

Издается с ноября 2013 года
Выходит один раз в квартал

№ 4 (25)
Декабрь 2019

ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

Журнал включён в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, рекомендованных для публикаций Высшей аттестационной комиссией Минобрнауки России

Главный редактор	АРХАНГЕЛЬСКИЙ ЮРИЙ СЕРГЕЕВИЧ
Зам. главного редактора	БЕКРЕНЕВ НИКОЛАЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ
Ответственный секретарь	ЮДИНА ВИОЛЕТТА ОЛЕГОВНА

Редакционная коллегия

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
Ю.В. ГУЛЯЕВ	д.ф.-м.н., профессор, академик РАН, ИРЭ имени В.А. Котельникова РАН, Москва
В.Б. ДЕМИДОВИЧ	д.т.н., профессор, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург
Л.С. ЗИМИН	д.т.н., профессор, СамГТУ, Самара
С.Г. КАЛГАНОВА	д.т.н., доцент, 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, ТвГТУ, Тверь
Г.А. МОРОЗОВ	д.т.н., профессор, КНИТУ-КАИ имени А.Н. Туполева, Казань
Ю.П. ПЕРЕЛЫГИН	д.т.н., профессор, ПГУ, Пенза
А.Ф. РЕЗЧИКОВ	д.т.н., профессор, член-корреспондент РАН, ИПТМУ РАН, Саратов
И.В. РОДИОНОВ	д.т.н., доцент, 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
Ю.Б. ТОМАШЕВСКИЙ	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
Г.Г. УГАРОВ	д.т.н., профессор, КТИ, Камышин
В.Н. ХМЕЛЕВ	д.т.н., профессор, БТИ, Бийск
В.А. ЦАРЕВ	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
В.О. ЮДИНА	ассистент, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

Since November 2013
Published Quarterly

№ 4 (25)
December 2019

JOURNAL OF ELECTROTECHNICS

Scientific and Technical Publication

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

The journal is included in the List peer-reviewed scientific publications, recommended for publication by the Higher Attestation Commission of the Ministry of education and science Russia

Editor-in-Chief:
Assistant to the Editor-in-Chief:
Chief Executive Officer

ARKHANGELSKY YURI SERGEEVICH
BEKRENEV NIKOLAY VALERYEVICH
YUDINA VIOLETTA OLEGOVNA

Editorial Board Members

Yu. S. ARKHANGELSKY	Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
N.V. BEKRENEV	Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
Yu.V. GULYAEV	Dr.Sc., Professor, Academician of RAS, Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Moscow
V.B. DEMIDOVICH	Dr.Sc., Professor, Saint Petersburg State Electrotechnical University «LETI», St.Petersburg
L.S. ZIMIN	Dr.Sc., Professor, Samara State Technical University, Samara
S.G. KALGANOVA	Dr.Sc., Associate Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
V.N. LYASNIKOV	Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
A.N. MAKAROV	Dr.Sc., Professor, Tver State Technical University, Tver
G.A. MOROZOV	Dr.Sc., Professor, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan
Yu.P. PERELIGIN	Dr.Sc., Professor, Penza State University, Penza
A.F. REZCHIKOV	Dr.Sc., Professor, Corresponding Member of RAS, Institute of Precision Mechanics and Control of RAS, Saratov
I.V. RODIONOV	Dr.Sc., Associate Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
V.P. RUBTSOV	Dr.Sc., Professor, National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow
F.N. SARAPULOV	Dr.Sc., Professor, Ural Federal University, Ekaterinburg
Yu.B. TOMASHEVSKY	Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
S.V. TRIGORLY	PhD, Associate Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
G.G. UGAROV	Dr.Sc., Professor, Kamishin
V.N. KHMELEV	Dr.Sc., Professor, Biysk Technological Institute, Biysk
V.A. TSAREV	Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
V.O. YUDINA	Assistant, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ

Сивяков Б.К., Григорьян С.В. Математическое моделирование многоволновой СВЧ установки для сушки продуктов 5

Тухватуллин М.И., Аипов Р.С. Технологическая установка для СВЧ сушки пиломатериалов 12

Сперанский С.К., Родионов И.В. Лазерные технологии в науке и производстве (обзор). 1. Технологические особенности лазерной сварки и пайки различных материалов 18

Юдина В.О., Архангельский Ю.С. Транспортные системы СВЧ электро-технологических установок на камерах гибридного типа 38

Антонов И.Н., Пименов А.Н., Пименов О.Н. Двухтактный источник вторичного электропитания магнетрона для формирования устойчивого СВЧ разряда в потоке газа 44

Тухватуллин М.И. Результаты экспериментальных исследований сушки пиломатериалов в СВЧ установке 50

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

Вырыханов Д.А., Угаров Г.Г., Мошкин В.И. Структурный анализ процесса электромеханического преобразования энергии 57

