюкова. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. С. 201–206.

Огурцов Константин Николаевич –

кандидат технических наук, заместитель заведующего кафедрой «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета
УДК 533.95

Ю.А. Бизянов

ТЕРМОАКУСТИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ ПЛОТНОСТИ В ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОМ СВЧ РЕАКТОРЕ

Рассматривается использование термоакустических волн плотности в плазмохимическом реакторе СВЧ для управления равномерностью получаемых покрытий в плазмохимической технологии.

Y.A. Bizianov

TERMOACOUSTIC WAVES OF DENSITY IN PLASMACHEMICAL ULTRA HIGH FREQUENCY REACTOR

Application of thermoacoustic waves of density in plasmachemical ultra high frequency reactor for management of uniformity of received coverings in plasmachemical technology.

Поведение плазменного потока в рабочей камере плазмохимического СВЧ реактора изучено в достаточной степени. Известно, что для управления характеристиками плазменного процесса используются давление, частота, мощность, скорость потока и температура [4]. Но также известно, что при плазменном напылении на технологической подложке возникают неоднородности. Поэтому попытки построения моделей поведения и, как следствие, автоматизации управления низкотемпературной плазмой при создании тонкопленочных структур стали предприниматься относительно недавно.

В литературе существует практическое подтверждение термических и акустических эффектов в полярных газах. Отмечается, что в результате изучения спектров поглощения газа на СВЧ было обнаружено поглощение микрорадиоволн и переход этой энергии в тепловую и звуковую. Для наблюдения акустических эффектов применяется модуляция микроволн, а газ помещается в объем, одновременно служащий объемным и акустическим резонатором на частоту модуляции.

Рассмотрим цилиндрический плазмохимический реактор (рис.1), в котором с помощью СВЧ энергии возбуждается низкотемпературная плазма. В реактор с помощью форсунки или эжектора подается плазмообразующий полярный газ и химический материал, который взаимодействует с технологической подложкой.

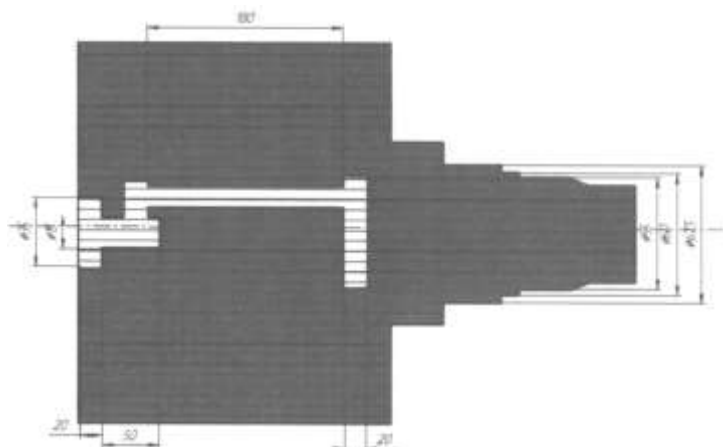


Рис.3. Распределение Е-поля вблизи подложки: 1 – технологическая подложка,
1* – максимальная концентрация частиц

Как было сказано выше, существует несколько параметров управляющих плазменным процессами. Управление распределением концентраций частиц в плазме в плазмохимическом реакторе СВЧ направлено на достижения наибольшей равномерности получаемой в процессе травления структуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зарембо Л.К. Введение в нелинейную акустику /Л.К. Зарембо, В.А. Красильников. М.: Наука, 1966. С. 506.
2. Харкевич А.А. Автоколебания / А.А. Харкевич. М.: Гостехиздат, 1954. С. 208.
3. Седельников Т.Х. Автоколебательное шумообразование при истечении газовых струй /Т.Х. Седельников. М.: Наука, 1971. С. 84.
4. Суздальцев С.Ю. Письма в Журнал технической физики /С.Ю.Суздальцев, Р.К. Яфarov //ЖТФ. 2001. Т. 27. № 15. С. 77–82.
5. Вихарев А.Л. Физика плазмы / А.Л Вихарев, В.Б. Гильденбург, О.А. Иванов и др. М.: Наука, 1984. Т.10. №1.
6. Релей Дж.В. Теория звука / Дж.В. Релей. М.: Гостехиздат, 1955. Т.2. С.400.
7. The Visualisation Toolkit /Ken Martin, Will Schroeder, Bill Lorensen, etc. CST. 2003. P.56.
8. Бизянов Ю.А. Автогенерация акустических шумовых колебаний в плазмохимическом реакторе /Ю.А. Бизянов //Системы и функциональные устройства низких и сверхвысоких частот: сб. науч. трудов. Саратов: СГТУ, 2005. С. 67–68.

Бизянов Юрий Анатольевич –

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

УДК 621.365.5

Е.М. Гришина, С.Г.Калганова

РАБОЧАЯ КАМЕРА СВЧ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ НЕТЕПЛОВОЙ МОДИФИКАЦИИ ТКАНЕЙ С ПОЛИМЕРНОЙ НИТЬЮ

Рассмотрен новый класс СВЧ электротехнологических установок, реализующих нетепловое воздействие электромагнитных колебаний дециметрового диапазона, для модификации свойств тканей с полимерной нитью.

Е.М. Grishina, S.G. Kalganova

THE WORKING CHAMBER OF THE MICROWAVE ELECTROTECHNOLOGICAL INSTALLATIONS FOR NOT THERMAL MODIFICATION FABRICS OF POLYMERIC FIBER

The new class of the microwave electrotechnological installations realizing not thermal microwave influence of electromagnetic fluctuations of a decimeter range, for updating properties of polymeric fabrics is considered.

Наряду с широко распространенным тепловым действием СВЧ электромагнитных колебаний остается малоизученным их нетепловое воздействие на диэлектрики, в частности на полимеры.

В настоящее время установлена возможность модификации свойств при нетепловой обработке в СВЧ электромагнитном поле некоторых материалов разного технологического назначения. Это смазочные охлаждающие жидкости (СОЖ) и вязкие смазочные материалы, терморезистивные смолы, в частности эпоксидные; текстильные материалы и волокна на основе поликапроамида (ПКА).

В этом отношении обращает на себя внимание модификация свойств химических волокон, имеющих большое практическое значение при производстве таких технических средств, как изоляционные, пленочные материалы, фильтрующие ткани, медицинские принадлежности, а также в создании текстильных и композиционных материалов, которые превратились в самостоятельный класс материалов с широкой сферой применения.

Под нетепловым воздействием СВЧ электромагнитных колебаний понимается кратковременная обработка объекта в СВЧ электромагнитном поле при фиксированном постоянном уровне СВЧ мощности, когда температура объекта остается практически постоянной [1].

Рабочая камера для СВЧ электротехнологической установки для обработки тканей с полимерной нитью должна удовлетворять следующим требованиям:

- камера должна обеспечивать наиболее эффективное взаимодействие объекта обработки с СВЧ электромагнитной волной: вектор напряженности электрического поля должен совпадать по направлению с поликапроамидной нитью в ткани;
- распределение напряженности электрического поля E по объему объекта должно быть равномерным;
- обрабатываемый объект должен размещаться в зоне максимальной напряженности электрического поля E .

При проектировании рабочей камеры СВЧ электротехнологической установки для модификации поликапроамидных тканей задаются:

- длина волны λ СВЧ генератора (речь идет об одной из частот, разрешенных к применению в СВЧ электротехнологических установках – 2450, 915, 433 МГц);
- напряженность электрического поля $E_{зад}$ электромагнитной волны, при которой наблюдается максимально благоприятное изменение контролируемого технологического параметра ткани;
- допустимое отклонение $\pm \Delta E_{дон}$ от $E_{зад}$, при котором не превышает допустимое отклонение значения контролируемого параметра от его максимального значения;
- время t пребывания обрабатываемого материала в СВЧ электромагнитном поле;
- допустимое отклонение $\pm \Delta t$ от t ;
- ориентация обрабатываемого материала относительно вектора напряженности E электромагнитного поля (для поликапроамидной нити, например, по направлению вектора напряженности E);
- производительность P установки (например в м/с);
- габариты обрабатываемого материала (ткани), ее длина, ширина, а также диаметр поликапроамидной нити.

Рабочая камера СВЧ электротехнологической установки для нетепловой обработки тканей с полимерной нитью, представлена на рис.1а. Она представляет собой систему рупорных излучателей, последовательно соединенных отрезками прямоугольных волноводов с поворотами. Ткань транспортируется между рупорными излучателями, причем полимерная

нить находится в пучности волны типа H_{10} , что вектор напряженности E совпадает с направлением ПКА нити в ткани.

Учитывая направление ПКА нити в ткани, в качестве рупорного излучателя рекомендуется секториальный H-рупор, показанный на рис.1б.

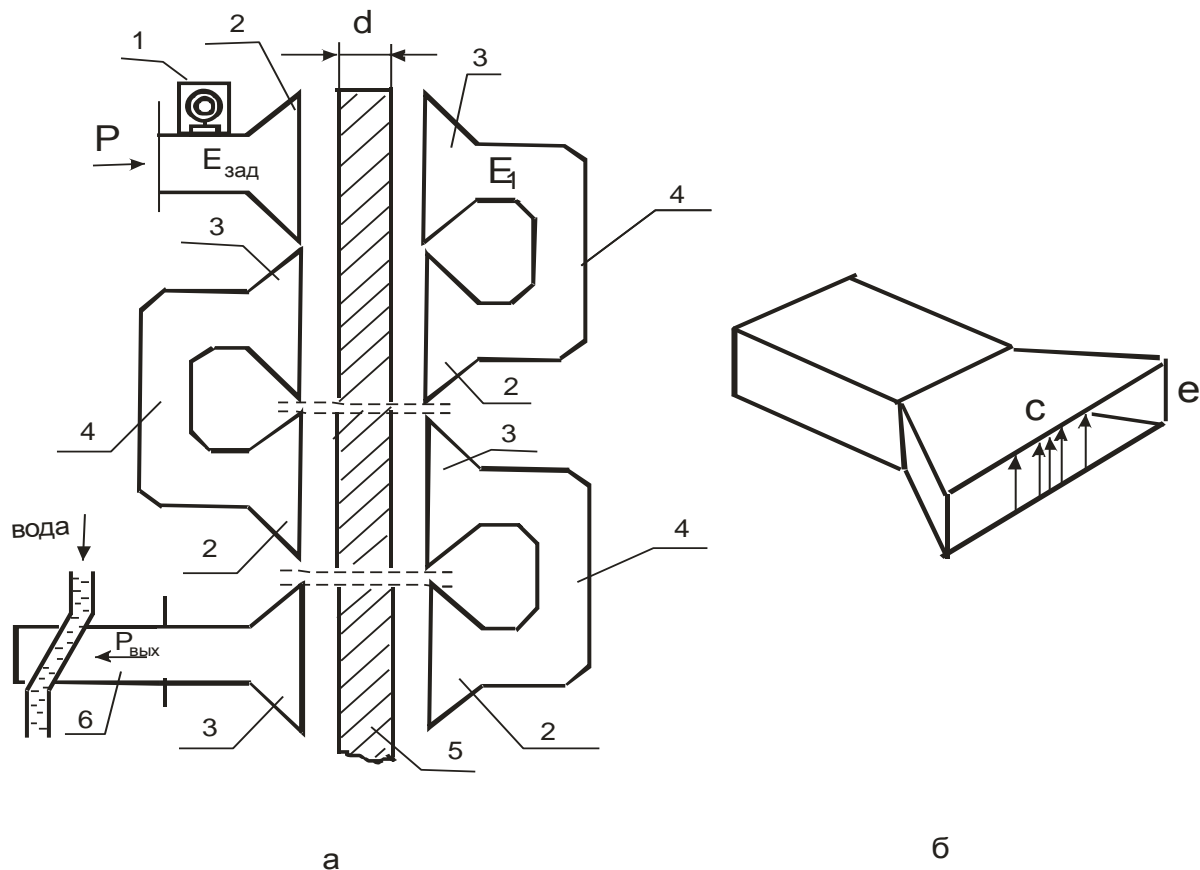


Рис.1. Рабочая камера СВЧ электротехнологической установки для нетепловой обработки тканей с ПКА нитью: а – система рупорных антенн с волноводами (1 – СВЧ генератор, 2 – излучающие рупоры, 3 – приемные рупоры, 4 – волноводные повороты, 5 – обрабатываемая ткань, 6 – балластная нагрузка); б – рупорный излучатель

На рис. 2 представлено расположение рупорных излучателей по длине и ширине обрабатываемой ткани.

