

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

№ 2 (11)

Июнь 2016

ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

Главный редактор

Зам. главного редактора

Ответственный секретарь

АРХАНГЕЛЬСКИЙ ЮРИЙ СЕРГЕЕВИЧ

БЕКРЕНЕВ НИКОЛАЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ

ВЫРЫХАНОВ ДЕНИС АЛЕКСАНДРОВИЧ

Редакционная коллегия

И.Н. АНТОНОВ

Ю.С. АРХАНГЕЛЬСКИЙ

Н.В. БЕКРЕНЕВ

В.Б. ДЕМИДОВИЧ

Л.С. ЗИМИН

Н.И. ЛОВЦОВА

В.Н. ЛЯСНИКОВ

А.Н. МАКАРОВ

Г.А. МОРОЗОВ

Ю.П. ПЕРЕЛЫГИН

А.Н. ПЛОТНИКОВ

В.П. РУБЦОВ

Ф.Н. САРАПУЛОВ

Б.К. СИВЯКОВ

А.А. СЫТНИК

Ю.Б. ТОМАШЕВСКИЙ

Г.Г. УГАРОВ

В.Н. ХМЕЛЕВ

В.А. ЦАРЕВ

Д.А. ВЫРЫХАНОВ

д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

д.т.н., профессор, СПбГЭУ (ЛЭТИ), Санкт-Петербург

д.т.н., профессор, СамГТУ, Самара

д.социол.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

д.т.н., профессор, ТГТУ, Тверь

д.т.н., профессор, КНИТУ имени А.Н. Туполева (КАИ), Казань

д.т.н., профессор, ПГУ, Пенза

д.э.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

д.т.н., профессор, НИУ «МЭИ», Москва

д.т.н., профессор, УрФУ, Екатеринбург

д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

д.т.н., профессор, первый проректор СГТУ имени Гагарина Ю.А.

д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

д.т.н., профессор, БТИ, Бийск

д.т.н., профессор, СГТУ Гагарина Ю.А., Саратов

к.т.н., СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

Since November 2013
Published Quarterly

№ 2 (11)
June 2016

JOURNAL OF ELECTROTECHNICS

Scientific and Technical Publication

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

Chief Editor

Assistant to the Chief Editor

Chief Executive Officer

ARKHANGELSKY YURI SERGEEVICH

BEKRENEV NIKOLAY VALERYEVICH

VIRIKHANOV DENIS ALEKSANDROVICH

Editorial Board Members

I.N. ANTONOV

YU.S. ARKHANGELSKY

N.V. BEKRENEV

V.B. DEMIDOVICH

L.S. ZIMIN

N.I. LOVTSOVA

V.N. LYASNIKOV

A.N. MAKAROV

G.A. MOROZOV

YU.P. PERELYGIN

A.N. PLOTNIKOV

V.P. RUBTSOV

F.N. SARAPULOV

B.K. SIVYAKOV

A.A. SYTNIK

YU.B. TOMASHEVSKY

G.G. UGAROV

V.N. KHMELEV

V.A. TSAREV

D.A. VIRIKHANOV

Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Dr. Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Dr.Sc., Professor, Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

Dr.Sc., Professor, Samara State Technical University

Dr. Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Dr.Sc., Professor, Tver State Technical University

Dr.Sc., Professor, Kazan National Research Technological University

Dr.Sc., Professor, Penza State University

Dr. Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Dr.Sc., Professor, National Research University «Moscow Power Engineering Institute»

Dr.Sc., Professor, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, Ekaterinburg

Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Dr.Sc., Professor, First Vice-Rector, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Dr. Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Dr. Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Dr.Sc., Professor, Biysk Technological Institute

Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

PhD, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОТЕРМИЯ

Юдина В.О., Архангельский Ю.С. Конвейерная СВЧ электротермическая установка на базе камеры лучевого типа.....	5
Архангельский Ю.С., Юдина В.О. СВЧ электротермические установки для обработки жидкости в потоке	8
Федоров А.В. Многочастотная термообработка диэлектриков в камерах лучевого типа	14

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

Мошкин В.И., Угаров Г.Г., Усанов К.М. О возможности увеличения энергии рабочего хода импульсного линейного электромагнитного двигателя.....	19
Мошкин В.И., Угаров Г.Г. Режимы аккумулирования магнитной энергии в импульсных ЛЭМД.....	25

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Злобина И.В., Бекренев Н.В. Улучшение эксплуатационных характеристик материалов трубопроводной арматуры в СВЧ электромагнитном поле.....	31
---	----

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

Халикова К.Н, Потапова О.В. Энергетические показатели сфокусированных антенн в задачах СВЧ технологий.....	37
Баринов Д.А., Железняк А.А., Коломейцев В.А., Лукьянов М.А. Собственные электродинамические параметры прямоугольного волновода с двухслойным диэлектрическим заполнением.....	46
Скворцов А.А. Определение параметров эквивалентной схемы для расчета критических длин основных волн прямоугольных волноводов с одним и двумя Т-ребрами с диэлектрическими цилиндрами в емкостных зазорах	58

СОЦИАЛЬНЫЙ АСПЕКТ

Архангельский Ю.С. Альтернативные электро- и теплотехнологии.....	62
--	----

ЛЕТОПИСЬ

Алексей Алексеевич Понукалин	65
К сведению авторов	66

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

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

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

Кроме того, напоминаем, что на каждую статью следует представлять краткий (4-5 предложений) реферат на русском и английском языках (включая название), а также ключевые слова.

CONTENTS

ELECTROTHERMY

Yudina V.O., Arkhangelsky Yu.S. Conveyor microwave electrothermal plants based on ray type cameras 5

Arkhangelsky Yu.S., Yudina V.O. Microwave electrothermal complexes for fluid flow heating 8

Fedorov A.V. Multifrequency dielectric heat treatment in ray heating type microwave chambers..... 14

ELECTROMECHANICS

Moshkin V. I., Ugarov G.G., Usanov K.M. A possibility for increasing the power stroke of electromagnetic pulsed linear engine 19

Moshkin V. I., Ugarov G.G. Modes of magnetic energy accumulation in pulse engines 25

MATERIALS SCIENCE

Zlobina I.V., Bekrenev N. V. Improving operation characteristics of materials for pipeline fitting in high frequency electromagnetic field ... 31

ELECTRODYNAMICS

Khalikova K.N., Potapova O.V. Power indi-

cators of the focused antennas in problems of microwave technologies.....37

Barinov D.A., Zheleznyak A.A., Kolomeytsev V.A., Lukyanov M. A. Inherent electrodynamic parameters of the rectangular waveguide with a two-layer dielectric filling.....46

Skvortsov A.A. Determination of equivalent circuit parameters for calculation the critical lengths of the fundamental waves the one or two T-rib rectangular waveguides with dielectric cylinders in the capacitive gaps58

SOCIAL ASPECT

Arkhangelsky Yu.S. Alternative electricity and heat technologies62

CHRONICLE

Aleksey Alekseevich Ponukalin65

Information for Authors66

DEAR AUTHORS!

The editors publish in each article brief information about the authors.

In this regard, we ask you in the direction of the article to report:

1. Full names and patronymics of all authors.
2. Place of work and position.

In addition, we remind you that each article should provide a brief (4-5 sentences) the abstract in Russian and English (including the title), and keywords.

ЭЛЕКТРОТЕРМИЯ

УДК 621.365.5

КОНВЕЙЕРНАЯ СВЧ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА НА БАЗЕ КАМЕРЫ ЛУЧЕВОГО ТИПА

В.О. Юдина, Ю.С. Архангельский

CONVEYOR MICROWAVE ELECTROTHERMAL PLANTS BASED ON RAY TYPE CAMERAS

V.O. Yudina, Yu.S. Arkhangelsky

Предложен алгоритм проектирования конвейерной СВЧ электротермической установки на базе камеры лучевого типа.

Ключевые слова: конвейерная СВЧ электротермическая установка, камера лучевого типа, транспортная система, СВЧ генератор, расчет

The proposed algorithm is used in designing conveyor microwave electrothermal plants based on ray type cameras.

Keywords: microwave electrothermal conveyor plant, camera with a traveling wave, transport system, microwave generator, calculation

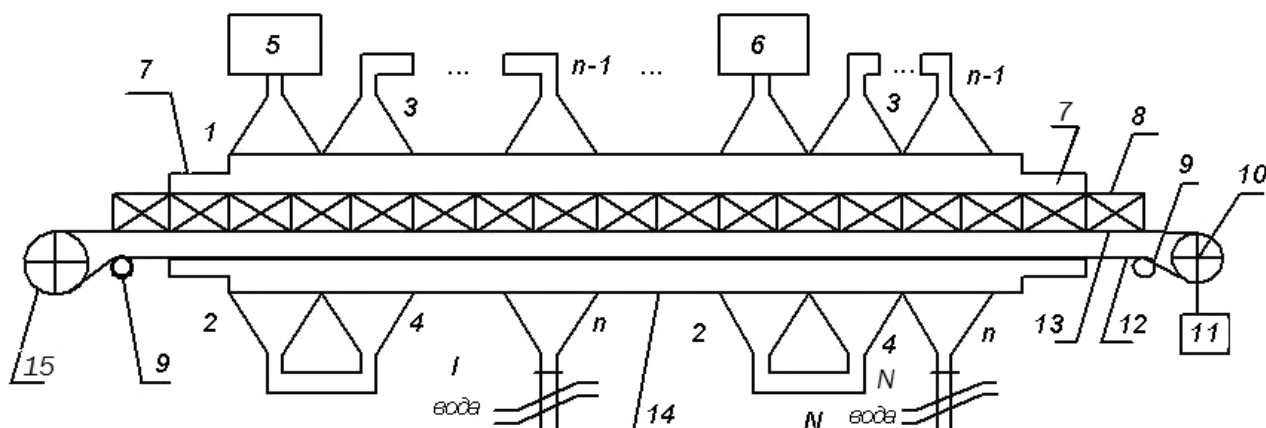
Среди СВЧ электротермических установок, работающих в методическом режиме, свое место занимают конвейерные СВЧ установки. Системному проектированию этих установок пока что мешает отсутствие методов расчета транспортных систем. Покажем, как эту проблему можно решить в отношении конвейерной СВЧ электротермической установки на базе камеры лучевого типа (КЛТ).

Для достижения максимального КПД по использованию СВЧ энергии при термообработке движущегося на конвейерной линии обрабатываемого объекта целесообразно излучающие и приемные рупоры соединить меандром (рис).

Электромагнитная волна, генерируемая источником СВЧ энергии 5, через излучающий рупор 1 поступает в КЛТ 14, проходит через слой обрабатываемого диэлектрика 8, при этом часть переносимой волной СВЧ энергии тратится на нагрев диэлектрика, по-

ступает в первый приемный рупор первой секции меандровой системы, а потом, пройдя всю первую секцию, проходит в балластную нагрузку, где СВЧ энергия тратится на нагрев проточной воды. Подобное распространение электромагнитной волны происходит в каждой секции меандровой системы.

Любой ленточный конвейер состоит из замкнутого тягового элемента (ленты), являющегося одновременно и рабочим элементом, который перемещается по стационарным роликовым опорам и огибает направляющие устройства. Верхняя ветвь ленты, на которой расположен груз, движется по стационарным желобчатым роликовым опорам. Нижняя часть ленты (холостая) движется, опираясь на прямые роликовые опоры. Лента приводится в движение от приводного барабана, связанного через передаточный механизм с электродвигателем.



Конвейерная СВЧ электротермическая установка на базе камере лучевого типа I,...,N секции меандровых систем; 1,4..., n-1 – излучающие рупоры; 2,3..., n – приемные рупоры; 5,6 – источники СВЧ энергии; 7 – шлюзы; 8 – обрабатываемые объекты; 9,10,12,13,15 – элементы конвейерной системы; 11 – электропривод; 14 – КЛТ

Если не учитывать отражение электромагнитной волны от поверхности обрабатываемого диэлектрика, то мощность, поступившая в первый приемный рупор первой секции меандровой системы, равна

$$P_{np1} = Pe^{-2\alpha_1 d}, \quad (1)$$

где P – мощность СВЧ источника СВЧ энергии; d – толщина обрабатываемого диэлектрика; α_1 – коэффициент затухания электромагнитной волны [1]

$$\alpha_1 = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon_1' \left(\frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta_1} \right) - 1 \right)} \quad (2)$$

В (2) ε_1' , $\operatorname{tg} \delta_1$ – относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь обрабатываемого диэлектрика.

Тогда в балластную нагрузку первой меандровой системы с учетом (1) придет СВЧ мощность

$$P_{npn} = Pe^{-2d(\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_n)}, \quad (3)$$

а КПД по использованию СВЧ энергии для нагрева обрабатываемого диэлектрика из (3) составит

$$\eta = 1 - e^{-2d(\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_n)}. \quad (4)$$

Если пренебречь зависимостями от температуры ε_1' , $\operatorname{tg} \delta_1$ обрабатываемого диэлектрика, то в (4) $\alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_n$ и при заданном η количество секций меандровой

системы равно

$$K = \frac{1}{2d\alpha} \ln \frac{1}{1-\eta},$$

тогда количество пар рупоров в секции меандровой системы составит $n=2K$.

Мощность СВЧ источника СВЧ энергии P , скорость движения обрабатываемого объекта в КЛТ на конвейерной ленте и температура на выходе секции T_n , до которой надо нагреть диэлектрик, связаны между собой соотношением

$$P = \frac{c\rho S v}{\eta} (T_n - T_0), \quad (5)$$

где c , ρ – удельная теплоемкость и плотность обрабатываемого объекта; T_0 – начальная температура диэлектрика, v – скорость транспортировки объектов на конвейерной ленте в КЛТ; $S=a^2$ – поперечное сечение обрабатываемого объекта в области излучения рупора КЛТ; a – размер излучающего рупора (см. таблицу).

Скорость v зависит от параметров электропривода.

Мощность электродвигателя конвейера определяется по соотношению

$$P_{эд} = \frac{k_3 v F_{тяг}}{1000 \eta}, \quad (6)$$

где k_3 – коэффициент запаса; $F_{тяг}$ – тяговое усилие на приводном барабане; η – КПД электродвигателя.

Размеры апертуры излучающего рупора

Частота, МГц	Сечение волновода, см×см	Размер апертуры, см×см	Длина рупора, см
2450	4,5×9	10×10	20
915	11×22	26×26	54
433	25×50	56×56	113

Если источник СВЧ энергии и электропривод не позволяют получить заданную производительность G при достижении заданной температуры термообработки, то в КЛТ следует разместить вторую, третью и так далее меандровые системы (рисунок), что, естественно, удлиняет транспортную систему установки. Так, при N секциях меандровой системы длина диэлектрических объектов на конвейерной линии в зоне излучения всех систем составит

$$L = aKN.$$

Наконец, если ширина обрабатываемого объекта больше a , то вдоль конвейерной ленты в КЛТ должно быть использовано несколько параллельных рядов меандровых систем, аналогичных рассмотренным. Количество таких систем равно $c=b/a$, где b – ширина обрабатываемого диэлектрика.

При проектировании конвейерной СВЧ электротермической установки сначала

следует проверить целесообразность применения такой установки для термообработки диэлектрического объекта. Для этого надо сравнить чистую прибыль за год эксплуатации СВЧ установки и аналогичной по производительности конкурирующей установки. Проект целесообразен, если прибыль от СВЧ установки больше [2].

Затем проводится технико-экономическая оптимизация СВЧ оборудования или выбирается наиболее экономически эффективная СВЧ установка путем сравнения чистой прибыли вариантов СВЧ установок.

Наконец, приводится расчет меандровых систем КЛТ, так что в целом алгоритм проектирования конвейерной СВЧ электротермической установки аналогичен алгоритму проектирования толкательной СВЧ электротермической установки [3].

ЛИТЕРАТУРА

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

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

3. **Архангельский Ю.С.** Толкательная СВЧ электротермическая установка на базе камеры с бегущей волной / Ю.С. Архангельский, В.О. Юдина // Вопросы электротехнологии. 2015. № 4 (9). С. 14-19.

Юдина Виолетта Олеговна – магистрант кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Архангельский Юрий Сергеевич – заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор кафедры «Электрообеспечение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Violetta O. Yudina – Master Student, Department of Automated Electrical Engineering Plants and Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Yuri S. Arkhangelsky – Dr.Sc., Professor, Honored Master of Sciences of the Russian Federation, Department of Power Supply for Industrial Facilities, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

СВЧ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ТЕРМООБРАБОТКИ ЖИДКОСТИ В ПОТОКЕ

Ю. С. Архангельский, В.О. Юдина

MICROWAVE ELECTROTHERMAL COMPLEXES FOR FLUID FLOW HEATING

Yu.S. Arkhangelskiy, V.O. Yudina

Рассмотрены варианты компоновки СВЧ электротермических установок для термообработки жидкости в потоке. Приведены соотношения для расчета рабочей камеры, гидросистемы и насоса.

Ключевые слова: СВЧ электротермические установки, термообработка, жидкость, поток, рабочая камера, гидросистема, насос, расчет

СВЧ электротермические установки применяются для термообработки жидкостей, в частности для пастеризации воды и молока. Эти установки позволяют получить более высокий КПД по сравнению с альтернативными теплотехнологическими установками.

Многие вопросы проектирования СВЧ установок уже рассмотрены. Так, вопросы подавления микроорганизмов в СВЧ электромагнитном поле рассмотрены, например, в работах [1-3], расчета рабочих камер – в работах [4, 5], технико-экономических расчетов – в работах [6, 7].

Однако вопросы компоновки СВЧ электротермических установок, их гидросистем и насоса, создающего поток жидкости в гидросистеме установки, пока в полной мере не исследованы.

Рассмотрим эти вопросы подробнее.

В СВЧ электротермической установке для термообработки жидкости в потоке удобнее всего использовать в качестве рабочей камеры камеру с бегущей волной

The paper considers the versions for the layout of microwave electrothermal complexes used in thermal treatment of fluid flows. The provided ratio formula can be used in calculations relating the working chamber, fluid power system and hydraulic pump.

Keywords: microwave electrothermal installations, heat treatment, fluid flow, working chamber, hydraulic pump, calculation

(КБВ), в которой обрабатываемая жидкость протекает по волноводу в цилиндрическом канале круглого поперечного сечения (рис. 1).

Заполнение круглого волновода 3 радиопрозрачным твердым диэлектриком 4 позволяет избежать применения в КБВ деталей из стекла, что существенно повышает надежность рабочей камеры. Профиль согласующего элемента 6 выбирается экспериментально.

Такие камеры имеют коэффициент стоячей волны по напряжению $K_{\text{сш}} \leq 1,3-1,5$, то есть их КПД по использованию СВЧ энергии составляет 96-98%. Некоторые варианты компоновки СВЧ электротермической установки с рабочей камерой, показанной на рис. 1, приведены на рис. 2.

Порядок расчета геометрии КБВ с $K_{\text{сш}} \leq 1,3-1,5$ приведен в работе [4], а мощность источника СВЧ энергии определяется соотношением

$$P = \frac{c\rho G\Delta T}{\eta}, \quad (1)$$

где c , ρ – удельная теплоемкость и плотность обрабатываемой жидкости; G – производительность установки; $\eta \approx 0,97$ – КПД по использованию СВЧ энергии; $\Delta T = T_H - T_0$; T_H , T_0 – температура нагрева и начальная температура жидкости.

Все варианты, показанные на рис. 2, имеют одинаковую гидросистему (рис. 3).

Пусть СВЧ энергия подводится к потоку жидкости между сечениями 3 и 4. Движением жидкости по гидросистеме КБВ интересуются для организации давления, которое нужно создать на входе в систему, чтобы обеспечить при выбранном ΔT заданную производительность установки.

Как известно, жидкости подразделяются на ньютоновские и неньютоновские в зависимости от того, подчиняются ли она закону внутреннего трения Ньютона [8].

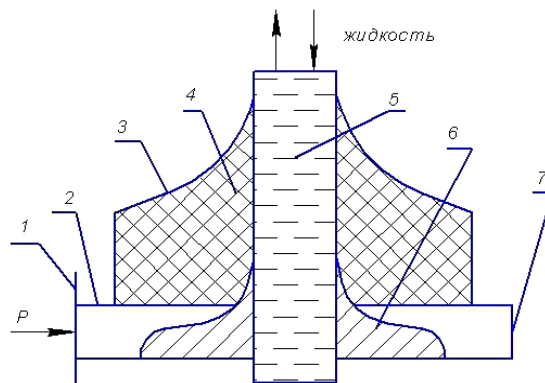


Рис. 1. Камера с бегущей волной на круглом волноводе: 1 – фланец прямогоугольного волновода; 2 – прямогоугольный волновод; 3 – круглый волновод; 4 – твердый радиопрозрачный диэлектрик; 5 – цилиндрический гидравлический канал; 6 – согласующий элемент; 7 – короткое замыкание

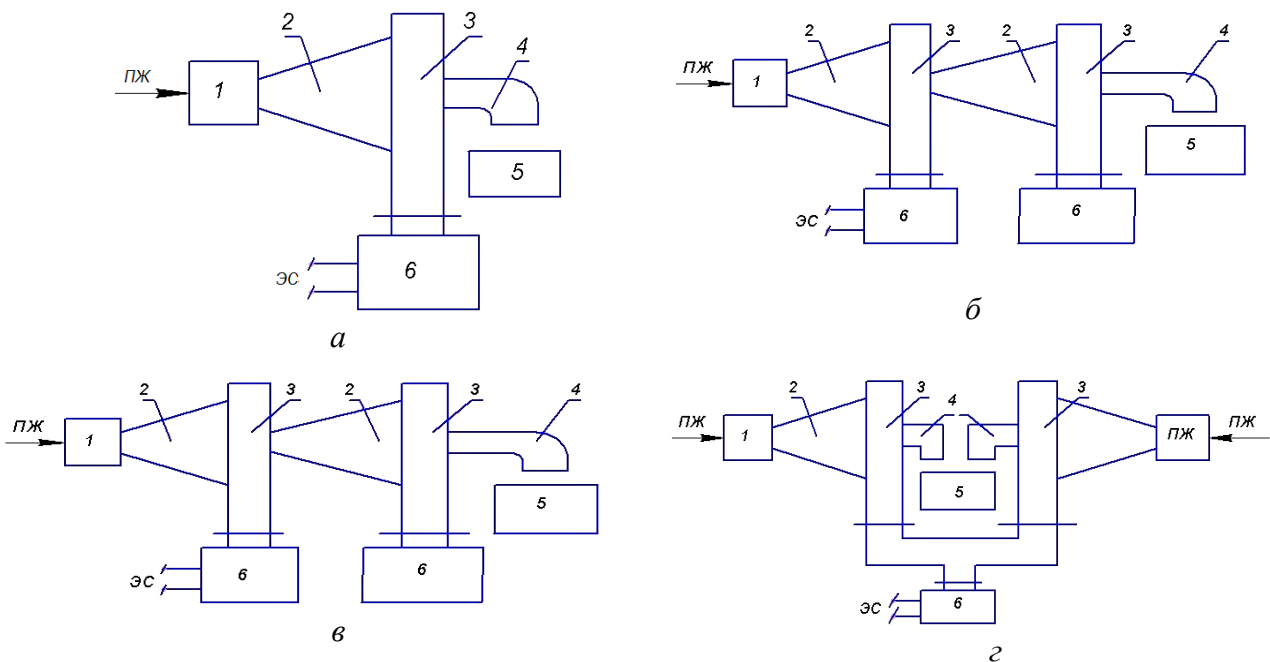


Рис. 2. Варианты компоновки СВЧ электротермической установки для термообработки жидкости в потоке: 1 – насос; 2 – КБВ; 3 – прямогоугольный волновод; 4 – гидравлическая система; 5 – приемная емкость; 6 – источник СВЧ энергии; ПЖ – поток жидкости; ЭС – электрическая сеть 220 В, 50 Гц

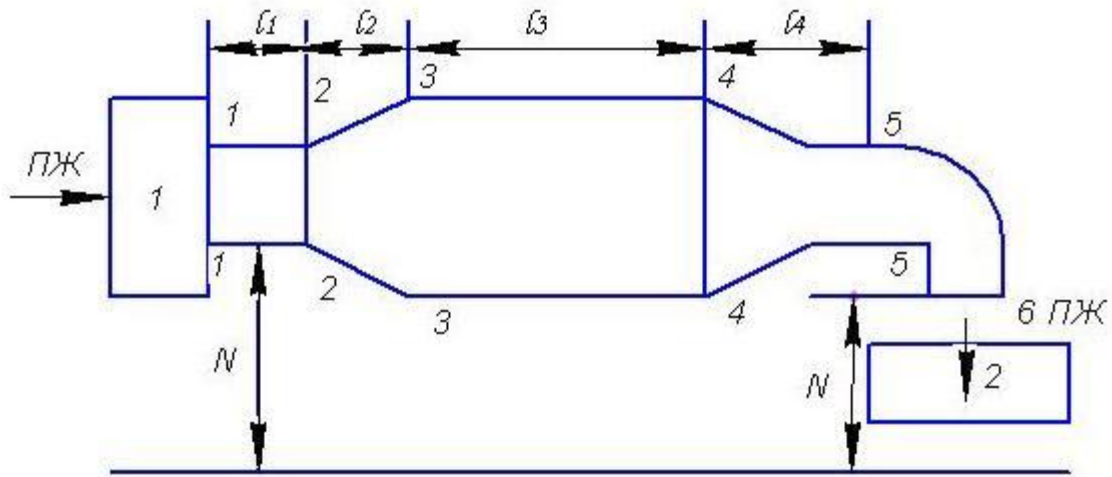


Рис. 3. Гидравлическая система КБВ на круглом волноводе для термообработки жидкости в потоке: 1 – насос; 2 – приемная емкость; ПЖ – поток жидкости

В СВЧ электротермических установках обычно обрабатываются ньютоновские жидкости (вода, молоко, растворы и т.п.). Для определения давления, которое дол-

жен создавать насос на входе в гидросистему, разобьем ее на характерные участки и для сечений 1 и 6 запишем уравнение Бернулли

$$Z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = Z_6 + \frac{p_6}{\rho g} + \frac{\alpha_6 v_6^2}{2g} + h, \quad (2)$$

где Z_1, Z_6 – геометрические высоты сечений 1 и 6; p_1, p_6 – давления в сечениях 1 и 6; v_1, v_6 – средние скорости потока в сечениях 1 и 6; g – ускорение свободного падения; $\alpha_1 v_1^2/2g, \alpha_6 v_6^2/2g$ – скоростные напоры в сечениях 1 и 6, α_1, α_6 – коэффициент Кориолиса в сечениях 1 и 6; h – потери напора на всей длине гидросистемы.

Поскольку $\alpha_1 \approx 1,03-1,1$, примем $\alpha_1 = \alpha_6 = 1$ [8]. В сечении 6 гидростатическое давление равно атмосферному, следовательно избыточное давление $p_6 = 0$. Тогда из уравнения (1) при $Z_1 \approx Z_6$ получим

$$p_1 = \rho g \left[\frac{v_6^2 - v_1^2}{2g} + h \right]. \quad (3)$$

Так как СВЧ энергия поглощается на участке между сечениями 3 и 4, в соотношении с (1) $G = G_4$ – производительность на участке 3-4. Тогда с учетом (1)

$$v_2 = \frac{P}{c \rho S_2 \Delta T}, \quad (4)$$

где S_3 – площадь поперечного сечения гидросистемы на участке между сечениями 3 и 4 (рассчитывается согласно [4] из условия идеального согласования КБВ с СВЧ генератором).