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

Миргородская Е.Е., Митяшин Н.П., Томашевский Ю.Б., Голембиовский Ю.М., Мирошниченко А.Ю. Универсальный источник питания многоуровневого инвертора напряжения с заданным гармоническим составом выходной кривой 65

Плащанский Л.А., Решетняк М.Ю. Устройство автоматизированного мониторинга качества электрической энергии в подземных сетях угольных шахт 74

ЭЛЕКТРОНИКА

Тищенко О.Д., Зоркин А.Я., Родионов И.В., Тищенко А.А., Горбунова Е.Н. Формирование характеристик импрегнированных катодов приборов М-типа с мгновенной готовностью на основе совершенствования электро-технологических процессов 81

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

Баринов Д.А., Ковряков П.В., Коломейцев В.А., Кузьмин Ю.А. Влияние перехода быстрой волны основного типа в медленную на электродинамические свойства прямоугольного волновода с диэлектрической пластиной в Н-плоскости 90

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Проскураков В.И., Родионов И.В., Сурменко Е.Л., Соколова Т.Н. Влияние состава обмазочного слоя на характеристики поверхности стали 12Х18Н10Т после лазерного импульсного легирования 101

ИЗМЕРЕНИЯ

Наимов У.Р., Данилов С.Н. Алгоритм функционирования информационно-измерительной системы оценки координат беспилотных летательных аппаратов 107

К сведению авторов 117

CONTENTS

ELECTROTHERMY

- Sivvyakov B.K., Grigoryan S.V.** Mathematical modeling of multi-wave microwave installations for drying products 5
- Tukhvatullin M.I., Aipov R.S.** Process unit for microwave drying of lumber 12
- Speransky S.K., Rodionov I.V.** Laser technology in science and industry. Part 1: Technological features of laser welding and soldering of various materials 18
- Yudina V.O., Archangelsky Yu.S.** The transport system of the microwave electrotechnological installations on the cameras hybrid type 38
- Antonov I.N., Pimenov A.N., Pimenova O.N.** A half-wave magnetron secondary power supply for the formation of the application of a microwave discharge in a gas stream 44
- Tukhvatullin M.I.** Results of experimental researches of drying of lumber in a microwave installation 50

ELECTROMECHANICS

- Vyrykhanov D.A., Ugarov G.G., Moshkin V.I.** Structural analysis of the process electromechanical energy conversion 57

ELECTRIC POWER SUPPLY

- Mirgorodskaya E.E., Mityashin N.P., Tomashevskiy Yu.B., Golembiovskiy Yu.M., Miroschnichenko A.Yu.** Universal power supply for a multi-level voltage inverter with the required spectrum of the output voltage 65

Plashchansky L.A., Reshetnyak M.Yu.

- Automated monitoring device quality of electric energy in underground networks coal mine 74

ELECTRONICS

- Tishchenko O.D., Zorkin A.Ya., Rodionov I.V., Tishchenko A.A., Gorbunova E.N.** Formation of characteristics of impregnated cathodes of M-type devices with instant readiness on the basis of improvement of electrotechnological processes 81

ELECTRODYNAMICS

- Barinov D.A., Kovryakov P.V., Kolomeytssev V.A., Kuzmin Yu.A.** The effect of the transition of a fast dominant wave into a slow one on the electrodynamic properties of a rectangular waveguide with a dielectric plate in the H-plane 90

MATERIALS SCIENCE

- Proskuryakov V.I., Rodionov I.V., Surmenko E.L., Sokolova T.N.** Influence of the composition of the coating layer on the surface characteristics of steel 12X18H10T after laser pulse alloying 101

MEASUREMENTS

- Naimov U.R., Danilov S.N.** Algorithm for functioning of information-measuring system for assessing coordinates of unmanned aerial vehicles 107
- Information for Authors 117

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ

УДК 621.37, 621.365

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОВОЛНОВОЙ СВЧ УСТАНОВКИ ДЛЯ СУШКИ ПРОДУКТОВ

Б.К. Сивяков, С.В. Григорьян

MATHEMATICAL MODELING OF MULTI-WAVE MICROWAVE INSTALLATIONS FOR DRYING PRODUCTS

B.K. Sivyakov, S.V. Grigoryan

СВЧ технологии занимают все большее место в сельском хозяйстве и пищеперерабатывающей промышленности. В частности, в последнее время для фермерских хозяйств все более важное значение приобретает энергоэффективное, малогабаритное оборудование для сушки различных типов сельхозпродукции и предварительной обработки ее перед закладкой на длительное хранение. Для уменьшения габаритов установки СВЧ сушки используют двойной проход продукта через одну камеру за один цикл обращения конвейера, однако это приводит к возрастанию неравномерности распределения СВЧ энергии от концов к середине камеры. Применение нескольких генераторов, вводы энергии которых в камеру распределены вдоль ее длины, позволяет уменьшить неравномерность распределения СВЧ энергии вдоль камеры. В этом случае камера работает в режиме многоволновой обработки продукта за счет применения нескольких независимых СВЧ генераторов. Приведены результаты математического моделирования различных схем построения таких установок.