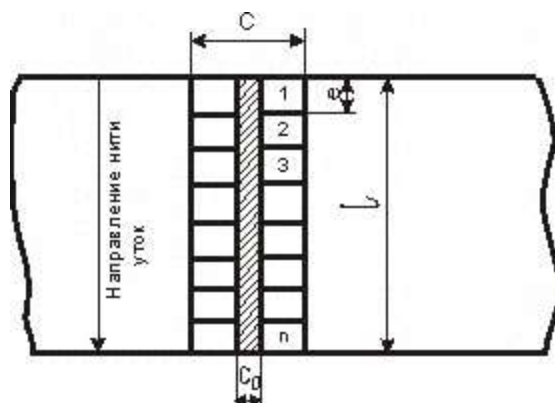


Рис.2. Размещение рупорных излучателей по длине и ширине ткани: c , e – большая и малая стороны апертуры излучателя; l – ширина ткани; c_0 – обработанная поверхность с максимальной напряженностью; 1, 2, 3, ... n – рупоры

Источник энергии должен иметь блоки СВЧ генератора и питания. В качестве СВЧ генератора может быть использован магнетрон, генерирующий СВЧ колебания с регулирующей мощностью на частоте 2450 МГц.

Энергия СВЧ подводится по прямоугольному волноводу сечением ($a \times b$) с волной типа H_{10} с помощью рупорного излучателя с апертурой ($c \times e$).

Оконечная волноводная нагрузка представляет собой прямоугольный волновод с наклонно расположенной кварцевой трубкой, по которой прокачивается проточная вода, поглощающая СВЧ энергию.

Рупорные излучатели должны удовлетворять следующим требованиям:

- равномерное распределение СВЧ энергии на облучаемой поверхности обрабатываемого материала;
- согласование линии передачи, подводящей энергию от СВЧ генератора, с пространством, в которое происходит излучение;
- малые габариты и простота конструкции антенны [3].

Рассчитаем количество рупоров, необходимое для обработки ткани по всей ее длине:

$$n = \frac{l}{e}, \quad (1)$$

где l – ширина ткани; e – меньшая из сторон апертуры рупора.

Время обработки (пребывания в СВЧ электромагнитном поле при заданной напряженности E) ткани $t_{обр}$ является величиной нормативной, т.е. заданной. Она определяется на стадии экспериментального исследования нетеплового воздействия на ПКА нить и равна

$$t_{обр} = \frac{c_0}{v}, \quad (2)$$

где v – скорость транспортировки ткани; c_0 – обработанная поверхность с максимальной напряженностью (см. рис.2).

Тогда скорость транспортировки ткани при одном ряде излучателей равна

$$v_1 = \frac{c_0}{t_{обр}}, \quad (3)$$

а при m рядов

$$v_m = \frac{m \cdot c_0}{t_{обр}} \quad (v_m > v_{m-1}), \quad (4)$$

С помощью соотношения (4) можно найти число рядов рупоров, если известна требуемая производительность установки

$$m = \frac{v \cdot t_{обр}}{c_0}. \quad (5)$$

Рассчитаем изменение напряженности электромагнитного поля волны от одной пары рупоров к другой.

Учитывая затухание электромагнитной волны в обрабатываемой ткани, напряженность на входе второго рупора равна

$$E_1 = E_{зад} e^{-\alpha d}, \quad (6)$$

где α – коэффициент затухания в ткани; d – толщина ткани.

Тогда отклонение E_1 от $E_{зад}$ равно

$$\Delta E_1 = E_{зад} - E_{зад} e^{-\alpha d} \approx E_{зад} \alpha d, \quad (7)$$

т.к. $ad \ll 1$.

После прохождения каждой пары рупоров нужно сравнивать $\Delta E_{\partial on}$ и ΔE_i , проверяя условие

$$\Delta E_i \leq |\Delta E_{\partial on}|, \quad (8)$$

причем, если $\Delta E_i < |\Delta E_{\partial on}|$, то подобные расчеты проводятся для следующей пары рупоров.

Если же условие (8) не выполняется, необходимо направлять СВЧ энергию в балластную нагрузку. Если даже это условие не выполняется при числе рупоров меньше m , то СВЧ энергию надо направить в балластную нагрузку, а следующий рупор запитывать от нового СВЧ генератора.

Для увеличения числа рупоров, расположенных поперек ткани, можно выбрать мощность СВЧ генератора такой, чтобы на входе первого рупора выполнялось условие

$$E = E_{зад} + \Delta E. \quad (9)$$

Тогда на входе второго рупора напряженность равна

$$E_1 = (E_{зад} + \Delta E_{\partial on}) e^{-\alpha d}. \quad (10)$$

Допустимое отклонение E_1 от $E_{зад}$ будет

$$\Delta E_1 = E_{зад} - (E_{зад} + \Delta E_{зад}) e^{-\alpha d}. \quad (11)$$

Рассчитаем КПД рабочей камеры по использованию СВЧ энергии. На входе второго рупора мощность

$$P_1 = P_{зад} e^{-2\alpha d}, \quad (12)$$

$$\Delta P_1 = P_{зад} - P_{зад} e^{-2\alpha d}. \quad (13)$$

Если мы имеем n пар рупоров, то на входе последнего рупора мощность равна

$$P_{вых} = P_0 e^{-2\alpha dn}, \quad (14)$$

которая и направляется в балластную нагрузку.

В таком случае КПД по использованию СВЧ энергии

$$\eta = \frac{P_{погл}}{P}, \quad (15)$$

где

$$P_{погл} = P - P_{б\ нагр}, \quad (16)$$

$$\eta = \frac{P - P_{б\ нагр}}{P} = 1 - e^{-2\alpha d}, \quad (17)$$

Если $2\alpha dn \ll 1$, то

$$\eta = 2\alpha nd. \quad (18)$$

Таким образом, приведенные в работе соотношения позволяют определить: количество рупоров при заданной ширине ткани, количество рядов рупоров в зависимости от производительности установки, скорость транспортировки ткани с учетом заданного времени обработки и КПД по использованию СВЧ энергии.

При нетепловой модификации тканей с ПКА нитью существенного поглощения СВЧ энергии в ткани не происходит, от чего КПД подобных установок весьма мал. По этой причине целесообразно не рассеивать СВЧ энергию в балластной нагрузке, а использовать ее в другой СВЧ установке реализующей электротермический процесс обработки диэлектрика.

ЛИТЕРАТУРА

1. Архангельский Ю.С. Рабочая камера СВЧ электротехнологической установки для модификации полимерных волокон./ Ю.С.Архангельский, С.Г. Калганова //Вестник СГТУ. 2004. № 1(2). С. 86–88.

2. Никольский В.В. Антенны /В.В.Никольский. М.: Связь, 1966. 358 с.

3. Фрадин А.З. Антенно-фидерные устройства /А.З.Фрадин. М.: Связь, 1977. 440 с.

Гришина Екатерина Михайловна –

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

Калганова Светлана Геннадьевна –

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

УДК 621.365.5

А.В. Доценко

ВЛИЯНИЕ УЩЕРБА И РЕЗЕРВИРОВАНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ УСТАНОВОК СВЧ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАГРЕВА

В статье рассмотрен энергетический КПД установок СВЧ диэлектрического нагрева, а также приведено соотношение для экономической эффективности с учетом ущерба и резервирования установок СВЧ диэлектрического нагрева.

A.V. Dozenko

INFLUENCE OF THE DAMAGE AND STANDBIES ON EFFICIENCY OF THE INSTALLATION MICROWAVE DIELECTRIC OF THE HEATING

In article is considered energy KPD installation microwave dielectric of the heating, as well as is brought correlation for cost-performance with provision for damage and reservation of the installation microwave dielectric of the heating.

До последнего времени при проектировании установок СВЧ диэлектрического нагрева (У СВЧ ДН) основное внимание уделялось расчету рабочих камер и конструкций этих установок.

Однако сейчас, когда во многом теория У СВЧ ДН разработана, приоритетными являются вопросы обеспечения конкурентоспособности этих установок на рынке современного технологического оборудования. В этих условиях особый интерес представляет проблема эффективности У СВЧ ДН с учетом неизбежного ущерба в процессе их эксплуатации и резервирования, направленного на уменьшение этого ущерба. Ключевыми здесь являются вопросы об энергетической и экономической эффективности установок.

В общем случае энергетическая эффективность (энергетический КПД) У СВЧ ДН определяется соотношением

$$\eta_{эн} = \eta_{эл} \eta_m,$$

где $\eta_{эл} = \frac{P_{СВЧ}}{P_{эл}}$ – электрический КПД, а $\eta_m = \frac{P_{погл}}{P_{СВЧ}}$ – тепловой КПД, $P_{погл} = (1 - |\Gamma|^2)P_{СВЧ} - P_{\Sigma}$ – мощность, поглощенная обрабатываемым объектом; $P_{эл}$ – мощность, потребляемая установкой от сети промышленной частоты; $P_{СВЧ}$ – СВЧ мощность источника СВЧ энергии установки, генерируемая на согласованную нагрузку; P_{Σ} – мощность потерь в рабочей камере из-за конвекции, излучения и теплоотдачи теплопроводности; Γ – коэффициент отражения от рабочей камеры.

Следовательно,

$$\eta_{эн} = \eta_{эл} \left[1 - \left(|\Gamma|^2 + \frac{P_{\Sigma}}{P_{СВЧ}} \right) \right].$$

У современных СВЧ генераторов $\eta_{эл} = 0,5 \div 0,8$, наименьший коэффициент отражения $|\Gamma| = 0,17$ можно обеспечить в установке с рабочей камерой с бегущей волной, а максимально допустимый $|\Gamma| = 0,5$ определяется условием безаварийной работы источника СВЧ энергии на рассогласованную нагрузку, так что

$$0,75 - \frac{P_{\Sigma}}{P_{СВЧ}} \leq \eta_m \leq 0,97 - \frac{P_{\Sigma}}{P_{СВЧ}}.$$

В правильно сконструированных рабочих камерах с учетом кратковременности СВЧ термообработки $\frac{P_{\Sigma}}{P_{СВЧ}} \leq 1$, а потому у современных У СВЧ ДН

$$0,38 \leq \eta_{эн} \leq 0,69. \quad (1)$$

Для сопоставления энергетической эффективности У СВЧ ДН с установками для термообработки диэлектриков с иным теплоподводом приходится говорить о системной энергетической эффективности

$$\eta_{энс} = \eta_{ит} \eta_{эн}, \quad (2)$$

где $\eta_{ит}$ – коэффициент использования топлива.

Поскольку у тепловых электростанций $\eta_{ит} \approx 0,35 - 0,38$ [1, 2], то (2) с учетом (1)

$$0,13 \leq \eta_{энс} \leq 0,26.$$

Для примера в среднем у теплотехнологических установок $0,25 \leq \eta_{эн} \leq 0,35$, тогда $0,09 \leq \eta_{энс} \leq 0,13$.