Принимая во внимание уравнение непрерывности

$$v_i S_i = v_k S_k$$

где v_i, v_k – средние скорости потока в i и k сечениях, S_i, S_k – площади поперечных сечений в i и k сечениях потока, запишем скорости v_1^2 и v_6^2 в сечениях 1 и 6 в виде

$$v_1^2 = v_3^2 \left(\frac{S_3}{S_1} \right)^2, \\ v_6^2 = v_3^2 \left(\frac{S_3}{S_7} \right)^2,$$

и тогда (3) можно записать как

$$p_1 = \rho g \left[\left[\left(\frac{S_3}{S_6} \right)^2 - \left(\frac{S_3}{S_1} \right)^2 \right] \frac{v_3^2}{2g} + h \right]. \quad (5)$$

Таким образом, учитывая (3), расчет p_1 по (5) сводиться к нахождению h . При расчете h вслед за [9] будем исходить из принципа сложения потерь напора, а потому

$$h = \sum_{i=1}^n h_{ni} + \sum_{j=1}^k h_{mj}, \quad (6)$$

где h_{nj} – путевые потери напора; h_{mj} – местные потери напора.

Тогда на участке между сечениями 1 и 2 путевые потери напора равны [8]

$$h_{n1} = \frac{\lambda_1 l_1}{d_1} \left(\frac{S_3}{S_1} \right) \frac{v_3^2}{2g}, \quad (7)$$

где l_1 , d_1 , λ_1 – длина, диаметр гидравлического канала и коэффициент Дарси на участке между сечениями 1 и 2.

Участок между сечениями 2 и 3 – диффузор и для него

$$h_{m1} = \xi_1 \frac{v_3^2}{2g}, \quad (8)$$

где $\xi_1 = \frac{\lambda_2}{8 \sin \frac{\varphi}{2}} \left(\frac{n^2 - 1}{n^2} \right) + \left(\frac{n - 1}{n} \right)^2 \sin \varphi$;

λ_2 – коэффициент, учитывающий потери напора на длине l_2 диффузора; φ – угол между образующими диффузора.

Для участка между сечениями 3 и 4

$$h_{n2} = \frac{\lambda_3 l_3}{d_3} \frac{v_3^2}{2g}, \quad (9)$$

где l_3 , d_3 , λ_3 – длина, диаметр гидравлического канала и коэффициент Дарси на участке между сечениями 3 и 4.

Участок между сечениями 4 и 5 – конфузор и для него

$$h_{m2} = \xi_2 \left(\frac{S_3}{S_5} \right)^2 \frac{v_3^2}{2g}, \quad (10)$$

где $\xi_2 = \frac{\lambda_4}{8 \sin \varphi} \frac{n^2 - 1}{n^2}$; λ_4 – коэффициент,

учитывающий потери напора на длине l_4 конфузора; $n = S_4 / S_5$; φ – угол между образующими конфузора.

Участок между сечениями 5 и 6 представляет собой плечо с закруглением. Для него

$$h_{m3} = \xi_3 \left(\frac{S_3}{S_6} \right)^2 \frac{v_3^2}{2g}, \quad (11)$$

где $\xi_3 = \left[0,131 + 0,163 \left(\frac{d_5}{R_3} \right)^{3,5} \right] \frac{\delta}{90^\circ}$; d_5 – диаметр канала на участке закругления; R_3 – радиус закругления; δ – угол закругления.

Наконец, в сечении 6 происходит расширение гидравлического канала. Местное сопротивление в этом сечении равно

$$h_{m4} = 0,32 \left(\frac{S_3}{S_6} \right)^2 \frac{v_3^2}{2g}. \quad (12)$$

Итак, h представляет собой сумму потерь напора, рассчитываемую по (6) с учетом (7) – (12). Все h_n и h_m выражены через $v_3 = v = G/S_3$, а чтобы определить коэффициенты Дарси, нужно определить для каждого участка гидросистемы число Рейнольдса

$$Re = \frac{vd}{\nu},$$

где v – скорость потока для каждого участка, d – диаметр трубы гидросистемы, ν – кинематическая вязкость жидкости.

Если $Re < 2300$, то режим течения жидкости считается ламинарным, а если $Re > 2300$ – турбулентным [8]. Для ламинарного режима в круглых трубках

$$\lambda = \frac{64}{Re},$$

а для турбулентного режима коэффициент Дарси может быть рассчитан по формуле Альтшуля

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{K_1}{d} + \frac{68}{Re} \right),$$

где K_1 – эквивалентная шероховатость стенок трубы [8].

Найденная по (3) величина давления p на входе гидросистемы дает возможность определить параметры насоса.

Непрерывную работу насоса обеспечивает электродвигатель, связанный с ним с помощью передаточных механизмов (муфтой, редуктором, шкивом). В совокупности это и есть электропривод.

Мощность электродвигателя насоса определяется по соотношению

$$P_{\text{эд}} = k_3 \frac{Gp}{\eta\eta_n}, \quad (13)$$

где $k_3=1,1-1,3$ – коэффициент запаса; G – производительность насоса; $\eta_n = 0,9...0,95$ – КПД передачи.

Что касается выбора наиболее экономически эффективного варианта компоновки СВЧ электротермической установки для термообработки жидкости в потоке, то это можно сделать на базе технико-экономической оптимизации, если экономическую эффективность оценивать как прибыль при заданной производительности установки [6, 7]

$$\mathcal{E} = ПЦ - З, \quad (14)$$

где $П$ – годовой объем продукции; $Ц$ – цена единицы продукции; $З$ – затраты на вы-

пуск продукции $П$ с учетом налогов и платежей.

Но так как вариантов компоновки, показанных на рис. 2, немного, проще выбрать наиболее экономически эффективный вариант, сопоставляя между собой поочередно чистую прибыль сравниваемых вариантов.

В этой процедуре должно быть $ПЦ = \text{const}$, постоянными будут и затраты на изготовление рабочей камеры, так как их геометрия зависит в первую очередь от длины волны генератора и диэлектрических параметров обрабатываемой жидкости. Разными при сравнении вариантов будут мощности СВЧ источников энергии и производительность насосов, а также от этих параметров зависят цены элементов структуры СВЧ установки.

Соотношение

$$\Delta \mathcal{E} = \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2,$$

где $\mathcal{E}_{1,2}$ – чистые прибыли сравниваемых вариантов установки; позволяет определить целесообразность инвестирования проекта установки для термообработки жидкости в потоке с применением СВЧ энергоподвода.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Архангельский Ю.С.** СВЧ электротермия / Ю.С. Архангельский. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 1998. 408 с.
2. СВЧ модификация полимеров / Ю.С. Архангельский и др. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2012. 288 с.
3. **Архангельский Ю.С.** Справочная книга по СВЧ электротермии / Ю.С. Архангельский. Саратов: Научная книга, 2011. 560 с.
4. Справочник инженера-электрика сельскохозяйственного производства / под ред. В.М. Баутина. М.: Информагротех, 1999. 536 с.
5. Камеры лучевого типа СВЧ электротехнологических установок / Ю.С. Архангельский и др. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2010. 229 с.
6. **Архангельский Ю.С.** Компьютерное моделирование СВЧ электротермических

процессов и установок / Ю.С. Архангельский, С.В. Тригорлый. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2006. 212 с.

7. **Москаленко В.В.** Электрический привод / В.В. Москаленко. М.: ИЦ «Академия», 2005. 368 с.

8. **Гришина Е.М.** Техничко-экономическая оптимизация СВЧ электротермического оборудования, на камерах с бегущей волной / Е.М. Гришина, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. 2014. № 1 (2). С. 33-35.

9. **Гришина Е.М.** Техничко-экономическая оптимизация структуры и параметров СВЧ электротермического оборудования на камерах лучевого типа / Е.М. Гришина, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. 2013. № 1 (1). С. 34-36.

Юдина Виолетта Олеговна – магистрант кафедры «Автоматизированные электро-технологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Архангельский Юрий Сергеевич – заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Violetta O. Yudina – Master Student, Department of Automated Electrical Engineering Plants and Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Yuri S. Arkhangelsky – Dr.Sc., Professor, Honored Master of Sciences of the Russian Federation, Department of Power Supply for Industrial Facilities, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 15.05.16, принята к опубликованию 19.06.16

К СВЕДЕНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

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

МНОГОЧАСТОТНАЯ ТЕРМООБРАБОТКА ДИЭЛЕКТРИКОВ В КАМЕРАХ ЛУЧЕВОГО ТИПА

А.В. Фёдоров

MULTIFREQUENCY DIELECTRIC HEAT TREATMENT IN RAY HEATING TYPE MICROWAVE CHAMBERS

A.V. Fedorov

Предложен принцип многочастотного режима работы установки СВЧ диэлектрического нагрева с рабочей камерой лучевого типа для термообработки диэлектрических материалов. Описан принцип управления частотой излучения для компенсации изменения диэлектрических параметров при нагреве диэлектрика. Рассчитано распределение температуры в диэлектрике при одночастотном и многочастотном режимах работы установки.

Ключевые слова: камера лучевого типа, установка СВЧ диэлектрического нагрева, расчёт, рупорная антенна, длина волны, относительная диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь, одночастотный режим, многочастотный режим

Для термической обработки диэлектрических материалов широко используется СВЧ энергия. В промышленности распространены установки СВЧ диэлектрического нагрева с рабочими камерами лучевого типа (КЛТ) [1]. Такая камера (рис.1) имеет один или несколько излучателей СВЧ энергии, расположенных у поверхности нагреваемого объекта. Излучателем чаще всего служит рупор, подключаемый к стандартному прямоугольному волноводу и облучающий прямоугольный участок поверхности нагреваемого диэлектрика.

Мощность СВЧ излучения на глубине Z определяется по соотношению

The multi-frequency mode principle is proposed for microwave radiation type installations to heat dielectric materials. The described emission frequency control principle can be applied in order to compensate for the changes in dielectric parameters in the course of dielectric heating. The calculations are made for the temperature distribution in the dielectric layers under both operation modes of the chamber.

Keywords: ray type microwave chamber, microwave installation, calculation, horn antenna, wavelength, relative permittivity, loss angle, single frequency mode, multiple-frequency mode

$$P_{y\delta} = P_0 e^{-2\alpha z}, \quad (1)$$

где P_0 – мощность, прошедшая в диэлектрик, при $Z = 0$; α – коэффициент затухания электромагнитной волны в диэлектрике

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{1}{2} \varepsilon' (\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} - 1)}, \quad (2)$$

λ – длина волны СВЧ колебаний; ε' , $\operatorname{tg} \delta$ – относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь нагреваемого объекта.

Глубину проникновения электромагнитной волны в обрабатываемый диэлектрик принято характеризовать величиной δ_p , при которой P уменьшается в e раз. Ди-

электрические параметры обрабатываемого материала зависят от температуры, отчего в процессе нагрева изменяется величина δ_r . Обеспечить постоянство δ_r на всём интервале термообработки можно,

согласно (2) изменяя длину волны λ синхронно с изменением ε' и $\operatorname{tg} \delta$ в процессе нагрева.

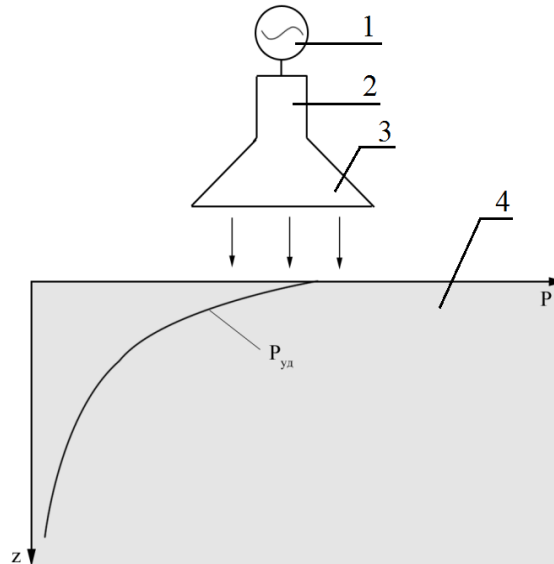


Рис. 1. Рабочая камера лучевого типа с рупорным излучателем: 1 – источник СВЧ энергии; 2 – прямоугольный волновод; 3 – рупорный излучатель; 4 – обрабатываемый диэлектрик

Рассмотрим имеющиеся здесь возможности на примере термообработки говядины, диэлектрические параметры которой зависят

от температуры, как показано на рис. 2.

При постоянной длине волны δ_r будет изменяться так, как показано на рис. 3а.

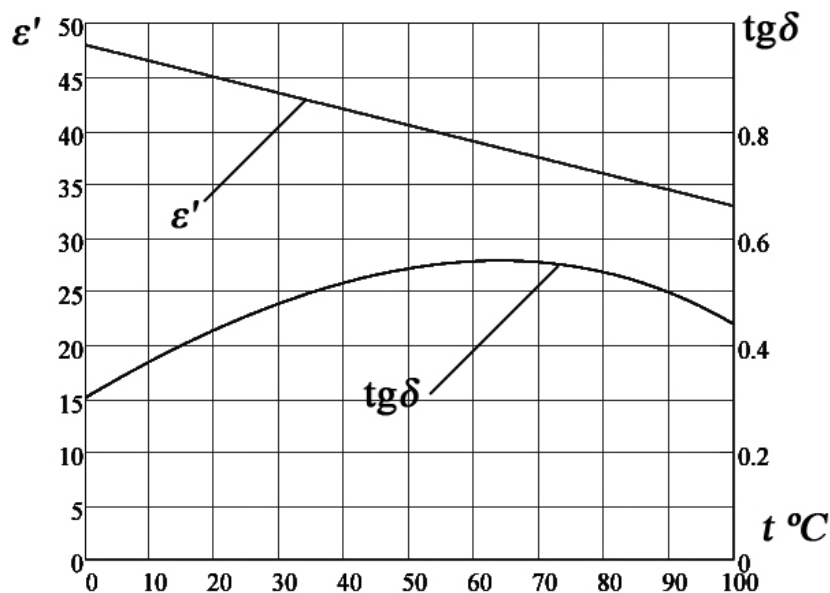
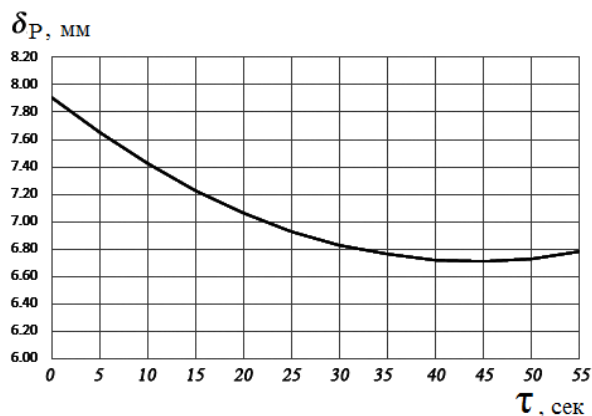
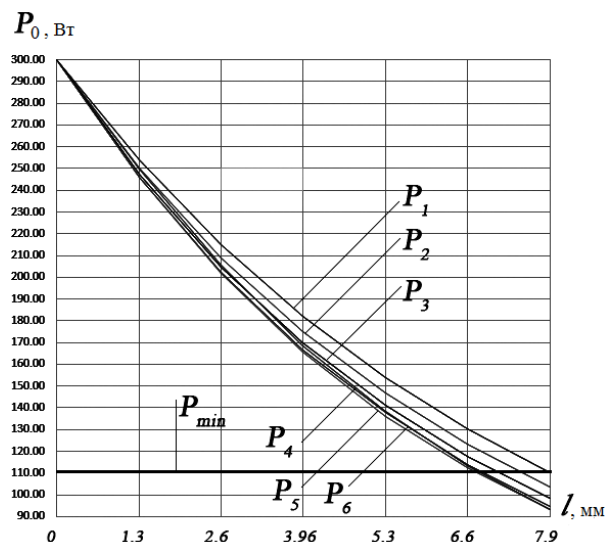


Рис. 2. Зависимость диэлектрических параметров говядины от температуры



а



б

Рис. 3. Нагрев говядины в КЛТ: а – изменение глубины проникновения электромагнитной волны внутрь диэлектрика при термообработке с $\lambda = 2450$ МГц; б – распределение СВЧ мощности внутри диэлектрика в разные моменты времени термообработки

Разбив нагреваемый участок диэлектрика на несколько слоёв высотой Δl , будем учитывать изменения диэлектрических параметров от температуры в каждом слое. Тогда через время τ после включения генератора температура n -го слоя в пренебрежении тепловыми потерями определяется по соотношению

$$T_n = T_0 + \frac{\Delta P \tau}{c \rho V}, \quad (3)$$

где T_0 – температура слоя n до начала нагрева; ΔP – часть мощности, поглощённая слоем n ; c , ρ , V – удельная теплоёмкость, плотность и объём слоя диэлектрика; τ – время термообработки.

Рассмотрим два варианта управления частотой СВЧ генератора с целью стабилизации δ_p на всём протяжении процесса термообработки.

В первом случае $\lambda(T)$ определяется по соотношению

$$\lambda(T) = 4\pi\delta_p \sqrt{\frac{\varepsilon'(T)}{2} (\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta(T)} - 1)}, \quad (4)$$

причем изменение длины волны происходит при изменении диэлектрических параметров только верхнего слоя.

Во втором варианте из (1) выражаем затухание мощности в последнем слое, учитывая диэлектрические параметры всех слоёв, считая, что входящая мощность в каждый последующий слой равна мощности, выходящей из предыдущего слоя

$$P(\lambda) = P_0 e^{-2\Delta l [\alpha(T_1, \lambda) + \alpha(T_2, \lambda) + \dots + \alpha(T_n, \lambda)]} \quad (5)$$

Тогда $\delta_p = \text{const}$, если выполняется условие

$$2\Delta l [\alpha(T_1, \lambda) + \alpha(T_2, \lambda) + \dots + \alpha(T_n, \lambda)] = 1. \quad (6)$$

Для каждого из предложенных вариантов управления частотой генератора был проведён расчёт процесса нагрева говядины, теплофизические параметры которой представлены в [2]. Полученные зависимости глубины проникновения от времени показаны на рис. 4. Законы изменения длин волн для обоих вариантов показаны на рис. 5.

Согласно рис. 4 при первом варианте управления $\lambda(\tau)$ величина δ_p все-таки во времени изменяется, хотя существенно меньше, чем в одночастотном режиме. Во втором варианте, глубина проникновения δ_p остаётся постоянной, что позволяет добиться лучшего нагрева.

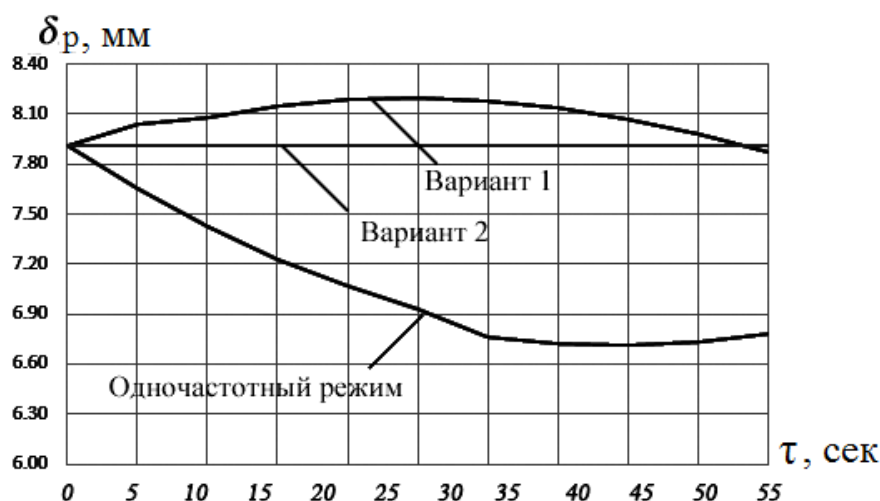


Рис. 4. Зависимость глубины проникновения электромагнитной волны внутрь говядины в процессе термообработки в одночастотном и двух вариантах многочастотного режима

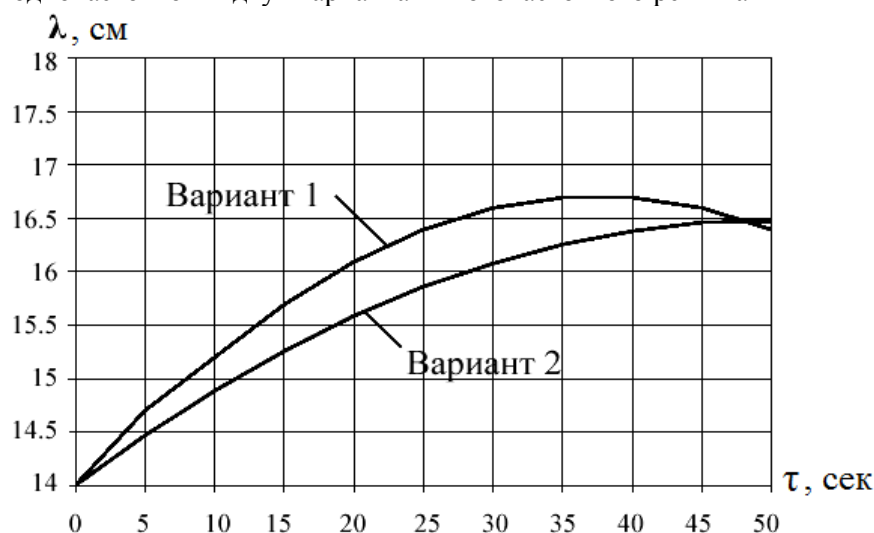


Рис. 5. Изменение длины волны генератора в процессе нагрева в многочастотном режиме

Для создания установок СВЧ диэлектрического нагрева, работающих в многочастотном режиме, требуется широкополосный генератор высокой мощности. Он

может быть построен на основе ЛБВ-генератора или на мощных полупроводниковых транзисторах [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. **Архангельский Ю.С.** Справочная книга по СВЧ электротермии / Ю.С. Архангельский. Саратов: Научная книга, 2011. 560 с.

2. **Гинзбург А.С.** Теплофизические характеристики пищевых продуктов / А.С. Гинзбург, М.А. Громов, Г.И. Красовская. М.: Пищевая промышленность, 1980. 288 с.

3. **Федоров А.В.** Применение полупроводниковых генераторов в СВЧ электро-технологических установках / А.В. Федоров, Ю.С. Архангельский // Актуальные проблемы электронного приборостроения: сб. науч. тр. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2014. Т. 2. С. 165-169.

Федоров Антон Витальевич – аспирант кафедры «Автоматизированные электро-технологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Anton V. Fedorov – postgraduate student of the Department of Power Supply for Industrial Facilities, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 15.05.16, принята к опубликованию 19.06.16



ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 621.318.3

О ВОЗМОЖНОСТИ УВЕЛИЧЕНИЯ ЭНЕРГИИ РАБОЧЕГО ХОДА ИМПУЛЬСНОГО ЛИНЕЙНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров, К.М. Усанов

A POSSIBILITY FOR INCREASING THE POWER STROKE OF ELECTROMAGNETIC PULSED LINEAR ENGINE

V.I. Moshkin, G.G. Ugarov, K.M. Usanov

Предложена конструкция импульсного линейного электромагнитного двигателя с встроенным электромагнитным устройством удержания якоря. Обмотки возбуждения и удержания двигателя соединены последовательно. Такое включение обмоток перераспределяет остаточную магнитную энергию устройства удержания в рабочие зазоры двигателя, что позволяет дополнительно увеличить энергию рабочего хода.

Ключевые слова: линейный электромагнитный двигатель, устройство удержания, энергия рабочего хода

В работах [1, 2] было установлено, что эффективность энергопреобразования в импульсных ЛЭМД зависит от режимных и конструктивных параметров. Функционирование по магнитным циклам с мало меняющимся по ходу потокоцеплением дает возможность импульсному ЛЭМД обеспечить значительную механическую работу и одновременно высокий магнитный КПД при значениях магнитной индукции, соответствующих насыщению магнитной системы двигателя.

Для реализации такого энергетического режима электромеханического преобразования применительно к редкоударным электромагнитным машинам необходимая

The proposed design relates the electromagnetic pulsed linear engine with an in-built electromagnetic unit for retention of the armature. The excitation and retention windings of the given engine are connected consistently. It is established that this type of connection of windings redistributes the residual magnetic energy of the retention unit into the working gaps of the engine, and additionally allows increasing the energy of the power stroke.

Keywords: electromagnetic linear engine, retention unit, power stroke

концентрация магнитной энергии в рабочих зазорах может быть обеспечена с помощью известного способа аккумуляирования магнитной энергии при неподвижном якоре двигателя [3]. В результате удалось повысить энергию удара (рабочего хода якоря) и КПД импульсного ЛЭМД, например, пресса ПЭМ-1,0, более чем в 2 раза.

Цель статьи – поиск путей дальнейшего увеличения удельной энергии рабочего хода импульсных ЛЭМД, снабженных встроенным в конструкцию двигателя устройством удержания якоря (УЯ).

Для достижения цели необходимо увеличить механическую энергию рабочего

хода за счет перераспределения значительной части магнитной энергии, связанной с полями рассеяния импульсного ЛЭМД и устройства удержания якоря, которая, преобразуясь в теплоту, бесполезно теряется, в энергию магнитного поля рабочих зазоров двигателя.

Чтобы увеличить энергетические показатели импульсного ЛЭМД с устройством удержания якоря, предлагается использовать магнитную энергию, связанную с полями рассеяния магнитной системы двигателя, как, например, в работах [4-6], а также магнитную энергию, сосредоточенную в магнитной системе устройства удержания якоря. Как показали исследования [7], эти энергии возможно перераспределить в рабочие зазоры, соединив последовательно обмотки возбуждения и удержания, за-

шунтировав их диодом (рис. 1). Выполнение возвратной пружины с предварительным поджатием в исходном положении якоря приводит к соприкосновению плоской части комбинированного якоря с магнитопроводом устройства удержания. Благодаря этому при появлении и возрастании тока от источника питания через последовательно соединенные обмотки возбуждения и удержания возникает удерживающее якорь усилие, превышающее тяговое усилие. Одновременно с возрастанием тока при неподвижном якоре происходит накопление магнитной энергии W_m в рабочих зазорах электромагнитного двигателя и дополнительной магнитной энергии $W_{m,доп}$ в зазорах устройства удержания якоря.