Ключевые слова: математическое моделирование, математические модели, установки многоволновой СВЧ сушки сельскохозяйственной продукции, распределение СВЧ энергии вдоль камеры

Microwave technologies are increasingly important in agriculture and the food processing industry. In particular, energy-efficient, small-sized equipment for drying various types of agricultural products and pre-processing them before laying them for long-term storage has become increasingly important for farms in recent years.

To reduce the size of the microwave drying unit, a double pass of the product through one chamber during one cycle of the conveyor circulation is used, but this leads to an increase in the uneven distribution of microwave energy from the ends to the middle of the chamber. The use of several generators whose energy inputs to the chamber are distributed along its length reduces the uneven distribution of microwave energy along the chamber. In this case, the camera operates in multi-wave product processing mode by using several independent microwave generators. The results of mathematical modeling of various schemes for constructing such devices are presented.

Keywords: mathematical modeling, mathematical models, installations of multi-wave microwave drying of agricultural products, distribution of microwave energy along the chamber

В настоящее время известны следующие классы камер СВЧ электротермического оборудования: камеры со стоячей волной на резонаторах, камеры с бегущей волной на отрезках волноводов, камеры с облучением объекта с помощью антенн [1] и камеры со встречными бегущими волнами на волноводе, свернутом в кольцо [2]. Волноводные камеры широко применяются для сушки сельхозпродукции [3], которая характеризуется значительным затуханием волны, особенно в начале сушки, что ведет к неравномерности выделения СВЧ энергии в продукте вдоль оси камеры. Известные волноводные камеры не обеспечивают равномерность выделения СВЧ энергии, уровень которой значительно падает по длине камеры с удалением от начала, где подается энергия в камеру. Для достижения равномерности распределения СВЧ энергии было предложено подавать в камеру СВЧ энергию от двух отдельных генераторов, подключенных к обоим концам камеры [4]. Подобные камеры на квазиоптическом желобковом волноводе (ЖВ) производились предприятием ООО НПФ «Этна плюс» (г. Саратов). Сушка сельхозпродукции требует мягкого воздействия СВЧ энергии на продукт с целью

исключения его порчи. Это обеспечивается многократным проходом продукта через несколько камер или циклическим – через одну для достижения требуемого уровня его влажности. В работе [5] предложено для уменьшения габаритов установки СВЧ сушки использовать двойной проход продукта за один цикл обращения конвейера через одну камеру, однако это приводит к возрастанию неравномерности распределения СВЧ энергии к середине камеры.

Настоящая работа посвящена математическому моделированию СВЧ процессов в камере, работающей в режиме многоволновой обработки продукта при использовании нескольких независимых генераторов для достижения равномерного распределения СВЧ энергии в камере.

Рассмотрим вариант конструкции с двумя генераторами, подключенными к концам камеры и работающими попеременно в течение периода промышленной частоты 50 Гц (рис. 1) [4, 5]. К ним добавим еще два генератора для инъекции дополнительной СВЧ энергии в целях выравнивания электромагнитного поля в рабочих зонах камеры (на рис. 1 заштрихованы), куда для сушки поступает кольцевой поток продукции [6].