Итак, энергетическая эффективность у СВЧ электротехнологических установок выше, чем у теплотехнологических, обеспечивающих получение того же продукта, в том же качестве и в том же объеме. Однако на этом основании делать безоговорочные выводы о целесообразности применения для термообработки диэлектриков СВЧ энергоподвода преждевременно: окончательное решение следует принимать с учетом экономической эффективности. Нужно заметить, что энергетическая эффективность существенно влияет на экономическую. Так, например, закладывая в проекте установки применение источников СВЧ энергии с таким $\eta_{эл}$, который потребует затрат на научную и опытно-конструкторскую разработку нового СВЧ магнетрона, проектировщик заведомо уменьшает экономическую эффективность установки. С другой стороны, низкий $\eta_{эл}$ при растущих тарифах на электроэнергию может, в свою очередь, уменьшить экономическую эффективность У СВЧ ДН.

Экономическая эффективность определяется отношением конечного результата работы к затратам, измеряемым в экономических категориях, основой которого являются деньги

$$\mathcal{E}_3 = \frac{B_1}{B},$$

где B и B_1 – конечный результат работы установки и затраты на его достижение в денежном выражении.

Под величиной B_1 следует понимать чистый дисконтированный доход или интегральный эффект [3]

$$B_1 = \sum_{t=0}^{t_{cl}} \left[\sum_{t=0}^t (P_i C_i)_t + H_t + S_t + M_t' - Z_t \right] (1 + E)^{-t} + \Phi_T (1 + E)^{-t}, \quad (3)$$

где P_i – количество i -й продукции, выпускаемой проектируемым объектом в t -й год его эксплуатации; C_i – цена единицы i -й продукции, выпускаемой проектируемым объектом в t -й год эксплуатации; n – число видов выпускаемой за время T продукции; t_{cl} – горизонт расчета B_1 ; H_t – стоимостная оценка сопутствующего эффекта в производственной сфере в t -й год эксплуатации; S_t – стоимостная оценка социального эффекта в t -й год эксплуатации; M_t – остаточная стоимость основных фондов производственной инфраструктуры, исключаемых из эксплуатации в t -й год; Z_t – эксплуатационные издержки на работу объекта, включая налоги, сборы и платежи, в t -й год эксплуатации; E – коэффициент приведения разновременных затрат и эффекта; Φ_T – остаточная на момент времени T стоимость основных фондов.

Отметим, что индекс доходности определяется соотношением

$$ИД = \frac{1}{K} \sum_{t=0}^{t_{cl}} (R_t - Z_t^*) (1 + E)^{-t},$$

где R_t – результаты, достигаемые в t -м году; Z_t^* – затраты, осуществляемые в t -м году при условии, что в них не входят капитальные затраты.

При расчете экономической эффективности можно ограничиться определением интегрального эффекта B_1 с горизонтом расчета в один год. Этот интервал предпочтительнее более мелких интервалов (месяц, квартал) и более длинных (2 – 3 года), потому что банковские кредиты на реализацию проекта всегда желательно брать на максимальный срок, но с учетом нынешней практики выдачи краткосрочных кредитов такой максимальный срок как раз равен одному году. Разумеется, после года эксплуатации ни часть, ни вся установка в целом из эксплуатации не выводится и не реализуется, то есть $C_{\Phi t} = 0$; $\Phi_{t_{cl}} = 0$.

Будем считать $C_{nt} = C_{ct} = 0$, так как сопутствующий эффект в производственной сфере достигается лишь в том редком случае, когда при термообработке объекта получается какой-либо еще продукт, имеющий рыночную цену, а учет стоимостной оценки социального эффекта требует специальных социально-экономических исследований, которые выходят за рамки данной работы. В результате соотношение (3) примет вид

$$B_{зам} = - \left[(C_{см} + C_3 + C_{3n} + Y) (1 - \gamma_n) + K (1,14 + i_{кр}) + C_{бр} \right],$$

где $C_{см}$ – затраты на сырье и материалы; γ_n – коэффициент, учитывающий систему налогов; γ_y – коэффициент, учитывающий участие учредителей в распределении прибыли; C_{3n} – затраты на заработную плату персонала, обслуживающего электротермическое оборудование; C_3 – затраты на электроэнергию и холодную воду, для охлаждения генератора; $C_{3ч}$ – затраты на приобретение запасных частей, вспомогательных материалов, необходимых для обеспечения работы установки в процессе эксплуатации (без учета затрат на резервирование); Y – величина ущерба; K – капиталовложения, рассчитанные с учетом резервирования; $i_{кр}$ – банковский процент; $C_{бр}$ – затраты, не включаемые в состав себестоимости (затраты на неизбежный брак).

Это соотношение можно использовать как целевую функцию для решения технико-экономических задач по оптимизации ущерба и резервирования. Стремясь уменьшить время простоя, т.е. сократить ущерб, проектировщик вынужден использовать более затратный вариант резервирования (например, вместо одних резервных магнетронов дополнительно резервировать целую технологическую установку). Это значит, что проектировщику необходимо выбирать вариант резервирования, а следовательно и величину ущерба так, чтобы интегральный годовой эффект от эксплуатации установки с резервом был максимальный.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андрющенко А.И. Оптимизация режимов работы и параметров тепловых электростанций /А.И.Андрющенко, Р.З.Аминов. М.: Высш. шк., 1983. 254 с.
2. Ларин Е.А. Техничко-экономическая оптимизация высокотемпературных АЭС /Е.А.Ларин. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 1989. 318 с.
3. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов и их отбору для финансирования /А.Г.Шахназаров и др. М., 1994. 57 с.

Доценко Анастасия Владимировна – аспирант кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета

УДК 621.365

Т.Ю. Дунаева

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЕКТОВ В СВЧ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ С УЧЕТОМ ФАКТОРОВ РИСКА

Рассматриваются некоторые способы оценки рисков при проектировании установок СВЧ диэлектрического нагрева, учет ущерба от простоя СВЧ установок, а также социальные аспекты инвестиций в разработку установок СВЧ диэлектрического нагрева.

T.Y. Dunaeva

ESTIMATION TO EFFICIENCY PROJECT OF INSTALLATION OF THE MICROWAVE OF DIELECTRIC HEATING WITH PROVISION FOR FACTOR OF THE RISK

Some ways of the estimation risk are considered when designing the installation of the microwave of dielectric heating, account of the damage from idle time microwave installation, as well as social aspects investment in development of the installation of the microwave of dielectric heating.

Решающим фактором при принятии решения о целесообразности разработки новой технологической установки, в том числе и установки СВЧ диэлектрического нагрева, является ее экономическая эффективность, зависящая от многочисленных параметров, учесть которые при решении оптимизационных задач можно только на базе системного подхода.

Экономическое обоснование инвестиционного проекта является этапом при принятии решения о необходимости и возможности его осуществления. Наиболее приемлемой в

настоящее время системой показателей экономической оценки инвестиционных проектов должна быть такая [1]:

- 1). чистый дисконтированный доход (ЧДД), или интегральный эффект ($\mathcal{E}_{инт}$);
- 2). расчетная рентабельность проекта E_{∂} ;
- 3). индекс доходности J_{∂} ;
- 4). срок (период) окупаемости $T_{ок}$.

Величина \mathcal{E}_{Σ} (чистого дисконтированного дохода) в общем случае вычисляется по формуле [2]

$$\mathcal{E}_{\Sigma} = ЧДД = \sum_{t=0}^T (R_t - Z_t) \cdot (1 + E)^{-t} - K_{\partial}, \quad (1)$$

где R_t – результат (доход), достигаемый на t -м шаге расчета; T – продолжительность расчетного периода или горизонт расчета; E – норма дисконта, равная приемлемой для инвестора норме дохода на капитал; t – номер шага расчета, как правило, по годам, начиная с момента начала осуществления проекта.

Применение внутренней нормы рентабельности ($E_{вн}$) для оценки эффективности проекта нецелесообразно, так как этот показатель задается неоднозначно, скачкообразно изменяется и не соответствует реальности [1].

В финансовом анализе инвестиций мы неизбежно сталкиваемся с неопределенностью показателей затрат и отдачи. В связи с этим возникает проблема определения величины риска и его влияния на результаты инвестиций. В условиях рынка, при колебаниях цен на сырье и материалы, спроса на продукцию, процентных ставок, курсов валют и акций, движение денежных средств в ходе реализации проекта может существенно отклоняться от запланированного. Следовательно, необходим анализ эффективности инвестиционных проектов в условиях риска.

В общем случае под риском понимают возможность наступления некоторого неблагоприятного события, влекущего за собой возникновение различного рода потерь (например, различного рода ущерб и т.п.).

При реализации инвестиционных проектов рассматриваются риски двух видов: предпринимательский и финансовый. Финансовый риск обусловлен изменениями рыночной ставки дохода на вложенный капитал.

В производственных организациях финансовый риск выражается также изменениями в структуре инвестиционного капитала и в условиях финансирования инвестиционных проектов.

Предпринимательский или просто бизнес-риск включает все типы неопределенности, возникающие вследствие воздействия специфических и макроэкономических факторов риска. Бизнес-риск подразделяется на проектный риск (оценивается степень риска отдельной долгосрочной инвестиции) и общий риск портфеля инвестиций организации.

Как социальное явление предпринимательский риск имеет свою специфику. Во-первых, риск представляет собой в данном случае элемент социальной практики и качество деятельности того или иного предпринимателя, проявление его экономической и социальной свободы через выбор того или иного варианта реагирования на производственную и коммерческую ситуацию. Во-вторых, риск есть один из вариантов адаптации к механизму рыночных отношений, попытка адаптироваться к реалиям рынка на уровне допустимого, но во многом неясного либо по причине отсутствия необходимой информации, либо из-за ограниченности материальных и социальных ресурсов. В-третьих, риск как социальное явление представляет собой составную часть определенной среды, что требует социального типа специфического характера, то есть человека рискующего и нацеленного на риск.

Для современного российского общества характерны два основных типа экономического и социального поведения. Оба они связаны с так называемым избеганием конкурен-

ции, следовательно, риска. Общая же тенденция в формировании конкуренции, инновации, предпринимательства и риска характеризуется именно избеганием конкуренции [3]. Бизнес-слой в современном российском обществе представляет собой своего рода класс, целиком детерминированный местными условиями, средний между экономическими и политическими монополистами и неструктурированной массой, которая отчуждена от собственности и власти. В таких условиях бизнес-класс весьма неустойчив в своих социальных параметрах. Это основной субъект продуктивной конкуренции и предпринимательского риска.

В нынешней экономической ситуации количественная оценка рисков инвестиционных проектов сильно затруднена.

Итак, предпринимательский риск – это риск, связанный с хозяйственной деятельностью организации, и выражается он в вероятности возникновения убытков или недополучения доходов по сравнению с прогнозируемым вариантом. При проектировании установок СВЧ диэлектрического нагрева следует оценивать именно этот вид риска.

По предложению [4] для установок СВЧ диэлектрического нагрева наиболее вероятным видом ущерба является ущерб от недоотпуска продукции. Выражение (1) тогда приобретает вид (с учетом остаточной стоимости основных фондов)

$$\mathcal{E}_{\Sigma} = ЧДД = \sum_{t=0}^T (R_t - Z_t - V_t - K_t)(1+E)^{-t} + \Phi_{t_{cl}}(1+E)^{-t_{cl}}, \quad (2)$$

где V_t – величина ущерба в t -й год эксплуатации; $\Phi_{t_{cl}}$ – остаточная на момент времени t_{cl} – стоимость основных фондов; t_{cl} – срок службы (эксплуатации) установки.

В общем виде ущерб от простоя установки СВЧ диэлектрического нагрева можно рассчитать по формуле [4]

$$Y = G t_0 C N, \quad (3)$$

где C – цена единицы продукции; t_0 – время простоя одной установки в год; G – производительность одной установки; N – количество установок.

Методика определения вероятных ущербов для разных типов СВЧ установок описана, например, в [4].