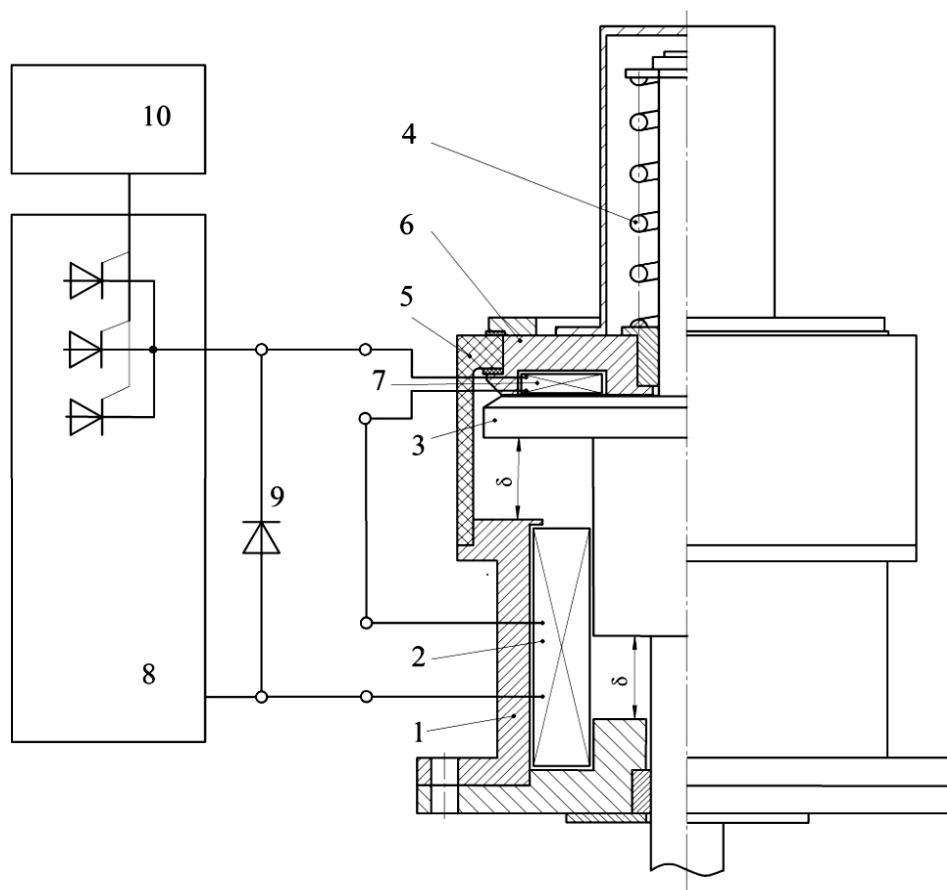


Рис. 1. Электромагнитный привод с устройством удержания якоря и последовательным соединением обмоток возбуждения и удержания: 1 – статор; 2 – обмотка возбуждения; 3 – дисковая часть комбинированного якоря; 4 – возвратная пружина; 5 – направляющий корпус; 6 – магнитопровод устройства УЯ; 7 – обмотка удержания; 8 – устройство питания; 9 – шунтирующий диод; 10 – устройство управления

При движении на интервале шунтирования диодом последовательно соединенных обмоток возбуждения и удержания, когда от источника питания уже нет притока энергии в магнитное поле рабочих зазоров двигателя, часть энергии магнитного поля $W_{м.доп}$ устройства удержания при снижении тока обмотки дополнительно передается в энергию магнитного поля рабочих зазоров W_m электромагнитного двигателя, что приводит к повышению среднего значения тягового усилия $F(t)$, пропорционального уменьшению магнитной энергии рабочего зазора при его перемещении x :

$$F(t) = \frac{\partial(W_m + W_{м.доп})}{\partial x},$$

где W_m – энергия магнитного поля в рабочих зазорах электромагнитного двигателя; $W_{м.доп}$ – часть энергии магнитного поля устройства удержания, дополнительно передаваемая в энергию магнитного поля рабочих зазоров; $F(t)$ – среднее тяговое усилие на интервале шунтирования.

Устройство управления 10 задает длительность открытого состояния управляемого выпрямителя устройства питания. В момент времени $t=0$ (t_0) оно подает сигнал включения управляемого выпрямителя 8, через который источник питания подключается к последовательно соединенным обмоткам удержания и возбуждения. Ток в этих обмотках при неподвижном якоре возрастает от нуля в соответствии с выражением при среднем значении выпрямленного напряжения U :

$$i = I_{уст} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{эКВ}}} \right) = \frac{U}{R + R_{y\partial}} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{эКВ}}} \right), \quad (1)$$

где $T_{эКВ} = \frac{L_n + L_{уд.макс}}{R + R_{уд}}$ – электромагнитная

постоянная времени цепи обмоток; L_n , R , $L_{уд.макс}$, $R_{уд}$ – соответственно начальная индуктивность и сопротивление обмотки возбуждения, максимальная индуктивность и сопротивление обмотки удержания;

$I_{уст}$ – установившийся ток в цепи обмоток.

С ростом тока в цепи обмоток тяговое усилие верхнего $F_{\delta.в}$ и нижнего $F_{\delta.н}$ рабочих зазоров и усилие удержания $F_{уд}$ начинают возрастать. Эти усилия выразим с помощью формулы Максвелла (на один зазор).

Тяговое усилие F_T определяется магнитным потоком Φ через начальный рабочий зазор δ и площадью распределения S_δ этого потока:

$$F_T(t) = F_{\delta.в} = F_{\delta.н} = \frac{\Phi^2(t)}{2\mu_0 S_\delta} = \frac{[wi(t)]^2 \mu_0 S_\delta}{2\delta^2}, \quad (2)$$

где $wi(t)$ – МДС обмотки возбуждения; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Усилие удержания $F_{уд}$ определяется магнитным потоком $\Phi_{уд}$ через начальный воздушный зазор $\delta_{в.0}$ (на рис. 1 показан утолщенной линией), образованный поверхностью сопряжения ярма 6 электромагнита удержания и плоской дисковой части якоря 3, и площадью распределения $S_{уд}$ этого потока:

$$F_{уд}(t) = \frac{\Phi_{уд}^2(t)}{2\mu_0 S_{уд}} = \frac{[w_{уд}i(t)]^2 \mu_0 S_{уд}}{2\delta^2}, \quad (3)$$

$w_{уд}i(t)$ – МДС обмотки удержания; $\delta_{в.0}$ – начальный воздушный зазор, образованный поверхностью сопряжения ярма электромагнита удержания и плоской дисковой части якоря двигателя; $S_{уд}$ – площадь распределения магнитного потока электромагнита удержания. В выражениях (2) и (3) w и $w_{уд}$ – числа витков обмотки возбуждения и обмотки удержания.

Так как МДС обмотки возбуждения всегда больше, чем МДС обмотки удержания, то согласно (2) и (3) с ростом тока скорость роста тягового усилия во времени будет выше скорости роста усилия удержания. Однако на этапе трогания якоря из-за разницы начальных зазоров δ и $\delta_{в.0}$ в исходном положении за счет предварительного поджатия возвратной пружины 4 абсолютные значения усилия удержания будут пока превышать абсолютные значения тягового усилия двигателя. Это объясняет-

ся весьма значительной разницей начальных зазоров, когда в выражениях (2) и (3) их отношение $\delta/\delta_{в.0} = 100 - 200$.

Движение якоря начнется с некоторой временной задержкой (в момент времени t_1 на рис. 2), когда возрастающее тяговое усилие двигателя превысит по величине возрастающее с меньшей интенсивностью усилие удержания якоря. Сразу после этого (в момент времени t_2) по окончании управляющего сигнала устройства 10 напряжение устройства питания 8 (рис. 2) с закрытием его выпрямителя становится равным нулю, и диод 9 откроется. К моменту времени t_2 ток возрастет до максимального значения I_2 , а в магнитной системе устройства удержания якоря будет накоплена магнитная энергия

$$W_{м.уд2} = L_{уд.макс} \cdot I_2^2 / 2,$$

где $W_{м.уд2}$ – энергия магнитного поля устройства удержания, соответствующая максимальному значению тока I_2 ; $L_{уд.макс}$ – максимальная индуктивность обмотки удержания.

Кроме того, к моменту времени t_2 в магнитной системе самого двигателя будет накоплена основная часть магнитной энергии – энергия магнитного поля $W_{м.д2}$, соответствующая максимальному значению тока I_2 :

$$W_{м.д2} = L_n I_2^2 / 2$$

где L_n – начальная индуктивность обмотки возбуждения, которая значительно больше максимальной индуктивности $L_{уд.макс}$ обмотки удержания.

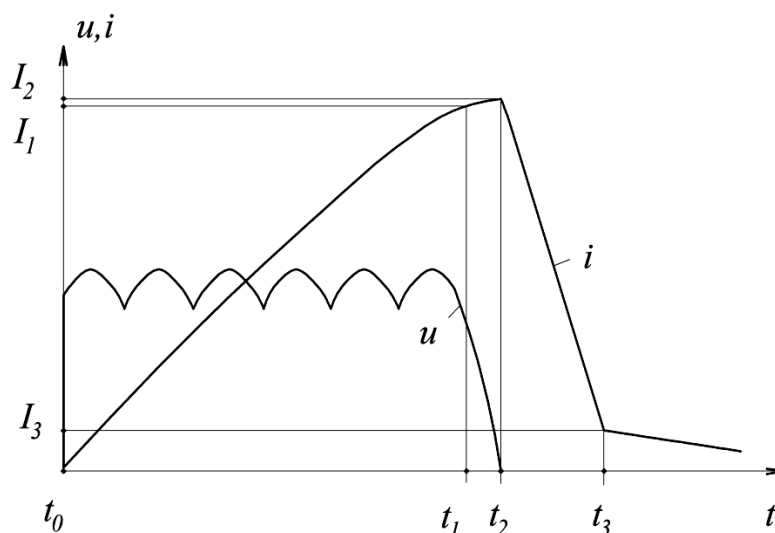


Рис. 2. Временные диаграммы напряжения и тока импульсного ЛЭМД

С момента времени t_2 ток обмоток возбуждения и удержания (рис. 2) замыкается через диод, а сам контур обмоток оказывается отключенным от источника. При движении якоря рабочий зазор между статором и якорем уменьшается и совершается механическая работа за счет расходования ранее накопленной магнитной энергии не только рабочих зазоров двигателя, но и магнитной энергии, обусловленной потоками рассеяния.

При наличии последовательно соединенных и замкнутых между собой через диод обмоток возбуждения и удержания часть магнитной энергии, запасенной в магнитных системах двигателя и устройства удержания к моменту времени t_2 , при уменьшении тока от I_2 до I_3 на интервале шунтирования диодом, перераспределяется в дополнительную энергию магнитного поля рабочих зазоров двигателя, а затем преобразуется в дополнительную механическую энергию. Если бы индуктивность об-

мотки удержания к моменту времени t_2 оставалась неизменной, то эта прибавка магнитной энергии за счет устройства удержания определилась бы так:

$$W'_{\text{м.доп}} = 0,5L_{\text{уд.макс}} I_1^2 - 0,5L_{\text{уд.макс}} I_2^2. \quad (4)$$

Однако при движении якоря на интервале времени $t_1 - t_2$ воздушный зазор между ярмом 6 и плоской дисковой частью якоря 3 увеличивается на величину рабочего хода и к моменту t_2 достигает значения δ , что приводит к уменьшению индуктивности обмотки удержания от максимальной величины $L_{\text{уд.макс}}$, соответствующей исходному состоянию якоря, до минимальной величины $L_{\text{уд.мин}}$, соответствующей конечному состоянию. Тогда выражение прибавки магнитной энергии для конечного состояния, соответствующего моменту времени t_2 , примет вид

$$W_{\text{м.доп}} = 0,5L_{\text{уд.макс}} I_1^2 - 0,5L_{\text{уд.макс}} I_2^2 b. \quad (5)$$

Сравнивая (4) и (5), нетрудно видеть, что прибавка магнитной энергии, дополнительно вводимой на интервале времени $t_1 - t_2$ в магнитное поле рабочих зазоров двигателя, когда нет притока энергии в это поле от источника питания, даже возросла.

На основе проведенного численного эксперимента при моделировании с помощью программного комплекса Elcut [8] определены запасы магнитной энергии в магнитных системах как самого двигателя типа ПЭМ-1,0, так и устройства удержания якоря с известными геометрическими параметрами [7]. При использовании магнитной энергии, связанной с потоками рассеяния двигателя, расчеты показали возможность увеличения механической работы двигателя на 10-15 %, а при использовании магнитной энергии устройства удержания якоря для такого среднеходового электромагнитного двигателя возможно увеличение его механической работы на 1-1,5%, а для короткоходового двигателя – на 4-6% дополнительно.

Таким образом, в преобразовании энергии магнитного поля в механическую энергию участвует больше энергии, чем ее за-

пасено к моменту t_1 в магнитном поле рабочих зазоров двигателя, на величину энергии $W_{\text{м.доп}}$.

Включение обмотки удержания последовательно с обмоткой возбуждения позволит за счет увеличения интервала времени $t_0 - t_1$ накопить в магнитных системах двигателя и устройства удержания необходимое количество магнитной энергии при сравнительно невысоком напряжении источника питания, не прибегая к режиму форсировки, вызывающему значительный рост потерь от вихревых токов в магнитопроводах двигателя и устройства удержания якоря.

Запасить магнитную энергию и затем передать ее рассмотренным выше способом в магнитное поле рабочих зазоров возможно и с помощью дросселя, конструктивно не связанного с электромагнитным двигателем [3-5]. Однако лишь использование в конструкции двигателя встроенного в него устройства удержания якоря позволит накопить в рабочих зазорах двигателя значительное количество магнитной энергии. Без устройства удержания якоря накопить значительное количество магнитной энергии $W_{\text{м}}$ возможно лишь с помощью подачи на обмотки повышенного в несколько раз (форсированного) напряжения. Но при этом существенно возрастут потери в магнитопроводе от вихревых токов и снизится коэффициент преобразования потребляемой двигателем энергии источника питания в механическую энергию якоря. В предлагаемом способе перераспределения энергии роль дросселя органично выполняет устройство удержания якоря, встроенное в конструкцию двигателя.

Включение обмотки удержания последовательно с обмоткой возбуждения позволит за счет роста интервала времени $t_0 - t_2$ (рис. 2) накопить в магнитных системах двигателя и устройства удержания необходимое количество магнитной энергии при сравнительно невысоком напряжении источника питания, не прибегая к режиму форсированного питания, вызывающему

значительный рост потерь от вихревых токов в магнитопроводах двигателя и устройства удержания якоря.

Таким образом, удалось увеличить механическую энергию рабочего хода за счет перераспределения значительной части

магнитной энергии, связанной с полями рассеяния импульсного ЛЭМД и устройства удержания якоря, которая, преобразуясь в теплоту, бесполезно теряется, в энергию магнитного поля рабочих зазоров двигателя.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Массад А.Х.** Электромеханическое преобразование энергии в линейных электромагнитных двигателях / А.Х. Массад, Г.Г. Угаров, И.М. Хусаинов // Новые технологии на железнодорожном транспорте и в образовании. Саратов: СГУ, 2001. С. 128-132.

2. **Мошкин В.И.** Сравнение магнитных циклов импульсного линейного электромагнитного двигателя с учетом мощности потерь в его обмотке. В.И. Мошкин // Известия Томского политехнического университета. Энергетика. 2012. Т. 321. № 4. С. 93-96.

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

4. Патент RU2398247, МПК G01V 1/04. Импульсный привод электромагнитного сейсмоисточника / В.В. Ивашин, В.П. Певчев, опубл. 27.08.2010, Бюл. №24.

5. **Певчев В.П.** О возможности повышения механической энергии короткохо-

дового импульсного электромагнитного двигателя сейсмоисточника / В.П. Певчев // Известия вузов. Электромеханика, 2010. № 3. С. 43-46.

6. **Певчев В.П.** Проектирование мощных короткоходовых импульсных электромагнитных двигателей / В.П. Певчев, В.В. Ивашин. Тольятти: Изд-во ТГУ, 2012. 142 с.

7. **Мошкин В.И.** Математическое моделирование импульсных линейных электромагнитных двигателей / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров, Д.Н. Шестаков, С.Ю. Помялов // Актуальные проблемы электронного приборостроения – АПЭП-2014: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2014. Т. 2. С. 348-352.

8. ELCUT. Моделирование электромагнитных, тепловых и упругих полей методом конечных элементов. Руководство пользователя. Версия 6.0. ООО «Тор». Санкт-Петербург. (<http://elcut.ru>).

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

Угаров Геннадий Григорьевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Усанов Константин Михайлович – доктор технических наук, профессор кафедры «Инженерная физика, электрооборудование и электротехнологии» Саратовского государственного аграрного университета имени Н.И. Вавилова

Vladimir I. Moshkin – Ph.D., Associate Professor, Head: Department of Energy and Metal Technologies, Kurgan State University

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

Konstantin M. Usanov – Dr.Sc., Professor, Department of Engineering Physics, Electrical Engineering and Technologies, N. Vavilov State Agrarian University of Saratov

Статья поступила в редакцию 07.06.16, принята к опубликованию 19.06.16

РЕЖИМЫ АККУМУЛИРОВАНИЯ МАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ В ИМПУЛЬСНЫХ ЛЭМД

В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров

MODES OF MAGNETIC ENERGY ACCUMULATION IN PULSE ENGINES

V.I. Moshkin, G.G. Ugarov

Рассмотрено влияние начального противодействующего усилия на энергетические и динамические показатели импульсных линейных электромагнитных двигателей для различных магнитных циклов.

Ключевые слова: линейные электромагнитные двигатели, магнитная энергия, энергия удара

The paper considers the effects of the initial effort on counteracting the energy and dynamic performance of pulsed electromagnetic linear motors for a variety of magnetic cycles.

Keywords: linear electromagnetic motor, magnetic energy, energy of an impact

Среди машин, реализующих импульсные технологии в машиностроении, горном деле, строительстве, сейсморазведке, большую перспективность использования имеют силовые электромагнитные импульсные системы на основе импульсных ЛЭМД [1, 2]. Для дальнейшего расширения области применения таких систем в традиционных и новых высокоэнергетических импульсных технологиях необходимо повышение силовых и энергетических показателей импульсных ЛЭМД, определяющих их экономичность, металлоёмкость, технологичность.

Одним из эффективных путей повышения энергии рабочего хода (удара) и КПД импульсного ЛЭМД является аккумуляция магнитной энергии в его рабочих воздушных зазорах на этапе трогания якоря при ограниченном перемещении якоря [1, 3].

Практическая реализация указанного способа повышения показателей состоит в приложении к якорю ЛЭМД на этапе трогания противодействующего усилия $F_n(x)$. Оно препятствует движению якоря до момента достижения током обмотки заданной величины, которая определяет за-

данное начальное противодействующее усилие – усилие удержания $F_{уд} = F_n(x_1)$ при $t \leq t_0$.

Исследуем влияние начального противодействующего усилия F_0 на некоторые энергетические и временные характеристики импульсных ЛЭМД. Для этого из уравнения баланса сил, действующих на якорь двигателя

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} = F_{\vartheta}(x) - F_n(x),$$

можно получить уравнение энергетического баланса [2, 3] при нулевой начальной скорости ($V_n=0$):

$$M \frac{V_k^2}{2} = \int_{x_1}^{x_2} F_{\vartheta}(x) dx - \int_{x_1}^{x_2} f_n(x) dx, \quad (1)$$

где M и $x = (x_2 - x_1)$ – масса и перемещение якоря; $F_{\vartheta}(x)$ – электромагнитное усилие; V_k – конечная скорость движения якоря; x_1 и x_2 – начальное и конечное значения перемещения.

Пусть усилие $F_n(x)$ изменяется скачком в соответствии с графиком рис. 1 и выражением (2):

$$F_{\text{п}}(x) = \begin{cases} F_{\text{уд}} & \text{при } t \leq t_0 \text{ и } x = x_1; \\ f_{\text{п}}(x) & \text{при } t > t_0 \text{ и } x \neq x_1. \end{cases} \quad (2)$$

Так как при движении якоря импульсного ЛЭМД в приводе машин ударного действия противодействующее усилие $F_{\text{п}}(x)$ обусловлено в основном возвратной пружиной, а электромагнитное тяговое

усилие $F_{\text{э}}(x)$ во много раз больше усилия $f_{\text{п}}(x)$, то примем $f_{\text{п}}(x) \approx 0$. Тогда выражение (1) упростится, а электромагнитное усилие $F_{\text{э}}(x)$ будет представлять собой динамическое тяговое усилие

$$M \frac{V_k^2}{2} = \int_{x_1}^{x_2} F_{\text{э}}(x) dx. \quad (3)$$

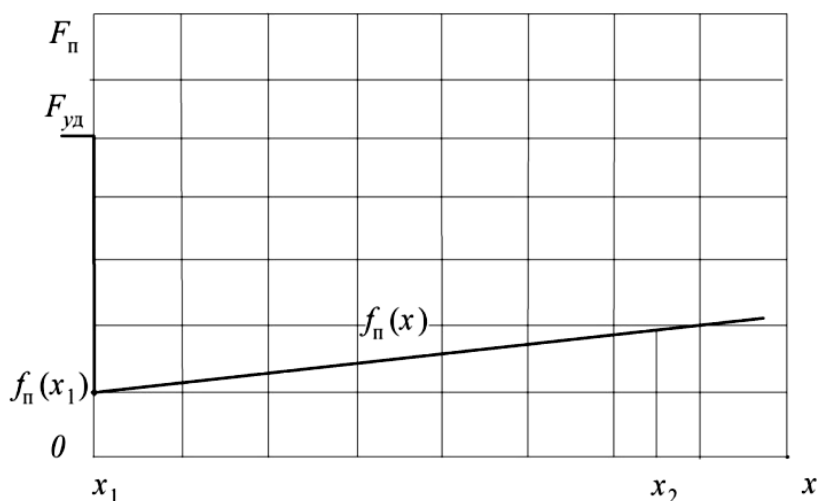


Рис. 1. Изменение противодействующего усилия по перемещению

Выразим при этих условиях правую часть (3) как механическую работу A при движении якоря на участке от x_1 до x_2 и преобразовании магнитной энергии двигателя. Для этого воспользуемся вебер-амперными магнитными характеристиками при насыщенной магнитной системе ЛЭМД за время движения его якоря. Поскольку в практически реализованных конструкциях импульсных ЛЭМД наиболее часто встречается случай, когда при максимальном (начальном) рабочем зазоре δ_1 магнитная система двигателя не насыщена, а при малом зазоре δ_2 — насыщена, то примем магнитные характеристики $\Psi(I)$ линейными в начале хода и нелинейными — в конце хода. Линии динамических переходов будем считать прямыми. Зависимость потокосцепления от тока для конечного зазора $\delta_2 = \delta_k = 0$ (кривую намагничивания магнитопровода) аппроксимируем двумя отрезками на рис. 2: на линейном участке — отрезком OB , на участке насыщения — отрезком BD . Аналогичную зави-

симость для начального зазора $\delta_1 = \delta_n$ аппроксимируем отрезком OA .

Линейный участок OB магнитной характеристики с индуктивностью L_k для конечного зазора δ_2 проведен под углом θ_2 (рис. 2) и характеризует конечное положение якоря, а также величину остаточной магнитной энергии, не преобразованной к концу перемещения в механическую энергию. В начальном положении якоря при зазоре δ_1 магнитная характеристика с индуктивностью L_n проведена под углом θ_1 и характеризует запас магнитной энергии в магнитной системе двигателя на этапе трогания якоря. Оба угла являются обобщёнными конструктивными параметрами импульсного ЛЭМД.

Так как импульсный ЛЭМД является двухступенчатым электромеханическим преобразователем электромагнитного типа циклического действия, то на ступени преобразования магнитной энергии в механическую его рабочая точка в координатах «потокосцепление — ток» описывает за

цикл энергопреобразования определенную траекторию – магнитный цикл.

В работе [3] установлены энергетические показатели элементарных магнитных циклов, линия динамического перехода которых при движении якоря представляет собой прямую, а магнитная система является ненасыщенной. В настоящей работе рассмотрим влияние начального противодействующего усилия на энергетические и динамические показатели импульсного ЛЭМД для двух магнитных циклов, обладающих наибольшей эффективностью электрохимического преобразования, рассмотренного в [3] с помощью критерия эффективности, установленного в работе [4]. Первый из циклов – цикл 0AB0 с возрастающим потокоцеплением ($\Psi_2 > \Psi_1$, $I_2 < I_1$) и второй цикл 0ACB0 ($\Psi_2 = \text{const}$,

$I_2 < I_1$) изображены на рис. 2. Вторым из рассматриваемых циклов возможно реализовать, используя предложенный нами способ нагружения импульсного ЛЭМД, снабженного устройством удержания якоря [5] или используя форсированный режим питания [6]. Выберем траектории движения рабочей точки в плоскости «потокоцепление – ток» на рис. 2 так, чтобы при движении рабочая точка не попадала в зону магнитной характеристики, соответствующей нулевому рабочему зазору и насыщенной магнитной системе двигателя. При такой постановке возможно использование для расчета энергетических характеристик насыщенной магнитной системы выражений, полученных ранее для ненасыщенной магнитной системы [3].

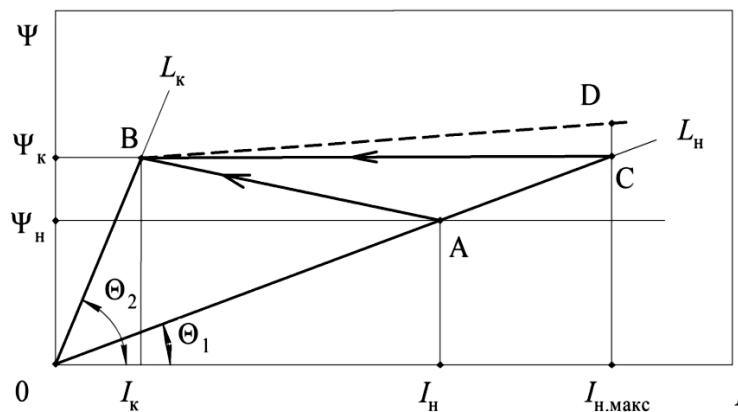


Рис. 2. Энергетические диаграммы импульсного ЛЭМД

Тогда согласно [3] запишем для первого и второго циклов, по которым работает импульсный ЛЭМД, выражения механической работы в виде энергии удара соответственно:

$$A_{y1} = 0,5 \Psi_k I_k k \left(\frac{m-1}{m} \right), \quad (4)$$

$$A_{y2} = 0,5 \Psi_k I_k k (m-1), \quad (5)$$

где $m = L_k / L_n$, $k = I_n / I_k$ – соответственно кратности изменения индуктивности и тока обмотки возбуждения за интервал движения якоря, причем $m \geq k > 1$.

