

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

№ 3 (8)

Сентябрь 2015

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

АЛЕКСЕЕВ ВАДИМ СЕРГЕЕВИЧ

Редакционная коллегия

И.Н. АНТОНОВ

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

Ю.С. АРХАНГЕЛЬСКИЙ

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

Н.В. БЕКРЕНЕВ

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

В.Б. ДЕМИДОВИЧ

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

Л.С. ЗИМИН

д.т.н., профессор, СамГТУ, Самара

Н.И. ЛОВЦОВА

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

В.Н. ЛЯСНИКОВ

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

А.Н. МАКАРОВ

д.т.н., профессор, ТГТУ, Тверь

Г.А. МОРОЗОВ

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

Ю.П. ПЕРЕЛЫГИН

д.т.н., профессор, ПГУ, Пенза

А.Н. ПЛОТНИКОВ

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

В.П. РУБЦОВ

д.т.н., профессор, НИУ «МЭИ», Москва

Ф.Н. САРАПУЛОВ

д.т.н., профессор, УрФУ, Екатеринбург

Б.К. СИВЯКОВ

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

А.А. СЫТНИК

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

Ю.Б. ТОМАШЕВСКИЙ

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

Г.Г. УГАРОВ

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

В.Н. ХМЕЛЕВ

д.т.н., профессор, БТИ, Бийск

В.А. ЦАРЕВ

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

В.С. АЛЕКСЕЕВ

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

Since November 2013
Published Quarterly

№ 3 (8)
September 2015

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

ARKHANGELSKIY YURI SERGEEVICH
BEKRENEV NIKOLAY VALERYEVICH
ALEKSEEV VADIM SERGEEVICH

Editorial Board Members

I.N. ANTONOV	Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
YU.S. ARKHANGELSKIY	Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
N.V. BEKRENEV	Dr. Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
V.B. DEMIDOVICH	Dr.Sc., Professor, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"
L.S. ZIMIN	Dr.Sc., Professor, Samara State Technical University
N.I. LOVTSOVA	Dr. Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
V.N. LYASNIKOV	Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
A.N. MAKAROV	Dr.Sc., Professor, Tver State Technical University
G.A. MOROZOV	Dr.Sc., Professor, Kazan National Research Technological University
YU.P. PERELYGIN	Dr.Sc., Professor, Penza State University
A.N. PLOTNIKOV	Dr. Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
V.P. RUBTSOV	Dr.Sc., Professor, National Research University "Moscow Power Engineering Institute"
F.N. SARAPULOV	Dr.Sc., Professor, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, Ekaterinburg
B.K. SIVYAKOV	Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
A.A. SYTNIK	Dr.Sc., Professor, First Vice-Rector, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
YU.B. TOMASHEVSKY	Dr. Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
G.G. UGAROV	Dr. Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
V.N. KHMELEV	Dr.Sc., Professor, Biysk Technological Institute
V.A. TSAREV	Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
V.S. ALEKSEEV	PhD, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОТЕРМИЯ

- Усков И.А., Фризен В.Э., Швыдкий Е.Л.** Исследование электромагнитного бокового вращателя 5
- Архангельский Ю.С.** Применение теории цепей при синтезе рабочих камер СВЧ электротермических установок и математическом моделировании термообработки в СВЧ электромагнитном поле..... 9
- Злобина И.В.** Моделирование термической обработки неоднородных композиционных материалов в СВЧ электромагнитном поле на основе критериального уравнения 16
- Морозов Г.А., Анфиногентов В.И., Морозов О.Г., Смирнов С.Н., Самигуллин Р.Р.** Адаптивные микроволновые технологические комплексы для обработки жидких смесей 23
- Фёдоров А.В., Архангельский Ю.С.** Определение погонных параметров рабочей камеры с бегущей волной на прямоугольном волноводе, работающей в многочастотном режиме 30
- Седельников Ю.Е., Потапова О.В., Халикова К.Н.** Малогабаритные сфокусированные антенны для задач СВЧ-технологий 37

ЭЛЕКТРОФИЗИКА

- Коняев А.Ю., Абдуллаев Ж.О., Багин Д.Н., Коняев И.А., Назаров С.Л.** Индукционная сортировка цветных металлов в бегущем магнитном поле 42
- Тарасов Ф.Е., Швыдкий Е.Л.** Индукционный МГД-насос с одноплоскостной концентрической обмоткой индуктора 50
- Бекренев Н.В., Злобина И.В., Фролов М.М.** Инженерный расчет технологических режимов ультразвуковой прецизионной обработки внутренних сферических поверхностей кварцевых резонаторов..... 57

ЭЛЕКТРОХИМИЯ

- Киреев С.Ю., Перелыгин Ю.П.** Методики определения общего количества электричества, затраченного на электролиз с использованием переменного тока 65
- Райгородский В.М.** Оптимизация процесса электролитического травления меди и ее сплавов..... 71

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

- Мошкин В.И., Угаров Г.Г.** О вводе сторонней механической энергии в импульсный линейный электромеханический преобразователь77
- Угаров Г.Г., Вдовина О.В., Массад А.Х.** Механическая характеристика линейного электромагнитного двигателя84

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

- Кошелев П.А., Опре В.М., Парамонов С.В., Терещенко В.Н.** Особенности проектирования силового трансформатора для системы электропитания подвижного объекта87
- Артюхов И.И., Степанов С.Ф., Ербаев Е.Т., Тулепова Г.Н., Жексембиева Н.С.** Гибридная система электроснабжения с объединенным звеном постоянного тока.....96

ЭЛЕКТРОНИКА

- Кудряшов А.Г., Сивяков Б.К.** Многосекционная фазостабильная лампа бегущей волны О-типа101

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

- Султанов Э.И.** Геометрическая прогрессия падающих и отраженных волн в теории длинной линии с распределенными параметрами107

СОЦИАЛЬНЫЙ АСПЕКТ

- Гришина Е.М.** Востребованы ли бытовые СВЧ печи?111

ЛЕТОПИСЬ

- Развитие инженерного образования (общественные слушания). Беседа с Г.В. Лобачевой.....114
- Сарапулов Ф.Н., Коняев А.Ю., Сокунов Б.А., Фризен В.Э.** История развития научного направления кафедры «Электротехника и электротехнологические системы» Уральского федерального университета 117
- Бекренев Н.В., Зорин А.И.** Лаборатория электрофизических технологий Саратовского научно-исследовательского технологического института.....126
- Архангельский Ю.С.** Вазген Рубенович Атоян135
- К сведению авторов137

CONTENTS

ELECTROTHERMY

- Uskov I.A., Frizen V.E., Shvydkiy E.L.** Research into Electromagnetic Side Stirrer 5
- Arkhangelskiy Yu.S.** Application of the Circuit Theory in Synthesizing Cameras for Microwave Electrothermal Installations and Mathematical Modeling of Heat Treatment in the Microwave Electromagnetic Field..... 9
- Zlobina I.V.** Thermal Treatment Modelling of Nonhomogeneous Composite Materials in the Microwave Electromagnetic Field using Criteria Equations 16
- Morozov G.A., Anfinogentov V.I., Morozov O.G., Smirnov S.N., Samigullin R.R.** Adaptive Microwave Technological Complexes for Processing of Liquid Mixtures..... 23
- Fedorov A.V., Arkhangelskiy Yu.S.** Determining Linear Parameters in the Working Chamber with a Traveling Wave over a Rectangular Waveguide Operating in the Multifrequency mode 30
- Sedelnikov Yu.E., Potapova O.V., Khalikova K.N.** Small-Size Focused Antennas for Microwave Technologies 37

ELECTROPHYSICS

- Konyaev A.Yu., Abdullaev Zh.O., Bagin D.N., Konyaev I.A., Nazarov S.L.** Induction Sorting of non-Ferrous Metals in the Traveling Magnetic Field 42
- Tarasov F.E., Shvydkiy E.L.** Induction MHD-Pump with a Single-Plane Concentric Coil Inductor..... 50
- Bekrenev N.V., Zlobina I.V., Frolov M.M.** Engineering Analysis of Technological Modes to Ultrasonic Assisted Precision Processing of Internal Spherical Surfaces in Quartz Resonators 57

ELECTROCHEMISTRY

- Kireev S.Yu., Perelygin Yu.P.** Methods for Determination of the Total Electric Charge Consumed in Electrolysis using the Alternating Current..... 65
- Raigorodskiy V.M.** Optimizing Electrolytic Etching of Copper and its Alloys 71

ELECTROMECHANICS

- Moshkin V.I., Ugarov G.G.** Using External Mechanical Energy in the Pulse Linear Electromechanical Converter77
- Ugarov G.G., Vdovina O.V., Massad A.Kh.** Mechanical Characteristics of the Linear Electromagnetic Engine84

ELECTRIC POWER SUPPLY

- Koshelev P.A., Opre V.M, Paramonov S.V., Tereshchenko V.N.** Design Patterns of Power Transformers for Power Supply Systems in Mobile Objects87
- Artyukhov I.I., Stepanov S.F., Erbaev E.T., Tulepova G.N., Zhexembiyeva N.S.** Hybrid Power Supply System with a Combined DC Link96

ELECTRONICS

- Kudryashov A.G., Sivyakov B.K.** O-Type Multisection Phase Stable Travelling Wave Tubes.....101

ELECTRODYNAMICS

- Sultanov E.I.** Geometric Series of Incident and Reflected Waves in the Theory of Long Lines With Distributed Parameters107

SOCIAL ASPECT

- Grishina E.M.** Are Domestic Microwave Ovens in Demand?111

CHRONICLE

- Development of engineering education (Public hearings). Interview with G.V. Lobacheva..... 114
- Sarapulov F.N., Konyaev A.Yu., Sokunov B.A., Frizen V.E.** History of Development Scientific Direction of Department of Electrical Engineering and Electro-Technological Systems of Ural Federal University.....117
- Bekrenev N.V., Zorin A.I.** Laboratory of electrophysical technology of Saratov Scientific Research Technological Institute.....126
- Arkhangelskiy Yu.S.** Vazgen Rubenovich Atoyanyan.....135
- Information for Authors137

ЭЛЕКТРОТЕРМИЯ

УДК 621.745.012

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО БОКОВОГО ВРАЩАТЕЛЯ

И.А. Усков, В.Э. Фризен, Е.Л. Швыдкий

RESEARCH INTO ELECTROMAGNETIC SIDE STIRRER

I.A. Uskov, V.E. Frizen, E.L. Shvydkiy

Приведены результаты компьютерного моделирования многофункционального плавильного агрегата, оснащенного боковым электромагнитным вращателем. Приводится сравнение с методом детализированных магнитных схем замещения (ДМСЗ).

Ключевые слова: электромагнитный вращатель, индукционная тигельная печь, электромагнитные усилия, метод конечных элементов, детализированные схемы замещения

В рамках НИР, проводимых на кафедре ЭЭТС УрФУ, разработан проект опытного образца многофункционального плавильного агрегата (МПА) оснащенного боковым электромагнитным вращателем (БЭМВ) (рис. 1). Агрегат создается на базе ИТП [1, 2] для плавки стали емкостью 0,4 т, получающей питание от преобразователя частоты мощностью 500 кВт и выходной частотой 1 кГц, основная функция которой – плавка стального лома. После установки дополнительного индуктора вращателя появляется возможность проводить специальные металлургические операции.

Создаваемое индуктором вращающееся магнитное поле приводит в движение металлический расплав в тигле с созданием воронки. Воронка является «сосудом», в котором металлургические процессы (химические, массообменные, теплообменные и т.п.) осуществляются с высокой скоростью за счет интенсивного движения металла на границе со шлаком. Питание ин-

The article contains results of computer simulation for a multifunctional melting unit equipped with an electromagnetic side stirrer. We provide a comparison with the method of detailed magnetic equivalent circuits.

Keywords: electromagnetic stirrer, induction crucible furnace, electromagnetic force, finite element method, the detailed equivalent circuit

дуктора вращателя осуществляется от источника промышленной частоты. Это связано с минимизацией затрат на реализацию проекта. Магнитопровод вращателя выполнен разомкнутым. Это обусловлено необходимостью размещения токо- и водопроводов к обмотке основного (греющего) индуктора.

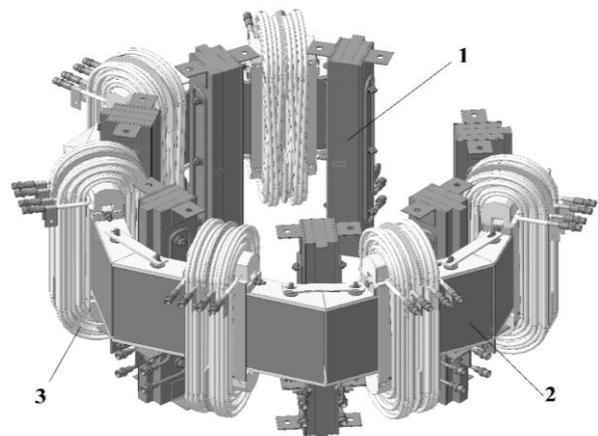


Рис. 1. Боковой ЭМВ для МПА: 1 – зубец; 2 – магнитопровод; 3 – катушка

Для верификации полученных данных проведен сравнительный анализ данных, полученных при решении задачи в COMSOL Multiphysics [3] и методом ДМСЗ.

Результатами моделирования являются ключевые параметры, необходимые для проведения гидродинамических исследований и при проектировании опытного образца ЭМВ. Ниже на рисунках представлены расчетные значения плотности тока в металле (рис. 2 и 3), Y-составляющая силы Лоренца (рис. 4 и 5) и X-составляющая силы Лоренца (рис. 6 и 7).

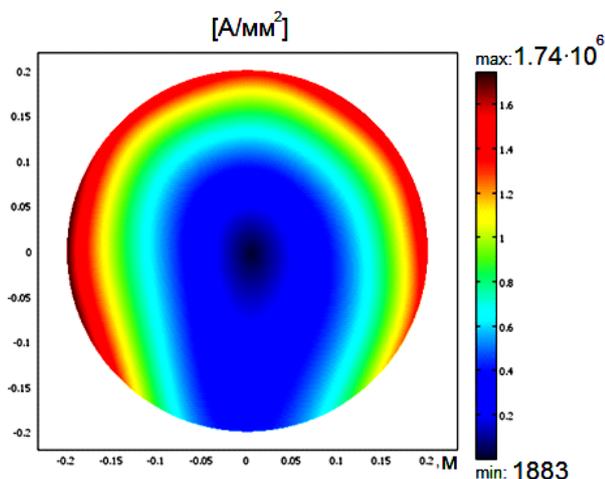


Рис. 2. Распределение плотности тока в расплаве металла

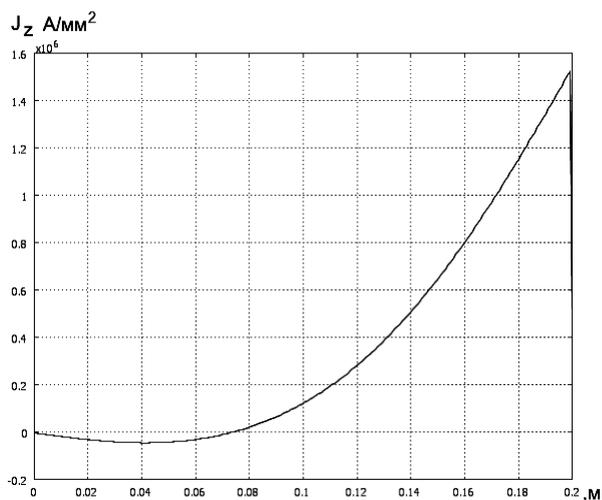


Рис. 3. График плотности тока в расплаве металла. Контур для графика Y-составляющей силы Лоренца

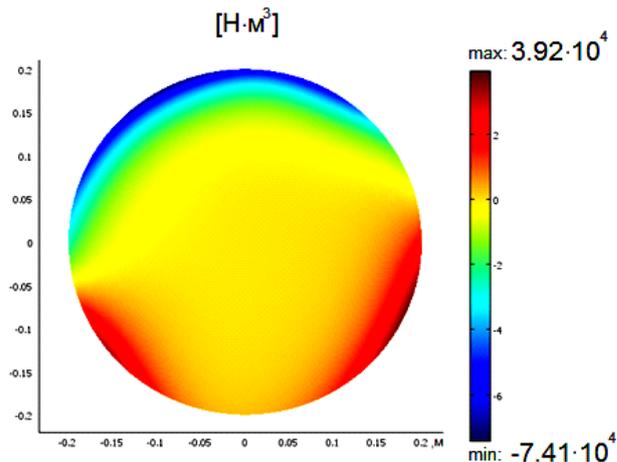


Рис. 4. Распределение Y-составляющей силы Лоренца в расплаве металла

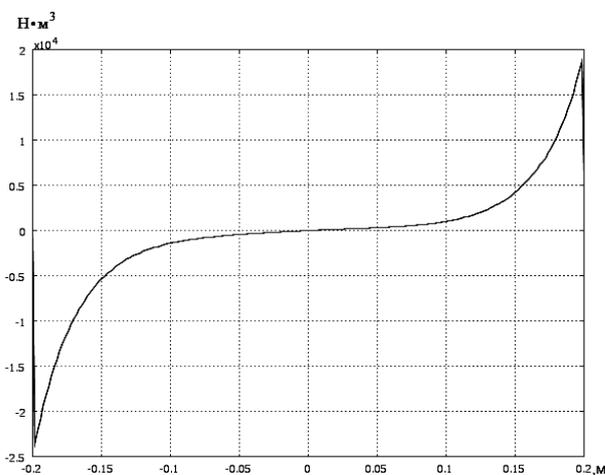


Рис. 5. График распределения Y-составляющей силы Лоренца в расплаве металла. Контур для графика X-составляющей силы Лоренца

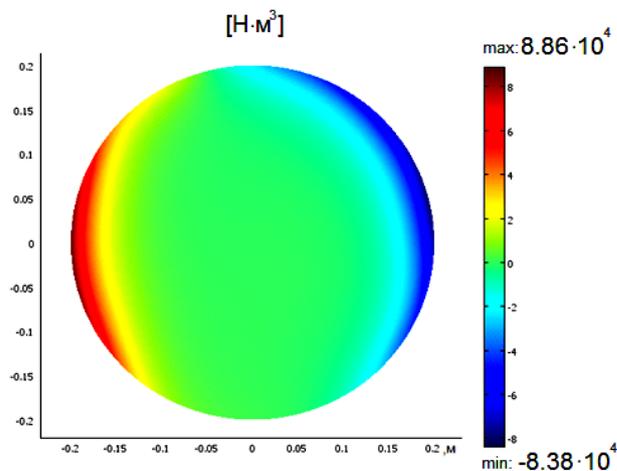


Рис. 6. Распределение X-составляющей силы Лоренца в расплаве металла

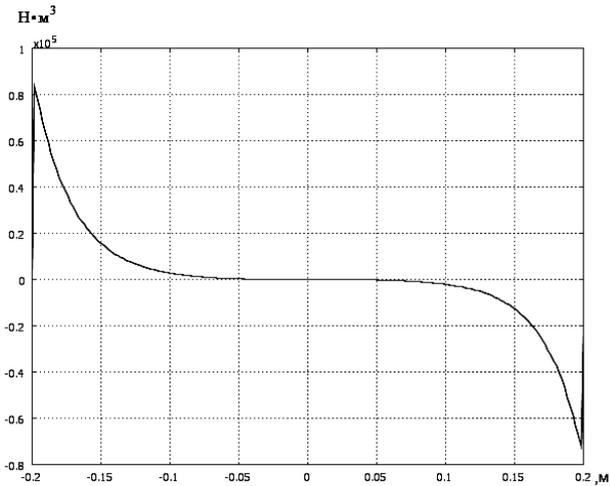


Рис. 7. График распределение X-составляющей силы Лоренца в расплаве металла

На рис. 8 показаны распределения по радиусу тигля в сечении, проходящем через середины магнитопровода и разрыва в нем, следующих величин: радиальной

(направленной по радиусу) B_n и окружной (направленной по касательной к окружности и проходящей через выбранную точку в тигле) B_t составляющих магнитной индукции; удельных радиального F_{ud} и окружного F_{tud} усилий; индуцированной плотности тока I_c .

На рис. 9 показаны распределения плотности тока по радиусам (от центра тигля до его стенки), проходящим по серединам зубцовых делений индуктора. Номер зубцового деления по окружности индуктора показан рядом с соответствующей кривой. Согласно рис. 9 разомкнутость магнитопровода существенно влияет на распределение величин по окружности (в секторе разрыва они приближаются к нулю).

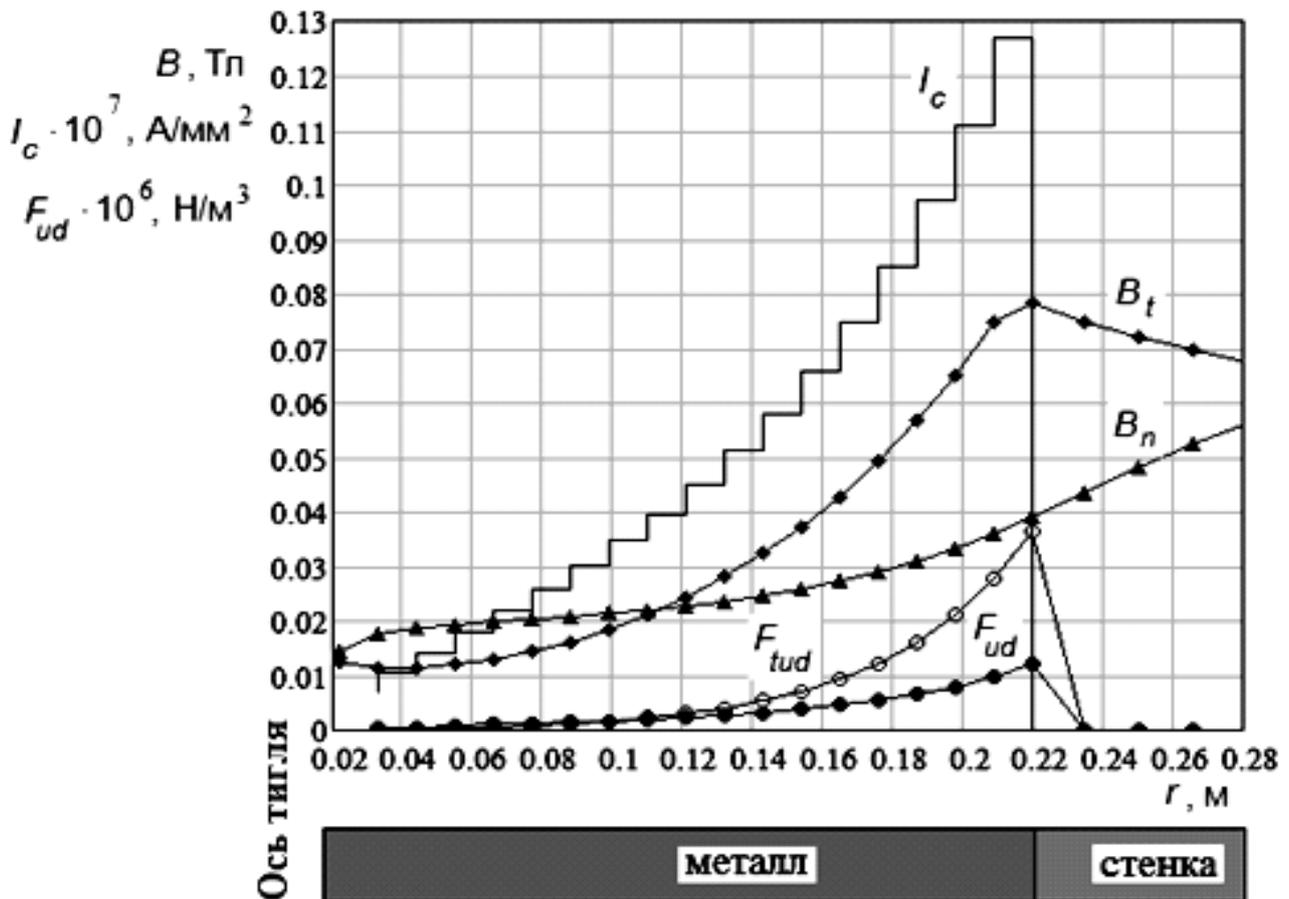


Рис. 8. Распределения индукций, удельных усилий и плотности тока по радиусу тигля

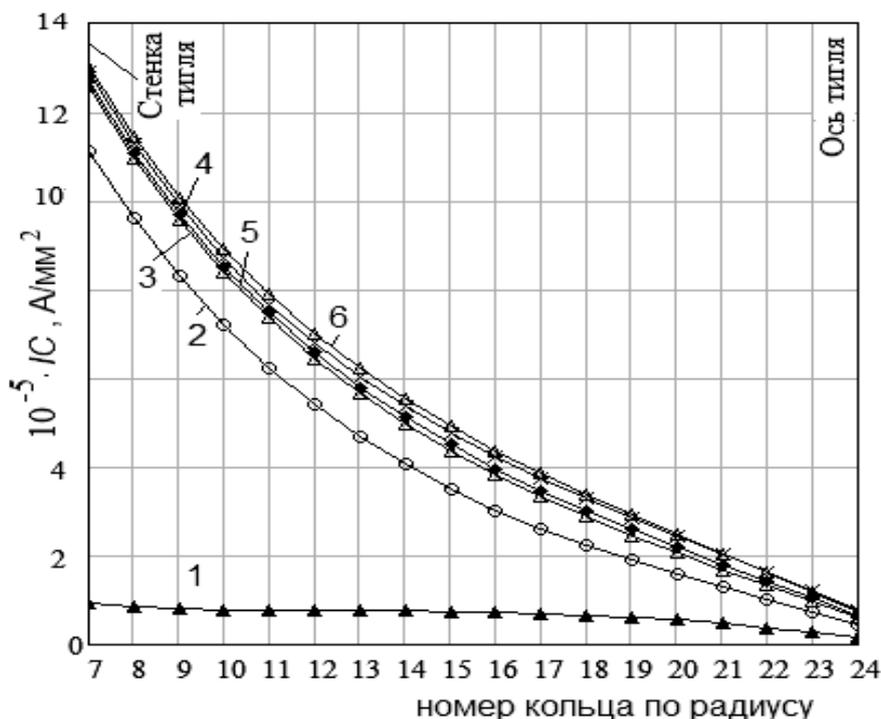


Рис. 9. Распределения плотности тока по радиусам, проходящим по серединам зубцовых делений индуктора (с 1-го по 6-й)

Параметр	ДМСЗ	COMSOL Multiphysics
Плотность тока в металле, А/мм ²	1.36·10 ⁶	1.4·10 ⁶
Магнитная индукция. Тангенциальная составляющая, Тл	0.066	0.0655
Магнитная индукция. Радиальная составляющая, Тл	0.032	0.0228

Данные таблицы говорят о том, что результаты исследований с определенной долей погрешности можно считать достоверными и использовать их в дальнейших исследованиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сарапулов Ф.Н. Многофункциональный плавильный агрегат для мини металлургических предприятий / Ф.Н. Сарапулов и др. // Промышленная энергетика. 2010. № 5. С. 7-10.
 2. Pat. RF №2207476 F 27 D 11/06, F27 B 14/06. E.A. Korshunov, F.N. Sarapulov, S.P. Burkin, A.G. Tarasov, O.A. Aragilyan, V.S. Tretyakov. Meltingunit (2003).
 3. <http://www.comsol.com/comsol-multiphysics>.
 4. Сарапулов Ф.Н. Математические модели линейных индукционных машин на основе схем замещения / Ф.Н. Сарапулов,

С.Ф. Сарапулов, П. Шымчак. Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ, 2005. 431 с.
 5. Многофункциональный плавильный агрегат на основе индукционной тигельной печи и его моделирование / Ф.Н. Сарапулов, С.Ф. Сарапулов, В.Э. Фризен, К.Е. Болотин, И.А. Усков // Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике: материалы VIII Всероссийской научно-технической интернет-конференции с международным участием (1-30 ноября 2015 г.). Изд-во Пермского национального исследовательского политехнического ун-та, 2015. С. 154-163.

Усков Илья Александрович – магистрант кафедры «Электротехника и электротехнологические системы» Уральского федерального университета

Фризен Василий Эдуардович – доктор технических наук, доцент кафедры «Электротехника и электротехнологические системы» Уральского федерального университета

Швыдкий Евгений Леонидович – магистрант кафедры «Электротехника и электротехнологические системы» Уральского федерального университета

Ива А. Uskov – Master Student, Department of Electrical Engineering and Electrotechnological Systems, Urals Federal University

Vasiliy E. Frizen – Dr. Sc., Associate Professor, Department of Electrical Engineering and Electrotechnological Systems, Urals Federal University

Evgeniy L. Shvydkiy – Master Student, Department of Electrical Engineering and Electrotechnological Systems, Urals Federal University

Статья поступила в редакцию 17.08.15, принята к опубликованию 11.09.15

УДК 621.365.5

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ЦЕПЕЙ ПРИ СИНТЕЗЕ РАБОЧИХ КАМЕР СВЧ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИХ УСТАНОВОК И МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ТЕРМООБРАБОТКИ В СВЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ

Ю.С. Архангельский

APPLICATION OF THE CIRCUIT THEORY IN SYNTHESIZING CAMERAS FOR MICROWAVE ELECTROTHERMAL INSTALLATIONS AND MATHEMATICAL MODELING OF HEAT TREATMENT IN THE MICROWAVE ELECTROMAGNETIC FIELD

Yu.S. Arkhangelskiy

Показана возможность применения теории цепей при проектировании СВЧ электротермических установок.

Ключевые слова: СВЧ электромагнитное поле, самосогласованная краевая задача электродинамики и тепломассопереноса, рабочие камеры, синтез, математическое моделирование

При проектировании СВЧ электротермических установок основное внимание приходится уделять рабочим камерам, по-

The paper shows the possibilities for using the circuits theory in designing microwave electro thermal installations.

Keywords: microwave electromagnetic field, self-consistent boundary value problem in electrodynamics and mass transfer, working chambers, synthesis, mathematical modeling

тому что в первую очередь от их параметров зависят возможности установок. Обычно речь идет о решении задачи син-

теза рабочей камеры, обеспечивающей равномерный нагрев обрабатываемого диэлектрика и максимально возможное согласование рабочей камеры с СВЧ генератором, а также задачи математического моделирования процесса термообработки. Эти решения должны учитывать взаимное влияние одновременно протекающих электродинамического и теплового процессов, и добиться этого можно, решая так называемую самосогласованную краевую задачу электродинамики и тепломассопереноса (теплопроводности). Постановка и принципиальный подход к решению этой краевой задачи приведены в [1]. Развитие и детализация этой проблемы даны в [2-5].

Наиболее трудоемкими на этом пути являются решение дисперсионного уравнения для рассматриваемых линий передачи, на которых собраны рабочие камеры, и расчет температурного поля обрабатываемого объекта. В связи с этим представляют интерес инженерные методы синтеза и математического моделирования процесса термообработки, учитывающие основные результаты строгого решения электродинамической задачи.

В основу инженерных методов расчета положены три обстоятельства, установ-

ленные при исследовании строго решения самосогласованной краевой задачи: в частично заполненной линии, на которой собрана рабочая камера: наибольшую энергию переносит квази- H_{10} волна в прямоугольном и квази- T волна в круглом и коаксиальном волноводе, нагреваемый диэлектрик обладает низкой теплопроводностью, а время нагрева меньше, чем при традиционном способе термообработки, теплообмен с окружающей средой можно не учитывать.

Но в любом случае надо знать постоянную распространения электромагнитной волны в обрабатываемом диэлектрике, а ее можно определить с помощью теории цепей (теории длинных линий) [6-9]. Рассмотрим возможности распространения теории цепей в проектировании рабочих камер СВЧ электротермических установках.

Камера с бегущей волной (КБВ). На рис. 1 показаны КБВ на прямоугольном волноводе со слоем обрабатываемого диэлектрика на широкой стенке и эквивалентная схема бесконечно малого участка линии передачи, частично заполненной средой с потерями.

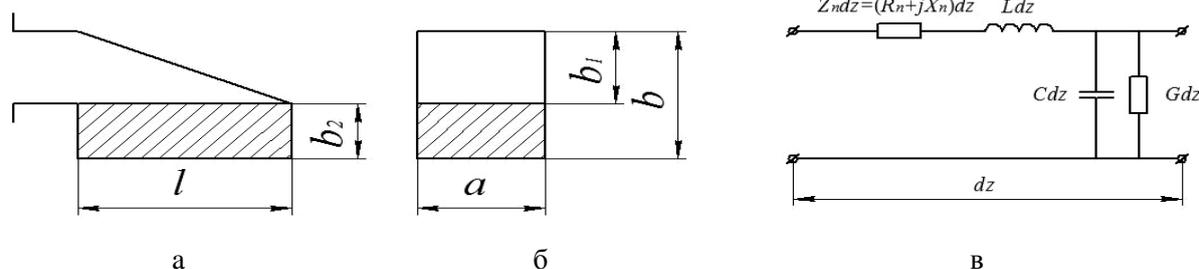


Рис. 1. Камера с бегущей волной на прямоугольном волноводе, частично заполненном обрабатываемым диэлектриком: а, б – КБВ; в – эквивалентная схема бесконечно малого отрезка волновода

Погонные параметры эквивалентной схемы должны быть определены так, чтобы постоянная распространения, найденная из эквивалентной схемы, равнялась постоянной распространения той же волны, найденной из соответствующего дисперсионного уравнения. Решения дисперсионного уравнения можно избежать, если учесть, что при $|\epsilon_2| \gg 1$

что обычно имеет место, энергия вдоль волновода переносится в основном квази- H_{10} волной [2], то есть по аналогии с теорией скин-эффекта будем считать, что волна над поглощающим диэлектриком распространяется вдоль волновода, а в обрабатываемом слое – перпендикулярно границе раздела сред. В таком случае [2]

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

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

(1)

где λ – длина волны генератора; a – размер широкой стенки волновода КБВ; ε'_2 и $\operatorname{tg} \delta_2$ – относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектри-

ческих потерь обрабатываемого диэлектрика; F_R и F_X – функции, представленные на рис. 2.

Так как у воздушного слоя в волноводе $\varepsilon'_1 = 1$; $\operatorname{tg} \delta_1 = 0$, то $G = 0$, тогда как [2]

$$C = \frac{a}{60\pi^2 c b_1} \left[1 - \left(\frac{\lambda}{2a} \right)^2 \right];$$

$$L = \frac{60\pi^2 b_1}{ca},$$

(2)

где c – скорость света; $b_1 = b - b_2$ – толщина воздушного слоя; b – размер узкой стенки волновода; b_2 – толщина слоя обрабатываемого диэлектрика.

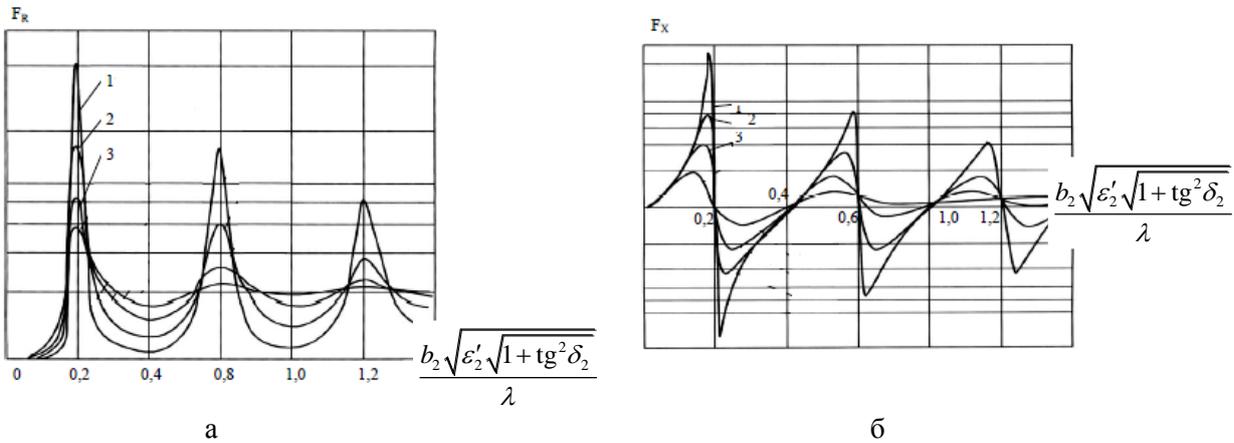


Рис. 2. Зависимости F_R и F_X для прямоугольного волновода со слоем поглощающего диэлектрика на широкой стенке (1, 2, 3... – значения $\operatorname{tg} \delta_2$)

КБВ представляет собой короткозамкнутую неоднородную линию длиной l , один из проводников которой обладает погонными параметрами $R_n + jX_n$ (рис. 1).

С помощью уравнений длинных линий [1] нетрудно получить уравнение Рикатти для $Z_{\text{вх}}(z)$ рассматриваемого волновода:

$$\frac{dZ_{\text{вх}}(z)}{dz} = R_n + jX_n + j\beta \frac{Z_0^2(z) - Z_{\text{вх}}^2(z)}{Z_0(z)}, \quad (3)$$

при чем $Z_0 = Z_0 \sqrt{1 + \frac{X_n - jR_n}{\beta Z_0}}$ – ком-

плексное волновое сопротивление волновода со слоем поглощающего диэлектрика в сечении z ; Z_0 – волновое сопротивление того же волновода в отсутствии потерь.

Поскольку обычно $\frac{b_2}{\lambda} \sqrt{\varepsilon'_2 \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta_2}}$ выбирают равным 0,4, чтобы $X_n \ll R_n$, то (3) можно переписать

$$\frac{dZ_{\text{вх}}(z)}{dz} = R_n + jX_n + j\beta \frac{Z_0^2(z) - (R_n z)^2}{Z_0(z)}, \quad (4)$$

а так как $Z_{\text{вх}}(0) = 0$, то из (4)

$$Z_{\text{вх}}(z) = \int_0^z (R_n + jX_n) dz + j\beta \int_0^z \frac{Z_0^2(z) - (R_n z)^2}{Z_0(z)} dz. \quad (5)$$

Для полного согласования КБВ с линией передачи, соединяющей КБВ с генератором, необходимо, чтобы

$$\operatorname{Im} Z_{\text{вх}}(l) = 0,$$

$$\operatorname{Re} Z_{\text{вх}}(l) = Z_0, \quad (6)$$

где Z_0 – волновое сопротивление линии передачи.

Условия (6) выполняются при

$$Z_0(z) = -\frac{\Lambda}{4\pi} X_n + \sqrt{\left(\frac{\Lambda}{4\pi} X_n\right)^2 + (R_n z)^2}, \quad (7)$$

где Λ – длина волны в волноводе сечением $a \times b$, так что из (7)

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

Что касается погонной мощности потерь, то [1, 2]

$$P_n(z) = \frac{PR_n}{\operatorname{Re} Z_{\text{вх}}(l)} \exp \left[2\beta \int_z^l \frac{\operatorname{Im} Z_{\text{вх}}(z)}{Z_0(z)} dz \right]. \quad (9)$$

Итак, полученные с помощью теории цепей соотношения (3)-(7) с учетом (1), (2) дают возможность рассчитать геометрию КБВ, причем, оптимизируя b_2 , можно обеспечить выполнение условия (6), то есть получить полное согласование КБВ с линией передачи, и при выполнении профиля неоднородного волновода КБВ согласно (8) по (9) получим равномерное тепловыделение по длине рабочей зоны КБВ ($P_n = P/l$).

Отклонение от полного согласования и равномерного нагрева в первую очередь может наступить из-за зависимостей $\varepsilon'_2(T)$ и $\operatorname{tg} \delta_2(T)$, где T – температура обрабатываемого диэлектрика. Приведенные соотношения позволяют найти зависимость коэффициента отражения $\Gamma[T(t)]$ и КПД по использованию СВЧ мощности $\eta[T(t)] = 1 - |\Gamma(t)|^2$.

Подобные расчеты на базе теории цепей могут быть выполнены для КБВ на круглом и коаксиальном волноводах.

Камера лучевого типа (КЛТ). На рис. 3 показаны КЛТ с пирамидальным рупорным излучателем.

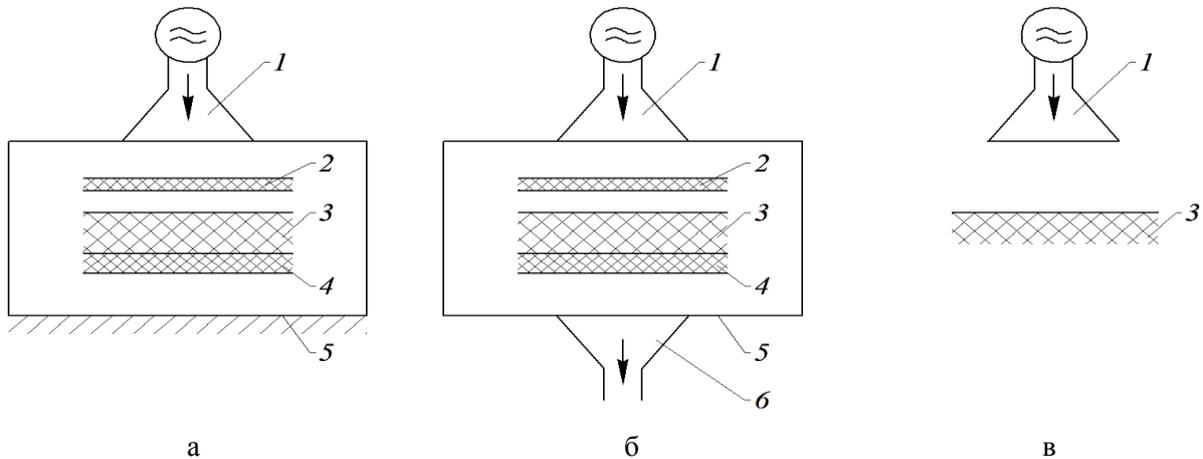


Рис. 3. Камеры лучевого типа: а, б – КЛТ с ограниченным объемом; в – КЛТ с неограниченным объемом (1 – рупорный излучатель, 2 – согласующий четвертьволновый трансформатор, 3 – обрабатываемый диэлектрик, 4 – транспортная лента (подложка), 5 – металлическая стенка КЛТ, 6 – приемный рупор)

В отношении КЛТ теория цепей позволяет в первую очередь обеспечить согласование КЛТ с линией передачи, соединяющей рабочую камеру с СВЧ генератором.

Электромагнитная волна, падающая из излучающего рупора на поверхность обрабатываемого диэлектрика, частично отра-

жается, что приводит к уменьшению КПД по использованию СВЧ мощности (уменьшению энергетической эффективности установки).

КПД можно повысить с помощью согласующего четвертьволнового трансформатора [10]. Такие трансформаторы широко

применяются в технике СВЧ для согласования линий передачи. Согласующий трансформатор в этом случае представляет собой линию передачи того или иного типа длиной в четверть длины волны в этой линии. В КЛТ согласующий трансформатор – слой диэлектрика без потерь с относительной диэлектрической проницаемостью, подлежащий расчету, и длиной в $\Lambda/4$, где Λ – длина волны в диэлектрике, представляющем собой согласующий трансформатор. Теория таких трансформаторов приведена, например, в [11]. Так, волновое сопротивление диэлектрика в четвертьволновом слое 2 (рис. 3) должно быть равным

$$Z_{0г} = \sqrt{Z_{0в} Z_{вх}}, \quad (10)$$

где $Z_{0в} = 377$ Ом – волновое сопротивление воздушного слоя между рупором и слоем диэлектрика трансформатора; $Z_{вх}$ – входное сопротивление совокупности слоев (слой воздуха между трансформатором и обрабатываемым слоем, обрабатываемый диэлектрик, подложка, слой воздуха за подложкой).

Расчет $Z_{вх}$ проводится последовательно, начиная с определения входного сопротивления нижнего слоя воздуха. В КЛТ, показанной на рис. 3 а, оно равно $Z_{вх1} = j Z_0 \operatorname{tg} \beta_1 l_1$, где Z_0 – волновое сопротивление воздуха; l_1 – толщина нижнего воздушного слоя. $Z_{вх1}$ является нагрузкой слоя, представляющего собой подложку, так что входное сопротивление системы двух нижних слоев равно

$$Z_{вх2} = Z_{02} \frac{Z_{вх1} + Z_{02} \operatorname{th} \gamma_2 l_2}{Z_{02} + Z_{вх1} \operatorname{th} \gamma_2 l_2}, \quad (11)$$

где $Z_{02} = \frac{377}{\sqrt{(1 - j \operatorname{tg} \delta_2) \epsilon'_2}}$ – волновое сопротивление слоя подложки; γ_2 , l_2 – постоянная распространения и толщина слоя подложки.

В свою очередь, входное сопротивление системы трех нижних слоев с учетом слоя обрабатываемого диэлектрика равно

$$Z_{вх3} = Z_{03} \frac{Z_{вх2} + Z_{03} \operatorname{th} \gamma_3 l_3}{Z_{03} + Z_{вх2} \operatorname{th} \gamma_3 l_3} = \operatorname{Re} Z_{вх3} + j \operatorname{Im} Z_{вх3}, \quad (12)$$

где $Z_{03} = \frac{377}{\sqrt{(1 - j \operatorname{tg} \delta_3) \epsilon'_3}}$ – волновое сопротивление слоя обрабатываемого диэлектрика.

Так как $Z_{вх3}$ по (12) имеет как активную, так и реактивную составляющую, над обрабатываемым диэлектриком должен быть отрезок линии длиной l_4 с воздушным заполнением, входное сопротивление которого $Z_{вх}$ является чисто активным, как это требуется для выполнения условия (10). В таком случае входное сопротивление системы четырех нижних слоев будет равно

$$Z_{вх4} = Z_{04} \frac{Z_{вх3} + Z_{04} \operatorname{th} \beta_1 l_4}{Z_{04} + Z_{вх3} \operatorname{th} \beta_1 l_4} = \operatorname{Re} Z_{вх4} + j \operatorname{Im} Z_{вх4},$$

причем

$$\begin{aligned} Z_{вх} &= \operatorname{Re} Z_{вх4}; \\ \operatorname{Im} Z_{вх4} &= 0. \end{aligned} \quad (13)$$

Из второго уравнения в (13) определяется расстояние l_4 , на котором над обрабатываемым диэлектриком размещается согласующий трансформатор, а из (10) с учетом первого уравнения в (13) – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика согласующего трансформатора, которая равна

$$\epsilon'_4 = \sqrt{\frac{377}{\operatorname{Re} Z_{вх4}}}, \quad (14)$$

причем $l_4 = \frac{\Lambda}{4\sqrt{\epsilon'_4}}$.

Таким образом, теория цепей позволяет рассчитать геометрию КЛТ и ϵ'_4 , дающие полное согласование КЛТ с линией передачи. Вопрос, в конечном счете, идет о том, удастся ли подобрать для четвертьволнового согласующего трансформатора диэлектрик с ϵ'_4 , рассчитанной по (14). Отклонение величины ϵ'_4 от расчетной на 60% приводит к уменьшению энергетической эффективности на 5-18% от ее максимальной величины [4].

Наконец, теория цепей позволяет, например, провести математическое моделирование нагрева диэлектрика в КЛТ, показанной на рис. 3 в, с учетом изменения ϵ'

и $\operatorname{tg} \delta$ обрабатываемого диэлектрика от температуры.

Пусть СВЧ мощность P , длина электромагнитной волны λ , сечение апертуры рупора axa , излучение по апертуре равномерное, тогда в диэлектрик пройдет СВЧ мощность

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

где $\Gamma = \frac{Z_{\text{вх}} - Z_0}{Z_{\text{вх}} + Z_0}$ – коэффициент отражения

от обрабатываемого диэлектрика; $Z_{\text{вх}}$ – входное сопротивление бесконечно длинной линии, заполненной обрабатываемым диэлектриком, $Z_0 = 377$ Ом.

Разобьем глубину проникновения электромагнитной волны в обрабатываемом диэлектрике

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

на n плоских слоев толщиной $l = \delta_E / n$.

Будем считать, что самый глубокий слой нагружен однородным диэлектриком с начальной температурой. Тогда по аналогии с расчетом КЛТ, показанной на рис. 3 а, б, можно рассчитать $Z_{\text{вх}}$ на входе системы, состоящей из n слоев, затем рассчитать Γ и КПД η .

Рассчитывая далее величину СВЧ мощности в каждом из n слоев

$$\Delta P_2 = P_{\text{прои}} e^{-2\alpha l_i} - P_{\text{прои}} e^{-2\alpha l_{i+1}},$$

где $\alpha = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{2\varepsilon'(\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} - 1)}$ – коэффициент затухания в данном слое диэлектрика; l_i, l_{i+1} – координаты начала и конца i -го слоя диэлектрика, можно найти температуру этого слоя

$$T_i = T_{i+1} + \frac{\Delta P_i t}{c \rho V},$$

где c, ρ – удельная теплоемкость и плотность обрабатываемого диэлектрика; $V = a^2 l$ – объем диэлектрика в одном слое, нагреваемом излучением рупорного излучателя.

Увеличивая с каким-либо шагом время нагрева t , учитывая всякий раз изменения $\varepsilon'(T)$ и $\operatorname{tg} \delta(T)$ по каждому слою, можно учесть изменения $T(z)$ и η во времени.

Таким образом, применение теории цепей позволяет проводить инженерный синтез КБВ, КЛТ и математическое моделирование термообработки диэлектриков.

Приведенные соотношения позволяют учитывать изменения диэлектрических параметров обрабатываемого диэлектрика от температуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Архангельский Ю.С.** Сверхвысоко-частотные нагревательные установки для интенсификации технологических процессов / Ю.С. Архангельский, И.И. Девяткин. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1983. 140 с.

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

3. **Архангельский Ю.С.** СВЧ электротермические установки лучевого типа / Ю.С. Архангельский, С.В. Тригорлый. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2000. 122 с.

4. **Архангельский Ю.С.** Камеры лучевого типа СВЧ электротехнологических установок / Ю.С. Архангельский, К.Н. Огур-

цов, Е.М. Гришина. Саратов: Полиграфиз Поволжья, 2010. 229 с.

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

6. **Зевеке Г.В.** Основы теории цепей / Г.В. Зевеке и др. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963.

7. **Нейман М.С.** Обобщение теории цепей на волновые процессы / М.С. Нейман. М., Л.: Госэнергоиздат, 1956.

8. **Schelkunoff S.A.** Conversion of Maxwell's endnation into generalized telegraphist's / S.A. Schelkunoff // Bell. Syst. Techn. Journal. 1956. № 5. P. 995-1045.

9. **Бова Н.Т.** Методы анализа устройств СВЧ / Н.Т. Бова, Ю.В. Толстикова. Киев: Техника, 1976.

10. **Гришина Е.М.** Повышение энергетической эффективности установок СВЧ диэлектрического нагрева с камерами лучевого типа / Е.М. Гришина // Проблемы

электротехники, электроэнергетики и электротехнологии: труды II Всерос. науч.-техн. конф. Ч. 2. Тольятти, 2007. С. 215-222.

11. **Лебедев И.В.** Техника и приборы СВЧ / И.В. Лебедев. М.: Высшая школа, 1972. Т. 1. 365с.

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

Статья поступила в редакцию 14.08.15, принята к опубликованию 11.09.15

К СВЕДЕНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НЕОДНОРОДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В СВЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ НА ОСНОВЕ КРИТЕРИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ

И.В. Злобина

THERMAL TREATMENT MODELLING OF NONHOMOGENEOUS COMPOSITE MATERIALS IN THE MICROWAVE ELECTROMAGNETIC FIELD USING CRITERIA EQUATIONS

I.V. Zlobina

Предложен новый подход к разработке модели СВЧ термической обработки неоднородных по структуре и свойствам композиционных материалов на основе полученного по специальному алгоритму критериального уравнения процесса их нагрева.

Ключевые слова: *неоднородная структура, СВЧ диэлектрический нагрев, критериальное уравнение*

Для разработки и внедрения перспективной техники требуются новые материалы, обладающие заданным комплексом свойств, например, композиционные неметаллические материалы. Применение электрофизических технологий в производстве изделий из таких материалов позволяет не только сформировать требуемую форму с заданной точностью, но и оказывать дополнительное модифицирующее действие, что делает возможным управлять свойствами материала в процессе обработки изделия.

Применение сверхвысокочастотного (СВЧ) электромагнитного поля для тепловой обработки композиционных материалов позволяет интенсифицировать процесс и повысить степень равномерности обработки вследствие объемного характера тепловыделения. Сейчас создана теория СВЧ нагрева диэлектрических материалов, основанная на решении краевой задачи электродинамики и тепломассопереноса в СВЧ электромагнитном поле и разработаны на-

The paper presents a new approach to the development of a microwave model for the heat treatment of composite materials non-uniform in structure or properties. This approach is based on the criteria equation developed for the thermal treatment process is received using a special algorithm.

Keywords: *non-uniform structure, microwave dielectric heating, criteria equation*

учные основы расчета СВЧ камер различного типа [1-4].

Однако ряд вопросов технологического применения СВЧ энергии требует решения, в том числе теоретико-экспериментального обоснования равномерного СВЧ нагрева неоднородных композиционных материалов, например органических, состоящих из матрицы с распределенными в ее объеме одним или несколькими компонентами.

Наличие в объеме материала компонентов с различными диэлектрическими свойствами вызывает неравномерное поглощение СВЧ мощности и соответственно тепловыделение по объему обрабатываемого объекта, что затрудняет достижение требуемых характеристик. Известные подходы к разработке моделей СВЧ диэлектрического нагрева неоднородных композиций материалов с применением уравнений Максвелла и тепломассопереноса Лыкова-Михайлова являются сложными для анализа процесса и расчета оптимальных технологических режимов [1].

Таким образом, разработка методов повышения равномерности СВЧ диэлектрического нагрева неоднородных композиций органических материалов является актуальной.

Для получения зависимостей, позволяющих определять влияние того или иного режимного фактора на тепловыделение в СВЧ электромагнитном поле, предлагается использовать подход, основанный на составлении критериального уравнения, связывающего температуру и время обработки изделий с их теплофизическими и механическими параметрами и позволяющего определить минимальную требующуюся для обработки СВЧ мощность [5, 6].

Так, был разработан алгоритм, включающий следующие этапы: выбор параметров, влияющих на удельные затраты энергии при термической обработке (удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности, СВЧ мощность, температура и время обработки); представление взаимосвязи параметров процесса в виде степенной мультипликативной функции; представление параметров процесса в мультипликативной функции основными единицами системы СИ; решение характеристического уравнения процесса, составленного через основные единицы СИ, относительно характеристических коэффициентов с учетом допущения, что при одинаковых основаниях показатели степени равны; запись критериального уравнения процесса через выражения характеристических коэффициентов, определяемых экспериментально; решение критериального уравнения при заданном уровне энергопотребления относительно удельной СВЧ мощности или напряженности электромагнитного поля [6].

Для получения исходных данных, используемых при составлении критериального уравнения, и экспериментальной проверки его адекватности изучали влияние режимов СВЧ диэлектрического нагрева на кинетику свойств изделий, а также состав, структуру, механические, теплофизические, химические и электрофизические свойства исследуемых композиций. В экспериментах по СВЧ обработке использовали специальную экспериментальную установку с регу-

лируемой мощностью магнетрона. Температуру образцов измеряли электронным термометром ЛТ-300. Для изучения структуры использовали микроскоп МБС-6 при 12-кратном увеличении, оснащенный насадкой с цифровым фотоаппаратом Canon PowerShot A2500. Полученные изображения транслировали в компьютерный анализатор изображений микроструктур АГПМ-6М, где выполняли их обработку в программе «Metallograph». При выполнении исследований электрофизических свойств материалов использовали метод двух толщин (волноводный метод), реализованный в экспериментальной установке, с использованием двойного волноводного тройника, при помощи которого поэтапно снимали температурную зависимость электрофизических параметров диэлектрика.

В качестве объекта исследований выбрана композиция, состоящая из гранулированного органического полимера в качестве матрицы с распределенным компонентом в виде микропорошка с размерами частиц 0,05-0,1 мм. Массовая доля микропорошка относительно матрицы составляла не более 20% [6].

На первом этапе экспериментально определяли физико-механические, тепло- и электрофизические характеристики обрабатываемого объекта.

Изменение удельной теплоемкости c и коэффициента теплопроводности λ чистой матрицы и с различной концентрацией введенного компонента от температуры нагрева представлено в таблице. Зависимость температуропроводности от времени нагрева для всех категорий образцов достаточно точно аппроксимируется линейной функцией. При этом концентрация введенного компонента оказывает меньшее влияние на зависимость, чем сам факт его присутствия в матрице.

Согласно таблице удельная теплоемкость c и коэффициент теплопроводности λ образцов с повышением концентрации вводимой добавки уменьшаются. Это может быть связано с отличием величин c и λ частиц дополнительного компонента и матрицы. Увеличение концентраций компонента приводит к росту изменения c и λ .