Известно, что в установках СВЧ диэлектрического нагрева наиболее часты отказы, обусловленные выходом из строя магнетрона [5]. Отказы установок по причине поломки источника питания, перерыва в электроснабжении и так далее случаются намного реже и ими можно пренебречь. Риски, связанные с макроэкономическими причинами (с нестабильностью экономического законодательства и текущей экономической ситуации, с условиями инвестирования и использования прибыли) и прочие виды рисков по [6] для установок СВЧ диэлектрического нагрева можно оценить иными способами.

Риск является вероятностной оценкой, следовательно, его количественное измерение не может быть однозначным и предопределенным. Поэтому применяемые в финансовом менеджменте методы количественного анализа риска основываются на ряде понятий теории вероятности и математической статистики [1,2,6].

Если вероятности различных условий реализации проекта известны точно, ожидаемый интегральный эффект рассчитывается по формуле математического ожидания [6]:

$$\mathcal{E}_{ож} = \sum_{i=1}^k \mathcal{E}_{\Sigma i} p_i, \quad (4)$$

где \mathcal{E}_i – интегральный эффект при i -м условии реализации; p_i – вероятность реализации i -го условия; k – количество условий.

В общем случае ожидаемый интегральный эффект определяется по формуле

$$\mathcal{E}_{ож} = \gamma \mathcal{E}_{\max} - (1-\gamma) \mathcal{E}_{\min}, \quad (5)$$

где \mathcal{E}_{\max} , \mathcal{E}_{\min} – наибольшее и наименьшее из математических ожиданий значение интегрального эффекта по вероятностным распределениям; γ – норматив для учета неопределенности эффекта, отражающий предпочтения соответствующего хозяйственного субъекта в условиях неопределенности. Он определяется на основании экспертных оценок.

Другим показателем, применяемым при анализе рисков, является коэффициент вариации, который исчисляется путем отнесения стандартного (средне-квадратического) отклонения к среднему (ожидаемому) значению случайной величины.

В мировой практике финансового менеджмента используются различные методы анализа эффективности инвестиционных проектов в условиях риска. К наиболее распространенным из них следует отнести [2, 5]:

- метод корректировки нормы дисконта;
- метод достоверных эквивалентов (коэффициентов достоверности);
- анализ чувствительности критериев эффективности проектов (ЧДД, ИД, ВНД и др.);
- метод сценариев;
- анализ вероятностных распределений потоков платежей;
- дерево решений;
- метод Монте-Карло (имитационное моделирование).

Анализ инвестиционных проектов в условиях риска основывается на двух моментах. Поскольку основными характеристиками инвестиционного проекта являются элементы денежного потока и коэффициент дисконтирования, учет риска осуществляется поправкой одного из этих параметров.

Эти расчеты должны проводиться на завершающем этапе, когда известны все составляющие потока денежных средств на основе информационной службы маркетинга. Поскольку для установок СВЧ диэлектрического нагрева конкретные расчеты таких вероятностей сильно затруднены, для практических расчетов эффективности таких установок более предпочтительно применение метода корректировки нормы дисконта и метода достоверных эквивалентов.

Метод корректировки нормы дисконта с учетом риска – наиболее простой и вследствие этого наиболее применяемый на практике метод. Основная идея метода заключается в корректировке некоторой безрисковой или минимально приемлемой нормы дисконта. В нашей стране это уровень учетной ставки Центрального банка РФ $E_{цб}$. Эта корректировка проводится на основе данных об уровне инфляции i и поправки на риск P по формуле Министерства экономики [2]:

$$1 + E_{\partial} = \frac{1 + \frac{P}{100}}{1 + \frac{i}{100}} + \frac{P}{100}. \quad (6)$$

После этого производится расчет критериев инвестиционного проекта по вновь полученной норме дисконта. При этом, чем больше риск, связанный с данным проектом, тем выше должна быть поправка на риск, которая может определяться экспертным путем или в зависимости от значений показателей измерения риска: дисперсии, стандартного отклонения, коэффициента вариации. Можно воспользоваться также рекомендуемыми в [1] величинами поправок на риск.

Поправки на риск

Величина риска	Цели проекта	p , %
Низкий	Вложения при интенсификации производства на базе освоенной техники	3 – 5
Средний	Увеличение объема продаж существующей продукции	8 – 10
Высокий	Производство и продвижение на рынок нового товара	13 – 15
Очень высокий	Вложение в исследования и инновации	18 – 20

Отметим, что согласно таблице степень риска для инвестиционных проектов, связанных с научными разработками, велика, и этим отчасти объясняется наблюдаемое нежелание

руководителей предприятий и предпринимателей вкладывать средства в научные исследования. Такая политика в стратегическом плане чревата упущением выгоды отечественным бизнесом.

Главные достоинства рассмотренного метода корректировки нормы дисконта – в простоте расчетов. Вместе с тем этот метод имеет существенные недостатки:

- он не дает никакой информации о степени риска. При этом полученные результаты существенно зависят только от величины поправки на риск;

- он предполагает увеличение риска во времени с постоянным коэффициентом, что вряд ли может считаться обоснованным, так как для многих проектов характерны наличие рисков в начальные периоды с постепенным снижением их к концу реализации проектов. Вследствие этого прибыльные проекты, не предполагающие со временем увеличение риска, могут быть оценены неверно и отклонены;

- данный метод не дает никакой информации о вероятностных распределениях будущих потоков платежей и не позволяет получить их оценку;

- он существенно ограничивает возможности моделирования различных вариантов, так как все сводится к анализу зависимости критериев ЧДД от изменения только одного показателя – нормы дисконта.

Поэтому при анализе рисков при расчете экономической эффективности проектируемой установки СВЧ диэлектрического нагрева можно также использовать другой метод – метод достоверных эквивалентов.

При использовании метода достоверных эквивалентов осуществляется корректировка ожидаемых значений потока платежей путем введения специальных понижающих коэффициентов α_t для каждого периода реализации проекта:

$$\alpha_t = \frac{Пч'_t}{Пч_t}, \quad (7)$$

где $Пч'_t$ – величина чистой прибыли от безрисковой операции в период t (например, ежегодная сумма процентов по банковскому депозиту); $Пч_t$ – ожидаемая величина чистой прибыли от реализации проекта в период t .

Для определения значения коэффициента α_t в реальной практике чаще всего прибегают к методу экспертных оценок.

После того, как значения коэффициента α_t определены, рассчитывают критерий ЧДД для скорректированного потока платежей по формуле

$$\mathcal{E}_\Sigma = ЧДД = \sum_{t=0}^T (R_t - Z_t - Y_t - K_t)(1 + E)^{-t} + \Phi_{t_{cl}}(1 + E)^{-t_{cl}}. \quad (8)$$

Предпочтение отдается проекту, скорректированный поток платежей которого обеспечивает получение большей величины ЧДД. Используемые при этом множители α_t получили название коэффициентов достоверности или определенности.

В отличие от метода корректировки дисконта данный метод не предполагает увеличения риска с постоянным коэффициентом, при этом сохраняются простота расчета, доступность и понятность. Таким образом, он позволяет учитывать риск более корректно.

Что же касается других методов, то они, как было сказано выше, для практической оценки рисков при проектировании установок СВЧ диэлектрического нагрева менее предпочтительны.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
 2. Маркарьян Э.А. Инвестиционный анализ: уч. пособие /Э.А.Маркарьян. М.: РостовнД: МарТ, 2003. 96 с.
 3. Мартюченко О.Ю. Характер предпринимательского риска в условиях социальной трансформации /О.Ю.Мартюченко. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2000. 29 с.
 4. Доценко А.В. Оптимизация ущерба и резервирование при СВЧ диэлектрическом нагреве /А.В.Доценко //Вестник СГТУ. 2006. № 1(10). С. 131 – 137.
 5. Толстов В.А. Эффективность электротехнологических установок /В.А.Толстов, Ю.С.Архангельский – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2000. 176 с.
 6. Гранатуров В.М. Экономический риск: сущность, методы измерения, пути снижения: уч. пособие /В.М.Гранауров. М: Дело и Сервис, 1999. 112 с.
- Дунаева Татьяна Юрьевна** – ассистент кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета

УДК 621.313(075)

М.В. Жабский, А.Д. Тютманов, И.А. Вокин

ВЛИЯНИЕ НА ПИТАЮЩУЮ СЕТЬ УСТАНОВОК СВЧ-НАГРЕВА

Рассматриваются вопросы негативного влияния на питающую сеть источников питания с промежуточным звеном повышенной частоты установок СВЧ нагрева. На основе полученной математической модели представлены зависимости искажения синусоидальности кривых тока и напряжения для бытовых и промышленных установок СВЧ нагрева.

M.V. Zhabskiy, A.D. Tiytmanov, I.A. Vokin

THE INFLUENCE TO THE POWER SYSTEM OF THE MICROWAVE OVEN

There are described some questions about negative influence to the power system of the power unit with heightened frequency link of the microwave oven. In terms of the obtained mathematical model there are described dependence of voltage and current total harmonic distortion for domestic and industrial microwave oven.

Основой установок СВЧ нагрева является магнетронный генератор, для работы которого необходим высоковольтный источник питания [1].

Среди многообразия используемых схем питания в промышленности наиболее распространенной в настоящий момент является схема, представленная на рис. 1. Данный источник питания установки СВЧ нагрева можно охарактеризовать простотой и достаточно высоким КПД. Однако следствием преобразования напряжения на промышленной частоте 50 Гц являются низкие массогабаритные показатели блока питания. Так, например, источник питания генератора «Хазар-3», выполненный по схеме рис. 1, мощностью 3 кВт имеет массу 200 кг.

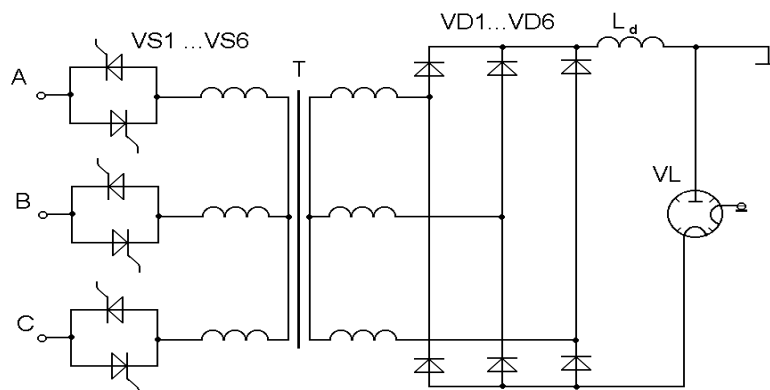


Рис. 1. Электрическая схема трехфазного источника питания магнетрона с тиристорным регулятором

Поэтому все большую популярность приобретают сегодня блоки питания с повышенной рабочей частотой токов и напряжений трансформаторов – так называемые блоки питания с промежуточным звеном повышенной частоты (см. рис. 2).

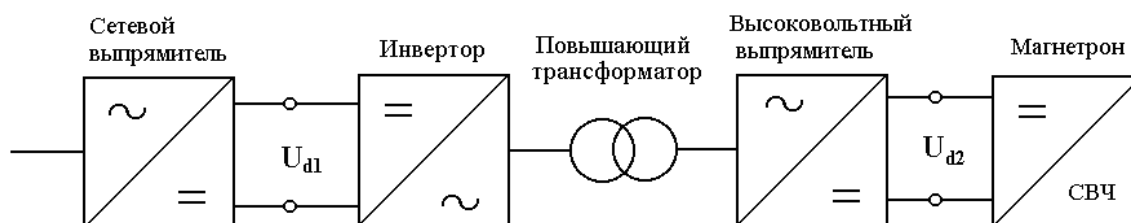


Рис. 2. Структурная схема источника СВЧ энергии с промежуточным звеном повышенной частоты

По назначению установки СВЧ нагрева делятся на промышленные и бытовые. При этом промышленные, как правило, являются трехфазными потребителями электроэнергии, а бытовые – однофазными [2].