Тогда из (3) с учетом (4) получим выражение конечной скорости V_{k1} движения якоря для первого цикла:

$$V_{k1} = \sqrt{\frac{\Psi_k I_k k (m-1)}{Mm}}. \quad (6)$$

Аналогично для второго цикла с учетом (5) получим

$$V_{k2} = \sqrt{\frac{\Psi_k I_k (m-1)}{M}}. \quad (7)$$

Согласно [7] начальные значения потокоцепления и тока, соответствующие моменту окончания движения якоря, представим для рассматриваемых циклов через конечную индуктивность L_k для ненасыщенной магнитной системы импульсного ЛЭМД:

$$\Psi_k = \sqrt{2F_{уд}xL_k}; \quad I_k = \sqrt{\frac{2F_{уд}x}{L_k}}; \quad (8)$$

С учетом (8) выражения (6) и (7) для конечных скоростей $V_{к1}$ и $V_{к2}$ примут вид

$$V_{к1} = \sqrt{\frac{2F_{уд}x(m-1)k}{Mm}}, \quad (9)$$

$$V_{к2} = \sqrt{\frac{2F_{уд}x(m-1)}{M}}. \quad (10)$$

При работе импульсного ЛЭМД по рассматриваемым магнитным циклам можно предположить, что тяговое усилие меняется незначительно, а якорь движется равноускоренно. Поэтому для них легко найти время движения на перемещении $x = x_2 - x_1$:

$$t_{дв1} = \frac{2x}{V_{к1}} = \sqrt{\frac{2xMm}{F_{уд}(m-1)k}}, \quad (11)$$

$$t_{дв2} = \frac{2x}{V_{к2}} = \sqrt{\frac{2xM}{F_{уд}(m-1)}}. \quad (12)$$

Соответственно найдём энергии удара $A_{уд1}$ и $A_{уд2}$ как кинетические энергии при конечной скорости:

$$A_{уд1} = \frac{MV_{к1}^2}{2} = \frac{F_{уд}x(m-1)k}{m}, \quad (13)$$

$$A_{уд2} = \frac{MV_{к2}^2}{2} = F_{уд}x(m-1). \quad (14)$$

Для анализа динамических и энергетических характеристик исследуемых магнитных циклов, по которым работает импульсный ЛЭМД, выразим полученные зависимости (11) – (14) в относительных единицах, приняв за базисные величины время свободного падения $T = \sqrt{2x/g}$ якоря массой M с высоты x и потенциальную энергию Mgx . Тогда получим для первого цикла относительное время движения $t_{дв1*}$ и энергию удара $A_{уд1}$ соответственно:

$$t_{дв1*} = \frac{t_{дв1}}{T} = \sqrt{\frac{m}{F_{уд*}(m-1)k}}, \quad (15)$$

$$A_{уд1*} = \frac{A_{уд1}}{Mgx} = \frac{F_{уд*}(m-1)k}{m}. \quad (16)$$

Для цикла $\Psi = \text{const}$:

$$t_{дв2*} = \frac{t_{дв2}}{T} = \sqrt{\frac{1}{F_{уд*}(m-1)}}, \quad (17)$$

$$A_{уд2*} = \frac{A_{уд2}}{Mgx} = F_{уд*}(m-1), \quad (19)$$

где $F_{уд*} = \frac{F_{уд}}{Mg}$ – относительное усилие

удержания якоря.

По выражениям (15 – 18) построим семейства характеристик $t_{дв*} = f(F_{уд*})$ и $A_{уд*} = f(F_{уд*})$ при неизменных режимных ($k = \text{const}$) и заданном конструктивном параметре $m = 5, 17$. Параметр $m = 5, 17$ соответствует начальному углу $\theta_1 = 28^\circ$ при конечном угле $\theta_2 = 70^\circ$. Отметим, что для первого магнитного цикла кратность изменения тока будет лежать в пределах $1 < k < 5, 17$. Характеристики представлены на рис. 3 и 4.

Их анализ показывает, что при увеличении удерживающего усилия $F_{уд*}$ время движения уменьшается, а энергия удара возрастает, причем в диапазоне изменения усилия удержания $F_{уд*}$ от 5 до 20 изменение времени движения довольно значительное (в 2-4 раза), тогда как при $F_{уд*} > 20$ оно мало меняется. Приближение режимного параметра k к кратности изменения индуктивности m вызывает сокращение времени движения за счет увеличения магнитной энергии в рабочих зазорах, преобразуемой в механическую работу. При этом доля магнитной энергии, запасаемая на этапе трогания, растет, в то время как доля магнитной энергии, запасаемая в процессе движения якоря, падает и стремится к нулю.

При кратности изменения тока $k = m$, что соответствует циклу $\Psi = \text{const}$, наблюдается самое быстрое движение якоря за счет наибольшего количества магнитной энергии, накопленной в рабочих зазорах импульсного ЛЭМД на этапе трогания. Наибольший прирост энергии удара при увеличении усилия $F_{уд*}$ наблюдается также при стремлении кратности тока к кратности изменения индуктивности.

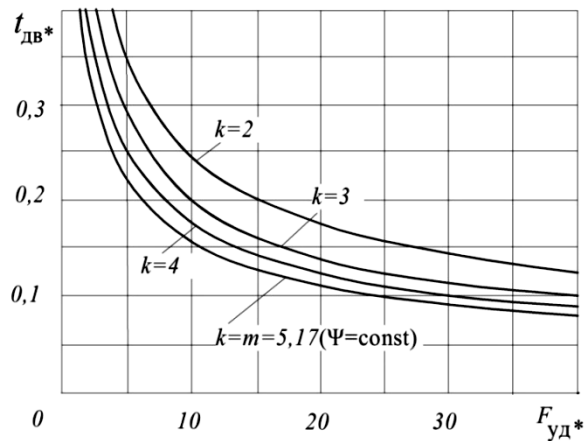


Рис. 3. Влияние усилия удержания $F_{уд}^*$ на время движения $t_{дв}^*$ при $m = 5,17$

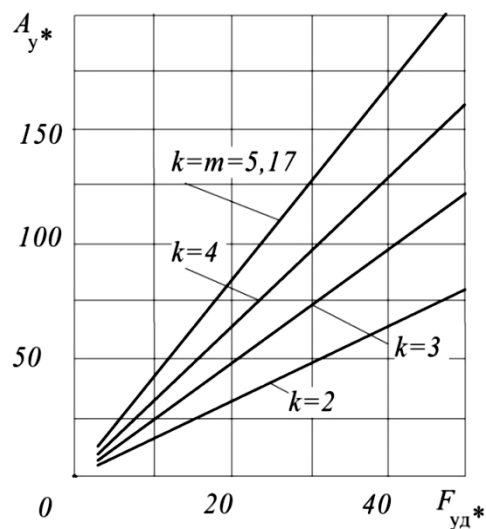


Рис. 4. Влияние усилия удержания $F_{уд}^*$ на энергию удара $A_{уд}^*$ при $m = 5,17$

Следует заметить, что снизить усилие удержания до нуля на практике невозможно из-за наличия трения в местах сочленения движущихся частей конструкции двигателя, а также из-за динамического усилия, возникающего при разгоне якоря. Экспериментальные исследования импуль-

сного ЛЭМД, например типа ПЭМ-0,8 с устройством удержания якоря показывают, что за счет применения устройства удержания якоря, дополняющего конструкцию двигателя, можно радикально улучшить как динамические, так и энергетические показатели двигателя [1; 5].

ЛИТЕРАТУРА

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

2. **Селезнев В.А.** Принципы повышения эффективности импульсных электромагнитных сейсмоисточников малой мощности для исследования малых глубин / В.А. Се-

лезнев, В.А. Живодровов, В.А. Селезнев, Г.Г. Угаров, К.М. Усанов // Приборы и системы разведочной геофизики. Саратов: 2003, №01(03). С. 28-29.

3. **Мошкин В.И.** Влияние режимных и конструктивных параметров линейных электромагнитных двигателей на эффективность электромеханического преобразо-

вания энергии / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2012. № 2 (66). Вып. 2. С. 124-129.

4. **Мошкин В.И.** Критерии эффективности преобразования магнитной энергии в линейном электромагнитном двигателе / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров, О.В. Вдовина // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2010. № 3 (47). Вып. 2. С. 71-76.

5. Патент РФ № 59342U1, МПК H02K 33/02. Линейный электромагнитный двигатель с удержанием якоря / В.И. Мошкин, К.М. Усанов, А.В. Волгин, В.А. Каргин;

заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Курганский государственный университет», № 2006127919/22; заявл. 31.07.2006; опубл. 10.12.2006. Бюл. № 34.

6. **Певчев В.П.** Проектирование мощных короткоходовых импульсных электромагнитных двигателей / В.П. Певчев, В.В. Ивашин. Тольятти: Изд-во ТГУ, 2012. 142 с.

7. **Тер-Акопов А.К.** Динамика быстродействующих электромагнитов / А.К. Тер-Акопов. М.-Л.: Энергия, 1965. 167 с.

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

Угаров Геннадий Григорьевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Vladimir I. Moshkin – Ph.D., Associate Professor, Head: Department of Energy and Metal Technologies, Kurgan State University

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

Статья поступила в редакцию 12.06.16, принята к опубликованию 19.06.16

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Редакция готова опубликовать сведения о ваших вузах и предприятиях, об их истории, научных и производственных успехах, планах на будущее. Объем публикации – одна страница текста с фотографиями.

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.9.047/048

УЛУЧШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ ТРУБОПРОВОДНОЙ АРМАТУРЫ В СВЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ

И.В. Злобина, Н.В. Бекренев

IMPROVING OPERATION CHARACTERISTICS OF MATERIALS FOR PIPELINE FITTINGS IN HIGH FREQUENCY ELECTROMAGNETIC FIELDS

I.V. Zlobina, N. V. Bekrenev

Исследовано изменение эксплуатационных характеристик уплотнительных и антифрикционных материалов трубопроводной арматуры, подвергнутых воздействию СВЧ электромагнитного поля малой удельной мощности 4-5 Вт/см³. Оценены размерный и массовый износ фторопластов и изменение податливости уплотнительной резины. Установлено, что обработка в СВЧ электромагнитном поле частотой 2450 МГц удельной мощностью 4-5 Вт/см³ в течение 4 минут обеспечивает снижение размерного и массового износа при контакте со стальным контртелом соответственно на 55 и 25%. После СВЧ обработки на аналогичном режиме податливость резины возрастает на 20-64 % в зависимости от степени деформации.

Ключевые слова: СВЧ электромагнитное поле, модифицирование, удельная мощность, время, размерный и массовый износ, деформация, нагружение, податливость

В современном машино- и агрегатостроении, а также в энергетике, например в системах транспортировки энергоносителей, значительный объем конструктивных элементов приходится на трубопроводную арматуру (переключатели, фитинги, краны,

The investigation concerns the changes in operation properties of the sealing and anti-friction materials for pipeline accessories subjected to the impact of the microwave electromagnetic field with low power rating at 4-5 W/cm³. The conducted estimations concern the size and mass wear of the polytetrafluorethylene, and changes in the pliability of the sealing rubber. It has been found that processing in the high frequency electromagnetic field at the frequency of 2450 MHz ensures the decrease in size and mass wear under the contact with the steel counterbody respectively by 55 and 25%. After the high frequency treatment at the similar mode, the pliability of rubber increases by 20-64% depending on the deformation rate.

Keywords: microwave field, modifying, power density, time, size and mass wear, deformation, loading, pliability

дроссели, клапаны, уплотнения и т.п.). Основным требованием к этим конструкциям является обеспечение долговечности сохранения герметичности соединений или систем регулирования расхода перемещающейся среды (жидкости или газа). При

этом в наиболее тяжелых условиях оказываются изделия типа кранов, клапанов и других регулирующих устройств, поскольку они должны обеспечить герметичность не только при воздействии внешних температурных и химических факторов, но и после определенного числа циклов нагружения при контактном взаимодействии с движущимися деталями при значительных давлениях. В трубопроводных газораспределительных системах контрольный уровень давления среды, при котором должна обеспечиваться герметичность, составляет 150 атм. при рабочем – до 100 атм.

Для снижения трения в контакте и обеспечения плотности прилегания деталей пары между ними устанавливают полимерные вставки, материал которых должен обладать высокой прочностью на сжатие, высокой износостойкостью и иметь минимальный коэффициент трения с контртелом. В настоящее время в наибольшей степени указанным требованиям удовлетворяют фторопласты различных марок. Однако отечественные марки имеют пониженный относительно зарубежных аналогов ресурс, что затрудняет решение задачи импортозамещения.

Другим распространенным материалом, применяемым в арматуре, являются резины, используемые как уплотнения, в том числе в клапанах. Однако резины подвержены влиянию временного фактора и воздействию внешней среды (температура, агрессивные жидкости), что приводит к повышению твердости, растрескиванию и, в конечном итоге, – к утере функциональных качеств.

Нами проведены исследования влияния финишной обработки фторопластов марок Ф-4 и «Флубон» в СВЧ электромагнитном поле малой удельной мощности на их износостойкость.

В экспериментах использовали специальную СВЧ технологическую установку с частотой генерируемого электромагнитного поля 2450 МГц, позволяющую в широких пределах регулировать подводимую к образцу мощность. В связи с нежелательностью перегрева готового изделия, что может вызвать температурные деформации,

обработку проводили в нетепловом режиме (при удельной мощности 4-5 Вт/см³) при времени воздействия 2, 4, 6 минут. Использовали образцы в виде цилиндров диаметром 20 мм и высотой 20 мм. В качестве контртела для испытаний использовали шарик из стали ШХ-15 твердостью HRC 50-55 диаметром 11 мм. Испытания образцов проводили на токарном станке ТВ-4 со специальной оснасткой (рис. 1), устанавливаемой в суппорте и обеспечивающей усилие прижима шарика к торцу образца 22,5 Н. Число оборотов шпинделя станка устанавливали равным 315 об/мин. Общее время обкатывания образца шариком составляло 40 минут. Таким образом, суммарное число нагружений образца составляло 12600. Каждые 10 минут образец снимали и осуществляли взвешивание на электронных весах HR200 с точностью до 0,0001 г и измерение глубины образованной шариком канавки на специальном устройстве (рис. 2) со стрелочным индикатором с ценой деления 0,01 мм. Предварительно осуществляли испытания контрольного образца.

После 10 минут обкатывания шариком на торце образца образовывался кольцевой след, с течением времени формирующийся в виде торообразной канавки.

Влияние времени СВЧ обработки и времени контактного воздействия контртела на изменение глубины канавки представлено графиком рис. 3.

Анализ полученных зависимостей позволяет сделать следующие выводы. Помещение фторопласта исследованной марки Ф4 в СВЧ электромагнитное поле существенно изменяет как кинетику износа, так и общую его величину.

Для контрольного образца характерны максимальный размерный износ и минимальный массовый в первые 10 минут воздействия контртела. В дальнейшем происходит уменьшение размерного износа и увеличение массового, а далее размерный и массовый износ циклически изменяются примерно в противофазе, постепенно снижаясь.



Рис. 1. Обработка образцов на станке ТВ-4



Рис. 2. Устройство измерения глубины канавки в образце

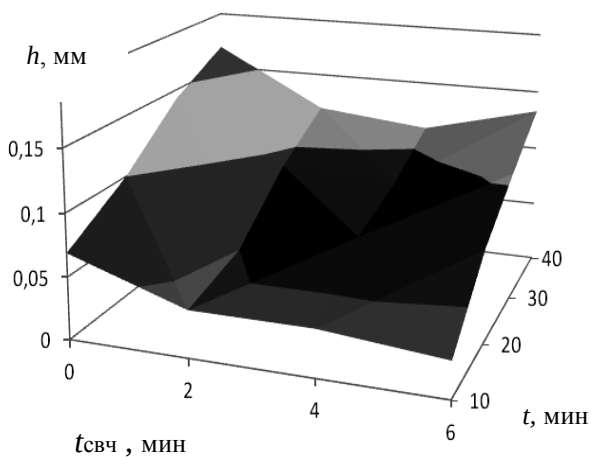


Рис. 3. Глубина канавки в зависимости от времени СВЧ воздействия и времени изнашивания

По-видимому, здесь играют роль пластичность материала и непрочность связей между элементами его структуры: сначала происходит значительная пластическая деформация с небольшим отделением материала (смятие микронеровностей рельефа и продавливание канавки), затем в результате смещения элементов структуры и заполнения пор последняя уплотняется и размерный износ замедляется, а массовый растет по причине отделения фрагментов, для которых превышен предел усталостной прочности. После снятия этого более прочного слоя повторяется первая стадия. В какой-то мере механизм износа можно считать сходным с износом пластичных металлов с об-

разованием перенаклепанного поверхностного слоя.

При малом времени СВЧ обработки закономерность размерного износа в целом сходна с описанной, но величины меньше почти в 2 раза за первые 10-20 минут изнашивания. За весь цикл размерный износ меньше на 41-42%. При времени обработки 4 минуты размерный и массовый износы снижаются соответственно на 55 и 25%. Очевидно, в этом случае обеспечивается оптимальное соотношение твердости и прочности материала образца. При дальнейшем увеличении времени СВЧ обработки, по-видимому, начинается охрупчивание материала, что сказывается на росте как размерного, так и массового износа.

Объяснить данные эффекты возможно с учетом известных [1, 2] и полученных нами ранее [3, 4] результатов исследований термического и нетеплового воздействия СВЧ электромагнитного поля на диэлектрические, в том числе композиционные, материалы.

Воздействие СВЧ электромагнитного поля интенсифицирует активность диполей обрабатываемого материала, ускоряет химические реакции и генерирует образование дополнительных связей на молекулярном уровне. При этом происходит сближение элементов структуры, уменьшение размеров пустот (пор) и повышение в целом однородности и изотропности свойств. С другой стороны, СВЧ электромагнитное

поле большой удельной мощности, или, напротив, малой, но при длительном воздействии вызывает дегидратацию материала с образованием микротрещин, которые могут привести к потере прочностных свойств и повышенному износу при контактном взаимодействии.

Таким образом, воздействие СВЧ электромагнитного поля на частоте 2450 МГц удельной мощностью 4-5 Вт/см³ в течение 3-4 минут позволяет увеличить износостойкость фторопласта Ф4 до 40-50%, что может обеспечить повышение долговечности подвижных элементов трубопроводной

арматуры и подобных технических систем машиностроения и обеспечит конкурентоспособность отечественной продукции данного назначения.

Испытания образцов из «Флубона» показали сходные результаты, но величина износа и эффект от СВЧ обработки несколько меньше (см. таблицу). Отличие заключается в ином составе и, как следствие, других физико-механических характеристиках, которые привели к различиям во взаимодействии с СВЧ электромагнитным полем.

Влияние обработки в СВЧ электромагнитном поле в течение 4 минут на массовый износ фторопластов при времени изнашивания 20 минут

Материал	Износ образца в состоянии поставки, г	Износ образца после СВЧ обработки, г	Изменение величины износа	
			абсолютное, г	относительное, %
Фторопласт Ф-4	0,1	0,0725	- 0,0275	- 27,5
Фторопласт «Флубон»	0,055	0,045	- 0,01	- 18,2

Образцы из резины подвергали воздействию СВЧ электромагнитного поля удельной мощностью 4-5 Вт/см³ в течение 2 и 4 минут. Контрольный образец и обработанные образцы исследовали на специальной установке с компьютерной обработкой сигналов тензометрического датчика, нагружаемого рычажным механизмом. Механизм воздействовал на образец конусом с углом при вершине 90° и радиусом округления 0,1 мм. Одновременно с нагружающим моментом определяли и соответствующую деформацию образца при помощи стрелочного индикатора с ценой деления 0,01 мм. Вычисляли податливость материала. По увеличению податливости делали вывод об изменении пластичности и, следовательно, герметизирующих свойств материала.

Установлено существенное – от 27 до 70% – увеличение податливости образца после воздействия СВЧ электромагнитного поля в зависимости от времени обработки. Графики нагружения образцов при дефор-

мации 2,5 мм представлены на рис. 4, зависимость податливости от времени СВЧ обработки – на рис. 5,

Механизм увеличения податливости, по-видимому, заключается в повышении пластичности каучуковой матрицы при воздействии СВЧ электромагнитного поля за счет увеличения подвижности межмолекулярных связей.

Для расширения сферы применения предложенного метода и разработки серийной технологии необходимы комплексные исследования физического механизма влияния СВЧ электромагнитного поля различного частотного диапазона на структуру фторопластов и резин различных марок с привлечением электронно-зондовой и атомно-силовой микроскопии, а также методов изучения диэлектрических свойств материалов.

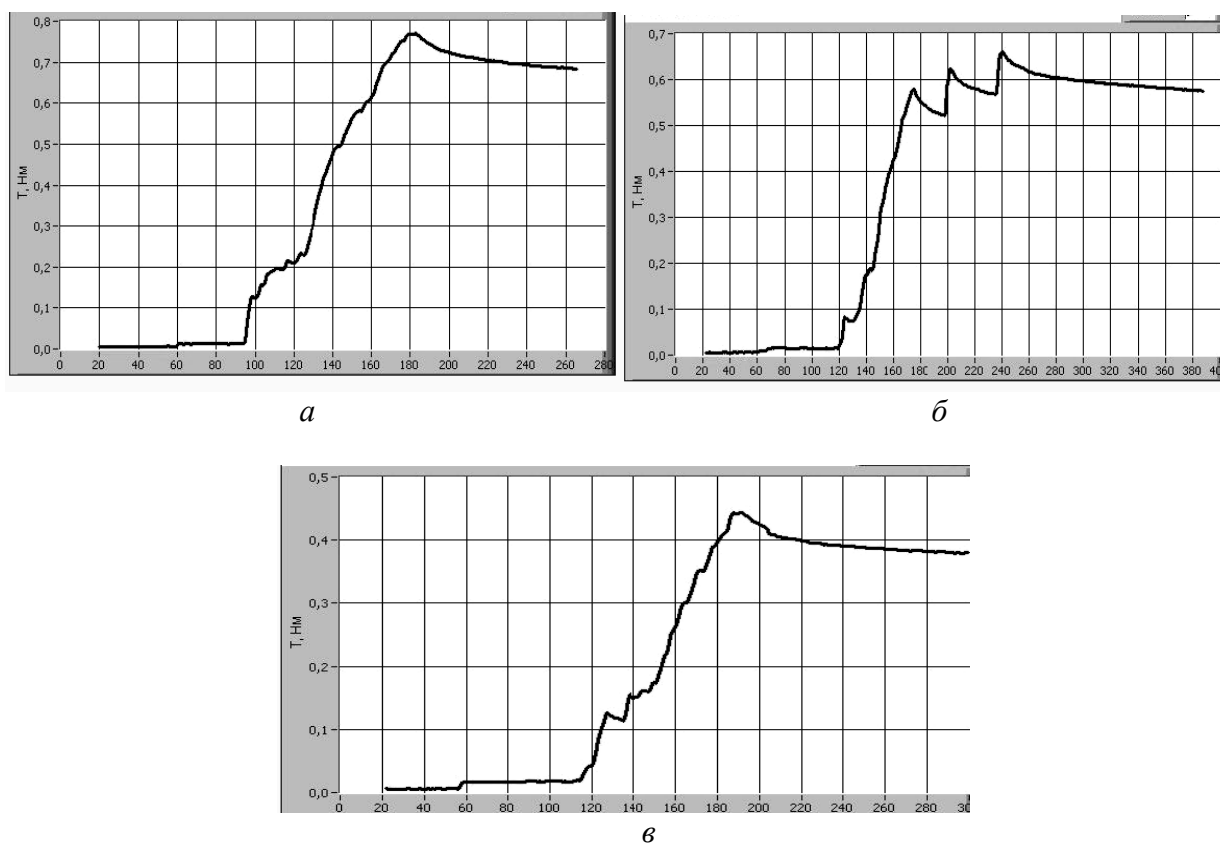


Рис. 4. Графики нагружения резиновых образцов с обеспечением деформации 2,5 мм (*a* – контрольный; *б* – после СВЧ обработки в течение 2 мин; *в* – после СВЧ обработки в течение 4 мин)

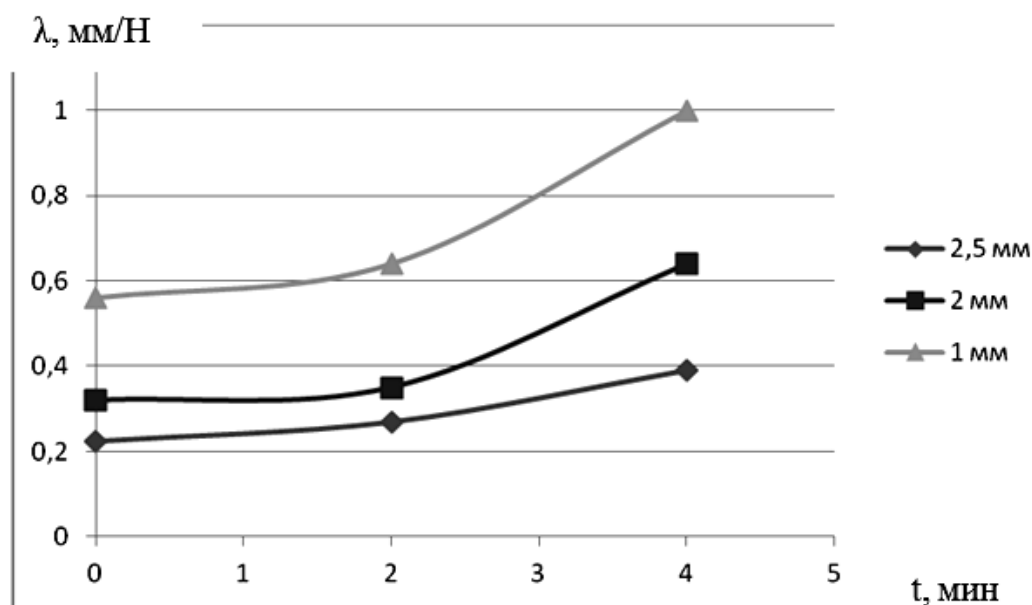


Рис. 5. Изменение податливости образца из резины в зависимости от времени воздействия СВЧ электромагнитного поля и деформации образца

ЛИТЕРАТУРА

1. **Архангельский Ю.С.** Справочная книга по СВЧ-электротермии: / Ю. С. Архангельский. Саратов: Научная книга, 2011. 560 с.

2. **Калганова С.Г.** Электротехнология нетепловой модификации полимерных материалов в СВЧ электромагнитном поле: дис. ... д-ра техн. наук / С.Г. Калганова. Саратов, 2009.

3. **Злобина И.В.** Повышение равномерности термической обработки композиций органических материалов СВЧ излучением / И.В. Злобина, В.А. Коломейцев, Н.В. Бек-

ренев // Научное обозрение, 2014. № 12 (1). С. 80-83.

4. **Злобина И.В.** Применение СВЧ излучения для термической обработки диэлектрических органических материалов с неоднородной структурой и составом / И.В. Злобина, В.А. Коломейцев // Актуальные проблемы электронного приборостроения – АПЭП-2014: материалы 11-й Междунар. науч.-техн. конф. Саратов, 2014. С. 235-241.

Злобина Ирина Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техническая механика и детали машин» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Irina V. Zlobina – PhD, Associate Professor, Department of Technical Mechanics and Machine Parts, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Бекренев Николай Валерьевич – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Техническая механика и детали машин» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Nikolay V. Bekrenev – Dr. Sc., Professor, Head: Department of Technical Mechanics and Machine Parts, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 12.06.16, принята к опубликованию 19.06.16

К СВЕДЕНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

В журнале можно опубликовать материалы научно-технических конференций, круглых столов, выставок по тематическим направлениям журнала.

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

УДК 520.8.056

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ СФОКУСИРОВАННЫХ АНТЕНН В ЗАДАЧАХ СВЧ ТЕХНОЛОГИЙ

К.Н. Халикова, О.В. Потапова

POWER INDICATORS OF THE FOCUSED ANTENNAS IN PROBLEMS OF MICROWAVE TECHNOLOGIES

K.N. Khalikova, O.V. Potapova

Рассматриваются энергетические показатели сфокусированных антенн в задачах СВЧ технологий, влияние на коэффициент направленного действия параметров исследуемой среды. Представлены основные полученные закономерности.