Влияние состава материала и температуры нагрева на удельную теплоемкость c и коэффициент теплопроводности λ

Параметры	Матрица			Концентрация 20%			Концентрация 5%		
	70	80	90	70	80	90	70	80	90
$t, ^\circ\text{C}$	70	80	90	70	80	90	70	80	90
$c, \text{Дж/кг}\cdot^\circ\text{C}$	2700	2670	2650	2620	2600	2550	2650	2620	2600
$\lambda, \text{Вт/м}\cdot^\circ\text{C}$	0,412	0,428	0,44	0,39	0,42	0,43	0,41	0,426	0,44

Из-за скоротечности процесса СВЧ нагрева нельзя отследить полностью его кинетику по достаточному количеству точек, и поэтому эксперименты проводили при конвективном нагреве образцов. Данные фиксировались с интервалом в 5 мин. Установлено, что коэффициент температуропроводности α возрастает при уменьшении дисперсности гранул матрицы, что можно объяснить более высокой интенсивностью процессов, за счет большей гомогенности системы. Удельная температуропроводность α снижается при введении добавочного компонента [6].

Эмпирические зависимости коэффициента температуропроводности от времени соответственно для матрицы и композиции имеют вид

$$\alpha_M = 9,8 - 0,02 \tau, \quad (1)$$

$$\alpha_K = 9,59 - 0,023 \tau. \quad (2)$$

Поскольку процесс СВЧ нагрева диэлектрических материалов характеризуется смещением зарядов и связанных с ними молекул (поляризация с образованием диполей) при воздействии на вещество (продукт) сверхвысокочастотного электромагнитного поля, то для кинетики процесса СВЧ диэлектрического нагрева имеют значение такие электрофизические характеристики объекта воздействия, как относительная диэлектрическая проницаемость ϵ' и тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta$ [1]. При этом вследствие имеющего место затухания электромагнитного поля в материале (как любого волнового процесса), интенсивность его воздействия будет снижаться с увеличением поперечных размеров изделия, что приведет к неравномерности нагрева. Исследования проводили методом двух толщин [4]. В эксперименте ис-

пользовали специальную лабораторную установку.

Обработку результатов измерений ϵ' и $\text{tg } \delta$ проводили по специальной программе Visual Basic [4], получили расчетные значения относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь образцов мясного фарша с добавкой муки нута: относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon' = 42,4$; $\epsilon'' = 33,1$; тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta = 0,78$.

При наличии в матрице дополнительного компонента в ходе термической обработки происходит изменение исходной плотности композиции. Метод двух толщин применили к образцам с различной плотностью, что позволило получить эмпирические зависимости диэлектрических свойств композиции от плотности структуры ρ :

$$\epsilon' = 0,025 \rho^{1,1}, \quad (3)$$

$$\text{tg } \delta = 190,16 \rho^{-0,853}. \quad (4)$$

Что касается алгоритма разработки искомого критериального уравнения, то предлагаются следующие составляющие алгоритма:

1. Удельные затраты энергии \mathcal{E} (Дж/кг) на процесс обработки как определяемый параметр приняли зависящими от c – удельной теплоемкости, Дж/кгК; λ – коэффициента теплопроводности, Вт/мК; ρ – плотности, кг/м³; N – СВЧ мощности, Вт; T – температуры, необходимой для модифицирования объекта, К; τ – времени обработки объекта, с.

Теплофизические параметры объекта выбираются как средние значения в диапазоне температур процесса обработки на основании экспериментальных данных, приведенных выше.

2. Зависимость энергопотребления от характеристических параметров имеет вид

$$\Theta = f(c, \lambda, \rho, N, T, \tau), \quad (5)$$

которую, в свою очередь, на основании теоремы подобия можно представить степенной мультипликативной функцией:

$$\Theta = A(c^\alpha \lambda^\beta \rho^\gamma N^x T^y \tau^z), \quad (6)$$

где A – коэффициент скорости процесса; $\alpha, \beta, \gamma, x, y, z$ – характеристические коэффициенты процесса, определяемые экспериментально.

3. Параметры процесса представим через основные единицы СИ следующим образом [7]:

$$\begin{aligned} [\Theta] &= \text{Дж/кг} = \text{кгм}^2\text{с}^{-2}\text{кг}^{-1} = \text{м}^2\text{с}^{-2}; \\ [A] &= \text{безразмерный коэффициент} \\ [c] &= \text{Дж/(кгК)} = \text{м}^2\text{с}^{-2}\text{К}^{-1}; \\ [\lambda] &= \text{Вт/(мК)} = \text{Дж/(смК)} = \text{кгмс}^{-3}\text{К}^{-1}; \\ [\rho] &= \text{кг/м}^3; \\ [N] &= \text{Вт} = \text{кгм}^2\text{с}^{-3}; \\ [T] &= \text{К}; \\ [\tau] &= \text{с}. \end{aligned}$$

4. Зависимость (5) записали через основные единицы СИ:

$$\begin{aligned} \text{м}^2\text{с}^{-2} &= (\text{м}^2\text{с}^{-2}\text{К}^{-1})^\alpha (\text{кг}\cdot\text{м}\cdot\text{с}^{-3}\text{К}^{-1})^\beta \\ &(\text{кг}\cdot\text{м}^{-3})^\gamma (\text{кг}\cdot\text{м}^2\text{с}^{-3})^x (\text{К})^y (\text{с})^z. \end{aligned} \quad (7)$$

5. При преобразовании функции (6) исходим из того положения, что при одинаковых основаниях показатели степени равны.

С учетом этого составили систему уравнений:

$$\begin{aligned} (\text{кг}): \quad & 0 = \beta + \gamma + x; \\ (\text{м}): \quad & 2 = 2\alpha + \beta - 3\gamma + 2x; \\ (\text{с}): \quad & -2 = -2\alpha - 3\beta - 3x + z; \\ (\text{К}): \quad & 0 = -\alpha - \beta + y. \end{aligned} \quad (8)$$

Выразили коэффициенты γ, x, y, z через α и β :

$$\begin{aligned} \gamma &= -0,4 + 0,4\alpha - 0,2\beta; \\ x &= 0,4 - 0,4\alpha - 0,8\beta; \\ y &= \alpha + \beta; \\ z &= -0,8 + 0,8\alpha + 0,6\beta. \end{aligned} \quad (9)$$

6. Подставив значения коэффициентов (9) в (6), получим искомое критериальное уравнение:

$$\Theta = A c^\alpha \lambda^\beta \rho^{-0,4+0,4\alpha-0,2\beta} N^{0,4-0,4\alpha-0,8\beta} \cdot t^{\alpha+\beta} \tau^{-0,8+0,8\alpha+0,6\beta}. \quad (10)$$

Найденные экспериментально для исследованных составов композиций характеристические коэффициенты равны:

$$\begin{aligned} A &= 0,22 - 0,63 = -0,41; \\ \alpha &= 0,64 - 0,67 = -0,03; \\ \beta &= 0,23 - 0,36 = -0,13. \end{aligned}$$

Согласно [1] удельная поглощенная мощность СВЧ электромагнитных колебаний зависит от диэлектрических свойств среды, частоты излучения и напряженности E электромагнитного поля:

$$P_{\text{уд}} = 0,5\omega\varepsilon_0\varepsilon' \text{tg}\delta f |E|^2, \quad (11)$$

где $\omega = 2\pi f$ – круговая частота; f – частота электромагнитного поля; ε_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума; E – напряженность электромагнитного поля.

Уравнение (10) позволяет описать физику процесса СВЧ диэлектрического нагрева композиционных материалов, но не вполне удобно для практического использования при выборе режимов тепловой обработки. Поэтому целесообразно модифицировать полученное нами критериальное уравнение. После преобразований с учетом характеристических коэффициентов уравнение (10) может быть приведено к виду

$$\Theta^{0,8} \left(\frac{\rho}{N} \right)^{0,4} = A \left[ct \left(\frac{\rho}{N} \right)^{0,4} \tau^{0,8} \right]^\alpha \left[\frac{\lambda t}{\rho^{0,2} N} \tau^{0,6} \right]^\beta, \quad (12)$$

где Θ – удельные затраты энергии на процесс термической обработки исследуемого объекта; c – удельная теплоемкость; λ – коэффициент теплопроводности; ρ – плотность; N – подводимая мощность; t – температура обработки объекта; τ – время обработки объекта; A – коэффициент скорости процесса; α и β – характеристические коэффициенты процесса.

Данное уравнение можно преобразовать с учетом того, что в технологии обработки материалов путем СВЧ диэлектрического нагрева основным режимным параметром является удельная мощность тепловых потерь, связанная с подводимой мощностью соотношением

$$N = P_{y\partial} V, \quad (13)$$

где $P_{y\partial}$ – удельная мощность; $V = m / \rho$ – объем обрабатываемого объекта; m – масса объекта нагрева.

$$\varepsilon \tau^{0,8} \left(\frac{\rho^2}{P_{y\partial} m} \right)^{0,4} = 0,22 \left[ct \left(\frac{\rho^2}{P_{y\partial} m} \right)^{0,4} \tau^{0,8} \right]^{0,64} \left[\frac{\rho^{0,8}}{P_{y\partial} m} \lambda t \tau^{0,6} \right]^{0,23}. \quad (14)$$

Решив уравнение (14) относительно $P_{y\partial}$, получим зависимость, по которой можно определить удельную мощность СВЧ термической обработки композиционного материала с учетом его состава и требований к результатам обработки:

$$P_{y\partial} = \frac{0,22 \cdot 10^{-7} t^{10,12} c^{7,4} \lambda^{2,67}}{\varepsilon^{11,63} \tau^{1,74} \rho^{1,21} m}. \quad (15)$$

Если раскрыть в выражении (15) $P_{y\partial}$ в соответствии с (11) при $f = 915$ МГц, то

Подставив (13) в (12) с учетом полученных экспериментальных зависимостей теплофизических и электрофизических характеристик и приняв минимальные значения характеристических коэффициентов, окончательно получим критериальное уравнение СВЧ диэлектрического нагрева выбранного композиционного материала в следующем виде:

$$E = 1,29 \cdot 10^3 \frac{t^{1,47} c^{1,47} \lambda^{0,79}}{f^{0,478} \varepsilon^{2,178} \tau^{0,1} \rho^{1,87} V^{0,5}}. \quad (16)$$

Это выражение может быть использовано для расчета геометрии СВЧ рабочей камеры либо для выбора напряженности в зависимости от плотности обрабатываемого материала, что важно для управления процессом с учетом изменения плотности композитов в СВЧ электромагнитном поле. Расчетная зависимость напряженности СВЧ электромагнитного поля от плотности показана на рис. 1.

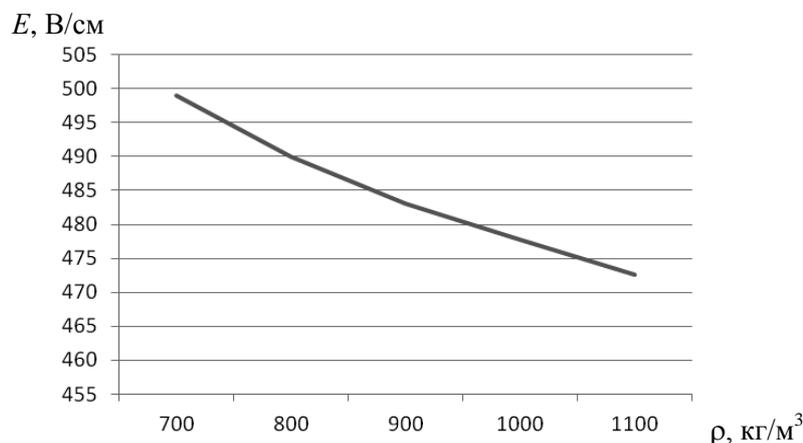


Рис. 1. Влияние плотности обрабатываемого объекта на требуемую напряженность электромагнитного поля

Как видно из выражений (15) и (16), наибольшее влияние на режимы СВЧ термической обработки оказывают требуемая температура изделия, затраты энергии и объем обрабатываемого материала. Время воздействия играет весьма несущественную роль. Из характеристик композиции наи-

большее значение имеют плотность и удельная теплоемкость. При рассмотрении указанных выражений установлено сложное взаимовлияние факторов на выходные параметры. На основе выполненных расчетов при различном сочетании исходных данных получены графические зависимо-

сти, позволяющие выделить рекомендуемый диапазон режимов СВЧ термической обработки по критерию минимальных энергетических затрат.

График изменения расчетной удельной СВЧ мощности в зависимости от требуемой температуры нагрева и времени обработки представлен на рис. 2.

Из полученных данных следует, что средняя температура обработки рассматриваемой композиции, равная 80°C, теоретически может быть достигнута при нагреве в течение 6 минут с удельной СВЧ мощностью (14,1-14,89) Вт/см³ в зависимости от вида композиции с обеспечением минимальных энергетических затрат, опреде-

ленных согласно критериальному уравнению. В наибольшей степени удельная мощность зависит от температуры при минимальном времени обработки, а зависимость от времени более выражена при максимальной температуре готовности.

Экспериментально было установлено, что диапазон удельной СВЧ мощности при частоте 915 МГц, при которой обеспечивается температура нагрева композиции (75-80)°С, составляет (12,9-14) Вт/см³, что отличается от полученной по выражению (16) не более чем на 13%. Это свидетельствует о вполне удовлетворительной схожести теоретических и практических результатов.

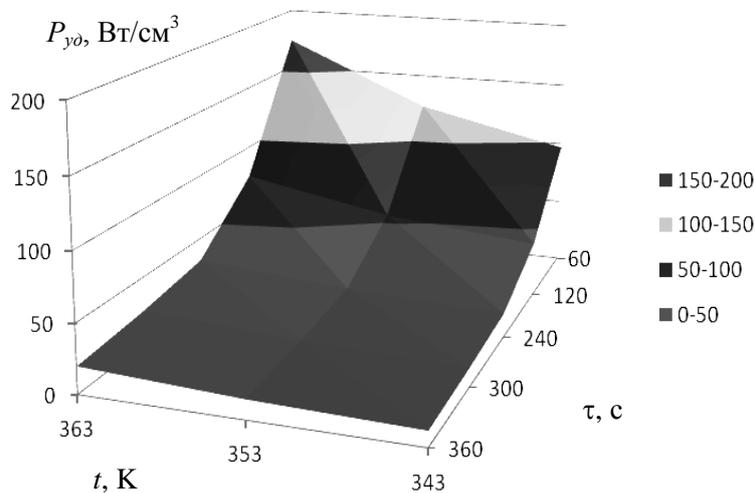


Рис. 2. Зависимость удельной СВЧ мощности от температуры и времени обработки композиции с 20% концентрацией введенного компонента

Таким образом, предложенный подход к разработке моделей СВЧ термической обработки неоднородных материалов, например композиционных, на основе критериального уравнения с экспериментальным определением его характеристических коэффициентов позволяет просто устанавливать рациональные электротехнологические режимы обработки. Подход может быть рекомендован для разработки пригод-

ных для инженерных расчетов моделей электротехнологических процессов формирования и модифицирования неоднородных по структуре и составу материалов. Однако универсальность предлагаемого подхода ограничивается параметрами применяемого технологического оборудования и необходимого определения коэффициентов для каждого нового материала.

ЛИТЕРАТУРА

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

2. **Michael Kachmar** Microwave Heating: 50MW and Counting // *Microwaves & RF*. sept. 1992. P. 41-44.

3. **Архангельский Ю.С.** Сверхвысоко-частотная электротехнология. Саратовская школа электротехнологов/ Ю.С. Архангельский // Вестник СГТУ. 2011. № 4 (3). С. 5-15.

4. **Гдалев А.В.** Исследование зависимости диэлектрических свойств материала от температуры / А.В. Гдалев, Р.Н. Сабилов, К.Н. Огурцов // Вестник СГТУ. 2010. № 3 (47). С. 27-30.

5. **Злобина И.В.** СВЧ термическая обработка неоднородных по структуре и электрофизическим характеристикам компози-

ций из органических материалов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.10 / И.В. Злобина. Саратов, 2015. 16 с.

6. **Злобина И.В.** СВЧ термическая обработка неоднородных по структуре и электрофизическим характеристикам композиций из органических материалов: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.10 / И.В. Злобина. Саратов, 2015. 173 с.

7. **Енохович А.С.** Краткий справочник по физике. М.: Высшая шк., 1976. 288 с.

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

Irina V. Zlobina – Ph.D., Assistant Lecturer, Department of Engineering Mechanics and Machine Elements, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 13.08.15, принята к опубликованию 11.09.15



АДАПТИВНЫЕ МИКРОВОЛНОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ЖИДКИХ СМЕСЕЙ

Г.А. Морозов, В.И. Анфиногентов, О.Г. Морозов,
С.Н. Смирнов, Р.Р. Самигуллин

ADAPTIVE MICROWAVE TECHNOLOGICAL COMPLEXES FOR PROCESSING OF LIQUID MIXTURES

G.A. Morozov, V.I. Anfinogentov, O.G. Morozov
S.N. Smirnov, R.R. Samigullin

Рассмотрены вопросы разработки адаптивных микроволновых технологических комплексов для обработки жидких смесей. В частности, представлены некоторые математические модели для вычисления параметров управления технологическим процессом и обоснован выбор типов волоконно-оптических датчиков для построения информационно-измерительной части комплекса, обеспечивающей входные данные для моделирования.

Ключевые слова: адаптивное управление, математическая модель, технологический процесс, волоконно-оптические датчики

Одной из важнейших научно-технических задач современного развития СВЧ комплексов является задача разработки технологий нагрева, обеззараживания и разделения жидких материалов и сред, способствующих повышению технологичности, автоматизации и снижению затрат на обработку непрерывного потока. По сравнению с традиционной микроволновая обработка способствует ускорению процесса отделения воды из смеси при меньших затратах электроэнергии и времени, при меньшей температуре обработки, обеспечивая выполнение все возрастающих экологических требований [1], так что есть основание говорить об актуальности разработки микроволновых технологических комплексов (МВТК).

Несмотря на широкое применение МВТК, они, как правило, являются узкоспециализи-

The paper provides a research into the problems related with development of adaptive microwave technological complexes for processing liquid mixtures. We present a number of mathematical models to compute the control parameters of the technological process, and show the necessity for the choice of fiber optic sensors to construct the information and measuring part of the complex, which provides the input data important for the simulation.

Keywords: adaptive control, mathematical model, technology process, fiber optic sensors

рованными, предназначенными для обработки при фиксированных режимах конкретных жидких материалов и сред с заданными параметрами и в заданных условиях [2]. Однако последнее не всегда выполнимо из-за изменчивого характера состава жидких сред, их состояния, параметров движения и т.д. Наиболее совершенным с точки зрения возможностей достижения требуемых показателей качества микроволновой обработки является управление параметрами, основанное на принципах адаптации.

Решение задач управления осуществляется с помощью методов математического моделирования, так как при этом открываются широкие возможности нахождения управляющих параметров, обеспечивающих эффективные режимы микроволновой обработки и улучшения технико-

экономических и эксплуатационных характеристик МВТК. На настоящий момент вопросы математического аналитического моделирования микроволновой обработки недостаточно рассмотрены. Количество научных работ по численному моделированию более чем в десятки раз превышает число работ по аналитическому моделированию, хотя наиболее предпочтительным является аналитическое решение поставленных задач. Кроме того, проблемным остается вопрос реализации датчиков для получения информации о технологическом процессе обработки жидких материалов и

сред. Внесение в среду обработки различных датчиков либо невозможно из-за возможного выхода их из строя, либо вызывает значительное изменение распределения создаваемого электромагнитного поля. Рассмотрим некоторые направления решения указанных выше проблем.

Структура МВТК обработки жидких материалов и сред с адаптивным управлением. Функциональная схема управления автоматизированным полнопроточным МВТК обработки жидких материалов и сред с адаптивным управлением представлена на рис. 1.

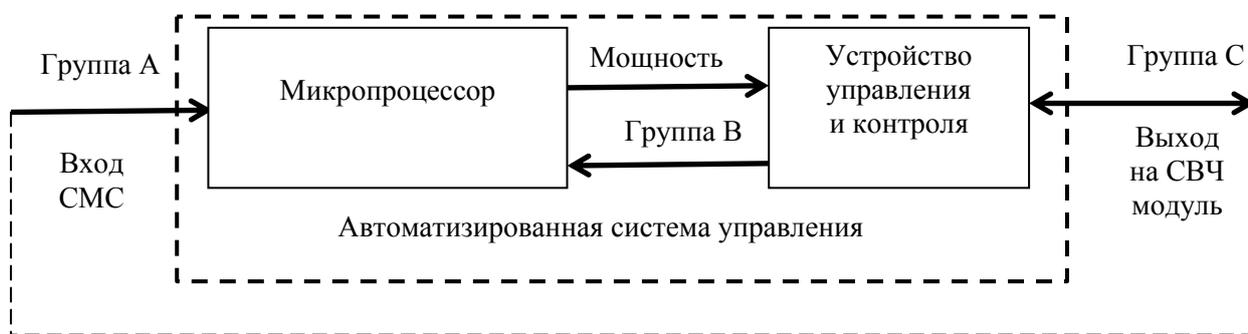


Рис. 1. Функциональная схема автоматизированной системы управления МВТК

Электромагнитная энергия поступает из СВЧ модуля через камеру электромагнитной обработки (КЭО) в канал концевой делителя фаз жидкой среды (КДС), нагревая жидкость. Измерительные устройства, расположенные на входе КЭО и в канале КДС, измеряют значения диэлектрической проницаемости (ϵ' , $\text{tg } \delta$), процента содержания воды в жидкости (%), температуры (T), уровня электромагнитного поля и скорости потока (V).

Полученные данные поступают на микроконтроллер, где на основе разработанной математической модели производится моделирование микроволновой обработки СМС. Вычисляются значения управляющих параметров, например, мощностью электромагнитного излучения, ее распределением и т.п., которые поступают в устройство управления и контроля, где формируется сигнал, управляющий СВЧ модулями. Количество СВЧ модулей определяется при разработке МВТК из расчета требуемого объема перерабатываемых жидких материалов и сред.

На вход автоматизированной системы управления и микропроцессора поступают сигналы так называемой группы *A* (см. таблицу).

Значения параметров группы *B* также подаются на вход микропроцессора, но с устройства управления. В микропроцессоре вычисляются требуемые значения для обеспечения заданного режима обработки СМС, которые поступают на устройство управления и контроля. Устройство управления и контроля управляет режимом работы СВЧ генератора на основе магнетрона, а также осуществляет электронную защиту магнетрона от перегрузок, блокировку СВЧ модуля с целью защиты обслуживающего персонала. Устройство управления и контроля вырабатывает сигналы группы *C*: включение/отключение напряжения накала магнетрона; автоматическое управление током накала магнетрона; включение/отключение высокого (анодного) напряжения магнетрона; регулирование

мощности генератора путём регулирования тока управляющего электромагнита; измерение анодного тока магнетрона и тока управляющего электромагнита; све-

товую индикацию: наличия питающего напряжения, исправности предохранителей, включения накального и анодного напряжения, состояния блокировок.

На вход микропроцессора поступают с датчиков измеренные значения (группа А)		На вход микропроцессора поступают сигналы	С устройства управления задаются начальные значения управляющих параметров (группа В)	
1А	ε'	КДС	1В	Мощность излучения
2А	$\text{tg}\delta$ СМС	КДС	2В	Частота излучения
3А	Процент воды	КДС	3В	Удельная теплоёмкость
4А	Температура	КЭО	4В	Плотность
5А	Уровень ЭМП	КЭО	5В	Коэффициент теплопроводности
6А	Скорость потока	КДС		
7А	Влажность воздуха	ВФВВ3-8		
8А	Температура воздуха	ВФВВ3-8		

Математические модели для МВТК с адаптивным управлением. Микроволновая обработка СМС представляет собой задачу нагрева среды большой толщины. В этом случае целесообразно использовать математические модели для полубесконечных и конечных диэлектрических сред с обеспечением равномерности нагрева. Среди разработанных моделей выделим следующие [3-5].

Одномерные задачи. 1. При снятом ограничении на условие применимости адиабатического приближения уточнена известная математическая модель СВЧ нагрева Рикенглаза Л.З., решена задача определения температурного поля в полубесконечной одномерной среде, на границу которой перпендикулярно падает плоская электромагнитная волна.

2. Плоская электромагнитная волна перпендикулярно падает на слой диэлектрика конечной толщины и отражается от противоположной границы.

3. Плоская электромагнитная волна перпендикулярно падает на слой диэлектрика конечной толщины и отражается от противоположной границы с поворотом плоскости поляризации.

4. Плоские электромагнитные волны, возбуждаемые некогерентными источниками, перпендикулярно падают на диэлектрик конечной толщины.

5. Плоские электромагнитные волны, возбуждаемые когерентными источниками, перпендикулярно падают на диэлектрик конечной толщины.

Двумерная задача. 6. СВЧ нагрев полубесконечного двумерного слоя диэлектрика при падении на него плоской электромагнитной волны от неподвижного источника с разными поверхностными распределениями мощности излучения электромагнитной волны.

Трёхмерная задача. 7. СВЧ нагрев полубесконечной трёхмерной области, заполненной диэлектриком с постоянными параметрами, с известным поверхностным распределением мощности излучения электромагнитной волны.

На рис. 2 приведена геометрия задачи СВЧ нагрева в трёхмерном пространстве. Электромагнитная волна перпендикулярно падает на плоскость xoy и проникает в полубесконечную среду по направлению возрастания координаты z .

Мощность тепловых потерь в диэлектрике можно представить в виде

$$Q(t, x, y, z) = q(z, t) \phi_1(x, x_0) \phi_2(y, y_0),$$

где $\phi_1(x, x_0)$, $\phi_2(y, y_0)$ – нормированные функции, задающие вид поверхностного распределения электромагнитной энергии излучателя.

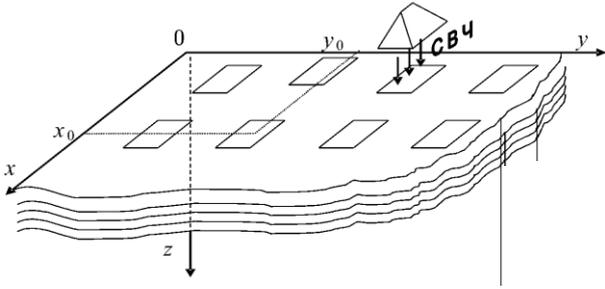


Рис. 2. Геометрия трехмерной задачи

Температура диэлектрика удовлетворяет нестационарному трехмерному уравнению теплопроводности

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q(t, x, y, z), \quad (1)$$

$$\phi_2(y, y_0) = \begin{cases} \frac{\pi}{4d} \cos\left(\frac{\pi(y - y_0)}{2d}\right) & \text{при } |y - y_0| \leq d \\ 0 & \text{при } |y - y_0| > d \end{cases} \quad (4)$$

имеет вид

$$T(t, x, y, z) = T_0 + \frac{A}{\lambda B} \times \left(\exp(a^2 t B) - 1 \right) e^{-2\alpha z} \phi_1(x, x_0) \phi_2(y, y_0), \quad (5)$$

$$B = 4\alpha^2 + b^2 - \frac{\pi^2}{4d^2}, \quad A = \alpha F_e S_0 \frac{\pi b}{4d}.$$

Показано, что решение (5) удовлетворяет граничному условию на границе $z = 0$ при коэффициенте теплообмена равном $2\alpha\lambda$.

Путём сравнения экспериментальных и расчётных результатов показана удовлетворительная точность построенных математических моделей СВЧ нагрева диэлектрических сред с заданными параметрами.

Совпадение результатов эксперимента с расчётными значениями подтверждает адекватность первой и седьмой математических моделей СВЧ нагрева СМС.

Волоконно-оптические датчики для МВТК с адаптивным управлением. Волоконно-оптические датчики (ВОД) позволяют преодолеть ограничения на измерения, указанные выше, и могут быть использованы для измерения всех параметров группы А. Для большинства ВОД волокно – первичный элемент измерительного преобразования, использующий для получения информации изменение объема материала, в котором он установлен, или механическое внешнее изменение.

$$-\infty < x < \infty, -\infty < y < \infty, 0 < z < \infty, t \geq 0.$$

Начальное и граничные условия выбираются в виде:

$$T(0, x, y, z) = T_0; \quad T(t, x, y, z) = T_0, \quad (2)$$

при $x \rightarrow \pm\infty, y \rightarrow \pm\infty, z \rightarrow \infty, -\lambda \partial t / \partial z = \chi(T - T_0)$.

Решение уравнения (1) при

$$\phi_1(y, y_0) = 0,5b \exp(-b|y - y_0|) \quad (3)$$

и

Три важных типа ВОД [6], используемых в различных системах, – интерферометры Фабри-Перо, датчики на решетках Брэгга и датчики на скрученных волокнах с замкнутыми концами.

Большинство компонентов ВОД должны удовлетворять требованиям по ударным и вибрационным нагрузкам. Но главным, определяющим их характеристики фактором является температура.

Для волоконных соединителей этот предел составляет приблизительно 200°C (для некоторых экспериментальных устройств – 300°C). Источники излучения, демодуляторы и модуляторы часто работают при более низких температурах. Большинство лазерных диодов применяются при температурах меньше 100°C , и только некоторые из светоизлучающих диодов могут использоваться при температурах более 150°C . Демодуляторы обычно эксплуатируются при температурах, приближающихся к 200°C , интегральные оптические модуляторы – приблизительно при 100°C . Такое

ограничение определяется тем, что большинство коммерческих приложений источников излучения ограничено 70°C . По этим причинам необходимо располагать все указанные компоненты в специальных зонах со стабильной температурой, и лишь только участок измерительного преобразования помещать в зону измерений с высокой температурой.

Интерферометры Фабри-Перо. Интерферометры Фабри-Перо (ИФП) состоят из двух зеркал, находящихся на расстоянии L друг от друга, с коэффициентами отражения R_1 и R_2 . Когда длина волны излучения источника кратна целому числу длин волн, укладываемому на расстоянии L , выполняется условие резонанса и интерферометр становится прозрачным. На базе ИФП могут быть созданы ВОД механических напряжений, температуры или давления. Существует ряд ВОД и соответствующих им методов сбора информации, использующих схему ИФП. Первый тип ВОД с ИФП, разработанный *Texas A&M* и усовершенствованный *Fiber Dynamics, Inc.* использует размещение зеркал непосредственно в волокне. Этот тип ВОД называют внутренними ИФП. Второй тип ВОД с ИФП состоит из волокон с зеркальными концами, помещенными в капиллярную трубку. Их называют внешними ИФП. Эта структура была разработана в *Virginia Technical University* и используется фирмами *F&S*, США и *FISO*, Канада.

Одно из преимуществ этого подхода заключается в том, что волокно между двумя зеркалами во внутреннем ИФП подвержено эффекту двулучепреломления, что вызывает изменение поляризации и соответственно свойств интерферометра, а во внешнем ИФП этого нет. Во внешнем ИФП между двумя зеркалами находится воздух или другой газ.

Одна из проблем применения внешних ИФП *F&S* и *FISO* как встроенных ВОД связана с использованием внешней капиллярной трубки большего диаметра, чем волокно. Это может вызвать структурные проблемы при установке датчиков

в различных материалах. Вторая проблема – возможный перелом волокна в месте его выхода из трубки. И *F&S*, и *FISO* решило проблему перелома, но наличие капиллярной трубки большего диаметра осталось проблемой.

ВРБ. Измерение температуры и напряжения по одной оси. ВРБ – периодическое изменение коэффициента преломления, созданное в одномодовом волокне путем облучения сердцевины волокна мощным ультрафиолетовым лазером через формирующую маску. Данное периодическое изменение коэффициента преломления позволяет создавать на базе ВРБ эффективные ВОД для измерения напряжений и температуры.

Когда ВРБ освещается широкополосным источником излучения, спектральный пик на длине волны λ_1 , соответствующей периоду решетки, отражается, а остальная часть излучения проходит дальше по волокну. Длина волны отраженного света смещается в сторону больших или меньших значений в зависимости от изменения температуры или натяжения волокна в зоне решетки, таким образом, определяя спектральную зависимость измеряемого параметра.

Для одновременного измерения напряжения и температуры использовался ряд подходов. Эти методы заключались в формировании двух перекрывающихся решеток, свободные части которых использовались для измерения температуры, а перекрывающиеся – напряжения, а также в последовательном включении ИФП и ВРБ.

ВРБ. Измерение многоосных напряжений. Во многих структурных приложениях необходимо измерять как продольное, так и поперечное напряжение. ВОД на базе ВРБ для измерения многоосных напряжений отличается от обычного тем, что в нем сформирована вторая решетка на другой длине волны, перекрывающая первую. При этом используется волокно, сохраняющее поляризацию. Эта конфигурация позволяет получить четыре отраженных сигнала по два для каждой

оси поляризации. Подобно одноосному ВОД отраженный сигнал смещается по длине волны в зависимости от приложен-

ного напряжения. Поперечное напряжение определяется видом разделения и смещения пиков, как показано на рис. 3.

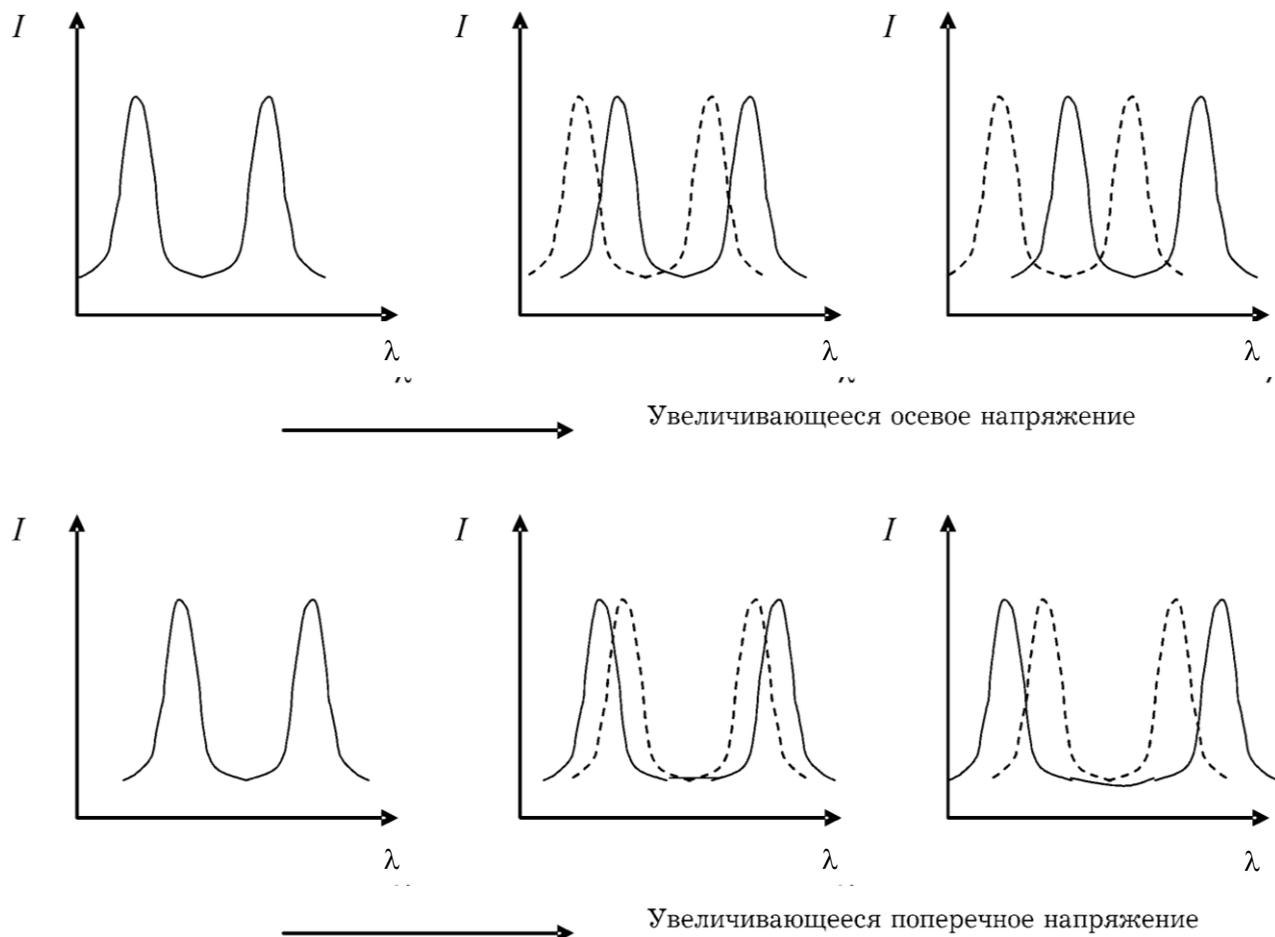


Рис. 3. Спектральное смещение длины волны при увеличивающихся осевом и поперечном напряжении

Информация от четырех спектральных пиков может использоваться одновременно для измерения осевого напряжения, двух взаимно ортогональных компонент поперечного напряжения и температуры.

ВОД на скрученных волокнах. Альтернативным ВОД для измерения напряжений может служить датчик на двух или более скрученных волокнах. В данном ВОД волокна скручиваются между собой или с несущей непроводящей проволокой в области чувствительного участка.

Когда скрученная пара растягивается или сжимается, происходит изменение амплитуды микроизгибов и часть передаваемого излучения покидает волокно. Измеряя интенсивность рассеянного света, можно получить информацию о приложенных напряжениях или температуре. Подобная сис-

тема распространялась фирмой *Sicom* и *Deha-Com*, Франция.

Нами было предложено замкнуть концы скрученных волокон и использовать метод обратного рассеяния для анализа распределенной информации. Данный ВОД достаточно прост, не требует никакого вмешательства в структуру волокна в отличие от ИФП и ВРБ.

Итак, изложенные подходы к математическому моделированию и выбору датчиков основаны на априорной информации о возбуждаемых электромагнитных и тепловых полях. В реальных ситуациях может быть организован эксперимент по воссозданию рабочих режимов возбуждения электромагнитного поля и произведено измерение совокупности реализаций температурного поля с помощью универ-

сальной измерительной системы с ВОД. После этого вычисляются требуемые по-

правки в математические модели адаптивного управления МВТК.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Морозов Г.А.** Низкоинтенсивные СВЧ-технологии (проблемы и реализации) / Г.А. Морозов, О.Г. Морозов, Ю.Е. Седельников, Н.Е. Стахова, В.В. Степанов. М.: Радиотехника, 2003. 112 с.

2. Способ микроволновой обработки жидкой водонефтяной смеси и устройство для его осуществления: пат. 2327865 Рос. Федерация / Т.К. Гараев, В.И. Анфиногентов, Г.А. Морозов; опубл. 17.11.2006.

3. **Анфиногентов В.И.** Математическое моделирование СВЧ нагрева диэлектриков. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2006. 140 с.

4. **Анфиногентов В.И.** Об одной задаче теории СВЧ нагрева диэлектриков /

В.И. Анфиногентов, Т.К. Гараев, Г.А. Морозов // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2002. № 3. С. 21-22.

5. Microwave installation for percent determination of extracted crude oil composition / G.A. Morozov, O.G. Morozov, R.R. Samigullin, R.C. Galimov, D.R. Khaziev // 44th Annual Microwave Power Symposium. Denver, Colorado, 2010. P. 137-140.

6. **Айбатов Д.Л.** Основы рефлектометрии / Д.Л. Айбатов, О.Г. Морозов, Ю.Е. Польский. Казань: ЗАО «Новое знание», 2007. 102 с.

Морозов Геннадий Александрович – заслуженный работник высшего профессионального образования, доктор технических наук, профессор кафедры «Радиоэлектронные и телекоммуникационные системы» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева (КАИ)

Анфиногентов Владимир Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры «Специальная математика» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева (КАИ)

Морозов Олег Геннадьевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Радиофотоника и микроволновые технологии» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева (КАИ)

Самошин Руслан Эдуардович – студент Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева (КАИ)

Gennady A. Morozov – Honored Worker of Higher Education of the Russian Federation, Dr. Sc., Professor, Department of Radioelectronic and Telecommunication Systems, A.N. Tupolev National Research Technical University of Kazan

Vladimir I. Anfinogentov – Dr. Sc., Professor, Department of Special Mathematics, A.N. Tupolev National Research Technical University of Kazan

Oleg G. Morozov – Dr. Sc., Professor, Head: Department of Radiophotonics and Microwave Technologies, A.N. Tupolev National Research Technical University of Kazan

Ruslan E. Samoshin – Undergraduate, A.N. Tupolev National Research Technical University of Kazan

Самигуллин Рустем Разяпович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиофотоника и микроволновые технологии» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева (КАИ)

Rustem R. Samigullin – Ph.D., Associate Professor, Department of Radiophotonics and Microwave Technologies, A.N. Tupolev National Research Technical University of Kazan

Статья поступила в редакцию 26.08.15, принята к опубликованию 11.09.15

УДК 621.365.5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГОННЫХ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕЙ КАМЕРЫ С БЕГУЩЕЙ ВОЛНОЙ НА ПРЯМОУГОЛЬНОМ ВОЛНОВОДЕ, РАБОТАЮЩЕЙ В МНОГОЧАСТОТНОМ РЕЖИМЕ

А.В. Фёдоров, Ю.С. Архангельский

DETERMINING LINEAR PARAMETERS IN THE WORKING CHAMBER WITH A TRAVELING WAVE OVER A RECTANGULAR WAVEGUIDE OPERATING IN THE MULTIFREQUENCY MODE

A.V. Fedorov, Yu.S. Arkhangelskiy

На основе теории цепей выполнен расчёт погонных параметров эквивалентной схемы рабочей камеры с бегущей волной на прямоугольном волноводе, работающей в многочастотном режиме с различными видами диэлектриков.

Ключевые слова: камера с бегущей волной, установка СВЧ диэлектрического нагрева, расчёт, эквивалентная схема, длина волны, относительная диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь, одночастотный режим, многочастотный режим

Рассмотрим рабочую камеру с бегущей волной (КБВ) установки СВЧ диэлектрического нагрева (рис. 1 а).

Конструкция такой камеры представляет собой короткозамкнутый отрезок прямоугольного волновода с изменяющимся вдоль продольной оси профилем

The paper presents the analysis regarding parameters of the equivalent circuit in the working chamber with a traveling wave over a rectangular waveguide operating in a multi-frequency mode with various types of dielectrics. The analysis is based on the theory of linear circuits.

Keywords: running wave cavity, microwave installation, calculation, equivalent circuit, wavelength, relative permittivity, loss angle, single frequency mode, multiple-frequency mode

($b_1 = b_1(z)$). На широкой стенке волновода помещается слой обрабатываемого диэлектрика толщины b_2 . Равномерного нагрева диэлектрика в такой камере можно добиться только при идеальном согласовании КБВ с генератором СВЧ энергии [1].

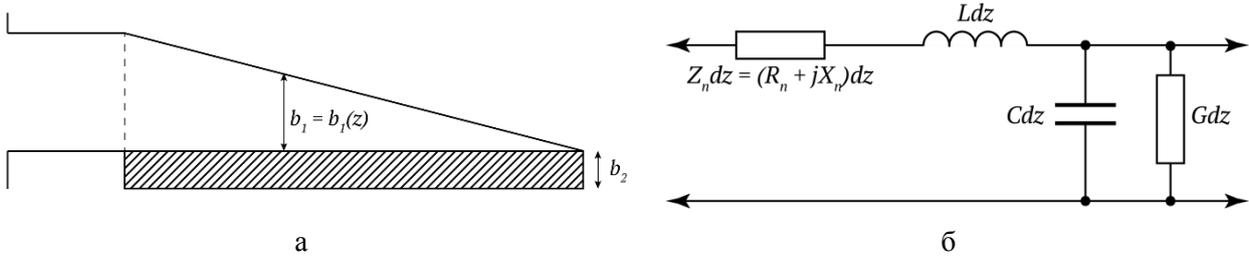


Рис. 1. КБВ на прямоугольном нерегулярном волноводе, частично заполненном обрабатываемым диэлектриком: а – продольное сечение КБВ; б – эквивалентная схема отрезка dz прямоугольного волновода, частично заполненного нагреваемым диэлектриком с потерями

Инженерный расчёт КБВ производят с помощью теории цепей, используя эквивалентную схему прямоугольного волновода, частично заполненного обрабатываемым диэлектриком (рис. 1 б)

Здесь $Z_n = R_n + jX_n$ – погонное сопротивление КБВ, характеризующее влияние обрабатываемого диэлектрика на волноводные свойства линии [2].

Для согласования с СВЧ генератором погонные параметры R_n и X_n эквивалентной схемы КБВ должны удовлетворять следующим условиям:

$$R_n = \text{const}, \quad X_n = 0. \quad (1)$$

Как показано в [1], параметры R_n и X_n зависят от диэлектрических свойств обрабатываемого диэлектрика (относительной

диэлектрической проницаемости ϵ' и тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta$), длины волны СВЧ генератора λ , толщины слоя диэлектрика b_2 и размера широкой стенки волновода a .

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

$$X_n = \frac{60\pi^2 F_X}{a \left[1 - \left(\frac{\lambda}{2a} \right)^2 \right] \sqrt{\epsilon'_2} \sqrt{1 + \text{tg}^2 \delta}}, \quad (3)$$

где

$$F_R = \frac{\left(\cos \frac{\delta}{2} \right) \text{sh} \left(\frac{4\pi b}{\lambda} \sqrt{\epsilon' \sqrt{1 + \text{tg}^2 \delta}} \sin \frac{\delta}{2} \right) - \left(\sin \frac{\delta}{2} \right) \sin \left(\frac{4\pi b}{\lambda} \sqrt{\epsilon' \sqrt{1 + \text{tg}^2 \delta}} \cos \frac{\delta}{2} \right)}{\text{ch} \left(\frac{4\pi b}{\lambda} \sqrt{\epsilon' \sqrt{1 + \text{tg}^2 \delta}} \sin \frac{\delta}{2} \right) + \cos \left(\frac{4\pi b}{\lambda} \sqrt{\epsilon' \sqrt{1 + \text{tg}^2 \delta}} \cos \frac{\delta}{2} \right)}, \quad (4)$$

$$F_X = \frac{\left(\sin \frac{\delta}{2} \right) \text{sh} \left(\frac{4\pi b}{\lambda} \sqrt{\epsilon' \sqrt{1 + \text{tg}^2 \delta}} \sin \frac{\delta}{2} \right) + \left(\cos \frac{\delta}{2} \right) \sin \left(\frac{4\pi b}{\lambda} \sqrt{\epsilon' \sqrt{1 + \text{tg}^2 \delta}} \cos \frac{\delta}{2} \right)}{\text{ch} \left(\frac{4\pi b}{\lambda} \sqrt{\epsilon' \sqrt{1 + \text{tg}^2 \delta}} \sin \frac{\delta}{2} \right) + \cos \left(\frac{4\pi b}{\lambda} \sqrt{\epsilon' \sqrt{1 + \text{tg}^2 \delta}} \cos \frac{\delta}{2} \right)}.$$

При работе установки СВЧ диэлектрического нагрева на одной из разрешённых частот [1] условия (1) выполняются лишь тогда, когда геометрия КБВ рассчитана на ϵ' и $\text{tg } \delta$, соответствующие начальной температуре диэлектрика. Но как только диэлектрик начинает нагреваться, ϵ' и $\text{tg } \delta$ изменяются, условия (1) нарушаются, и появляется рассогласование КБВ с СВЧ генератором и неравномерность нагрева диэлек-

трика. Наилучшее согласование КБВ во всём диапазоне температуры термообработки и наибольшая равномерность нагрева диэлектрика достигаются, если расчёт геометрических размеров КБВ провести на средние в диапазоне температур значения ϵ' и $\text{tg } \delta$ [1, 3].

Как показано в [3], применяя многочастотный режим работы КБВ и изменяя частоту по определенному алгоритму, можно

добиться уменьшения разброса значений функций F_R и F_X в процессе термообработки. Имеет смысл определить разброс погонных параметров R_n и X_n , меняя частоту СВЧ генератора в процессе нагрева для компенсации изменения диэлектрических параметров.

Сопоставим результаты расчёта R_n и X_n для КБВ в одночастотном и многочастотном режимах. КБВ, как и в [3], собрана на прямоугольном волноводе сечением $4,5 \times 9$ см, в одночастотном режиме генератор работает на частоте 2450 МГц, а в многочастотном ре-

жиме длина волны генератора может меняться в пределах $9 < \lambda < 18$ см. Выберем четыре типа диэлектриков с широким диапазоном изменения ϵ' и $\text{tg } \delta$, когда с увеличением температуры T :

- 1) ϵ' и $\text{tg } \delta$ возрастают,
- 2) ϵ' и $\text{tg } \delta$ уменьшаются,
- 3) ϵ' возрастает, $\text{tg } \delta$ уменьшается,
- 4) ϵ' уменьшается, $\text{tg } \delta$ возрастает.

Пусть ϵ' и $\text{tg } \delta$ для каждого из четырёх диэлектриков в зависимости от температуры T изменяются так, как показано в табл. 1 [3].

Таблица 1

Зависимости ϵ' и $\text{tg } \delta$ обрабатываемого диэлектрика от температуры

$T, ^\circ\text{C}$	Диэлектрик							
	D_1		D_2		D_3		D_4	
	ϵ'	$\text{tg } \delta$						
20	35	0,1	50	0,25	35	0,25	50	0,1
40	40	0,15	45	0,2	40	0,2	45	0,15
60	45	0,2	40	0,15	45	0,15	40	0,2
80	50	0,25	35	0,1	50	0,1	35	0,25

Зависимости $F_R \left(\frac{4\pi b_2}{\lambda} \sqrt{\epsilon' \sqrt{1 + \text{tg}^2 \delta}} \right)$ и $F_X \left(\frac{4\pi b_2}{\lambda} \sqrt{\epsilon' \sqrt{1 + \text{tg}^2 \delta}} \right)$ для данных диэлектриков показаны на рис. 2.

В одночастотном режиме профиль КБВ рассчитывается на средние значения диэлектрических параметров обрабатываемого диэлектрика $\epsilon'_{\text{cp}} = 42,5$ и $\text{tg } \delta_{\text{cp}} = 0,18$. Средняя координата рабочей точки x зависимостей $F_R(x)$ и $F_X(x)$ (рис. 2) выбрана равной $x = 0,5$. Длина волны СВЧ генератора выбирается стандартной $\lambda_{\text{cm}} = 12,2$ см. Тогда толщина слоя диэлектрика

$$b_{2\text{cp}} = \frac{x}{\lambda_{\text{cm}} \sqrt{\epsilon'_{\text{cp}} \sqrt{1 + \text{tg}^2 \delta_{\text{cp}}}}} = 0,93 \text{ см.}$$

В процессе нагрева рабочая точка изменяет своё положение в области A так, что

$$x(T) = \frac{b_{2\text{cp}}}{\lambda_{\text{ct}}} \sqrt{\epsilon'(T) \sqrt{1 + \text{tg}^2 \delta(T)}}. \quad (5)$$

В табл. 2 приведены зависимости $R_n(T)$ и $X_n(T)$ для одночастотного режима, причём F_R и F_X соответствуют данным работы [3].

Рассмотрим далее ту же самую КБВ в многочастотном режиме. Как показано в [3], в рабочем диапазоне температур можно добиться $F_X = 0$. Приняв $b_2 = 1$ см, построим зависимости $X_n(\lambda)$ с помощью соотношения (3) для разных значений температуры диэлектрика. На рис. 3 показаны эти зависимости для диэлектрика D_1 .

Определим значения λ в точках пересечения кривых с осью абсцисс. Данные значения длины волны СВЧ генератора соответствуют значениям $X_n = 0$ в пределах диапазона изменения температуры (рис. 3). Аналогичные расчёты $\lambda(T)$ и соответствующие им значения R_n и X_n для всех четырёх диэлектриков $D_1 \dots D_4$ приведены в табл. 3.