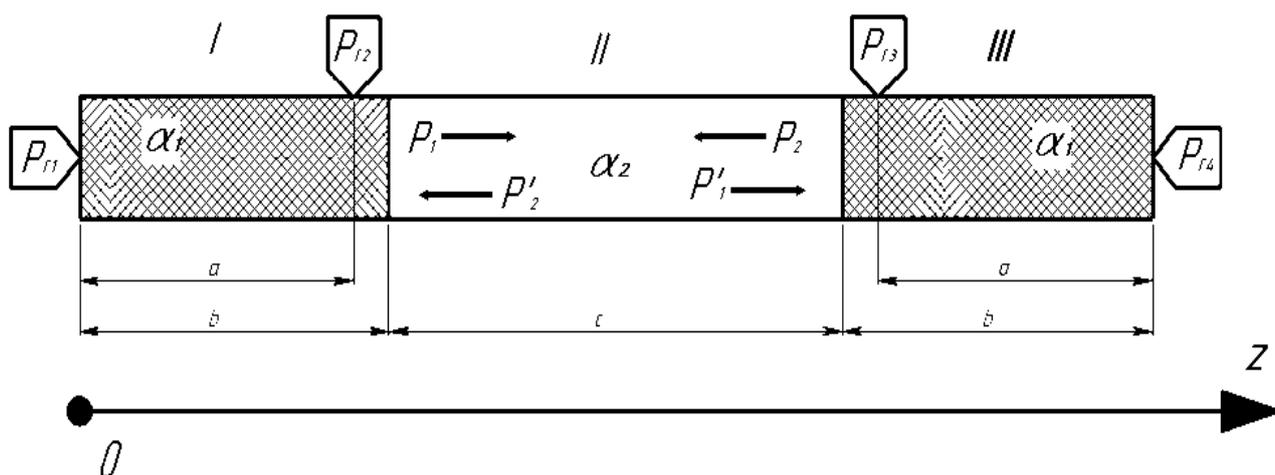


Рис. 1. Волноводная камера с четырьмя точками ввода СВЧ энергии и двумя рабочими зонами для прохождения обрабатываемого продукта: a – координата инъекции дополнительной энергии; b – ширина рабочей зоны; c – свободный участок волновода; α_1 – затухание энергии в слое продукта; α_2 – затухание энергии в свободном участке волновода; $P_{Г1} \dots P_{Г4}$ – значения мощности генераторов

Вся длина волновода разделена на три зоны: зоны *I* и *III* с затуханием СВЧ энергии в слое продукта и зона *II* – без продукта, где затухание очень мало (практически отсутствует).

Генераторы имеют одинаковые частоты, они не синхронизированы, поэтому суммарная СВЧ мощность в каждом сечении ЖВ будет равна сумме СВЧ мощностей от каждого генератора. Генераторы работают в импульсном режиме с частотой 50 Гц, один полупериод Γ_1 и Γ_3 , а второй – Γ_2 и Γ_4 , что уменьшает за счет потерь в продукте их взаимное влияние. Каждый генератор отдает в камеру среднюю мощность P_{Γ} . Энергетический (тепловой) эффект СВЧ нагрева будет определяться потерями средней СВЧ мощности от всех генераторов в камере

на единицу длины (удельной мощностью)

$$P_{y\partial}(z) = -\frac{dP(z)}{dz} \quad [6].$$

Для каждой зоны определим суммарную СВЧ мощность в камере $P(z)$ от всех генераторов и удельную мощность $P_{y\partial}(z)$, преобразуемую в тепловую энергию в каждом сечении камеры:

$$P(z) = P_{\Gamma_1}(z) + P_{\Gamma_2}(z) + P_{\Gamma_3}(z) + P_{\Gamma_4}(z), \quad (1)$$

$$P_{y\partial}(z) = -\frac{dP(z)}{dz}.$$

Для каждой области камеры имеем:

область 1 ($0 \leq z < b$):

$$P(z) = P_{\Gamma_1} e^{-2\alpha_1 z} + 0,5 P_{\Gamma_2} e^{-2\alpha_1 |z-a|} + 0,5 P_{\Gamma_3} e^{-2\alpha_1 (b-a)} e^{-2\alpha_2 c} e^{-2\alpha_1 (b-z)} + P_{\Gamma_4} e^{-2\alpha_1 b} e^{-2\alpha_2 c} e^{-2\alpha_1 (b-z)}, \quad (2)$$

$$P_{y\partial}(z) = 2 \alpha_1 P_{\Gamma_1} e^{-2\alpha_1 z} + \alpha_1 P_{\Gamma_2} e^{-2\alpha_1 |z-a|} + \alpha_1 P_{\Gamma_3} e^{-2\alpha_1 (2b+c-a-z)} + 2 \alpha_1 P_{\Gamma_4} e^{-2\alpha_1 (2b+c-z)}; \quad (3)$$

область 2 ($b \leq z < (b+c)$):

$$P(z) = P_{\Gamma_1} e^{-2\alpha_1 b} e^{-2\alpha_2 (z-b)} + 0,5 P_{\Gamma_2} e^{-2\alpha_1 (b-a)} e^{-2\alpha_2 (z-b)} + 0,5 P_{\Gamma_3} e^{-2\alpha_1 (b-a)} e^{-2\alpha_2 [(b+c)-z]} + P_{\Gamma_4} e^{-2\alpha_1 b} e^{-2\alpha_2 ((b+c)-z)}, \quad (4)$$

$$P_{y\partial}(z) = 2 \alpha_2 P_{\Gamma_1} e^{-2\alpha_2 z} + \alpha_2 P_{\Gamma_2} e^{-2\alpha_2 (z-a)} + \alpha_2 P_{\Gamma_3} e^{-2\alpha_2 (2b+c-a-z)} + 2 \alpha_2 P_{\Gamma_4} e^{-2\alpha_2 (2b+c-z)}; \quad (5)$$