Ключевые слова: коэффициент направленного действия, радиотермометрия, подповерхностное радиолокационное зондирование

In this paper the power indicators of the focused antennas in problems of microwave technologies are analyzed. The influence of parameters of the studied medium on coefficient of the directed action is considered.

Keywords: coefficient of the directed action, radiothermometry, subsurface radar probing.

Существует большое число технических приложений, в которых целесообразно использовать сфокусированные антенны [1, 2]. В подавляющем числе таких приложений излучение (или прием радиоволнового излучения) происходит в среде, имеющую значительную величину коэффициента затухания, а область фокусировки находится на небольших расстояниях относительно излучающей системы (в области ближнего излученного поля). Будем называть антенны, использующие принцип фокусировки в зоне ближнего излученного поля, сфокусированными антеннами.

К числу приложений, в которых перспективно использовать сфокусированные антенны, помимо технологий СВЧ обработки различных материалов можно отнести подповерхностную радиолокацию, ра-

диоволновую диагностику, медицинские приложения (микроволновую радиотермографию, гипертермию и др.).

Антенны, сфокусированные в зоне ближнего излученного поля, позволяют осуществлять избирательное электромагнитное воздействие (нагрев, например), точнее осуществлять пространственную локализацию обнаруженных аномалий, улучшить пространственное разрешение, а также увеличить контрастность наблюдаемых объектов [3]. Достижимый эффект всецело определяется способностью антенн осуществить направленное излучение или прием. Поэтому определенные надежды на улучшение указанных показателей аппаратуры в целом связывают с показателями, характеризующими направленные свойства сфокусированных антенн, одним из важнейших среди которых является ко-

эффицент направленного действия (КНД).

В работе [1] введено обобщенное понятие коэффициента направленного действия апертурных антенн в однородном пространстве как отношение квадрата модуля напряженности электрического поля в точке фокусировки (x_0, y_0, z_0) , создаваемого сфокусированной апертурой, к аналогичному значению, соответствующему излучению идеального изотропного излучателя, расположенного в точке апертуры, ближайшей к точке фокусировки, при условии равенства мощностей излучения сфокусированной и ненаправленной антенн:

$$КНД_{\text{фок}}(x_0, y_0, z_0) = \frac{|E(x_0, y_0, z_0)|^2}{|E_{\text{ненапр}}(z_0)|^2}$$

где $E(x_0, y_0, z_0)$ – напряженность электрического поля в точке фокусировки, $E_{\text{ненапр}}(z_0)$ – напряженность электромагнитного поля в точке фокусировки, создаваемая ненаправленным излучателем.

Это определение остается справедливым как для области ближнего излученного поля, так и для дальней зоны, и может быть расширено для случая неоднородной среды. В этой же работе, а также в работах [2, 4, 5] были установлены основные закономерности, описывающие поведение КНД апертур, сфокусированных в зону ближнего излученного поля.

Однако упомянутые выше результаты были получены для модельных ситуаций, соответствующих апертурам, сфокусированным в среде со значениями электрических параметров, соответствующих лишь по порядку величины реальным приложениям. Из них следует наличие нетривиальных зависимостей величины КНД от электрических размеров апертуры, глубины расположения точки фокусировки, а также от потерь в среде. Более того, показано, что при значительных потерях происходит деградация эффекта фокусировки.

Выясним и проанализируем закономерности, определяющие значения коэф-

фициента направленного действия, в том числе предельно достижимых, для случаев конкретных приложений. В качестве двух диаметрально противоположных случаев по величинам используемых апертур антенн, по глубине расположения точки фокусировки и значениям потерь в среде, рассмотрим радиотермометрию и наземное радиоволновое подповерхностное зондирование.

Характерные особенности рассматриваемых СВЧ технологий.

Радиотермометрия относится к числу современных и весьма перспективных методов диагностики ряда патологий [3, 6]. Измерения собственного радиоизлучения человека в микроволновом диапазоне позволяют выявлять температурные аномалии на глубине нескольких сантиметров, что весьма интересно с медицинской точки зрения, так как тепловые изменения зачастую предшествуют функциональным.

В силу специфики области применения апертуры в радиотермометрии не могут достигать больших размеров, глубина расположения точки фокусировки также составляет несколько сантиметров. Эффективность использования подобных малогабаритных сфокусированных антенн показана в работе [5]. Биологические ткани на частотах, используемых в радиотермометрии, представляют собой среды со значительным затуханием [7, 8]. Для определения всего диапазона достижимых значений КНД нами были рассмотрены ткани, имеющие минимальное, максимальное и среднее значения коэффициента затухания среди биологических сред. На частоте 1000 МГц параметры этих сред соответственно были равны: кортикальная кость $\alpha = 8,26$ 1/м, $\beta = 78,84$ 1/м, белое вещество мозга $\alpha = 19,94$ 1/м, $\beta = 130,84$ 1/м и спинномозговая жидкость $\alpha = 53,92$ 1/м, $\beta = 183,1$ 1/м.

Подповерхностное радиолокационное зондирование позволяет решить большое число задач: измерить толщину ледового покрова, исследовать структуру торфяных месторождений, определить уровень грун-

товых вод, осуществить поиск подземных сооружений и коммуникаций, закарстованных зон и т.д. Весьма специфическим вопросом, связанным с задачами подповерхностного распознавания, является обнаружение малоразмерных объектов. Имеющийся опыт показывает [9], что радиолокационный метод наиболее перспективен до глубин порядка нескольких десятков метров, размеры используемых антенн также составляют единицы метров. Параметры сред, в которые при подповерхностной радиолокации осуществляется излучение, больше всего зависят не от качественного состава грунта, а от его влажности. В диапазоне используемых в данной аппаратуре частот эти среды имеют умеренную величину коэффициента затухания. В работе рассматривались суглинки сухой и суглинки влажный. На частоте 100 МГц параметры этих сред были равны: суглинки сухой $\alpha=0,013$ 1/м, $\beta=3,3$ 1/м, суглинки влажный $\alpha=0,91$ 1/м, $\beta=9,2$ 1/м.

При проведении исследований рассчитывалось значение КНД, согласно выражению (1) для квадратной апертуры, сфокусированной в однородную поглощающую среду. Размеры апертуры и глубина расположения точки фокусировки, а также параметры тканей выбирались соответствующими конкретной области приме-

ния. В качестве элементарного излучателя рассматривался изотропный излучатель.

1. Эффективность фокусировки

Как установлено в работе [10], в средах без потерь при больших относительно длины волны линейных размерах апертуры эффект фокусировки наблюдается как в поперечном (параллельном апертуре), так и в продольном (перпендикулярном апертуре) направлениях. Однако размеры апертуры, глубина расположения точки фокусировки и параметры конкретной среды накладывают некоторые ограничения на возможность фокусировки.

При увеличении затухания в среде может происходить деградация фокусирующих свойств [2]. Рассматривалось электромагнитное поле плоской квадратной антенны для конкретных задач СВЧ технологий в поперечном (параллельном апертуре) и продольном (перпендикулярном апертуре) направлениях. Оценку эффективности фокусировки целесообразнее проводить сравнением сфокусированного возбуждения электромагнитного поля с синфазным возбуждением.

Картины распределения поля при подповерхностном зондировании представлены на рис. 1-4, где кривая 1 – сфокусированное возбуждение, кривая 2 – синфазное возбуждение. Электрическая длина антенны L при этом составляла 2 м.

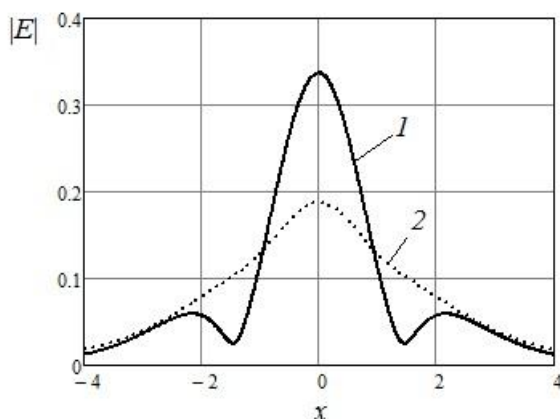


Рис. 1. Распределение электромагнитного поля в поперечном направлении (среда – суглинки сухой)

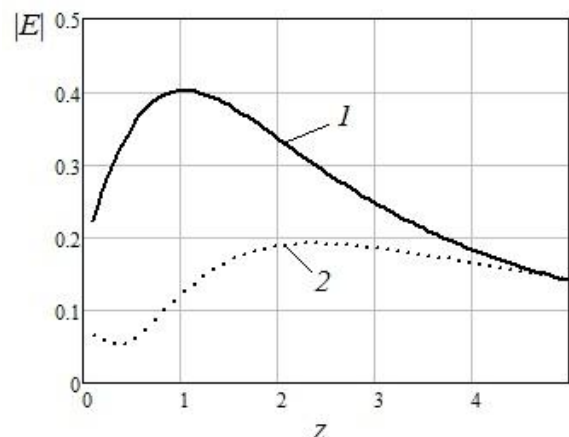


Рис. 2. Распределение электромагнитного поля в продольном направлении (среда – суглинки сухой)

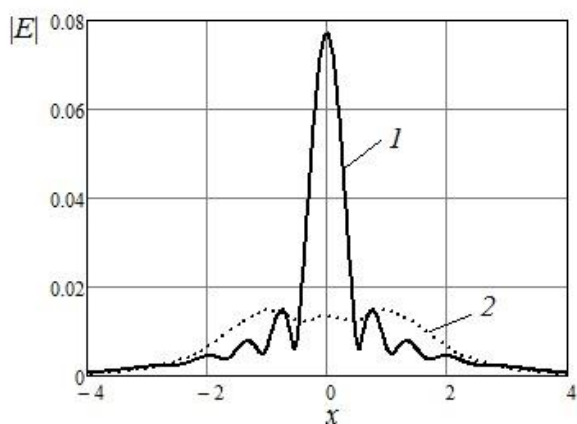


Рис. 3. Распределение электромагнитного поля в поперечном направлении (среда – суглинок влажный)

При оценке параметров сфокусированных полей, создаваемых плоскими квадратными апертурами, в задачах подповерхностного зондирования можно сделать вывод, что использование сфокусированных апертур всегда дает выигрыш как в поперечном, так и в продольном направлениях по сравнению с использованием синфазных апертур. Это объясняется тем, что при реализуемых параметрах (размер апертуры и значение затуханий), характерных для подповерхностного зондирования, синфазное возбуждение приводит к отсутствию явно выраженного максимума, а

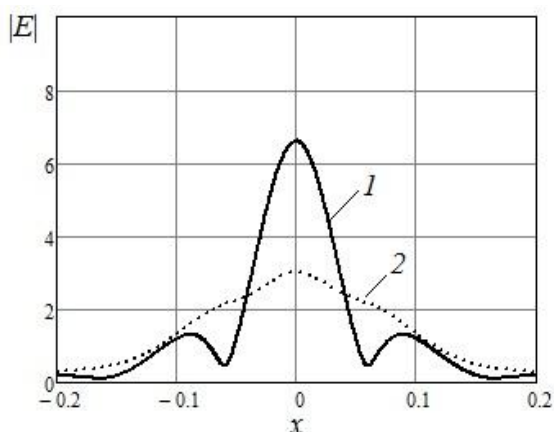


Рис. 5. Распределение электромагнитного поля в поперечном направлении (среда – кортикальная кость)

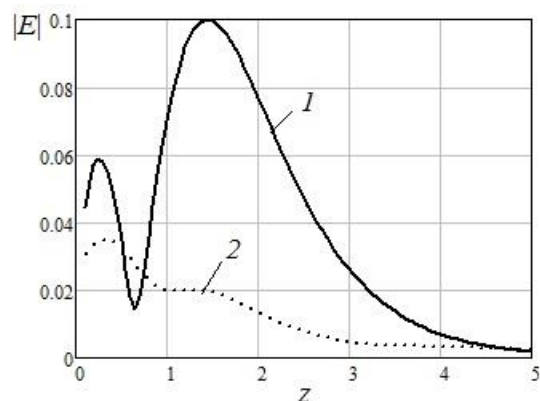


Рис. 4. Распределение электромагнитного поля в продольном направлении (среда – суглинок влажный)

также к снижению интенсивности излучения за счет его распределения в значительной области.

Рассмотрение эффективности фокусировки в задачах радиотермометрии проводилось для двух сред, имеющих относительно минимальные и максимальные значения затухания. Картины распределения поля при радиотермометрии представлены на рис. 5-8, где кривая 1 – сфокусированное возбуждение, кривая 2 – синфазное возбуждение. Размер сторон апертуры при этом составляет 0,1 м.

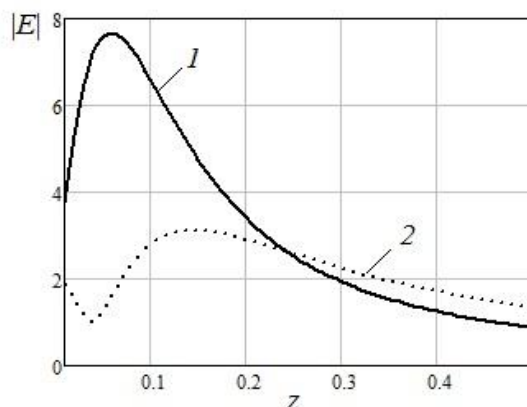


Рис. 6. Распределение электромагнитного поля в продольном направлении (среда – кортикальная кость)

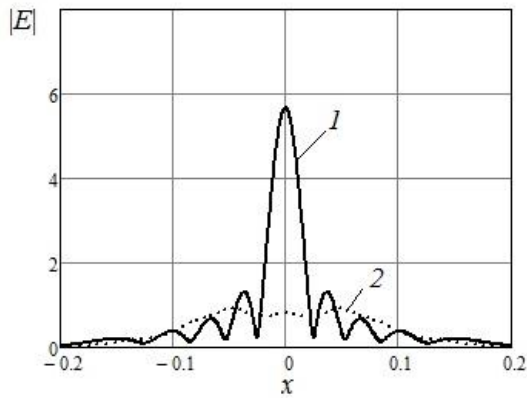


Рис. 7. Распределение электромагнитного поля в поперечном направлении (среда – спинномозговая жидкость)

Эффективность фокусировки как в параллельном, так и в перпендикулярном апертуре направлениях наблюдается и в задачах радиотермометрии, причем даже более выражено, чем для подповерхностного зондирования. Обусловлено это тем, что значения коэффициента затуханий α и коэффициента фазы β , соответствующие реальным биологическим тканям, значительно больше, чем в задачах радиолокации, что приводит к увеличению электрической длины антенны за счет уменьшения длины волны.

2. Зависимость КНД от глубины расположения точки фокусировки

В работах [1, 2, 4] установлено, что для антенны с равномерным амплитудным распределением фокусировка в зоне ближнего излучаемого поля всегда характеризуется ограниченным значением КНД_{фок}, которое при удалении точки фокусировки увеличивается до значения, соответ-

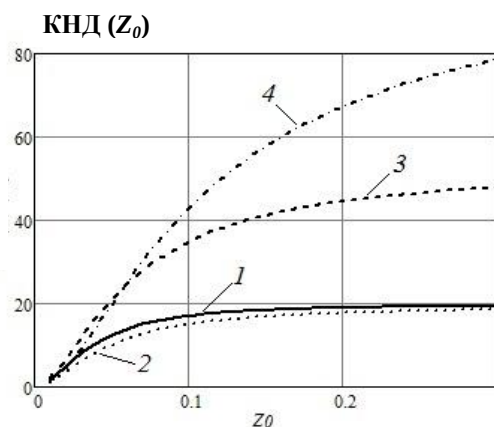


Рис. 9. Радиотермометрия

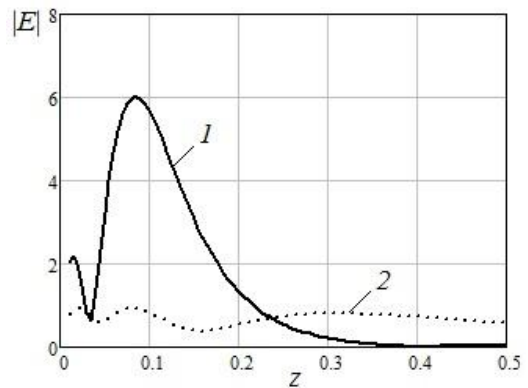


Рис. 8. Распределение электромагнитного поля в продольном направлении (среда – спинномозговая жидкость)

ствующего КНД в дальней зоне вне зависимости от наличия затухания в среде.

Зависимость КНД от глубины расположения точки фокусировки ($z_0=0,01-0,3$ м) при размере аперттуры, близком к максимально возможному в радиотермометрии $L=0,1$ м и различных биологических тканях, представлена на рис. 9 (кривая 1 – среда без потерь, кривая 2 – кортикальная кость, кривая 3 – белое вещество мозга, кривая 4 – спинномозговая жидкость). На рис. 10 представлена аналогичная зависимость, но полученная для случая подповерхностной радиолокации. Размер аперттуры выбирался равным $L=2$ м, глубина фокусировки изменялась в пределах $z_0=0,01-1$ м (кривая 1 – среда без потерь, кривая 2 – суглинок сухой, кривая 3 – суглинок влажный).

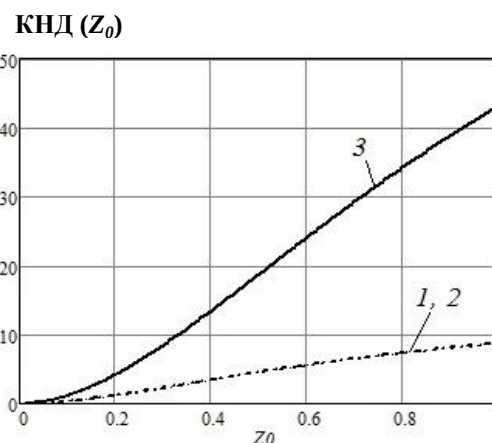


Рис. 10. Подповерхностная радиолокация

Тенденция увеличения $KНД_{\text{фок}}$ при удалении точки фокусировки, установленная ранее, остается справедливой. Однако характерными для СВЧ приложений в этих зависимостях являются большие значения КНД в средах с большими потерями. Это объясняется уменьшением значения длины волны в среде при увеличении потерь, а следовательно, постоянный физический размер апертуры будет соответствовать апертуре с большей электрической длиной.

3. Существование оптимального размера апертуры

Для линейных сфокусированных антенн при фиксированном положении точки фокусировки существует оптимальный размер апертуры $L_{\text{опт}}/\lambda$, после которого КНД начинает снижаться. Для плоских ан-

тенн факт существования оптимального размера апертуры справедлив только при наличии потерь в среде. При отсутствии потерь увеличение апертуры больше оптимального размера практически не увеличивает КНД [1, 2, 4].

Зависимости КНД от размера апертуры L при фиксированном положении точки фокусировки показаны на рис. 11-12. Здесь очевидно существование оптимального размера апертуры, величина которого напрямую определяется величиной затухания среды. Увеличение затухания приводит к уменьшению оптимального размера апертуры, для среды без потерь оптимальный размер апертуры не определяется, однако увеличение размера антенны больше определенной величины практически не способно повысить КНД.

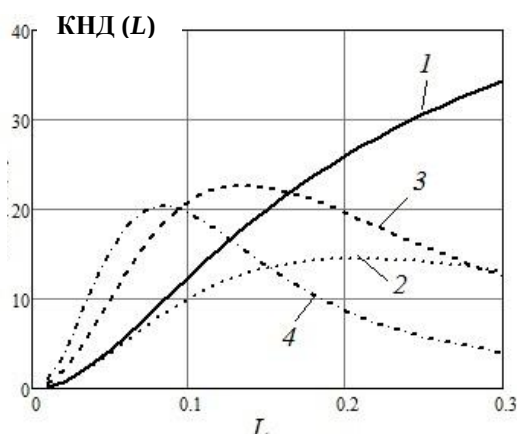


Рис. 11. Радиотермометрия, $z_0=0,05$ м, $L=0,01-0,3$ м (кривая 1 – среда без потерь, кривая 2 – кортикальная кость, кривая 3 – белое вещество мозга, кривая 4 – спинномозговая жидкость)

4. Оптимальное амплитудное распределение

Ранее в [1, 2] было установлено, что для каждого положения точки фокусировки существует оптимальное амплитудное распределение, которое позволяет максимизировать значение КНД в зоне ближнего излучаемого поля вне зависимости от направленных свойств и поляризации элементарного источника. Величина увеличения КНД зависит от расстояния, на кото-

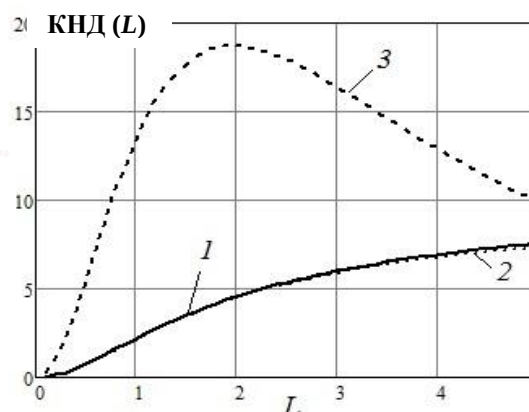


Рис. 12. Подповерхностная радиолокация $z_0=0,5$ м, $L=0,1-5$ м (кривая 1 – среда без потерь, кривая 2 – суглинок сухой, кривая 3 – суглинок влажный)

ром от антенны расположена точка фокусировки, и от значения потерь в среде.

На рис. 13-16 представлены зависимости КНД от глубины расположения точки фокусировки и размера апертуры для равномерного и оптимального амплитудного распределений. Рис. 13, 14 соответствуют условиям радиотермометрии (кривая 1 – равномерное амплитудное распределение, кривая 2 – оптимальное амплитудное распределение, среда – кортикальная кость; кривая 3 – равномерное амплитудное рас-

пределение, кривая 4 – оптимальное амплитудное распределение, среда – спинномозговая жидкость), рис. 15, 16 – подповерхностной радиолокации (кривая 1 – равномерное амплитудное распределение, кривая 2 – оптимальное амплитудное рас-

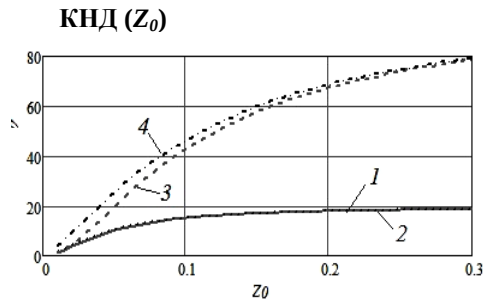


Рис. 13. Радиотермометрия ($z_0=0,01..0,3$ м, $L=0,1$ м)

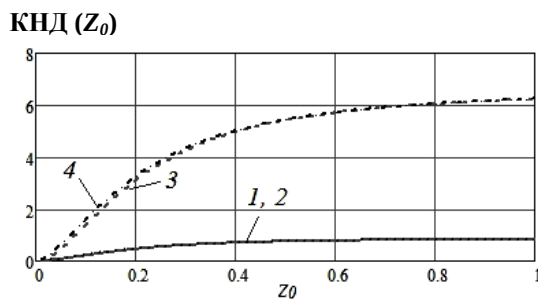


Рис. 15. Подповерхностная радиолокация ($z_0=0,01..1$ м, $L=0,5$ м)

Очевидно, что различия в значениях КНД для равномерного и оптимального амплитудных распределений невелики, особенно при значительном удалении точки фокусировки от апертуры. Однако использование оптимального амплитудного распределения позволяет избежать снижения КНД при неудачном выборе размеров апертуры, добиться некоторого его роста при увеличении размера апертуры.

5. *Снижение КНД при перемещении точки фокусировки вдоль апертуры*

Перемещение точки фокусировки вдоль

пределение, среда – суглинок сухой; кривая 3 – равномерное амплитудное распределение, кривая 4 – оптимальное амплитудное распределение, среда – суглинок влажный).

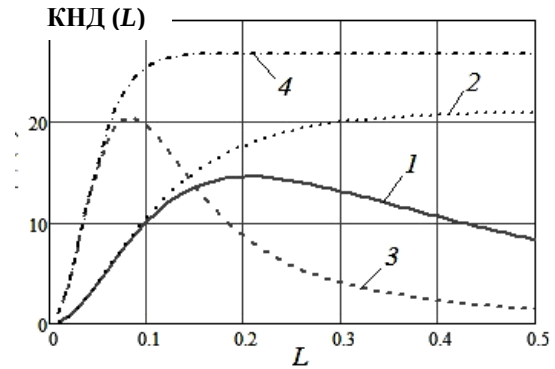


Рис. 14. Радиотермометрия ($z_0=0,5$ м, $L=0,01-0,5$ м)

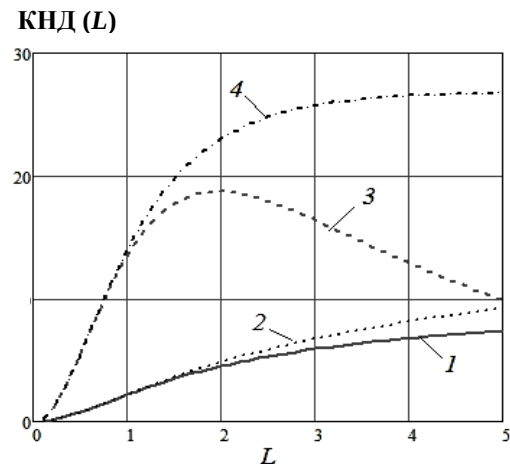


Рис. 16. Подповерхностная радиолокация ($z_0=0,5$ м, $L=0,01..5$ м)

апертуры приводит к снижению КНД независимо от величины потерь в среде, вида амплитудного распределения и глубины расположения точки фокусировки [1, 2, 4]. Аналогичная картина будет наблюдаться и в условиях радиотермометрии (кривая 1 – среда без потерь, кривая 2 – кортикальная кость, кривая 3 – белое вещество мозга, кривая 4 – спинномозговая жидкость), и подповерхностной радиолокации (кривая 1 – среда без потерь, кривая 2 – суглинок сухой, кривая 3 – суглинок влажный) (рис. 17, 18).

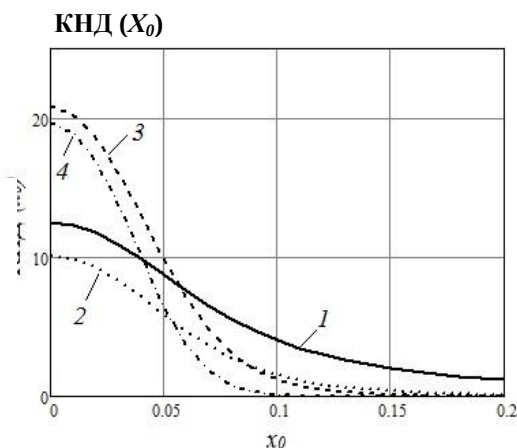


Рис. 17. Радиотермометрия ($z_0=0,05$ м, $L=0,1$ м)

Из приведенных зависимостей видно, что увеличение затухания среды приводит к более резкому снижению КНД.

Практические рекомендации

Проведенные исследования позволили сформулировать рекомендации для практического использования антенн, сфокусированных в зону ближнего поля.