Схемы с промежуточным звеном повышенной частоты широко используются в системах электропитания современных бытовых печей СВЧ нагрева. Использование повышенной частоты позволяет снизить массогабаритные показатели повышающего трансформатора и других электромагнитных элементов.

К общему недостатку обеих схем питания необходимо отнести негативное воздействие на питающую сеть ввиду ключевого режима работы элементов и, соответственно, прерывистого режима потребляемого тока, в кривой которого содержатся высшие гармоники [3]. Исходя из этого, источники питания со звеном повышенной частоты являются нелинейными потребителями (НП) электрической энергии.

В схеме трехфазного источника питания магнетрона с тиристорным регулятором искажения напряжения обуславливаются импульсным характером потребляемого тока, где для регулирования первичного напряжения повышающего трансформатора применяются тиристоры. Регулирование напряжения осуществляется измерением угла управления.

В схемах однофазного и трехфазного источников питания с промежуточным звеном повышенной частоты сетевой выпрямитель вследствие существенного коэффициента пульсаций выпрямленного напряжения снабжается сглаживающим емкостным фильтром. Схемы замещения выпрямителей однофазного и трехфазного блоков питания с промежуточным звеном повышенной частоты представлены на рис. 3.

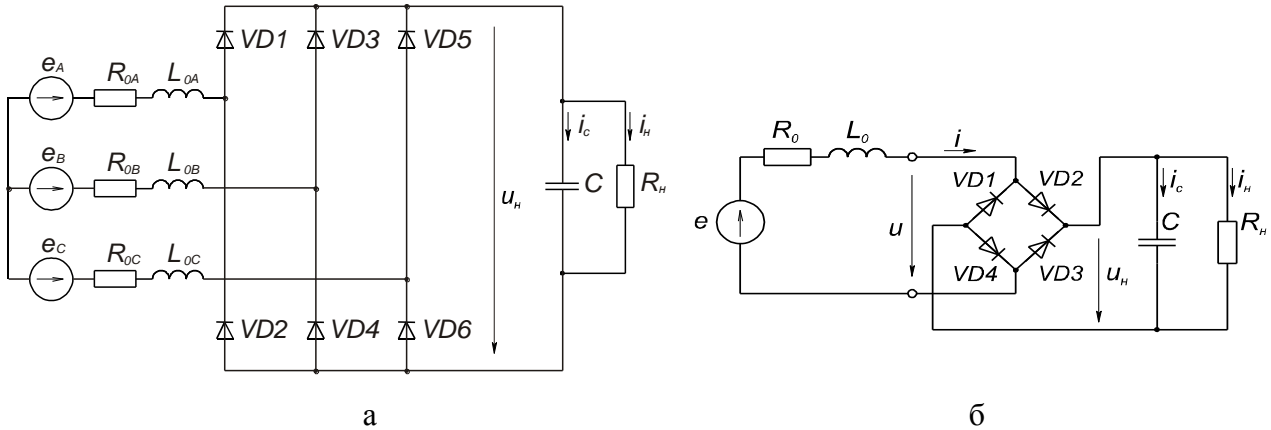


Рис. 3. Схемы замещения типовых выпрямителей промышленного и бытового источника питания: а – трехфазного, б – однофазного

Введение в схему емкостного фильтра позволяет добиться допустимого для работы устройства коэффициента пульсаций, но в то же время потребляемый импульсный ток i также приводит к искажению сетевого напряжения u_c . Для определения степени влияния вышеуказанных блоков питания в зависимости от их типов и топологии схемы электроснабжения группы установок СВЧ нагрева были произведены ряд теоретических и практических исследований. Схемы электроснабжения промышленных трехфазных установок СВЧ нагрева (рис. 4 а) и однофазных бытовых (рис. 4 б) обладают рядом принципиальных отличий.

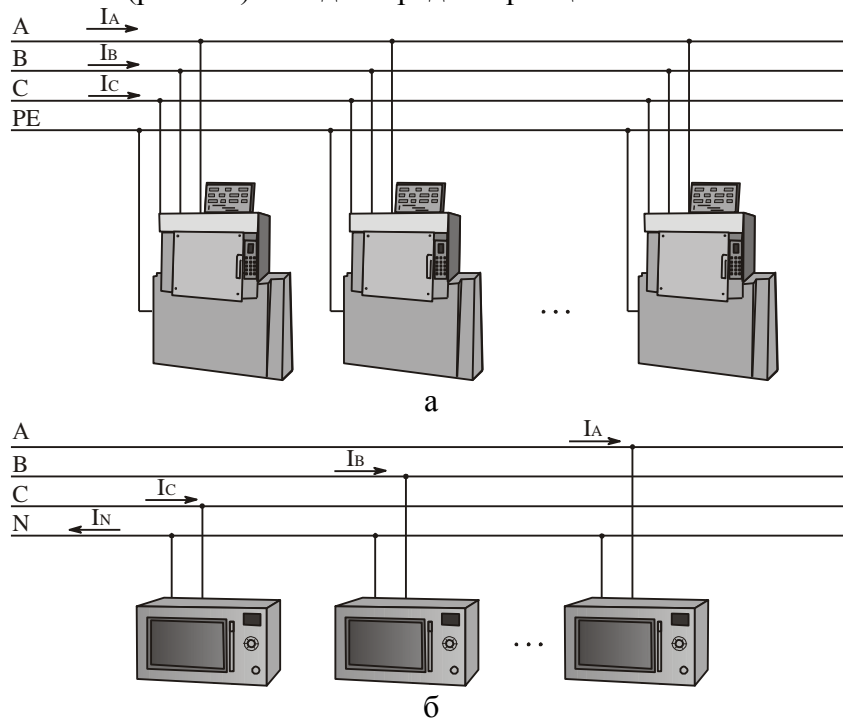


Рис. 4. Схемы электроснабжения промышленных и бытовых установок СВЧ нагрева

Как видно из рис. 4 а, трехфазная сеть питания промышленных СВЧ установок не имеет рабочего нулевого проводника, так как трехфазная установка является симметричной нагрузкой.

В бытовой сети для компенсации небаланса нагрузки возникает необходимость использования нулевого проводника, соединяющего нейтраль источника питания и нейтраль нагрузки. При этом ток, протекающий по нулевому проводнику равен векторной сумме токов, протекающих по фазным проводам (рис. 4 б)

$$i_N = i_A + i_B + i_C . \tag{1}$$

Для исследования влияния на питающую сеть источников питания с промежуточным звеном повышенной частоты установок СВЧ нагрева были разработаны математические модели в визуальной среде Simulink [4], входящей в состав математического пакета MATLAB (рис.5). Для обеспечения универсальности модели и ее результатов при переборе параметров используются параметры в относительных единицах [5], а внутри самой модели в процессе запуска на моделирование осуществляется пересчет в именованные единицы для следующей совокупности базисных величин:

$$S_{\delta} = 1 \text{ ВА}, \quad U_{\delta} = 1, \quad \omega_{\delta} = 2\pi 50 \text{ рад/с},$$

$$I_{\delta} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3} U_{\delta}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \text{ А (для трехфазных БП)}, \quad I_{\delta} = \frac{S_{\delta}}{U_{\delta}} = 1 \text{ А (для однофазных БП)}, \quad (2)$$

$$Z_{\delta} = \frac{U_{\delta}^2}{S_{\delta}} = 1 \text{ Ом}, \quad L_{\delta} = \frac{Z_{\delta}}{\omega_{\delta}} = \frac{1}{2\pi 50} \text{ Гн}, \quad C_{\delta} = \frac{1}{Z_{\delta} \omega_{\delta}} = \frac{1}{2\pi 50} \text{ Ф}.$$

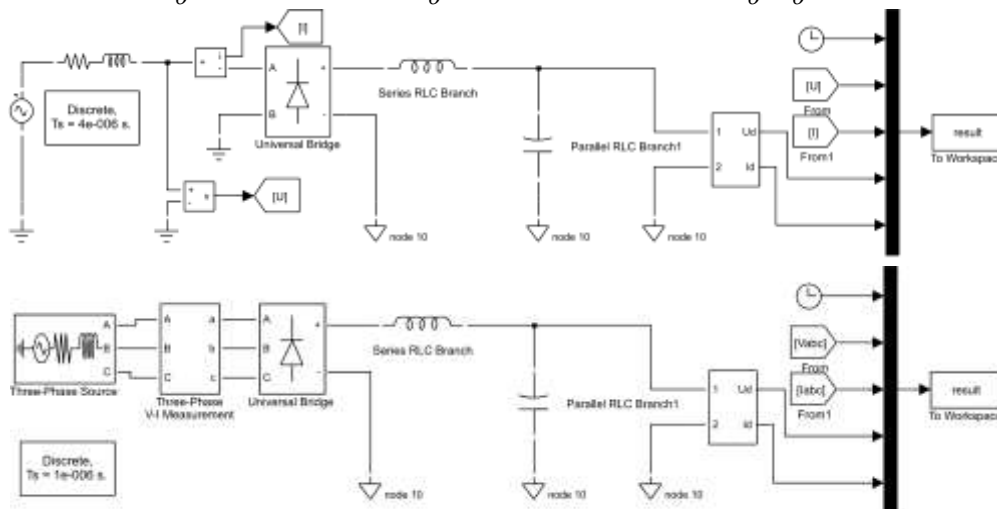


Рис. 5. Схемы моделей источников питания установок СВЧ нагрева со звеном повышенной частоты

С целью получения зависимостей коэффициентов искажения синусоидальности кривых напряжения и тока при изменении параметров питающей сети и нагрузки осуществлено многопараметрическое моделирование [6].

Подсистема Subsystem (рис. 6) моделирует электрическую нагрузку инвертора напряжения, вырабатывающего напряжение повышенной частоты. Ввиду того, что частота напряжения в звене повышенной частоты значительно выше частоты сети и для исследования влияния блоков питания на питающую сеть, а также с целью упрощения математической модели и, соответственно, снижения времени расчета возможно в расчетной схеме представить инвертор напряжения как источник постоянного тока. Величина индуцируемого тока есть функция напряжения на обкладках конденсатора сглаживающего фильтра. Указанная зависимость моделирует статическую характеристику систему регулирования при изменении напряжения на входе инвертора и обеспечивает постоянство потребления активной мощности на стороне постоянного тока.

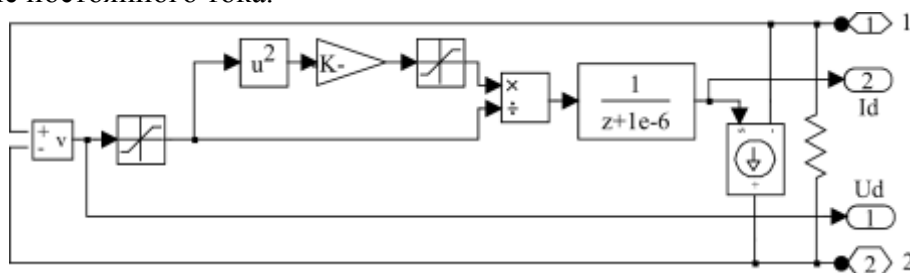


Рис. 6. Схема модели подсистемы, моделирующей инвертор напряжения звена повышенной частоты

Для решения дифференциальных уравнений модели выбран многошаговый метод переменного порядка discrete (no continuous states). Шаг расчета принят 4 мкс. Длительность моделируемого интервала принята 0,5 с. Для осуществления гармонического анализа результатов моделирования по методу быстрого преобразования Фурье и расчета ряда интегральных показателей была создана отдельная модель, изображенная на рис. 7.