область 3 ($(b+c) \leq z < (2b+c)$):

$$P(z) = P_{\Gamma_1} e^{-2\alpha_1 b} e^{-2\alpha_2 c} e^{-2\alpha_1 [z-(b+c)]} + 0,5 P_{\Gamma_2} e^{-2\alpha_1 (b-a)} e^{-2\alpha_2 c} e^{-2\alpha_1 [z-(b+c)]} + 0,5 P_{\Gamma_3} e^{-2\alpha_1 [z-(2b+c-a)]} + P_{\Gamma_4} e^{-2\alpha_1 [(2b+c)-z]}, \quad (6)$$

$$P_{y\partial}(z) = 2 \alpha_1 P_{\Gamma_1} e^{-2\alpha_1 z} + \alpha_1 P_{\Gamma_2} e^{-2\alpha_1 |z-a|} + \alpha_1 P_{\Gamma_3} e^{-2\alpha_1 (2b+c-a-z)} + 2 \alpha_1 P_{\Gamma_4} e^{-2\alpha_1 (2b+c-z)}. \quad (7)$$

Разработанная математическая модель энергетических процессов в многоволновой камере с четырьмя генераторами (2)-(7) реализована в программе в среде Microsoft .NETC#, предоставляющей возможность визуализации результатов математического моделирования процессов. Визуализация результатов моделирования в сочетании с простотой и наглядностью задания всех параметров моделирования позволяет в интерактивном режиме проектирования оптимизи-

ровать СВЧ установку по критерию достижения равномерной мощности, поглощаемой в продукте.

На рис. 2 приведено рабочее окно программы со схематическим изображением рабочей зоны на желобковом волноводе СВЧ установки сушки с возможностью оперативного задания всех параметров моделирования и приведены на графике результаты моделирования.

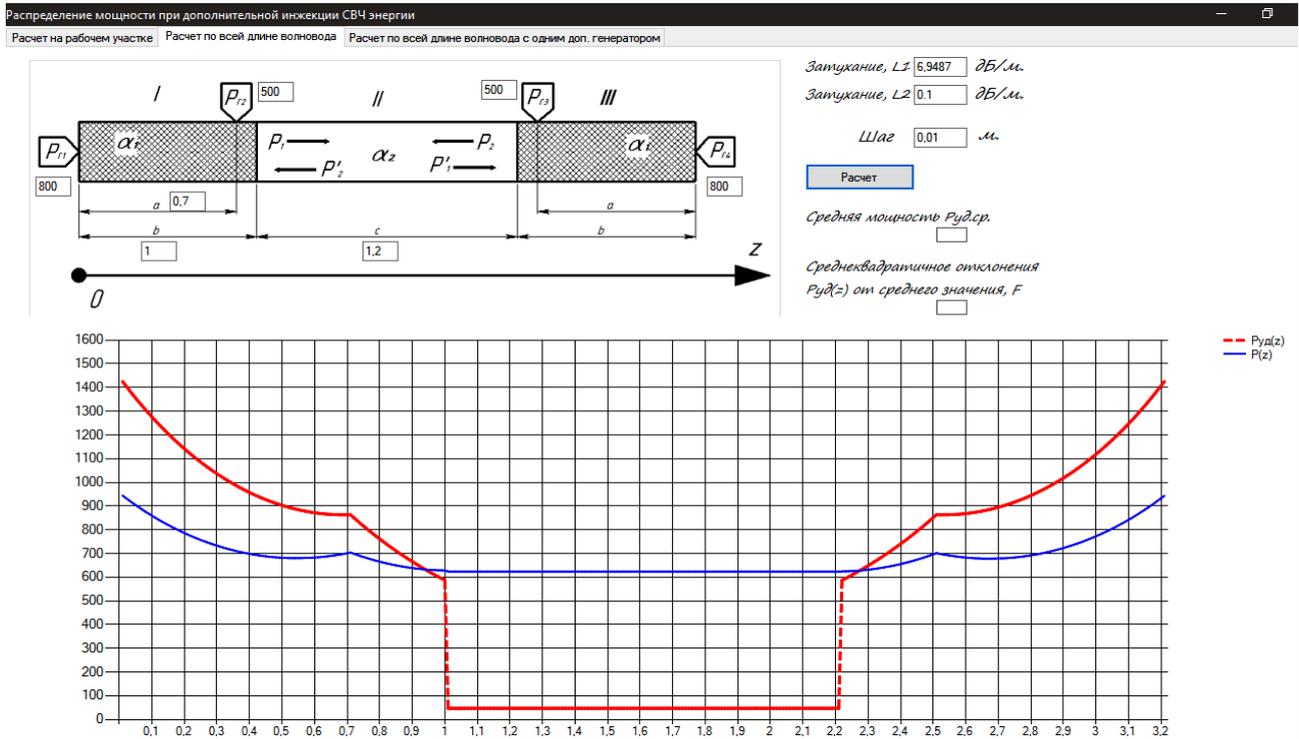


Рис. 2. Рабочее окно программы моделирования процессов в многоволновой камере с двумя рабочими зонами и четырьмя генераторами: — — $P_{y0}(z)$, — — $P(z)$

Анализ приведенных результатов показывает, что в данном варианте СВЧ камеры с четырьмя генераторами с инжекцией СВЧ энергии вблизи концов рабочих зон наблюдается заметное нарушение равномерности распределения мощности на концах рабочих зон с продуктом, что нежелательно.