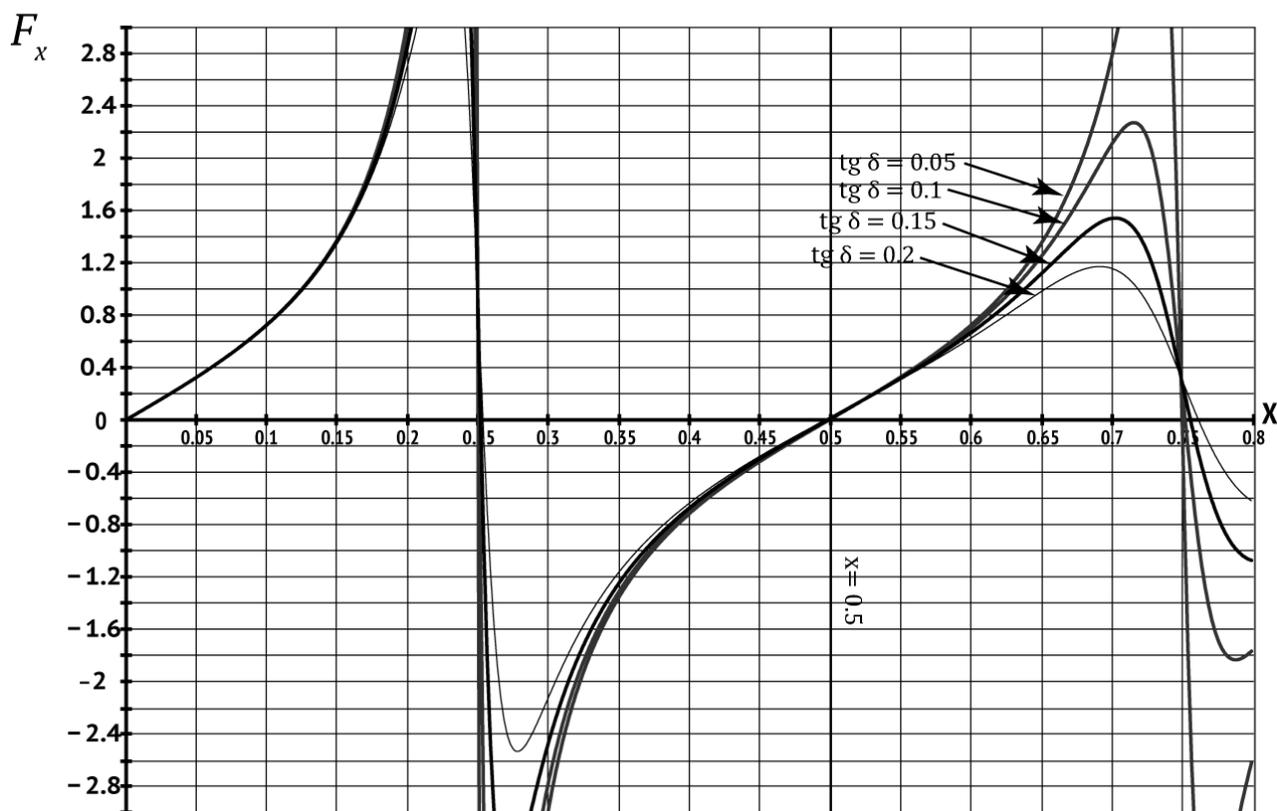
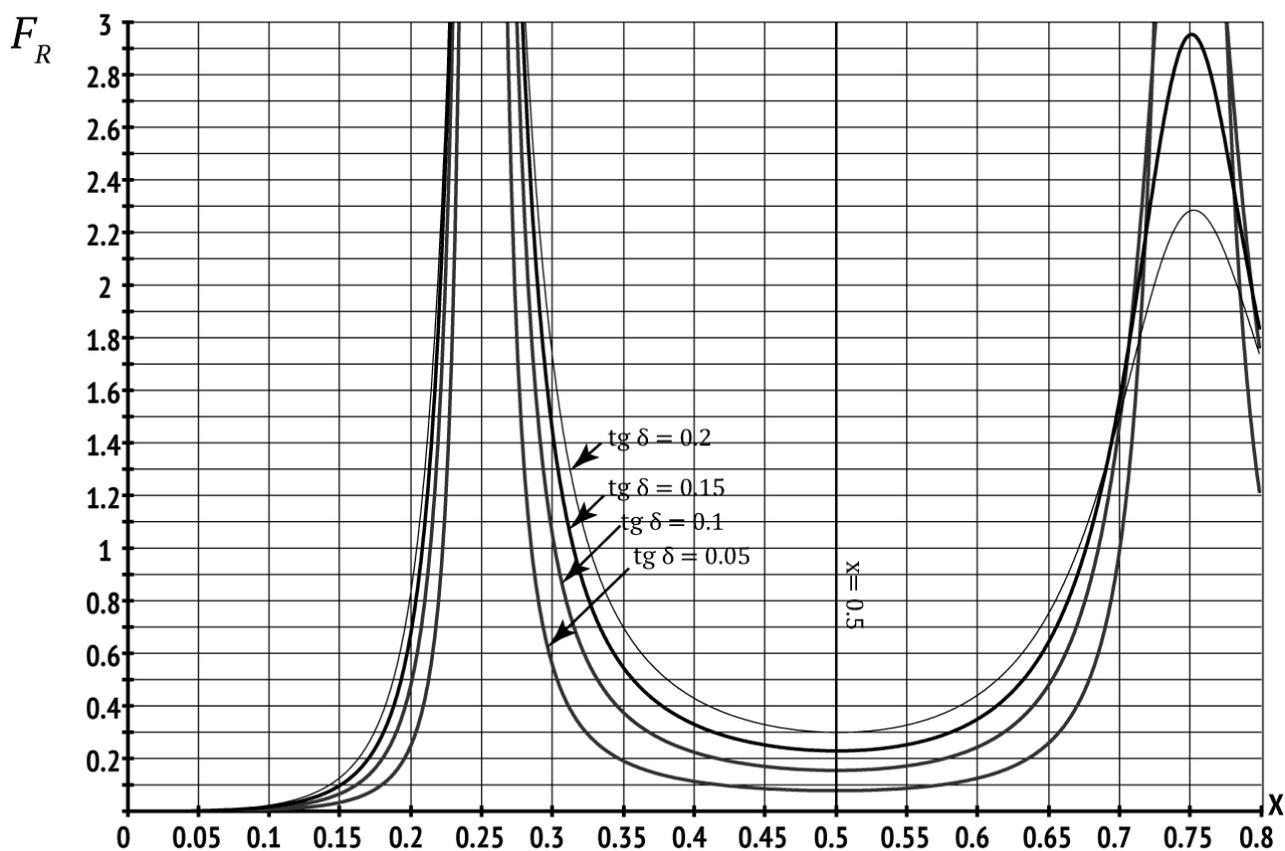


Рис. 2. Зависимости F_R и F_x от $x = \frac{b_2}{\lambda} \sqrt{\epsilon' \sqrt{1 + \text{tg}^2 \delta}}$

Зависимости R_n и X_n в одночастотном режиме

$T, ^\circ\text{C}$	Диэлектрики					
	Д_1			Д_2		
	x	R_n (Ом/см)	X_n (Ом/см)	x	R_n (Ом/см)	X_n (Ом/см)
20	0,45	3,50	-6,27	0,55	6,66	4,72
40	0,48	4,47	-1,66	0,52	5,46	1,90
60	0,52	5,46	1,90	0,48	4,47	-1,66
80	0,55	6,66	4,72	0,45	3,50	-6,27
	$R_n = 5,02 \pm 1,58;$ $X_n = -0,33 \pm 5,50$			$R_n = 5,02 \pm 1,58;$ $X_n = -0,33 \pm 5,50$		
$T, ^\circ\text{C}$	Д_3					
	Д_3			Д_4		
	x	R_n (Ом/см)	X_n (Ом/см)	x	R_n (Ом/см)	X_n (Ом/см)
20	0,46	8,01	-4,4	0,54	2,85	4,33
40	0,49	5,81	-1,22	0,51	4,19	1,62
60	0,51	4,19	1,62	0,49	5,81	-1,22
80	0,54	2,85	4,33	0,46	8,01	-4,4
	$R_n = 5,22 \pm 2,58;$ $X_n = 0,88 \pm 4,37$			$R_n = 5,22 \pm 2,58;$ $X_n = 0,88 \pm 4,37$		

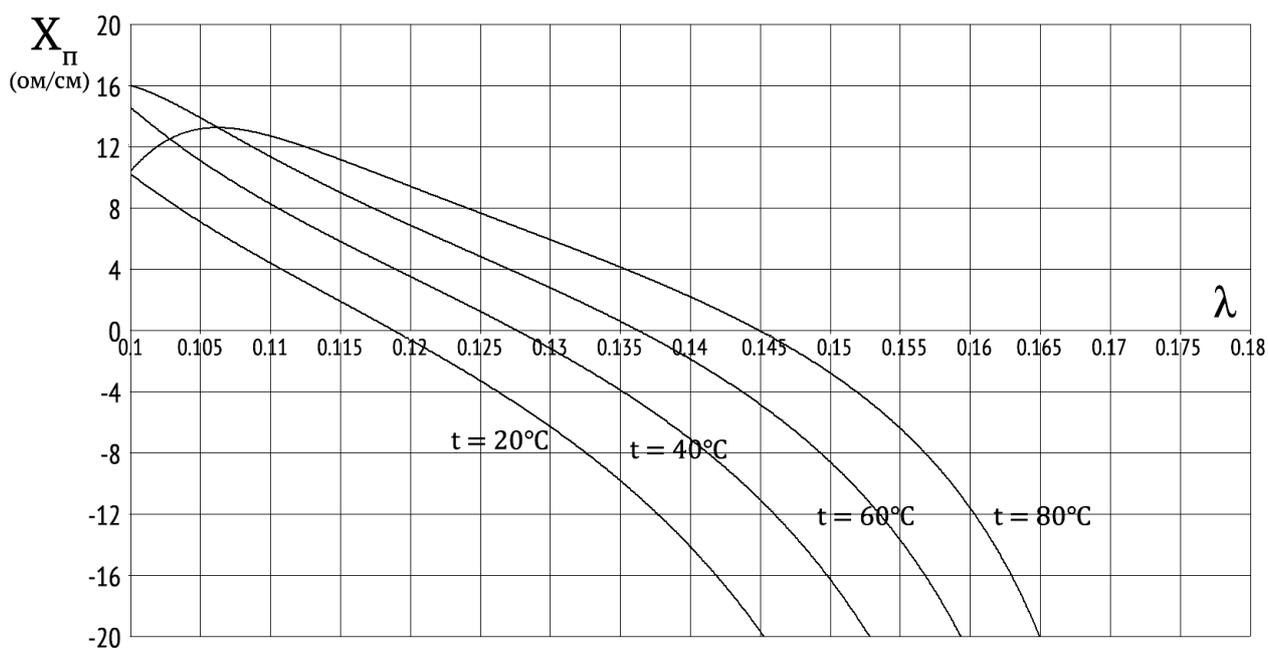


Рис. 3. Зависимости $F_X(\lambda)$ для первого диэлектрика

Зависимости R_n и X_n в многочастотном режиме

$T, ^\circ\text{C}$	Диэлектрики							
	D_1				D_2			
	x	λ (см)	R_n (Ом/см)	X_n (Ом/см)	x	λ (см)	R_n (Ом/см)	X_n (Ом/см)
20	0,499	11,9	2,84	0	0,496	14,5	8,9	0
40	0,498	12,8	4,45	0	0,497	6,36	13,6	0
60	0,497	13,6	6,36	0	0,498	4,45	12,8	0
80	0,496	14,5	8,9	0	0,499	2,84	11,9	0
	$R_n = 5,64 \pm 3,03; X_n = 0$				$R_n = 5,64 \pm 3,03; X_n = 0$			
$T, ^\circ\text{C}$	D_3				D_4			
	x	λ (см)	R_n (Ом/см)	X_n (Ом/см)	x	λ (см)	R_n (Ом/см)	X_n (Ом/см)
	20	0,496	11,3	6,63	0	0,4994	13,23	3,13
40	0,497	12	5,55	0	0,499	12,61	4,4	0
60	0,4985	12,6	4,4	0	0,497	11,97	5,55	0
80	0,499	13,2	3,13	0	0,496	11,3	6,63	0
	$R_n = 4,93 \pm 1,75; X_n = 0$				$R_n = 4,93 \pm 1,75; X_n = 0$			

Согласно данным табл. 3 разброс X_n на всём протяжении нагрева отсутствует, а само значение равно нулю.

Разброс значений R_n в случае одновременного роста или спада значений ϵ' и $\text{tg } \delta$ в многочастотном режиме несколько выше, чем в одночастотном. Однако при изменении ϵ' и $\text{tg } \delta$ в разные стороны разброс

R_n в многочастотном режиме снижается по сравнению с одночастотным режимом, что позволяет добиться лучшего согласования КБВ с СВЧ генератором в многочастотном режиме. Даже при большем разбросе R_n в многочастотном режиме согласование улучшается за счёт $X_n = 0$ во всём диапазоне температур.

ЛИТЕРАТУРА

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

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

3. **Архангельский Ю.С.** К расчёту камер с бегущей волной установок СВЧ диэлектрического нагрева, работающих в многочастотном режиме. / Ю.С. Архангельский, А.В. Федоров // Вопросы электротехнологии. 2015. № 2. С. 42-49.

Фёдоров Антон Витальевич – аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» 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.

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

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

Статья поступила в редакцию 04.08.15, принята к опубликованию 11.09.15

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.

МАЛОГАБАРИТНЫЕ СФОКУСИРОВАННЫЕ АНТЕННЫ ДЛЯ ЗАДАЧ СВЧ-ТЕХНОЛОГИЙ

Ю.Е. Седельников, О.В. Потапова, К.Н. Халикова

SMALL-SIZE FOCUSED ANTENNAS FOR MICROWAVE TECHNOLOGIES

Yu.E. Sedelnikov, O.V. Potapova, K.N. Khalikova

Рассматриваются малогабаритные сфокусированные антенны, используемые для задач СВЧ-технологий. Рассмотрены основные характеристики сфокусированных антенн в поглощающих средах. Представлены устройство и принцип работы малогабаритных сфокусированных антенн в виде антенны бегущей волны, оценена эффективность использования таких антенн в задачах радиоволновой диагностики.

Ключевые слова: *малогабаритные сфокусированные антенны, антенны бегущей волны*

В ряде технических приложений возникает требование формирования электромагнитных полей, по возможности локализованных в ограниченной части пространства. Примером таких ситуаций может служить аппаратура радиоволновой диагностики. Аналогично может требоваться обеспечение пространственно-селективного приема, например, в задаче радиотермометрии. Эффективным средством решения указанных задач представляется использование антенных устройств, реализующих принцип фокусировки в зоне ближнего излученного поля [1].

Для большинства задач СВЧ технологий характерна работа в средах со значительным затуханием и с высоким значением диэлектрической проницаемости. Фокусировка излучения антенн в средах с указанными свойствами характеризуется рядом особенностей [1-3]:

The paper presents a research into small-size focused antennas used to solve the problems with microwave technologies. The main characteristics of focused antennas in the absorbing medium are analyzed. The device and operation principles of small-size focused antennas having the form of running wave antennas are presented.

Keywords: *small-size focused antennas, running wave antennas*

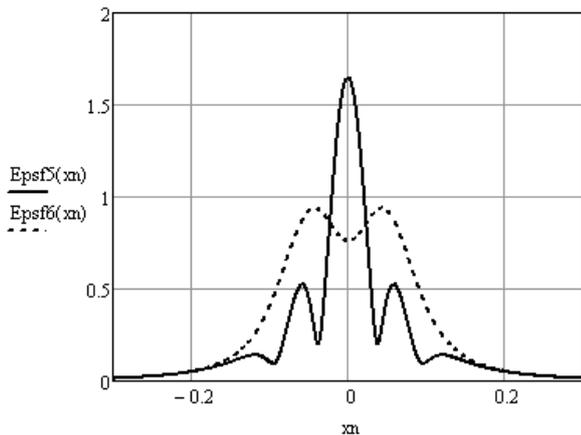
– эффективная трехмерная фокусировка возможна на расстояниях от апертуры порядка ее геометрических размеров и умеренном затухании волны в среде (не более $\alpha\lambda \leq 0,2 \dots 0,3$). При большем затухании свойство выраженной фокусировки в направлении, перпендикулярном апертуре, утрачивается при сохранении ее в плоскости, параллельной апертуре;

– у сфокусированных антенн для каждого значения фокусного расстояния z_0 существует оптимальный размер апертуры, при котором достигается максимальный КНД. Дальнейшее увеличение апертуры более к его росту не приводит;

– оптимальные размеры апертуры и, соответственно, максимально возможный КНД быстро снижаются по мере увеличения коэффициента затухания волны в среде. Для многих приложений максимальный размер апертуры составляет величину порядка единиц длины волны в среде.

В настоящей работе предлагается принцип построения малогабаритных сфокусированных антенн.

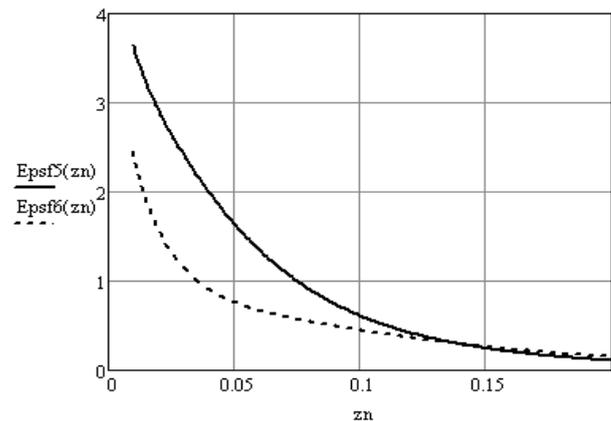
Сфокусированные антенны в поглощающих средах. Покажем на примере возбуждения электромагнитных полей в биологических тканях перспективность использования принципа фокусировки. В качестве модельного примера взяты следующие данные $\alpha = 8,263$ 1/м, $\beta = 78,835$ рад/м.



Распределение поля в поперечном направлении

Антенна – линейная с равномерным амплитудным распределением, сфокусированная в точку, находящуюся на нормали к апертуре при фокусном расстоянии z_0 . Частота – 1 ГГц. Расчет напряженности электрического поля проводился с использованием модели [4].

Типичные результаты показаны на рис. 1.



Распределение поля в продольном направлении

Рис. 1. Распределение поля (сплошная линия – сфокусированное возбуждение, штриховая линия – синфазное возбуждение)

Как и следовало ожидать, в рассматриваемых условиях выраженная фокусировка наблюдается только в плоскости, параллельной апертуре, хотя возрастание напряженности поля в окрестности фокуса имеет место и в поперечном направлении.

Использование фокусировки позволяет, по сравнению со слаборазлученной антенной или синфазной апертурой равной длины добиться не только заметного увеличения КНД в точке фокусировки, но и сократить размеры области с повышенной интенсивностью поля. При этом, разумеется, достигаемые эффекты существенно зависят от глубины фокусировки (фокусное расстояние z_0) и частоты.

На рис. 2-3 представлены расчетные зависимости в диапазоне значений фокусных расстояний $\frac{z_0}{2L} = 0,1...1,25$ при $\lambda = 0,2$ м и длине антенны $2L = 0,1$ м

(Сплошная кривая – среда без потерь, штриховая – кортикальная кость, точечная – серое вещество мозга).

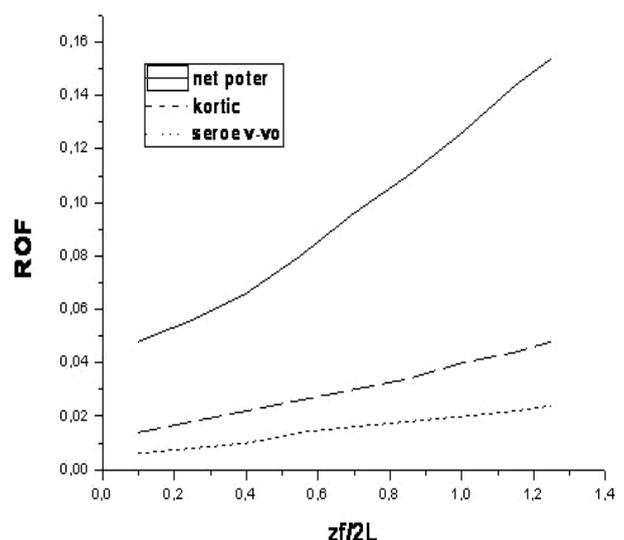


Рис. 2. Зависимость РОФ от глубины фокусировки

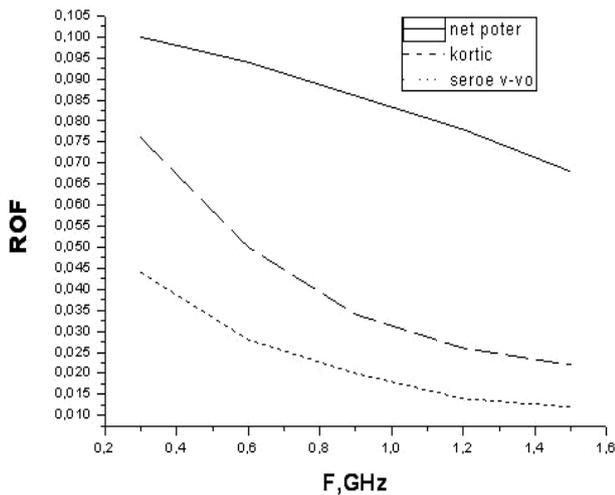


Рис. 3. Зависимость РОФ от частоты фиксируемого радиоизлучения

Важно отметить, что в средах со значительным поглощением существуют предельные размеры апертуры антенны, при которых достигается наибольший эффект от фокусировки, а дальнейшее увеличение либо не приводит к улучшению показателей, либо ведет к их снижению. При этом максимальный размер апертуры уменьшается с ростом затухания (рис. 4).

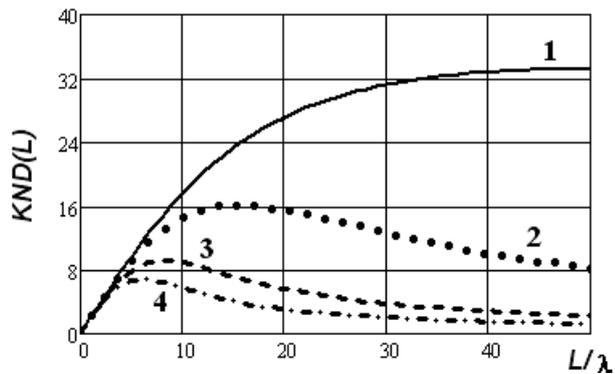


Рис. 4. Зависимость $KND_{\text{фок}}$ от размеров апертуры при различных значениях коэффициента затухания (1 – $\alpha\lambda = 0$; 2 – $\alpha\lambda = 0,2$; 3 – $\alpha\lambda = 0,8$; 4 – $\alpha\lambda = 1,5$; $z_0 = 5\lambda$)

Таким образом, в задачах, связанных с формированием сфокусированных полей в поглощающих средах, целесообразно использование антенн только с небольшими размерами апертуры.

Пути технической реализации сфокусированных антенн больших и даже умеренных электрических размеров могут быть различными: зеркальные антенны

эллиптического профиля, рупорно-линзовые антенны, антенные решетки, в том числе с синтезированной апертурой и др. Создание сфокусированных антенн относительно малых электрических размеров встречает определенные трудности. В настоящее время практические разработки таких антенн отсутствуют. Одним из путей реализации таких антенн может служить использование принципа антенны бегущей волны.

Сфокусированные антенны бегущей волны. Для реализации малогабаритных сфокусированных антенн авторами предложен вариант построения их в виде антенны бегущей волны [5]. Устройство и принцип работы их можно пояснить следующим образом. Антенна типа бегущей волны располагается на границе «воздух – среда» и синфазно возбуждается с двух противоположных сторон (рис. 5)¹.

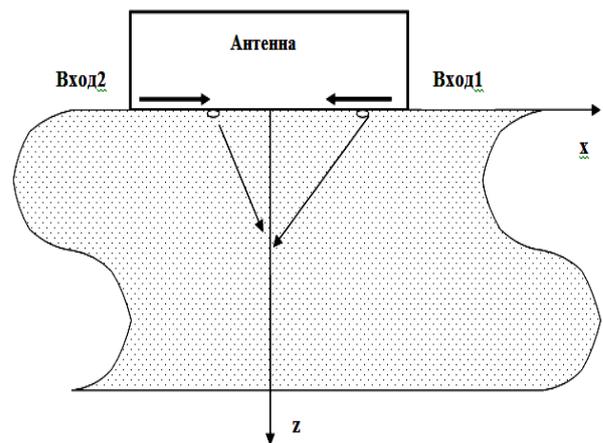


Рис. 5. Сфокусированная антенна бегущей волны

Формируемое ею электромагнитное поле в среде создается апертурой с амплитудно-фазовым распределением $J(x)$, соответствующим двум встречно распространяющимся волнам (соотношение (1)):

$$J(x) = e^{-j\beta_a x} e^{-\alpha_a x} + e^{-j\beta_a(x-L)} e^{-\alpha_a(x-L)}, \quad (1)$$

¹ К числу исключений можно отнести варианты антенн, располагаемых на криволинейной поверхности.

где α_a и β_a – коэффициенты затухания и фазы бегущей волны; L – длина антенны.

При надлежащем выборе параметров β_a и L фазовое распределение токов в апертуре может быть достаточно близким к фазовому распределению тока, требуемого при фокусировке в заданную точку зоны ближнего излученного поля (рис. 6).

При выполнении указанных условий обеспечивается фокусировка излучения в заданную точку среды с приемлемым качеством (рис. 7-8).

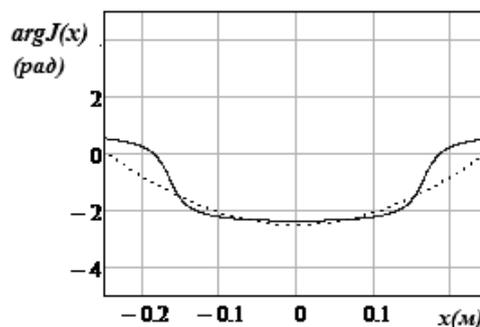


Рис. 6. Фазовое распределение тока в антенне бегущей волны ($L = 0,5$ длины волны в воздухе, $\alpha_a \lambda = 1$ и $\beta_a / k = 1,5$) и требуемое для фокусировки в среде с $\beta_{срeды} / k = 7$ при фокусном расстоянии $0,5$ длины волны в воздухе (пунктир)

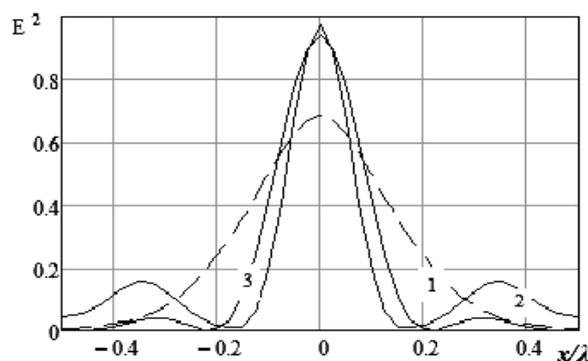


Рис. 7. Распределение квадрата модуля напряженности электрического поля в фокальной плоскости (1 – сфокусированная антенна с косинусным амплитудным распределением, сфокусированная в среде с $\beta_{срeды} / k = 7$ и $\alpha_{срeды} / k = 0,75$ при фокусном расстоянии $0,8$ длины волны в воздухе; 2 – антенна бегущей волны ($\beta_a / k = 1,5$, $\alpha_a \lambda = 0,4$; 3 – синфазная антенна с косинусным распределением. Длина антенны во всех случаях $0,75$ длины волны в воздухе)

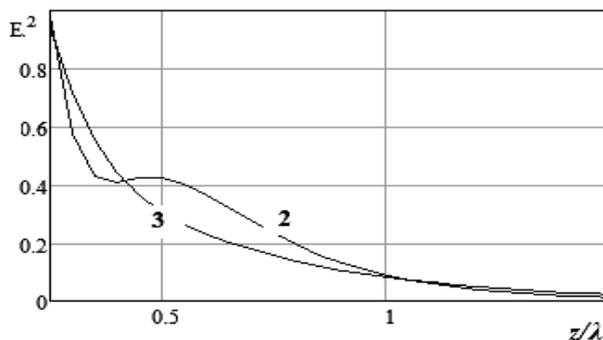


Рис. 8. Распределение квадрата модуля напряженности электрического поля для синфазной и сфокусированной антенны бегущей волны в направлении, перпендикулярном апертуре. Параметры антенны и среды – согласно рис. 7

Итак, антенны, построенные на описанном принципе, могут с успехом использоваться в ряде приложений СВЧ технологий [6], в частности при создании терапевтической и диагностической аппаратуры медицинского назначения [7-8].

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках проектной части государственного задания 3.1962.2014/К.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Vedenkin D.A.** Antennas, focused in near radiated field zone. Features and technical application / D.A. Vedenkin, O.V. Potapova, Yu.E. Sedelnikov // Proceedings of IX international Conference on Antenna Theory And Techniques. Odessa, Ukraine, September 2013. P. 560-565.

2. **Потапова О.В.** Исследование методов сфокусированной апертуры для повышения эффективности СВЧ-технологических установок открытого типа: дис. ... канд. техн. наук / О.В. Потапова. Казань, 1988. 118 с.

3. **Низамутдинов Р.Р.** Фокусирующие свойства пространственно-распределенных источников волновых полей в средах с потерями / Р.Р. Низамутдинов, О.В. Потапова, Ю.Е. Седельников // Нелинейный мир. 2010. № 5. С. 310-315.

4. **Седельников Ю.Е.** Анализ фокусирующих свойств антенн в зоне ближнего излученного поля (в неоднородных диссипативных средах) / Ю.Е. Седельников, О.В. Потапова, Д.В. Никишина // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2013. № 3. С. 73-77.

5. **Никишина Д.В., Седельников Ю.Е., Халикова К.Н.** Антенна-аппликатор для неинвазивного измерения температуры внутренних тканей биологического объекта. Патент РФ. Положительное решение по заявке № 2014135516/14 (057600) от 08.06.2015 г.

6. Низкоинтенсивные СВЧ-технологии: проблемы и реализации / под ред. Г.А. Морозова и Ю.Е. Седельникова. М.: Радиотехника, 2003. 112 с.

7. **Кубланов В.С.** Совершенствование характеристик СВЧ-радиотермографов в медицинских задачах / В.С. Кубланов, О.В. Потапова, Ю.Е. Седельников, А.М. Сысков // Журнал радиоэлектроники. 2012. № 4. С. 1-27.

8. **Седельников Ю.Е.** Сфокусированные антенны в задачах медицинской радиотермометрии / Ю.Е. Седельников, О.В. Потапова // Инженерный журнал: наука и инновации. <http://www.engjournal.ru/search/word/page1.html>.

Седельников Юрий Евгеньевич – заслуженный деятель науки и техники Республики Татарстан, доктор технических наук, профессор кафедры «Радиоэлектронные и телекоммуникационные системы» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева (КАИ)

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

Халикова Ксения Наильевна – аспирант кафедры «Радиоэлектронные и телекоммуникационные системы» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева (КАИ)

Yu E. Sedelnikov – Honored Master of Science and Technology of the Republic Tatarstan, Dr. Sc., Professor, Department of Electronic and Telecommunication Systems, A.N. Tupolev National Research Technical University of Kazan

Olga V. Potapova – Ph.D., Associate Professor, Department of Electronic and Telecommunication Systems, A.N. Tupolev National Research Technical University of Kazan

Kseniya N. Khalikova – Postgraduate, Department of Electronic and Telecommunication Systems, A.N. Tupolev National Research Technical University of Kazan

Статья поступила в редакцию 19.08.15, принята к опубликованию 11.09.15

ЭЛЕКТРОФИЗИКА

УДК 621.928.1: 621.313.17

ИНДУКЦИОННАЯ СОРТИРОВКА ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ В БЕГУЩЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

А.Ю. Коняев, Ж.О. Абдуллаев, Д.Н. Багин, И.А. Коняев, С.Л. Назаров

INDUCTION SORTING OF NON-FERROUS METALS IN THE TRAVELING MAGNETIC FIELD

A.Yu. Konyaev, Zh.O. Abdullaev, D.N. Bagin, I.A. Konyaev, S.L. Nazarov

Экономически выгодно использовать вторичное сырье с целью добычи полезных материалов для их дальнейшего применения. Электродинамическая сепарация, основанная на силовом взаимодействии бегущего магнитного поля с вихревыми токами, наведенными им в проводящих частицах, наиболее эффективна при сборе и обработке лома цветных металлов. Статья посвящена проблеме сортировки цветных металлов. Описаны результаты исследования конструкций сепараторов с бегущим магнитным полем.

Ключевые слова: *электродинамическая сепарация, индукционная сортировка металлов, результаты исследований*

Одной из тенденций развития экономики, позволяющей решать эколого-экономические проблемы, является увеличение производства вторичных цветных металлов. Несмотря на появление новых материалов, спрос на цветные металлы и изделия из них остается устойчиво высоким. Однако производство металлов из рудного сырья сталкивается с целым рядом экономических и экологических проблем. Возрастают затраты на разработку сырья, что связано с уменьшением содержания металлов в рудах, увеличением транспортных расходов из-за удаленности месторождений. Велики топливно-энергетические за-

In the recent years using processed raw materials has been recognized increasingly cost-effective for the purpose of their further utilization as useful materials. Electrodynamics separation based on force interaction between the magnetic field and eddy currents induced by the field in conducting particles is most effective when recycling non-ferrous metals. This paper is devoted to the problem of sorting out non-ferrous metals, and provides the results of research into designs referring separators with the traveling magnetic field.

Keywords: *electrodynamics separation, induction sorting of metals, research results*

траты на производство цветных металлов и расходы на природоохранные мероприятия, поскольку технологические процессы в цветной металлургии характеризуются большим количеством пылегазовых выбросов в атмосферу, сточных вод и разнообразных видов твердых отходов (хвосты обогащения, шлаки и шламы металлургических переделов и т.д.). Указанные причины обуславливают необходимость развития вторичной цветной металлургии [1-4]. При использовании вторичных металлов уменьшается потребность в минеральном сырье, снижаются энергопотребление и выбросы в биосферу загрязняющих веществ.

Производство вторичных цветных металлов в нашей стране уступает достигнутому в ведущих промышленных странах уровню как по количественным (доля вторичных металлов от всего производства), так и по качественным (качество сплавов) показателям [3-4]. Одной из причин такого положения является отставание в области разработки и производства оборудования для извлечения цветных металлов из разных видов отходов и для вспомогательных технологических операций, реализуемых на стадии подготовки лома и отходов к металлургическому переделу и обеспечивающих свойства вторичного сырья, требуемые для металлургических процессов.

Проблема заключается в том, что значительная часть лома цветных металлов содержится в смешанных твердых отходах производства и потребления и безвозвратно теряется при захоронении таких отходов. Производства по сортировке отходов в нашей стране практически отсутствуют.

Лом цветных металлов поступает на металлургические заводы в неразделанном и несортированном виде. Непосредственная плавка несортированного лома сопровождается рядом нежелательных явлений, таких как:

- потери легирующих добавок (в первую очередь олова, свинца, цинка);
- выпуск низкокачественных сплавов (например, для алюминия основными загрязнителями являются железо, кремний, марганец);
- повышение энергозатрат, связанное как с увеличением времени плавки, так и с расходами на последующую очистку расплавов;
- ухудшение свойств шлака и выделение вредных выбросов, обусловленные наличием в ломе неметаллических включений (резина, пластмассы и т.п.);
- потери основного металла на угар при плавке металлолома с фрагментами, существенно отличающимися по размерам (например, стружка и кусковый лом).

В целом потери металла при плавке несортированного цветного металлолома могут достигать 20% [1], в то время как оцен-

ки Организации европейских производителей алюминия (ЕАА – The European Aluminium Association) показывают, что при оптимальной загрузке скрапа потери металла не должны превышать 2-3% [2].

В зарубежной практике технологии подготовки вторичного сырья и соответствующее оборудование начали разрабатывать в 1970-1980-е годы. В настоящее время машиностроительные фирмы многих стран выпускают оборудование, позволяющее обрабатывать различные виды металлоотходов с учетом их происхождения и требуемого качества выпускаемой из отходов продукции. Такое оборудование обеспечивает фрагментацию крупногабаритного лома, дробление, измельчение и сортировку лома и отходов. Удаление из лома и отходов неметаллических включений, сортировка цветных металлов по крупности, а также по видам металлов и группам сплавов являются наиболее сложными операциями на стадии подготовки вторичного сырья. В развитых странах широкое применение при сборе и обработке лома и отходов цветных металлов находит электродинамическая сепарация в бегущем магнитном поле [4-6]. При этом извлекаемые из потока материалов металлические предметы и частицы играют роль вторичного элемента индукционной электрической машины. Бегущее магнитное поле наводит в них вихревые токи, взаимодействие которых с полем обеспечивает создание электромагнитных сил извлечения. Получение с помощью такой сепарации селективных концентратов металлов существенно повышает ценность продуктов разделения: снижаются затраты на последующие металлургические переделы, уменьшаются потери металла, улучшаются экологические показатели металлургических процессов. Появляется возможность получения из вторичных металлов высококачественных сплавов.

Разработка установок электродинамической сепарации является одним из научных направлений кафедры «Электротехника и электротехнологические системы» Уральского федерального университета [7-10]. На кафедре создан ряд опытных сепараторов,

разработаны математические модели и методы их расчета. Основные виды разрабатываемых электродинамических сепараторов схематично показаны на рис. 1. Нетрудно видеть, что сепараторы различаются

как конструкцией электромагнитного ядра, так и способами подачи и отвода сепарируемых материалов. Выбор конкретного варианта зависит от решаемой технологической задачи.

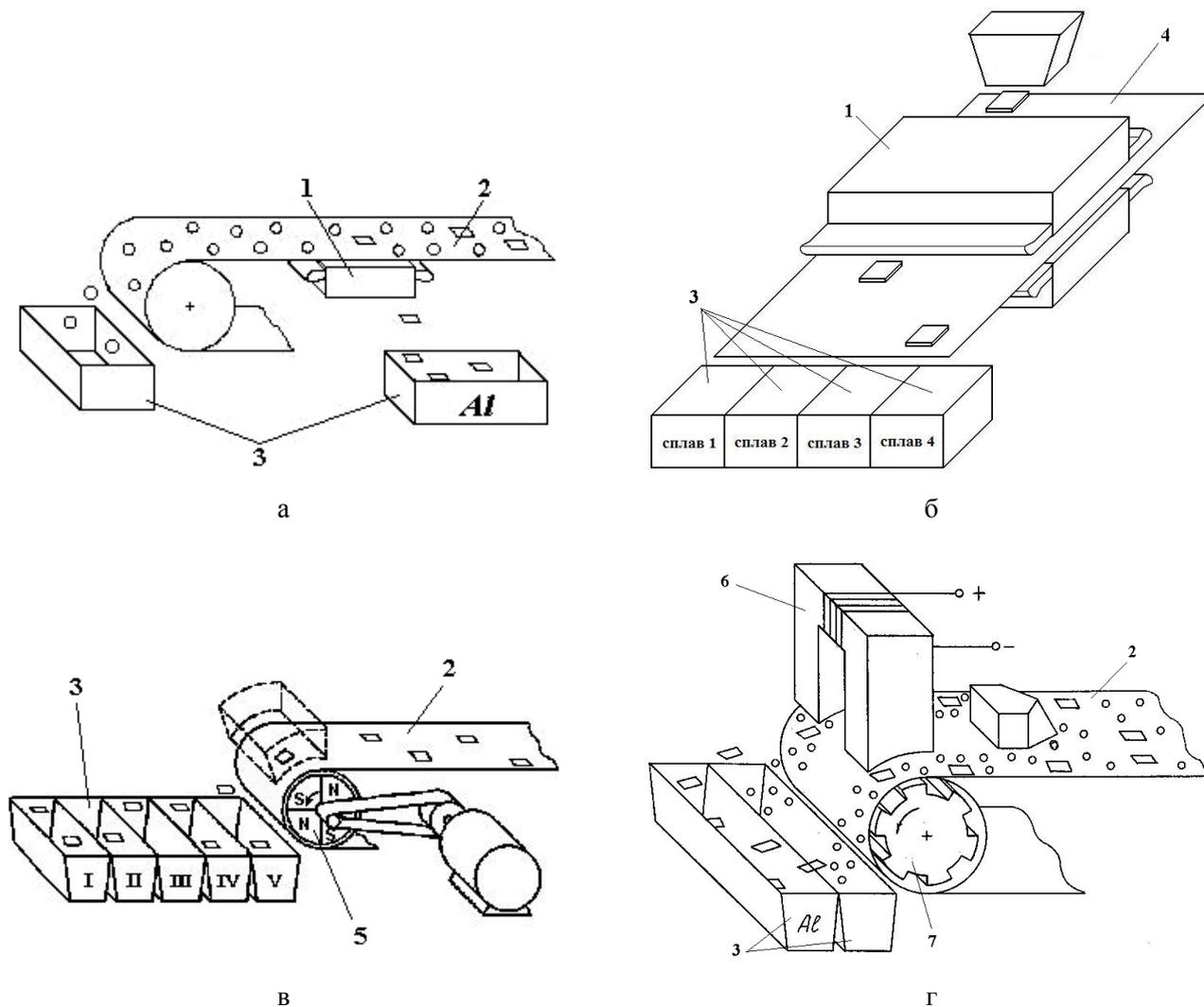


Рис. 1. Схемы электродинамических сепараторов с бегущим (вращающимся) магнитным полем (1 – линейные индукторы; 2 – лента конвейера; 3 – приемники продуктов разделения; 4 – наклонная плоскость; 5 – вращающийся индуктор; 6 – электромагнитный индуктор; 7 – зубчатый ротор)

Электродинамические сепараторы на основе трехфазных линейных индукторов наиболее универсальны (рис. 1 а, б). Они легко встраиваются в существующие технологические линии и имеют наибольшую производительность. Однако, как показывают испытания и опыт эксплуатации, при работе от стандартной электрической сети с частотой 50 Гц такие сепараторы обеспечивают надежное извлечение из отходов металлических предметов крупностью более

40 мм (оценки даны для алюминия) [7-8]. Обработка металлосодержащих отходов в диапазоне меньшей крупности требует повышения частоты бегущего магнитного поля, как показано далее на рис. 2. При этом целесообразны сепараторы на основе вращающихся индукторов с возбуждением от постоянных магнитов или электромагнитов (рис. 1 в), позволяющие получать частоты магнитного поля до 500-800 Гц и обеспечивающие извлечение цветных металлов в

диапазоне крупности от 5 до 50 мм. При необходимости сепарации материалов крупностью менее 5 мм могут использоваться сепараторы индукторного типа, в которых бегущее (вращающееся) магнитное поле модулируется при вращении зубчатого ротора в постоянном магнитном поле. В созданных установках модулированная составляющая магнитного поля имеет частоту от 500 до 3000 Гц, что позволяет извлекать частицы измельченных металлов.

Накопленный в УрФУ опыт исследований и разработок позволил определить ряд целесообразных направлений использования электродинамической сепарации в технологиях переработки твердых металлосодержащих отходов:

- извлечение лома цветных металлов из твердых бытовых или смешанных производственных отходов;

- отделение металлической фракции от неметаллической в сложных отходах цветных металлов (отходы электро- и радиотехнической промышленности, кабельный лом, отходы электролампового производства, автомобильный лом и т.п.);

- сортировка лома цветных металлов (по крупности или по сортам) при подготовке его к металлургическому переделу;

- очистка сыпучих материалов от металлических включений (например, очистка отработанных формовочных смесей от скрапа в литейном производстве, защита технологических смесей от попадания металла);

- обогащение алюминиевых шлаков.

Большая часть указанных технологических операций прошла успешную апробацию на лабораторных установках электродинамической сепарации, либо в промышленных условиях. По разработкам УрФУ ряд установок реализован совместно с предприятиями-заказчиками в виде опытно-промышленных образцов, а сепараторы для извлечения цветных металлов из твердых бытовых отходов доведены до серийного производства [8].

Указанные варианты использования электродинамических сепараторов можно разделить на две группы. К первой отно-

сятся технологии извлечения металлов из различных видов твердых металлосодержащих отходов. Ко второй – операции сортировки лома и отходов цветных металлов по крупности или видам сплавов. Как показывают исследования, требования к конструкции и параметрам таких сепараторов могут существенно различаться.

Помимо параметров бегущего магнитного поля (амплитуда индукции B_m , пространственный период (двойное полюсное деление) 2τ и частота f) характеристики электродинамической сепарации зависят от физических свойств (удельной электропроводности γ и плотности ρ), а также от размеров извлекаемых металлических кусков или частиц. Об этом свидетельствуют показанные на рис. 2 и 3 зависимости удельного электромагнитного усилия (отношения электромагнитного усилия к массе извлекаемой частицы $F_m = F/m$ [Н/кг или m/c^2]) от частоты магнитного поля. Критерий F_m наилучшим образом характеризует работоспособность сепараторов, поскольку показывает максимально возможное ускорение, сообщаемое извлекаемым металлическим частицам электромагнитными силами. На рис. 2 представлены указанные зависимости для квадратных медных пластин толщиной 5 мм. Цифрами на графиках показаны значения стороны пластин b , см. Расчеты выполнены для экспериментальной установки на основе линейного индуктора с полюсным делением $\tau = 100$ мм при удалении металла от поверхности индуктора $h = 6,5$ мм. Амплитуда индукции бегущего магнитного поля в месте расположения пробных металлических пластин $B_m = 0,05$ Тл. Следует отметить нелинейный характер зависимостей, вполне соответствующий виду механических характеристик асинхронных электродвигателей. Существенное различие характеристик в области малых частот (в частности, при $f = 50$ Гц) указывает на возможность сортировки металлов по крупности, что подтверждается экспериментом. Например, такая установка позволяет решать важную технологическую задачу отделения кускового лома от стружки.

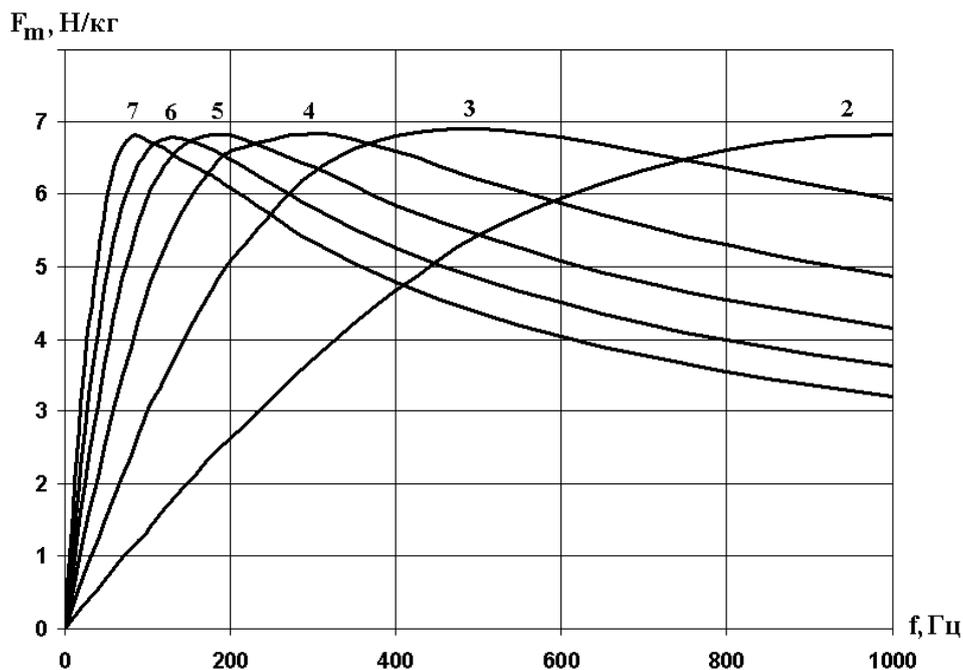


Рис. 2. Зависимости удельного усилия сепаратора от крупности извлекаемых пластин (цифры на графиках – сторона квадратной пластины, см)

Возможность сортировки различных сплавов алюминия по удельной электропроводности показана на рис. 3. Расчеты характеристик сепаратора выполнены на примере опытной установки электродинамической сепарации на основе двухстороннего линейного индуктора, подобной показанной на рис. 1 б. Установка характеризуется следующими данными: полюсное деление $\tau = 75$ мм, немагнитный зазор в активной зоне $\delta = 12$ мм, удаление пластин от поверхности индуктора $h = 5$ мм, амплитуда магнитной индукции в середине активной зоны $B_m = 0,132$ Тл. Сортируемые металлы представлены алюминиевыми сплавами с удельными электропроводностями $\gamma = 35, 28, 20$ и 15 МСм/м (на графиках 1-4 соответственно) при одинаковых размерах пластин ($40 \times 40 \times 2$ мм).

Как видно на рис. 2 и 3, экстремумы кривых удельного усилия с уменьшением размеров и удельной электропроводности металлических частиц смещаются в сторону больших частот, что хорошо иллюстрирует необходимость создания для обработки измельченных и плохо проводящих материалов бегущего магнитного поля повышенной частоты.

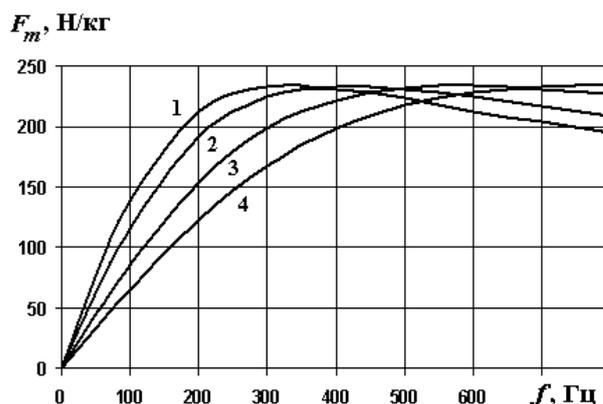


Рис. 3. Зависимости удельного электромагнитного усилия в сепараторах с двухсторонним индуктором от частоты для разных сплавов алюминия

В целом при решении технологических задач первой группы (отделение металлов от неметаллов) можно рекомендовать повышенные частоты магнитного поля (например, 200-500 Гц). При этом обеспечиваются ускорения частиц, близкие к максимальным, и такие ускорения в меньшей степени зависят от размеров и электропроводности металлов. Напротив, при решении технологических задач второй группы (сортировка металлов по крупности и видам сплавов) целесообразна работа в области меньших частот, поскольку именно в этой

области ускорения, сообщаемые частицам с разными свойствами, существенно различны и предсказуемы. При обработке лома цветных металлов на частотах $f \approx 400-500$ Гц близость удельных электромагнитных усилий (возможных ускорений извлекаемых частиц) означает формирование близких траекторий движения разных сплавов и невозможность их разделения. Условиям достижения селективности разделения сплавов в данном случае удовлетворяет, например, частота $f = 50$ Гц.

Для количественной оценки эффективности разделения сплавов удобно ввести коэффициент селективности $k_{сл}$, представляющий собой отношение удельных электромагнитных усилий, развиваемых для разных сплавов ($k_{сл12} = F_{m1}/F_{m2}$ и т.п.). Начальные значения коэффициентов селективности определяются как отношение удельных электропроводностей сплавов. Например, для указанных выше групп алюминиевых сплавов получаем $k_{сл12} = 1,25$; $k_{сл23} = 1,40$ и $k_{сл34} = 1,33$. Изменение коэффициента селективности $k_{сл12}$ при изменении частоты поля f и толщины пробных пластин $d = 2; 4$ и 6 мм для приведенных выше расчетов показано на рис. 4. Как видно, с ростом частоты коэффи-

циент селективности снижается, что соответствует увеличению взаимозасоренности фракций разделяемых металлов.

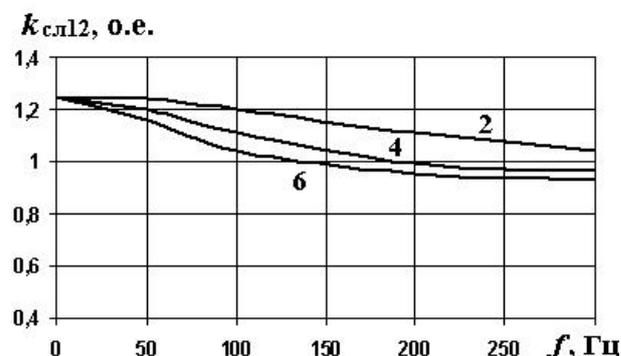


Рис. 4. Зависимости коэффициентов селективности от частоты для пластин разной толщины (показана цифрами на графиках, мм)

В таблице показаны свойства медных сплавов, предоставленных одним из заинтересованных предприятий для исследований процессов индукционной сортировки цветных металлов на кафедре «Электротехника и электротехнологические системы» УрФУ. Образцы, нарубленные из отходов медных сплавов, поступающих на предприятие, имели квадратную форму с размером стороны около 40 мм.

Физические свойства сортируемых медных сплавов

Металлы и сплавы	Удельная электропроводность, МСм/м	Плотность, г/см ³
Медь	58,0	8,90
Медь кадмиевая (Cd < 1%)	48,0	8,89
Бронза (Cr < 1%)	35,0	8,90
Латунь Л90	25,0	8,85
Лс59-1	15,4	8,50
Латунь Л63	14,5	8,47
ОЦС	10,0	9,02
MN	3,5	8,90
МНЖМц (мельхиор)	2,4	8,90

Экспериментальные исследования выполнялись на установках как с двухсторонним линейным индуктором ($\tau = 75$ мм, $f = 50$ Гц), так и с шестиполюсным вращающимся индуктором ($\tau = 56$ мм, $f = 50$ и 100 Гц), подобных показанным на рис. 1 б и в. В том и

другом случае по результатам испытаний получено разделение сплавов, представленных в таблице, на 5 групп в строгом соответствии с их электропроводностью. Для примера на рис. 5 показаны траектории движения пластин, выполненных из разных

медных сплавов (1 – медь кадмиевая Мк1; 2 – латунь Л90; 3 – латунь Л63; 4 – мельхиор МНЖМц), полученные на установке с линейными индукторами.

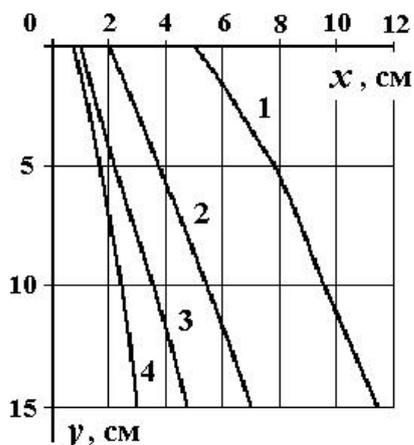


Рис. 5. Траектории образцов сепарируемых медных сплавов на выходе из индуктора

Наряду с индукционной сортировкой сплавов цветных металлов на кафедре «Электротехника и электротехнологические системы» УрФУ исследуются и разрабатываются установки для электродинамической сепарации электронного лома. Показана возможность выделения из измельченного электронного лома алюминиевых сплавов, что является одним из условий повышения экономичности последующей переработки лома с целью извлечения благородных металлов и получения вторичной меди.

После дробления электронного лома, необходимого, прежде всего, для раскрытия материалов, и последующей классификации его по крупности частиц получают фракции с размерами частиц от 20 мм до долей мм. При этом для обработки фракций раз-

ной крупности могут быть использованы все типы сепараторов, показанные на рис. 1.

В частности, для сортировки электронного лома в диапазоне крупности 10-20 мм разработан и создан электродинамический сепаратор с двухсторонним линейным индуктором, подобный показанному на рис. 1 б, находящийся сейчас в опытно-промышленной эксплуатации [9].

В заключение отметим, что при разделении на фракции сложных многокомпонентных отходов (например, твердых бытовых отходов) часто используется ручной труд. При этом сортировка материалов выполняется по визуальным признакам. Механизация таких операций требует создания сложных технологических линий и не всегда экономически оправдана. В отличие от этого ручная сортировка лома цветных металлов по видам сплавов затруднительна, поскольку разные сплавы меди (или разные алюминиевые сплавы) визуально неразличимы. В случае электронного лома ручная сортировка неэффективна из-за малости металлических частиц. С учетом этого индукционная сортировка лома цветных металлов с помощью электродинамических сепараторов практически не имеет альтернативы. Этим обусловлены необходимость изучения процессов индукционной сортировки металлов в бегущем магнитном поле и повышенный интерес предприятий к результатам научных разработок. Проводимые в УрФУ исследования процессов и установок электродинамической сепарации и достигнутые результаты создают хорошие предпосылки для успешного развития рассматриваемых электротехнологий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колобов Г.А. Сбор и обработка вторичного сырья цветных металлов / Г.А. Колобов, В.Н. Бредихин, В.М. Чернобаев. М.: Металлургия, 1993. 288 с.
2. The problem of aluminium recycling // Recycling International. 2007. № 3. P. 14-16.
3. Золотаревский В.С. Вторичные алюминиевые сплавы: состояние и перспективы / В.С. Золотаревский // Цветные металлы. 2004. № 7. С. 76-80.

4. Абросимов А.С. Подготовка отходов цветных металлов к металлургическому переделу: зарубежный опыт / А.С. Абросимов, Ю.А. Бондаренко // Цветные металлы. 1989. № 8. С. 100-104.
5. Lungu M. Eddy-current separation of small non-ferrous particles using a single disc separator with permanent magnet / M. Lungu, P.C. Rem // IEEE Transaction on Magnetics. 2003. № 39(4). P. 2062-2067.

6. **Бредихин В.Н.** Электродинамическая сепарация лома и отходов цветных металлов за рубежом / В.Н. Бредихин, Н.И. Извеков, А.Я. Лаушкина // Цветная металлургия. 1982. № 4. С. 24-25.

7. **Коняев А.Ю.** Применение электродинамических сепараторов в технологиях вторичной цветной металлургии / А.Ю. Коняев, И.А. Коняев, С.Л. Назаров // Цветные металлы. 2012. № 11. С. 22-25.

8. Устройства для электродинамической сепарации лома и отходов цветных металлов / А.А. Патрик, Н.Н. Мурахин, Т.Н. Дерендяева, А.Ю. Коняев, С.Л. Назаров //

Промышленная энергетика. 2001. № 6. С. 16-19.

9. Переработка электронного лома: применение электродинамических сепараторов / В.В. Воскобойников, А.А. Дистанов, А.Ю. Коняев, С.Л. Назаров, Н.С. Якушев // Твердые бытовые отходы. 2014. № 2. С. 26-30.

10. **Коняев А.Ю.** Исследования характеристик электродинамических сепараторов на основе двумерной модели / А.Ю. Коняев, С.Л. Назаров // Электротехника. 1998. № 5. С. 52-57.

Коняев Андрей Юрьевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Электротехника и электротехнологические системы» Уральского федерального университета

Абдуллаев Жахонгир Одашжонович – аспирант кафедры «Электротехника и электротехнологические системы» Уральского федерального университета

Багин Дмитрий Николаевич – аспирант кафедры «Электротехника и электротехнологические системы» Уральского федерального университета

Коняев Иван Андреевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические машины» Уральского федерального университета

Назаров Сергей Леонардович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и электротехнологические системы» Уральского федерального университета

Andrey Yu. Konyaev – Dr. Sc., Professor, Department of Electrical Engineering and Electrotechnological Systems, Urals Federal University

Zhahongir O. Abdullaev – Postgraduate, Department of Electrical Engineering and Electrotechnological Systems, Urals Federal University

Dmitriy N. Bagin – Postgraduate, Department of Electrical Engineering and Electrotechnological Systems, Urals Federal University

Ivan A. Konyaev – Ph. D., Associate Professor, Department of Electrical Machines, Urals Federal University

Sergey L. Nazarov – Ph. D., Associate Professor, Department of Electrical Engineering and Electrotechnological Systems, Urals Federal University

Статья поступила в редакцию 11.08.15, принята к опубликованию 11.09.15

ИНДУКЦИОННЫЙ МГД-НАСОС С ОДНОПЛОСКОСТНОЙ КОНЦЕНТРИЧЕСКОЙ ОБМОТКОЙ ИНДУКТОРА

Ф.Е. Тарасов, Е.Л. Швыдкий

INDUCTION MHD-PUMP WITH A SINGLE-PLANE CONCENTRIC COIL INDUCTOR

F.E. Tarasov, E.L. Shvydkiy

Приведены результаты компьютерного моделирования индукционного магнетогидродинамического насоса для транспорта легких цветных металлов. Обосновывается выбор конструкции обмоток насоса.

Ключевые слова: МГД-насос, линейный асинхронный двигатель, плоская катушка, обмотка, фактор нагрева

Для транспортировки жидкого металла в литейных установках в ряде случаев удобно использовать индукционные МГД-насосы. Технологическая цепочка для процесса литья в кристаллизатор скольжения с подачей

The article contains the computer simulation results of an induction magnetohydrodynamic pump designed for transportation of light non-ferrous metals. Justification of the pump windings design is given.

Keywords: MHD-pump, linear induction motor (LIM), flat coil, winding, heat factor

металла МГД-насосом изображена на рис. 1. При этом к насосам предъявляются повышенные требования по надежности, поскольку в случае неисправности насоса отливаемый слиток отбраковывается.