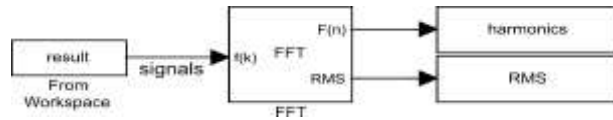
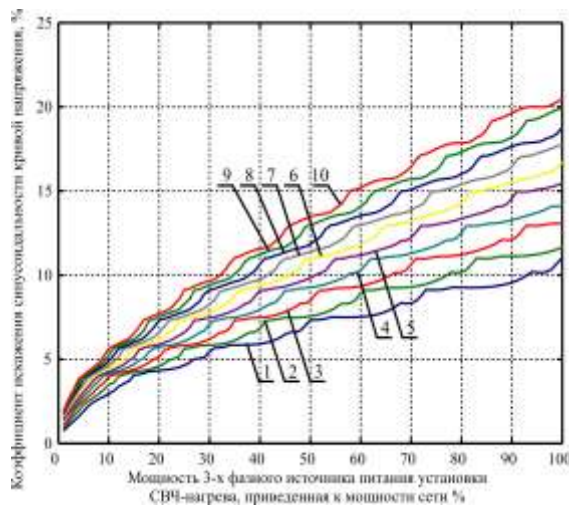


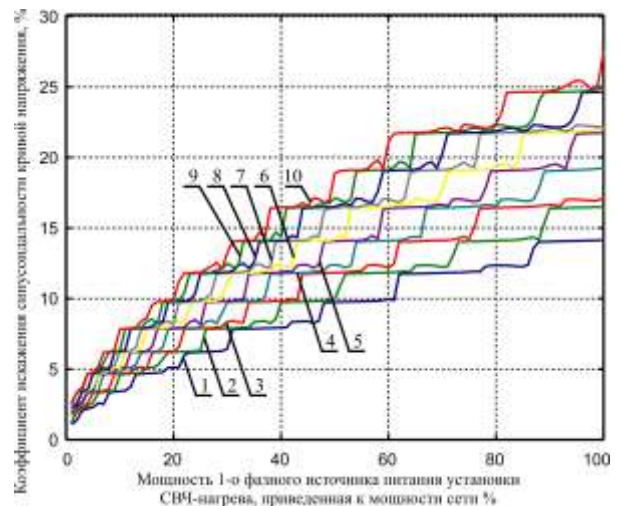
Рис.7. Схема модели для проведения гармонического анализа

Основным компонентом в этой модели является блок FFT из библиотеки Simulink SimPowerSystem, который содержит алгоритм для дискретного преобразования Фурье. В качестве результата для шага дискретизации 250 мкс блок FFT выдает гармонический состав для необходимого количества входных сигналов, начиная с постоянной составляющей и заканчивая 39-й гармоникой. Помимо этого, данный блок рассчитывает для входных сигналов ряд интегральных показателей. С целью исключения влияния на результаты гармонического анализа возникающих при включении выпрямителя к сети переходных процессов запуск вспомогательной модели осуществляется в момент 0,48 с. Тем самым преобразование Фурье осуществляется для последнего периода основной частоты от 0,48 до 0,5 с.

На рис.8 представлены зависимости коэффициентов искажения синусоидальности кривых напряжения и тока на входе выпрямителя для трехфазных источников питания (рис. 8 а,в), и, соответственно, для однофазных (рис. 8 б, г).



а)



б)

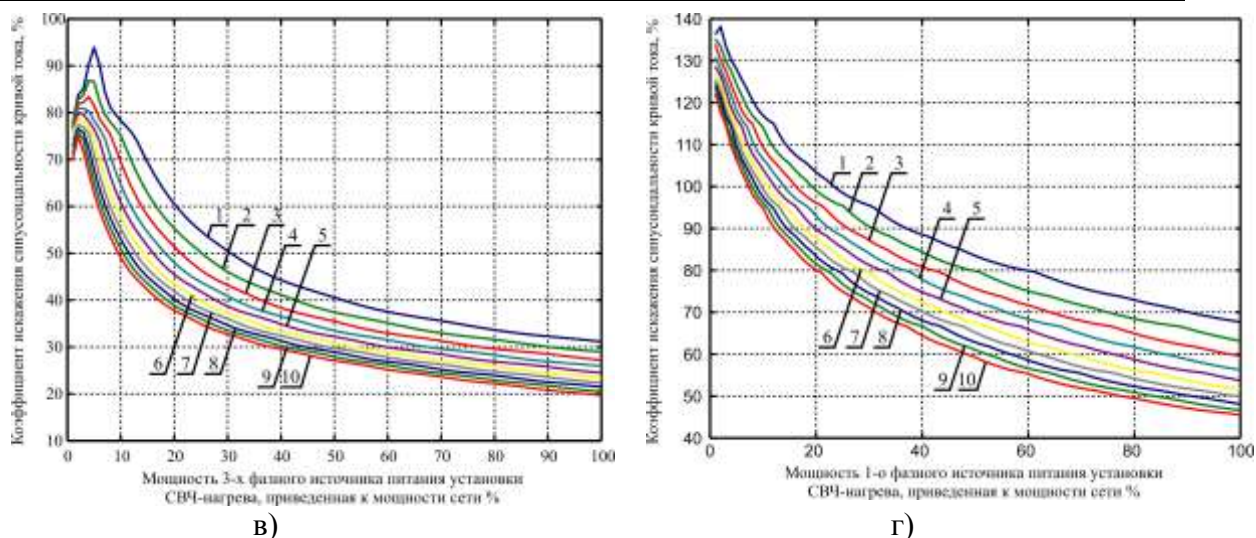


Рис.8. Зависимости коэффициентов искажения синусоидальности кривых напряжения и тока

Представленные графики получены путем многопараметрического моделирования электромагнитных процессов, при этом варьировались следующие параметры:

Индуктивное сопротивление питающей сети принималось 0,05, 0,06, 0,07, 0,08, 0,09, 0,1, 0,11, 0,12, 0,13, 0,14 в относительных единицах, приведенных к базисным параметрам.

Активная мощность нелинейного потребителя менялась от 0,01 до 1,0 с шагом 0,01 в относительных единицах, приведенных к базисным параметрам.

Из приведенных зависимостей видно, что коэффициент искажения синусоидальности кривых тока и напряжения нелинейно зависят от параметров питающей сети.

Следует отметить, что с ростом мощности НП коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения увеличивается, в то время как этот же показатель для тока снижается.

Это явление может быть объяснено следующим образом. При малой мощности НП, кривая потребляемого им тока сильно искажена, но в абсолютном выражении токи высших гармоник невелики и, протекая по элементам питающей сети, не вызывают большого искажения кривой напряжения.

С увеличением мощности НП повышается сглаживающая способность индуктивности рассеяния питающей сети и гармонический состав тока улучшается, однако в абсолютном выражении токи высших гармоник возрастают, что и приводит к увеличению коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения.

Представляет интерес выявление причин возникновения некоторой «волнистости» на кривых коэффициента искажения синусоидальности напряжения. Интересно, что в то же время на кривых искажения синусоидальности тока наблюдаются максимумы в интервале мощностей НП 0,02 – 0,07.

Следует отметить, что при обнаружении данных явлений делались попытки варьирования параметров моделирования, таких как шаг интегрирования, метод, а также относительная погрешность, но к исчезновению или смещению «волнистости» и максимумов это не привело.

В заключение отметим, что полученные зависимости обладают универсальным характером и могут быть применены к любой реальной СЭС с НП, построенными по схеме трехфазный или однофазный неуправляемый выпрямитель с емкостным фильтром.

Помимо этого, представленные зависимости могут быть использованы для решения следующих двух взаимосвязанных задач.

1. Заданы параметры трансформатора, кабельных линий, коммутационных аппаратов и других элементов системы электроснабжения. Требуется определить максимальную допустимую мощность НП, которую можно подключить к системе электроснабжения без нарушения условий эксплуатации.

2. Заданы параметры и суммарная мощность НП. Требуется определить, какие параметры должны иметь питающий трансформатор и другие элементы системы электроснабжения.

Развитием этих двух задач является третья задача, которая предусматривает нахождение структуры и параметров фильтров ЭМС, позволяющих увеличить мощность НП в задаче 1 или снизить мощность трансформатора, уменьшить сечение кабелей, выбрать коммутационные аппараты меньшего типоразмера в задаче 2.

ЛИТЕРАТУРА

1. Степанов С.Ф. Анализ элементной базы для построения высоковольтных источников с промежуточным звеном повышенной частоты /С.Ф. Степанов, В.В. Иванова, М.В. Жабский //Проблемы электроэнергетики: межвуз.науч.сб. Саратов: СГТУ, 2004. С.180 – 191.

2. Жабский М.В. Математическое моделирование выпрямителя с емкостным фильтром /М.В.Жабский, А.Д.Тютманов, В.В.Иванова //Проблемы электроэнергетики: межвуз. науч. сб. Саратов; 2004. С. 226–234.

3. Вокин И.А. Особенности автономных систем электроснабжения с нелинейной нагрузкой / И.А. Вокин // Проблемы электроэнергетики: межвуз. науч. сб. Саратов; 2004. С. 97–101.

4. Математическая модель высоковольтного источника питания для промышленных электротехнологических установок /И.И. Артюхов, С.Ф.Степанов, В.В.Иванова, М.В.Жабский //Актуальные проблемы электронного приборостроения: междунар. науч.-техн. конф.: Саратов; 2004. С. 381–385.

5. Жабский М.В. Применение относительных единиц для расчета электромагнитных процессов в системах электроснабжения с нелинейными потребителями /М.В. Жабский //Проблемы электроэнергетики: межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ, 2006. С. 80 – 85.

6. Жабский М.В. Математическая модель для исследования электромагнитных процессов в системах электроснабжения с нелинейными потребителями / М.В. Жабский // Анализ, синтез и управление: межвуз. науч. сб. Саратов, 2006. С. 88–93.

Жабский Михаил Васильевич –

аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета

Тютманов Александр Дмитриевич –

аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета

Вокин Игорь Александрович –

аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета

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 POLYAPROAMID 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_f (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 ($P_{y\partial}$) (2) [4] обработанных в СВЧ поле ПКА нитей на 2,7 – 10 % по сравнению с исходными, необлученными волокнами

$$P_{y\partial} = \frac{P_f}{T}, \quad (2)$$

где P_{ϕ} – фактическая разрывная нагрузка одиночных нитей (сН).

Все волокна при растяжении дают остаточное удлинение, по крайней мере часть которого обратима во времени (высокоэластическая деформация²). 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 (ϵ_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 $T=195 - 197 \text{ }^\circ\text{C}$ время разрыва $t_{\text{разр}}$ 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 E в процессе обработки при 8 – 15 с наблюдается увеличение времени разрыва ПКА волокон, чем при расположении перпендикулярно напряженности электрического поля E . Этот факт доказывает влияние напряженности электрического поля электромагнитной волны на модификацию свойств волокнистого полимера (рис. 2).