При равномерном распределении существует оптимальный размер апертуры, позволяющий максимизировать энергетические показатели сфокусированных антенн. С увеличением затухания в среде оптимальный размер апертуры уменьшается. Кроме того, значение оптимального размера апертуры будет зависеть и от глубины расположения точки фокусировки. С уве-

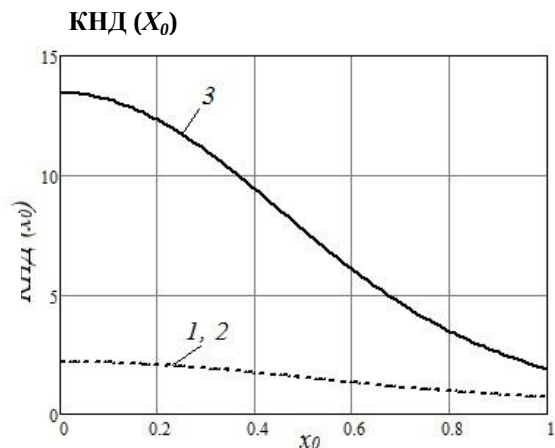


Рис. 18. Подповерхностная радиолокация ($z_0=0,5$ м, $L=1$ м)

личением глубины значение оптимального размера апертуры увеличивается.

Использование оптимального амплитудного распределения в СВЧ технологиях не приводит к существенному увеличению энергетических показателей сфокусированных антенн. Использование оптимального амплитудного распределения позволяет избежать снижения КНД при неудачном выборе размеров апертуры.

Для достижения максимального значения КНД сфокусированную антенну необходимо размещать симметрично относительно точки фокусировки. Чем больше значения коэффициента затухания среды, тем строже должна выполняться эта рекомендация.

ЛИТЕРАТУРА

1. Седельников Ю.Е. Коэффициент направленного действия апертурных антенн, сфокусированных в зоне ближнего излученного поля / Ю.Е. Седельников, О.В. Потапова // Радиотехника. 2015. № 7. С. 118-123.

2. Седельников Ю.Е. Антенны, сфокусированные в зоне ближнего излученного поля. Основы теории и технические приложения / Ю.Е. Седельников, Н.А. Тестоедов, Д.А. Веденькин и др. Красноярск: Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т, 2015. 309 с.

3. Кубланов В.С. Совершенствование характеристик СВЧ-радиотермографов в медицинских задачах / В.С. Кубланов, О.В. Потапова, Ю.Е. Седельников и др. // Радиоэлектроника. 2012. № 4. С. 1-27.

4. Потапова О.В. Коэффициент направленного действия плоской сфокусированной антенны в зоне ближнего излучаемого поля / О.В. Потапова, К.Н. Халикова // Физика и технические приложения волновых процессов: материалы XIII Междунар. науч.-техн. конф. Казань: ООО «Новое знание», 2015.

5. **Седельников Ю.Е.** Малогабаритные сфокусированные антенны для задач СВЧ технологий / Ю.Е. Седельников, О.В. Потапова, К.Н. Халикова // Вопросы электротехнологии. 2015. № 3 (8). С. 37-41.

6. **Asimakis N.P., Karanasiou I.S. and Uzunoglu N.K.** Non-invasive microwave radiometric system for intracranial applications: a study using the conformal L-notch microstrip patch antenna // Progress in Electromagnetic Research. Vol. 117 / 2011. PP. 83-101.

7. **Gabriel C., Gabriel S. and Corthout E.** The dielectric properties of biological tissues: I. Literature survey // UK. Phys. Med. Biol. № 41. 1996.

8. **Gabriel S. Law R.W. and Gabriel C.** The dielectric properties of biological tissues: II. Measurements in the frequency range 10 Hz to 20 GHz // UK. Phys. Med. Biol. №41. 1996.

9. **Финкельштейн М.И.** Подповерхностная радиолокация / М.И. Финкельштейн, В.И. Карпукhin и др. М.: Радио и связь, 1994. 216 с.

10. **Низамутдинов Р.Р.** Исследование характеристик линейных сфокусированных антенн для радиоволновых технологических и диагностических устройств: дис. ... канд. техн. наук / Р.Р. Низамутдинов. Казань, 2011. 155 с.

Потапова Ольга Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиоэлектронные и телекоммуникационные системы» Казанского научно-исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева

Халикова Ксения Наильевна – аспирант кафедры «Радиоэлектронные и телекоммуникационные системы» Казанского научно-исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева

Olga V. Potapova – Ph.D, Associate Professor, Department of Electronics and Telecommunication Systems, A.N. Tupolev National Research Technical University of Kazan, 89027110326, potapova_olga@bk.ru

Ksenia N. Khalikova – Postgraduate, Department of Electronics and Telecommunication Systems, A.N. Tupolev National Research Technical University of Kazan, 89047689159, fogginess1963@mail.ru

Статья поступила в редакцию 21.05.16, принята к опубликованию 19.06.16

СОБСТВЕННЫЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ВОЛНОВОДА С ДВУХСЛОЙНЫМ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ЗАПОЛНЕНИЕМ

Д.А. Баринов, А.А. Железняк, В.А. Коломейцев, М.А. Лукьянов

INHERENT ELECTRODYNAMIC PARAMETERS OF THE RECTANGULAR WAVEGUIDE WITH A TWO-LAYER DIELECTRIC FILLING

D.A. Barinov, A.A. Zheleznyak, V.A. Kolomeytsev, M.A. Lukyanov

На основе аналитического решения внутренней краевой задачи электродинамики проведен анализ диапазонных свойств собственных электродинамических параметров и структуры электромагнитного (ЭМ) поля прямоугольного волновода с двухслойным диэлектрическим заполнением. Установлены необходимые и достаточные условия получения аналитического решения в виде суперпозиции ортогональных типов волн без возникновения гибридных типов. Полученное аналитическое решение позволяет определить не только распределение электрического поля в объеме диэлектрической пластины, но и пути достижения однородной плотности тепловых источников в заполняющем волновод материале.

Ключевые слова: внутренняя краевая задача электродинамики, волновые уравнения Гельмгольца, критические длины волн, дисперсионное уравнение, граничные и начальные условия, уравнение непрерывности, абсолютная и относительная диэлектрические проницаемости среды, векторы напряженности электрического и магнитного поля, метод частичных областей

Данная работа посвящена исследованию диапазонных свойств собственных электродинамических параметров прямоугольного волновода (ПрВ) с двухслойным

The analysis of the band properties of the inherent electrodynamic parameters and structure of electromagnetic field of the rectangular waveguide with a two-layer dielectric filling is based on the analytical solution to the internal regional problem of electrodynamics. The required and sufficient conditions are established for receiving the analytical solution in the form of the superposition of orthogonal wave types without emergence of the hybrid wave types, which are based on principles of electrodynamics that implies the principle of polarizing duality, and the principle of superposition and orthogonality. The received analytical solution will allow not only to define distribution of the electric field in volume of the dielectric plate, but also to define ways of achieving a uniform density of thermal sources in the material that fills the waveguide.

Keywords: internal regional problem of electrodynamics, wave equations of Helmholtz, critical lengths of waves, dispersive equation; boundary and entry conditions; third-party currents and charges; continuity equation; absolute and relative dielectric permeability of the environment; vector of intensity of the electric and magnetic field; method of partial areas

диэлектрическим заполнением (рис.1), при этом диэлектрический материал представляет собой прямоугольную диэлектрическую пластину, расположенную на нижней

стенке ПрВ и совпадающая с ней по размерам в плоскости X, Z, что позволяет

обеспечить необходимое условие аналитического решения ВКЗЭ.

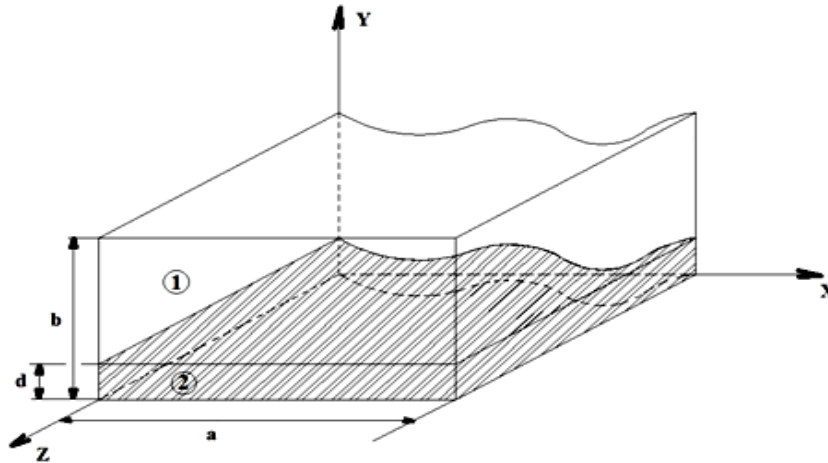


Рис. 1. Прямоугольный волновод с двухслойным диэлектрическим заполнением: 1 – воздушная среда; 2 – диэлектрическая пластина

Достаточным условием аналитического решения ВКЗЭ является выбор поляризации электромагнитного (ЭМ) поля, составляющие векторов напряженности электрического и магнитного полей которые ортогональны поверхности раздела сред ($y=d$). Для нашего случая это поляризация E_y, H_y . При выполнении необходимого и достаточного условий решение ВКЗЭ для ПрВ с

двухслойным диэлектрическим заполнением может быть представлено в виде суперпозиции E и H -типов продольных волн без возникновения гибридных типов волн. Использование поляризации E_y, H_y позволяет перейти от решения векторных волновых уравнений к решению двух скалярных уравнений для E_y и H_y компонент ЭМ поля [1, 2]:

$$\begin{aligned} \nabla^2 E_{yq}(\vec{r}, \tau) - \varepsilon_q \mu_0 \frac{\partial^2 E_{yq}(\vec{r}, \tau)}{\partial \tau^2} &= F_{cm.yq}^{(E)}(\vec{r}, \tau), \\ \nabla^2 H_{yq}(\vec{r}, \tau) - \varepsilon_q \mu_0 \frac{\partial^2 H_{yq}(\vec{r}, \tau)}{\partial \tau^2} &= F_{cm.yq}^{(H)}(\vec{r}, \tau), \end{aligned} \quad (1)$$

где $q=1$ определяет структуру электромагнитного поля в воздушной среде, а $q=2$ – в диэлектрической пластине; $\varepsilon_q = \varepsilon_0$ при $q=1$; а $\varepsilon_q = \varepsilon_i$ при $q=2$; $\varepsilon_0, \mu_0, \varepsilon_i$ – абсолютная диэлектрическая проницаемость воздушной среды и материала пластины;

$\vec{r}$ – радиус вектор, определяющий положение рассматриваемой точки в пространстве; τ – время. При этом сторонние источники ЭМ поля определяются следующим образом [3]:

$$\begin{aligned} F_{cm.yq}^{(E)}(\vec{r}, \tau) &= \mu \frac{\partial j_{cm.yq}(\vec{r}, \tau)}{\partial \tau} + \frac{1}{\varepsilon_0} \text{grad}_y \vec{\rho}_{cm}(\vec{r}, \tau), \\ F_{cm.yq}^{(H)}(\vec{r}, \tau) &= -\text{rot}_y \vec{J}_{cm}(\vec{r}, \tau), \end{aligned} \quad (2)$$

где $\vec{J}_{cm}(\vec{r}, \tau)$ и $\vec{\rho}_{cm}(\vec{r}, \tau)$ – удельные плотности стороннего тока и заряда, связанные между собой уравнением непрерывности [4]:

$$\text{div} \vec{J}_{cm}(\vec{r}, \tau) = -\frac{\partial \rho_{cm.yq}(\vec{r}, \tau)}{\partial \tau}. \quad (3)$$

Уравнение (3) позволяет представить функцию источника ЭМ поля (2) через удельную плотность стороннего тока, что наиболее эффективно при решении ВКЗЭ для поверхностных источников ЭМ поля (щелевые, многощелевые и комбинированные распределенные системы возбуждения).

Для определения собственных типов волн прямоугольного волновода, частично

$$\begin{aligned} E_{yq}(x, y, z, \tau) &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} E_{yqmn}(x, y) e^{j(\omega \tau - \beta_{mn} z)}, \\ H_{yq}(x, y, z, \tau) &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} H_{yqmn}(x, y) e^{j(\omega \tau - \beta_{mn} z)}, \end{aligned} \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned} E_{yqmn}(x, y) &= \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cdot (a_{1q} \cos K_{ynq} y + b_{1q} \sin K_{ynq} y), \\ H_{yqmn}(x, y) &= \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cdot (a_{2q} \cos K_{ynq} y + b_{2q} \sin K_{ynq} y), \end{aligned} \quad (5)$$

при этом $\beta = 2\pi/\Lambda_B$ – постоянная распространения волны, Λ_B – длина волны в волноводе. Соотношения (4) определяют спектр собственных волн прямоугольного волновода, частично заполненного диэлектрическим материалом. Необходимо заметить, что соотношения (4) определяют

заполненного диэлектрическим материалом, необходимо получить решение однородного волнового уравнения (1) при $F_{cm,yq}^{(E)}(\vec{r}, \tau) = F_{cm,yq}^{(H)}(\vec{r}, \tau) = 0$, которое при использовании метода разделения переменных [5] и удовлетворении граничным условиям на металлической поверхности волновода может быть представлено в виде

волны, распространяющиеся в положительном направлении оси Z (прямые волны ПрВ). При этом остальные компоненты ЭМ поля определяются на основе принципа поляризационной двойственности из первых двух уравнений Максвелла следующим образом [6]:

$$\begin{aligned} E_x &= \frac{1}{\kappa_{\perp}^2} \left(\frac{\partial^2 E_y}{\partial x \partial y} + j\omega\mu \frac{\partial H_y}{\partial z} \right), & H_x &= \frac{1}{\kappa_{\perp}^2} \left(\frac{\partial^2 H_y}{\partial x \partial y} - j\omega\mu \frac{\partial E_y}{\partial z} \right), \\ E_z &= \frac{1}{\kappa_{\perp}^2} \left(\frac{\partial^2 E_y}{\partial x \partial y} + j\omega\mu \frac{\partial H_y}{\partial x} \right), & H_z &= \frac{1}{\kappa_{\perp}^2} \left(\frac{\partial^2 H_y}{\partial x \partial y} - j\omega\mu \frac{\partial E_y}{\partial x} \right), \end{aligned} \quad (6)$$

где $\kappa_{\perp}$ – поперечное волновое число ПрВ при продольной поляризации ЭМ поля E_y , H_y , которое определяется следующим образом:

$$\kappa_{\perp} = \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \beta^2}. \quad (7)$$

Из соотношений (5) следует, что решение однородной ВКЗЭ можно представить

в виде суперпозиции волн ($E_y \neq 0$, $H_y = 0$) ПрВ и Н-типов волн ($E_y = 0$, $H_y \neq 0$) без возникновения гибридных типов волн, что значительно облегчает решение неоднородной ВКЗЭ для ПрВ с двухслойным диэлектрическим заполнением. Так, с учетом соотношений (5), (6) для Е-типов волн структура ЭМ поля может быть представлена в виде

$$\begin{aligned}
 E_{xqmn}(x, y) &= \frac{K_{ynq}}{K_{\perp mn}^2} \left(\frac{m\pi}{a} \right) \cdot \cos \left(\frac{m\pi x}{a} \right) \cdot (-a_{1qn} \sin K_{ynq} y + b_{1qn} \cos K_{ynq} y), \\
 E_{zqmn}(x, y) &= -\frac{j}{K_{\perp mn}^2} \beta_{mn} \left(\frac{m\pi}{a} \right) \cdot \cos \left(\frac{m\pi x}{a} \right) \cdot (a_{1qn} \cos K_{ynq} y + b_{1qn} \sin K_{ynq} y), \\
 H_{xqmn}(x, y) &= -\frac{\omega \varepsilon_q}{K_{\perp mn}^2} \beta_{mn} \cdot \sin \left(\frac{m\pi x}{a} \right) \cdot (a_{1qn} \cos K_{ynq} y + b_{1qn} \sin K_{ynq} y), \\
 H_{zqmn}(x, y) &= -\frac{j\omega \varepsilon_q}{K_{\perp mn}^2} \cdot \left(\frac{m\pi}{a} \right) \cdot \cos \left(\frac{m\pi x}{a} \right) \cdot (a_{1qn} \cos K_{ynq} y + b_{1qn} \sin K_{ynq} y).
 \end{aligned} \tag{8}$$

Соответственно для H -типов волн можно представить в следующем виде: ($E_y = 0$, $H_y \neq 0$) структуру ЭМ поля

$$\begin{aligned}
 E_{xqmn}(x, y) &= \omega \mu \frac{\beta_{mn}}{K_{\perp mn}^2} \cdot \cos \left(\frac{m\pi x}{a} \right) \cdot (a_{2qn} \cos K_{ynq} y + b_{2qn} \sin K_{ynq} y), \\
 E_{zqmn}(x, y) &= -j\omega \mu \left(\frac{m\pi}{a} \right) \frac{1}{K_{\perp mn}^2} \cdot \sin \left(\frac{m\pi x}{a} \right) \cdot (a_{2qn} \cos K_{ynq} y + b_{2qn} \sin K_{ynq} y), \\
 H_{xqmn}(x, y) &= -\frac{K_{ynq}}{K_{\perp mn}^2} \left(\frac{m\pi}{a} \right) \cdot \sin \left(\frac{m\pi x}{a} \right) \cdot (-a_{2qn} \sin K_{ynq} y + b_{2qn} \cos K_{ynq} y), \\
 H_{zqmn}(x, y) &= -j \frac{\beta_{mn}}{K_{\perp mn}^2} \cdot \left(\frac{m\pi}{a} \right) \cdot \sin \left(\frac{m\pi x}{a} \right) \cdot (a_{2qn} \cos K_{ynq} y + b_{2qn} \sin K_{ynq} y).
 \end{aligned} \tag{9}$$

Удовлетворяя полученные решения (8), (9) граничным условиям, требующим равенства тангенциальных составляющих ЭМ поля на границе раздела сред для векторов напряженности электрического и магнитного поля, а также граничным усло-

виям на металлической поверхности, получим следующие дисперсионные уравнения соответственно для E - и H -типов волн ПрВ с двухслойным диэлектрическим заполнением.

$$\begin{aligned}
 \operatorname{tg} K_{yn1}(b-d) &= -\frac{\varepsilon_1'}{\varepsilon_2'} \frac{K_{yn2}}{K_{yn1}} \operatorname{tg} K_{yn2} d && \text{для } E\text{-типов волн,} \\
 \operatorname{tg} K_{yn1}(b-d) &= -\frac{K_{yn1}}{K_{yn2}} \operatorname{tg} K_{yn2} d, && \text{для } H\text{-типов волн}
 \end{aligned} \tag{10}$$

Дисперсионные уравнения (10) позволяют определить спектр критических длин волн E - и H -типов, а также дисперсионные зависимости постоянной распространения волны $\frac{\beta c}{\omega} \left(\frac{\lambda}{a} \right)$ в режиме быстрых и медленных волн и структуру ЭМ поля в поперечном сечении волновода при изменении толщины и относительной диэлектрической проницаемости ε' прямоугольной пластины.

Особенностью дисперсионных уравнений (10) для E - и H -типов волн является их зависимость от двух волновых чисел K_{yn1} и K_{yn2} , что затрудняет их решение. Для приведения данных уравнений к одной неизвестной величине воспользуемся обобщенными дисперсионными уравнениями для каждой из сред, заполняющих ПрВ (метод частичных областей):

$$\begin{aligned} \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \varepsilon'_m &= \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + K_{yn2}^2 + \beta_{mn}^2, (0 \leq y \leq d), \\ \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 &= \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + K_{yn2}^2 + \beta_{mn}^2, (0 \leq y \leq d). \end{aligned} \quad (11)$$

Выражая из уравнений (11) величины K_{yn1} и K_{yn2} и подставляя полученные значения в дисперсионные уравнения (10),

получим для Е- и Н-типов волн соответственно:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \sqrt{\left(\frac{\omega}{c}\right)^2 - \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 - \beta_{mn}^2} \cdot (b-d) &= -\frac{1}{\varepsilon'_m} \sqrt{\frac{\left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \varepsilon'_m - \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 - \beta_{mn}^2}{\left(\frac{\omega}{c}\right)^2 - \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 - \beta_{mn}^2}} \cdot \operatorname{tg} \sqrt{\left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \varepsilon'_m - \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 - \beta_{mn}^2} \cdot d, \\ \operatorname{tg} \sqrt{\left(\frac{\omega}{c}\right)^2 - \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 - \beta_{mn}^2} \cdot (b-d) &= -\sqrt{\frac{\left(\frac{\omega}{c}\right)^2 - \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 - \beta_{mn}^2}{\left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \varepsilon'_m - \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 - \beta_{mn}^2}} \cdot \operatorname{tg} \sqrt{\left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \varepsilon'_m - \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 - \beta_{mn}^2} \cdot d. \end{aligned} \quad (12)$$

Необходимо заметить, что дисперсионные уравнения (10) совпадают по форме записи с аналогичными уравнениями для прямоугольного резонатора (ПрР) с двухслойным диэлектрическим заполнением. Однако обобщенные дисперсионные уравнения (10) отличаются от аналогичных уравнений для ПрР, что связано с различием электродинамических процессов в ПрВ и ПрР, поскольку ЭМ поле в ПрВ определяется суперпозицией бегущих волн, а в ПрР – суперпозицией стоячих волн. Соответственно отличаются и методики решения данных уравнений. Так, при решении дисперсионного уравнения для ПрР определяется спектр собственных типов колебаний, а при решении уравнений (10) – спектр критических длин волн (при $\beta_{mn} = 0$), а также дисперсионная зависимость $\beta_{mn}(\lambda)$. Заметим, что чаще используется дисперсионная зависимость коэффициента замедления волны $\frac{\beta c}{\omega} \left(\frac{\lambda}{a}\right)$ [7, 8].

Существуют два способа определения дисперсионных зависимостей $\frac{\beta c}{\omega} \left(\frac{\lambda}{a}\right)$ или $\beta(\lambda)$ посредством дисперсионных уравнений (12). Первый способ связан с определением β_{mn} для заданного значения λ_0 ($0 \leq \lambda \leq \lambda_{cp}$), а второй способ – с определением λ соответствующего заданной ве-

личине постоянной распространения волны $\beta_{mn} \left(0 \leq \frac{\beta c}{\omega} \leq \sqrt{\varepsilon'}\right)$. Интерес представляют первые два типа волн – основной и первый высший тип волны, которые определяют доминантный диапазон длин волн, в котором распространяется основная волна ПрВ. Наибольшую трудность при определении собственных электродинамических параметров представляет дисперсионная зависимость $\beta_{mn}(\lambda)$ или $\frac{\beta c}{\omega} \left(\frac{\lambda}{a}\right)$, которая содержит такие важные для ПрВ с частичным диэлектрическим заполнением электродинамические параметры, как критические длины волн основного и первого высшего типов волн, длина волны перехода быстрых волн $\left(\frac{\beta c}{\omega} < 1\right)$ в медленные $\left(\frac{\beta c}{\omega} > 1\right)$, значение $\frac{\beta c}{\omega} \left(\frac{\lambda}{a}\right)$ при $\lambda = 0$, которое равно для всех типов волн. Данные параметры позволяют тестировать полученную дисперсионную зависимость $\frac{\beta c}{\omega} \left(\frac{\lambda}{a}\right)$ и упростить её расчет. Кроме того, определенную трудность при расчете дисперсионной зависимости $(\beta c/\omega)(\lambda/a)$ в области распространения медленных волн представляет величина K_{yn1} , которая ста-

новится мнимой ($K_{yn1} = j|K_{yn1}|$), что приводит к изменению дисперсионных уравнений (12), левая часть которых определяется не гиперболическими функциями (квазипериодические функции), а параболическими функциями, носящими затухающий характер в воздушной среде от

границы раздела сред.

В табл. 1, 2 приведены значения $(\lambda_{kp})_{mn}$ для E -типов волн (табл. 1) и H -типов волн (табл. 2), полученные при решении дисперсионных уравнений (12) при $\beta_{mn} = 0$ для E - и H -типов волн соответственно:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \sqrt{\left(\frac{2\pi}{\lambda_{kpnn}}\right)^2 - \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2} \cdot (b-d) &= -\frac{1}{\varepsilon'_M} \sqrt{\frac{\left(\frac{2\pi}{\lambda_{kpnn}}\right)^2 \varepsilon'_M - \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2}{\left(\frac{2\pi}{\lambda_{kpnn}}\right)^2 - \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2}} \cdot \operatorname{tg} \sqrt{\left(\frac{2\pi}{\lambda_{kpnn}}\right)^2 \varepsilon'_M - \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2} \cdot d, \\ \operatorname{tg} \sqrt{\left(\frac{2\pi}{\lambda_{kpnn}}\right)^2 - \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2} \cdot (b-d) &= -\sqrt{\frac{\left(\frac{2\pi}{\lambda_{kpnn}}\right)^2 - \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2}{\left(\frac{2\pi}{\lambda_{kpnn}}\right)^2 \varepsilon'_M - \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2}} \cdot \operatorname{tg} \sqrt{\left(\frac{2\pi}{\lambda_{kpnn}}\right)^2 \varepsilon'_M - \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2} \cdot d. \end{aligned} \quad (13)$$

Таблица 1

Значения критических длин волн $(\lambda_{kp})_{mn}$ пяти E -типов колебаний прямоугольного волновода с двухслойным диэлектрическим заполнением при различных ε'_M

$(\lambda_{kp})_{mn}, \text{ м}$										
E_{mn}	ε'_M									
	1	2	4	9	16	25	36	49	64	81
E_{11}	0.080	0.083	0.093	0.115	0.145	0.178	0.211	0.244	0.278	0.312
E_{12}	0.043	0.048	0.056	0.064	0.068	0.075	0.083	0.094	0.106	0.119
E_{13}	0.029	0.032	0.035	0.041	0.051	0.058	0.064	0.066	0.069	0.074
E_{14}	0.022	0.024	0.028	0.033	0.035	0.040	0.047	0.054	0.060	0.064
E_{15}	0.018	0.019	0.022	0.025	0.030	0.034	0.037	0.040	0.045	0.051

Таблица 2

Значения критических длин волн $(\lambda_{kp})_{mn}$ пяти H -типов колебаний прямоугольного волновода с двухслойным диэлектрическим заполнением при различных ε'_M

$(\lambda_{kp})_{mn}, \text{ м}$										
H_{mn}	ε'_M									
	1	2	4	9	16	25	36	49	64	81
H_{10}	0.180	0.240	0.330	0.490	0.650	0.810	0.970	1.130	1.290	1.450
H_{01}	0.090	0.110	0.150	0.210	0.280	0.350	0.420	0.490	0.560	0.630
H_{11}	0.080	0.083	0.093	0.115	0.145	0.178	0.211	0.244	0.278	0.312
H_{12}	0.043	0.048	0.056	0.063	0.068	0.073	0.082	0.094	0.106	0.119
H_{13}	0.029	0.032	0.035	0.041	0.051	0.059	0.064	0.066	0.068	0.073

Расчеты были проведены для первых пяти $(\lambda_{кр})_{mn}$ критических длин волн E и H -типов при различных значениях относительной диэлектрической проницаемости ϵ'_m для прямоугольного волновода сечением 90×45 мм при толщине диэлектрической пластины $d=10$ мм. Полученные результаты позволяют определить доминантный диапазон длин волн ПрВ с двухслойным диэлектрическим заполнением, в котором распространяется основная волна волновода, а также оценить влияние диэлектрического материала на диапазонные свойства ПрВ, частично заполненного диэлектрическим материалом. На рис. 2 приведены кривые зависимостей $(\lambda_{кр})_{mn}$ от величины диэлектрической пластины для E

и H типов волн, построенные по результатам расчета $(\lambda_{кр})_{mn}$, приведенным в табл. 1, 2, которые позволяют наглядно проследить характер изменения $(\lambda_{кр})_{mn}$ при увеличении относительной диэлектрической проницаемости ϵ'_m . Из данных табл. 1, 2 и рис. 2 следует, что диэлектрическая пластина, расположенная на нижней стенке ПрВ, оказывает максимальное воздействие на основной тип волны (E - и H -типы волн) и меньшее влияние оказывает на первый высший тип волны, что приводит к увеличению широкополосности ξ ПрВ с двухслойным диэлектрическим заполнением. При увеличении ϵ'_m все кривые $(\lambda_{кр})_{mn}$ возрастают.