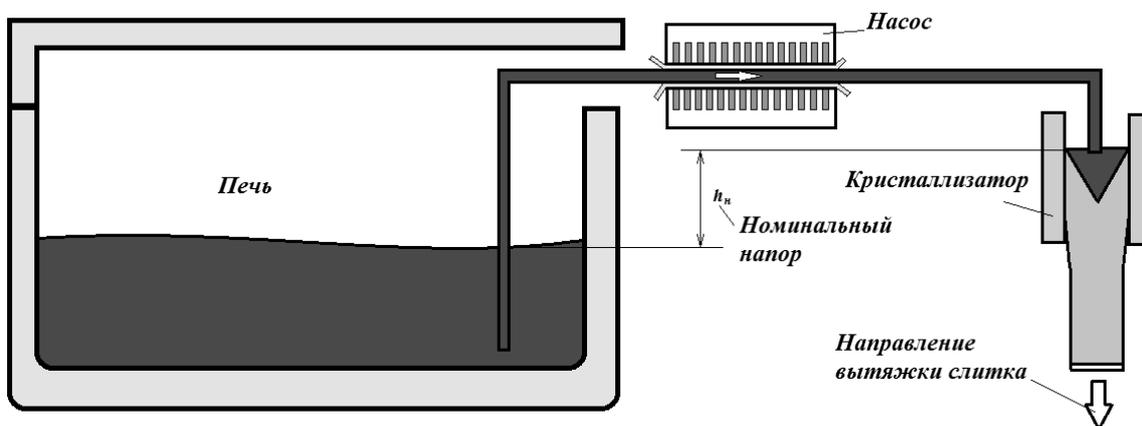


Рис. 1. Технология полунепрерывного литья в кристаллизатор скольжения

Из основных требований к насосам для литейных машин можно выделить следующие:

- малые габариты (ограничены расстоянием от стенки металлургической емкости до литейной машины);
- относительно высокое развиваемое усилие (определяет максимальный напор насоса);

– высокие рабочие температуры обмоток (металлотракт должен располагаться как можно ближе к активной части магнитной системы, а возможности теплоизоляции и охлаждения обмоток в условиях металлургического производства ограничены);

– конструктивная простота, легкость монтажа и обслуживания.

Исходя из вышеперечисленных требований сформировалась конструкция плоского линейного индукционного насоса (ПЛИН), которая применяется на ряде металлургических предприятий для литейного производства (рис. 2). Насос представляет собой двухсторонний линейный асинхронный двигатель (ЛАД) с жидкометаллическим вторичным элементом, индуктор которого создает бегущее вдоль оси металлотракта поперечное (пронизывающее металлотракт) магнитное поле.

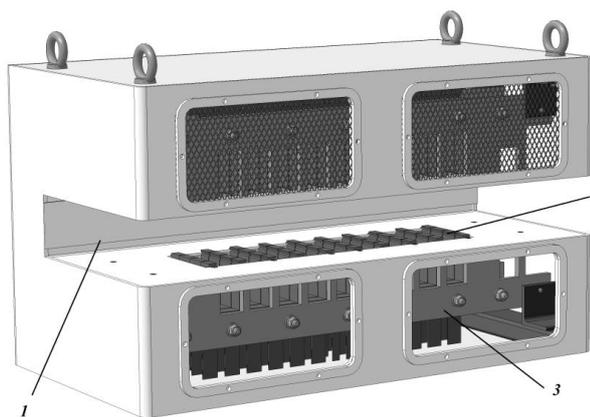


Рис. 2. Конструкция насоса: 1 – проем для установки металлотракта; 2 – активная поверхность индуктора; 3 – магнитопровод нижней части ЛАД

Представляет определенный интерес сравнение эффективности схем обмоток, которые можно расположить в заданных габаритах насоса. Для сравнения были выбраны схемы с различным числом полюсов $2p$ с полным и укороченным шагом, с однослойными и двухслойными катушками. Расчетная модель была создана в программе Elcut, учитывающая в двумерной постановке продольный краевой эффект. Для учета поперечного краевого эффекта вносились поправки в электропроводность вторичного элемента [1].

Увеличение полюсного деления τ неоднозначно влияет на тяговое усилие машины. С одной стороны, увеличение полюсного деления приводит к снижению относительного зазора машины, что повышает коэффициент мощности. С другой стороны, увеличение полюсного деления при фиксированной ширине машины уменьшает ее относительную

ширину, усиливая влияние поперечного краевого эффекта, который приводит к снижению коэффициента полезного действия и тягового усилия машины. Из-за этого имеет определенный смысл провести исследование влияния числа полюсов на характеристики ПЛИН при заданных габаритах насоса. Сравнение проводилось для трех вариантов машины – базового варианта с 6 полюсами, а также четырех- и двухполюсных.

Сопоставление вариантов проводилось при фиксированном значении фактора нагрева.

Равенство фактора нагрева для всех индукторов соответствует равенству потерь в обмотке. При этом плотность тока принималась равной $1,76 \text{ А/мм}^2$.

В модели была учтена стенка канала насоса толщиной 1 мм, выполненная из немагнитной стали. Не учитывались конструктивные особенности обмоток индуктора, такие как взаимное расположение лобовых частей обмоток, а также катушечная и витковая изоляция проводников.

Учет поперечного краевого эффекта осуществлялся изменением проводимости γ металла в канале [1].

На рис. 3 представлены распределения магнитного поля трех вариантов насоса, а на рис. 4 приведены распределения тока по сечению вторичного элемента для тех же вариантов обмоток. Результаты расчета приведены в табл. 1. Как видно, уменьшение числа пар полюсов при постоянной длине машины приводит к значительному увеличению усилия.

В таблицах приведено следующее обозначение типа обмоток: первая буква – количество слоев (Д – двухслойная; Ш – шаблонная; К – концентрическая), первая цифра – шаг обмотки; 2 группа цифр – величина фазной зоны, мм.

Согласно табл. 1 даже при практически трехкратном снижении эффективной проводимости вторичного элемента, вызванном влиянием поперечного краевого эффекта, наибольшее усилие дает двухполюсный индуктор, при этом по сравнению с шестиполюсным прототипом усилие возрастает почти в 7 раз.

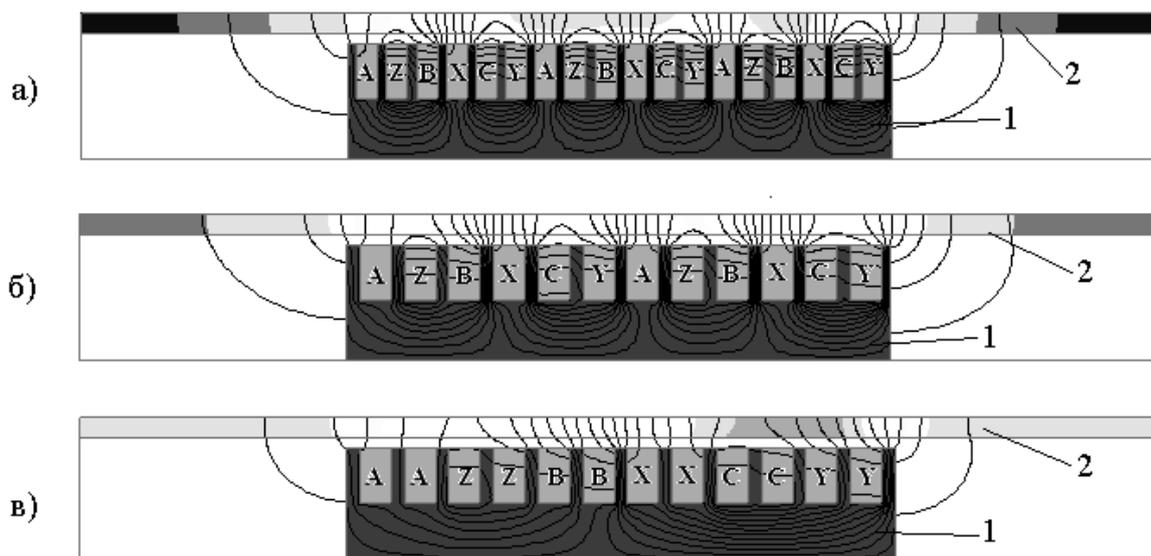


Рис. 3. Распределения магнитного поля в индукторах с различным числом полюсов: а – $2p = 6$; б – $2p = 4$; в – $2p = 2$; 1 – индуктор; 2 – канал с жидким металлом

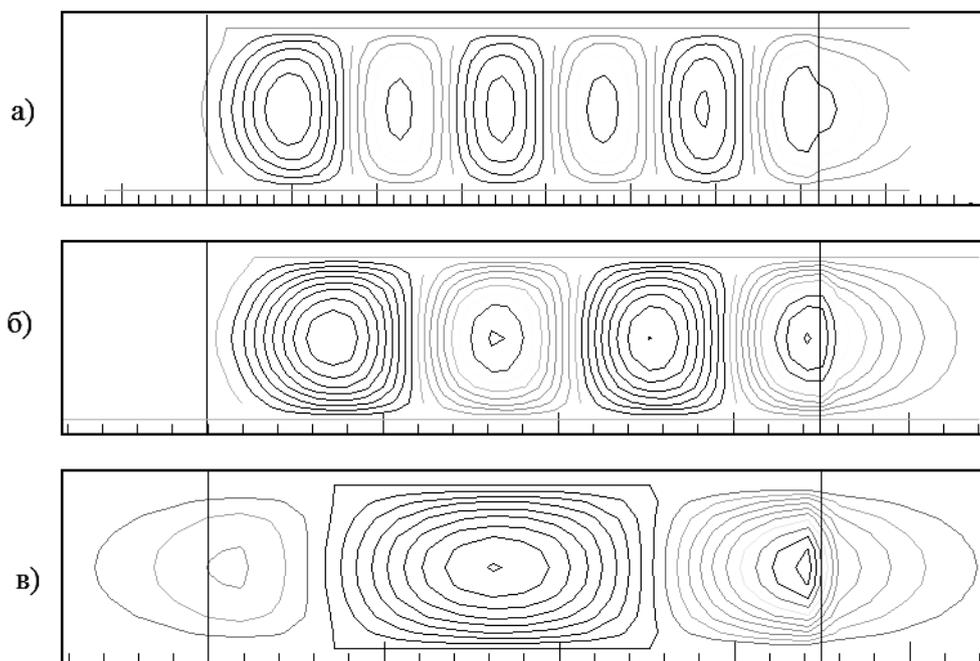


Рис. 4. Распределения вторичных токов: а – $\tau = 60$ мм, $q = 1$; б – $\tau = 90$ мм, $q = 2$; в – $\tau = 180$ мм, $q = 2$

Таблица 1

Параметры обмоток плоского линейного индукционного насоса

Тип обмотки	Число полюсов	Число пазов	Число пазов на полюс и фазу	Проводимость ВЭ, МСм·м	Коэф-т поперечного краевого эффекта	Максимальная индукция в зубце, Тл	Плотность тока, А/мм ²	Линейная нагрузка, А/м	Усилие, Н
ДШ-1-60	6	18	1	3,1	0,621	0,68	1,76	46,8	11,5
ДШ-1-60	4	12	2	3,1	0,459	0,64	1,76	46,8	27,3
ДШ-1-60	2	12	2	3,1	0,192	1,02	1,76	46,8	75,6

Далее, насос должен надежно работать в крайне тяжелых для изоляции условиях. При длительной непрерывной работе температура активной части насоса (зубцы магнитопровода, части обмоток, расположенные в пазах магнитопровода) становится сопоставимой с температурой металла в канале (у жидкого магния $\sim 750^\circ\text{C}$), и надо обеспечить надежную изоляцию обмотки, работающей при таких температурах. Сейчас такая изоляция выполняется стекло-сланцевыми лентами. Надежность такой изоляции невысока. Отмечались случаи выхода из строя насоса по причине повреждения изоляции в течении нескольких часов непрерывной работы. Повысить надежность изоляции можно, используя новые высокотемпературные изоляционные материалы и применяя предельно простую форму катушек обмотки. Последнее обстоятельство упрощает технологию наложения изоляции и снижает возможность брака при производстве. Наиболее пригодными являются двухслойные концентрические обмотки, катушки которых могут быть выполнены плоскими без изгиба лобовых частей.

Такие обмотки могут быть выполнены как шестизонными, так и трехзонными, при этом шестизонные обмотки с плоскими катушками могут быть реализованы только с частичным заполнением пазов, поэтому были проведены расчеты шестизонных и трехзонных обмоток с различным числом пазов на полюс и фазу q и различным относительным шагом β . Расчеты проводились без учета изоляции. В качестве базового варианта принималась шестизонная шаблонная двухслойная обмотка с полным шагом. Распределение магнитного поля для рассмотренных вариантов приведено на рис. 5, а результаты расчета – в табл. 2.

Как и в предыдущем вычислительном эксперименте, сравнение различных вариантов осуществлялось при фиксированном значении фактора нагрева, плотности тока в проводниках и длины индуктора. Поэтому при изменении конструкции обмоток (числа зон, числа пазов на полюс и фазу, отно-

сительного шага обмоток и т.д.), произошло изменение геометрии паза таким образом, чтобы фактор нагрева оставался неизменным.

Наихудший результат дали трехзонная обмотка и шестизонная обмотка с полным заполнением пазов. Остальные варианты дали близкие значения усилия (60-70 Н). Наибольшие значения усилия дают обмотки с полным шагом (рис. 5 б, з). Укорочение шага обмотки (рис. 5 в, д, е) приводит к снижению усилия. Помимо величины усилия, в расчетах определялось максимальное значение индукции в основании зубца. В этом отношении индуктор с обмоткой с полным шагом и $q = 3$ (рис. 5 з), а также индуктор с обмоткой с укорочением $5/7.5$ и $q = 3$ (рис. 5 д) будут входить в насыщение. По этой причине эти варианты были исключены. Помимо величины усилия, при выборе типа обмотки оценивались технологичность и стоимость изготовления насоса.

Поскольку рассматриваемые машины предполагается изготавливать малыми сериями, традиционный способ производства магнитопровода штамповкой неприемлем по экономическим соображениям. Для изготовления листов магнитопровода предлагается использовать технологии лазерной или электроэрозионной резки. При этом стоимость работы пропорциональна длине разреза. В этом отношении более выгодным является индуктор с наименьшим числом пазов. Среди рассмотренных вариантов наименьшее число пазов имеет обмотка с $q = 2$ и укорочением $3/4.5$ (рис. 5 в). По величине усилия она проигрывает только обмотке с $q = 2$ и полным шагом, однако величина усилия составляет 59.2 Н что фактически в 6 раз больше усилия прототипа.

Наконец, в скорректированной модели было учтено снижение линейной нагрузки при уменьшении сечения проводников, обусловленном наличием изоляции катушек (рис. 6). Толщина изоляции принималась равной 2 мм на сторону. Расчет проводился также и для насоса прототипа. Результаты приведены в табл. 3.

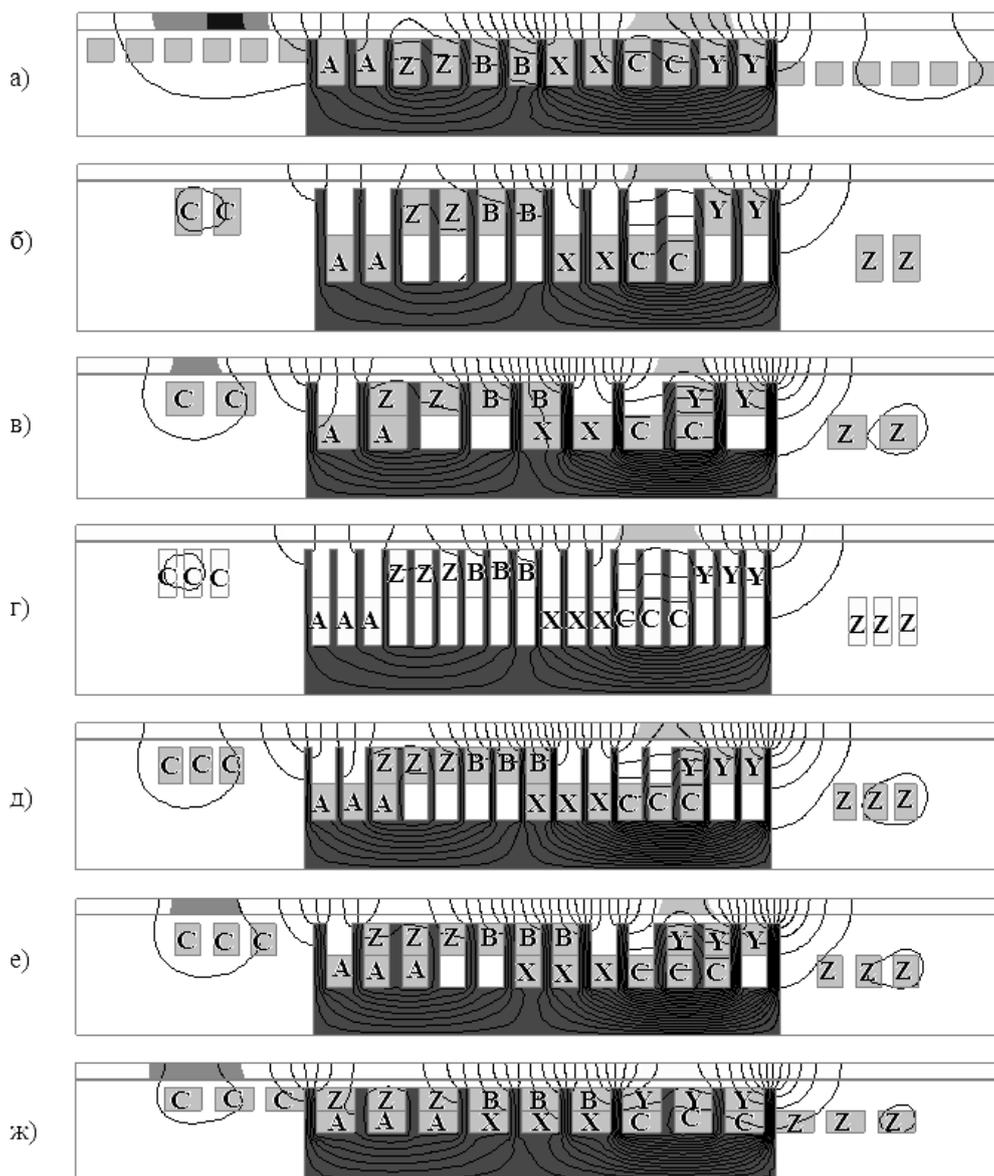


Рис. 5. Распределения магнитного поля в индукторах с плоскими катушками различной конструкции

Таблица 2

Параметры обмоток

Тип обмотки	Рисунок	Число полюсов	Число пазов	Число пазов на полюс и фазу	Коэффициент поперечного краевого эффекта	Максимальная индукция в зубце, Тл	Плотность тока, А/мм ²	Линейная нагрузка, А/м	Усилие, Н
ДШ-1-60	5, а	2	12	2	0,192	0,88	1,76	46,8	81,2
ДК-1-60	5, б	2	12	2	0,192	1,37	1,76	46,8	70,5
ДК-3/4.5-60	5, в	2	9	2	0,192	1,11	1,76	46,8	59,2
ДК-1-60	5, г	2	18	3	0,192	1,83	1,76	46,8	72,8
ДК-5/7.5-60	5, д	2	15	3	0,192	1,49	1,76	46,2	63,8
ДК-2/3-60	5, е	2	12	3	0,192	1,05	1,77	46,2	55,5
ДК-1-120	5, ж	2	12	3	0,192	1,10	1,76	46,8	37,5

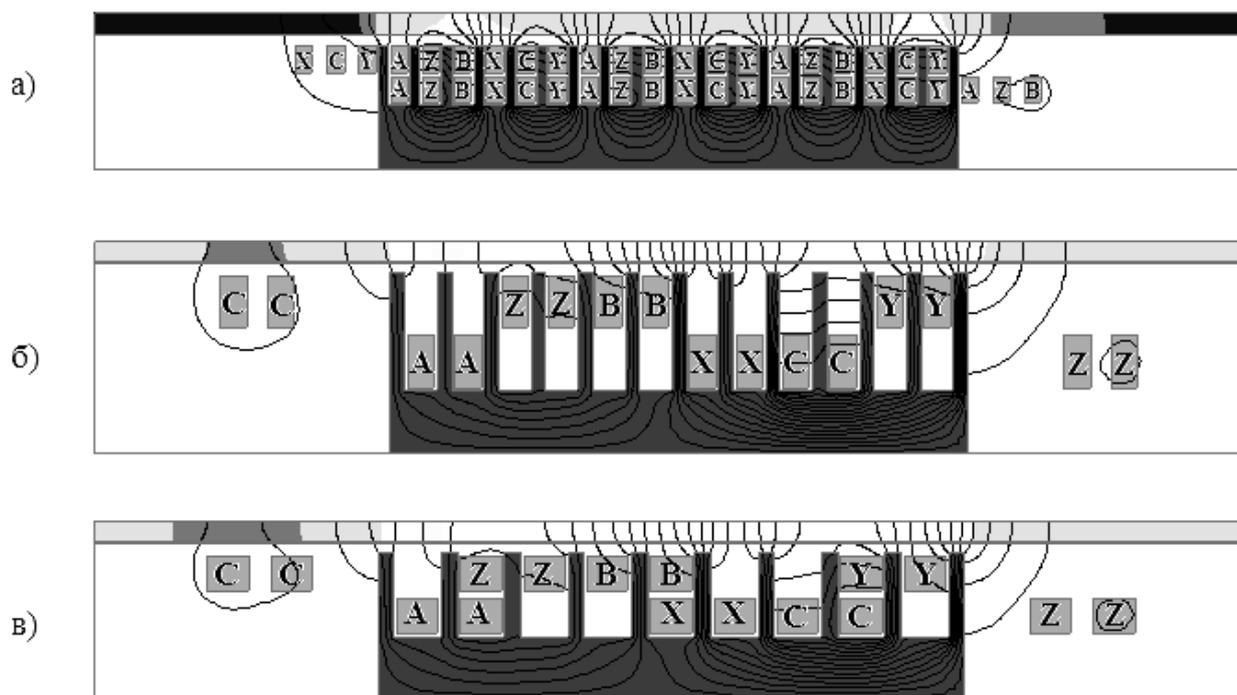


Рис. 6. Распределения магнитного поля в индукторах: а – прототип; б, в – с наилучшими показателями

Таблица 3

Параметры обмоток

Тип обмотки	Рисунок	Число полюсов	Число пазов	Число пазов на полюс и фазу	Коэффициент поперечного краевого эффекта	Максимальная индукция в зубце, Тл	Плотность тока, А/мм ²	Линейная нагрузка А/м	Усилие, Н
ДШ-1-60	6, а	6	18	1	0,621	0.51	1.76	32.9	5.7
ДК-1-60	6, б	2	12	2	0,192	1.00	1.76	33.9	37.2
ДК-3/4.5-60	6, в	2	9	2	0,192	0.83	1.76	34.2	32.0

При сравнении результатов расчета, приведенных в табл. 2 и 3, для машин с аналогичными типами обмоток видно, что учет изоляции существенно снижает расчетную линейную нагрузку и электродинамическое усилие, развиваемое в канале. Становится очевидным, что различие в усилиях двухслойных обмоток при учете в модели изоляции катушек становится не столь существенным по сравнению с приведенным в табл. 2, где изоляция катушек не учитывалась.

Итак, можно сделать вывод о целесообразности применения в плоских индукционных машинах с плоскими катушками схем обмоток с полузаполненными пазами как с полным, так и с укороченным шагом обмоток. Анализ широкого спектра вариантов обмоток с различным числом зон, пазов на полюс и фазу, относительным шагом и т.п. позволяет при ограниченных габаритах машины сделать выбор в пользу схемы обмотки с $q = 2$ и укорочением 3/4.5 (рис. 6 в).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Веселовский О.Н.** Линейные асинхронные двигатели / О.Н. Веселовский,

А.Ю. Коняев, Ф.Н. Сарапулов. М.: Энергоатомиздат, 1991.

Тарасов Федор Евгеньевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и электротехнологические системы» Уральского федерального университета

Швыдкий Евгений Леонидович – магистрант кафедры «Электротехника и электротехнологические системы» Уральского федерального университета

Fedor E. Tarasov – Ph. D., Associate Professor, Department of Electrical Engineering and Electrotechnological Systems, Urals Federal University

Evgeniy L. Shvydkiy – Master Student, Department of Electrical Engineering and Electrotechnological Systems, Urals Federal University

Статья поступила в редакцию 12.08.15, принята к опубликованию 11.09.15

К СВЕДЕНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

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

ИНЖЕНЕРНЫЙ РАСЧЕТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ПРЕЦИЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ ВНУТРЕННИХ СФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ КВАРЦЕВЫХ РЕЗОНАТОРОВ

Н.В. Бекренев, И.В. Злобина, М.М. Фролов

ENGINEERING ANALYSIS OF TECHNOLOGICAL MODES TO ULTRASONIC ASSISTED PRECISION PROCESSING OF INTERNAL SPHERICAL SURFACES IN QUARTZ RESONATORS

N.V. Bekrenev, I.V. Zlobina, M.M. Frolov

Обоснована схема и установлены расчетные зависимости для определения режимов финишной обработки тонкостенных сферических поверхностей деталей навигационных приборов из кварца и кварцевого стекла с использованием ультразвуковых колебаний, амплитуда и частота которых обеспечивают равномерную скорость резания по поверхности сферы без применения сложной кинематики движения инструмента.

Ключевые слова: твердотельный вибрационный гироскоп, кварцевый резонатор, сферошлифование, точность геометрической формы, поверхностный слой, ультразвук, амплитуда и частота колебаний инструмента, кинематика

К перспективным средствам навигации летающих объектов относятся твердотельные вибрационные гироскопы (ТВГ). Основным элементом ТВГ является резонатор, особенностями конструкции которого являются применение в качестве материала кварцевого стекла или кварца, наличие цилиндрической ножки на внутренней и внешней поверхностях полусферической формы, малая (1-2 мм) толщина стенок, высокие требования к точности формы и качеству поверхности (отклонения формы не более 0,5 мкм, шероховатость $Ra \leq 0,04$ мкм). Внешний вид типовых резонаторов ТВГ в виде 3-D моделей представлен на рис. 1.

The paper provides the scheme and calculated dependence to determine the modes for the finished shape of thin-walled spherical surfaces in parts of navigation devices made of quartz or quartz glass using ultrasonic assisted fluctuations. The amplitude and frequency of these fluctuations ensure a uniform velocity of cutting over the surface of the sphere without using any sophisticated kinematics of the tool motion.

Keywords: solid-state vibration gyroscope, quartz resonator, grinding of spheres, accuracy of a geometrical form, blanket, ultrasound, amplitude and frequency of fluctuations of the tool, kinematics

Наиболее сложными и ответственными технологическими операциями при изготовлении резонатора являются формообразование и финишная полировка наружной и внутренней сферы, ограниченных в центральной части цилиндрическими ножками. Обработка сферических поверхностей известными методами заключается в многооперационном шлифовании и последующем полировании специальными инструментами. При этом высокая твердость и хрупкость материала приводит к образованию трещин, протяженность которых превышает 3 размера абразивного зерна инструмента. Этот слой нарушает стабильную работу ТВГ и снижает назначенный ресурс.

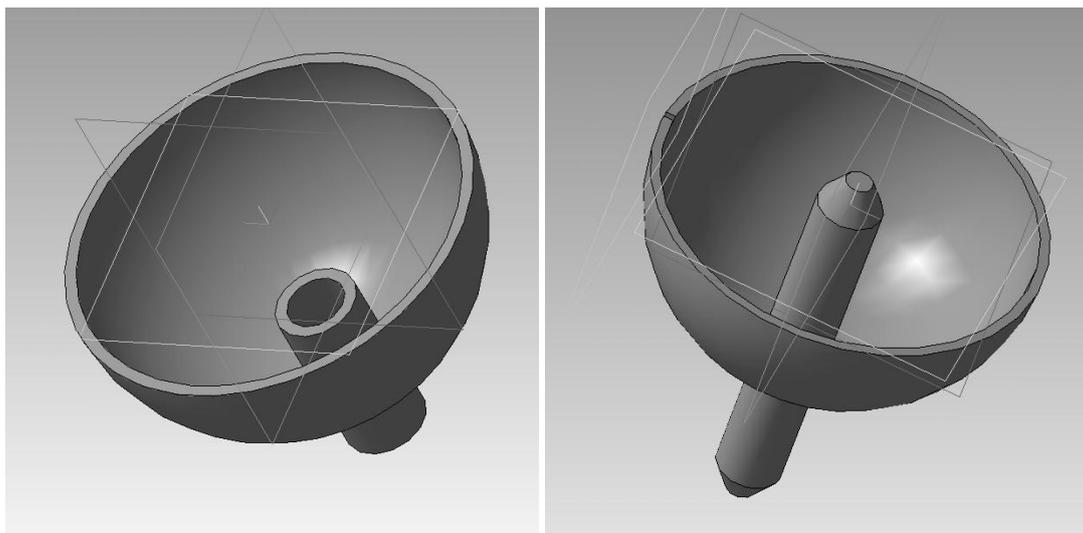


Рис. 1. Типовые конструкции резонаторов ТВГ (3-D модели)

Удаляется слой трещин многопереходной полировкой. Указанное требует увеличения припуска под полировку и вызывает рост длительности технологического цикла. Кинематика сферошлифования и сферопо-

лирования включает сочетание вращательного и возвратно-качательного движений инструмента [1]. Типовые схемы представлены на рис. 2 а-в.

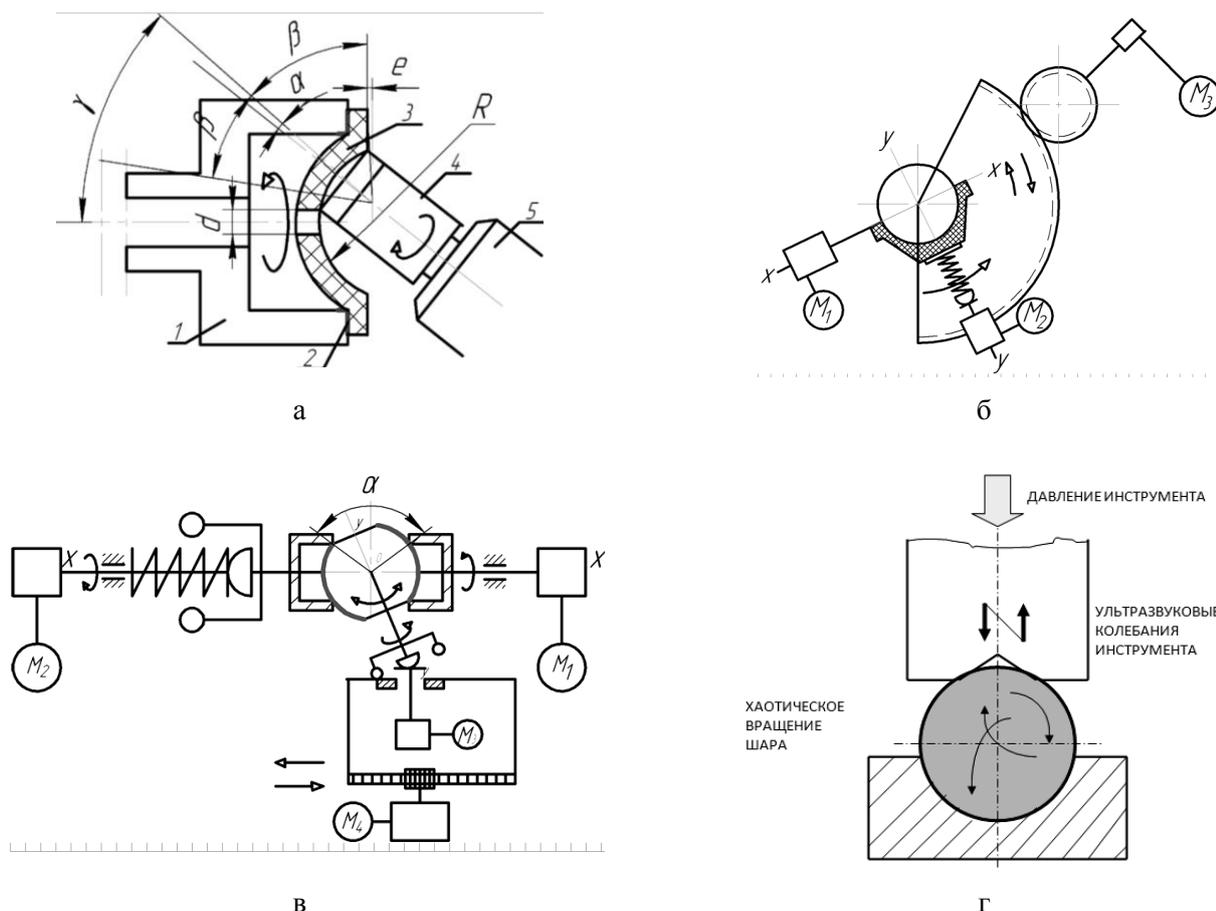


Рис. 2. Технологические схемы сферошлифования и сферополирования: а – трубчатым алмазным инструментом, б – сферическим полировальником, в – двумя чашечными инструментами, г – свободным шаром, вращающимся под действием ультразвука

Смена знака скоростей и ускорений вызывает динамические нагрузки, а наличие ножки в центре внутренней полусферы делает практически невозможным исключение ударов инструмента. Это приводит к возникновению повышенных напряжений, которые приводят к преждевременному разрушению резонатора. Также существует опасность подрезания ножки инструментом.

Исключение качания инструмента приводит к неравномерности съема по поверхности вследствие различия скоростей по сечениям резонатора. Использование литья, штамповки или аддитивных технологий не обеспечивает требуемой размерной точности. Применение шлифовки свободным шаром (рис. 2 з), совершающим хаотическое вращение при воздействии на него энергии ультразвуковых колебаний прижатого волновода, эффективно применяемое, например, в подшипниковой промышленности при финишной обработке поверхностей штампов, практически неосуществимо применительно к резонатору ТВГ вследствие того, что центр полусферы занят ножкой.

Таким образом, существующие технологические методы не позволяют стабильно осуществлять получение требуемых характеристик резонатора в условиях серийного производства.

Нами выполнены исследования [2], в ходе которых установлена зависимость протяженности и концентрации трещин в поверхностном слое хрупких материалов от амплитуды ультразвуковых колебаний инструмента и показана возможность высокоэффективной обработки при минимальной дефектности материала за счет снижения амплитуды по критерию допустимой протяженности трещин и увеличения частоты колебаний до уровня, обеспечивающего необходимую интенсивность съема.

С учетом данных исследований для решения задачи обработки резонатора ТВГ с требуемым качеством и точностью предлагается использовать следующий подход.

Вести обработку только с вращением изделия на минимальной скорости без качания инструмента, что исключит ударные нагрузки и опасность подрезания ножки резонатора (рис. 3).

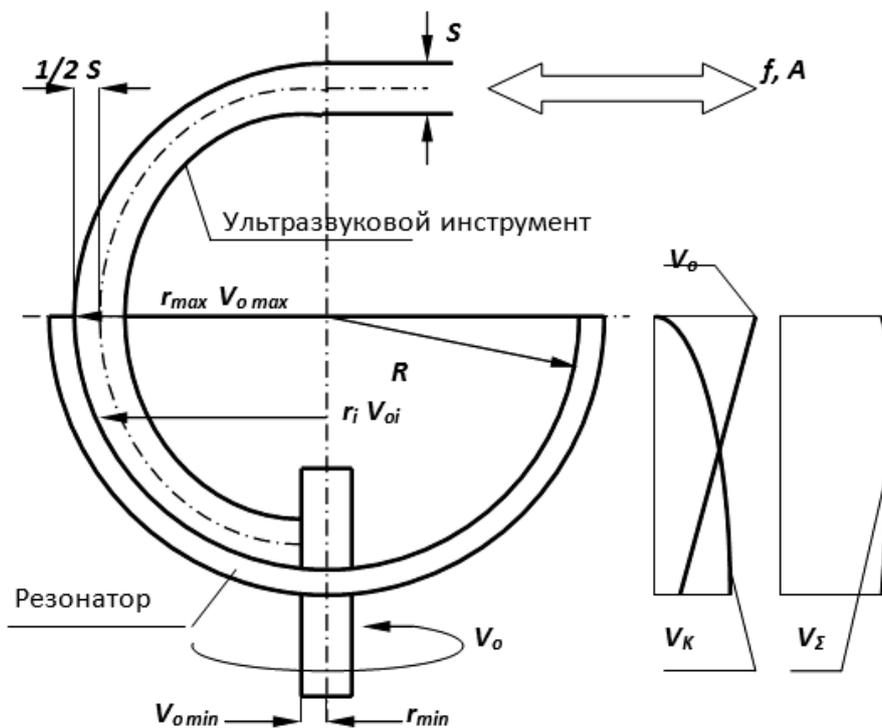


Рис. 3. Схема ультразвуковой обработки резонатора ТВГ (V_0 – скорость вращения резонатора, V_K – скорость колебаний инструмента, $V_Σ$ – суммарная скорость, R – радиус сферы резонатора, r – текущий радиус вращения, S – толщина инструмента, f и A – частота и амплитуда колебаний)

Для выравнивания эпюры скоростей, а следовательно съема материала по поверхности, использовать сообщение инструменту специального профиля ультразвуковых колебаний, амплитуда и частота которых выбираются по условиям непревышения заданной техническими требованиями глубины нарушенного трещинами слоя. Форма инструмента обеспечивает такое распределение скорости колебаний, которое в сочетании с эпюрой скорости вращения обеспечивает выравнивание значений скорости по всей обрабатываемой поверхности.

Чтобы распределение скорости колебаний инструмента по сечениям резонатора, перпендикулярным его оси вращения, было обратным распределению окружной скорости, на поверхности внутренней сферы резонатора, длина образующей которой, очевидно, равна четверти длины окружности сферы радиуса R , должна уложиться четверть длины волны ультразвуковых колебаний. Это является необходимым условием осуществления равномерного съема материала и точности обработки при отсутствии качательных движений и вращения инструмента. В этом случае будет соблюдаться условие: при $V_0 = \max - V_K = \min$ и при $V_0 = \min - V_K = \max$. Эпюра суммарной скорости по поверхности сферы будет относительно равномерной, т.е. суммарная скорость по длине образующей примерно одинакова, что обеспечит равномерность съема в различных сечениях обрабатываемой поверхности. При этом необходимо рассматривать длину волны колебаний по среднему сечению инструмента, радиус кривизны которого будет отличаться от радиуса сферической поверхности резонатора на половину толщины инструмента.

Для определения частоты ультразвука, обеспечивающей данное условие, воспользуемся известным выражением [3]:

$$f = \frac{C}{\lambda}, \quad (1)$$

где f – резонансная частота ультразвуковых колебаний; C – скорость звука в материале инструмента, λ – длина волны колебаний.

С учетом изложенного выше имеем равенство

$$\frac{1}{4} \lambda = \frac{1}{4} 2\pi R_H, \quad (2)$$

где R_H – радиус кривизны инструмента.

В расчете необходимо учесть распространение ультразвука по оси инструмента, имеющего толщину S , т.е. радиус кривизны последнего R_H будет меньше радиуса сферы на $1/2S$. С учетом этого после преобразований получим выражение для определения длины волны колебаний инструмента:

$$\frac{1}{4} \lambda = \frac{\pi}{2} (R - S). \quad (3)$$

Если внутри резонатора располагается цилиндрическая ножка радиуса r_{\min} , то в расчете длины волны в инструменте необходимо учесть уменьшение длины образующей сферы на Δl , которое вследствие относительной малости радиуса ножки можно принять равным $\Delta l = r_{\min}$. Тогда (3) примет вид

$$\frac{1}{4} \lambda = \left[\frac{\pi}{2} (R - S) - r_{\min} \right]. \quad (4)$$

Подставив (4) в (1), получим выражение для определения частоты колебаний инструмента в зависимости от размеров основных элементов резонатора:

$$f = \frac{C}{2\pi(R - S) - 4r_{\min}}. \quad (5)$$

На основе совместного рассмотрения известных зависимостей определения окружной скорости изделия через его диаметр и число оборотов, а также средней скорости ультразвуковых колебаний, приравняв $V_0 = V_K$ в каждом из сечений резонатора, перпендикулярных оси его вращения, получим выражение для определения числа оборотов резонатора при его ультразвуковой обработке:

$$n = \frac{1200 f A \left(1 - \frac{r_{\min}}{R} \right)}{\pi R \cos \left(\arcsin \frac{r_{\min}}{R} \right)}, \quad (6)$$

где A – амплитуда колебаний инструмента.

Поскольку задача финишного формообразования резонатора ТВГ состоит, как указано выше, не только в обеспечении точности формы и снижении при этом динамических нагрузок, но и в снижении размеров зоны трещинообразования, в выражении (6) необходимо учитывать максимально допустимое по критерию трещинообразования значение амплитуды колебаний инструмента.

В [4] получено выражение для максимально допустимой амплитуды колебаний, вызывающей трещинообразование в аморфных материалах:

$$A_M = \frac{[\sigma] e^{\delta x}}{E}, \quad (7)$$

где δ – коэффициент затухания ультразвуковой волны, E – модуль Юнга, $[\sigma]$ – пре-

дел прочности материала на сжатие, x – глубина распространения трещины.

После подстановки (7) в (6) окончательно получим для числа оборотов резонатора:

$$n = \frac{1200 f [\sigma] \left(1 - \frac{r_{\min}}{R}\right) e^{\delta x}}{\pi R E \cos\left(\arcsin \frac{r_{\min}}{R}\right)}. \quad (8)$$

В табл. 1 и 2 и на рис. 4-6 приведены результаты расчетов требуемых частот колебаний инструмента и числа оборотов резонатора для различных его размеров. В качестве материала основы инструмента принят сплав Д16Т, скорость звука $c = 5000$ м/с. Для различных условий трещинообразования определены значения амплитуды колебаний 0,5; 1,0 и 2,0 мкм.

Таблица 1

Расчетные частоты колебаний инструмента (Гц), обеспечивающие одинаковые значения скорости резания во всех сечениях резонатора, в зависимости от радиуса сферы и ножки

$r_{\min}, \text{М}$ \diagdown $R, \text{мм}$	0,02	0,03	0,04
0,004	106837,6	45620,4	29002,0
0,006	128866,0	49212,6	30413,6
0,008	162337,7	53418,8	31969,0

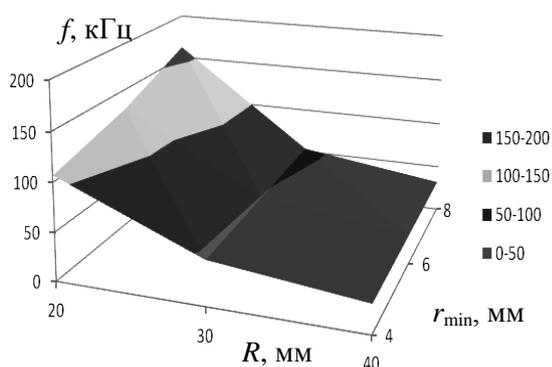


Рис. 4. Зависимость частоты колебаний инструмента f от размеров резонатора (радиус сферы R и радиус ножки r_{\min})

Видно, в большей степени на частоту колебаний инструмента оказывает влияние радиус сферы резонатора. Радиус ножки влияет существенно меньше, особенно при

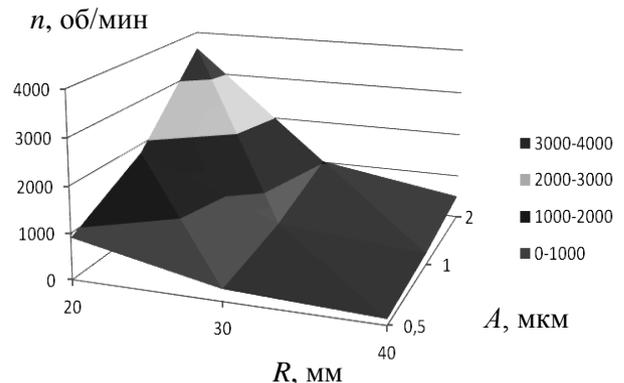


Рис. 5. Зависимость числа оборотов инструмента n от амплитуды его колебаний и радиуса сферы резонатора R при $r_{\min} = 6$ мм

больших размерах сферы. Это связано с различной длиной волны ультразвука, находящейся в прямой зависимости от длины образующей сферы.

Число оборотов резонатора в зависимости от размеров сферы, частоты и амплитуды колебаний инструмента

$R = 0,02 \text{ м}$				
$r_{\min}, \text{ М}$	$f, \text{ Гц}$	$A, \text{ МКМ}$		
		0,5	1	2
0,004	106837,6	833,4	1666,8	3333,6
0,006	128866,0	903	1806	3612
0,008	162337,7	1015	2030	4060
$R = 0,03 \text{ м}$				
$r_{\min}, \text{ М}$	$f, \text{ Гц}$	$A, \text{ МКМ}$		
		0,5	1	2
0,004	45620,4	254	508	1016
0,006	49212,6	256	512	1024
0,008	53418,8	259	518	1036
$R = 0,04 \text{ м}$				
$r_{\min}, \text{ М}$	$f, \text{ Гц}$	$A, \text{ МКМ}$		
		0,5	1	2
0,004	29002,0	125	250	500
0,006	30413,6	124,9	249,8	499,6
0,008	31969,0	124,7	249,4	498,8

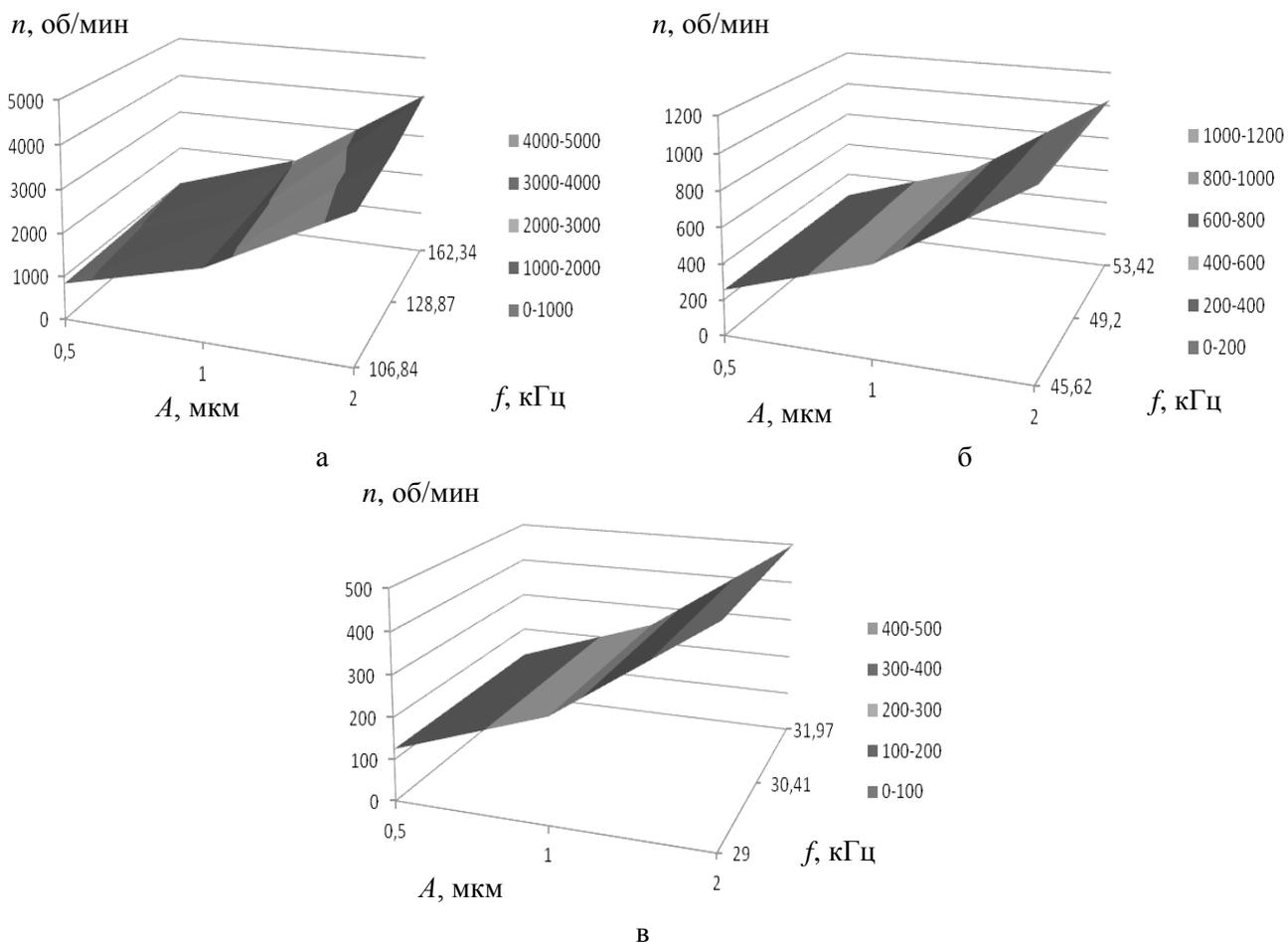


Рис. 6. Зависимость числа оборотов инструмента n от амплитуды A и частоты f его колебаний: $a - R = 20 \text{ мм}$, $б - R = 30 \text{ мм}$, $в - R = 40 \text{ мм}$

При малых радиусах сферы поперечные размеры ножки в большей степени уменьшают длину образующей сферы, а значит, длину волны колебаний инструмента. При радиусах сферы менее 40 мм требуемые частоты колебаний выходят далеко за диапазон технологических частот ультразвука, поэтому в случае разработки малогабаритных резонаторов для их изготовления по предлагаемой технологии необходимо создать специальные ультразвуковые генераторы.

Для разрабатываемых в настоящее время ТВГ, имеющих размеры резонатора более 30 мм, возможно использование серийных генераторов с частотой выходного сигнала 22 и 44 кГц. Некоторое отклонение частоты от расчетной в данном случае приведет лишь к незначительному снижению производительности обработки, что допустимо в условиях экспериментального производства ТВГ для обработки конструкции.

Амплитуда колебаний инструмента оказывает большее влияние на число оборотов резонатора при меньших радиусах

сферы. Влияние радиуса в большей степени проявляется при больших амплитудах колебаний.

Частота ультразвука оказывает влияние на число оборотов резонатора при меньших его размерах. При радиусе сферы 30 мм изменение частоты колебаний на 17% приводит к изменению числа оборотов всего на 2%. При радиусе резонатора 40 мм расчетное изменение частоты на 10% практически не требует изменения числа оборотов. Это связано с отмеченным выше снижением влияния размеров резонатора на требуемую частоту колебаний при увеличении его радиуса.

В целом теоретически показана принципиальная возможность обработки резонаторов ТВГ по простой кинематической схеме с вращением изделия и сообщением инструменту ультразвуковых колебаний определенной частоты и амплитуды. При практической реализации предложенной схемы для обработки большинства резонаторов с радиусом сферы более 30 мм могут быть использованы существующие модели ультразвуковых генераторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бекренев Н.В.** Керамика и ситаллы в приборостроении. Свойства. Технологические процессы обработки. Инструменты / Н.В. Бекренев, Р.С. Великанов, О.А. Дударева. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2006. 128 с.

2. **Бекренев Н.В.** Малодефектная ультразвуковая обработка деталей навигационных приборов из неоднородных по структуре твердых, хрупких материалов / Н.В. Бекренев, И.В. Злобина, А.П. Петровский // Вестник СГТУ. 2014. № 4 (77). С. 97-103.

3. **Бржозовский Б.М.** Ультразвуковые технологические процессы и оборудование в машино- и приборостроении / Б.М. Бржозовский, Н.В. Бекренев. Саратов: СГТУ, 2009. 348 с.

4. **Петровский А.П.** Повышение эффективности и качества финишной обработки деталей из твердых и прочных материалов на основе применения ультразвуковых колебаний с амплитудой и частотой, устанавливаемыми с учетом параметров структуры: дис. ... канд. техн. наук / А.П. Петровский. Саратов: СГТУ, 2011.

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

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

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

Фролов Михаил Михайлович – студент Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Irina V. Zlobina - Ph.D., Assistant Lecturer, Department of Engineering Mechanics and Machine Elements, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Mikhail M.Frolov – Undergraduate, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 18.08.15, принята к опубликованию 11.09.15



ЭЛЕКТРОХИМИЯ

УДК 54.084

МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЩЕГО КОЛИЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСТВА, ЗАТРАЧЕННОГО НА ЭЛЕКТРОЛИЗ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

С.Ю. Киреев, Ю.П. Перелыгин

METHODS FOR DETERMINATION OF THE TOTAL ELECTRIC CHARGE CONSUMED IN ELECTROLYSIS USING THE ALTERNATING CURRENT

S.Yu. Kireev, Yu.P. Perelygin

Приводятся методики определения общего количества электричества, затраченного на проведение нестационарного электролиза. Указываются условия их реализации, приводятся примеры с использованием результатов экспериментальных исследований авторов.

Ключевые слова: импульсный электролиз, нестационарный электролиз, количество электричества, выход по току, интегратор тока

Нестационарный электролиз для формирования гальванических покрытий металлами применяется уже несколько десятков лет. В [1-5] отмечаются преимущества и недостатки данного режима, рассматриваются механизмы влияния переменного тока на процесс электрокристаллизации, приводятся описания и схемы установок, позволяющих реализовать тот или иной режим.

Одной из важнейших характеристик электролиза является выход вещества по току – величина, учитывающая долю тока, затраченную на интересующий процесс. В настоящее время нет единой методики определения выхода по току вещества при использовании переменного тока, причем наибольшие трудности и споры связаны с

The paper presents the methods for determination of the total quantity of electricity consumed in conducting non-stationary electrolysis. The authors assign the conditions for implementation of the proposed methods, and present the cases with the results of experimental research.

Keywords: pulsed electrolysis, non-stationary electrolysis, amount of electricity, output current, integrator current

нахождением общего количества электричества, прошедшего через гальваническую ванну.

Цель работы – разработка методик определения общего количества электричества при электроосаждении металлов с использованием переменного тока.

Методика работы. Асимметричный квазисинусоидальный переменный ток получали из тока промышленной частоты с помощью установки, позволяющей отдельно регулировать амплитуду прямого и обратного импульсов. Импульсный ток прямоугольной формы получали с помощью генератора импульсов Г5-60. Для регистрации формы сигнала и измерения амплитудного значения напряжения использовали двухлучевой осциллограф С1-99.

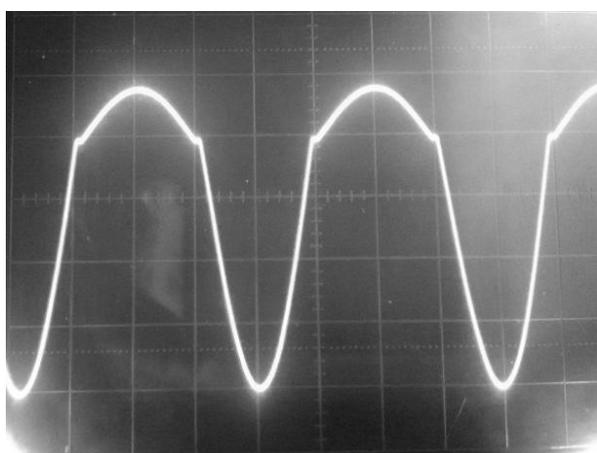
Для определения общего количества электричества, прошедшего через электрохимическую систему $Q_{общ}$, при условии изменения силы тока в течение процесса необходимо произвести интегрирование зависимости силы тока I от времени τ [3]:

$$Q_{общ} = \int_0^{\tau} I d\tau. \quad (1)$$

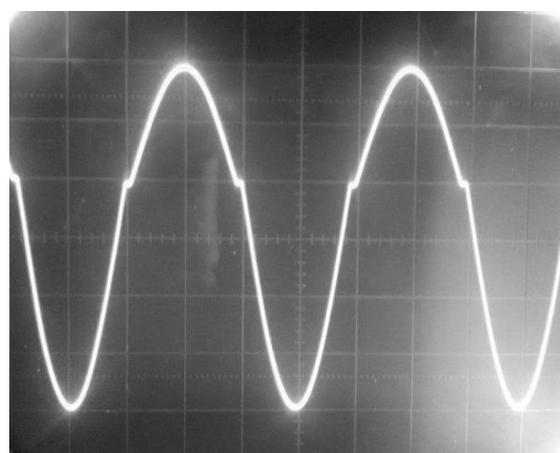
Для определения $Q_{общ}$ можно предложить несколько методов, которые объединяются в следующие группы: аналитические, электромеханические и электронные.

Группа аналитических методов, с помощью которых количество электричества определяется математически, может быть использована в случае, если форма тока в прямом и обратном импульсах повторяется в течение всего процесса, и ее можно описать с помощью какой-либо функции.

Например, при электроосаждении кадмия из кислых электролитов [6] на переменном асимметричном квазисинусоидальном токе осциллограмма зависимости тока-время имеет вид, показанный на рис. 1.