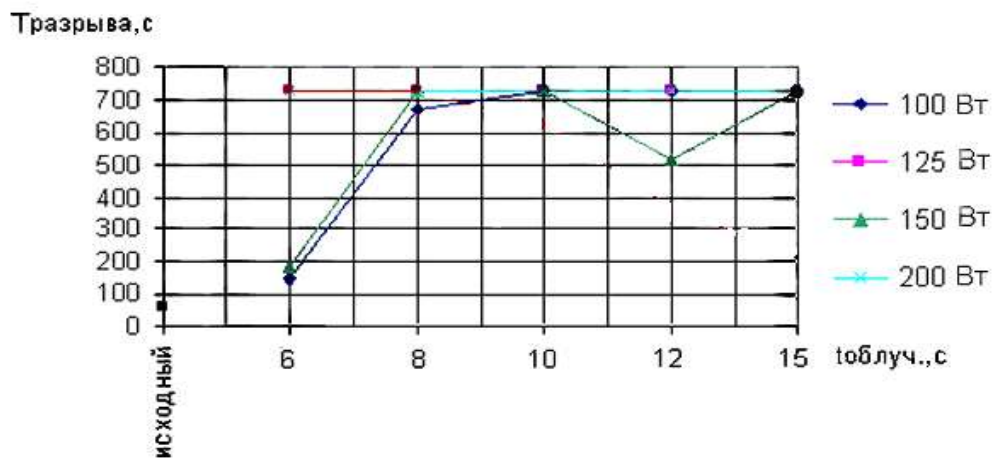
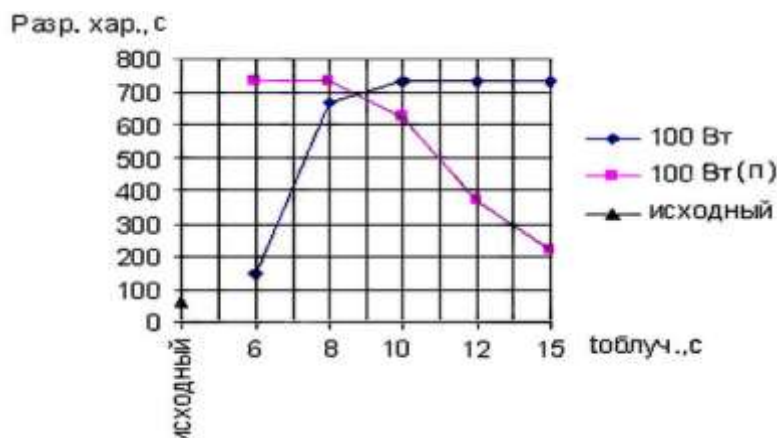


Рис.1. График зависимости времени разрыва T от времени облучения t при термическом нагреве для генерируемой мощности 100, 125, 150, 200 Вт



² Поскольку называют просто э

) невелика, ее часто

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

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, электро-технологии 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. С. 146.

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

УДК 536.24

Л.С. Зимин, П.В. Купцов

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

МНОГОСЛОЙНЫХ ТЕЛ

Данная работа посвящена решению проблемы разделения на фракции и утилизации материалов, являющихся составными частями сопла ракетного двигателя. Вопрос утилизации, возникший на сегодняшний день, очевиден. В ходе высокотехнологического процесса пайки присутствует значительный процент брака изделий.

L.S. Zimin, P.V. Kuptzov

MODELLING THE SYSTEM OF INDUCTION HEATING OF MANYLAYER OBJECTS

The work aimed to solve a problem of decomposing the components of rocket nozzles. The highly technological process of soldering components into a rocket nozzle accomplishes with a certain level of defects. Therefore, the question of decomposing defect nozzles is an essential for the rocket industry

Проблемы разработки комплексов математических моделей для процессов индукционного нагрева в установках различного технологического назначения, эффективности методов их расчета и оптимизации конструктивных и режимных параметров являются актуальными как с точки зрения проектирования, эксплуатации и автоматизации, так и с точки зрения математического моделирования и управления.

Реализация поставленной цели представляется в виде решения трех взаимосвязанных задач:

1. Разработка проблемно-ориентированной математической модели индукционного нагрева материалов с различными теплофизическими свойствами.
2. Оптимальное проектирование конструкции индуктора.
3. Разработка системы оптимального управления установкой индукционного нагрева.

Основной целью данных задач является получение равномерного температурного распределения в заготовке. Сложность исследуемого тела предполагает проектирование особой конструкции индуктора с использованием численных методов расчета.

Для решения электромагнитной задачи используется конечно-элементная модель, которая позволяет учесть практически все особенности исследуемого тела. Реализуемая задача решалась в программном пакете Ansys 7.0, который сегодня является одним из мощнейших пакетов, основанным на методе конечных элементов. В данной программе имеется расширенная постановка электромагнитной задачи, позволяющая решать вопросы, связанные с присутствием магнитных масс, энергии движущихся и неподвижных зарядов. Электромагнитные процессы при нагреве металла описываются системой дифференциальных уравнений Максвелла.

$$\nabla_x \{H\} = \{J\} + \left\{ \frac{\partial D}{\partial t} \right\} = \{J_s\} + \{J_b\} + \{J_v\} + \left\{ \frac{\partial D}{\partial t} \right\}, \quad (1)$$

$$\nabla_x \{E\} = - \left\{ \frac{\partial B}{\partial t} \right\}, \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \{E\} = 0, \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \{D\} = \rho. \quad (4)$$

Здесь ∇_x – ротор, $\nabla \cdot$ – оператор дивергенции, $\{H\}$ – вектор магнитной напряженности, $\{J\}$ – полный вектор плотности тока, $\{D\}$ – вектор электрического смещения, t – время,

$\{E\}$ – вектор напряженности электрического поля, $\{B\}$ – вектор магнитной индукции, ρ – плотность электрического заряда.

Электромагнитная модель дает исчерпывающую характеристику индукционного устройства с точки зрения потребления энергии от внешнего источника питания и выделения ее в нагрузке.

Решение тепловой задачи вызвано необходимостью получения заданного температурного распределения в изделии. Алгоритм решения тепловой задачи реализован посредством метода конечных элементов программно. Сложность постановки математической задачи для расчета тепловых полей объекта иллюстрируется системой дифференциальных уравнений в частных производных:

$$\frac{\partial T_1(r, x, t)}{\partial t} = a_1 \left[\frac{\partial^2 T_1(r, x, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_1(r, x, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_1(r, x, t)}{\partial x^2} \right] + W(r, x, T(t), t) \quad (5)$$

$$\frac{\partial T_2(r, x, t)}{\partial t} = a_2 \left[\frac{\partial^2 T_2(r, x, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_2(r, x, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_2(r, x, t)}{\partial x^2} \right]$$

с граничными условиями:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0, \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big|_{r_2} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r_2}, \quad (6)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r_3} = \alpha(T_2 - T_c),$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x_1} = \alpha(T_1 - T_c), \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x_2} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x_2}, \quad (7)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x_3} = \alpha(T_2 - T_c), \quad \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x_3} = \alpha(T_2 - T_c),$$

$$T_1 \Big|_{r_2} = T_2 \Big|_{r_2}, \quad T_1 \Big|_{x_2} = T_2 \Big|_{x_2}, \quad (8)$$

где $T_1(r, x, t)$, $T_2(r, x, t)$ – температурные распределения соответственно во внешнем и внутреннем цилиндрах; r, x, t – радиальная и аксиальная координаты и время процесса; $W(r, x, t)$ – функция распределения мощности внутренних источников тепла, λ – коэффициент теплопроводности, L – длина нагревателя, r_1 – радиус сопряжения цилиндров.

Система уравнений (5) – (8) разрешима только для тел правильной геометрической формы. Метод конечных элементов строится на базе одного дифференциального уравнения. При этом многообразии форм составных элементов и их свойств учитывается путем присвоения определенных характеристик каждому элементу.

В ходе исследования были получены тепловые поля заданного объекта в зависимости от распределения внутренних источников тепла.

Полученное температурное распределение позволило внести коррективы в конструкцию индуктора.

С целью повышения эффективности процесса разборки паяных изделий проведено исследование влияния электромагнитных полей на припаяваемые детали. Расчеты показали, что увеличение тангенциальных сил между поверхностями способствует выдавливанию припоя в зоны с большими зазорами. Влияние электродинамических усилий оказывает позитивное действие в процессе утилизации, так как с наименьшими затратами позволяет разделить на фракции бракованные конструкции сопла.

При проектировании индуктора задача создания заданного распределения удельной мощности вдоль радиальной координаты решалась выбором соответствующей частоты питающего устройства, и положением нагреваемого объекта.

На основе проведенных исследований, в ходе экспериментов, была реализована индукционная установка, питающаяся током 10 кГц и 50 Гц. Частота 10 кГц применяется для быстрого нагрева до заданной температуры согласно технологическому процессу. При этом значительно снижается расход энергии и уменьшается время нагрева изделия. На частоту 50 Гц производится переключение с целью получения электродинамических усилий, позволяющих отодвинуть составные части конструкции друг друга. Схема данной установки представлены ниже на рис. 1.

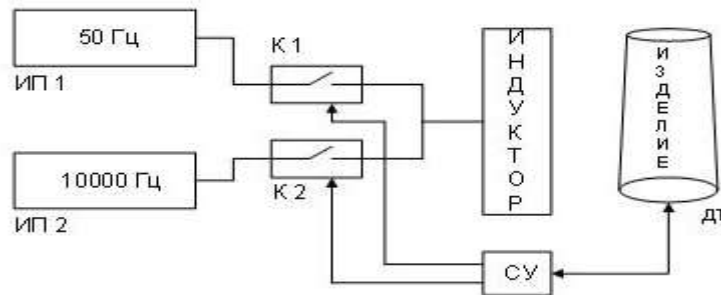
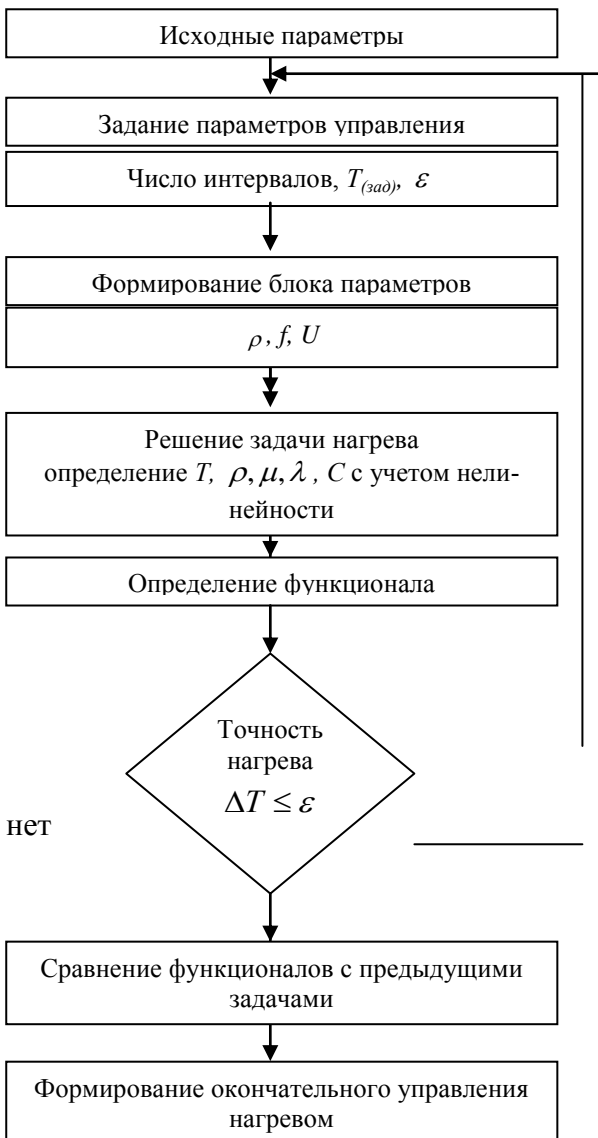


Рис. 1. Схема индукционной установки для процесса утилизации



Таким образом, были решены задачи проектирования индуктора, определяющие создание конструкции индуктора, обеспечивающей качественный процесс и снижающей непроизводительные затраты материальных и энергетических ресурсов.

Алгоритм решения оптимального управления был реализован программно. Реализация алгоритма управления процессом нагрева основывалась на многоинтервальном управлении нагревом, с n – числом включений и выключений. В ходе поставленных экспериментов определили оптимальное число интервалов, при которых одновременно удается прогреть поверхность и центр конструкции до температуры, согласно требованиям технологического процесса. На рис. 2 приведена блок-схема оптимального управления. В ходе проведенных исследований определили оптимальное число интервалов – 5 и на основе этого алгоритма получили температурное распределение во времени по сечению конструкции сопла с пятипроцентной погрешностью. В результате проделанной работы была разработана система индукционного

да

нагрева в установках по утилизации многослойных конструкций. Предложенная система способствует реализации процесса утилизации бракованных изделий, что позволяет производственной сфере получить дополнительную прибыль и снизить загрязнения окружающей среды.