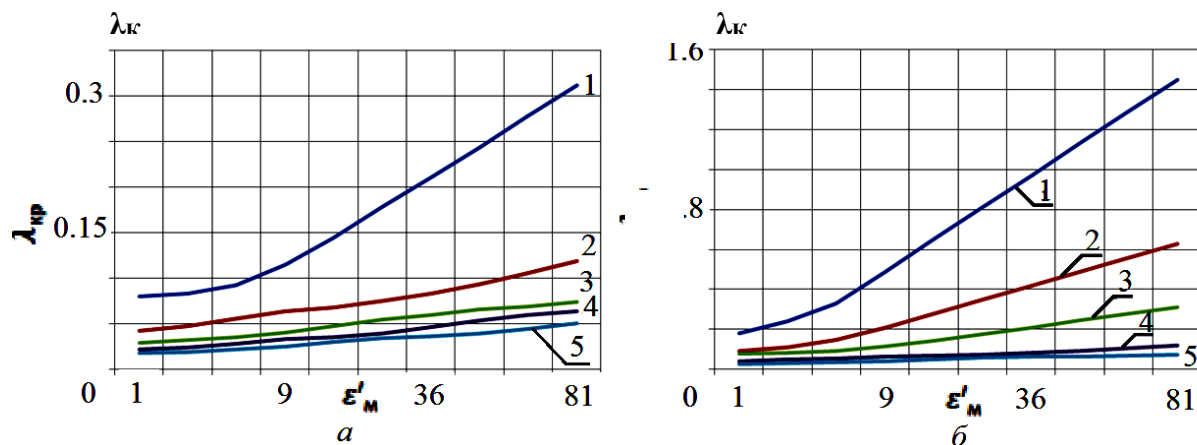


Рис. 2. График зависимостей $\lambda_{кр\,mn}(\epsilon'_m)$ прямоугольного волновода с двухслойным диэлектрическим заполнением для различных типов волн. а – для E -типов волн (1 – E_{11} , 2 – E_{12} , 3 – E_{13} , 4 – E_{14} , 5 – E_{15}); б – для H -типов волн (1 – H_{10} , 2 – H_{01} , 3 – H_{11} , 4 – H_{12} , 5 – H_{13}).

Необходимо отметить, что коэффициент широкополосности ПрВ, частично заполненного диэлектрическим материалом, может превышать коэффициент $\xi = 2$ полного или полностью заполненного диэлектриком волновода. На рис. 3 представлены кривые зависимости коэффициента широкополосности ξ от толщины диэлектрической пластины для различных значений относительной диэлектрической проницаемости ϵ'_m .

Как следует из рис. 3, коэффициент широкополосности ξ достигает максимального значения при толщине пластины

$d < 0.3b$, причем с увеличением величина $\xi_{\max}(\epsilon'_m)$ возрастает. Заметим, что условие $0 < d < 0.3b$, определяющее величину $\xi_{\max}(\epsilon'_m)$, связано с высокой концентрацией электрического поля основного типа волны и минимальной концентрации поля первого высшего типа волны в диэлектрической пластине. При увеличении толщины пластины ($d > 0.3b$) возрастает её влияние на первый высший тип волны практически при сохранении воздействия пластины на основной тип волны, что приводит к уменьшению ξ .

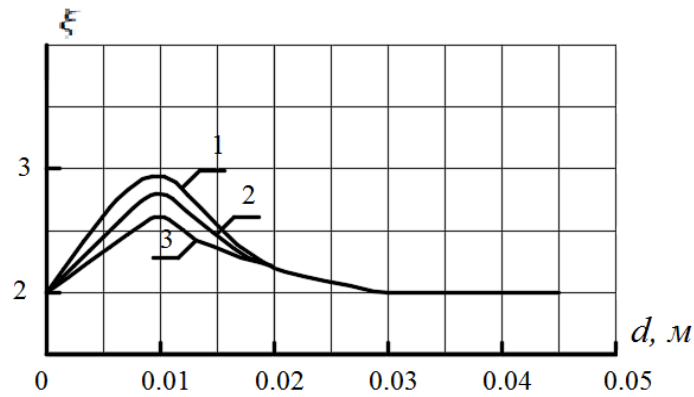


Рис. 3. Зависимость коэффициента широкополосности H -типа волн прямоугольного волновода с двухслойным диэлектрическим заполнением в зависимости от толщины диэлектрической пластины d для различных значений ε'_m (1 – $\varepsilon'_m=81$; 2 – $\varepsilon'_m=9$; 3 – $\varepsilon'_m=4$)

Как показано в работе [9], при $d > 0.7b$ электродинамические свойства ПрВ с двухслойным заполнением практически совпадают со свойствами полностью заполненного диэлектрическим материалом волновода ($\xi = 2$ при $d=b$). Таким образом, использование тонких диэлектрических пластин с высоким значением позволяет расширить потенциальные возможности таких СВЧ устройств как фазовращатели, аттенюаторы, линии задержки, согласованные волноводные нагрузки, а также СВЧ нагревательных установок конвейерного типа для термообработки листовых материалов и др.

Особый интерес при исследовании электродинамических свойств ПрВ, частично заполненного диэлектрическим материалом, представляет процесс перехода быстрых волн в медленные, который происходит в воздушной среде при $K_{yn1}^2 \leq 0$.

Как показано в работе [9], при этом ЭМ поле в воздушной среде стягивается к границе раздела сред в силу мнимости волнового числа K_{yn1} . Одним из основных электродинамических параметров, определяющих дисперсионную зависимость $\frac{\beta c}{\omega} \left(\frac{\lambda}{a} \right)$, является длина волны $(\lambda_{mn})_{nep}$ на которой начинается трансформация волны, определяемая условием $\frac{\beta c}{\omega} = 1$. Для определения $(\lambda_{mn})_{nep}$ воспользуемся обобщенными дисперсионными уравнениями (11), которые позволяют выразить значения волновых чисел K_{yn1} и K_{yn2} , соответствующие $\frac{\beta c}{\omega} = 1$. Преобразуем уравнения (11) к следующему виду:

$$\begin{aligned} 1 &= \left(\left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 + K_{yn1}^2 \right) \left(\frac{c}{\omega} \right)^2 + \left(\frac{\beta c}{\omega} \right)^2; (d \leq y \leq b), \\ \varepsilon' &\left(\left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 + K_{yn2}^2 \right) \left(\frac{c}{\omega} \right)^2 + \left(\frac{\beta c}{\omega} \right)^2; (d \leq y \leq b). \end{aligned} \quad (14)$$

Выразим волновые числа K_{yn1} и K_{yn2} из соотношений (14) для $\frac{\beta c}{\omega} = 1$:

$$K_{yn1} = -j \left(\frac{m\pi}{a} \right),$$

$$K_{yn1} = \frac{\pi}{a} \sqrt{4 \left(\frac{a}{(\lambda_{mn})_{nep}} (\varepsilon' - 1) \right) - m^2}. \quad (15)$$

Подставляя соотношения (15) в дисперсионные уравнения (10) получим следующие уравнения для определения $(\lambda_{mn})_{nep}$:

$$\xi_n \operatorname{th} \xi_n = \frac{1}{\varepsilon'_m} g_0 \eta_n \operatorname{tg} \eta_n; \quad E - \text{типы волн},$$

$$\frac{\operatorname{tg} \xi_n}{\xi_n} = \frac{1}{g_0} \frac{\operatorname{tg} \eta_n}{\eta_n}; \quad H - \text{типы волн}, \quad (16)$$

где $g_0 = \frac{b-d}{d}; \quad \xi_n = \left(\frac{m\pi}{a} \right) (b-d);$

$$\xi_{n2} = \frac{\pi}{a} d \sqrt{4 \left(\frac{a}{(\lambda_{mn})_{nep}} (\varepsilon' - 1) \right) - m^2}.$$

Из соотношений (16) следует, что левая часть дисперсионных уравнений для заданного типа волны является постоянной величиной, разной по величине для E и H -типов волн, что приводит к различным значениям $(\lambda_{mn})_{nep}$ для E и H -типов волн ПрВ с двухслойным диэлектрическим заполнением. При этом величина $(\lambda_{mn})_{nep}$ для E -типов волн более зависит от изменения, нежели ε'_m для H -типов волн.

Третьей характеристической точкой дисперсионной зависимости $\frac{\beta c}{\omega} \left(\frac{\lambda}{a} \right)$ является

значение $\frac{\beta c}{\omega}$ при $\frac{\lambda}{a} = 0$, которое согласно

второму соотношению (14) равно $\frac{\beta c}{\omega} = \sqrt{\varepsilon'_m}$

при $\lambda = 0$. Таким образом, значение критических длин волн $\lambda_{кpmn}$, длина волны

$(\lambda_{mn})_{nep}$ и значение $\frac{\beta c}{\omega}$ при $\lambda = 0$ позволяют

определить точность построения графика дисперсионной зависимости $\frac{\beta c}{\omega} \left(\frac{\lambda}{a} \right)$. На

рис. 4 приведены графики дисперсионных

зависимостей $\frac{\beta c}{\omega} \left(\frac{\lambda}{a} \right)$ основной волны E и

H -типов волн для $\varepsilon'_m = 4, 9, 25$ (во всем разрешенном диапазоне волн $0 \leq \lambda \leq \lambda_{кpmn}$) для ПрВ с сечением 45×90 мм при толщине диэлектрической пластины $d = 10$ мм. Заметим, что уравнения (16) легко решаются графоаналитическим методом [10], поскольку левая часть дисперсионного уравнения представляет собой табулированную функцию, а правая часть уравнения – постоянная величина (прямая параллельная оси X). Точки пересечения данных функций и являются корнями дисперсионного уравнения (17) для H -типов волн. Корни данного уравнения для малых толщин пластины $d \ll b$ и больших значений $n > 4$ практически кратны $K_{yn2} = n\pi/d$, но при этом значение λ_n для H -типов волн не является точкой тривиальной кратности.

Как было показано выше, в области распространения медленных волн $\frac{\beta c}{\omega} > 1$, величина K_{yn1} является мнимой, что приводит к изменению дисперсионных уравнений (10), которые могут быть представлены в следующем виде:

$$K_{yn1} \operatorname{th} K_{yn1} (b-d) = \frac{K_{yn2}}{\varepsilon'_m} \operatorname{tg} K_{yn2} d; \quad E - \text{типы волн}$$

$$\frac{\operatorname{th} K_{yn1} (b-d)}{K_{yn1}} = - \frac{\operatorname{tg} K_{yn2} d}{K_{yn2}}; \quad H - \text{типы волн} \quad (16)$$

при $\lambda \leq \lambda_n$. Решение системы дисперсионных уравнений (17) отличается от решения уравнений (10), поскольку в левой части уравнений присутствуют не периодические тригонометрические функции, а параболические (затухающие от границы раздела сред) функции, что приводит к изменению значений корней дисперсионного уравнения, а следовательно, к изменению распределения ЭМ поля в поперечном сечении ПрВ при распространении в нем медленных волн $\frac{\beta c}{\omega} > 1$, при этом диапазонные свойства ПрВ с двухслойным ди-

электрическим заполнением в основном определяются электродинамическими процессами в диэлектрической пластине (коэффициент широкополосности $\xi(\lambda)$ и коэффициент замедления волны $\frac{\beta c}{\omega(\lambda)}$).

На рис. 4 приведены дисперсионные зависимости $\frac{\beta c}{\omega(\lambda/a)}$ для ПрВ сечением 90x45 мм, заполненного диэлектрической пластиной толщиной $d = 10$ мм для E - и

H -типов волн для $\varepsilon'_m = 4, 9, 25$ (во всем разрешенном диапазоне длин волн – ($0 \leq \lambda/a \leq \lambda_{\text{крит}}$) для двух первых типов волн, как в режиме распространения быстрых ($\frac{\beta c}{\omega} < 1$), так и медленных ($\frac{\beta c}{\omega} > 1$) волн, что позволяет определить процесс распространения ЭМ волн и основные электродинамические параметры ПрВ с двухслойным диэлектрическим заполнением.

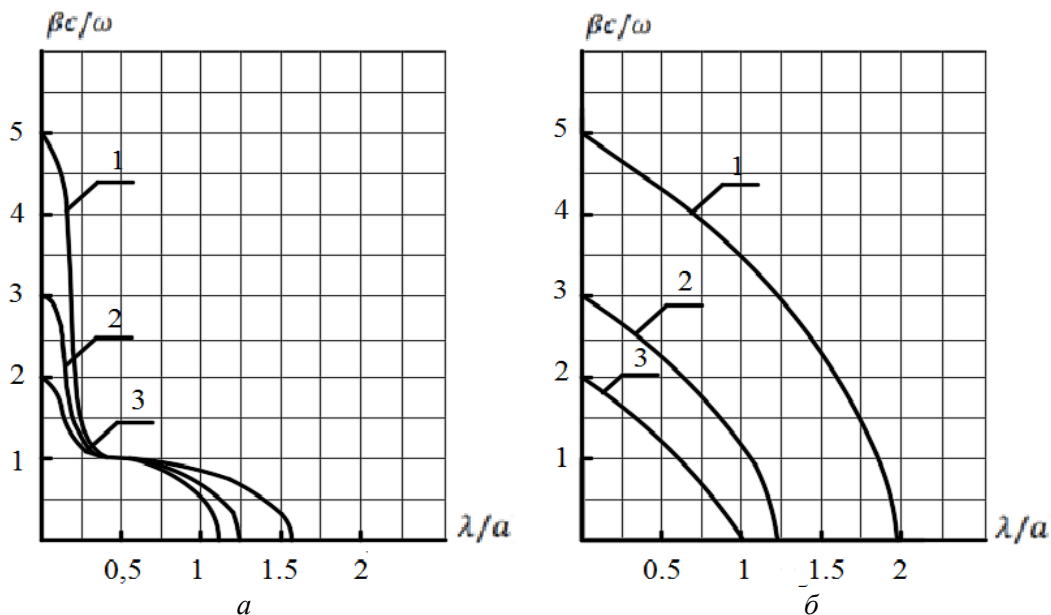


Рис. 4. График зависимостей $\beta c/\omega(\lambda/a)$ для прямоугольного волновода с двухслойным диэлектрическим заполнением для различных типов волн: а – для E_{11} -типов волн (1 - $\varepsilon'_m = 4$; 2 - $\varepsilon'_m = 9$; 3 - $\varepsilon'_m = 25$); б - для H_{11} -типов волн (1 - $\varepsilon'_m = 4$; 2 - $\varepsilon'_m = 9$; 3 - $\varepsilon'_m = 25$)

Приведенные на рис. 4 кривые позволяют определить длину волны ПрВ с двухслойным диэлектрическим заполнением на заданной рабочей длине волны λ , а также широкополосность ξ данной волноводной структуры и, самое главное, – значение волновых чисел K_{yn1} и K_{yn2} E и H -типов волн, которые однозначно определяют структуру ЭМ поля в ПрВ. Следует заметить, что величинам K_{yn1} и K_{yn2} присуща дисперсия, поскольку обобщенное дисперсионное уравнение (11) для ПрВ с частичным диэлектрическим заполнением существенно зависит от рабочей длины волны λ .

Легко видеть, что при $\lambda < \lambda_n$ величина K_{yn1} становится мнимой в области распространения медленных волн, что приводит к трансформации ЭМ поля в поперечном сечении ПрВ, при этом во всем разрешенном диапазоне длин волн величина K_{yn2} , определяющая структуру ЭМ поля в диэлектрической пластине, остается действительной величиной. Это подтверждает факт стягивания ЭМ поля в менее плотной среде к поверхности раздела диэлектрических сред ($y=d$). Заметим, что в отличие от прямоугольного резонатора структура ЭМ поля и собственные электродинамические параметры ПрВ с двухслойным диэлек-

трическим заполнением существенно зависит от рабочей длины волны.

Итак, предложено аналитическое решение внутренней краевой задачи электродинамики для прямоугольного волновода с двухслойным диэлектрическим заполнением. Определены необходимые и достаточные условия получения данного решения. Проведен анализ диапазонных

свойств собственных электродинамических параметров. Показано, что переход быстрых волн в медленные приводит к стягиванию электромагнитного поля в воздушной среде к границе раздела сред, при этом электродинамические свойства ПрВ с двухслойным заполнением определяются процессами в диэлектрической пластине.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Пименов Ю.В.** Техническая электродинамика / Ю.В. Пименов, В.И. Вольман. М.: Радио и связь, 2000. 536 с.

2. **Егоров Ю.В.** Частично заполненные прямоугольные волноводы / Ю.В. Егоров. М.: Энергия, 1967. 216 с.

3. **Марков Г.Т.** Возбуждение электромагнитных волн / Г.Т. Марков, А.Ф. Чаплин. М.: Энергия, 1967. 315 с.

4. **Баскаков С.И.** Электродинамика и распространение радиоволн / С.И. Баскаков. М.: Высш. шк., 1992. 497 с.

5. **Семенов Н.А.** Техническая электродинамика / Н.А. Семенов. М.: Связь, 1937. 480 с.

6. Определение спектра собственных резонансных частот и структуры электромагнитного поля прямоугольного резонатора с частичным диэлектрическим заполнением / В.А. Коломейцев, П.В. Ковряков, В.А. Лой-

ко и др. // Успехи современной радиоэлектроники. 2015 № 6. С. 69-80.

7. **Коломейцев В.А.** Взаимодействие электромагнитных волн с поглощающими средами и специальные СВЧ системы равномерного нагрева: дис. ... д-ра техн. наук / В.А. Коломейцев. Саратов: СГТУ, 1999. 434 с.

8. **Коломейцев В.А.** Микроволновые системы с равномерным нагревом / В.А. Коломейцев, В.В. Комаров, А.Р. Железняк // Саратов: СГТУ, 2006.

9. **Ванштейн Л.А.** Электромагнитные волны / Л.А. Ванштейн. М.: Радиосвязь, 1988. 440 с.

10. Определение собственных электродинамических параметров прямоугольного резонатора с двухслойным диэлектрическим заполнением / В.А. Коломейцев, Д.А. Баринов, В.И. Посадский и др. // Радиотехника. 2014. № 10. С. 41-45.

Баринов Д.А. – заместитель Генерального директора ЗАО НПП «Алмаз-Фазотрон»

Железняк А.А. – студент Московского автодорожного института

Коломейцев В.А. – доктор технических наук, профессор кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Лукьянов М.А. – студент кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

D.A. Barinov – deputy CEO of CJSC NPTs Almaz-Fazotron

A.A. Zheleznyak – student of the Moscow road institute

V.A. Kolomeytsev – Dr.Sc., professor of department «Radio electronics and telecommunications», Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

M.A. Lukyanov – student of department «Radio electronics and telecommunications», Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 06.06.16, принята к опубликованию 19.06.16

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ СХЕМЫ
ДЛЯ РАСЧЕТА КРИТИЧЕСКИХ ДЛИН ОСНОВНЫХ ВОЛН
ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ВОЛНОВОДОВ С ОДНИМ И ДВУМЯ Т-РЕБРАМИ
С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ЦИЛИНДРАМИ В ЕМКОСТНЫХ ЗАЗОРАХ**

А.А. Скворцов

**DETERMINATION OF EQUIVALENT CIRCUIT PARAMETERS FOR
CALCULATION THE CRITICAL LENGTHS OF THE FUNDAMENTAL
WAVES IN THE ONE OR TWO T-RIB RECTANGULAR WAVEGUIDES
WITH DIELECTRIC CYLINDERS IN THE CAPACITIVE GAPS**

A.A. Skvortsov

Методом эквивалентных схем получены квазистационарные соотношения, позволяющие проводить приближенно-аналитический расчет критических длин основных волн прямоугольных волноводов с одним и двумя Т-ребрами с диэлектрическими цилиндрами, расположенными в их емкостных зазорах. Приводится сравнение результатов расчетов нормированной критической длины основной волны прямоугольного волновода с Т-ребром с диэлектрическим цилиндром в емкостном зазоре, выполненных методами эквивалентных схем и конечных элементов.

Ключевые слова: прямоугольный волновод, Т-ребро, диэлектрический цилиндр, емкостной зазор, квазистационарный расчет, метод эквивалентных схем, критическая длина, основная волна

В настоящее время прямоугольные волноводы с одним (ПВТР) и двумя (ПВДТР) Т-ребрами с диэлектрическими цилиндрами в их емкостных зазорах (рис. 1) являются базовыми элементами для построения СВЧ устройств для термо-

Based on the method of equivalent circuits, we obtained quasi-stationary relations, that allows for conducting an approximate analytical calculation of the critical lengths of fundamental waves in the rectangular waveguides with one or two T-edges with dielectric cylinders in their capacitive gaps. A comparison of the calculation results for the normalized critical length of the main wave rectangular waveguide with a T-edge dielectric cylinder in the capacitive gap was performed using the equivalent circuit and finite element methods.

Keywords: rectangular waveguide with one and two T-edges to dielectric cylinders in the capacitive gaps, a quasi-steady state calculation method of the equivalent circuits, critical length, the main wave

обработки диэлектрических материалов [1, 2]. Важной задачей, возникающей при разработке СВЧ устройств на основе ПВТР и ПВДТР, является определение критической длины основной волны рассматриваемых линий передачи.

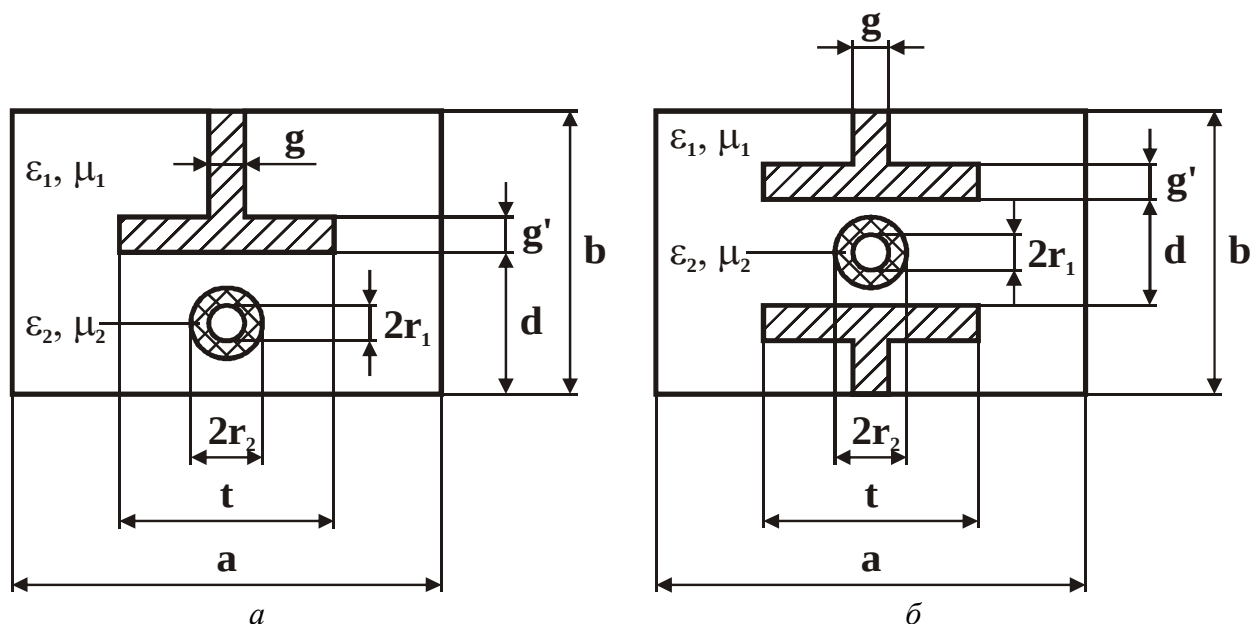


Рис. 1. Поперечные сечения ПВТР (а) и ПВДТР (б) с диэлектрическими цилиндрами в емкостных зазорах

Поскольку рассчитать критическую длину основной волны анализируемых волноведущих структур на основе точного аналитического решения внутренней краевой задачи электродинамики не удастся из-за сложной конфигурации поперечных сечений и кусочно-слоистого диэлектрического заполнения емкостных зазоров ПВТР и ПВДТР, для ее определения необходимо использовать либо численные методы, либо методики приближенно-аналитического расчета. Применение численных подходов [1–6], к которым относятся метод конечных элементов (МКЭ), метод конечных разностей, метод частичных областей, вариационный метод, метод интегральных уравнений и ряд других, к расчету критической длины основной волны ПВТР и ПВДТР, несмотря на их универсальность, связано с привлечением громоздкого математического аппарата, затрудняющего использование полученных результатов как для теоретических исследований, так и для практических целей. Необходимо также отметить, что первое приближение этих методов достаточно часто дает результат с большой погрешностью.

При квазистационарных расчетах критической длины основной волны ПВТР и ПВДТР хорошо зарекомендовал себя ме-

тод эквивалентных схем (МЭС) [7], основанный на замене реальной электродинамической системы эквивалентной цепью с сосредоточенными параметрами и отличающийся наглядностью, возможностью выявить общие закономерности функционирования анализируемых линий передачи и сравнительной простотой вычислений, точность которых зависит от точности определения параметров эквивалентной схемы.

Квазистационарный расчет критической длины основной волны ПВТР и ПВДТР с диэлектрическими цилиндрами в их емкостных зазорах можно провести, представив эквивалентную схему отрезка анализируемых линий передачи единичной длины в виде параллельного резонансного контура из сосредоточенных индуктивностей и емкостей (рис. 2), по формуле [7]:

$$\lambda_{c1} = 2\pi\sqrt{LC}, \quad (1)$$

где L и C – погонные индуктивность и емкость эквивалентного колебательного контура.

Погонная индуктивность эквивалентного колебательного контура определяется выражением

$$L = \frac{L_1}{2}, \quad (2)$$

в котором

$$L_1 = \frac{\mu\mu_0[(a-g)(b-d-g')+(a-t)(d+g')]}{2} \quad (3)$$

– индуктивность боковой секции ПВТР или ПВДТР; μ_0 – магнитная постоянная; a, b, d, g', t – размеры, указанные на рис. 1;

Погонная емкость колебательного контура рассчитывается по формуле

$$C = C_1 + 2(C_2 + C_3 + C_4), \quad (4)$$

C_1 и C_3 – погонные электростатические емкости; C_2 и C_4 – погонные краевые емкости.