а



б

Рис. 1. Осциллограмма асимметричного переменного тока (частота 50 Гц) для электроосаждения кадмия: а – $i_{\max}^k = 1,0 \text{ A} / \text{дм}^2$; $i_{\max}^a = 0,25 \text{ A} / \text{дм}^2$, б – $i_{\max}^k = 1,0 \text{ A} / \text{дм}^2$; $i_{\max}^a = 0,5 \text{ A} / \text{дм}^2$

Общее количество электричества для данного режима можно рассчитать по соотношению

$$Q_{общ} = n \left(\int_0^{\pi} |I_{\max}^k \sin(2\pi f\tau)| d\tau + \int_{\pi}^{2\pi} |I_{\max}^a \sin(2\pi f\tau)| d\tau \right), \quad (2)$$

где n – количество периодов колебаний тока за время электролиза; I_{\max}^k – амплитудное значение силы тока в катодный полупериод, А; I_{\max}^a – амплитудное значение силы тока в анодный полупериод, А; f – частота переменного тока, Гц; τ – время, с.

Значения общего количества электричества, прошедшего через гальваническую ванну за 10 минут ($n = 30000$), для режимов, изображенных на рис. 1 а, б, приведены в таблице.

При использовании импульсного тока прямоугольной формы (гальваностатиче

ские импульсы) возможны несколько частных режимов:

- униполярный импульсный ток (прямой импульс – пауза);
- реверсированный режим (прямой импульс – обратный импульс);
- другие режимы (прямой импульс большой амплитуды – прямой импульс малой амплитуды, программные режимы).

Ограничимся рассмотрением первых двух режимов.

Значения $Q_{общ}$, пропущенного через гальваническую ванну кадмирования за 10 минут, для режимов, изображенных на рис. 1

Режим	i_{\max}^k , А/дм ²	I_{\max}^k , А	i_{\max}^a , А/дм ²	I_{\max}^a , А	Q за один период		$Q_{общ} = n(Q_k + Q_a)$, Кл
					Q_k , Кл	Q_a , Кл	
1	1,00	0,04	0,50	0,02	$2,55 \cdot 10^{-4}$	$1,27 \cdot 10^{-4}$	11,46
2	1,00	0,04	0,25	0,01	$2,55 \cdot 10^{-4}$	$0,64 \cdot 10^{-4}$	9,57

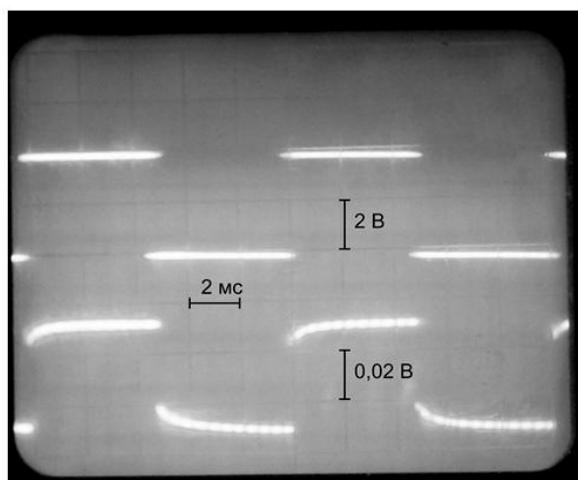
Для униполярного импульсного тока (при условии постоянства силы тока во время импульса) рекомендуется использовать формулу [7, 8]:

$$Q_{общ} = \frac{I_{\max} \tau_u}{\tau_u + \tau_n} \tau = n I_{\max} \tau_u, \quad (3)$$

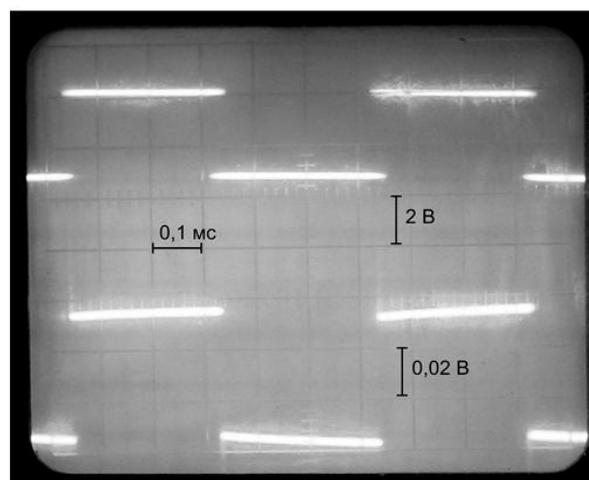
где I_{\max} – амплитудное значение силы тока в импульсе, А; τ_u – длительность импульса, с; τ_n – длительность паузы, с; τ – длительность процесса, с.

Так, например, при электроосаждении металлов с использованием импульсного тока прямоугольной формы в [8]

для определения амплитудного значения силы тока в импульсе предложено последовательно с гальванической ванной включать резистор, имеющий сопротивление больше сопротивления электрохимической системы. В приведенных на рис. 2 осциллограммах видно, что падение напряжения на добавочном резисторе (верхний луч) во времени импульса не изменяется, тогда как падение напряжения на гальванической ванне во время импульса (нижний луч) изменяется. Таким образом, измерение падения напряжения на добавочном резисторе позволяет, используя закон Ома, найти амплитудное значение силы тока в импульсе.



а



б

Рис. 2. Осциллограммы различных режимов импульсного электролиза (верхний луч – падение напряжения на добавочном резисторе (50 Ом), нижний луч – падение напряжения на гальванической ванне никелирования)

На рис. 2 а амплитудное значение силы тока в импульсе при $U = 4$ В равно $I_{\max} = 0,08$ А, на рис. 2 б $I_{\max} = 0,06$ А.

Используя выражение (3), можно найти $Q_{общ}$. Для режима, показанного на рис. 2 а, при $\tau_u = 0,005$ с, $\tau_n = 0,005$ с $Q = 24$ Кл.

Для режима, показанного на рис. 2 б, $\tau_u = 0,0003$ с, $\tau_n = 0,003$ с и $Q = 18$ Кл.

При использовании реверсивного режима импульсного электролиза для определения $Q_{общ}$ необходимо использовать соотношение

$$Q_{\text{общ}} = \frac{|I_{\text{max}}^{\text{np}}| \tau_{\text{np}} + |I_{\text{max}}^{\text{обр}}| \tau_{\text{обр}}}{\tau_{\text{np}} + \tau_{\text{обр}}} \tau = n \left(|I_{\text{max}}^{\text{np}}| \tau_{\text{np}} + |I_{\text{max}}^{\text{обр}}| \tau_{\text{обр}} \right), \quad (4)$$

где $|I_{\text{max}}^{\text{np}}|$ – абсолютное амплитудное значение силы тока в прямом импульсе, А; $|I_{\text{max}}^{\text{обр}}|$ – абсолютное амплитудное значение силы тока в обратном импульсе, А; τ_{np} – длительность прямого импульса, с; $\tau_{\text{обр}}$ – длительность обратного импульса, с; τ – длительность процесса, с.

В (4) значения силы тока в прямом и обратном импульсах необходимо брать абсолютные (без учета полярности). В противном случае при использовании режима, в котором количество электричества в прямом импульсе будет равно количеству электричества в обратном импульсе, общее количество электричества будет равно нулю.

Данные методы применимы и для других форм тока: треугольной, синусоидальной с отсечкой, синусоидальной с постоян-

ной составляющей. Однако рассматриваемая группа методов определения общего количества электричества, прошедшего через электрохимическую систему, подходит лишь в том случае, если сила тока в импульсе не изменяется во времени или изменение ее во времени протекает согласно какому-либо закону и может быть описано математическим выражением (например, если форма синусоидального тока не искажается электрохимической системой).

Следует обратить внимание на то, что в некоторых нестационарных режимах амплитудное значение силы тока или потенциала электрода в начальный момент времени отличаются от таковых значений после достижения квазистационарного состояния [5, 9] (рис. 3).

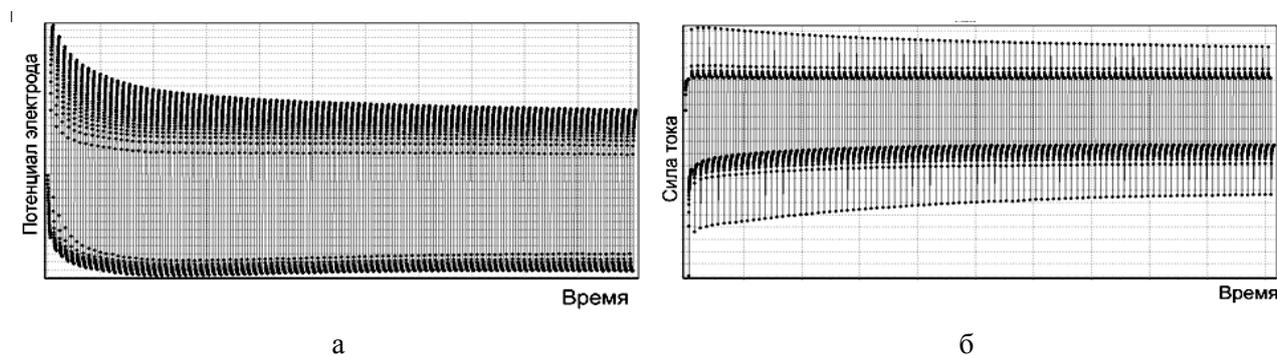


Рис. 3. Изменение потенциала во времени при гальваностатическом режиме (а) и силы тока во времени при потенциостатическом режиме (б) импульсного электролиза в кислом лактатном электролите цинкования [10]

Данное обстоятельство не позволяет использовать группу аналитических методов для определения общего количества электричества применительно к потенциостатическому режиму импульсного электролиза и создает предпосылки для развития других групп методов.

Электрохимические методы [11] для определения общего количества электричества при импульсном электролизе малоприменимы, так как не позволяют регистрировать с достаточной точностью мгновенные значения силы тока во время импульса длительностью менее секунды.

Электронные методы представляют наибольший интерес, так как в них с помощью специальной приборной базы регистрируются мгновенные значения силы тока через малые промежутки времени.

В настоящее время предложено достаточно большое количество электронных интеграторов тока, позволяющих определять общее количество электричества, прошедшее через цепь. Однако большинство таких интеграторов предназначены для работы только с постоянным током [11, 12]. Для использования переменного тока, а тем

более реверсированных режимов, необходимо использовать специальные интеграторы, обладающие быстродействием и позволяющие регистрировать мгновенные значения силы тока.

Можно использовать цифровой кулонометр, принцип работы которого следующий: в цепь последовательно с электрохимической ячейкой включается опорный (калиброванный) резистор R_o сопротивлением, например, 1 Ом, рассчитанный на протекающий через него ток (рис. 4). Если сила тока в системе больше, чем та, на которую рассчитан резистор, необходимо пользоваться набором шунтов.

Ток, протекающий в системе, создает на резисторе падение напряжения, которое пересчитывается (при условии постоянства электрического сопротивления опорного резистора) в силу тока. Замеры напряжения производятся через определенные промежутки времени, которые определяются частотой используемого тока (чем больше частота, тем меньше промежутки времени).

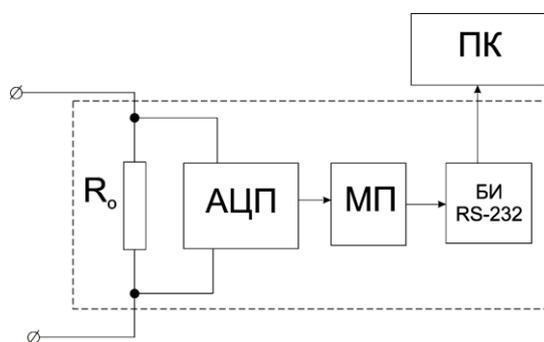


Рис. 4. Схема цифрового кулонометра (R_o – опорный резистор, АЦП – аналогово-цифровой преобразователь, МП – микропроцессорный блок, БИ RS-232 – блок интерфейса RS-232, ПК – персональный компьютер)

Наиболее высокая точность достигается при использовании запоминающего цифрового осциллографа (например, Tektronix TDS 1002B, TDS 3012B), подключенного параллельно опорному резистору, имеющему точное значение электрического сопротивления (например, 1 Ом). Последний метод наиболее подходит при проведении лабораторных исследований, направленных на установление оптимальных режимов импульсного электролиза.

В предложенных вариантах интеграторов тока формируется файл, содержащий информацию о значениях измеренного падения напряжения через определенные промежутки времени. Данная информация может быть использована при расчете общего количества пропущенного электричества.

Предлагаемые конструкции интеграторов тока позволяют работать с токами разной формы.

Итак, для определения выхода по току вещества, образующегося на поверхности электрода в результате прохождения переменного электрического тока, необходимо использовать общее количество электричества, определяемое интегрированием зависимости ток-время.

Наиболее приемлемыми методами определения $Q_{общ}$ являются аналитические методы и использование электронных интеграторов тока-кулонометров.

При проведении исследований необходимо указывать метод определения количества электричества и приводить методику расчета выхода вещества по току. В противном случае нет возможности сопоставления результатов различных авторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бахвалов Г.Т. Новая технология электроосаждения металлов (Реверсирование тока в гальваностегии) / Г.Т. Бахвалов. М.: Металлургия, 1966. 150 с.
2. Озеров А.М. Нестационарный электролиз / А.М. Озеров и др. Волгоград: Нижневолж. изд-во, 1972. 160 с.
3. Костин Н.А. Импульсный электролиз / Н.А. Костин, В.С. Кублановский, В.А. Заблудовский. Киев: Наук. думка, 1989. 168 с.
4. Костин Н.А. Импульсный электролиз сплавов / Н.А. Костин, В.С. Кублановский. Киев: Наук. думка, 1996. 207 с.

5. **Гамбург Ю.Д.** Электрохимическая кристаллизация металлов и сплавов / Ю.Д. Гамбург. М.: Янус-К, 1997. 280 с.

6. **Киреев С.Ю.** Электроосаждение индия из кислых электролитов с использованием асимметричного переменного тока / С.Ю. Киреев, Г.А. Перистая, Ю.П. Перельгин // Журнал прикладной химии. 2000. № 9. Т. 73. С. 1641-1642.

7. **Флеров В.Н.** Сборник задач по прикладной электрохимии / В.Н. Флеров. М.: Высш. шк., 1976. 311 с.

8. **Киреев С.Ю.** К методике определения выхода металла по току при импульсном режиме электроосаждения / С.Ю. Киреев, С.Н. Татаева, Ю.П. Перельгин // Деп. в ВИНТИ, 2001. от 19.07.2001. № 1710-В2001.

9. **Киреев С.Ю.** Электрохимическое осаждение цинка в потенциостатическом режиме импульсного электролиза из мало-

токсичного лактатного электролита / С.Ю. Киреев и др. // Известия вузов. Поволжский регион. Технические науки. 2013. № 4. С. 225-235.

10. **Перельгин Ю.П.** Электроосаждение цинка из кислого лактатного электролита / Ю.П. Перельгин, С.Ю. Киреев, Н.В. Ягниченко // Гальванотехника и обработка поверхности. 2011. № 3. Т. XIX. С. 30-32.

11. **Фрейман Л.И.** Потенциостатические методы в коррозионных исследованиях и электрохимической защите / Л.И. Фрейман, В.А. Макаров, И.Е. Брыксин. Л.: Химия, 1972. 240 с.

12. **Перельгин Ю.П.** Цифровой кулонометр / Ю.П. Перельгин, В.А. Баранов, Вл.А. Баранов // Гальванотехника и обработка поверхности и экология в XXI веке: сб. докл. Всерос. науч.-практ. конф и выставка. М., 2003. С. 5.

Киреев Сергей Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Химия» Пензенского государственного университета

Перельгин Юрий Петрович – доктор технических наук, декан факультета физико-математических и естественных наук, заведующий кафедрой «Химия» Пензенского государственного университета

Sergey Yu. Kireev – Ph. D., Associate Professor, Department of Chemistry, Penza State University

Yuri P. Perelygin – Dr. Sc., Dean: Faculty of Physics, Mathematics and Natural Sciences, Head: Department of Chemistry, Penza State University

Статья поступила в редакцию 07.08.15, принята к опубликованию 11.09.15



ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ МЕДИ И ЕЕ СПЛАВОВ

В.М. Райгородский

OPTIMIZING ELECTROLYTIC ETCHING OF COPPER AND ITS ALLOYS

V.M. Raigorodskiy

Статья посвящена оптимизации методики электролитического травления для меди, литой и деформированной, латуни цинковой и бронзы оловянной. Приведены особенности электролитического травления, рецепты электролитов и химических травителей для указанных сплавов.

Ключевые слова: электролит, электролитическое травление, химическое травление, медь, латунь, бронза

Медь и ее сплавы являются распространенным объектом материаловедческих исследований, поскольку эти материалы часто используются при изготовлении как промышленного оборудования, так и бытовых изделий. Медь, а именно бескислородная медь в виде кабельной продукции используется в электротехнике и электронной промышленности, бронза и латунь применяются для изготовления втулок и подшипников скольжения, запорной и прочей арматуры.

Изделия из меди и ее сплавов могут быть объектами судебной экспертизы и криминалистических исследований по восстановлению измененных или уничтоженных маркировочных обозначений при расследовании различных категорий уголовных дел, таких как кражи, мошенничество, подделка клейм и др.

Несмотря на широкое применение медных сплавов, информация по рецептуре электролитов и травителей для проведения электролитического или химического травления на изделиях из данных материалов крайне ограничена, отсутствуют четкие рекомендации и практические указания про-

The article deals with optimization of the methods for electrolytic etching of cast or deformed copper, zinc and tin bronze. The author provides the characteristics of electrolytic pickling, and recipes for electrolytes and chemical etching of the given alloys.

Keywords: electrolyte, electrolytic etching, chemical etching, copper, brass, bronze

ведения данного процесса. В большинстве литературных источников в качестве травителей при химическом травлении рекомендуют использовать 20-30% растворы азотной кислоты [1-3]. При повышенном содержании цинка в сплаве рекомендуют добавлять в травитель несколько капель соляной кислоты. Для электролитического травления какие-либо данные по рецептуре электролитов и методике проведения процесса отсутствуют вовсе. Отсутствуют также данные о влиянии химического состава медных сплавов на рецептуру используемых при этом электролитов и травителей.

Проведенные нами предварительные эксперименты показали, что при использовании указанных в литературе электролитов и травителей вообще может не происходить растворения материала, либо это растворение будет сопровождаться образованием пленок окислов, не всегда удаляемых последующей промывкой образцов. Добавление в раствор соляной кислоты не помогает избежать указанных недостатков.

Поскольку рекомендации в литературе по рецептуре травителей в зависимости от

химического состава медных сплавов носят крайне разрозненный и противоречивый характер, а по рецептуре электролитов отсутствуют вовсе, в данной работе поставлена задача поиска оптимальных электролитов и травителей для наиболее распространенных медных сплавов, а именно меди литой, латуни цинковой и бронзы оловянной, отработки методики химического и электролитического травления для них.

Определение химического состава исследуемых образцов проводили методом

рентгенофлюоресцентного анализа. Сравнение результатов химического анализа с компонентным составом различных марок сплавов, указанным в соответствующих ГОСТ¹, позволило установить марки сплавов, на которых проводили исследования, а именно:

- латунь цинковая марки ЛЦ40С;
- бронза оловянная марки Бр0Ф8-0.3;
- медь марки М1.

В табл. 1, 2 приведены составы соответствующих сплавов.

Таблица 1

Химический состав в % сплава ЛЦ40С (в скобках приведены результаты определения химического состава исследуемых образцов)

Cu	Zn	Pb	Sb	Fe	Si	Mn	Ni	Al	Sb	Sn
57.0-61.0 (61.75)	35.0-42.2 (37.99)	0.8-2.0	до 0.05	до 0.8 (-)	до 0.3	до 0.5	до 1.0 (-)	до 0,5	до 0,05	до 0.5 (-)

Таблица 2

Химический состав в % сплава Бр0Ф8-0.3 (в скобках приведены результаты определения химического состава исследуемых образцов²)

Cu	Sn	Fe	Si	Ni	P	Al	Pb	Zn	Sb	Bi
90.85-92.15 (91.22)	7.5-8.5 (8.45)	до 0.02 (-)	до 0.002	0.1-0.2 (-)	0.26-0.35 (-)	до 0.002	до 0.02	до 0,03	до 0,002	до 0.002

Определение химического состава третьего образца показало, что содержание меди в нем составляет 99,91%, дополнительных легирующих компонентов и примесей обнаружено не было. Сравнение указанных результатов с химическим составом сплавов, содержащимся в ГОСТ 859-2001, позволило установить, что указанный образец представляет собой медь марки М1, относящейся к литым и деформированным сплавам.

Оптимизацию процесса электролитического и химического травления проводили одновременно с отработкой методики восстановления измененных или уничтоженных маркировочных обозначений на данных материалах. Для этого на исследуемых образцах вручную ударом молотка по клейму наносили трех и четырехзначные буквенно-цифровые обозначения, которые затем удаляли с помощью наждачного кру-

га. Толщина удаляемого слоя металла выбиралась, исходя из условий полного исчезновения всех штрихов обозначения.

Подготовка к процессу восстановления заключалась в шлифовании поверхности наждачной бумагой средней зернистости (50-100 мкм), а затем мелкозернистой (20-40 мкм). Шлифование проводили поперек трасс, оставленных наждачным кругом, до тех пор, пока на образце не оставались единичные наиболее глубокие трассы, расстояние между которыми намного превышало толщину выявляемых штрихов (рис. 1).

¹ ГОСТ 17711-93. Сплавы медно-цинковые (латуни) литейные. Марки.
ГОСТ 5017-2006. Бронзы оловянные обработанные давлением. Марки.
ГОСТ 859-2001. Медь. Марки.

² Общая сумма примесей данной марки бронзы составляет не более 0.1%

Устранение всех без исключения трасс не проводили, поскольку это приводит к уменьшению толщины деформированного приповерхностного слоя, хранящего информацию об уничтоженном обозначении. Поскольку расстояние между неудаленными трассами намного больше толщины выявляемых штрихов, они не могут ухудшить визуальный контроль выявленных обозначений.

Последующее полирование поверхности пастой ГОИ или алмазными пастами, рекомендуемое в большинстве литературных источников, также не проводили, поскольку, с одной стороны, такое механическое воздействие может привести к наклепу материала, затрудняющему его последующее растворение, с другой стороны, в результате химического или электролитического травления создается достаточно развитая поверхность, имеющая заметные неровности рельефа, что сводит к нулю усилия при полировании объекта.

Электролитическое растворение материала осуществляли путем контакта участка, на котором проводился процесс, с ватным тампоном, смоченным в электролите. Анодом в этом случае служила сама пластина из медного сплава, а катодом – пинцет, зажимающий ватный тампон и равномернодвигаемый вдоль поверхности. Источником постоянного напряжения служил лабораторный блок питания НУ-1500, позволяющий стабилизировать напряжение до 15 В и ток – до 2 А. Электролитическое травление в основном осуществляли при максимальном напряжении и токе. Для сравнения проводили химическое травление исследуемых образцов, которое осуществляли с помощью тех же растворов, которые использовались для электролитического травления. Химический процесс, так же как и электрохимический, проводили посредством обработки площадки с обозначениями ватным тампоном, смоченным в травящем растворе.

Для проведения электролитического и химического травления на исследуемых образцах были опробованы электролиты и травящие растворы следующего состава:

- водные растворы азотной кислоты, а также смеси водных растворов азотной и соляной кислот в различных соотношениях;
- растворы едкого натра в смеси с растворами хлорамина-Т и лимонной кислоты;
- растворы хромового ангидрида, в том числе в смеси с соляной кислотой и хлористым никелем;
- растворы хромового ангидрида с азотной и серной кислотами;
- растворы хлорного железа с соляной кислотой и этиловым спиртом;
- растворы хлорной меди с аммиаком;
- смеси растворов азотной и уксусной кислот;
- смеси растворов двуххлористой меди с соляной кислотой;
- смеси растворов соляной, серной и азотной кислот;
- растворы уксусной кислоты с перекисью водорода;
- растворы серной кислоты с перманганатом калия.

В итоге было опробовано более 30 электролитов, для которых проводили как электролитическое, так и химическое травление исследуемых образцов. Большинство перечисленных травителей и электролитов были взяты из литературы по восстановлению удаленных маркировочных обозначений [1-3], а также из справочников по металлографическому травлению металлов и сплавов [4-6]. Во многих случаях в процессе экспериментов с целью оптимизации результатов проводили варьирование взятых из литературы составов электролитов и травителей, а также включение в исходный состав дополнительных компонентов.

Анализ полученных результатов показал, что для электролитического травления на меди литой и деформированной, а также цинковой латуни наилучшие результаты были получены при использовании смеси растворов уксусной и азотной кислот, раствора соляной, серной и азотной кислот (соляная кислота – 10 мл, серная кислота – 5 мл, азотная кислота – 10 мл, вода дистиллированная – 10 мл), 30-50% водных растворов азотной кислоты.

Для последнего раствора хорошие результаты были получены также и для хи-

мического травления. При этом как электролитическое, так и химическое травление в данном растворе приводило к образованию пленки розового цвета (рис. 2), которая не ухудшала контраст выявленных штрихов маркировочных обозначений, не мешала их наблюдению и фотофиксации.

Использование водных растворов азотной кислоты для электролитического и химического травления бронзы оловянной приводило к появлению пленок окислов (рис. 3), которые не столь значительно ухудшали контраст выявленных знаков.

Также неплохие результаты травления для всех трех исследуемых сплавов были получены при использовании электролитов и травящих растворов на основе смеси азотной и уксусной кислот (азотная кислота – 20 мл, уксусная кислота – 30 мл). Для цинковой латуни и бронзы оловянной в этом случае образовывались окислы зеленого цвета (рис. 4), однако они без труда смывались водой и не мешали наблюдению и фотофиксации выявленных обозначений.

Использование травителей и электролитов на основе водных растворов соляной кислоты, а также смеси раствора серной кислоты с перманганатом калия (серная кислота - 15 мл, перманганат калия - 0,5 г, вода дистиллированная - 100 мл) для всех трех исследуемых сплавов приводило к образованию значительных по толщине, плохо или совсем нерастворимых темных пленок окислов. Помимо этого, на поверхности пленок в отдельных местах мог образовываться белый налет. Их наличие значительно ухудшало контраст и мешало наблюдению и фиксации восстановленных маркировочных обозначений (рис. 5).

В более ранних работах [7-8] при обработке процесса травления для сплавов на основе железа и алюминия нами было показано, что различие в результатах травления для сплавов, различающихся по составу, связано с наличием легирующих компонентов или примесей в указанных сплавах. В данном случае наличие пленок окислов, вероятно, связано с присутствием цинка в цинковой латуни и олова – в бронзе оловянной.

При использовании травителей и электролитов на основе раствора хлорамина-T и лимонной кислоты, хромового ангидрида, хлорного железа, соляной кислоты и этилового спирта, раствора двухлористой меди и соляной кислоты, уксусной кислоты и перекиси водорода, раствора серной кислоты, перекиси водорода, дистиллированной воды процесса восстановления практически не наблюдалось, либо этот процесс происходил крайне медленно для всех трех исследуемых сплавов. В некоторых случаях, например, при использовании травителей и электролитов на основе 40% водного раствора хромового ангидрида маркировочная площадка освобождалась от пленки окислов, изначально присутствующей на образце меди литой и деформированной, для цинковой латуни наблюдалось наличие зеленоватого оттенка в отдельных местах участка травления. Это указывает на наличие процесса растворения материала, однако происходил он крайне медленно. В частности, при травлении более 1 часа восстановления знаков не происходило. По этой причине указанные составы не могут быть рекомендованы для электролитического или химического травления указанных сплавов, используемого, в частности, для восстановления маркировочных обозначений.

Сравнение результатов химического и электрохимического методов восстановления показывает, что в целом результаты, полученные обоими методами, аналогичны, но электролитическое растворение происходит быстрее. Исключение составляют реактивы на основе смеси азотной и уксусной кислот, а также смеси соляной, серной и азотной кислот, химическое травление в которых проходило более интенсивно по сравнению с электрохимическим методом. В то же время при химическом травлении в этих растворах образовывались пленки окислов. При травлении в растворе на основе соляной, серной и азотной кислот на образцах латуни цинковой и меди литой и деформированной эти пленки выглядели в виде рельефного вспученного наложения зеленого цвета (рис. 6), для бронзы оловянной

ЭЛЕКТРОХИМИЯ

ной – в виде совокупности отдельных кристаллов голубого цвета, занимающих

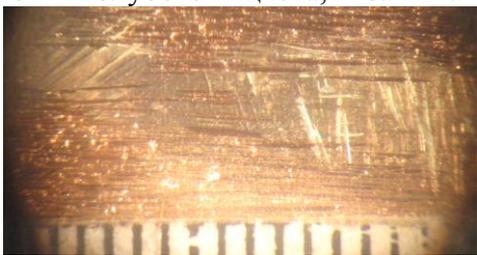


Рис. 1. Образец бронзы оловянной, подготовленный к процессу травления

большую часть поверхности маркировочной площадки.

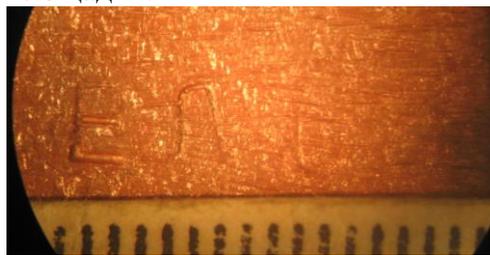


Рис. 2. Результат восстановления маркировочных обозначений на меди М1, полученный электролитическим травлением в 50%-м растворе азотной кислоты



Рис. 3. Результат восстановления маркировочных обозначений на бронзе оловянной, полученный электролитическим травлением в 50%-м растворе азотной кислоты



Рис. 4. Результат восстановления маркировочных обозначений на бронзе оловянной, полученный электролитическим травлением в смеси азотной и уксусной кислот

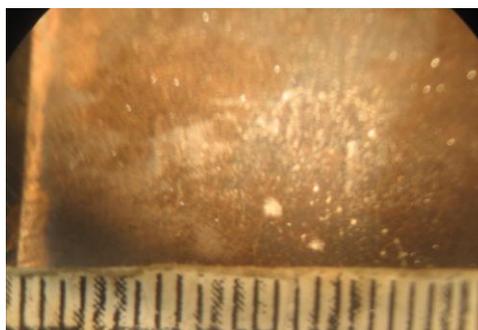
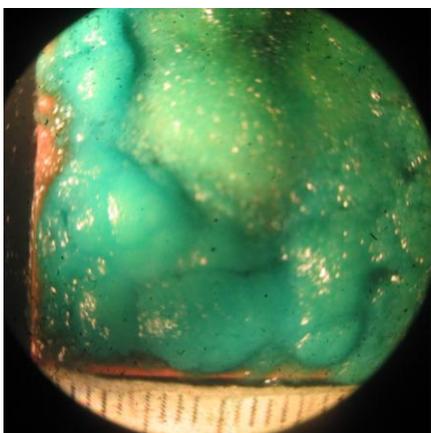
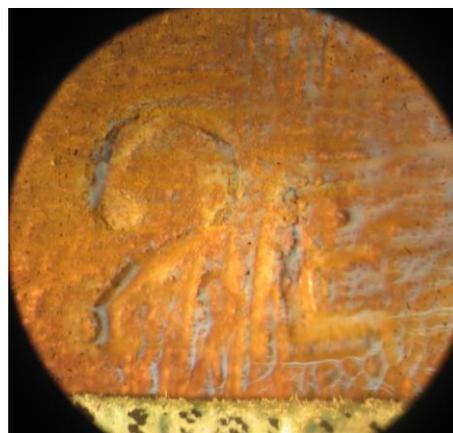


Рис. 5. Потемнение площадки с образованием белого налета на бронзе оловянной, полученное электролитическим травлением в растворе серной кислоты, перманганата калия, дистиллированной воды



а



б

Рис. 6. Результат восстановления маркировочных обозначений на меди, литой и деформированной, полученный химическим методом с использованием раствора соляной, серной и азотной кислот: *a* – непосредственно после процесса восстановления; *b* – после удаления окисной пленки ватным тампоном, смоченным дистиллированной водой

Характерной особенностью восстановления маркировочных обозначений на бронзах оловянных химическим методом было то, что практически для всех используемых травителей после прекращения процесса травления происходило образование на поверхности пленок темного (от серого вплоть до черного) цвета, которые практически не смывались водой и затрудняли наблюдение и фиксацию выявленных обозначений. Для электрохимического травления это было менее характерно. Образование пленок окислов в большинстве случаев происходило лишь по истечении продолжительного времени (порядка 30 мин) и на отдельных небольших участках маркировочной площадки.

По результатам проведенных экспериментов можно сделать вывод, что для всех исследованных сплавов оптимальным явля-

ется метод электролитического травления. При этом время восстановления минимально, а качество восстановленных обозначений в большинстве случаев максимально. Кроме того, электролитический метод в отличие от химического является регулируемым и воспроизводимым. Регулировка может производиться корреляцией напряжения и тока источника питания. Электролитами при этом могут служить растворы азотной и уксусной кислоты (азотная кислота - 20 мл, уксусная кислота - 30 мл), либо 50% водный раствор азотной кислоты. Для меди катодной и латуни цинковой оптимальным является электролит на основе раствора соляной, серной и азотной кислот (соляная кислота – 10 мл, серная кислота - 5 мл, азотная кислота - 10 мл, вода дистиллированная – 10 мл).

ЛИТЕРАТУРА

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

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

3. **Райгородский В.М.** Экспертиза восстановления измененных и уничтоженных маркировочных обозначений / В.М. Райгородский, В.Н. Хрусталева, С.А. Ермолаев. Саратов: СЮИ МВД РФ, 1999. 72 с.

4. **Баранова Л.В.** Металлографическое травление металлов и сплавов / Л.В. Баранова, Э.Л. Демина. М.: Металлургия, 1986. 256 с.

5. **Беккерт М.** Способы металлографического травления / М. Беккерт, Х. Клемм. М., 1988.

6. **Коваленко В.С.** Металлографические реактивы / В.С. Коваленко. М.: Металлургия, 1981. 120 с.

7. **Райгородский В.М.** Использование электрохимических методов для восстановления измененных или уничтоженных маркировочных обозначений / В.М. Райгородский // Вопросы электротехнологии. 2014. № 1 (2). С. 52-57.

8. **Райгородский В.М.** Оптимизация процесса электролитического травления алюминиевых сплавов / В.М. Райгородский // Вопросы электротехнологии. 2015. № 1 (6). С. 51-57.

Райгородский Владимир Михайлович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Инженерная физика» Саратовского государственного аграрного уни-

Vladimir M. Raigorodskiy – Ph.D., Associate Professor, Department of Engineering Physics, N.I. Vavilov State Agrarian Universi-

Статья поступила в редакцию 03.08.15, принята к опубликованию 11.09.15

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 621.318.3

О ВВОДЕ СТОРОННЕЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ИМПУЛЬСНЫЙ ЛИНЕЙНЫЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров

USING EXTERNAL MECHANICAL ENERGY IN THE PULSE LINEAR ELECTROMECHANICAL CONVERTER

V.I. Moshkin, G.G. Ugarov

На основании взаимных соотношений для электромеханической системы выявлены энергетические режимы, снижающие эффективность электромеханического преобразователя в качестве ударной машины. Установлены области изменения режимных параметров, в которых нежелательный генераторный эффект отсутствует.

Ключевые слова: электромеханический преобразователь, энергия удара, тяговое усилие

Рассматриваемый случай взаимодействия сторонней механической энергии с энергиями электромеханического преобразователя (ЭМП) электромагнитного типа относится к специальным режимам работы преобразователя [1]. Схема ЭМП изображена на рис. 1. ЭМП представляет собой однообмоточный электромагнит с подвижным якорем.

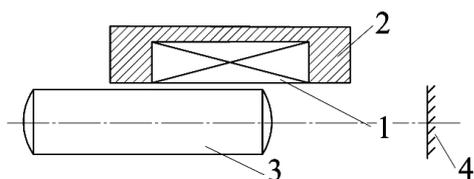


Рис. 1. Схема электромеханического преобразователя (1 – обмотка возбуждения; 2 – магнитопровод статора; 3 – якорь; 4 – обрабатываемая среда)

Electric power modes necessary for electromechanical systems are determined based on their mutual inter-relations. These modes help reduce efficiency of the electromechanical transducer working as a shock machine. The authors identified the changes in the regime parameters where the unwanted generating effect is removed.

Keywords: *electromechanical transducer, the impact energy, the force of traction*

Известны следующие виды сторонней механической энергии и ее источников:

– потенциальная энергия буферного устройства (БУ), например, в ручном электроинструменте (электромагнитные молотки и перфораторы) [2];

– механическая энергия возврата якоря в период холостого хода, обеспечиваемая возвратной пружиной, обмоткой холостого хода (в молотах), второй обмоткой (в молотках и перфораторах), выбегом бойка (якоря) в однообмоточных молотах двойного действия, в молотах со свободным выбегом в режимах одиночных и непрерывных ходов [2];

– механическая (кинетическая) энергия, создаваемая отдельными секциями обмоток или двигателями другой, неэлектрической природы;

– кинетическая энергия отскока от обрабатываемой среды;

– известен режим, когда ЭМП работает силовым двигателем на упор, компенсируя силовую нагрузку от другого устройства. (силовые компенсаторы). Иногда они выступают в роли виброкомпенсаторов, виброизоляторов, работая в противофазе с внешним вибровозбудителем, обеспечивая спокойное состояние фундаментов зданий, столов крупных станков и т.д.

– работа ЭМП в режиме генератора электрических импульсов, когда ферромагнитный якорь перемещается внутри возбужденной обмотки ЭМП.

Перечисленные виды потоков механической энергии в зависимости от схемы импульсного ЭМП вводятся в его электро-механическую систему на этапе рабочего хода, либо холостого хода. При известной массе якоря m_a сторонняя механическая энергия на этих этапах может быть охарактеризована определенной конечной скоростью V_0 якоря и его кинетической энергией $A_{к1} = 0,5m_a V_0^2$, а по отношению к электро-механической системе скорость V_0 одновременно является и начальной скоростью.

При исследовании рабочих процессов необходимо учитывать знак вводимой механической энергии, который зависит от совпадения или несовпадения скорости V_0 и статического тягового усилия $F_{ст}$ импульсного ЭМП на конкретном этапе. В случае их совпадения импульсный ЭМП может работать в режиме двигателя или генератора, а при несовпадении – в режиме электромагнитного тормоза.

Оценим влияние вводимой на этапе рабочего хода сторонней механической энергии на рабочие процессы импульсного электро-механического преобразователя, выполненного, например, по схеме однообмоточного молота двойного действия (рис. 2). Будем считать, что такой преобразователь имеет статические тяговые характеристики, неизменные на большей части перемещения якоря, электромагнитное усилие возникает после включения обмотки возбуждения преобразователя без запаздывания, продольная ось молота расположена

вертикально, а скорость V_0 якоря и статическое тяговое усилие $F_{ст}$ на этапе рабочего хода совпадают и направлены вниз.

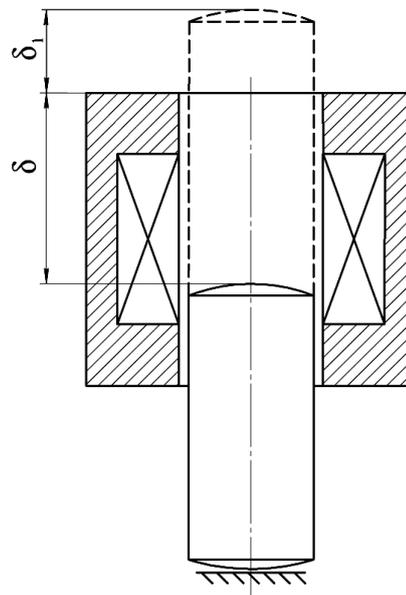


Рис. 2. Схема однообмоточного молота двойного действия

Получим выражение энергии удара A_y импульсного ЭМП в составе однообмоточного молота двойного действия. Рабочий цикл такой электромагнитной машины начинается с этапа холостого хода и заканчивается рабочим ходом. С подачей напряжения в обмотку возбуждения начинается подъем якоря массой m_a на высоту δ_n (холостой ход), в результате чего якорем запасается потенциальная энергия $m_a g \delta_n$. При этом часть пути δ якорь в течение холостого хода проходит сначала под действием электромагнитного усилия (активный участок), а затем часть пути δ_1 – по инерции (на выбеге) при отключенном питании обмотки возбуждения. При движении якоря вниз (рабочий ход) он перемещается сначала только под действием силы тяжести (пассивный участок длиной δ_1), а далее на активном участке – под действием одновременно электромагнитного усилия и силы тяжести, проходя путь δ . Следовательно, $\delta_n = \delta_1 + \delta$ – полный путь, пройденный якорем в период как холостого, так и рабочего хода.

Для упрощения нахождения энергии удара A_y как кинетической энергии якоря целесообразно воспользоваться взаимными

соотношениями для электромеханической системы, справедливыми для ненасыщенного магнитопровода импульсного ЭМП и без учета потерь от перемангничивания, вихревых токов и потерь на трение [3-6]:

$$A_y = 0,5(A_n - A_n). \quad (1)$$

В (1) интегральная работа A_u связана с особенностями электромеханического преобразователя и с его статическими тяговыми характеристиками $F_{cm}(\delta)$, а поскольку статическое тяговое усилие неизменно на большей части перемещения δ , то $A_u = F_{cm} \delta$. Работа A_n связана с противодействующей характеристикой $F_n(\delta)$ и особенностями схемы электромагнитной машины.

Поскольку в энергию удара A_y молота двойного действия, совершаемого в период рабочего хода, входит и кинетическая энергия $A_{к1}$, запасенная якорем еще за период холостого хода и определяющая конечную скорость V_0 на пассивном участке рабочего хода (она же является и начальной скоростью V_0 на активном участке), для периода холостого хода величину $A_{к1}$ предварительно найдем с помощью выражения (1), справедливого для активного участка длиной δ :

$$\begin{aligned} A_{к1} &= 0,5(F_{cm} \delta - m_a g \delta) = \\ &= m_a g \delta 0,5 (F_{cm*} - 1), \end{aligned} \quad (2)$$

где $F_{cm*} = F_{cm}/(m_a g)$ – относительное статическое тяговое усилие; $A_n = m_a g \delta$ – работа, связанная с преодолением силы тяжести якоря на активном участке в период холостого хода, когда сила тяжести якоря и скорость движения якоря не совпадают по направлению; g – ускорение свободного падения.

Из (2) следует, что при тяговом усилии $F_{cm*} = 1$ кинетическая энергия якоря $A_{к1} = 0$ и выбег якоря отсутствует ($\delta_1 = 0$).

Будем считать, что величина интегральной работы импульсного ЭМП при рабочем ходе останется такой же, как и при холостом ходе, что соответствует такому же статическому тяговому усилию F_{cm} на том же перемещении δ активного участка. Применим выражение (1) для нахождения кинетической энергии якоря (энергии удара A_y) на активном участке рабочего хода. После прохождения якорем пассивного участ-

ка пути δ_1 конечная скорость V_0 , определяемая, как указано выше, величиной кинетической энергии $A_{к1}$, является одновременно начальной скоростью для активного участка пути δ .

В отличие от холостого хода на рабочем ходе энергия A_n в выражении (1), связанная с противодействующими усилиями, включает не только потенциальную энергию якоря $m_a g \delta$ на активном участке, обусловленную силой тяжести якоря, но и вводимую в электромеханическую систему стороннюю кинетическую энергию $A_{к1}$, обусловленную начальной скоростью V_0 , с которой якорь входит в обмотку. Причем эти обе энергии должны быть учтены в выражении (1) с противоположным знаком:

$$A_n = - (m_a g \delta + A_{к1}). \quad (3)$$

Это объясняется тем, что сила тяжести $m_a g$, определяющая первое слагаемое, и начальная скорость V_0 , определяющая второе слагаемое в правой части (3), направлены согласно с тяговым усилием ЭМП.

Тогда выражение (1) энергии удара для рабочего хода примет вид

$$\begin{aligned} A_y &= 0,5 [F_{cm} \delta + (m_a g \delta + A_{к1})] = \\ &= m_a g \delta (0,75 F_{cm*} + 0,25), \end{aligned}$$

которое представим в относительной форме, приняв за базу потенциальную энергию якоря $m_a g \delta$:

$$A_{y*} = \frac{A_y}{m_a g \delta} = 0,75 F_{cm*} + 0,25. \quad (4)$$

Выразим в энергии удара молота (соотношение (4)) составляющие, обусловленные холостым A_{xx} и рабочим A_{px} ходами якоря, учтя (2) и имея в виду, что $A_y = A_{xx} + A_{px}$:

$$A_{xx*} = 1 + 0,5 (F_{cm*} - 1) = 0,5 F_{cm*} + 0,5; \quad (5)$$

$$A_{px*} = 0,25 F_{cm*} - 0,25. \quad (6)$$

На рис. 3 представлены зависимости энергий A_{y*} , A_{xx*} , A_{px*} от величины статического тягового усилия ЭМП, построенные по выражениям (4)-(6). Из их анализа следует, что все они линейно растут с увеличением F_{cm} , однако темп роста зависимости A_{xx*} выше, чем у A_{px*} .

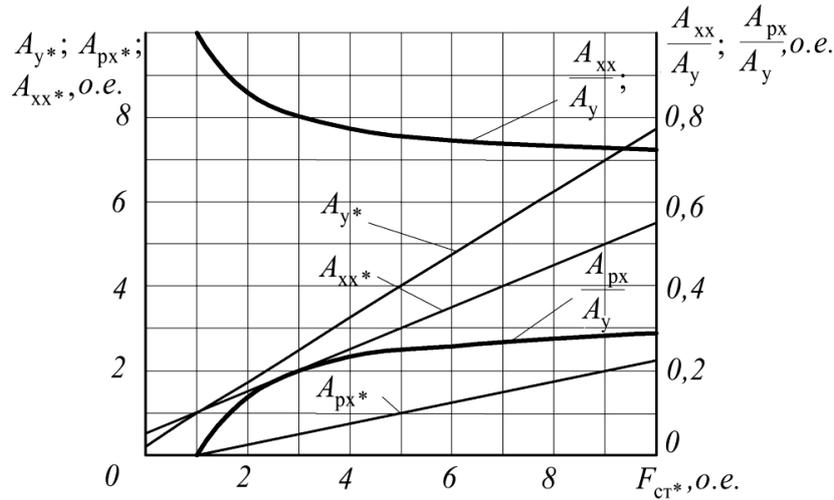


Рис. 3. Влияние статического тягового усилия на энергетические характеристики молота

Для количественной оценки вклада этих составляющих в величину энергии удара на рис. 3 дополнительно представлены зависимости $A_{xx}/A_y = f(F_{cm}^*)$ и $A_{px}/A_y = f(F_{cm}^*)$, первая из которых падает с ростом статического тягового усилия, а вторая – возрастает. При одинаковых значениях статического тягового усилия F_{cm}^* больший (не менее двукратного) вклад в энергию удара обеспечивается за счет холостого, нежели рабочего хода. Это обстоятельство предопределяет и бóльшую токовую, следовательно, и тепловую нагрузку обмотки в период холостого хода и соответственно меньшую токовую нагрузку в период рабочего хода машины. Поэтому для более полного использования активных материалов импульсного ЭМП необходимо в период рабочего хода использовать, например, форсированное питание обмотки возбуждения.

Для периода рабочего хода к моменту действия на якорь электромагнитного тягового усилия якорь приобретет начальную скорость V_0 и стороннюю по отношению к обмотке кинетическую энергию A_{cm} :

$$A_{ct} = A_{kl} = 0,5m_a V_0^2, \quad (7)$$

которую представим в относительной форме:

$$A_{ct}^* = A_c / (m_a g \delta) = V_0^{*2}. \quad (8)$$

Используя выражение (1) и учитывая (3), представим энергию удара в виде

$$A_y = 0,5m_a g \delta (F_{ct}^* + V_0^{*2} + 1), \quad (9)$$

где $V_0^* = V_0/V_B$ – относительная начальная скорость якоря при входе его в обмотку; $V_B = \sqrt{2g\delta}$ – базисная скорость якоря в конце его свободного падения с высоты δ . Выражение (9) представим в относительной форме:

$$A_{y*} = 0,5 \cdot (F_{ct}^* + V_0^{*2} + 1) = 0,5 \cdot (F_{ct}^* + A_{ct}^* + 1). \quad (10)$$

Из рис. 4, на котором представлены характеристики, построенные по выражению (10) при $F_{cm}^* = \text{const}$, следует, что энергия удара молота растет как с увеличением тягового усилия F_{cm}^* , так и начальной скорости V_0^* , то есть сторонней механической энергии A_{cm} , вводимой в импульсный ЭМП.

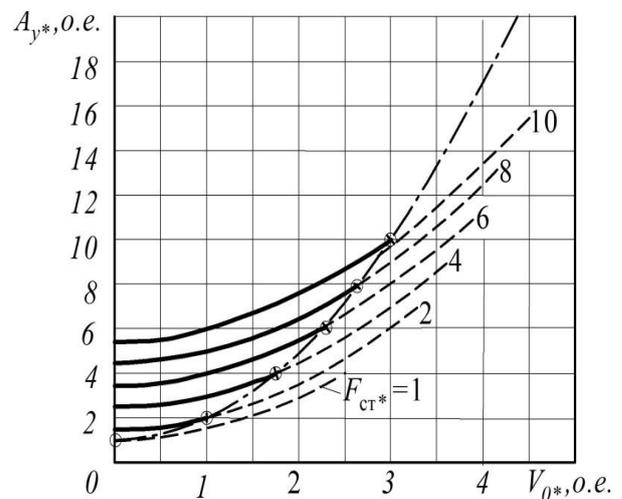


Рис. 4. Влияние начальной скорости на энергию удара молота для различных значений тягового усилия

На этом же рисунке штрихпунктирной линией изображена следующая предельная относительная энергия:

$$A_{y,пред*} = (V_{0*}^2 + 1) = (A_{ст*} + 1), \quad (11)$$

определяемая суммой сторонней кинетической и потенциальной энергиями якоря. Точки пересечения кривых A_{y*} , построенных по (10), с кривой, построенной по (11), определяют значения предельно допустимых скоростей $V_{0пред*}$ якоря для каждого значения $F_{ст*}$.

В диапазоне изменений начальной скорости якоря V_{0*} от нуля до $V_{0пред*}$ энергия удара молота двойного действия будет больше суммы сторонней кинетической $A_{ст}$ и потенциальной $m_a g \delta$ энергий якоря, что свидетельствует о работе импульсного ЭМП в двигательном режиме (сплошные линии на рис. 4). Если V_0 будет больше $V_{0пред}$, то возникает генераторный эффект, при котором накопленная в рабочих зазорах магнитная энергия лишь частично преобразуется в механическую энергию, а другая часть магнитной энергии возвращается в источник (пунктирные линии на рис. 4). Это так называемый «совмещенный режим» [1].

Условие (11) (штрихпунктирная линия на рис. 4) можно рассматривать как ограничение при выборе обобщенных режимных параметров ударной машины, а именно: сочетание параметров $F_{ст*}$, V_{0*} и A_{y*} , которое соответствует нахождению их правее штрихпунктирной линии на рис. 4, является недопустимым, поскольку в этой области возникает генераторный эффект, снижающий энергию удара молота и его эффективность.

Определим минимально необходимое статическое тяговое $F_{ст,мин*}$, исключающее генераторный эффект, при заданной начальной скорости якоря V_{0*} из выражения (10), подставив величину $V_{0*}^2 + 1$ в его левую часть:

$$F_{ст,мин*} \geq (V_{0*}^2 + 1), \quad (12)$$

а также предельную стороннюю механическую энергию, вводимую в импульсный ЭМП при заданном усилии $F_{ст*}$, из (12) и (8):

$$A_{ст,пред*} = F_{ст*} - 1. \quad (13)$$

Для количественной оценки влияния сторонней механической энергии на энергию удара молота двойного действия определим энергию рабочего хода, создаваемую обмоткой возбуждения импульсного ЭМП, в виде суммы $A_y = A_{px} + A_{ст} + m_a g \delta$, откуда получим

$$A_{px*} = \frac{A_{px}}{m_a g \delta} = 0,5(F_{ст*} - A_{ст*} - 1). \quad (14)$$

Из рис. 5, построенного по (14), следует, что с ростом сторонней механической энергии, вводимой на этапе рабочего хода, энергия рабочего хода молота падает при неизменных значениях тягового усилия. Возникновение нежелательного генераторного эффекта показано пунктиром.

Оценим вклад обмотки в период рабочего хода в создание энергии удара молота, полученное из (14) и (10):

$$\frac{A_{px}}{A_y} = 1 - \frac{2}{1 + \frac{F_{ст*}}{1 + A_{ст*}}}. \quad (15)$$

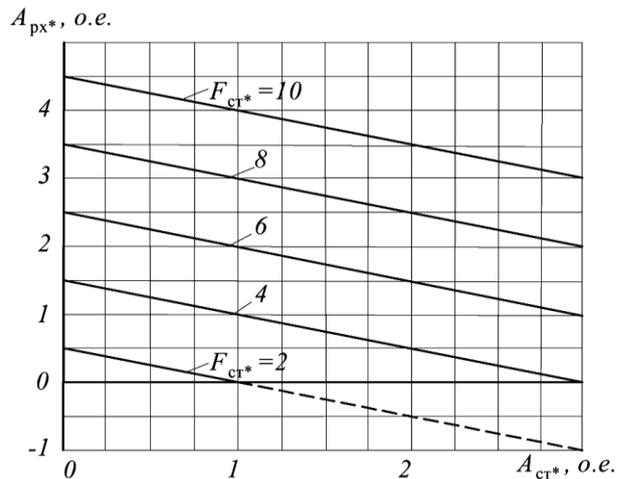


Рис. 5. Влияние сторонней механической энергии на энергию рабочего хода для различных значений тягового усилия

На рис. 6 представлены зависимости, построенные по (15) при условии $F_{ст*} = \text{const}$, которые характеризуют эффективность обмотки при рабочем ходе молота. Они свидетельствуют, что вклад обмотки в создание энергии удара молота двойного действия с ростом начальной скорости

V_0 якоря, обусловленной сторонней механической энергией, уменьшается.

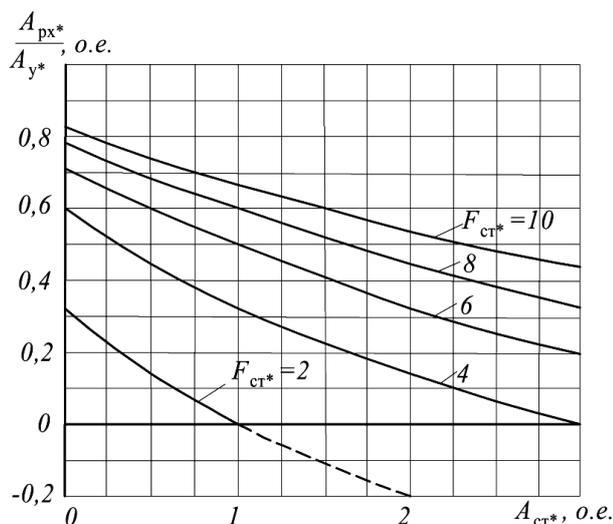


Рис. 6. Влияние сторонней механической энергии на относительный вклад обмотки в энергию удара при рабочем ходе для различных значений тягового усилия

Положительные значения энергии обмотки при рабочем ходе свидетельствуют о работе импульсного ЭМП в двигательном режиме, когда обмотка ускоряет якорь, а отрицательные – о работе в совмещенном режиме [1], когда появляется генераторный режим одновременно с двигательным, что является специфической особенностью двухступенчатого электромеханического преобразователя электромагнитного типа и нежелательно для рассматриваемой машины. Следовательно, для обеспечения работы импульсного ЭМП в двигательном ре-

жиме при наличии сторонней механической энергии, вводимой в электромеханическую систему, величина тягового усилия $F_{ст*}$ должна быть значительно больше единицы. Это требует от устройства питания и управления в период рабочего хода возможности либо форсированного питания, либо иного способа питания обмотки, например, предложенного в [7, 8].

Таким образом, установлено, что введение сторонней механической энергии в импульсный ЭМП электромагнитного типа при совпадении направлений скорости вводимой механической энергии с тяговым усилием преобразователя может снизить его эффективность вследствие генераторного эффекта.

– получено выражение, устанавливающее минимальное значение статического тягового усилия, которое исключает генераторный эффект, и выявлена область, в которой генераторный эффект отсутствует.