область 1, $0 \leq z < b$:

$$P(z) = P_{Г1} e^{-2\alpha_1 z} + P_{Г2} e^{-2\alpha_1 b} e^{-2\alpha_2 c} e^{-2\alpha_1 (b-z)} + 0,5 P_{Г3} e^{-\alpha_2 c} e^{-2\alpha_1 (b-z)}, \quad (8)$$

В связи с этим была предложена другая конструкция СВЧ камеры, в которой дополнительная инжекция СВЧ энергии производилась от третьего генератора в середине камеры.

Была разработана аналогичная математическая модель такой камеры, которая представлена ниже:

$$P_{y0}(z) = 2 \alpha_1 P_{\Gamma 1} e^{-2\alpha_1 z} + 2 \alpha_1 P_{\Gamma 2} e^{-2\alpha_1(2b+c-z)} + \alpha_1 P_{\Gamma 3} e^{-2\alpha_1(z-\frac{c}{2}+b)}; \quad (9)$$

область 2, $b \leq z < (b+c)$:

$$P(z) = P_{\Gamma 1} e^{-2\alpha_1 b} e^{-2\alpha_2(z-b)} + P_{\Gamma 2} e^{-2\alpha_1 b} e^{-2\alpha_2(b+c-z)} + 0,5P_{\Gamma 3} e^{-2\alpha_2|z-(b+c/2)|}, \quad (10)$$

$$P_{y0}(z) = 2 \alpha_2 P_{\Gamma 1} e^{-2\alpha_2 z} + 2 \alpha_2 P_{\Gamma 2} e^{-2\alpha_2(2b+c-z)} + \alpha_2 P_{\Gamma 3} e^{-2\alpha_2|z-\frac{c}{2}+b|}, \quad (11)$$

область 3, $(b+c) \leq z < (2b+c)$:

$$P(z) = P_{\Gamma 1} e^{-2\alpha_1 b} e^{-2\alpha_2 c} e^{-2\alpha_1[z-(b+c)]} + P_{\Gamma 2} e^{-2\alpha_1(2b+c-z)} + 0,5P_{\Gamma 3} e^{-\alpha_2 c} e^{-2\alpha_1[z-(b+c)]}, \quad (12)$$

$$P_{y0}(z) = 2 \alpha_1 P_{\Gamma 1} e^{-2\alpha_1 z} + 2 \alpha_1 P_{\Gamma 2} e^{-2\alpha_1(2b+c-z)} + \alpha_1 P_{\Gamma 3} e^{-2\alpha_1|z-\frac{c}{2}+b|}. \quad (13)$$

На рис. 3 приведено рабочее окно программы в среде Microsoft .NETC#, в котором реализована математическая модель (8)-(13) со схематическим изображением рабочей зоны на желобковом волноводе СВЧ установки сушки в случае трех гене-

раторов и приведены результаты моделирования. Дополнительная инжекция мощности от второго генератора осуществляется в середине камеры на желобковом волноводе.