Погонные электростатические емкости

C_1 и C_3 можно вычислить, используя модель плоского конденсатора с однородным диэлектрическим заполнением:

$$C_1 = \frac{\varepsilon_{\text{эфф}}\varepsilon_0 t}{d}, \quad (5)$$

$$C_3 = \frac{2\varepsilon_1\varepsilon_0 g'}{a-t} \times \begin{cases} 1 & \text{для ПВТР;} \\ 1/2 & \text{для ПВДТР,} \end{cases} \quad (6)$$

где $\varepsilon_{\text{эфф}}$ – эффективная диэлектрическая проницаемость заполнения емкостного зазора; ε_0 – диэлектрическая постоянная.

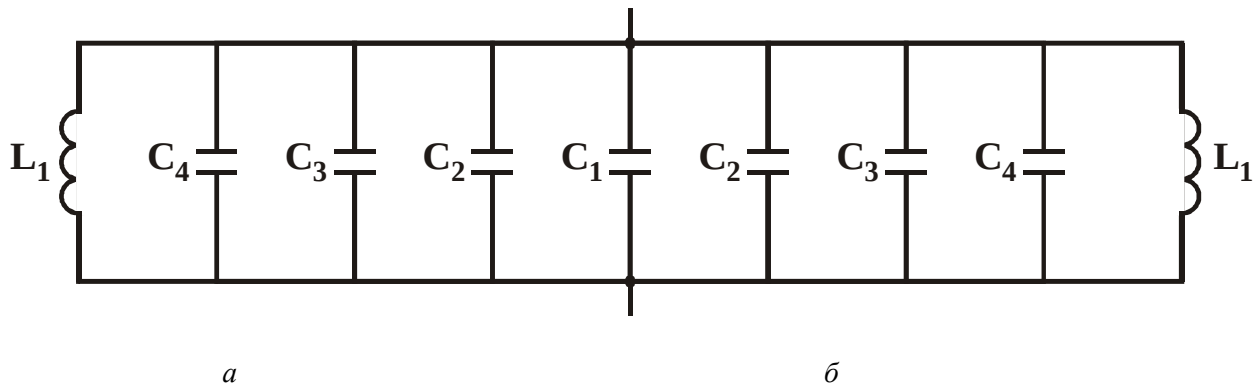


Рис. 2. Эквивалентная схема для расчета критической длины основной волны ПВТР и ПВДТР с диэлектрическими цилиндрами в емкостных зазорах

В настоящей работе рассчитана эффективная диэлектрическая проницаемость заполнения емкостных зазоров ПВТР, причем рассмотренные выше соотношения при $r_1 = 0$ определяют критические длины основных волн ПВТР и ПВДТР со сплошными диэлектрическими цилиндрами в их емкостных зазорах, а при $r_1 = (r_2^2 - \pi^{-1}dt)^{1/2}$ – критические длины основных волн ПВТР ПВДТР. При этом использована приближенная формула Лихтенеккера [8]:

$$\varepsilon_{\text{эфф}} = \varepsilon_1 \left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \right)^n, \quad (7)$$

где

$$n = \begin{cases} \pi(r_2^2 - r_1^2)(dt)^{-1} & \text{при } r_1 < r_2; \\ \pi r_2^2(dt)^{-1} & \text{при } r_1 = 0; \\ 1 & \text{при } r_1 = (r_2^2 - \pi^{-1}dt)^{1/2}; \\ 0 & \text{при } r_1 = r_2. \end{cases} \quad (8)$$

Анализ выражений (7) и (8) показывает, что при $\varepsilon_1 \neq \varepsilon_2$

$$\varepsilon_{\text{эфф}} = \begin{cases} \varepsilon_1 & \text{при } r_1 = r_2; \\ \varepsilon_2 & \text{при } r_1 = (r_2^2 - \pi^{-1}dt)^{1/2}. \end{cases} \quad (9)$$

Погонные краевые емкости C_2 и C_4 определяются выражениями

$$C_2 = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_0}{\pi} \left[\frac{1 + g_1^2}{g_1} \operatorname{Arch} \left(\frac{1 + g_1^2}{1 - g_1^2} \right) - 2 \ln \left(\frac{4g_1}{1 - g_1^2} \right) \right] \times \begin{cases} 1 & \text{для ПВТР;} \\ 1/2 & \text{для ПВДТР;} \end{cases} \quad (10)$$

$$C_4 = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_0}{\pi} \left[\frac{1 + g_2^2}{g_2} \operatorname{Arch} \left(\frac{1 + g_2^2}{1 - g_2^2} \right) - 2 \ln \left(\frac{4g_2}{1 - g_2^2} \right) \right] \times \begin{cases} 1 & \text{для ПВТР;} \\ 1/2 & \text{для ПВДТР,} \end{cases} \quad (11)$$

в которых $g_1 = d/b$ и $g_2 = (a - t)/(a - g)$.

На основе полученных выше выражений проведен квазистационарный расчет основной волны ПВТР и ПВДТР с диэлектрическими цилиндрами в емкостных зазорах при различных значениях их геометрических размеров и электрофизических параметров заполнения. В качестве примера, иллюстрирующего эффективность рассмотренной выше методики, на рис. 3

представлены графики зависимостей нормированной критической длины основной волны (λ_{cl}/a) ПВТР ($b/a = 0,5$; $g/a = 0,05$; $g'/b = 0,1$; $t/a = 0,6$; $d/b = 0,3$; $2r_1/d = 0$; $2r_2/d = 0,4$; $\varepsilon_1 = \mu_1 = \mu_2 = 1$) от относительной диэлектрической проницаемости цилиндра ε_2 , полученные МЭС и МКЭ [1].

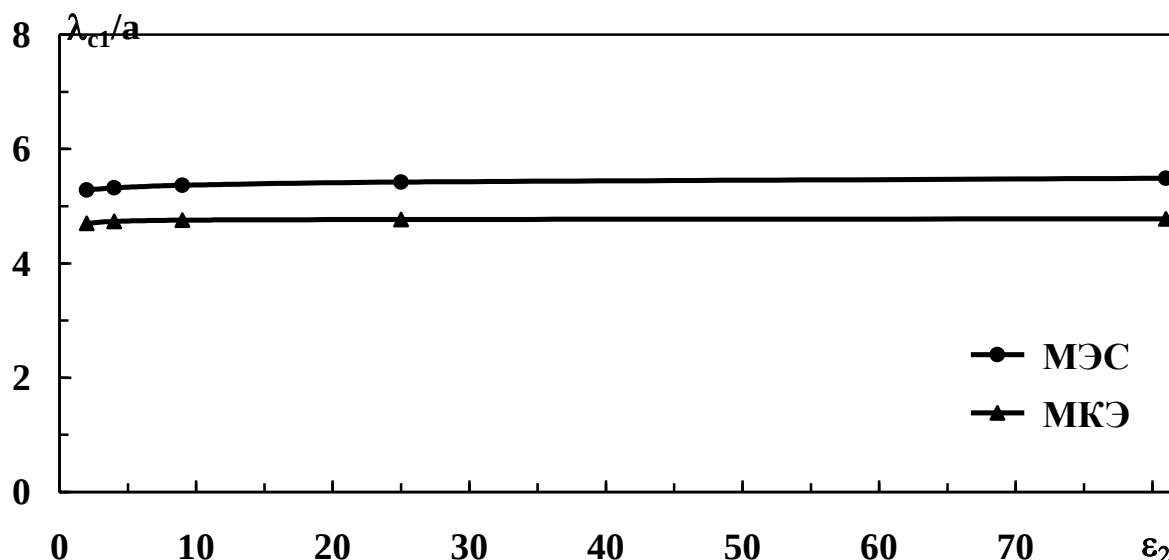


Рис. 3. Зависимость нормированной критической длины основной волны ПВТР от относительной диэлектрической проницаемости цилиндра в его емкостном зазоре

Как видно из рис. 3, результаты расчетов λ_{cl}/a МЭС и МКЭ достаточно хорошо согласуются, а их некоторое расхождение может быть устранено введением соответствующего поправочного множителя.

Таким образом, в настоящей работе определена связь параметров эквивалентной

схемы для квазистационарного расчета критических длин основных волн ПВТР и ПВДТР с геометрическими размерами и электрофизическими свойствами цилиндрического кусочно-слоистого диэлектрического заполнения их емкостных зазоров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коломейцев В.А. Микроволновые системы с равномерным объемным нагре-

вом. Ч. 1. / В.А. Коломейцев, В.В. Комаров. Саратов: СГТУ, 1997. 160 с.

2. **Коломейцев В.А.** Микроволновые системы с равномерным объемным нагревом. Ч. 2. / В.А. Коломейцев, В.В. Комаров, А.Р. Железняк. Саратов: СГТУ, 2006. 232 с.

3. **Григорьев А.Д.** Электродинамика и микроволновая техника / А.Д. Григорьев. СПб: Лань, 2007. 704 с.

4. Волноводы сложных сечений / Г.Ф. Заргано и др. М.: Радио и связь, 1986. 124 с.

5. Линии передачи сложных сечений / Г. Ф. Заргано и др. Ростов н/Д.: РГУ, 1983. 320 с.

6. Расчет характеристик линий передачи / В. Б. Каток и др. Днепропетровск: ДГУ, 1985. 100 с.

7. **Коломейцев В.А.** Аналитические соотношения для определения критической длины волны доминантной моды прямоугольного волновода с Т-ребром / В.А. Коломейцев, В.В. Комаров, А.А. Скворцов. Деп. в ВИНТИ 16.10.96, № 3052-В96. – 1 с.

8. **Княжевская Г.С.** Высокочастотный нагрев диэлектрических материалов / Г.С. Княжевская, М.Г. Фирсова, Р.Ш. Килькеев. Л.: Машиностроение, 1989. 64 с.

Скворцов Алексей Анатольевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю. А.

Aleksey A. Skvortsov – Ph.D, Associate Professor, Department of Radio electronics and telecommunications of the Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 06.06.16, принята к опубликованию 19.06.16



СОЦИАЛЬНЫЙ АСПЕКТ

УДК 621.365.51

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ЭЛЕКТРО- И ТЕПЛОТЕХНОЛОГИИ

Ю.С. Архангельский

ALTERNATIVE ELECTRICITY AND HEAT TECHNOLOGIES

Yu. S. Arkhangelsky

Рассмотрены вопросы преподавания в технических вузах электро- и теплотехнологий.

Ключевые слова: *подготовка бакалавров, учебные планы, электротехнология, теплотехнология, альтернативные технологии*

В технических вузах изучение учебных дисциплин по электро- и теплотехнологии проводится с учетом профиля подготовки бакалавров. Так, в СГТУ имени Гагарина Ю.А. учебный план подготовки бакалавров по профилю «Промышленная теплоэнергетика» направления «Теплоэнергетика и электротехника» содержит учебные дисциплины:

- «Тепломассообменное оборудование предприятий»,
- «Энергетические системы обеспечения жизнедеятельности»,
- «Технологические энергоносители предприятий»,
- «Физико-химические основы теплотехнических, теплоэнергетических и теплотехнологических процессов»,
- «Физико-химические основы подготовки рабочих тел и теплоносителей в теплоэнергетике и в теплотехнологиях»,
- «Технология очистки и обезвреживания промышленных выбросов»,
- «Энергопользование в высокотемпературных технологиях».

Учебный план подготовки бакалавров по профилю «Электротехнологические ус-

The paper examines the issues of teaching at the technical institutes of electrical and heat technologies.

Keywords: *bachelor, curriculum, electrotechnology, heat technology, alternative technologies*

тановки и системы» направления «Электроэнергетика и электротехника» содержит учебные дисциплины:

- «Электротехнологические установки и системы»,
- «Перспективные электротехнологии»,
- «Применение электротехнологии в промышленности»,
- «Дуговые печи, печи сопротивления и установки спецнагрева»,
- «Установки конвективного, кондуктивного и радиационного нагрева»,
- «Бытовые электротехнологические устройства»,
- «ЭТУС малой мощности»,
- «Индукционные, ВЧ и СВЧ установки»,
- «Установки объемного тепловыделения».

Наконец, учебный план подготовки бакалавров по профилю «Электроснабжение» направления «Электроэнергетика и электротехника» содержит учебные дисциплины:

- «Перспективные электротехнологии»,
- «Применение электротехнологий в промышленности».

Изучение этих дисциплин дает выпускнику вуза достаточную подготовку для работы в областях электро- и теплотехнологии, но только в том случае, когда технология соответствует профилю его подготовки. Другое дело, если электротехнологу придется иметь дело с теплотехнологическими процессами и установками, а теплотехнологу – с электротехнологией. В этих случаях знаний, полученных в вузе, может быть недостаточно.

Еще сложнее бакалавру принимать решения по модернизации технологического оборудования участка, цеха, предприятия.

Здесь нельзя ориентироваться только на изученные в вузе технологические процессы и оборудование, нужно выбрать наиболее эффективные технологии, имея в виду, что одну и ту же продукцию заданного качества и в необходимом объеме можно получить с помощью, например, электро- или теплотехнологий, то есть бакалавру нужно иметь необходимую профессиональную подготовку в области этих альтернативных технологий. В таблице приведены примеры альтернативных электро- и теплотехнологических процессов и установок.

Альтернативные электро- и теплотехнологические процессы и установки

Область применения	Технологические процессы и установки	
	электротехнологические	теплотехнологические
Выплавка металла	Дуговые сталеплавильные печи и установки. Установки индукционного нагрева	Доменные, мартеновские печи
Нагрев металла перед обработкой давлением	Электрические печи прямого и косвенного нагрева	Установки нагрева пламенем
Закалка металла	Установки индукционной поверхностной закалки	Установки нагрева пламенем
Сварка металлических деталей	Электрические дуговые и контактные сварочные установки	Установки и аппараты газовой сварки
Нагрев и сушка диэлектрических сред, материалов, изделий	Электрические печи сопротивления, ВЧ и СВЧ установки диэлектрического нагрева	Тепломассообменные установки
Нагрев пищевых продуктов в быту	Электрические плиты, электрические камерные печи сопротивления, СВЧ печи	Газовые плиты

Таблица, разумеется, не содержит исчерпывающего перечисления всех альтернативных электро- и теплотехнологий, но, на наш взгляд, свидетельствует о необходимости при изучении студентами конкретных технологий дать им возможность изучить и альтернативные электротехнологии.

Нужно научить студентов делать научно обоснованный выбор из конкурирующих технологий [1-7], проводя технико-экономическую оптимизацию структуры и параметров выбранных конкурентов и принимать оптимальные решения по величине сравнительного экономического эффекта [8-11].

ЛИТЕРАТУРА

1. Электротехнологические промышленные установки / под ред. А.Д. Свенчанского. М.: Энергоиздат, 1982. 400 с.

2. Болотов А.В. Электротехнологические установки / А.В. Болотов, Г.А. Шекель. М.: Высш. шк., 1988. 336 с.

СОЦИАЛЬНЫЙ АСПЕКТ

3. **Свенчанский А.Д.** Электрические промышленные печи / А.Д. Свенчанский. М.: Энергия, 1975. 382 с.

4. Дуговые промышленные печи. Дуговые печи и установки специального нагрева / под ред. А.Д. Свенчанского. М.: Энергоиздат, 1981. 296 с.

5. **Вайнберг А.М.** Индукционные плавильные печи / А.М. Вайнберг. М.: Энергия, 1972. 304 с.

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

7. **Баклабов А.М.** Промышленные теплообменные процессы и установки / А.М. Баклабов А.М. и др. М.: Энергоатомиздат, 1986. 328 с.

8. **Лебедев П.Д.** Теплоиспользующие установки промышленных предприятий / П.Д. Лебедев, А.А. Щукин. М.: Энергия, 1970. 408 с.

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

10. **Архангельский Ю.С.** Элементы СВЧ электротермического оборудования / Ю.С. Архангельский, В.А. Воронкин. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2003, 212 с.

11. **Симонов В.Ф.** Техничко-экономическая оптимизация при проектировании низкотемпературных теплотехнологических установок / В.Ф. Симонов. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 1993, 84с.

Архангельский Юрий Сергеевич – заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Yuri S. Arkhangelsky – Honored Scientist of Russia, Dr.Sc., Professor, Department of Power Supply for Industrial Enterprises, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 05.06.16, принята к опубликованию 19.06.16



ЛЕТОПИСЬ

АЛЕКСЕЙ АЛЕКСЕЕВИЧ ПОНУКАЛИН

1938



2016

9 июля 2016 г. скончался Алексей Алексеевич Понукалин, профессор кафедры психологии Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А., доктор социологии, кандидат технических наук, профессор психологии и почетный работник высшего профессионального образования РФ.

Алексей Алексеевич закончил физический факультет Саратовского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского по кафедре «Радиофизика», аспирантуру Института психологии АН СССР по специальности «Психология труда, инженерная психология». Он был членом научного совета при Президиуме РАН РФ по комплексным проблемам евразийской экономической интеграции, модернизации, конкурентоспособности.

Алексей Алексеевич – один из саратовских «физиков», перешедших в «лирики». В своем интервью журналу «Вопросы электротехнологии» «Физики» и «Лирики» много лет спустя» (№ 1 (2), 2014 г.) по этому поводу он говорил: «... я всегда был предрасположен заниматься как точными, так и гуманитарными науками. С детства увлекался радиолюбительством, что определило выбор специальности».

Одинаковый интерес к гуманитарным, точным и техническим наукам у Алексея Алексеевича сохранился до конца его дней. Он был необыкновенно интересным собеседником и всегда оставался среди «физиков» своим...

Последний раз я виделся с Алексеем Алексеевичем на трамвайной остановке «Детский парк»

– Я только что из больницы. У меня был инфаркт, – сказал он.

Живой, заинтересованный, как всегда, взгляд, уверенная походка...

Профессор Архангельский Ю.С., СГТУ

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

Приглашаем к сотрудничеству ученых, преподавателей, сотрудников научных коллективов кафедр и лабораторий вузов, научно-исследовательских институтов, аспирантов, студентов, руководителей промышленных предприятий, разработчиков новой продукции, инвесторов, представителей органов власти.

По вопросам публикации статей в научно-техническом журнале «Вопросы электротехнологии» просим обращаться по телефонам:

8 (8452) 99-87-63 – Архангельский Юрий Сергеевич (главный редактор),

8 (937) 224-08-05 – Вырыханов Денис Александрович (ответственный секретарь).

Просьба направлять публикации по адресу:

Россия, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, ком. 1/133а, гл. редактору журнала «Вопросы электротехнологии» Архангельскому Ю.С. и по электронной почте eltech@sstu.ru.

Требования к оформлению публикаций

Печатный вариант публикации предоставляется объемом до 10 стр. формата А4; поля: сверху и снизу по 25 мм, справа и слева по 20 мм, через одинарный интервал, шрифт Times New Roman 12, абзацный отступ 0,63 см, формат файла *.doc, редактор Microsoft Word 2003.

Иллюстрации (рисунки, графики) выполняются в формате .jpg, располагаются в тексте статьи и должны иметь номер и подпись. Рисунки и фотографии должны иметь контрастное изображение.

Таблицы располагаются непосредственно в тексте статьи. Каждая таблица должна иметь номер и заголовок.

Формулы и буквенные обозначения величин должны быть набраны в редакторе формул Microsoft Equation 3.0.

Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ). Не следует употреблять сокращенных слов, кроме общепринятых (т.е., т.д., т.п.). Допускается введение предварительно расшифрованных сокращений.

ОБЯЗАТЕЛЬНО наличие индекса УДК и списка использованных источников, оформленного по ГОСТ 7.1-2003 и включающего фамилию и инициалы автора, название статьи, название журнала, том, год, номер или выпуск, страницы, а для книг – фамилии и инициалы авторов, точное название книги, место издания (город), издательство, год издания, количество страниц.

Также предоставляется информация об авторах (ФИО полностью, почетные звания, ученая степень, ученое звание, должность, место работы, телефон, e-mail), название статьи, аннотация и ключевые слова. Данная информация дублируется на английском языке.

Специалисты в технических и естественно-научных отраслях к публикации **ОБЯЗАТЕЛЬНО** прилагают экспертное заключение.

Публикации принимаются в течение всего года.

Публикации, не отвечающие перечисленным требованиям, к рассмотрению не принимаются. Рукописи и электронные носители авторам не возвращаются.

Редакция оставляет за собой право производить редакционные изменения, не искажающие основное содержание статьи.

За дополнительной информацией обращайтесь на сайт журнала «Вопросы электротехнологии» www.sstu.ru/nauka/nauchnye-izdaniya/voprosy-elektrotekhnologii

INFORMATION FOR AUTHORS

We invite to cooperation of scientists, teachers, scientific employees, staff members research groups of the departments and laboratories of universities, research institutes, graduate students, industrial managers, developers of new products, investors, representatives of authorities.

On the publication of articles in scientific and technical «Journal of Electrotechnics» to contact by phone:

8 (8452) 99-87-63 – Arkhangelsky Yuri Sergeevich (editor in chief),

8 (937) 224-08-05 – Virikhanov Denis Aleksandrovich (Executive Secretary).

Please send the publication to the address:

Russia, 410054, Saratov, Polytechnicheskaya 77, com. 1/133a, chief editor of the «Journal of Electrotechnics» Arkhangelsky Yu.S. and e-mail eltech@sstu.ru.

Requirements for registration of publications

A printed version of the publication is given up to 10 pages of A4 format; margins: top and bottom 25 mm, right and left 20 mm, single-spaced, font Times New Roman 12, indent 0.63 cm, file format *.doc, Microsoft Word 2003.

Illustrations (drawings, charts) are performed in the format .jpg, are in the text and must be numbered and signed. The drawings and photos shall be contrast.

The tables are placed directly in the text. Each table should have a number and title.

Formulas and letter symbols of quantities should be typed in formula editor **Microsoft Equation 3.0**.

All measurements taken in the article should correspond to International system of units (SI). You should not use abbreviated words, except for the General-taken (i.e., etc., etc.). Allowed the introduction of the pre-decoded abbreviations.

Required UDC index and list of references, presentation provided according to GOST 7.1-2003 and include: surname and initials of author, article title, journal title, volume, year, number or issue, page, and for books – surname and initials of authors, exact title of book, place of publication (city), publisher, year of publication, number of pages.

It also provides information about authors (full name, honorary titles, scientific degree, academic title, position, place of work, telephone number, e-mail), title of article, abstract and key words. This information is duplicated in English.

Specialists in technical and natural scientific fields to publish be SURE to enclose an expert opinion.

Publications are accepted throughout the year.

Publications that do not meet the listed requirements will not be accepted. Manuscripts and electronic media will not be returned.

The editorial Board reserves the right to make editorial changes do not distorting the main content of the article.

For more information, visit the website of the «Journal of Electrotechnics» www.sstu.ru/nauka/nauchnye-izdaniya/voprosy-elektrotekhnologii

Редактор Л.А. Скворцова
Компьютерная верстка – В.О. Горбачев, Э.В. Темирбулатов, Д.А. Вырыханов
Перевод на английский язык – А.Х. Аскарова

Почтовый адрес: 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77
Телефон: (8452) 99-87-63
E-mail: eltech@sstu.ru

Подписано в печать 24.06.16
Формат 60×84 1/8 Бум. офсет.
Усл. печ. л. 8,5 Уч. изд. л. 3,4
Тираж 500 экз. Заказ 95 Цена свободная
Отпечатано в Издательстве СГТУ, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77.
E-mail: izdat@sstu.ru
Полная электронная версия журнала размещена в системе РИНЦ
в открытом доступе на платформе eLIBRARY.RU
Подписной индекс 70841 (каталог «Газеты. Журналы» на 1-е полугодие 2016 г.)
Свидетельство о регистрации СМИ *ПИ № ФС77-54621 от 01.07.2013*

Editor L.A. Skvortsova
Computer-assisted layout by V.O. Gorbachev, E.V. Temirbulatov, D.A. Virikhanov

Translation into English by A.H. Askarova

Address: 77 Politekhnikeskaya Str., 410054, Saratov, Russia
Tel.: (8452) 99-87-63
E-mail: eltech@sstu.ru

Print date: 24.06.2016
Paper size: 60×84 1/8 Offset-Print
Conventional printed sheet 8,5 Publication base sheet 3,4
Circulation: 500 printed copies Order 95 Subscription and individual copies: open rates
Published by SSTU Publishing, 410054 Saratov, 77 Politekhnikeskaya Str.
Online at www.eLIBRARY.RU
The certificate of media source registration: *PI No. FS77-54621 dated 1 July 2013*

Пензенский государственный университет



Рожденный в трудные годы войны вуз прошел большой путь становления и развития от индустриального института до классического университета. Сегодня это – один из самых крупных многопрофильных вузов Поволжья, обеспечивающий формирование интеллектуального потенциала и способствующий социально-экономическому развитию региона.

История ПГУ началась 3 июля 1943 года, когда было принято решение о переводе из оккупированной фашистами Одессы в Пензу индустриального института.

Первая лекция в стенах нового вуза была прочитана 1 ноября 1943 года. Новый вуз был призван обеспечить кадрами развивающуюся промышленность города. В его составе были механико-технологический, точной механики и теплотехнический факультеты. Обучение проходило по специальностям «Технология машиностроения», «Металлорежущие станки» и «Литейное производство». Первый учебный год начали 600 студентов, в том числе 525 первокурсников. После освобождения Украины и возобновления работы индустриального института в Одессе решением Совнаркома от 08.06.1944 г. вуз в Пензе получил наименование Пензенский индустриальный институт. 17 марта 1958 года индустриальный институт был преобразован в Пензенский политехнический институт, имевший в своем составе 5 дневных, вечерний и заочный факультеты.

Изменения, происходившие в стране в 90-е годы XX века, принятие новых законов о высшем образовании, расширение перечня специальностей дали возможность Пензенскому политехническому институту в 1993 году перейти в ранг технического университета. Статус классического университета ПГУ приобрел 22 января 1998 года. Сегодня в стенах ПГУ обучаются будущие специалисты естественно-научного и технического профиля, экономисты, медики и юристы, педагоги.

В состав ПГУ входят филиалы в Кузнецке, Сердобске и Нижнем Ломове, 6 институтов (политехнический, педагогический, медицинский, военного обучения, физической культуры и спорта), а также 2 самостоятельных факультета (юридический, экономики и управления). Университетский городок насчитывает 18 учебных корпусов, 5 общежитий, столовую, стадионы «Темп» и «Труд».

Выпускники университета работают практически во всех регионах России и ближнего зарубежья. В Пензе нет, пожалуй, ни одного крупного предприятия или научно-исследовательского института, во главе которых не стояли бы воспитанники бывшего ППИ. Большинство профессоров вуза получили образование в его стенах. Многие из них обогатили своими открытиями отечественную науку. Среди выпускников вуза были лауреаты государственных премий, академики, руководители города и области, депутаты Государственной Думы и Совета Федерации, Герои Советского Союза, Социалистического Труда и России. Особой гордостью университета является космонавт Герой Советского Союза В.И. Пацаев.

По материалам официального сайта ПГУ
<http://www.pnzgu.ru/>