– установлено, что для повышения эффективности импульсного ЭМП, работающего в режиме молота двойного действия или при наличии обмоток рабочего хода, необходимо увеличивать статическое тяговое усилие импульсного ЭМП сверх установленного минимального значения, например, за счёт форсировки или за счёт предварительного аккумулирования магнитной энергии рабочих зазоров, например, в период холостого хода.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Мошкин В.И.** Специальные режимы линейных электромагнитных двигателей / В.И. Мошкин, А.П. Моисеев, Г.Г. Угаров // Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы Междунар. науч.-практ. конф. Саратов: СГАУ, 2010. С. 234-237.

2. **Ряшенцев Н.П.** Электромагнитный привод линейных машин / Н.П. Ряшенцев, В.Н. Ряшенцев. Новосибирск: Наука, 1985. 153 с.

3. **Ольсон Г.** Динамические аналогии / Г. Ольсон. М: Иностран. лит., 1947. 291 с.

4. **Гордон А.В.** Электромагниты постоянного тока / А.В. Гордон, А.Г. Сливинская. М.: Госэнергоиздат, 1960. 446 с.

5. **Мошкин В.И.** Использование принципа взаимности при исследовании и расчёте энергетических характеристик линейных электромагнитных двигателей / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Задачи динамики электрических машин. Омск: Изд-во ОмПИ, 1988. С. 120-128.

6. **Мошкин В.И.** Взаимные соотношения в мощных импульсных электромагнит-

ных машинах / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров, О.В. Вдовина // Вестник СГТУ. 2010. № 3 (47). Вып. 2. С. 65-71.

7. **Мошкин В.И.** Оценка эффективности способов концентрации магнитной энергии в импульсных линейных электромагнитных двигателях / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Актуальные проблемы электронного при-

боростроения. АПЭП-2014: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2014. Т. 2. С. 344-348.

8. Патент RU № 2127017 Н 02 К 33/02. Способ управления однообмоточным линейным электромагнитным двигателем ударного действия / Г.Г. Угаров, В.Ю. Нейман, К.М. Усанов. 27.02.99, БИ № 6.

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.

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

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

Статья поступила в редакцию 20.08.15, принята к опубликованию 11.09.15

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.

**МЕХАНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА
ЛИНЕЙНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ДВИГАТЕЛЯ**

Г.Г. Угаров, О.В. Вдовина, А.Х. Массад

**MECHANICAL CHARACTERISTICS
OF THE LINEAR ELECTROMAGNETIC ENGINE**

G.G. Ugarov, O.V. Vdovina, A.Kh. Massad

Аналитически получены и обосновывается идентичность механических характеристик линейных электромагнитных двигателей, работающих на продольном и поперечном магнитном поле.

Ключевые слова: электромагнитный двигатель, индуктивность, тяговые усилия, скорость перемещения якоря

Наибольшее применение в приводе линейных машин нашли линейные электромагнитные двигатели (ЛЭМД), использующие продольное и поперечное магнитное поле и имеющие различные показатели и характеристики [1, 2].

Представляет интерес установление зависимости скорости перемещения якоря рассматриваемых двигателей от силы тяги $\mathcal{G} = f(F_3)$ при постоянном значении тока I источника питания, сопротивления R обмотки.

При приложении напряжения U к обмотке ЛЭМД уравнение электрического состояния будет иметь вид

$$U = iR + i \frac{dL}{dx} \mathcal{G}, \quad (1)$$

где L – индуктивность двигателя; x – перемещение якоря.

Из выражения (1) определим скорость

$$\mathcal{G} = \frac{U - iR}{i \frac{dL}{dx}}. \quad (2)$$

Из известной формулы тяговой силы электромагнита с ненасыщенным магнито-

Analysis was made to identify the mechanical characteristics of the linear electromagnetic engines operating at a longitudinal and cross magnetic field.

Keywords: electromagnetic engine, inductance, traction efforts, speed of movement of an anchor

проводом найдем ток $i = \sqrt{2F_3 \frac{dx}{dL}}$ и, подставив его в (2), после преобразования получим

$$\mathcal{G} = \frac{U - R \sqrt{\frac{2F_3}{dL/dx}}}{\sqrt{\frac{2F_3}{dL/dx}}}. \quad (3)$$

Разделив в (3) числитель и знаменатель на $\sqrt{\frac{2F_3}{dL/dx}}$, получим

$$\mathcal{G} = \frac{U}{\sqrt{2F_3 dL/dx}} - \frac{R}{\sqrt{dL/dx}}. \quad (4)$$

Выражение (4) представляет собой в обобщенном виде механическую характеристику для любого из рассматриваемых двигателей. Покажем это. Приняв для двигателя с продольным магнитным полем зависимость $L = f(x)$ в виде $L = a/(x_k - x)$, где $(x_k - x)$ – изменение длины рабочего воздушного зазора, и подставив производную $dL/dx = a(x_k - x)^2$ в (4), получим выражение механической характеристики двигателя с продольным магнитным полем:

$$g = \frac{U}{\sqrt{\frac{2F_y a}{(x_k - x)^2}}} - \frac{R(x_k - x)^2}{a}. \quad (5)$$

Для двигателя с поперечным магнитным полем зависимость индуктивности от перемещения определяется выражением $L = L_n + kx$, где $k = (L_k - L_n)/x$, L_n, L_k – начальное и конечное значение индуктивности.

Подставив производную $dL/dx = k$ в (4), получим выражение для механической характеристики двигателя с поперечным магнитным полем:

$$g = \frac{U}{\sqrt{2F_y k}} - \frac{R}{k}. \quad (6)$$

Представим выражение (5) для механической характеристики двигателя с продольным магнитным полем в относительной форме, поделив обе части его на $R(x_k - x)^2 / a$:

$$g^* = \frac{U}{\frac{R(x_k - x)^2}{a}} = \frac{I_y \frac{a}{(x_k - x)^2}}{\sqrt{2F_y \frac{a}{(x_k - x)^2}}} - 1, \quad (7)$$

где $I_y = U / R$ – установившееся значение тока обмотки двигателя.

Воспользуемся формулой силы тяги, приняв ток $I = I_y$

$$F_{yy} = \frac{1}{2} I_y^2 \frac{a}{(x_k - x)^2}$$

и определим ток

$$I_y = \sqrt{\frac{2F_{yy} / a}{(x_k - x)^2}}. \quad (8)$$

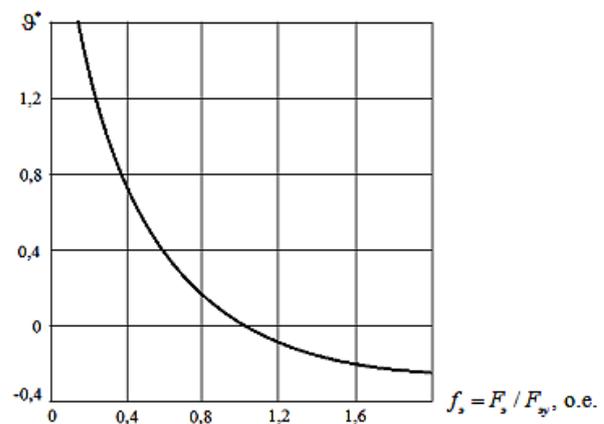
Подставив (8) в (7), после преобразования получим

$$g^* = \sqrt{\frac{F_{yy}}{F_y}} - 1. \quad (9)$$

Легко показать, что для двигателя с поперечным магнитным полем выражение механической характеристики в относительной форме будет выражаться той же формулой (9), что и для двигателя с продольным магнитным полем.

На рисунке изображена механическая характеристика рассматриваемых электромагнитных двигателей, построенная по выражению (9).

Из выражения (9) и рисунка следует, что механическая характеристика рассматриваемых двигателей «мягкая».



Механическая характеристика ЛЭМД

Выражение (4) показывает, что регулирование скорости перемещения якоря рассматриваемых двигателей может быть осуществлено путем изменения сопротивления обмотки возбуждения R , конструкции магнитной системы преобразователей, ведущего к изменению индуктивности по перемещению и тягового усилия F_y .

Полученные зависимости могут быть использованы для анализа режимов работы ЛЭМД в системе привода рабочих машин.

ЛИТЕРАТУРА

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

2. **Ряшенцев Н.П.** Электромагнитный привод линейных машин / Н.П. Ряшенцев, В.Н. Ряшенцев. Новосибирск: Наука, 1985. 153 с.

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

Вдовина Ольга Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Массад Амер Х. – кандидат технических наук, профессор кафедры «Электромеханика» Национального университета, г. Наблус, Палестина

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

Olga V. Vdovina – Ph.D., Associate Professor, Department of Power Supply for Industrial Enterprises, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

A. Kh. Massad – Ph. D., Professor, Department of Electromechanical Engineering, An-Najah National University, Nablus, Palestine

Статья поступила в редакцию 06.08.15, принята к опубликованию 11.09.15



ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

УДК 621.314.58

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ДЛЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ПОДВИЖНОГО ОБЪЕКТА

П.А. Кошелев, В.М. Опре, С.В. Парамонов, В.Н. Терещенко

DESIGN PATTERNS OF POWER TRANSFORMERS FOR POWER SUPPLY SYSTEMS IN MOBILE OBJECTS

P.A. Koshelev, V.M Opre, S.V. Paramonov, V.N. Tereshchenko

Рассмотрены особенности систем электропитания бортовой аппаратуры подвижных объектов, в частности летательных аппаратов. Особое внимание уделено силовому трансформатору системы электропитания, который, в основном, определяет её массу и габариты. Представлено универсальное выражение, описывающее как начальную линию намагничивания, так и прямую и обратную ветви петли гистерезиса.

Ключевые слова: силовой трансформатор, насыщение магнитопровода, потери мощности, гистерезис, математическая модель

В отличие от силовых трансформаторов (СТ), работающих в стационарных условиях, СТ подвижного объекта должен иметь минимально возможные массу и габариты, и высокую надёжность.

При проектировании СТ, работающих в составе бортовой системы электропитания (СЭП), следует учитывать температурный режим оборудования, возможное кратковременное насыщение материала магнитопровода в переходных режимах, не приводящее к аварийному отключению СЭП, с достаточной точностью вычислять активные и реактивные потери в магнитопроводе

The paper considers the characteristics of power supply systems in onboard equipment of mobile objects, particularly aircrafts. Special attention is paid to the power transformer in the power supply system, which determines its weight and overall dimensions. The authors present the universal expression describing the initial line of magnetization, including the direct and return branches of the hysteresis loop.

Key words: power transformer, saturation of a magnetic conductor, loss of power, hysteresis, mathematical model

и в обмотках, чтобы рассчитать и обеспечить параметры системы охлаждения.

Оптимизация массы и габаритов СТ, рекомендации по проектированию СТ и достоверные результаты анализа процессов в СЭП могут быть получены при учёте влияния процесса перемагничивания магнитопровода СТ на технические характеристики и на экономические показатели СЭП, для чего необходимо адекватное описание самого процесса, учитывающее как свойства применённого материала, так и конструкцию СТ.

Проектированию СТ, предназначенных для установки на подвижных объектах, оп-

ределению мощности активных потерь в магнитопроводе и обмотках, посвящено большое количество исследований, описанных в литературе, например [1, 2].

Удельная объёмная энергия активных потерь в магнитопроводе СТ в статике и динамике – это площадь петли гистерезиса, размерность которой Дж/м³.

Методам графического представления и математического описания процесса перемагничивания магнитопровода и участков петли гистерезиса посвящаются исследования с начала XX века по настоящее время [3-6]. Термины и определения приведены в стандарте [7].

В системе MATLAB в пакете SIMULINK POWER SYSTEMS имеется возможность учёта формы основной кривой намагничивания и явления гистерезиса.

Однако при использовании этого пакета возникают следующие проблемы:

- отсутствие аналитических выражений, которые позволяют установить связь между параметрами СТ и динамикой процессов в СЭП;

- закрытость применяемого алгоритма;

- невозможность коррекции параметров в процессе моделирования и их оптимизации.

Для вычисления энергетических показателей СЭП необходим анализ спектрального состава её основных сигналов.

Функция FFT системы MATLAB выполняет разложение в ряд Фурье, однако возможность восстановления сигнала по амплитудному и фазовому спектрам отсутствует.

С помощью современных математических программ символьных и численных преобразований и их синтеза отмеченные проблемы поддаются решению.

Как отмечалось в [4], процесс перемагничивания магнитопровода может быть описан

экспоненциальным рядом как наиболее удобным набором функций для дальнейших преобразований. В большинстве случаев достаточно одного члена ряда и постоянной составляющей, при этом единое выражение зависимости магнитной индукции от напряжённости поля может описать начальную линию намагничивания, прямую и обратную ветви петли гистерезиса (1).

Аппроксимация процесса перемагничивания и результаты проектирования СТ.

$$B = x_0 \text{signum}(H + x_1 H_c) B_s \times (1 - e^{-x_2 \text{abs}(H + x_3 H_c)}) + x_4 B_m. \quad (1)$$

Здесь B – текущее значение магнитной индукции, Тл; H – напряжённость поля, А/м; B_s – магнитная индукция в режиме технического насыщения материала магнитопровода, Тл; H_c – коэрцитивная сила, А/м; B_m – остаточная индукция, Тл.

Коэффициенты x_0, x_4 в (1) находятся в системе MAPLE. 12 методом наименьших квадратов с использованием пакета with (Optimization) и оператора LSSolve.

Естественно, чем больше опорных точек на сетке исходных данных, тем надёжнее результат при соответствующей точности вычислений.

Как правило, достаточно четырёх пар и их отражения в третьем квадранте координат: $[H_{\max}, B_s]$, $[0, B_m]$, $[H_c, 0]$, Промежуточная пара: $[0.5 * H_{\max}, B_0]$ (рис. 1, а).

На рис. 1 б показаны те же зависимости после аппроксимации по (1) для примеров: № 1: $H_{\max} = 400$ А/м, $B_m = 0,3$ Тл, $H_c = 30$ А/м, $B_0 = 1,1$ Тл, $B_s = 1,2$ Тл и № 2: $H_{\max} = 80$ А/м.

Ниже приведены импортированные для примера № 1 (см. таблицу) из системы MAPLE.12 аппроксимирующие выражения:

Для основной линии намагничивания:

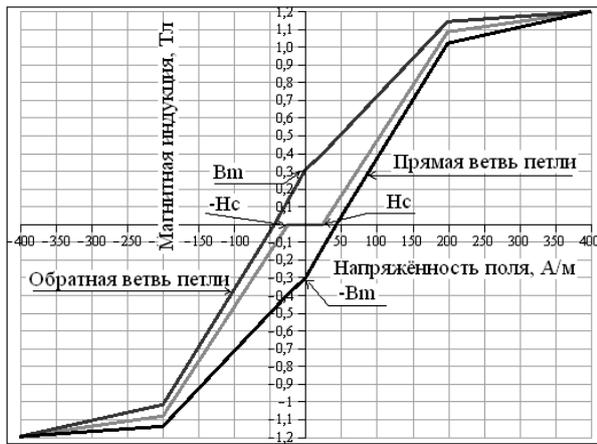
$$B_0 = 91235867020774094806266 * \text{signum}(H - 2.904375637503188687833341 * 10^{(-11)}) * (1 - \exp(-0.5809624265311945505677448e - 2 * \text{abs}(H - 2.904375637503188687833341 * 10^{(-11)}))) + 1.174298312703973257603136 * 10^{(-13)};$$

Для обратной ветви петли гистерезиса:

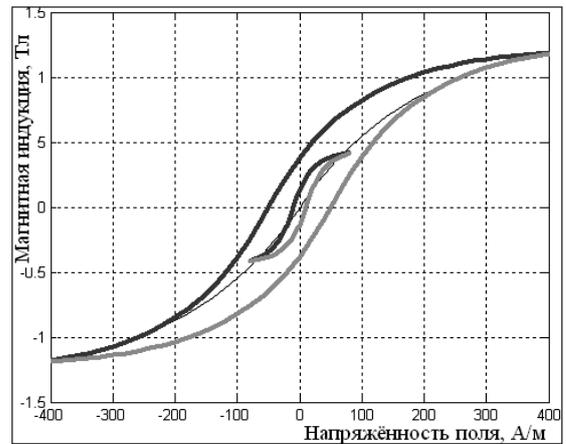
$$B_1 = 1.288098175009418658653942 * \text{signum}(H + 51.82524831937540308646269) * (1 - \exp(-0.8081447451797394632664877e - 2 * \text{abs}(H + 51.82524831937540308646269))) - 0.4456771054722793006062723e - 1;$$

Для прямой ветви:

$$B2=1.288098175009738830040896*\text{signum}(H-51.82524831939783196829298)*(1-\exp(-0.8081447451790177823276515e-2*\text{abs}(H-51.82524831939783196829298)))+0.4456771054735316800029424e-1$$



а



б

Рис. 1

При моделировании электромагнитных процессов в динамике может быть введено понятие «расчётная коэрцитивная сила H_{cr} », позволяющее оперативно изменять данные динамической петли гистерезиса.

На основании [1]

$$H_{cr} = \frac{0.0125 \cdot (20 \cdot P_{dis} \cdot \rho \cdot \nu f - 197 \cdot B_s^2 \cdot f^2 \cdot Q_f \cdot \delta^2)}{B_s \cdot f \cdot Q_f \cdot \rho}, \text{ А/м}, \quad (2)$$

где P_{dis} – суммарная мощность потерь в магнитопроводе, Вт; ρ – удельное сопротивление материала, Ом м; νf – плотность материала, кг/м³; Q_f – масса магнитопровода, кг; f – частота сети, Гц; δ – толщина ленты (пластины), м.

При допущении о подобии частных петель гистерезиса предельной петле, обоснованном в [3], несложно пересчитать координаты опорных точек, введя соответствующие коэффициенты.

В качестве примера № 1 приведены данные для СТ с активной мощностью 5000 Вт, частотой сети 400 Гц.

Для примера № 1 на рис. 2 показаны рассчитанные по (2) зависимости H_{cr} от P_{dis} при толщинах пластины (ленты) магнитопровода Delta 0,15 и 0,35 мм.

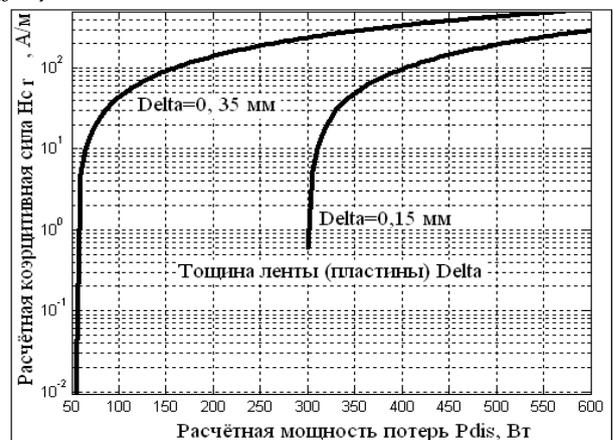


Рис. 2

В таблицу сведены основные результаты расчётов и оптимизации СТ с той же активной мощностью в нагрузке для частот 50, 400, 1000 Гц. Эскизы оптимизированных СТ [2] показаны соответственно на рис. 3-5.

Пример №2.

Материал магнитопровода: сталь 3421, толщина ленты Delta=0,15 мм

% Ввод исходных данных

LC0=0.15; % Длина стержня, м

LCA=0.15; % Длина ярма, м

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

A=0.03;	% Толщина магнитопровода, м
B=A;	% Ширина магнитопровода, м
RO=1.7e-8;	% Уд. сопротивление провода, Ом·м
M0=4*pi*10 ⁽⁻⁷⁾ ;	% Магнитная постоянная, Гн/м
MR=1000;	% Относительная магнитная проницаемость
F=400;	% Частота сети, Гц
P=5000;	% Активная мощность нагрузки, Вт
R=10;	% Активное сопротивление нагрузки, Ом
BM=1.2;	% Допустимая индукция, Тл
DH0=0.001;	% Размер немагнитного зазора, м
Tmax=373;	% Температура перегрева, К
Tex=313;	% Температура окружающей среды, К
Twr=1;	% Относительная продолжительность работы
Di0=0.001;	% Толщина изоляции магнитопровода, м
Di1=0.0001;	% Толщина изоляции 1 обмотки, м
Di2=0.0001;	% Толщина изоляции 2 обмотки, м
DH1=0.0003;	% Ширина воздушного канала стержень-1 обмотка, м
DH2=0.003;	% Ширина воздушного канала 1 – 2 обмотки, м
Di12=0.002;	% Толщина изоляции между 1 и 2 обмотками, м
Gam=8900;	% Плотность материала обмоток, кг/м ³
Gaf=7800;	% Плотность материала магнитопровода, кг/м ³
E=282;	% Амплитуда напряжения питающей сети, В
Dmax=3;	% Допустимая плотность тока, А/мм ²

Наименование параметра	Размерность	F = 50 Гц Пример № 1	F = 400 Гц Пример № 2	F = 1000 Гц Пример № 3
Количество витков первичной обмотки W1	-	469	116	95
Количество витков вторичной обмотки W2	-	526	118	107
Индуктивность намагничивания Lm	Гн	0,232	0,0076	0,00317
Индуктивность рассеяния	Гн	0,0076	0.0002529	0,00028
Максимальная магнитная индукция BM	Тл	1,2	1,2	1,2
КПД ЕТА	-	0,932	0,939	0,984
Коэффициент мощности Km	-	-	0,968	-
Активная мощность в нагрузке P	Вт	5000	5000	5000
Мощность потерь в обмотках PW	Вт	297	52,79	49,29
Мощность потерь в магнитопроводе PF	Вт	67,4	274	32,45
Масса обмоток Qm	кг	17,4	2,84	2,0
Масса магнитопровода Qf	кг	11,2	4,2	1,25

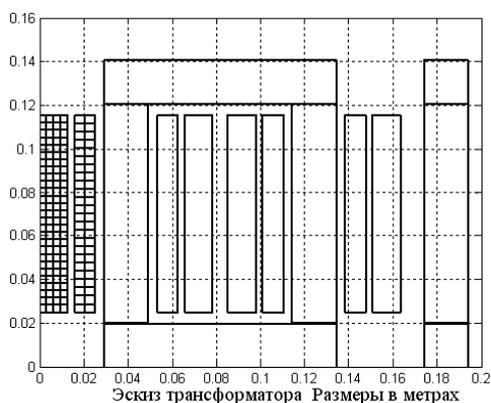


Рис. 3

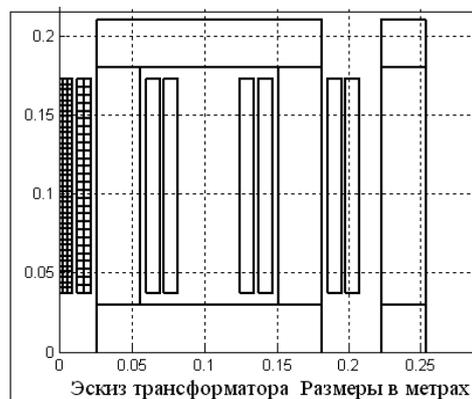


Рис. 4

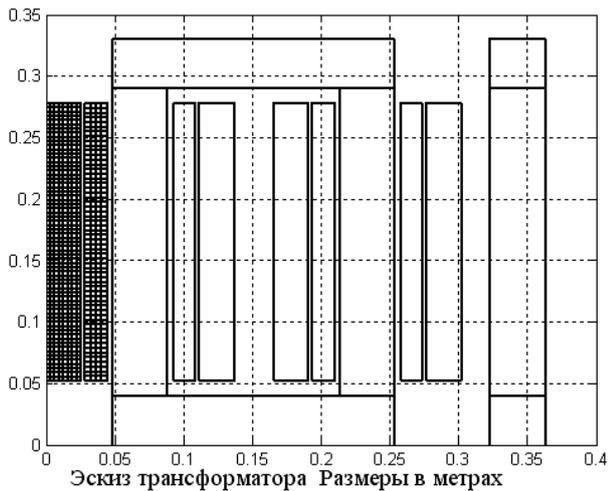


Рис. 5

Процесс перемагничивания магнитопровода СТ для того же примера при различных амплитудах напряжённости магнитного поля H , А/м, представлен на рис. 1 б.

На рис. 6 показана зависимость суммарной мощности активных потерь в СТ от частоты сети и толщины ленты (пластины) магнитопровода.

Анализ спектра сигналов и определение энергетических показателей СЭП.

В результате спектрального анализа получены основные характеристики и параметры СЭП, в частности формы токов и напряжений, их действующие, средние и амплитудные значения, коэффициенты искажений, мощности.

Анализ выполнен в системе MAPLE.12, иллюстрации соответствуют приведённому выше примеру. Выведенные выражения экспортированы в систему MATLAB 7.11, где после незначительной коррекции синтаксиса производились численные преобразования.

Для нахождения формы тока сети предварительно определяется зависимость индуктивности намагничивания L_m , Гн (3) от напряжённости поля H , А/м; применены операторы diff или gradient:

$$L_m = \frac{w l^2 \cdot S_c}{l m} \cdot \frac{dB}{dH} + L_o, \quad (3)$$

где L_o – остаточная индуктивность в режиме насыщения, Гн; $l m$ – средняя длина магнитной силовой линии, м.

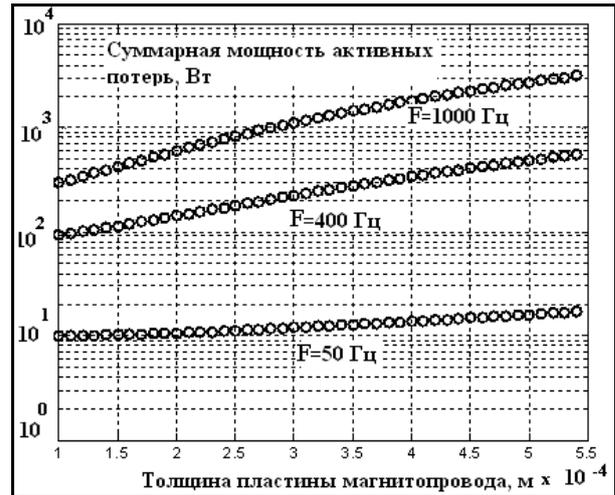


Рис. 6

На рис. 7 представлен фрагмент файла этой системы, содержащий некоторые применённые операторы и их синтаксис.

Вводится вектор отсчётов сигнала F на выбранном периоде базовой частоты, затем выполняются операторы (рис. 7).

На рис. 8-10 – соответственно форма тока сети, амплитудный спектр, фазовый спектр без учёта гистерезиса.

На рис. 11-13 – те же сигналы с учётом явления гистерезиса и амплитуды напряжённости поля 400 А/м.

Вычислены и выведены значения основных энергетических параметров.

На рис. 8 – форма тока для примера по рис. 4, 6.

Амплитудный и фазовый спектры тока для этого примера приведены на рис. 9 и 10.

Итак, выполнены расчёт и оптимизация СТ со специальными требованиями к массогабаритным характеристикам.

Разработан набор программ символьных и численных операций, который может быть использован при проектировании различных систем электропитания аппаратуры подвижных объектов.

Предложен и проиллюстрирован метод аппроксимации статических и динамических характеристик гистерезиса магнитного материала магнитопровода силового трансформатора на основе универсального аналитического выражения, позволяющий анализировать процессы в реальном изделии.

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

```

restart :
F := ( 0, 0.03575, 0.072752, 0.11106, 0.15075, 0.19163, 0.23401, 0.27778, 0.32293, 0.36932, 0.41744, 0.46699,
      0.51786, 0.5703, 0.62429, 0.6798, 0.73686, 0.79556, 0.85575, 0.91762, 0.98109, 1.0462, 1.1128, 1.1816,
      1.2518, 1.3234, 1.3971, 1.4722, 1.5485, 1.628, 1.7089, 1.7898, 1.8742, 1.9611, 2.0477, 2.1367, 2.2282,
      2.3206, 2.4155, 2.5112, 2.6114, 2.7102, 2.8117, 2.9134, 3.0202, 3.1272, 3.237, 3.3441, 3.4596, 3.5719,
      3.687, 3.8048, 3.9219, 4.0418, 4.1684, 4.2859, 4.4144, 4.5416, 4.667, 435, -10.313, -10.022, -10.09,
      -9.434, -9.4748, -9.1638, -8.8505, -8.8634, -8.2175, -8.2017, -7.8678, -7.5319, -7.1941, -7.1288,
      -6.7739, -6.1705, -6.0592, -5.937, -5.3384, -4.976, -4.8046, -4.4246, -4.0436, -3.6615, -3.2785,
      -3.0206, -2.5102, -2.2175, -1.815, -1.4122, -1.0089, -0.60547, -0.2)

F := 
$$\left[ \begin{array}{l} 1 \dots 93 \text{ Vector}_{\text{column}} \\ \text{Data Type: anything} \\ \text{Storage: rectangular} \\ \text{Order: Fortran\_order} \end{array} \right] \quad (1)$$


Digits := 10 :
# Разложение сигнала, заданного на равномерной сетке, в ряд Фурье, построение спектра и восстановление
исходного
with(LinearAlgebra) :
with(Statistics) :
with(plots) :
# Ввод данных по формату F.
dim := Dimension(F); # Кол-во отсчётов на сетке
dim := 93 (2)

F1 := evalm(convert(F, list)) :
nhar := 20; # Максимальный номер гармоники
nhar := 20 (3)

y :=  $\frac{2 \cdot \pi}{\text{dim}} \cdot (m - 1)$  :
for m from 1 by 1 to dim do Fb1[m] := evalf([y, F1[m]·sin(k·y)]) end do:
for m from 1 by 1 to dim do F0[m] := evalf([y, F1[m]]) end do:
ca0 := evalf(convert(F0, list)) :

ca0 := evalf(convert(F0, list)) :
ab0 :=  $\frac{\text{add}(ca0[j, 2], j = 1 \dots \text{dim})}{\text{dim}}$  :
cb1 := evalf(convert(Fb1, list)) :
b1 := evalf $\left( \frac{1}{\pi} \cdot (\text{add}((cb1[n, 1] - cb1[n - 1, 1]) \cdot (cb1[n, 2]), n = 2 \dots \text{dim})) \right)$  :
for m from 1 by 1 to dim do Fa1[m] := evalf([y, F1[m]·cos(k·y)]) end do:
ca1 := evalf(convert(Fa1, list)) :
a1 := evalf $\left( \frac{1}{\pi} \cdot (\text{add}((ca1[n, 1] - ca1[n - 1, 1]) \cdot (ca1[n, 2]), n = 2 \dots \text{dim})) \right)$  :
G[0] := ab0 : for k from 1 by 1 to nhar do G[k] := sqrt((b1)2 + (a1)2) end do:
FC[0] := 0; for k from 1 by 1 to nhar do FC[k] := arctan(a1 / b1) end do:
FC0 := 0 (4)

A[0] := G[0]; for k from 1 by 1 to nhar do A[k] := a1·cos(k·x) + b1·sin(k·x) end do:
A0 := 3.817350237 (5)

AA :=  $\sum_{r=0}^{nhar} A[r]$  : # Разложение в ряд Фурье
cG := convert(G, list) : # Амплитудный спектр
cFC := convert(FC, list) : # Фазовый спектр

```

Рис. 7

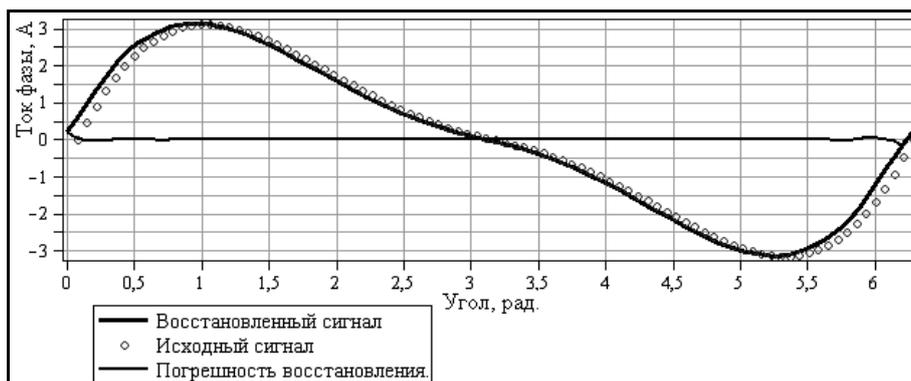


Рис. 8. Форма тока фазы сети в установившемся режиме без учёта гистерезиса.

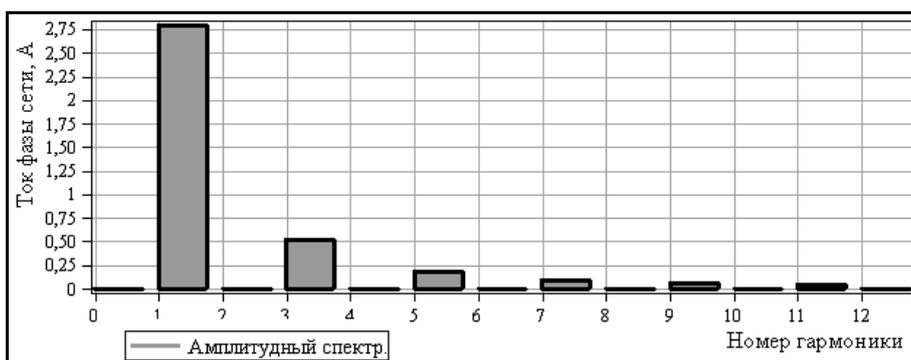


Рис. 9

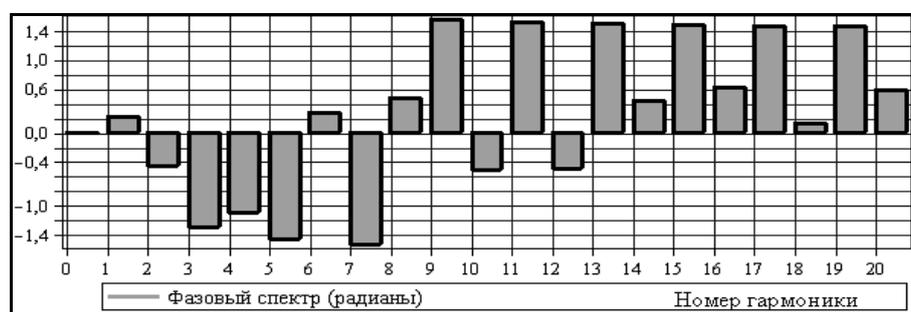


Рис. 10

$\cos \varphi = 0,975,$
Коэффициент мощности $K_m = 0,968.$

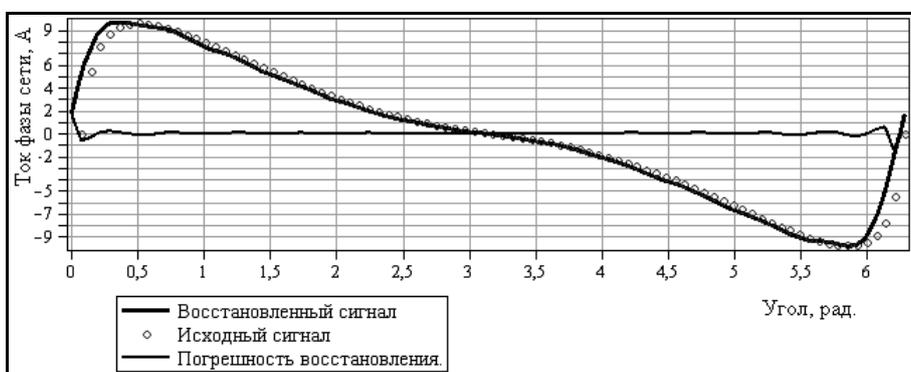


Рис. 11. Форма тока фазы сети в установившемся режиме при учёте гистерезиса.

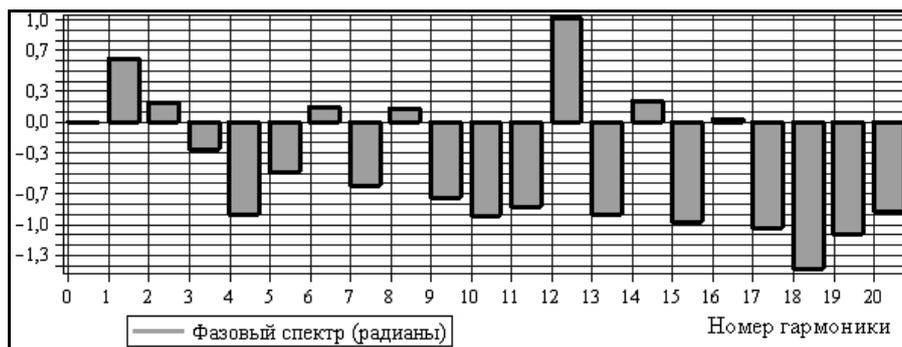


Рис. 12

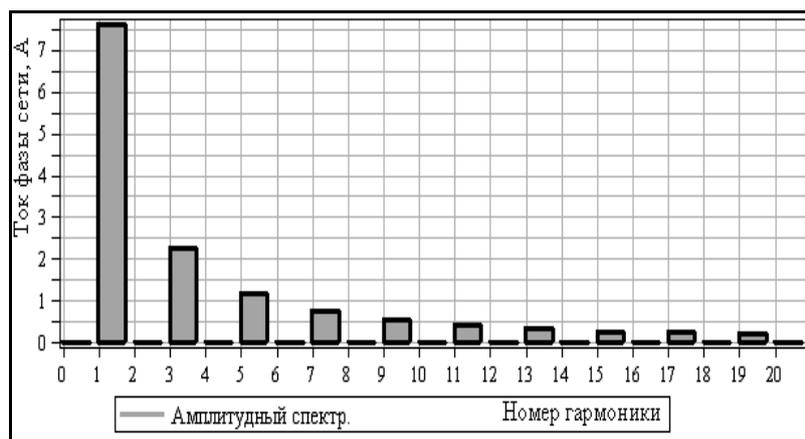


Рис. 13

$\cos \varphi = 0,817$.

Коэффициент мощности $K_m = 0,768$.

При проектировании СТ СЭП подвижных объектов следует учитывать нелинейность её элементов, в частности характеристики магнитопровода СТ.

Положения данной работы могут оказаться полезными для исследователей и разработчиков систем электропитания со специальными требованиями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Активные потери в трансформаторах электротехнологических установок / В.С. Богачев, П.А. Кошелев, В.М. Опре, С.В. Парамонов, В.Н. Терещенко // Проблемы электроэнергетики: сб. науч. тр. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2010. С. 52-61.

2. **Терещенко В.Н.** Проектирование и оптимизация элементов источника питания цепи катода клистрона для радиолокации и радионавигации / В.Н. Терещенко, П.А. Кошелев, С.В. Парамонов // Вопросы радиоэлектроники. Сер. РЛТ. Изд-во ОАО «ЦНИИ "Электроника"». 2013. Вып. 1. С. 56-72.

3. **Madelung E.** Über Magnetisierung durch schnell verlaufende Ströme / E. Madelung // Göttingen, 1905. Ann. d. Phys. 17, 861. 1905.

4. Моделирование процессов в сварочном источнике тока с высокочастотным звеном / П.А. Кошелев, В.В. Смирнов, С.А. Ермолин, Н.М. Яценко // Электротехника. 1985. № 3. С. 30-33.

5. **Грехов Л.В.** Методика расчета процессов в приводе управляющих клапанов топливной аппаратуры двигателей внутреннего сгорания с электронным управлением / Л.В. Грехов, Чжао Цзяньхуэй // Известия вузов. Машиностроение. 2012. № 6. С. 46-51.

б. Кадочников А.И. Область применимости формул Релея и преобразований Кондорского для описания петель гистерезиса электротехнических сталей / А.И. Ка-

дочников, Н.Е. Миронюк // Электротехника. 1982. № 9. С. 34-37.

7. ГОСТ 19693-74. Межгосударственный стандарт. Материалы магнитные. Термины и определения. Группа Э00.

Кошелев Петр Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры «Электротехнологическая и преобразовательная техника» Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ»

Peter A. Koshelev – Dr.Sc., Professor, Department of Electrotechnical and Conversional Equipment, Saint Petersburg Electrotechnical University LETI

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

Viktor M. Opre – Dr.Sc., Professor, Department of Electrotechnical and Conversional Equipment, Saint Petersburg Electrotechnical University LETI

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

Sergey V. Paramonov – Ph.D., Associate Professor, Department of Electrotechnical and Conversional Equipment, Saint Petersburg Electrotechnical University LETI

Терещенко Владимир Николаевич – Начальник отдела АО «Заслон», Санкт-Петербург

Vladimir N. Tereshchenko – Head of Department, JSC «ZASLON», St. Petersburg

Статья поступила в редакцию 24.08.15, принята к опубликованию 11.09.15

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

В разделе «Летопись» можно опубликовать воспоминания, рассказ, информацию об ученых, преподавателях, представителях промышленности, бизнеса, работающих в области электротехнологии.

ГИБРИДНАЯ СИСТЕМА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ОБЪЕДИНЕННЫМ ЗВЕНОМ ПОСТОЯННОГО ТОКА

**И.И. Артюхов, С.Ф. Степанов,
Е.Т. Ербаев, Г.Н. Тулепова, Н.С. Жексембиева**

HYBRID POWER SUPPLY SYSTEM WITH A COMBINED DC LINK

**I.I. Artyukhov, S.F. Stepanov,
E.T. Erbaev, G.N. Tulepova, N.S. Zhexembiyeva**

Для электроснабжения потребителей децентрализованных зон широкое применение получили дизельные генераторы. Для снижения расхода топлива эти генераторы дополняют установками, использующими энергию ветра и солнца. Предложена и проанализирована гибридная система электроснабжения, в которой суммирование потоков источников энергии различной физической природы осуществляется в объединенном звене постоянного тока.

Ключевые слова: *дизель-генератор, ветрогенератор, солнечная панель, преобразование энергии, гибридная электростанция*

Для электроснабжения потребителей децентрализованных зон широкое применение получили дизельные генераторы. Основным недостатком этих источников электроэнергии – высокий расход дизельного топлива, которое зачастую необходимо доставлять в удаленные районы.

Наличие в регионе таких энергоносителей, как ветер и солнце, делают целесообразным применение гибридных электростанций, в которых дизельные генераторы дополняются ветрогенераторами и преобразователями солнечной энергии в электрическую в виде солнечных панелей [1].

Возможны различные варианты построения гибридных электростанций, которые отличаются не только составом оборудования, но и организацией режимов ра-

Diesel generators have gained widespread acceptance in power supply for decentralized zones. To reduce fuel consumption, these generators are complemented with units utilizing wind or solar energy. We propose and analyze hybrid power supply systems in which summing up the various flows of energy resources is conducted in the united DC link.

Keywords: *diesel generator, wind generator, solar panel, energy conversion, hybrid power plant*

боты [2]. В условиях интенсивного развития силовой электроники целесообразной может быть схема гибридной электростанции, в которой суммирование потоков энергии отдельных источников различной физической природы осуществляется на шине постоянного тока [3]. Пример построения такой системы электроснабжения (СЭС) показан на рис. 1. Первичными источниками энергии в ней являются дизельный генератор ДГ, ветрогенератор ВГ и солнечные панели СП.

ДГ и ВГ вырабатывают электрическую энергию переменного тока, при этом частота и величина напряжения на выходе каждого из этих генераторов зависят от скорости вращения вала первичного двигателя. До недавнего времени ДГ строились по

принципу стабилизации скорости вращения вала с целью получения заданной частоты выходного напряжения. Однако проведенные исследования показали, что работа ДГ с фиксированной скоростью вращения вала на изменяющуюся в широком диапазоне нагрузку сопровождается непроизводительными затратами топлива. Поэтому в настоящее время развивается направление,

которое ориентировано на создание ДГ с изменяемой в зависимости от нагрузки скоростью вращения вала. Получение электроэнергии заданного качества обеспечивается за счет преобразователей частоты. Построенные по такому принципу ДГ имеют уменьшенный расход топлива и увеличенный межремонтный интервал.

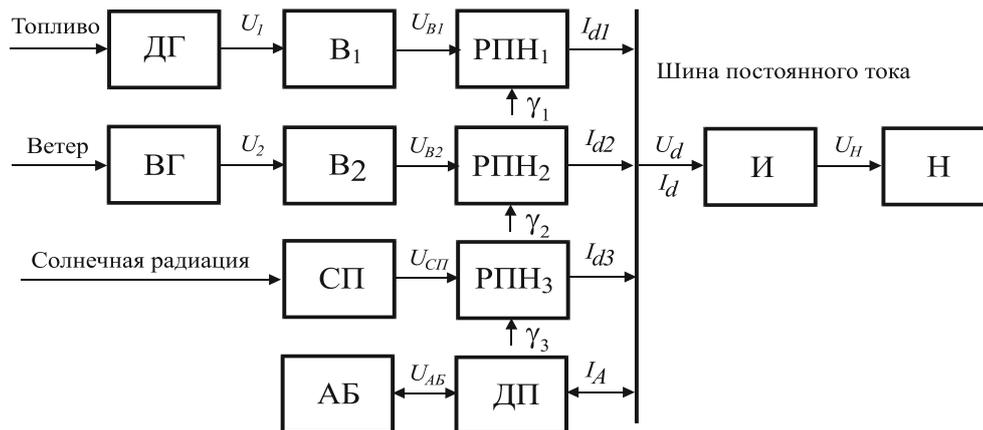


Рис. 1. Блок-схема гибридной системы электроснабжения с накопителем энергии и суммированием мощностей на шине постоянного тока (ДГ – дизельный генератор; ВГ – ветрогенератор; СП – солнечные панели; V_1, V_2 – выпрямители; РПН₁, РПН₂, РПН₃ – регуляторы постоянного напряжения; И – инвертор; Н – нагрузка; АБ – аккумуляторная батарея; ДП – двунаправленный преобразователь)

Скорость вращения ветроколеса является величиной случайной, она зависит от скорости ветра, а также от нагрузки ВГ. Таким образом, в рассматриваемой схеме (рис. 1) подразумевается, что ДГ и ВГ работают с изменяемой скоростью вращения вала, что требует решения задачи управления потоками энергии для обеспечения заданного качества электроэнергии в системе электроснабжения при изменении параметров нагрузки и климатических условий [4].

Для решения указанной задачи, прежде всего, осуществляется преобразование электрической энергии переменного тока на выходах ДГ и ВГ в электрическую энергию постоянного тока с помощью выпрямителей V_1 и V_2 . Подключение выпрямителей к шине постоянного тока производится через регуляторы постоянного напряжения РПН₁ и РПН₂.

СП вырабатывают электрическую энергию постоянного тока, при этом СП имеют нелинейные вольт-амперные характеристики, ход которых зависит от

уровня энергетической освещенности и температуры панелей [5]. Для согласования СП с шиной постоянного тока в схеме на рис. 1 служит регулятор постоянного напряжения РПН₃.

От шины постоянного тока получает питание инвертор И, который формирует на нагрузку переменное напряжение. При этом в нагрузку Н должна поступать электрическая энергия, показатели качества которой должны соответствовать ГОСТ 32144-2013 в заданном диапазоне изменения параметров нагрузки.

К шине постоянного тока через двунаправленный преобразователь ДП подключена также аккумуляторная батарея АБ, которая в зависимости от режима работы системы электроснабжения заряжается от напряжения на шине постоянного тока при совместной или отдельной работе ДГ, ВГ и СП или отдает энергию в нагрузку через ДП и инвертор И.

Уравнение баланса мощностей на шине постоянного тока (без учета потерь мощно-

сти в преобразовательных устройствах) имеет вид

$$P_{ДГ} + P_{ВГ} + P_{СП} \pm P_{АБ} = P_{Н}, \quad (1)$$

где $P_{ДГ}$, $P_{ВГ}$, $P_{СП}$ – мощности, генерируемые ДГ, ВГ и СП соответственно; $P_{АБ}$ – мощность, отдаваемая (забираемая) АБ; $P_{Н}$ – мощность, отдаваемая в нагрузку.

Нестабильный график нагрузки и стохастический характер режима работы возобновляемых источников энергии должны компенсироваться соответствующим режимом работы ДГ и АБ. Для обеспечения надежной работы СЭС должно выполняться условие

$$P_{ДГ} \pm P_{АБ} > P_{Н} - P_{ВГ} - P_{СП}. \quad (2)$$

При этом расход дизельного топлива будет минимальным, если АБ находится в заряженном состоянии, а ВГ и СП работают в режиме выдачи максимальной мощности.

Так как суммирование потоков энергии производится на общей шине постоянного тока с напряжением U_d , то мощности, отдаваемые ДГ, ВГ и СП, будут пропорциональны выходным токам РПН. Поэтому уравнение (1) можно переписать следующим образом:

$$I_{d1} + I_{d2} + I_{d3} \pm I_A = I_d, \quad (3)$$

где I_{d1} , I_{d2} , I_{d3} – выходные токи РПН на выходах ДГ, ВГ и СП; I_A – ток, отдаваемый (потребляемый) АБ; I_d – входной ток инвертора.

Напряжение U_H , подаваемое с выхода инвертора на нагрузку, зависит от ее параметров и напряжения на входе инвертора U_d . В современных преобразователях стабилизация напряжения U_H осуществляется за счет широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Поэтому для обеспечения заданного качества электроэнергии на нагрузке при изменении ее параметров в широком диапазоне целесообразно держать стабильным напряжение U_d на шине постоянного тока. Это позволит уменьшить диапазон ШИМ и тем самым снизить требования к выходному фильтру инвертора.

Таким образом, при построении гибридной системы электроснабжения по схеме рис. 1 возникают следующие задачи:

– стабилизация напряжения U_d на шине постоянного тока;

– оптимальное управление токами I_{d1} , I_{d2} , I_{d3} источников энергии, режимом заряда/разряда АБ.

Для решения задачи управления потоками энергии источников энергии воспользуемся моделью, расчетная схема которой показана на рис. 2. На основании этой схемы выражение для напряжения на шине постоянного тока будет иметь следующий вид:

$$U_d = \frac{F_1 E_1 R_1^{-1} + F_2 E_2 R_2^{-1} + F_3 E_3 R_3^{-1} + F_A E_A R_A^{-1}}{R_1^{-1} + R_2^{-1} + R_3^{-1} + R_A^{-1} + R_H^{-1}}, \quad (4)$$

где E_1 , E_2 , E_3 , R_1 , R_2 , R_3 – эквивалентные ЭДС и внутренние сопротивления регуляторов постоянного напряжения; E_A , R_A – ЭДС и внутреннее сопротивление аккумуляторной батареи; R_H – эквивалентное входное сопротивление инвертора; F_1 , F_2 , F_3 – логические функции, отражающие возможность протекания токов I_{d1} , I_{d2} , I_{d3} только в одном направлении. Функция $F_k = 1$, если РПН соответствующего источника отдает энергию в шину постоянного тока, и нулю – в противном случае.

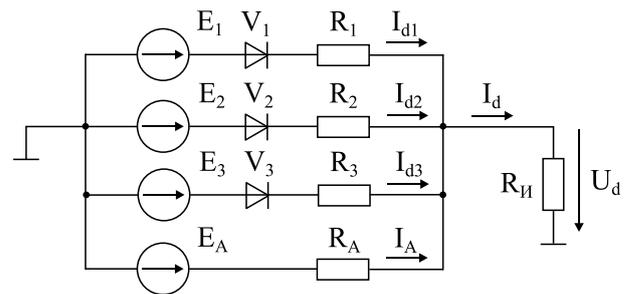


Рис. 2. Расчетная схема объединенного звена постоянного тока

Логическая функция F_A характеризует режим работы аккумуляторной батареи. Эта функция равна единице, если АБ подключена к шине постоянного тока. В противном случае $F_A = 0$.

В ситуации, когда питание нагрузки осуществляется исключительно от АБ (полный штиль, темное время суток, неис-

правен ДГ или отсутствует топливо), напряжение на шине постоянного тока будет определяться выражением

$$U_d = E_A \cdot \frac{R_{II}}{R_A + R_{II}}. \quad (5)$$

Выходные токи РПН можно рассчитать по формуле

$$I_{dk} = \frac{F_k(E_k - U_d)}{R_k}. \quad (6)$$

Для тока аккумуляторной батареи справедливо выражение

$$U_d = \frac{F_1 D(\gamma_1) U_{B1} R_1^{-1} + F_2 D(\gamma_2) U_{B2} R_2^{-1} + F_3 D(\gamma_3) U_{СП} R_3^{-1} + F_A E_A R_A^{-1}}{R_1^{-1} + R_2^{-1} + R_3^{-1} + R_A^{-1} + R_{II}^{-1}}. \quad (9)$$

Из формулы (9) следует, что при построении системы стабилизации напряжения на шине постоянного тока в качестве возмущающих воздействий надо рассматривать напряжения U_{B1} и U_{B2} на выходе ДГ и ВГ, $U_{СП}$ на выходе СП, а также эквивалентное входное сопротивление R_{II} инвертора, которое зависит от нагрузки последнего. Управляющими воздействиями в рас-

$$I_A = F_A \cdot \frac{E_A - (F_1 \vee F_2) \cdot U_d}{R_A + (F_1 \wedge F_2) \cdot R_{II}}. \quad (7)$$

Эквивалентные ЭДС регуляторов напряжения зависят от напряжений U_{Bk} на выходе выпрямителей B_k и сигналов γ_k на управляющих входах РПН

$$E_k = D(\gamma_k) U_{Bk}, \quad (8)$$

где $D(\gamma_k)$ – регулировочная характеристика k -го РПН, вид которой определяется его конкретной реализацией.

С учетом (8) выражение (1) примет вид

смаатриваемой системе являются сигналы γ_k на управляющих входах РПН $_k$ (рис. 1).

Модель, представленная формулами (4)–(9), позволяет исследовать статические режимы распределения потоков энергии в гибридной СЭС. Для исследования динамических процессов необходима имитационная модель, которая может быть реализована, в частности, в среде Matlab с пакетом расширения Simulink.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лукутин Б.В. Возобновляемая энергетика в децентрализованном электроснабжении / Б.В. Лукутин, О.А. Суржикова, Е.Б. Шандарова. М.: Энергоатомиздат, 2008. 231 с.

2. Обухов С.Г. Сравнительный анализ схем автономных электростанций, использующих установки возобновляемой энергии / С.Г. Обухов, И.А. Плотников // Промышленная энергетика. 2012. № 7. С. 46-51.

3. Артюхов И.И. Варианты построения схем автономных ветродизельных установок / И.И. Артюхов, Е.Т. Ербаев // Новые технологии и технические средства в АПК: материалы Междунар. конф., посвященной 105-летию со дня рождения профессора

Красникова В.В. (Саратов, 23–24 мая 2013 г.). Саратов: КУБиК, 2013. С. 9-11.

4. Степанов С.Ф. Обеспечение эффективной работы мультимодульной ветроэлектростанции при изменении скорости ветра и нагрузки / С.Ф. Степанов, И.М. Павленко, Е.Т. Ербаев // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6. URL: www.science-education.ru/113-11407.

5. Artyukhov I.I. Application of solar panels for power supplies of cathodic protection installations / I.I. Artyukhov, G.N. Tulepova // Наука и образование (научно-практический журнал Западно-Казахстанского аграрно-технического университета имени Жангир хана). 2012. № 2 (27). С. 64-67.

Артюхов Иван Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного техниче-

Ivan I. Artyukhov – Dr. Sc., Professor, Department of Power Supply for Industrial Facilities, Yuri Gagarin State Technical University

ского университета имени Гагарина Ю.А.

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

Ербаев Ербол Тулегенович – аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.; старший преподаватель кафедры «Энергетика» Западно-Казахстанского аграрно-технического университета им. Жангир хана

Тулупова Гульсим Нуржановна – аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А., старший преподаватель кафедры «Энергетика» Западно-Казахстанского аграрно-технического университета им. Жангир хана

Жексембиева Назым Сагиновна – кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой «Энергетика» Западно-Казахстанского аграрно-технического университета им. Жангир хана

of Saratov

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

Erbol T. Erbaev – Postgraduate, Department of Power Supply for Industrial Facilities, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov; Senior Lecturer, Department of Power Engineering at Zhangir-Khan Western Kazakhstan Agrarian-Technical University

Gulsim N. Tulepova – Postgraduate, Department of Power Supply for Industrial Facilities, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Senior Lecturer, Department of Power Engineering at Zhangir-Khan Western Kazakhstan Agrarian-Technical University

Nazym S. Zhexembiyeva – Ph.D., Associate Professor, Head: Department of Power Engineering at Zhangir-Khan Western Kazakhstan Agrarian-Technical University

Статья поступила в редакцию 07.08.15, принята к опубликованию 11.09.15



УДК 621.385.632

**МНОГОСЕКЦИОННАЯ ФАЗОСТАБИЛЬНАЯ
ЛАМПА БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ О-ТИПА****А.Г. Кудряшов, Б.К. Сивяков****O-TYPE MULTISECTION PHASE STABLE
TRAVELLING WAVE TUBES****A.G. Kudryashov, B.K. Sivyakov**

Приводятся результаты измерений характеристик экспериментальных ламп бегущей волны с секциями несинхронного взаимодействия, обладающих малой фазовой чувствительностью прибора к изменению напряжения пучка. Приводится сравнение результатов расчета и эксперимента, обсуждаются причины их расхождения.