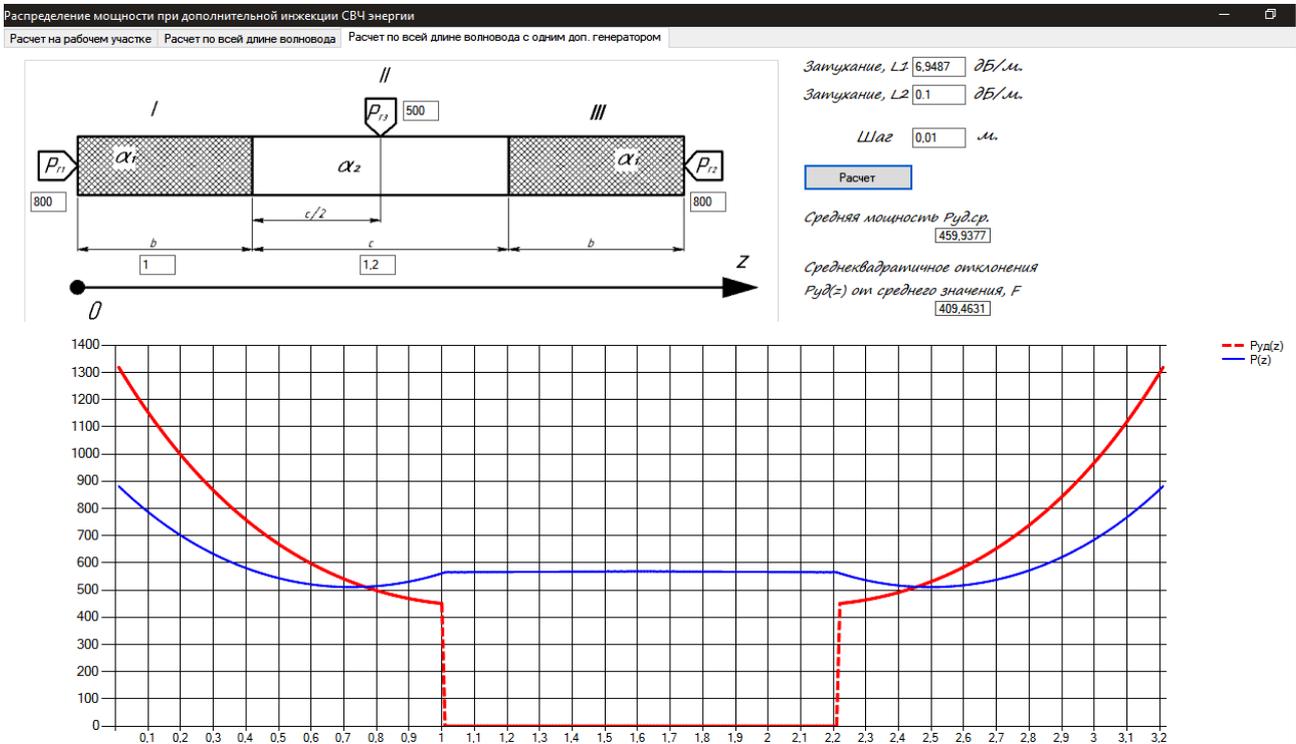


Рис. 3. Рабочее окно программы моделирования процессов в многоволновой камере с двумя рабочими зонами и тремя генераторами: --- $P_{y0}(z)$, — $P(z)$

Данная конструкция имеет ряд преимуществ по сравнению с предыдущей. Во-первых, требуется только один генератор для дополнительной инъекции мощности. Во-вторых, возможно питание от трехфазной сети.

В этом случае каждый генератор запитывается от отдельной фазы промышленной трехфазной сети через специальный трансформатор. При достижении критического напряжения в положительном полупериоде начинается генерация магнетрона. При напряжении ниже критического генерация заканчивается. Амплитудное значение напряжения подбирается таким, чтобы оно лежало в области рабочих напряжений магнетрона. Такой режим питания магнетронов от однофазной сети используется в выпускаемой предприятием ООО НПФ «Этна плюс» установке сушки и он показал свою работоспособность и эффективность за счет простоты блока питания магнетронов. В этом случае магнетроны работают в импульсном режиме в различные моменты времени и не влияют на работу друг друга. Поэтому такая схема питания от трехфазной сети не требует дополнительных устройств, кроме соответствующего трансформатора. В данной конструкции многоволновой камеры сушки, как показали ре-

зультаты математического моделирования камеры, обеспечивается наиболее равномерное распределение и поглощение СВЧ мощности в продукте, поэтому она может быть рекомендована к применению.

Таким образом, разработаны математические модели и программы моделирования многоволновой сушки продуктов с дополнительной инъекцией СВЧ энергии в рабочие зоны камеры. Осуществлено математическое моделирование энергетических процессов в камере в случае использования двух и одного дополнительного генераторов. В результате моделирования установлено, что использование одного генератора обеспечивает большую равномерность распределения и поглощения СВЧ мощности в продукте, что упрощает конструкцию камеры и увеличивает надежность ее работы. Разработанные в среде Microsoft .NETC# программные продукты обладают возможностью визуализации результатов математического моделирования процессов, что в сочетании с простотой и наглядностью интерфейса программы для пользователя позволяет проектировщику в интерактивном режиме оптимизировать СВЧ установку по критерию достижения равномерного распределения мощности, поглощаемой в продукте.

ЛИТЕРАТУРА

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

2. **Сивяков Д.Б.** Камера с бегущими волнами на волноводе, свернутом в кольцо / Д.Б. Сивяков // Вопросы электротехнологии. 2017. № 2. С. 29-33.

3. **Явчуновский В.Я.** Микроволновая и комбинированная сушка: физические основы, технологии и оборудование / В.Я. Явчуновский. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1999. 217 с.

4. Пат. РФ № 2084084. Установка для СВЧ обработки диэлектрических материалов / В.А. Малярчук, В.И. Миркин, С.Г. Сучков и др. 1997. Бюл. № 12.