Рис. 2. Блок-схема алгоритма определения оптимального управления

ЛИТЕРАТУРА

1. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов /Л.Сегерлинд. М.: Мир, 1979. 400 с.
2. Рей У. Методы управления технологическими процессами: пер. с англ. /У.Рэй. М.: Мир, 1983. 321 с.
3. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике /О.Зенкевич. М.: Мир, 1975. 541 с.

Зимин Леонид Сергеевич –

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

Купцов Павел Владимирович –

аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Самарского государственного технического университета

УДК 536.24

А.А.Базаров, А.Н.Бузуев

ИНДУКЦИОННЫЙ НАГРЕВ МНОГОСЛОЙНЫХ ИЗДЕЛИЙ КОНИЧЕСКОЙ ФОРМЫ ПОД ПАЙКУ

Работа направлена на разработку математических моделей описывающих процесс индукционного нагрева многослойных изделий состоящих из материалов с различными физическими свойствами. Решение электромагнитной и тепловой задачи производится с помощью метода конечных элементов.

A.A.Bazarov, A.N.Buzuev

INDUCTION HEATING OF MANYLAYER CONE FORM OBJECTS FOR SOLDER

The aim of this work is to design an appropriate mathematical model for the process of induction heating of multiplayer bodies. The multiplayer bodies consist of different materials with di-

verse physical properties. The solution of electromagnetic and heat transfer problems is based upon the finite element method.

Внешний вид исследуемого изделия представлен на рис. 1 (1 – футеровка, 2 – сопло ракетного двигателя, 3 – индуктор). Сопло ракетного двигателя представляет собой конструкцию, состоящую из двух (внешней и внутренней) стальных оболочек толщиной 3 мм и внутренней медной гофры толщиной 5 мм, свободное пространство во время пайки занимает аргон (рис. 2). Процесс пайки осуществляется между стальными пластинами и медной гофрой, припоем служит техническое серебро, нанесенное на поверхности спаиваемых изделий в виде пасты.

Наличие большого количества дефектных изделий обуславливает постановку задачи по усовершенствованию технологического процесса пайки. Для решения поставленных задач проектирования системы нагрева требуется применение теории оптимального проектирования, при этом необходимо применение численных методов расчетов электромагнитной, тепловой задач и задачи термоупругости.

Исходная постановка нелинейной электромагнитной задачи выражается через векторный магнитный потенциал общим уравнением Пуассона в двумерной осесимметричной области $V(r, z)$:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu_c} \operatorname{rot} A\right) + \gamma \frac{\partial A}{\partial t} &= J_0, \\ \operatorname{rot} A &= B, \quad \operatorname{div} A = 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь A – векторный магнитный потенциал; J_0 – плотность тока внешних источников; B – магнитная индукция; $\mu_c = \mu\mu_0$ – магнитная проницаемость среды; γ – удельная электрическая проводимость.

Принимая во внимание осевую симметрию и квазистационарность исследуемого поля, уравнение (1) может быть представлено для комплексной амплитуды векторного потенциала в виде

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial A(r, z)}{\partial z} \right] + r \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{\mu_0} \frac{1}{r} \frac{\partial A(r, z)}{\partial r} \right] - j\omega \gamma A(r, z) - J_0 = 0, \quad (2)$$

где $\omega = 2\pi f$ – цилиндрическая частота питающего тока.

В качестве граничных условий принято равенство нулю векторного потенциала на границе расчетной области, находящейся в бесконечности. В плоскостях геометрической симметрии предполагается перпендикулярность линий потока этим плоскостям

$$A|_{S_1} = 0, \quad \left. \frac{\partial A}{\partial n} \right|_{S_1} = 0,$$

где S_1 – удаленная граница области Q ; S_2 – граница плоскостей симметрии.

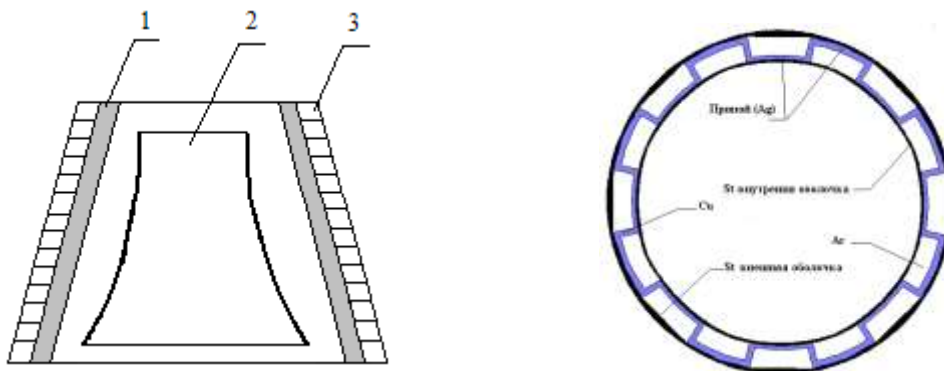


Рис. 1. Внешний вид системы нагрева

Рис 2. Поперечное сечение сопла

Указанная постановка задачи охватывает самые общие электромагнитные явления и позволяет рассчитывать практически весь класс устройств индукционного нагрева, который может быть математически описан двумерным уравнением Пуассона.

Идеология расчета МКЭ основывается на вариационных принципах, когда решение системы (2) ищется путем минимизации нелинейного функционала, выражающего энергию электромагнитного поля

$$F(A) = \frac{1}{2} \iint_Q \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu_0} \right) \frac{\partial A}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{\mu_0 r} \right) \frac{\partial r A}{\partial r} \right] dr dz + \frac{1}{2} \iint_Q j \omega \gamma |A|^2 dr dz + \frac{1}{2} \iint_Q J_0 A dr dz. \quad (3)$$

В дискретной модели функционал (3) определяется суммой вкладов всех конечных элементов, и исходное уравнение (2) заменяется системой алгебраических уравнений с комплексными коэффициентами вида

$$([K] + j[Q])[A] + [R] = 0, \quad (4)$$

где $[K]$ – матрица жесткости; $[Q]$ – матрица вихревых токов; $[A]$ – искомая функция; $[R]$ – матрица внешних источников тепла.

После решения системы (4) определяются необходимые переменные.

Напряженность электрического поля

$$E = j \omega A. \quad (5)$$

Мощность внутренних источников тепла, характеризующая нагрев проводящих тел индукционной системы, вычисляется для каждого КЭ по закону Джоуля-Ленца

$$P_W^e = \frac{1}{2} \iiint_{V^e} \gamma (EE^*) dV^e. \quad (6)$$

Интегрирование (6) проводится по объему V^e тела, образованного при вращении элемента вокруг оси z .

Тепловая задача, описывающая процесс пайки, моделировалась в пакете ANSYS с использованием элементов, позволяющих значительно упростить расчеты. Например, для вычисления угловых коэффициентов между излучающими поверхностями (набранными из вспомогательных элементов) с учетом затенения используется генератор матрицы излучения, на основе которой создается суперэлемент с температурной степенью свободы. Одноосный элемент, способный проводить тепло между его узлами – Link 32, используется для моделирования излучающей поверхности. Выбор элементов для решения поставленных задач ограничен временем, отведенным на решение той или иной задачи. Использование более сложных элементов с большим количеством узлов неизбежно приведет к увеличению времени, требуемого для решения задачи.

Задача лучистого теплообмена между внутренней поверхностью кожуха и внешней поверхностью изделия описывается следующим выражением:

$$\sum_{i=1}^N \left(\frac{\delta_{ij}}{\varepsilon_i} - F_{ji} \frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_i} \right) \frac{1}{A_i} Q_i = \sum_{i=1}^N (\delta_{ij} - F_{ji}) T_i^4, \quad (7)$$

где N – число поверхностей излучения, δ_{ij} – дельта Кронекера, Q_i – величина теплопередачи с поверхности, σ – постоянная Стефана-Больцмана, ε_i – коэффициент излучения, F_{ij} – коэффициент представления поверхности I для определения поверхности J , A_i – площадь поверхности I , T_i , T_j – абсолютная температура на поверхности I и J соответственно.

В процессе индукционного нагрева многослойного тела имеет место проникновение электромагнитного поля во внутренние области, что приводит к возникновению электродинамических сил между элементами изделия и индуктором. В силу разной жесткости меди и стали возникающие деформации приводят к относительному смещению гофры и оболочек, что обуславливает появление зазоров, искривление поверхностей и делает пайку некачественной. Для исследования этой проблемы был рассмотрен вопрос создания связанной задачи нестационарной теплопроводности и упругой деформации.

В общем случае деформация, которая возникает внутри изделия, вследствие проявления электромагнитных сил и нагрева может быть описана следующими уравнениями.

В координатах z, r соотношения между деформациями и перемещениями для линейно упругого изотропного материала имеют вид

$$\begin{aligned} \varepsilon_{rz} &= \frac{[\sigma_{zz} - \nu(\sigma_{rr} + \sigma_{\varphi\varphi})]}{2G(1 + \nu)} + \varepsilon^{(T)}, & \varepsilon_{rr} &= \frac{[\sigma_{rr} - \nu(\sigma_{\varphi\varphi} + \sigma_{zz})]}{2G(1 + \nu)} + \varepsilon^{(T)}, \\ \varepsilon_{\varphi\varphi} &= \frac{[\sigma_{\varphi\varphi} - \nu(\sigma_{zz} + \sigma_{rr})]}{2G(1 + \nu)} + \varepsilon^{(T)}, & \varepsilon_{rz} = \varepsilon_{zr} &= \frac{\sigma_{rz}}{2G} = \frac{\sigma_{zr}}{2G}. \end{aligned} \quad (8)$$

Функционал при вариационной формулировке задачи термоупругости примет вид

$$\begin{aligned} J(u) = \int r \left\{ \left[\frac{G}{3} \left(\frac{\partial u_z}{\partial z} + \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r} - 3\varepsilon^{(T)} \right)^2 \frac{1 + \nu}{1 - 2\nu} + \left(\frac{\partial u_z}{\partial z} - \frac{\partial u_r}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_r}{\partial r} - \frac{u_r}{r} \right)^2 + \right. \right. \\ \left. \left. + \left(\frac{u_r}{r} - \frac{\partial u_z}{\partial z} \right)^2 + \frac{3}{2} \left(\frac{\partial u_r}{\partial z} - \frac{\partial u_z}{\partial r} \right)^2 \right] - (f_r^0 u_r + f_z^0 u_z) \right\} dS - \int_a r (P_r^0 u_r + P_z^0 u_z) d\alpha, \quad (9) \end{aligned}$$

где f^0 – объемные силы; P^0 – поверхностные силы; σ – модуль сдвига.

В результате преобразований создается алгебраическая система уравнений

$$[K]\{\delta\} = \{F\}. \quad (10)$$

Влияние температурного поля на процессы упругой деформации проявляется через изменение свойств материалов и линейное расширение элементов изделия.

В результате проделанной работы разработан комплекс взаимосвязанных электромагнитной, тепловой задач и задачи упругости, направленный на поиск оптимальной системы индукционного нагрева многослойных изделий сложной геометрической формы с минимальным количеством брака

ЛИТЕРАТУРА

1. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов /Л.Сегерленд. М.: Мир, 1979. 400 с.
2. Рей У. Методы управления технологическими процессами: пер. с англ. /У.Рэй. М.: Мир, 1983. 321 с.
3. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике /О.Зенкевич. М.: Мир, 1975. 541 с.

Базаров Александр Александрович –

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

Бузуев Алексей Николаевич –

аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Самарского государственного технического университета