Ключевые слова: фазостабильная ЛБВ, крестатронная секция, секция подавления, фазовая чувствительность

Лампа бегущей волны О-типа (ЛБВ-О) обладает уникальным сочетанием параметров среди всех электровакуумных приборов СВЧ: большие КПД и коэффициент усиления в сочетании с широкой полосой усиления, высоким качеством усиления и достаточно большой выходной мощностью. Однако она имеет достаточно существенный недостаток – большую чувствительность фазы выходного сигнала к изменению питающих напряжений и, прежде всего, к напряжению пучка, который обусловлен большой электрической длиной пространства взаимодействия, обусловленной распределенным волновым взаимодействием поля сигнала с электронным потоком.

В [1] впервые было предложено для уменьшения фазовой чувствительности ЛБВ использовать несинхронные режимы взаимодействия пучка с полем, когда изме-

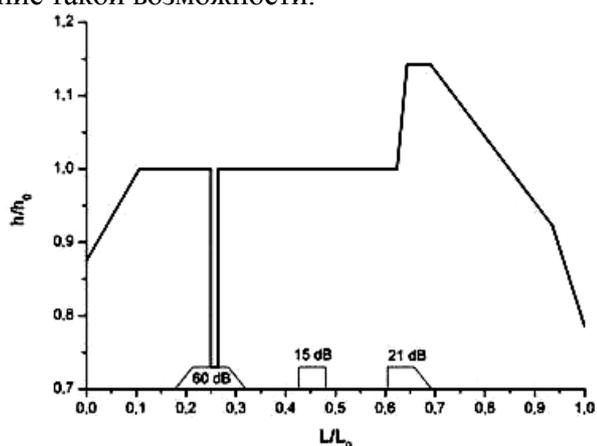
The paper presents the results referring experimental measurements of the traveling wave tubes with asynchronous interaction sections characterized for low phase sensitivity to voltage changes in the beam. The authors provide a comparison between the calculation and experimental data, including the reasons for their divergence.

Keywords: phase-stable TWT, crestatron section, suppression section, phase sensitivity

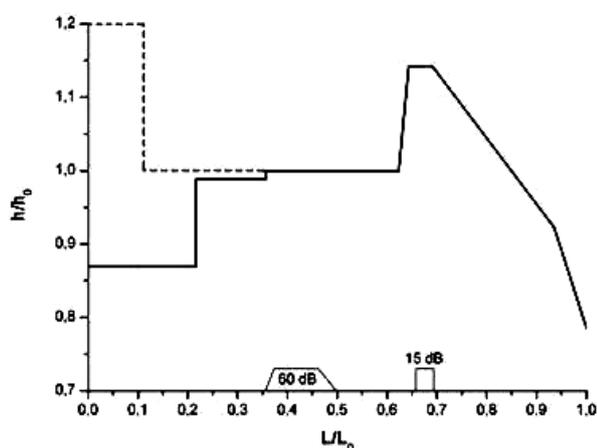
нение фазы имеет противоположный характер по отношению к усилительному режиму. Этого можно достичь в двухкаскадных цепочках на ЛБВ, специальных конструкциях с секцией несинхронного взаимодействия.

В последующем [2] было проведено теоретическое исследование с помощью программы численного моделирования, реализующей нелинейную волновую одномерную теорию ЛБВ Signal, разработанной в СГТУ и имеющей госрегистрацию, многосекционной ЛБВ, содержащей в начале секцию несинхронного взаимодействия в режиме подавления. Оно показало возможность достижения нулевой фазовой чувствительности в ограниченной области изменения напряжения пучка. По результатам этого исследования был получен патент на такую конструкцию прибора [3]. Однако до настоящего времени от-

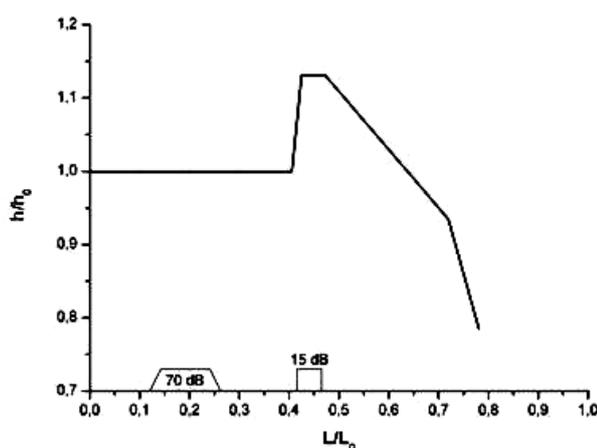
существовало экспериментальное подтверждение такой возможности.



а



б



в

Рис. 1. Схематическое изображение пространства взаимодействия базовой ЛБВ (а), фазостабильного прибора с крестатронной секцией (сплошные линии) и с секцией подавления (пунктир) (б), а также ЛБВ с укороченной входной секцией (в)

Недавно было проведено углубленное теоретическое исследование возможности реализации этой идеи, опирающееся на современные возможности вычислительной техники и программ моделирования ЛБВ, используемых в электронной промышленности [4]. Помимо несинхронного режима подавления, исследовался и несинхронный крестатронный режим [5].

Исследования показали, что в обоих режимах можно достичь близкой к нулевой фазовой чувствительности в ЛБВ. Были изготовлены и испытаны опытные образцы фазостабильных ЛБВ, которые подтвердили результаты математического моделирования.

В настоящей статье излагаются результаты экспериментального исследования характеристик опытных образцов прибора и их обсуждение.

Образцы создавались на базе серийно выпускаемого прибора. В целях уменьшения затрат на создание экспериментальной фазостабильной ЛБВ в ней относительно базового прибора (рис. 1 а) была изменена конструкция входной секции замедляющей системы (ЗС), в которую был введен участок несинхронного режима (рис. 1 б) без разрыва ЗС. Было также уменьшено количество поглотителей (исключен третий), их местоположение и величина затухания первого с 60 до 70 дБ. При этом общая длина замедляющей системы осталась такой же, как у серийного прибора. Для более корректного сопоставления параметров экспериментального прибора, у которого меньший коэффициент усиления из-за секции несинхронного подавления, с параметрами базового была рассчитана ЛБВ с сопоставимым коэффициентом усиления ~30 дБ и укороченной входной секцией, имеющей постоянный шаг спирали (рис. 1 в) [6].

Результаты расчетов свидетельствуют о том, что и секция подавления, и крестатронная секция позволяют получать примерно одинаковые фазовые характеристики с малой и даже нулевой чувствительностью к изменению напряжения пучка.

Для практического применения использование крестатронной секции выглядит более предпочтительным, поскольку степень изменения фазовой чувствительности при изменении ее длины (и, следовательно, ужесточения требований к точности изготовления) практически в 2 раза ниже, чем для секции подавления. Кроме того, коэффициент усиления такого прибора в режиме

насыщения на 0,5...1 дБ выше, а КПД практически одинаков.

Для экспериментальной проверки был спроектирован вариант прибора с крестатронным участком с безразмерной длиной $\Theta = 2,94$ (рис. 1 б). Выбор шага спирали проводился из условия оптимального для стабилизации фазы напряжения пучка, равного 12,6 кВ. Результаты расчетов и измерений представлены на рис. 2, 3.

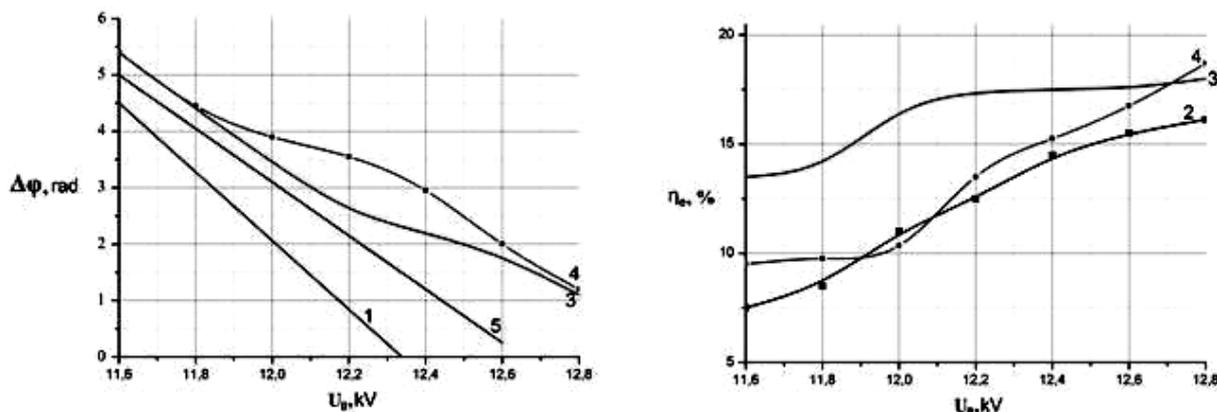


Рис. 2. Зависимости фазы $\Delta\varphi$ и КПД η_c от напряжения пучка базового прибора (1 – расчет, 2 – эксперимент), экспериментального образца (3 – расчет, 4 – эксперимент) и прибора с укороченной входной секцией (расчет – 5)

Полученные результаты свидетельствуют, что в определенном интервале изменения напряжения пучка (~ 200 В) наблюдается значительное уменьшение фазовой чувствительности (в 5 раз по сравнению с базовым прибором и в 4 раза по сравнению с ЛБВ с меньшей длиной и коэффициентом усиления ~ 30 дБ). В экспериментальном приборе интервал стабилизации фазы по напряжению пучка смещен относительно расчетных значений в область более низких напряжений (примерно на 200 В) (рис. 2), что, по-видимому, объясняется погрешностями при расчете дисперсионных характеристик ЗС. При напряжениях за пределами зоны стабилизации фазовая чувствительность экспериментального прибора соответствует не базовой ЛБВ, а расчетной – с коэффициентом усиления 30 дБ (рис. 2).

В поведении расчетного и измеренного КПД наблюдается некоторое отличие (расчетная кривая смещена в область меньших напряжений пучка), но в оптимизируемой точке ($U = 12,6$ кВ) разница в полученных значениях КПД составляет менее 1%. Аналогичные расхождения наблюдаются и в

частотных характеристиках КПД (рис. 3). По сравнению с базовым прибором фазостабильная ЛБВ имеет более высокий КПД, что, очевидно, является следствием уменьшения коэффициента усиления. Это подтвердили и расчеты ЛБВ с $K_y \approx 30$ дБ.

Измерение частотных характеристик фазовой чувствительности ЛБВ также выявило небольшое смещение оптимального напряжения пучка относительно расчетного. Приведенные на рис. 3 зависимости показывают, что измеренные при напряжении $U_0 = 12,2$ кВ характеристики хорошо соответствуют расчетным при напряжении пучка $U_0 = 12,4$ кВ.

Исследования фазостабильной ЛБВ с участком подавления в секции компенсации были такими же, как и для прибора с участком крестатронного режима. Однако большая длина усилительного участка в секции компенсации, необходимая для восстановления амплитуды поля после участка подавления, может быть критична к режиму самовозбуждения на первой обратной гармонике. Этот вывод не является общим, он справедлив только для данного конкретного случая в связи с тем, что объектом исследования яв-

ляется относительно высоковольтная спиральная ЛБВ. В итоге тщательной юстировкой электронного пучка стабильный режим для всех рабочих напряжений и необходимых для выполнения исследований значений тока пучка был достигнут, при этом минимальная фазовая чувствительность составила 2,6 град./%, что удовлетворительно согласуется с расчетными данными.

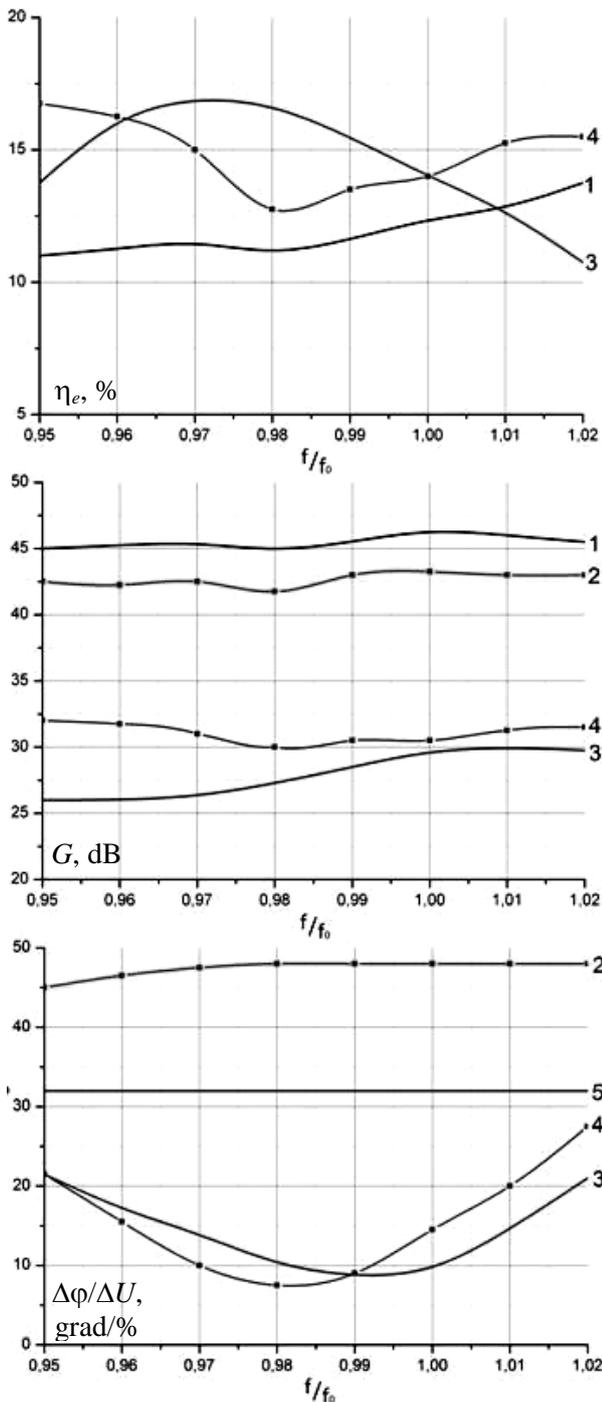


Рис. 3. Зависимости КПД η_e , коэффициента усиления G и фазовой чувствительности $\Delta\phi/\Delta U$ от частоты f/f_0 для базового прибора (1 – расчет,

2 – эксперимент), для экспериментального образца (3 – расчет, 4 – эксперимент) и для укороченного (за счет уменьшения длины входной секции) прибора (5 – расчет)

На рис. 4 приведены расчетные и измеренные зависимости фазы, коэффициента усиления и КПД от напряжения пучка для центральной частоты рабочего диапазона частот. Входной сигнал при этом соответствовал насыщению выходной мощности при напряжении 12,6 кВ (центр измеренного интервала стабилизации фазы). Видно, что, как и для ЛБВ с крестатронным участком, в приборе с участком подавления сигнала измеренное напряжение стабилизации фазы смещено относительно расчетного примерно на 200 В в сторону меньших напряжений, а измеренные и расчётные характеристики хорошо согласуются между собой.

При этом для центра интервала напряжения пучка, соответствующего стабилизации фазы (12,7 кВ), измеренные значения коэффициента усиления оказались несколько выше, а полученный в режиме насыщения КПД – ниже расчётных.

Из сопоставления полученных результатов с результатами для ЛБВ с крестатронным участком следует, что прибор с участком подавления характеризуется более широким (почти в 1,5 раза) интервалом изменения напряжения стабилизации и меньшим коэффициентом усиления (примерно на 5 дБ) относительно ЛБВ с крестатронным участком.

Вместе с тем меньшие (по сравнению с ЛБВ с крестатронным участком в секции компенсации) достигнутые значения коэффициента усиления и КПД стимулируют поиск методов и средств совершенствования характеристик, прежде всего, компенсирующей секции. Из очевидных рекомендаций, в большей степени относящихся к прибору в целом, можно отметить возможности увеличения параметра усиления, что на практике эквивалентно, в частности повышению первеанса пучка. Это приводит к уменьшению длины и, соответственно, фазовой чувствительности усилительных секций ЛБВ, которую можно скомпенсировать участком подавления сигнала меньшей

длины, что, как уже отмечалось, позволит улучшить все основные параметры фазо-

стабильного прибора.

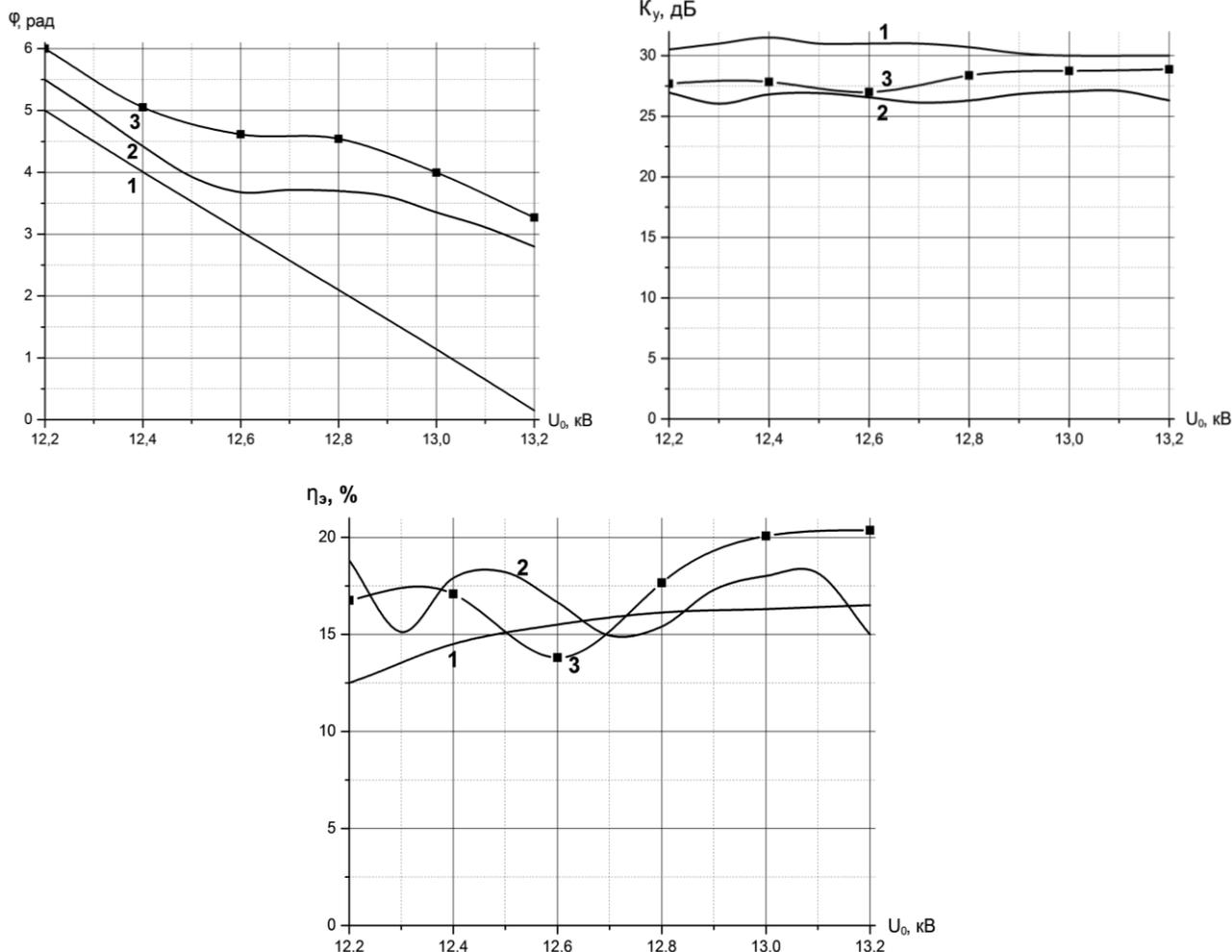


Рис. 4. Зависимости фазы φ , коэффициента усиления K_y и КПД η_e от напряжения U_0 в базовом приборе с коэффициентом усиления 30 дБ (1) и в фазостабильной ЛБВ с секцией подавления (расчет – 2, эксперимент – 3)

Таким образом, результаты экспериментальных исследований двух разработанных типов фазостабильной ЛБВ подтвердили практическую возможность реализации приборов с высоким (25...30 дБ) коэффициентом усиления и уменьшенной (вплоть до нулевых значений) чувствительностью

фазы выходного сигнала к изменению напряжения электронного пучка. Для достижения этой цели во входной секции ЛБВ можно устанавливать как участки подавления сигнала, так и участки крестатронного режима работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кац А.М.** Фазовые характеристики ЛБВ в несинхронных режимах / А.М. Кац, В.П. Кудряшов, П.И. Суслин // Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ. 1971. № 5. С. 83-91.

2. **Сивяков Б.К.** Снижение фазовой чувствительности ЛБВ к изменению пи-

тающих напряжений / Б.К. Сивяков, И.Б. Яковлева // Актуальные проблемы электронного приборостроения: тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. Новосибирск, 17-19 апр. 1990 г. Новосибирск, 1990. С. 60.

3. Патент № 2046442 РФ, МПК⁶ H01J 25/34. Лампа бегущей волны / В.П. Кудряшов, Б.К. Сивяков, И.Б. Яковлева. Заявл. 21.05.1992; опубл. 20.10.1995. Бюл. № 29.

4. **Кудряшов А.Г.** Фазостабильная ЛБВ / Б.К. Сивяков, А.Г. Кудряшов // Актуальные проблемы электронного приборостроения: материалы 11-й Междунар. науч.-техн. конф. – АПЭП-2014. Саратов, 2014. Ч. 1. С. 21-24.

5. **Кудряшов А.Г.** Применение секции крестатронного режима для создания фа-

зостабильной ЛБВ / А.Г. Кудряшов, Б.К. Сивяков // Техническая электродинамика и электроника: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2013. С. 33-36.

6. **Дёмин В.В.** Уменьшение фазовой чувствительности лампы с бегущей волной. / В.В. Дёмин, Е.М. Ильина, А.Г. Кудряшов, Б.К. Сивяков [Электронный ресурс] // Журнал радиоэлектроники. 2014. № 12. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/iso/contents.html>.

Кудряшов Александр Геннадьевич – аспирант кафедры «Электротехника и электроника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Сивяков Борис Константинович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электротехника и электроника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Alexander G. Kudryashov – Postgraduate, Department of Electrical Engineering and Electronics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Boris K. Sivyakov – Dr.Sc., Professor, Head: Department of Electrical Engineering and Electronics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 04.08.15, принята к опубликованию 11.09.15



ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

УДК 621.3.06

ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ПРОГРЕССИЯ ПАДАЮЩИХ И ОТРАЖЕННЫХ ВОЛН В ТЕОРИИ ДЛИННОЙ ЛИНИИ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Э.И. Султанов

GEOMETRIC SERIES OF INCIDENT AND REFLECTED WAVES IN THE THEORY OF LONG LINES WITH DISTRIBUTED PARAMETERS

E.I. Sultanov

В отличие от традиционной методики учебных курсов получены функции распределения напряжения и тока в отрезке двухпроводной линии с подключенными генератором и нагрузкой в форме, представляющей сумму геометрического ряда падающих и отраженных волн. Множитель прогрессии является коэффициентом преобразования падающей волны при ее прохождении от генератора к нагрузке, отражении от нагрузки, обратном прохождении от нагрузки к генератору и еще одном отражении от генератора.

Ключевые слова: теория электрических цепей, цепи с распределенными параметрами, отрезок двухпроводной линии, падающие и отраженные волны, множитель геометрической прогрессии

В учебных курсах «Теоретические основы электротехники» (ТОЭ), «Основы теории цепей» (ОТЦ), «Теория электрических цепей» (ТЭЦ) имеется раздел «Цепи с распределенными параметрами». Основной объем раздела занимает исследование отрезка однородной двухпроводной линии с подключенными генератором и нагрузкой (см. рисунок).

Для малого участка линии составляются конечно-разностные уравнения по законам

In contrast to traditional methods used in courses of lectures, we received the voltage and current distribution functions for the section of two-wire lines with a connected generator and output load. These functions present a sum of geometric series for the incident and reflected waves. The scale factor of the geometric series is the transformation coefficient of incident waves by passage from the generator to the load, and reflection from the load, inverse passage to the generator and one more reflection from the impedance of the generator.

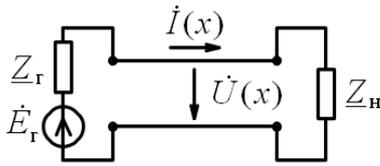
Keywords: theory of electric circuits, circuits with distributed parameters, section of two-wire lines, incident and reflected waves, scale factor of geometric series

Кирхгофа (баланс токов и баланс напряжений). Из них получают пространственные дифференциальные уравнения первого порядка

$$\frac{d\dot{U}(x)}{dx} = -\underline{Z}_0 \dot{i}(x), \quad (1)$$

$$\frac{d\dot{i}(x)}{dx} = -\underline{Y}_0 \dot{U}(x), \quad (2)$$

где $\underline{Z}_0 = R_0 + j\omega L_0$ – удельное продольное комплексное сопротивление,



Двухпроводная линия

$\underline{Y}_0 = G_0 + j\omega C_0$ – удельная поперечная комплексная проводимость.

Путем дифференцирования по координате x уравнения преобразуются к волновому уравнению, имеющему одинаковый вид как для тока, так и для напряжения:

$$\frac{d^2 \dot{U}(x)}{dx^2} = \underline{\gamma}^2 \dot{U}(x), \quad (3)$$

$$\frac{d^2 \dot{i}(x)}{dx^2} = \underline{\gamma}^2 \dot{i}(x). \quad (4)$$

Здесь вводится величина $\underline{\gamma}$, которая называется постоянной распространения:

$$\underline{\gamma} = \sqrt{\underline{Z}_0 \underline{Y}_0} = \alpha + j\beta.$$

Волновое уравнение линии имеет два фундаментальных решения в форме экспоненты с постоянной распространения в показателе степени: $e^{-\underline{\gamma}x}$ – падающая (прямая) волна, $e^{\underline{\gamma}x}$ – отраженная (обратная) волна.

Общий вид решения волновых уравнений записывается в виде суммы волн для напряжения и в виде разности волн для тока

$$\dot{U}(x) = \dot{U}_{\text{пад}}(x) + \dot{U}_{\text{отр}}(x), \quad (5)$$

$$\dot{i}(x) = \dot{i}_{\text{пад}}(x) - \dot{i}_{\text{отр}}(x), \quad (6)$$

где $\dot{U}_{\text{пад}}(x) = \dot{A}_1 e^{-\underline{\gamma}x}$, $\dot{U}_{\text{отр}}(x) = \dot{A}_2 e^{\underline{\gamma}x}$.

Величины \dot{A}_1 и \dot{A}_2 являются константами интегрирования, значения которых еще предстоит установить. Пространственные уравнения первого порядка позволяют выразить константы интегрирования функции тока через константы интегрирования функции напряжения:

$$\dot{i}_{\text{пад}}(x) = \frac{\dot{U}_{\text{пад}}(x)}{\underline{Z}_0} = \frac{\dot{A}_1}{\underline{Z}_0} e^{-\underline{\gamma}x}, \quad (7)$$

$$\dot{i}_{\text{отр}}(x) = \frac{\dot{U}_{\text{отр}}(x)}{\underline{Z}_0} = \frac{\dot{A}_2}{\underline{Z}_0} e^{\underline{\gamma}x}. \quad (8)$$

Здесь вводится еще один параметр линии – волновое сопротивление:

$$\underline{Z}_0 = \sqrt{\frac{\underline{Z}_0}{\underline{Y}_0}} = R_B + jX_B.$$

Во всех учебниках по ТОЭ, ОТЦ и ТЭЦ [1-10] решение не доводится до логического завершения: Г.И. Атабеков в [1] на с. 287 выражает константы интегрирования через напряжение и ток на входе линии и через напряжение и ток на выходе линии, тогда как функции распределения напряжения и тока должны содержать только параметры линии, входного генератора и выходной нагрузки. Получается, что входные и выходные напряжение и ток выполняют роль новых констант интегрирования.

В учебнике В.П. Попова [2] на с. 448 повторяется подход Г.И. Атабекова. В учебниках В.П. Бакалова и др. [3] на с. 332 и в учебнике Д.А. Улаховича [4] на с. 365 константы интегрирования выражены через значения напряжения и тока в начале линии. В книге А.Ф. Белецкого [5] на с. 363 в этой роли используются напряжение и ток в конце линии. В книге А.К. Лосева [6] на с. 314 записывается только общий вид решения и говорится, что константы интегрирования могут быть найдены из граничных условий.

В учебнике Л.А. Бессонова [7] на с. 359 используются напряжение и ток в конце линии. В книге Л.Р. Неймана, К.С. Демирчяна [7] на с. 475 использованы напряжение и ток в начале линии. Учебник [9] на с. 521 придерживается традиционной методики по Атабекову Г.И.

Задачник [10] на с. 291 и справочник [11] на с. 204 используют ту же методику. Даже в монографии С.И. Баскакова, посвященной цепям с распределенными параметрами [12], на с. 36 не дается законченной формы решения.

Получим функции распределения напряжения и тока в длинной линии с учетом параметров генератора и нагрузки.

Для нахождения констант интегрирования \dot{A}_1 и \dot{A}_2 используем граничные условия на входе (при $x = 0$) и на выходе (при $x = l$):

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_2 - \underline{Z}_2 \dot{I}_1, \quad (9)$$

$$\dot{U}_2 = \underline{Z}_n \dot{I}_2. \quad (10)$$

Поставляем сюда \dot{U}_1 , \dot{I}_1 , \dot{U}_2 , \dot{I}_2 из общего вида решения, получаем алгебраические уравнения для нахождения констант интегрирования:

$$\dot{A}_1 + \dot{A}_2 = \dot{E}_2 - \underline{Z}_2 \frac{\dot{A}_1 - \dot{A}_2}{\underline{Z}_g}, \quad (11)$$

$$\dot{A}_1 e^{-\gamma l} + \dot{A}_2 e^{\gamma l} = \underline{Z}_n \frac{\dot{A}_1 e^{-\gamma l} - \dot{A}_2 e^{\gamma l}}{\underline{Z}_g}. \quad (12)$$

В итоге $\dot{U}(x)$ – функция распределения напряжения вдоль линии и $\dot{I}(x)$ – функция распределения тока вдоль линии могут быть представлена следующими формулами:

$$\dot{U}(x) = \dot{U}_0 \frac{e^{-\gamma x} + \underline{p}_n e^{-2\gamma l} e^{\gamma x}}{1 - \underline{p}_2 \underline{p}_n e^{-2\gamma l}}, \quad (13)$$

$$\dot{I}(x) = \frac{\dot{U}_0}{\underline{Z}_g} \frac{e^{-\gamma x} - \underline{p}_n e^{-2\gamma l} e^{\gamma x}}{1 - \underline{p}_2 \underline{p}_n e^{-2\gamma l}}. \quad (14)$$

Здесь введены обозначения:

$$\dot{U}_0 = \dot{E}_2 \frac{\underline{Z}_g}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_g} - \text{напряжение первичной падающей волны,}$$

$\underline{p}_r = \frac{\underline{Z}_r - \underline{Z}_B}{\underline{Z}_r + \underline{Z}_B}$ – коэффициент отражения генератора,

$\underline{p}_n = \frac{\underline{Z}_n - \underline{Z}_B}{\underline{Z}_n + \underline{Z}_B}$ – коэффициент отражения от нагрузки.

Физический смысл формул (13) и (14) становится понятным, если учесть, что величина

$$q = \underline{p}_r \underline{p}_n e^{-2\gamma l} \quad (15)$$

является множителем геометрической прогрессии

$$1 + q + q^2 + q^3 + \dots = \frac{1}{1 - q}, \quad (16)$$

то есть формулы (13) и (14) представляют собой сумму ряда падающих и отраженных волн, а величина q является коэффициентом преобразования падающей волны при ее прохождении от генератора к нагрузке, отражении от нагрузки (превращение в отраженную волну) и дальнейшем прохождении от нагрузки к генератору и еще одном отражении уже от сопротивления генератора (превращение во вторичную падающую волну).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Атабеков Г.И.** Линейные электрические цепи / Г.И. Атабеков. М.: Энергия, 1978. 591 с.
2. **Попов В.П.** Основы теории цепей / В.П. Попов. М.: Высш. шк., 1985. 496 с.
3. **Бакалов В.П.** Основы теории цепей / В.П. Бакалов, В.Ф. Дмитриков, Б.Е. Крук. М.: Радио и связь, 2000. 503 с.
4. **Улахович Д.А.** Основы теории линейных электрических цепей / Д.А. Улахович. СПб.: БХВ-Петербург, 2009. 816 с.
5. **Белецкий А.Ф.** Теория линейных электрических цепей / А.Ф. Белецкий. М.: Радио и связь, 1986. 544 с.
6. **Лосев А.К.** Теория линейных электрических цепей / А.К. Лосев. М.: Высш. шк., 1987. 512 с.

7. **Бессонов Л.А.** Теоретические основы электротехники / Л.А. Бессонов. М.: Высш. шк., 1996. 638 с.
8. **Нейман Л.Р.** Теоретические основы электротехники / Л.Р. Нейман, К.С. Демирчян. Л.: Энергия, 1967. 523 с.
9. Основы теории цепей / Г.В. Зевеке и др. М.: Энергия, 1975. 752 с.
10. **Шебес М.Р.** Задачник по теории линейных электрических цепей / М.Р. Шебес, М.В. Каблукова. М.: Высш. шк., 1990. 544 с.
11. **Куликовский А.А.** Справочник по радиоэлектронике. Т. 1 / А.А. Куликовский. М.: Энергия, 1967. 640 с.
12. **Баскаков С.И.** Радиотехнические цепи с распределенными параметрами / С.И. Баскаков. М.: Высш. шк., 1980. 152 с.

Султанов Эдварт Идиятович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиоэлектроника и информационная измерительная техника» Казанского национально-исследовательского технического университета им А.Н. Туполева (КАИ)

Edwart I. Sultanov – Ph. D., Associate Professor, Department of Radioelectronics and Information Measurement Technology, A.N. Tupolev National Research Technical University of Kazan

Статья поступила в редакцию 25.08.15, принята к опубликованию 11.09.15



СОЦИАЛЬНЫЙ АСПЕКТ

УДК 621.365.5

ВОСТРЕБОВАНЫ ЛИ БЫТОВЫЕ СВЧ ПЕЧИ?

Е.М. Гришина

ARE DOMESTIC MICROWAVE OVENS IN DEMAND?

E.M. Grishina

Приведены результаты опроса жителей г. Саратова о востребованности бытовых СВЧ печей.

Ключевые слова: *опрос, бытовые СВЧ печи*

С началом работы в области, как тогда говорили, СВЧ нагрева к применению энергии СВЧ электромагнитных колебаний в технологических процессах проявляли интерес технологи пищевых производств [1-3]: все способы интенсификации процесса термообработки пищевых продуктов были изучены и использовались, а СВЧ нагрев открывал здесь новые перспективы [4, 5]. Неудивительно, что среди СВЧ электротермических установок массовое распространение получили бытовые СВЧ печи.

С создания в г. Саратове первых в нашей стране СВЧ печей «Волжанка», «Славянка», позднее «Электроника С» прошли десятилетия, и интересно узнать, насколько востребованы сейчас бытовые СВЧ печи.

С целью найти ответ на этот вопрос был проведен опрос жителей г. Саратова (генеральная совокупность). Численность респондентов (выборочная совокупность) – 100 человек. Опробование выбранного инструмента (вопросов) проводилось на выборке малых размеров, когда в качестве респондентов были опрошены преподаватели и студенты СГТУ имени Гагарина Ю.А. Наконец, опрос выборочной совокупности респондентов проводился по телефону: набирались случайные номера из телефонного справочника г. Саратова.

The paper deals with the results of a survey conducted among Saratov residents to identify the demand for domestic microwave ovens.

Keywords: *survey, household microwave ovens*

При составлении вопросов было учтено, что после перехода нашей страны к рыночной экономике на прилавках наших магазинов, торгующих бытовой техникой, появилось много бытовых СВЧ печей, изготовленных за рубежом. В описаниях и инструкциях по эксплуатации этих печей они обычно назывались микроволновыми, и у населения термины «микроволновая печь», «микроволновка» весьма распространились.

Респондентам было предложено ответить на следующие вопросы:

1. Какой у Вас социальный статус (домохозяин, студент, работник, пенсионер)?
2. Хотели бы Вы иметь микроволновую печь?
3. Используете ли Вы микроволновую печь?
4. Если «да», легко ли было бы Вам отказаться от использования микроволновой печи?
5. Считаете ли Вы вредным для здоровья использование микроволновой энергии?
6. Считаете ли Вы микроволновые печи неоправданно дорогими?
7. Устраивает ли Вас пища, разогретая в микроволновой печи в кафе?
8. Устраивает ли Вас пища, разогретая в микроволновой печи в ресторане?

СОЦИАЛЬНЫЙ АСПЕКТ

9. Сколько дней в неделю Вы пользуетесь микроволновой печью?

10. Почему Вы используете микроволновую печь? Что нравится?

11. Появилось ли у Вас больше свободного времени при использовании микроволновой печи?

12. Что Вам в микроволновой печи не нравится? Что хотелось бы изменить?

13. Сколько Вам лет?

Результаты опроса приведены в таблице.

Результаты опроса

Вопрос	Ответы, %							
	Домохозяин (12)		Студент(30)		Работник(52)		Пенсионер(6)	
1	Да (83)	Нет (17)	Да (97)	Нет (3)	Да (96)	Нет (4)	Да (67)	Нет (33)
2	Да (52)	Нет (4)	Да (57)	Нет (43)	Да (85)	Нет (15)	Да (17)	Нет (83)
3	Да (50)	Нет (50)	Да (23)	Нет (77)	Да (8)	Нет (12)	Да (67)	Нет (33)
4	Да (25)	Нет (75)	Да (7)	Нет (93)	Да (8)	Нет (92)	Да (67)	Нет (33)
5	Да (17)	Нет (83)	Да (20)	Нет (80)	Да (4)	Нет (96)	Да (65)	Нет (35)
6	Да(87)				Нет(13)			
7	Да(5)				Нет(95)			
8	7 дней (19)		6 дней (30)		5 дней (34)		Меньше 5 дней (17)	
9	Скорость приготовления		Без лишнего масла		Положил и забыл			
10	Да (70)	Нет (30)	Да (87)	Нет (13)	Да (97)	Нет (3)	Да (5)	Нет (95)
11	Цена		Большой объем		Излучение		Скорость	
12	15-20 (17)	21-25 (19)	26-35 (23)	36-45 (18)	46-50 (10)	51-55 (8)	56 и более (5)	

Опрос показал, что 93% респондентов хотели бы иметь СВЧ печь. Наибольший интерес к этой бытовой технике у студентов (97%) и работников (96%), стремящихся сэкономить время на приготовлении пищи. 69% респондентов хотели бы иметь СВЧ печь и в первую очередь – работники (88%). 79% респондентов не хотят отказываться от СВЧ печи. Все это подтверждает гипотезу о том, что СВЧ электротехнология прочно вошла в жизнь социума.

Любопытно, что в разговорах на бытовом уровне иногда можно услышать сомнения, не опасно ли применять при приготовлении пищи СВЧ энергию. Опрос показал, что 87% респондентов считают безопасным использование в быту СВЧ печи, и это справедливо, потому что еще в 60-70-е годы XX века в нашей стране были проведены масштабные проверки безопасности использования СВЧ энергии в приготовлении

пищи. Наконец, 86% респондентов считают цены СВЧ печей приемлемыми, при этом отношение к применению СВЧ энергии в быту у пенсионеров более сдержанное.

Что касается пожеланий в отношении бытовых СВЧ печей, опрос выявил очевидное: следует стремиться к удешевлению этой бытовой техники, исключить СВЧ излучение из СВЧ печи, увеличить скорость термообработки и уменьшить объем. Отметим, что два последних пожелания выполнить непросто. Так, для увеличения скорости термообработки потребуется увеличить мощность СВЧ генератора, а это приведет к удорожанию СВЧ печи, вырастут платы за электроэнергию. Уменьшить эти платежи можно было бы, увеличив КПД магнетрона, но это потребует существенных затрат на совершенствование серийных магнетронов технологического назначения и, разумеется, приведет к удорожанию СВЧ печи.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Архангельский Ю.С.** История СВЧ электротехнологии / Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. 2014. № 3 (4). С. 100-114.

2. **Архангельский Ю.С.** История СВЧ электротехнологии / Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. 2014. № 4 (5). С. 99-110.

3. **Архангельский Ю.С.** История СВЧ электротехнологии / Ю.С. Архангельский //

Вопросы электротехнологии. 2015. № 1 (6). С. 144-154.

4. **Рогов И.А.** Электрофизические методы обработки пищевых продуктов / И.А. Рогов. М.: Агропромиздат, 1988. 325 с.

5. **Рогов И.А.** Техника сверхвысокочастотного нагрева пищевых продуктов / И.А. Рогов, С.В. Некрутман, Г.В. Лысов. М.: Легкая промышленность, 1981. 199 с.

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

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

Статья поступила в редакцию 25.08.15, принята к опубликованию 11.09.15



ЛЕТОПИСЬ

РАЗВИТИЕ ИНЖЕНЕРНОГО ОБРАЗОВАНИЯ (ОБЩЕСТВЕННЫЕ СЛУШАНИЯ)



Галина Викторовна Лобачева, проректор по учебной работе Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А., заведующая кафедрой «История Отечества и культуры», доктор исторических наук, профессор, Заслуженный работник высшей школы Российской Федерации, Почетный работник высшей школы Российской Федерации.

«ВЭ» Галина Викторовна, в марте 2014 г. при Саратовском государственном техническом университете имени Гагарина Ю.А. создан Совет по инженерному образованию. Какие задачи стоят перед Советом? Кто вошел в его состав? Что удалось уже сделать?

Г.В.Л. Одна из основных задач Совета – разработка концепции инженерного образования в регионе, включая преподавание, профориентацию, разработку инженерных решений и трансфера технологий. В состав Совета вошли руководители, ученые, преподаватели нашего университета, других образовательных учреждений, представители научно-исследовательских учреждений, специалисты промышленных предприятий, технопарков и других организаций, заинтересованных в развитии промышленности Саратовского региона. Совет по инженерному образованию является общественной структурой, при этом он открыт для новых членов. Работать в Совете выразили желание ОАО НПП «Алмаз», ООО «Газпром трансгаз Саратов», Балаковская АЭС, ООО ЭПО «Сигнал», ООО «Сароргсинтез», ГБУ СО «Управление пассажирскими перевозками», ОАО «Автокомбинат № 2», ОАО НИТИ «Тесар», Министерство образования Саратовской области, министерство занято-

сти, труда и миграции Саратовской области, и многие другие.

Возглавляет работу Совета ректор СГТУ имени Гагарина Ю.А. д.и.н., профессор И.Р. Плева, координировать работу Совета со стороны вуза поручено мне.

Сразу началось формирование рабочих групп по совершенствованию образовательных программ. В июле 2014 г. Совет по инженерному образованию утвердил 13 рабочих групп по направлениям «Машиностроение», «Информационная безопасность», «Электроника, радиотехника и системы связи», «Фотоника, приборостроение, оптические и биотехнические системы и технологии», «Технологии материалов», «Управление в технических системах», «Математические и естественные науки», «Топливо-энергетический комплекс», «Эксплуатация автотранспорта, сервис автомобилей и строительно-дорожных машин, организация перевозок», «Строительство», «Экономика», «Информационные технологии», рабочая группа по Энгельскому технологическому институту (филиалу СГТУ). В их состав для обсуждения вопросов, связанных с повышением качества инженерного образования в Саратовской области и корректировкой рабочих образовательных программ в соответствии с тре-

бованиями производства, кроме преподавателей СГТУ, вошли представители промышленности региона.

«ВЭ» 28 мая 2015 г. в СГТУ имени Гагарина Ю.А. состоялись общественные слушания по вопросу «Развитие инженерного образования: федеральный и региональный аспекты». Поделитесь, пожалуйста, Вашими впечатлениями.

Г.В.Л. Общественные слушания прошли под председательством руководителя Общественной палаты Саратовской области А.С. Ландо. В работе участвовали министр образования Саратовской области М.А. Епифанова, члены Комиссии по развитию образования, науки, инноваций Общественной палаты Саратовской области, члены Совета по инженерному образованию при СГТУ, представители научного и производственного сообщества губернии.

Председатель Общественной палаты А.С. Ландо, сославшись на последние события в отечественной космонавтике, отметил, что снова и снова надо обращаться к поиску решений проблем инженерного образования.

Первый проректор СГТУ А.А. Сытник призвал открыто обсудить меры повышения качества инженерного образования и предложить пусть непопулярные, но действенные меры по совершенствованию подготовки кадров с высшим образованием для промышленности страны.

Ректор СГТУ И.Р. Плеве отметил слабую подготовку учителей физики, высказал замечания к системе ЕГЭ.

Министр образования Саратовской области М.А. Епифанова отметила отсутствие надлежащей материально-технической базы в физических кабинетах школ.

Представители предприятий говорили о текучести кадров. Выпускники вузов из-за невысокой зарплаты, которую им предлагают на предприятиях, ищут более высокооплачиваемую работу. В связи с этим было предложено в вузах выплачивать стипендию работодателя, которую студент должен будет потом отработать на определенном месте.

В своем выступлении я отметила, что экономика страны ставит вузам все новые

цели, появляются новые трудности и риски, известные и новые проблемы переплетаются. Необходимо сделать программу развития образования более осознанной, нужен институт заказчиков специалистов с высшим образованием. Отсутствие системной работы в этом направлении приводит к тому, что лишь треть выпускников школ области осознанно выбирают будущую специальность.

В целом же, по мнению участников общественных слушаний, на саратовских предприятиях достаточно вакансий для выпускников технических вузов. У технического образования есть много не решенных задач. Достаточно сказать, что трудоустройство выпускников технических вузов Саратовской области в настоящее время составляет всего 60-70%.

«ВЭ» Какие решения были приняты по итогам общественных слушаний?

Г.В.Л. В целях решения этих проблем участники выработали ряд рекомендаций органам исполнительной и законодательной власти, вузам и другим заинтересованным структурам.

Так, Саратовской областной думе рекомендовано выйти с инициативой в Государственную думу РФ о рассмотрении возможности включения дисциплины «Физика» в число обязательных дисциплин в рамках ЕГЭ, введении в структуру Гособоронзаказа раздела, предусматривающего финансирование подготовки инженеров и специалистов среднего звена.

Министерству образования Саратовской области совместно с министерством занятости, труда и миграции Саратовской области рекомендовано создать межведомственный центр постоянного мониторинга и прогнозирования кадровых потребностей предприятий в регионе.

Министерству промышленности и энергетики Саратовской области совместно с Торгово-промышленной палатой Саратовской области и Саратовским государственным техническим университетом имени Гагарина Ю.А. рекомендовано подготовить предложения по формированию отраслевых центров компетенций по

техническим профессиям и специальностям на базе промышленных предприятий и вузов для решения задач кадрового обеспечения предприятий реального сектора экономики области, профессиональной переподготовки и повышения квалификаций их персонала, разработать проекты отраслевых соглашений о государственно-корпоративном партнерстве в области подготовки квалифицированных кадров на базе созданных центров компетенций, предусмотрев возможность активного использования оборудования центров профессиональными образовательными организациями и вузами.

Наконец, министерству образования Саратовской области рекомендовано подготовить представление по включению в федеральный справочник востребованных и перспективных профессий (специальностей), требующих среднего профессионального образования, предложений СГТУ имени Гагарина Ю.А. (согласно Приложению), а Саратовскому государственному техническому университету имени Гагарина Ю.А. и другим вузам, ведущим подготовку инженерных кадров, совместно с предприятиями реального сектора экономики Саратовской области рекомендовано:

– развивать целевую контрактную подготовку как механизм стабилизации всей цепи формирования кадрового потока замещения выбывающих профессионалов в промышленности;

– формировать содержание образовательных программ при участии работодателей и с учетом потребностей производства;

– активнее привлекать к образовательному процессу специалистов-практиков, работающих на предприятиях реального сектора экономики;

– проводить конкурсы и соревнования студентов инженерных специальностей, в частности по темам и задачам, предложенным предприятиями и при их материальной поддержке;

– разработать механизм получения практического опыта преподавателями, не имеющими производственного стажа;

– привлекать студентов к реальной проектной и исследовательской деятельности путем предоставления на конкурсной основе грантов;

– выйти с инициативой в Министерство экономического развития РФ о возможности создания центров молодежного инновационного творчества как структурных подразделений образовательных организаций, сделав их основной функцией профессиональную ориентацию детей и молодежи по инженерным специальностям.

Вышло также обращение к средствам массовой информации и общественным организациям содействовать распространению положительного имиджа работников реального сектора экономики, инженерных кадров.

«ВЭ» Спасибо, Галина Викторовна.

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ НАУЧНОГО НАПРАВЛЕНИЯ КАФЕДРЫ «ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ» УРАЛЬСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА

Ф.Н. Сарапулов, А.Ю. Коняев, Б.А. Сокунов, В.Э. Фризен

Становление научного направления кафедры связано с разработкой и математическим моделированием электромеханических преобразователей энергии с разомкнутыми магнитопроводами. Одними из основоположников работ по исследованию и созданию в нашей стране таких электродвигателей являются профессора Г.И. Штурман и П.А. Фридкин. В годы Великой Отечественной войны они жили в Свердловске, совмещая работу на производстве с преподавательской деятельностью в Уральском индустриальном институте, позднее преобразованном в Уральский политехнический институт (УПИ). Под руководством П.А. Фридкина выпускник кафедры электрических машин Михаил Григорьевич Резин выполнил свою дипломную работу «Исследование двигателя с дуговым статором». Начатые совместно с П.А. Фридкиным исследования М.Г. Резин продолжил в аспирантуре кафедры электрических машин под руководством профессора Н.С. Сиунова. В ходе работы создан и исследован уникальный асинхронный электродвигатель с дуговым статором мощностью около 20 кВт. Результаты этих исследований составили основу диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук, защищенной М.Г. Резиным в 1949 г. Признанием высокого уровня работы и интереса к ней со стороны научной общественности явилась публикация основных положений диссертации в центральной печати.

Электрические машины с разомкнутыми магнитопроводами. Указанные события объективно свидетельствовали о зарождении на кафедре электрических машин научного направления «Исследование и разработка электрических машин

с разомкнутыми магнитопроводами», которое в дальнейшем объединило интересы большой группы научных работников и преподавателей ряда кафедр института. По прикладной направленности эти работы можно разделить на две части: разработка и исследование линейных электродвигателей для транспортных и технологических установок и разработка и исследование устройств для электромагнитного воздействия (нагрева, плавки, транспортировки, перемешивания и т.п.) на жидкие металлы.

1. В конце 60-х годов на кафедре электрических машин возобновляются работы по исследованию линейных электродвигателей. Во многом это связано с тем, что в этот период как за рубежом, так и в нашей стране разворачиваются работы по созданию монорельсового транспорта с приводом от линейных электродвигателей. На кафедре формируется научная группа под руководством профессора Резина М.Г., занимающаяся исследованием линейных электродвигателей. В нее, помимо профессора М.Г. Резина, вошли аспиранты Н.М. Пирумян и М.Г. Мурджикян.

К разработке теории линейных электродвигателей подключается доцент Ф.Н. Сарапулов, к тому времени перешедший с кафедры электрических машин в Нижне-Тагильский филиал УПИ и ставший первым заведующим кафедрой физики и инженерной электротехники. Существенную поддержку эта научная группа получила в 1972 г. в связи с получением УПИ заказ-наряда Минвуза СССР на научно-исследовательскую работу по теме «Исследование и разработка индукционных машин с разомкнутым магнитопроводом для целей металлургии и транспорта». В составе проблемной лаборато-

рии электрических машин появляется штатная группа исследователей. В это время в проблемную лабораторию электрических машин приходят А.Ю. Коняев, В.С. Проскуряков, С.В. Соболев, а несколько позже – А.А. Емельянов, Ю.Р. Урманов, С.Л. Назаров и М.В. Юрченко. Одновременно в Нижне-Тагильском филиале УПИ также формируется группа исследователей, в которую вошли В.А. Бегалов, Т.А. Бегалова, Ю.Л. Махорский, С.В. Иваницкий и Ю.В. Телешев.

В этот период выполняется ряд хозяйственных работ с предприятиями и организациями Урала, развиваются основы теории линейных асинхронных двигателей. В теоретическом плане основные достижения связаны с созданием математических моделей линейных электродвигателей на основе детализированных электрических, магнитных и тепловых схем замещения, позволяющих наиболее полно отразить основные особенности линейных электромеханических преобразователей энергии – несимметрию электрических и магнитных цепей, вынос вторичным элементом теплоты за пределы активной зоны. Выполняются исследования линейных электродвигателей разных модификаций, отличающихся как по конструкции индукторов, так и по виду вторичного элемента, исследуются различные режимы работы таких двигателей.

Результаты исследований линейных электродвигателей используются при создании промышленных и опытных установок. Созданы и эксплуатируются на трубопрокатных заводах Челябинска и Первоуральска рольганговые линейные двигатели для перемещения ферромагнитных труб; совместно с Институтом горного дела Министерства черной металлургии (г. Свердловск) созданы опытные образцы ленточного конвейера и конвейерного поезда с линейными электроприводами; создан первый в стране электродинамический сепаратор на основе линейных индукторов для извлечения алюминия из твердых отходов, установленный на Ле-

нинградском заводе по механизированной переработке бытовых отходов; реализованы опытные отрезки промышленных транспортных систем с линейными электроприводами на «Уралвагонзаводе» (г. Нижний Тагил) и на комбинате «Ураласбест» (г. Асбест); создан ряд других опытных установок.

Результаты исследований и разработок линейных электродвигателей были положены в основу кандидатских диссертаций, защищенных практически всеми перечисленными выше научными работниками. Основы теории и методов расчета таких двигателей были обобщены в докторской диссертации Ф.Н. Сарапулова «Несимметричные индукционные двигатели с замкнутыми и разомкнутыми магнитопроводами» (1982 г.).

В конце 70-х годов в составе проблемной лаборатории электрических машин было выделено отделение кафедры общей электротехники. Исследования электрических машин с разомкнутыми магнитопроводами продолжились на кафедре общей электротехники (с 1994 г. кафедра электротехники и электротехнологических систем) под руководством профессора М.Г. Резина, а с 1985 г. – профессора Ф.Н. Сарапулова.

В последующие годы научный коллектив участвовал в разработке наиболее значительных для нашей страны проектов в области использования линейных электродвигателей.

1.1. В результате сотрудничества с Всесоюзным научно-исследовательским институтом взрывозащищенного электрооборудования (г. Донецк), определенного в 1984-1991 г. головной организацией Минэлектротехпрома СССР по разработке и созданию электродвигателей с разомкнутыми магнитопроводами, создаются двигатели для привода ряда транспортных и технологических установок (научный руководитель работ – Ф.Н. Сарапулов):

– тяговые линейные асинхронные двигатели экологически чистого конвейерного электропоезда для транспортировки угля на Междуреченском ГОК «Кемерово»

воуголь», заменяющего автомобильный транспорт,

- дисковый электродвигатель с разомкнутым магнитопроводом для привода шахтной подъемной установки,

- линейный асинхронный двигатель с двусторонним индуктором для высокодинамичного электропривода загрузочно-выгрузочной машины кольцевой нагревательной печи,

- дугостаторный асинхронный двигатель для привода штемпельного пресса брикетирования угля.

1.2. Совместно с ВНИПТИ вагоностроения (г. Кременчуг) в 1989-1992 гг. разрабатывались и создавались линейные электродвигатели для перемещения ферромагнитных листов в технологических линиях металлургических и машиностроительных заводов (научный руководитель – А.Ю. Коняев).

1.3. По заданиям ВНИПИ «Транспрогресс», а позднее НПЦ «ТЭМП» (г. Москва) научная группа во главе с Ф.Н. Сарapultовым и В.А. Бегаловым участвовала в разработке, исследованиях и создании промышленных образцов тяговых линейных асинхронных двигателей для монорельсовых транспортных систем, один из вариантов которой функционирует в г. Москве.

1.4. В содружестве с АО «Уралэнергоцветмет» разработаны и созданы установки электродинамической сепарации на основе линейных электродвигателей со специфическим вторичным элементом, отправленные на мусороперерабатывающие заводы г.г. Пятигорска и Москвы (научный руководитель – А.Ю. Коняев).

Развитие в последние годы вычислительной техники и математического обеспечения (в том числе освоение стандартных пакетов MathCAD, Matlab, Elcut, COMSOL Multiphysics) позволило существенно продвинуть теорию линейных электродвигателей за счет усложнения и уточнения их математических моделей.

Разработанные модели делают возможным:

- производить расчеты динамических режимов работы двигателей, в том числе

исследовать связанные электромагнитные, механические и тепловые процессы,

- интегрировать модель линейного асинхронного двигателя в Simulink-модель системы электропривода в комплексе с источником питания, регуляторами и механическими элементами,

- учитывать особенности вторичных элементов ряда линейных двигателей (стальной вторичный элемент, вторичные элементы малых по сравнению с полюсным делением размеров, вторичные элементы в виде роликов и т.п.).

Результаты проведенных исследований нашли отражение в ряде кандидатских диссертаций (В.Н. Удинцев, В.А. Иванушкин, Д.В. Исаков, М.Ю. Кожемякин, С.Ф. Сарapultов, Д.Н. Томашевский), а также в докторских диссертациях А.Ю. Коняева «Линейные индукционные машины для технологического электромагнитного воздействия на обрабатываемые электропроводящие изделия и материалы» (1996 г.) и И.В. Черных «Основы теории и моделирование линейного асинхронного двигателя как объекта управления» (2000 г.).

2. Одним из направлений развития электротехнологических процессов является магнитогидродинамическое (МГД) воздействие различного рода в металлургических технологиях. Это МГД-методы и устройства для управления течением и обработкой расплавов с использованием целенаправленного возбуждения в проводящей среде МГД-эффекта посредством приложенных извне электромагнитных полей. Сюда относятся различные типы МГД-насосов, регуляторов, вентилях, служащие для транспорта, дозирования, перемешивания расплавов, воздействия на структуру затвердевающего металла, и т.п.

Частным применением этого метода являются электромагнитное воздействие (ЭМВ) на структуру затвердевающего металла – электромагнитное перемешивание (ЭМП) в процессе кристаллизации, ЭМП в ванне дуговой сталеплавильной печи, а также транспорт жидкого металла.

Кафедра «Электротехника и электротехнологические системы» УГТУ (далее

УрФУ) совместно с рядом кафедр университета и другими организациями в течение длительного времени проводит научно-исследовательские и прикладные работы, связанные с проблемой ЭМВ на жидкие металлы. Как показывает история, развитие ЭМВ на расплавы занимает значительное место в получении качественных металлов и сплавов. В настоящее время состояние этой проблемы сводится к совокупности частных теоретических предпосылок и отдельных экспериментальных работ применительно к черным и некоторым легким цветным металлам и сплавам.

Одни из первых работ, проводимых кафедрой ЭЭС по электромагнитному перемешиванию, были связаны с ЭМП расплавов в дуговых сталеплавильных печах. Сюда можно отнести работы М.Г. Резина, Э.К. Кочнева, на которые ссылаются М.В. Окорочков в книге «Электромагнитное перемешивание металлов в дуговых сталеплавильных печах», 1961 г., Л.А. Верте в книге «Электромагнитная разливка и обработка жидкого металла», 1967 г., и А.И. Вольдек в монографии «Индукционные гидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом», 1970 г.

В это же время в рамках НИР с промышленными предприятиями проводятся исследования, связанные с определением параметров дуговых статоров для электромагнитного перемешивания на электропечах. В практическом приложении эти работы были направлены на выравнивание температурного поля в объеме ванны печи, снижение ликвации по химическому составу и в ряде случаев для десульфурации.

Немного позднее начинаются работы по электромагнитному перемешиванию специальных сплавов, в частности жидких катодов, в электролизных ваннах при помощи плоского индукционного устройства. Электромагнитный перемешиватель с транспозицией фаз позволил организовать сложное движение металла в ванне, например по осям магнитопровода к центру или к ее краям или четырехконтурное движение в плоскости ванны.

Применение плоского электромагнитного перемешивателя обеспечило равномерность перемешивания расплава, проведение перемешивания агрессивных расплавов, снижение процента загрязнения продукта электролиза, осуществление постоянного обновления поверхностного слоя расплава, а также упрощение конструкции электролизера.

Как дуговые статоры, так и плоские электромагнитные перемешиватели в основном создавали условия для выравнивания расплава по химическому составу и выносу на поверхность ванны разного рода неметаллических включений.

В 1967 г. М.Г. Резин защитил докторскую диссертацию на тему «Разработка и исследование устройств для электромагнитного перемешивания жидких металлов». Защищают кандидатские диссертации: в 1968 г. И.А. Кривонищенко – «Исследование устройств для электромагнитного перемешивания жидких металлов», в 1971 г. Э.К. Кочнев – «Исследование электромагнитных перемешивающих установок металлургической промышленности», а в 1974 г. Ю.С. Прудников – «Исследование устройств для электромагнитного воздействия на расплавы».

С 1972 г. в группу, связанную с электромагнитным перемешиванием расплавов, входит Б.А. Сокунов, защитивший в 1981 г. кандидатскую диссертацию «Исследование цилиндрических индукторов для электромагнитного воздействия на расплав в кристаллизаторе». В 1995 г. состоялась защита кандидатской диссертации А.И. Кривонищенко «Короткий цилиндрический индуктор для электромагнитного воздействия на медные сплавы».

Последующие работы были связаны с электромагнитным перемешиванием жидкой фазы кристаллизующихся слитков круглого, квадратного, прямоугольного сечений из меди и ее сплавов. Электромагнитное перемешивание в процессе кристаллизации позволяет получить мелкозернистую литую структуру, способствует снижению ликвации и загазованности, уменьшению неметаллических включений в литом металле, что в конечном итоге положи-

тельно сказывается на качестве полуфабрикатов и готовых изделий.

Большинство работ проводилось совместно с институтом «Гипроцветметобработка» и кафедрой «Литейное производство» УГТУ – УПИ по заказам заводов по обработке цветных металлов в городах Ревда и Каменск-Уральский (Свердловская область), Кольчугино (Московская область), Москва, Артемовский (Украина).

Результаты этих работ легли в основу кандидатских диссертаций специалистов ОАО «Каменск-Уральский завод по обработке цветных металлов» В.С. Токаря, Б.Е. Балукова, Ю.Н. Юрьева.

Проводились работы по ЭМП сложных специальных сплавов на заводе «Уралэлемент» (г. Верхний Уфалей), на Березниковском титаномагниеком комбинате (Пермская область) и работы по регулированию наполнения сталеразливочных ковшей на Северском трубном заводе (г. Полевской).

Последующие работы были связаны с разработкой индукционных насосов для транспортировки расплавов алюминия и цинка, а также устройств электромагнитного перемешивания алюминия и его сплавов.

В 1987 г. под руководством проф. М.Г. Резина Г.К. Смолиным была защищена кандидатская диссертация «МГД-устройства с пульсирующим и бегущим винтовым магнитным полем». В 1992 г. Г.К. Смолин защитил докторскую диссертацию на тему «Системы трансформаторных и линейно-вихревых асинхронных МГД-устройств», в которой обобщил свои разработки по кондукционным и индукционным МГД-генераторам и МГД-насосам, дал их классификацию, способы возбуждения, анализ энергетических показателей.

Комплексные исследования электромагнитных, тепловых и гидромеханических процессов в жидкометаллических расплавах проводил О.Ю. Сидоров. Им разработаны численные математические модели МГД-устройств, в том числе индукционных тигельных и канальных печей, позволяю-

щие производить комплексное моделирование указанных процессов в данных устройствах. В 1995 г. О.Ю. Сидоровым была защищена докторская диссертация на тему «Основы теории и расчет характеристик индукционных электромеханических преобразователей энергии для обработки металлических расплавов». По этой тематике в 2002 г. были защищены кандидатские диссертации С.Ф. Сарапуловым «Математическое моделирование линейных индукционных машин технологического назначения на основе их схем замещения» а также В.В. Иваничкой «Математическое моделирование электрической цепи индуктора асинхронного двигателя на основе графотопологического подхода».

Значительная часть НИР проводится совместно с ЗАО «Российская электротехнологическая компания» и связана с созданием систем индукционного нагрева заготовок, а также многофункциональных плавильных комплексов, включающих в себя специальную индукционную тигельную печь, электромагнитный вращатель расплава в печи, электромагнитный перемешиватель металла в кристаллизующемся слитке, МГД-насос и вентильный источник питания. По данной тематике защищены кандидатские диссертации В.Э. Фризенем, А.В. Бычковым, С.А. Бычковым, А.А. Идиятулиным, С.М. Фаткуллиным.

В 2011 г. С.Ф. Сарапулов защитил докторскую диссертацию на тему «Индукционные магнитогидродинамические машины технологического назначения для электромеханического воздействия на металлические расплавы». В ней предлагается методическая база для математического моделирования взаимосвязанных электромагнитных, тепловых и гидродинамических процессов, а также изложены технические решения по формированию энергоэффективных конструкций индукционных магнитогидродинамических машин технологического назначения как особого класса электромеханических преобразователей энергии.

В 2014 г. В.Э. Фризен защитил докторскую диссертацию на тему «Индукционные комплексы для инновационных элект-

триметаллургических технологий». В ней изложены принципы создания специальных индукционных печей с управляемым электромагнитным воздействием на расплавленный металл. Предлагается комплекс математических моделей на основе детализированных электрических, магнитных и тепловых схем замещения для исследования взаимосвязанных процессов в индукционных тигельных печах с управляемым электромагнитным воздействием на металл в статических и динамических режимах.

Установки индукционного нагрева металлов. Кафедра ЭЭС осуществляет разработку, моделирование процессов и подбор режимов работы установок индукционного нагрева под закалку и пластическую деформацию как однородных по структуре и свойствам, так и неоднородных заготовок. Примерами могут служить разработанные установки индукционного нагрева сложных составных заготовок для производства сверхпроводящих проводов (рис. 1), а также отработавших тепловыделяющих сборок реакторов. Также производились разработки системы индукционного нагрева труб между прошивным и редуцированным станами. На базе проведенных исследований был осуществлен синтез быстродействующей системы управления комплексом индукционных нагревателей движущейся трубной заготовки.



Рис. 1. Внешний вид двухсекционной установки индукционного нагрева сложных составных заготовок

Созданы модели для проведения исследований, разработана методика расчета и проектирования кузнечных индукционных нагревателей заготовок под пластическую деформацию.

Электромагнитное перемешивание жидкой фазы слитка в процессе кристаллизации. При производстве проката из легких и тяжелых цветных металлов начальным этапом технологической цепочки обычно является процесс получения слитка в кристаллизаторе скольжения. От структуры слитка, распределения примесей по его сечению и качества поверхности слитка зависит, каким переделам он будет подвергаться при получении готовой продукции.

Коллективом кафедры отработана и предлагается к промышленной реализации технология электромагнитного перемешивания для формирования желаемой структуры слитка путем бесконтактного воздействия на кристаллизующийся металл бегущим электромагнитным полем. Такое организованное воздействие позволяет существенно сократить издержки на начальных этапах технологического процесса за счет получения более плотной структуры и гладкой поверхности слитка. При этом сокращаются энергетические затраты на подогрев слитка перед прессованием, затраты на работу прессы и износ прессового оборудования, увеличивается скорость литья.

На предприятиях были внедрены десятки разработанных на кафедре устройств для воздействия на жидкую сердцевину кристаллизующихся слитков тяжелых цветных металлов (рис. 2). Проводились исследования по улучшению структуры слитков из алюминиевых сплавов как в лабораторных условиях, так и в условиях промышленного производства.

Гомогенизация расплава в плавильном агрегате. Совмещение нагрева металла и его МГД-перемешивания (вращения) в ванне плавильного агрегата является перспективным направлением создания плавильно-литейных комплексов для производства композиционных сплавов. При вращении

металла индуцированном вращающемся в горизонтальной плоскости электромагнитным полем на поверхности расплава образуется воронка, что облегчает ввод материалов и обеспечивает высокую скорость диффузии за счет турбулентного скольжения металла в подшлаковом слое, позволяет устранить химическую неоднородность и

обеспечить равномерность распределения дисперсных частиц.

Разработана турбоиндукционная тигельная печь (рис. 3), реализующая данную технологию. Основными потребителями технологии являются машиностроительные предприятия авиастроительного, судостроительного комплексов.

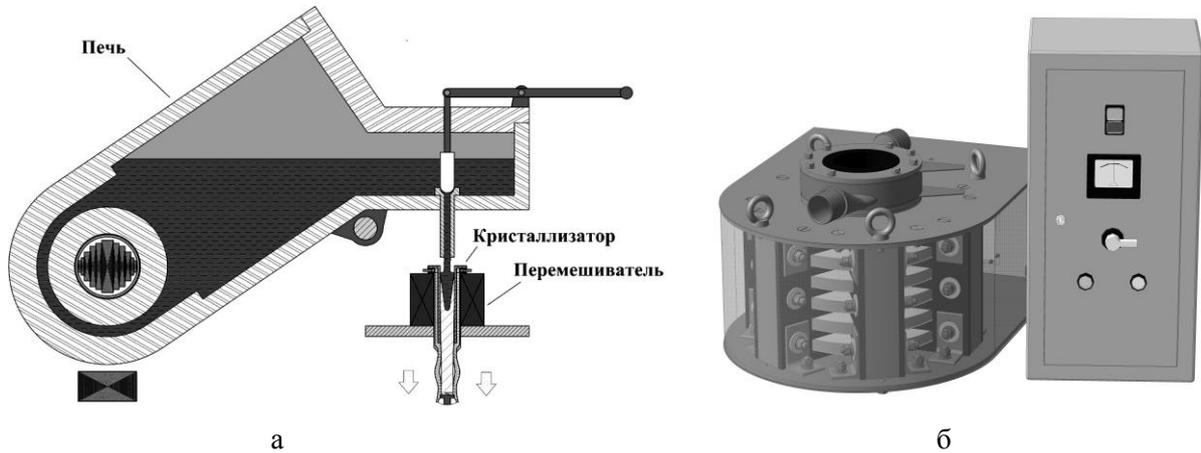


Рис. 2. Электромагнитный перемешиватель жидкой фазы слитка: а – расположение устройства в литейной машине; б – внешний вид

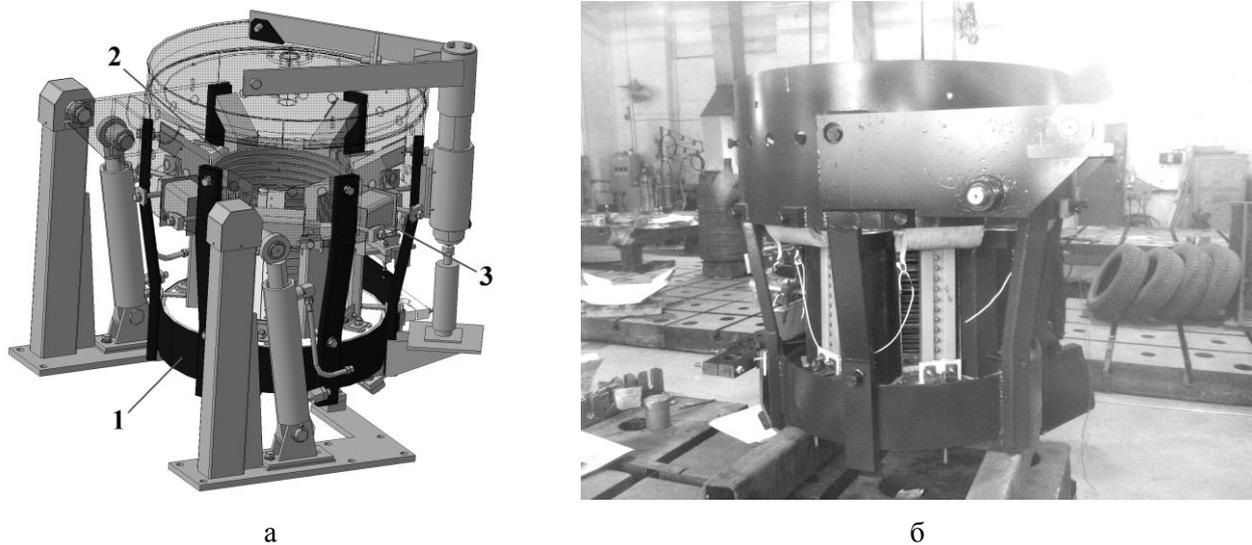


Рис. 3. Турбоиндукционная тигельная печь: а – конструкция печи; б – внешний вид; 1 – каркас печи, 2 – греющий индуктор, 3 – вращающий индуктор

Переработка техногенных отходов. Металлургический агрегат, использующий технологию плавки с вращением и жидкофазным восстановлением, предлагается к применению для утилизации техногенных отходов металлургических производств и руд, не пригодных для переработки традиционными методами.

Вращение жидкометаллической подложки в агрегате осуществляется бесконтактно за счет электродинамических усилий, наводимых в расплаве специальным индуктором-вращателем (рис. 4).

Продуктами переработки являются химические элементы, содержащиеся в исходной руде (отходах, шлаках), трудно из-

влекаемые традиционными способами. Побочным продуктом переработки является также плавленный клинкер, идущий на производство высококачественного цемента, стоимость которого покрывает стоимость электроэнергии на работу агрегата. Основными потребителями этого технического решения являются предприятия черной и цветной металлургии, занимающиеся переработкой техногенных отходов.

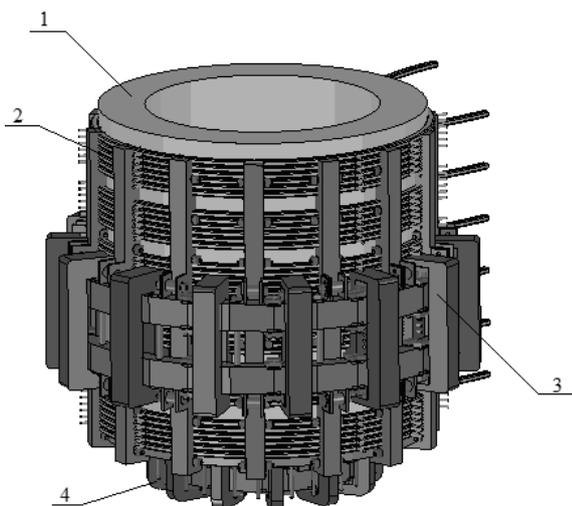


Рис. 4. Устройство опытного образца МПА (1 – тигель, 2 – греющий индуктор, 3 – боковой вращатель, 4 – донный (торцевой) вращатель)

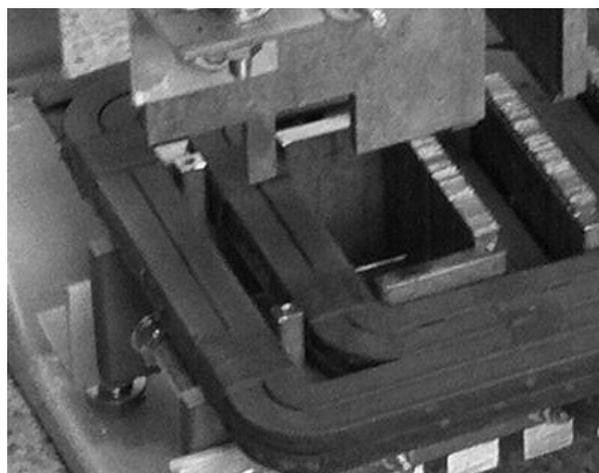
Устройства электродинамической сепарации технологических отходов. Электродинамическая сепарация основана на силовом взаимодействии бегущего магнитного поля с токами, наводимыми этим полем в

проводящих частицах металлов, извлекаемых из отходов. Электродинамические сепараторы являются эффективным средством извлечения цветных металлов из различных видов отходов (электронный и кабельный лом, отработанные формовочные пески литейного производства, автомобильный лом, твердые бытовые отходы и т.д.) и для сортировки их при подготовке к металлургическому переделу. В институте проводится оптимизация физических процессов в сепараторах под конкретные производственные задачи, обеспечивающая повышение технологических и энергетических показателей.

Индукционные МГД-насосы. В настоящее время МГД-насосы достаточно широко применяются в металлургии. Актуальна задача повышения эффективности и надежности насосов, снижения расхода стали и цветного металла при их изготовлении за счет применения новых материалов, технологий изготовления и методик расчета узлов насосов современных конструкций. Коллективом кафедры оптимизирована конструкция насоса с плоскими катушками (рис. 5). Разработанная технология изготовления катушек позволяет поднять рабочую температуру обмоток до 300-350°C. За счет этого многократно по сравнению с эксплуатируемыми насосами снизились потери энергии в насосе, а также масса материалов на изготовление индуктора.



а



б

Рис. 5. Индукционный насос для транспорта расплавленного металла: а – насос в работе; б – конструкция обмоток

В металлургической промышленности полезный эффект от применения разработки проявляется в уменьшении уровня брака, обусловленного выходом из строя МГД-насоса в процессе отливки.

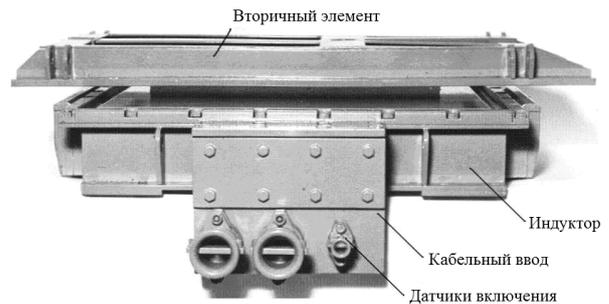
Тяговые линейные электроприводы для промышленного и пассажирского транспорта. Коллективом кафедры разработана конструкция энергоэффективных линейных электродвигателей для транспортных систем, тяговых линейных асинхронных двигателей со специальными обмотками индуктора и улучшенными энергетическими показателями (рис. 6). Конструкция обеспечивает высокую скорость перемещения, снимает ограничения по углам наклона пути и ускорениям транспортного средства, обеспечивает улучшенные шумовые показатели. Основные потребители: РЖД, городские транспортные организа-

ции, предприятия (для внутризаводского транспорта, перемещения труб).

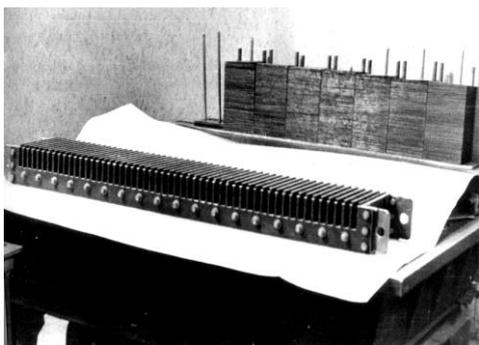
Повышение надежности и экономичности работы разборных контактных соединений электротехнического оборудования. Работа электрических сетей и электротехнического оборудования во многом зависит от надежности и экономичности многочисленных разборных контактных устройств, соединяющих отдельные участки электрической цепи. Переходное электрическое сопротивление в этих устройствах является причиной значительных потерь электроэнергии, недопустимого перегрева контакт-деталей, а его тенденция к росту в процессе эксплуатации приводит к нестабильности электрических параметров и необходимости частых отключений для ремонта и ревизии контактных соединений.



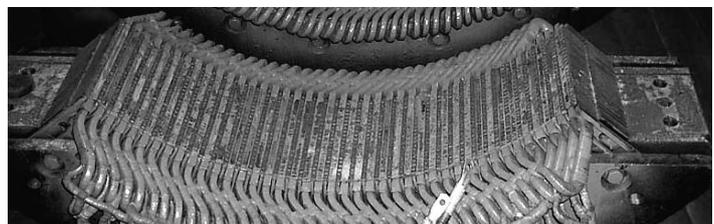
Двигатель для московской монорельсовой дороги



Двигатель для конвейерного поезда



Двигатель для системы межцехового транспорта



Дугостаторный двигатель привода пресса

Рис. 6. Примеры разработок в области линейных транспортных систем

Отработан и предлагается к внедрению процесс локального контактного твердотельного подплавления, при котором взаимодействие твердого металла с жидким происходит ниже температуры автономно-

го плавления твердого металла, создавая защитное металлопокрытие. После затвердевания на контактной поверхности образуется слой металлопокрытия толщиной 5-10 микрон, которое представляет собой но-

вое вещество (твердый раствор двух металлов), отличающееся по своим физическим и химическим свойствам как от материала контакт-детали, так и от нанесенного на ее поверхность легкоплавкого сплава. Применение в технологии сплавов с температурой плавления 10-30°C позволяет получить защитное металлопокрытие при температуре нагрева контакт-деталей не выше 40-45°C и

не требует использования какого-либо специального оборудования.

Главное преимущество данного способа по сравнению с традиционными лужением и серебрением контактов состоит в том, что он может применяться не только в условиях стационарного производства, но и в реальных условиях работы действующего электротехнического оборудования на различных объектах электроэнергетики.

Статья поступила в редакцию 21.08.15, принята к опубликованию 11.09.15

ЛАБОРАТОРИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ САРАТОВСКОГО НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

Н.В. Бекренев, А.И. Зорин

Развитие техники во второй половине XX века стимулировало создание новых конструкционных высокопрочных и термостойких материалов, разработку малогабаритных высокоточных приборов и агрегатов, имеющих сложные формы поверхностей. Это создало определенные проблемы их изготовления традиционными методами механической обработки, когда стойкости инструмента оказывалось недостаточно для эффективного формообразования или вообще обработка оказывалась невозможной по причине высокой твердости материалов и миниатюрности изделий. В то же время были разработаны новые для того времени методы формообразования, получившие название электрофизических и электрохимических. Для этих методов характерно преобразование электрической энергии в механическую или тепловую, что вызывает удаление части материала, на который направлено воздействие. При электроэрозионной и электрохимической обработке отсутствует прямой контакт инструмента и детали, и формообразование проводящих материалов осуществляется за счет электрических разрядов в промежутке или

анодного травления в электролите. При ультразвуковой обработке вызываются механические деформации специального магнитострикционного или пьезоэлектрического материала, которые усиливаются и обеспечивают колебания инструмента, воздействующего на материал кинетической энергией удара. Разработка этих сложных многофакторных технологических процессов, новых для того времени, потребовала проведения обширных теоретических и экспериментальных исследований, проводившихся многочисленными коллективами в вузах и отраслевых институтах.

В Саратове 13 ноября 1962 года был образован Научно-исследовательский технологический институт (НИТИ), основной задачей которого было технологическое сопровождение серийного освоения новых изделий приборостроения, то есть опережающая разработка новых технологий и оборудования, которых в те годы не было ни в нашей стране, ни за рубежом. Среди первых лабораторий НИТИ была лаборатория электрофизических методов обработки, потому что в приборах стали широко применять керамику, кварц,

ситаллы и другие труднообрабатываемые материалы.

В составе лаборатории электрофизических методов обработки в конце 60-х – начале 70-х годов XX века сложилась группа высококвалифицированных специалистов в области ультразвуковой, электрохимической и электроэрозионной обработки материалов: Е.П. Калинин, А.А. Горбунов, В.Г. Моисеев, В.М. Салтанов, А.И. Зорин, Ю.В. Шведенко. Эта группа поддерживала тесные творческие контакты с научной школой д.т.н., профессора А.И. Маркова, сложившейся в Московском авиационном институте имени С. Орджоникидзе. В те годы успешно защитили кандидатские диссертации: начальник лаборатории Е.П. Калинин, впоследствии работавший в Энгельском филиале Саратовского политехнического института, ведущий инженер А.А. Горбунов, на длительное время ставший «генератором идей» лаборатории. В это же время под руководством А.И. Маркова защитил диссертацию В.В. Захаров, долгое время работавший до-

центом кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» Саратовского политехнического института и выполнявший разработки совместно с НИТИ. Основными направлениями деятельности лаборатории были создание технологий и оборудования для размерной ультразвуковой обработки изделий из керамики, разработка технологий электроискровой обработки профильным и непрофильным электродом и оснастки к электроискровым станкам, работы по электрохимическому удалению заусенцев в глубоких пересекающихся отверстиях. Были разработаны две модели высокоточных ультразвуковых станков для размерной обработки, устройство для электроискровой правки прецизионных цанг к станкам-автоматам, четыре модели электрохимических установок удаления заусенцев в пересекающихся отверстиях малого диаметра. Ведущая роль в создании и внедрении электрохимических установок принадлежит А.И. Зорину, ультразвуковых установок – В.Г. Моисееву и В.М. Салтанову.



Анатолий
Иванович
Зорин



Василий
Герасимович
Моисеев



Виктор
Митрофанович
Салтанов



Юрий
Владимирович
Шведенко

А.А. Горбуновым был предложен новый способ обработки внутренних полостей в деталях из керамики свободным шаром, вращающимся в ультразвуковом поле (рис. 1). Способ, защищенный авторским свидетельством, был успешно внедрен в производство корпусов гиросприборов, а также на Саратовском подшипниковом заводе при окончательной обработке штам-

пов для изготовления подшипниковых шариков. Позднее способ успешно применялся в НИТИ при серийном производстве перьев автоматических графопостроителей (предшественников нынешних плоттеров) для обработки фасок на твердосплавных капиллярах. В конце 60-х – начале 70-х годов в СССР благодаря исследованиям А.И. Маркова в области ультразвуковых

технологий оформилось новое научное направление: комбинированное ультразвуковое резание или обработка труднообрабатываемых сталей и сплавов с сообщением режущему инструменту ультразвуковых колебаний малой амплитуды.

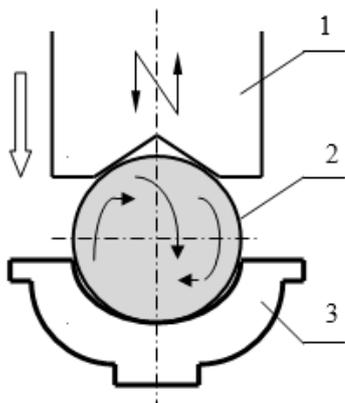


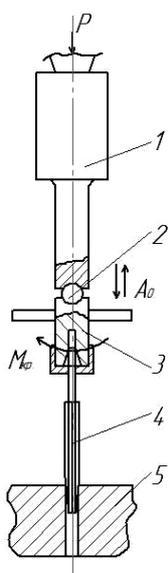
Рис. 1. Обработка полости незакрепленным шаром (1 – инструмент, 2 – хаотически вращающийся шар, 3 – обрабатываемая деталь)

Именно отечественной школе следует отдать приоритет в этой сфере промышленного применения ультразвука, поскольку

ку работы Дз. Кумабэ в Токийском университете были направлены в основном на разработку и патентование принципиальных схем обработки без научной трактовки результатов.

В электрофизической лаборатории НИТИ впервые в нашей стране способ комбинированного резания был реализован путем создания специальных ультразвуковых станков. Следует отметить, что только после 2000 года появилась техническая информация о зарубежных станках аналогичного назначения. За годы существования лаборатории было разработано 7 моделей ультразвуковых станков для сверления и резбонарезания отверстий малого диаметра. Основной вклад внесли А.А. Горбунов и В.М. Салтанов. Ими были предложены и оформлены как изобретения оригинальные и простые схемы повышения эффективности ультразвукового резания и автоматической регулировки амплитуды колебаний инструмента в зависимости от изменения условий резания (рис. 2).

1. Испытание схемы возбуждения колебаний через промежуточный колеблющийся элемент.

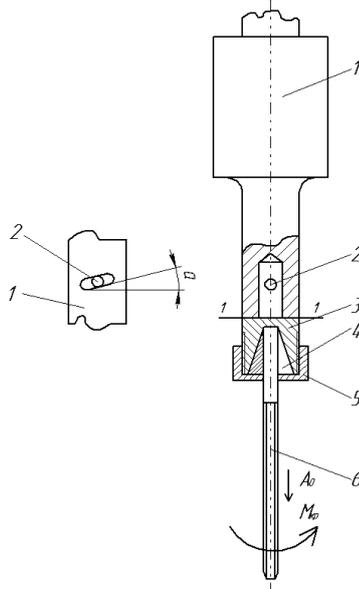


- 1. Волновод преобразователя
- 2. Промежуточный колеблющийся элемент (шарик)
- 3. Крепежный элемент с цангой
- 4. Инструмент
- 5. Образец

P – статическое усилие прижима
 A_0 – амплитуда колебаний торца волновода
 $M_{\text{кр}}$ – крутящий момент на инструменте

а

2. Испытание схемы подведения колебаний к инструменту с автоматическим регулированием акустического режима.



- 1. Волновод
 - 2. Штифт, связанный с хвостовиком цанги
 - 3. Цанговый волновод
 - 4. Цанга
 - 5. Накладная гайка
 - 6. Инструмент
- α – угол контакта
 1-1 – плоскость разреза

б

Рис. 2. Схемы сообщения ультразвуковых колебаний инструменту: а – через промежуточное свободное тело – шарик, б – с креплением через байонет, обеспечивающий увеличение амплитуды колебаний при возрастании момента резания



Владимир
Андреевич
Кривега



Игорь
Дмитриевич
Степанов



Анатолий
Михайлович
Долгих

Несколько позднее в лабораторию из отдела, занимающегося очисткой эксплуатационных и технологических жидкостей, пришли В.А. Кривега, вскоре ставший начальником лаборатории, и И.Д. Степанов.

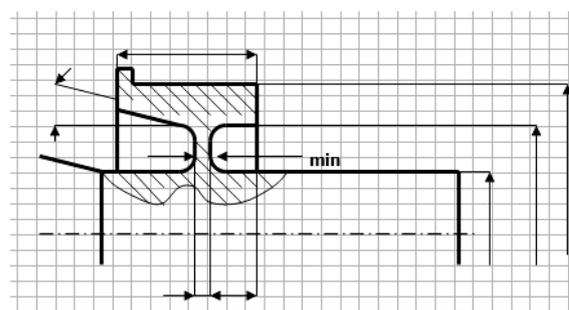
С их приходом в лаборатории появилось новое направление – ультразвуковая обработка в жидких средах. Под руководством В.А. Кривеги и при непосредственном участии В.Г. Моисеева и И.Д. Степанова были разработаны модели ультразвуковых установок для очистки деталей приборов с различной тонкостью, в том числе – ультразвуковой шприц для промывки и очистки глубоких каналов с использованием интенсивных изгибных колебаний инструмента.

В середине 70-х годов в лаборатории усилилась электрохимическая группа. В ее состав вошел А.М. Долгих. После защиты кандидатской диссертации он перешел на работу в Энгельсский филиал СПИ. Позднее им была защищена докторская диссертация в Тульском политехническом институте.

При непосредственном участии В.Г. Моисеева, В.М. Салтанова и В.А. Кривеги была разработана методика расчета резонансных полуволновых, волновых и двухволновых колебательных систем, на основе которой были разработаны конструкции вращающихся двухопорных шпинделей-преобразователей (рис. 3).



а



б

Рис. 3. Вращающийся ультразвуковой шпindel-преобразователь станков для обработки отверстий (а) и его подшипниковый узел (б)

Практически до настоящего времени пьезокерамические преобразователи вращающегося типа крепят на фланце к стакану (гильзе), который, в свою очередь, устанавливают в подшипниках, что приводит к

увеличению габаритных размеров узла и не позволяет достичь высокой точности. Разработанные в лаборатории ультразвуковые шпиндельные узлы благодаря жесткой конструкции с минимумом соединений и со-

вместной обработке опор после сборки позволили достичь точности по радиальному биению не хуже 2-3 мкм. Новыми в саратовских колебательных системах были специальные подшипниковые опоры (рис. 3 б), расположенные в узловых плоскостях преобразователя и отличающиеся тонким средним диском, что исключало распространение колебаний на корпус и возникновение низкочастотных вибраций и паразитных шумов.

Благодаря проведенным экспериментальным исследованиям В.Г. Моисеевым и В.М. Салтановым была получена формула (1), позволяющая точно рассчитать резонансную длину пассивной накладки преобразователя и отличающаяся простотой

$$l_2 = \lambda/2 - Ch/C_k, \quad (1)$$

где k – коэффициент пропорциональности (0,25, 0,5, 1, 2, ...); λ – длина волны ультразвуковых колебаний в материале накладки; C и C_k – скорость звука в материале накладки и пьезокерамике; h – толщина пьезоэлемента.

До этого длины накладок рассчитывали на основе более сложного трансцендентного уравнения (2)

$$\operatorname{tg}(\pi f_0 l / C) \operatorname{tg}(2\pi f_0 l_1 / C_1) = \frac{\rho C S}{\rho_1 C_1 S_1}, \quad (2)$$

где S и S_1 – площади сечения пьезоэлементов и пассивной накладки; f_0 – резонансная частота колебаний системы; l и l_1 – длина пакета пьезоэлементов и пас-

сивной накладки; ρ и ρ_1 – плотность материалов пьезоэлемента и пассивной накладки.

А.И. Зориным был разработан малогабаритный станок для электроискровой прошивки отверстий в микрошариках (диаметром до 1 мм). Задача обеспечения соосности шарика и отверстия решалась технологически просто и не потребовала создания сложных систем позиционирования. Сначала в оснастке прошивалось отверстие под установку стеклянного капилляра с каналом, соответствующим диаметру шарика. Затем в полученное отверстие устанавливали капилляр и только потом – шарик. В цанге станка заменяли электрод на инструмент требуемого диаметра и прошивали отверстие. Следует отметить, что уже в описываемое время в области электроэрозионной обработки в лаборатории разрабатывались в основном специальные станки, которые не производились на предприятиях станкостроительной и инструментальной промышленности.

Расширение круга поставленных перед НИТИ задач и увеличение объемов исследовательских, технологических и конструкторских работ потребовало увеличения кадрового состава электрофизической лаборатории. В лабораторию пришли Н.В. Савенков, В.М. Фирсов, В.М. Серебряков и З.Б. Кошкина, А.С. Захаров. В начале 80-х годов в коллектив влились Н.В. Бекренев и А.В. Бочкарев.



Николай Васильевич
Савенков



Владимир Михайлович
Фирсов



Владимир Михайлович
Серебряков



Зоя Борисовна
Кошкина


 Анатолий Сергеевич
Захаров

 Николай Валерьевич
Бекренев

 Александр Викторович
Бочкарев

К началу 80-х годов в лаборатории сложились следующие группы специалистов по направлениям разработок: В.М. Салтанов и В.М. Серебряков (сверление и резьбонарезание отверстий малого диаметра), В.Г. Моисеев и В.М. Фирсов (сварка термопластичных материалов, обработка деталей из кварца, керамики и с плазмонапыленными твердыми покрытиями), Н.В. Савенков и Н.В. Бекренев (доводка и хонингование отверстий малого диаметра), Ю.В. Шведенко и А.С. Захаров (разработка источников питания к ультразвуковому и электроискровому оборудованию), В.А. Кривега и И.Д. Степанов (ультразвуковая обработка в жидких средах), А.И. Зорин, З.Б. Кошкина и А.В. Бочкарев (электроискровая обработка). А.А. Горбунов начал работы по созданию совершенно нового способа сверхточной обработки титановых и других высокопрочных вязких сплавов путем шлифования металлическим инструментом с режущими микронеровностями, наносимыми в процессе шлифования электроискровым способом. Это был абсолютно новый подход к управлению процессом шлифования за счет активного формообразования инструмента без его снятия со станка в процессе резания. Вскоре он перешел в лабораторию доводочных процессов. К сожалению, безвременная кончина не позволила ему довести данную работу до завершения. Позднее, уже в 2011 году начинавший работать с А.А. Горбуновым в этом направлении В.М. Фирсов защитил кандидатскую диссертацию в СГТУ имени Гагарина Ю.А.

На 80-е и начало 90-х годов XX века пришелся расцвет научно-практической деятельности лаборатории. В это время в лаборатории была разработана методика расчета и сконструированы многостержневые колебательные системы для мощных установок ультразвуковой очистки и сварки и начался постепенный переход к созданию автоматизированного ультразвукового оборудования с микропроцессорными системами управления. Также А.С. Захаровым были разработаны две модели генераторов импульсов, обеспечивших решение важной технической задачи модернизации имеющегося на заводах электроискрового оборудования путем замены в качестве технологической жидкости керосина на деионизованную воду, что обеспечило пожарную безопасность и улучшило условия труда. Им также была разработана схема тиристорного генератора, выполненного по схеме параллельного инвертора на тиристорах ТЧ-50 9-го класса и способного работать как в режиме независимого возбуждения, как и с использованием сигнала обратной связи для автоподстройки частоты. Схема электронной защиты обеспечивала надежную работу инвертора при коротком замыкании и при обрыве внешних цепей. Подобные генераторы были разработаны в числе первых в нашей стране. Ю.В. Шведенко разработал схему генератора, обеспечивающую малый износ электродов при электроискровой прошивке отверстий. Группой А.И. Зорина была разработана схема формообразования сложнопрофильной поверхности в том

числе в материалах с неоднородной структурой типа алмазного инструмента на металлической связке (рис. 4). Сущность новой схемы заключалась в применении дискового электрода со срезанным сегментом, осуществляющего в следящем режиме поворот в сторону изделия и выжигание профиля. За счет дисковой формы обеспечивалось многократное использование электрода без правки изношенной рабочей части. Эта схема была реализована в специальных электроискровых установках для профилирования правящих алмазных роликов к автоматам шлифования мелкогабаритных сверл, станке для обработки специального сферического инструмента, полуавтомате с микропроцессорной системой для шлифовки пакетов статоров и роторов микроэлектромашин с повышенной точностью по соосности.

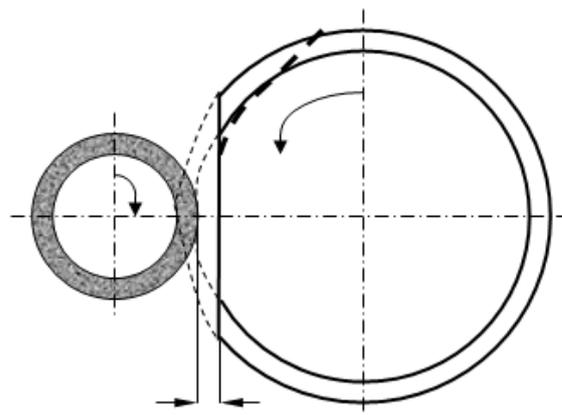


Рис. 4. Схема электроискровой правки дисковым электродом

Применение электроискровой обработки позволило исключить замыкание пластин, часто сопровождавшее процесс абразивного шлифования и приводившее к браку.

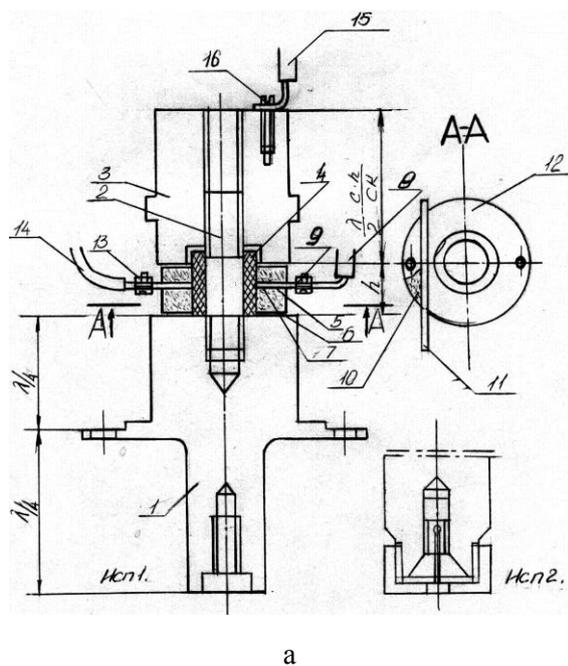


Рис. 5. Пьезокерамический преобразователь со встроенным датчиком обратной связи

Под руководством В.Г. Моисеева была разработана оригинальная конструкция ультразвукового преобразователя с датчиком обратной связи по амплитуде колебаний. В реальных условиях вследствие изменения рабочих нагрузок, приводящих к изменению коэффициентов термического расширения элементов преобразователя, а значит, усилия их стяжки (вследствие разо-

грева пьезокерамики из-за перехода части акустической энергии колебаний в тепловую или разогрева от внешнего источника) возникает изменение собственной частоты колебаний системы относительно расчетной. К тому же возможно отклонение частоты питающего генератора или изменение напряжения электрической сети. Поэтому в течение рабочего цикла амплитуда колеба-

ний преобразователя претерпевает изменения по величине, достигающие иногда до 25-40% от первоначально заданного значения. Эти отклонения устраняются датчиками обратной связи. Существующие датчики обычно в виде отдельных конструктивных элементов размещаются либо на выходном рабочем торце преобразователя, что значительно усложняет конструкцию, либо на выходном торце пассивной (отражающей) накладки. Последнее также нерационально, так как частота и амплитуда его колебаний могут отличаться от истинных колебаний пьезокерамического пакета преобразователя. К тому же датчики выполняются из керамики иных линейных размеров, а часто и другой марки, чем рабочие элементы, что вносит определенную погрешность в работу датчика. Конструктивные особенности разработанного в ходе экспериментальных исследований преобразователя (рис. 5) следующие.

Преобразователь стержневого типа выполнен на основе пьезокерамических колец диаметром $15 \div 56$ мм. Рабочая частотопонижающая (активная) накладка 1 имеет в узловой зоне фланец для крепления на оборудовании. Пассивная накладка 2 имеет на расстоянии $\frac{\lambda}{4}$ от выходного торца центрирующий пояс. Соединены накладки при помощи шпильки 3. Для изоляции пьезокерамических колец от шпильки на последнюю надета токонепроводящая втулка 4. Для лучшего электрического контакта между пьезокерамическими кольцами 5 и накладками проложены лепестки из алюминиевой фольги 6. Между двумя кольцами размещен токопроводящий электрод 7. Токопроводящий кабель 8 прикреплен к электроду болтовым соединением 9. Для снятия сигнала обратной связи в качестве датчика используется непосредственно сегмент пьезокерамического кольца 10, отделенный от него токоизолирующей прокладкой (пластина фторопласта) 11. Такая конструкция не нарушает расчетных габаритов преобразователя, относительно проста и обеспечивает снятие сигнала непосредственно из зоны ус-

тановки пьезокерамики при помощи датчика, имеющего те же линейные размеры. Датчик имеет свой токоотъемный электрод 12, болтовое соединение 13 и кабель 14. Массовый кабель 15 может крепиться непосредственно к пассивной накладке винтом 16. На рабочем торце для крепления инструмента могут выполняться резьбовое отверстие или цанговый патрон. В дальнейшем все ультразвуковые установки лаборатории оснащались подобными преобразователями. Н.В. Савенковым и Н.В. Бекреневым были разработаны технологии и станки, в том числе с микропроцессорным управлением для доводки отверстий диаметром от 1 до 10 мм с точностью 1-0,3 мкм в деталях из керамики и легированных сталей и спечсплавов. С постепенным переходом разработчиков на применение вместо керамики твердых покрытий, наносимых плазменным напылением, встала задача прецизионной обработки неоднородных по структуре материалов. Она была успешно решена совместно с С.К. Сперанским – ведущим инженером лаборатории микропроцессорной техники и измерительной аппаратуры. Был реализован алгоритм управления скоростями движения инструмента и амплитудой его колебаний в соответствии с предварительно определенной на первых проходах неравномерностью съема материала. Результаты исследований были положены в основу кандидатской диссертации Н.В. Бекренева, ставшего в 1986 году начальником лаборатории.

Последними разработками лаборатории были настольный станок для обработки микроканалов глубиной до 5 мкм на плоских поверхностях и полуавтомат обработки микроканалов на цилиндрических поверхностях. Внедрение этих станков позволило сократить трудоемкость изготовления плоских деталей с 4 часов до 30 минут, цилиндрических – с 5 часов до 1 часа. В 1993 году по итогам визита делегации НИТИ в Китай был заключен и успешно выполнен контракт на поставку настольного ультразвукового станка для обработки хрупких материалов.

Во второй половине 90-х годов в связи с сокращением заказов дорогостоящие разработки электрофизического оборудования оказались временно не востребованными, и лаборатория в составе НИТИ была ликвидирована. Часть ее сотрудников продолжила работу по своему направлению в других организациях. В.А. Кривега, А.И. Зорин и В.Г. Моисеев работали в НПП НИМ, организованном кафедрой «Технология машиностроения» на Саратовском подшипниковом заводе. Ими были разработаны технологии и установки по ультразвуковой релаксации напряжений в кольцах подшипников и по раскалыванию колец. При их практическом содействии несколько аспирантов и сотрудников кафедры защитили кандидатские диссертации. В настоящее

время В.Г. Моисеев является одним из руководителей ООО «Ультразвук-ТЕО», занимающегося разработкой и внедрением установок для обработки жидких сред. Н.В. Бекренев перешел в СГТУ имени Гагарина Ю.А., где защитил докторскую диссертацию. Под его руководством по ультразвуковой тематике было защищено 6 кандидатских диссертаций. В настоящее время его научным направлением является исследование ультразвуковых методов модифицирования и обработки неоднородных материалов. В целом можно сказать, что лаборатория сохранилась в направлениях ее исследований и молодой смене ученых, занятых созданием электрофизических технологий в Саратове.

Статья поступила в редакцию 11.08.15, принята к опубликованию 11.09.15



ВАЗГЕН РУБЕНОВИЧ АТОЯН

1940



2010

5 августа 2015 г. В.Р. Атояну исполнилось бы 75 лет. Известия о его серьезной болезни и смерти пришли ко мне, как говорится, одно за другим, и я не поверил своим ушам. Не мог, не хотел верить... Начал звонить ... Неужели? ...

В.Р. Атоян отдал САДИ-СПИ-СГТУ более половины века. В 1962 г. он окончил Саратовский автодорожный институт и прошел все ступени научно-образовательной деятельности. Инженер. Старший преподаватель. Доцент. Декан энергетического факультета. Заместитель проректора по научной работе. Проректор по научной работе. Первый проректор, директор департамента науки и инноваций СГТУ.

Под руководством В.Р. Атояна была разработана модель одного из первых в России вузовских научно-технологических парков «Волга-техника», который он несколько лет возглавлял в должности генерального директора.

Кандидат технических наук В.Р. Атоян докторскую диссертацию защитил по экономическим наукам и внес значительный вклад в формирование научной школы по проблемам инновационной экономики. Он возглавлял ряд научно-технических программ Минобрнауки РФ инновационного направления, разработал законодатель-

ные акты по проблеме инновационной деятельности, принятые Саратовской областной думой.

Вазген Рубенович говорил мне, в те годы проректору по учебной работе СГТУ, о необходимости интегрирования технического и экономического образования и долго до перехода высшей школы России к обучению по направлениям высказывался за объединение родственных учебных специальностей.

Большой вклад внес В.Р. Атоян в создание Российского отделения международной исследовательской сети «Глобеликс». С 2009 г. он являлся президентом Академии инноватики как отделения GLOBELICS.

Большой вклад внес Вазген Рубенович в создание терминологической базы инновационной технологии. Как-то я в шутку спросил его, чем инновация отличается от инноватики и что такое инновационный кластер, инновационные задачи, инновационные решения, инновационное общество и могут ли быть инновационные дети, родители, дружба... И Вазген Рубенович стал скрупулезно разъяснять каждый термин... Шутки об инновациях он не любил.

В.Р. Атоян был активным, требовательным и исполнительным человеком. Поражала его работоспособность. Даже

когда ему нездоровилось, он сидел за своим рабочим столом, смотрел на посетителя грустными глазами и работал, работал, работал...

За плодотворную деятельность в сфере высшего образования и науки В.Р. Атоян награжден медалью «За трудовое отличие», ему присвоено звание «Почетный работник высшего профессионального образования РФ».

Вазген Рубенович стремился создать в СГТУ межкафедральные, межфакультетские научные школы. В 70-е годы, еще в СПИ, на кафедре электроники факультета электронной техники и приборостроения были начаты работы в области, как тогда говорили, СВЧ нагрева. С годами исследования в этой области начались на соседних кафедрах, затем на электрических кафедрах энергетического факультета. Мы общались, встречались на научных семинарах, участвовали в конференциях... В 2006 г. Вазген Рубенович предложил нам участвовать в первом Всероссийском конкурсе научных школ. Так в СГТУ появилась ведущая научная школа РФ в области инженерных и технических наук НШ-9553.2006.8 «Создание теории, исследование характеристик и разработка комплекта СВЧ электротехнологического оборудования для интенсификации широкого класса технологических процессов».

В последние годы В.Р. Атоян работал заведующим кафедрой «Экономика и управление в машиностроении». В те годы

я часто замечал на его лице грустные глаза. По-моему, ему было на кафедре тесно...

Однажды мы с ним участвовали в совещании у первого проректора университета. Речь шла о стратегии развития научной работы в СГТУ. Вазген Рубенович высказался за опору на межкафедральные, межфакультетские научные школы, но у большинства было другое мнение: кафедры предпочитают традиционно автономные научные исследования.

С совещания мы шли с Вазгеном Рубеновичем по коридору рядом. У него были грустные глаза, черное лицо. Я попробовал успокоить его, подбодрить, но он ответил такой грубостью, что я опешил, а Вазген Рубенович ускорил шаг.

По моей просьбе ему передали, что при следующей встрече я отвечу ему по-мужски жестко...

Не знаю, то ли так сложились обстоятельства или Вазген Рубенович стал избегать встречи, только мы с ним больше не виделись...

А потом одно за другим до меня дошли известия о болезни и смерти Вазгена Рубеновича...

Прошло пять лет, а мне все не верится, что Вазгена Рубеновича больше нет. Мне все кажется, подойди к двери, загляни в его кабинет, Вазген Рубенович, как всегда, сидит за своим рабочим столом, поднимет глаза, улыбнется и скажет свое традиционное: «Заходи, дорогой!»

*Профессор СГТУ
Ю.С. Архангельский*

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» обращаться по телефонам:

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

8(8452)99-87-21 — Алексеев Вадим Сергеевич (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 aeu@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** и иметь нумерацию.

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

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.

Редактор Л.А. Скворцова
Компьютерная верстка – В.И. Ермолаев, Ю.Л. Жупилова
Перевод на английский язык – А.Х. Аскарова

Почтовый адрес: 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77
Телефон: (845-2) 99-87-63
E-mail: aeu@sstu.ru

Подписано в печать 25.09.2015
Формат 60×84 1/8 Бум. офсет.
Усл. печ. л. 17,25 Уч. изд. л. 7,7
Тираж 500 экз. Заказ 158 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 2-е полугодие 2015 г.)
Свидетельство о регистрации СМИ *ПИ № ФС77-54621 от 01.07.2013*

Editor L.A. Skvortsova
Computer-assisted layout by V.I. Ermolaev, Yu.L. Zhupilova
Translation into English by A.H. Askarova

Address: 77 Politekhnikeskaya Str., 410054, Saratov, Russia
Tel.: (845-2) 99-87-63
E-mail: aeu@sstu.ru

Print date: 25.09.2015
Paper size: 60×84 1/8 Offset-Print
Conventional printed sheet 17,25 Publication base sheet 7,7
Circulation: 500 printed copies Order 158 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*

Уральский федеральный университет



Уральский университет является старейшим университетом Уральского региона. Он был открыт в Екатеринбурге в 1920 г. декретом главы советского правительства. Позднее на месте одного университета возникли два: Уральский государственный университет (УрГУ), связанный с подготовкой в области фундаментальных естественных, математических, гуманитарных и социальных наук, и Уральский политехнический институт (УПИ, Уральский государственный технический университет, УГТУ), ориен-

тированный на подготовку инженеров в области металлургии, машиностроения, строительства, радиотехники, энергетики. Кроме того, в УПИ динамично развивались и новые направления подготовки: ядерная энергетика, органическая химия, телекоммуникационные технологии.

Оба университета были тесно связаны друг с другом и с партнерами — промышленными предприятиями Урала. Благодаря этому Екатеринбург стал одним из крупнейших в России университетских городов.

В 2009 г. начался процесс объединения УГТУ и УрГУ в единый Уральский федеральный университет (УрФУ) и полностью завершился весной 2011 г.

УрФУ — полноправный участник и организатор нескольких крупных мероприятий в регионе: международной выставки и форума промышленности и инноваций «Иннопром», в формировании и реализации программ инновационного развития предприятий региона. Малые инновационные предприятия УрФУ каждый год представляют свои новинки на «Иннопроме». В 2013 году УрФУ организовал на выставке дискуссию «Корпорации и российские университеты: формула перезагрузки».

Уральский федеральный университет вместе с медиахолдингом «Эксперт» традиционно выступает организатором ежегодной конференции «Точки роста экономики Большого Урала». На этой площадке эксперты мирового уровня обсуждают пути развития региональной экономики.

УрФУ — один из крупнейших научно-образовательных центров, авторитет в сфере подготовки IT-специалистов. В июне 2014 г. при активной поддержке УрФУ в Екатеринбурге состоялся финал чемпионата мира по программированию

Уральский федеральный университет является местом проведения в Екатеринбурге Венского фестиваля музыкальных фильмов. Уникальные записи концертов классической музыки, фильмы-оперы на огромном экране под открытым небом ежегодно дарит университет всем гостям фестиваля.