5. **Сивяков Б.К.** Установка СВЧ сушки сельскохозяйственных продуктов в фермерских хозяйствах / Б.К. Сивяков, С.В. Григорьян // Вопросы электротехнологии. 2019. № 1. С. 9-13.

6. **Sivyakov B.K.** Mathematical Model of Microwave Camera on the Groovewaveguide with Additional Injection of the Microwave

Energy / B.K. Sivyakov, S.V. Grigorjan,
D.B. Sivyakov // International Conference on

Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE. 2018. Vol. 1. P. 334-337.

Сивяков Борис Константинович – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Boris K. Sivyakov – Dr. Sc., Professor, Department «Electric power and electrical engineering» Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Григорьян Сейран Вагифович – аспирант кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Seyran V. Grigoryan – Postgraduate, Department «Electric power and electrical engineering» Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 20.09.19, принята к опубликованию 15.11.19

УДК 621.365.5

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ СВЧ СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ

М.И. Тухватуллин, Р.С. Аипов

PROCESS UNIT FOR MICROWAVE DRYING OF LUMBER

M.I. Tukhvatullin, R.S. Aipov

Составлена конструктивная схема технологической установки. Разработаны имитационная модель и конструкция технологической установки для СВЧ сушки пиломатериалов вращением их в пространстве рабочей камеры при дискретном расположении магнетронов. Приведены результаты моделирования процесса сушки штабеля пиломатериалов в технологической установке.

Ключевые слова: СВЧ сушка, имитационная модель, технологическая установка, магнетроны, пиломатериалы, влажность, температура

В существующих установках для СВЧ сушки пиломатериалов используются мощные магнетроны, которые отличаются высокой стоимостью обслуживания и эксплуатации (затраты электрической энергии на сушку 1 м³ древесины составляют 700...900 кВт·ч). В процессе сушки в таких установках в штабеле пиломатериалов возникают локальные перегревы древесины, находящейся ближе к магнетрону, а древесина, расположенная в глубине штабеля, не высыхает до необходимого влагосодержания [1].

При анализе существующих способов СВЧ сушки пиломатериалов выделяют следующие основные недостатки процесса сушки [2]:

– неравномерное распределение СВЧ энергии вдоль штабеля пиломатериалов, что не позволяет получить качественно высушенный материал;

– увеличение потребляемой электрической энергии.

A constructive diagram of the technological installation is drawn up. A simulation model and the design of a technological installation for microwave drying of lumber by rotating them in the space of the working chamber with a discrete arrangement of magnetrons have been developed. The results of modeling the process of drying a stack of lumber in a processing unit are presented.

Keywords: microwave drying, simulation model, technological installation, magnetrons, lumber, humidity, temperature

Вышеперечисленные недостатки устранены в технологической установке для СВЧ сушки пиломатериалов вращением их в пространстве рабочей камеры при дискретном расположении магнетронов.

Конструктивная схема технологической установки приведена на рис. 1.

Технологическая установка представляет собой рабочую камеру 1, на боковых поверхностях которой расположены магнетроны 2. Магнетроны имеют волноводный вывод энергии. В камере установлен вращающийся вал 3, на который с двух сторон установлены рамы с креплениями для пиломатериалов 4. Вращательное движение вала можно осуществлять как в ручном, так и в автоматическом режиме за счет установленного двигателя 5. Сверху на рабочей камере установлена крышка для обеспечения электрической герметизации установки. В установке можно регулировать количество работающих магнетронов и скорость вращения

пиломатериалов. На торцевой части камеры установлен вентилятор 7 для конвективной термообработки по удалению влаги [3].

Для защиты персонала от электромагнитного поля сверхвысокой частоты вокруг установки смонтирован экран из стальной сетки.

Имитационная модель технологической установки в программной среде MATLAB/Simulink приведена на рис. 2.

Модель состоит из подсистемы, входными сигналами которой являются выходы семи блоков, моделирующих магнетроны. Четыре из них (в нижней части) подключены всегда, а верхние можно подключать и отключать с помощью верхнего из двух ключей (Magn Switch). Нижний ключ (Rotate Switch) управляет включением механизма вращения.

В зависимости от положения ключей меняются режимы работы установки:

– включены 7 магнетронов и механизм вращения штабеля пиломатериалов;

– включены 4 магнетрона и механизм вращения штабеля пиломатериалов;

– включены 7 магнетронов, механизм вращения штабеля пиломатериалов отключен;

– включены 4 магнетрона, механизм вращения штабеля пиломатериалов отключен.

В верхнем левом углу модели помещены индикаторы положения ключей. В качестве источников в модели используется блок «Step», включающий магнетроны, и блоки «Constant», задающие начальные значения температуры и влажности, желаемую конечную влажность. Источник «Constant» = 0 используется для реализации положения «отключено» ключей Magn Switch и Rotate Switch. Процесс моделирования происходит в задаваемый пользователем промежуток времени.

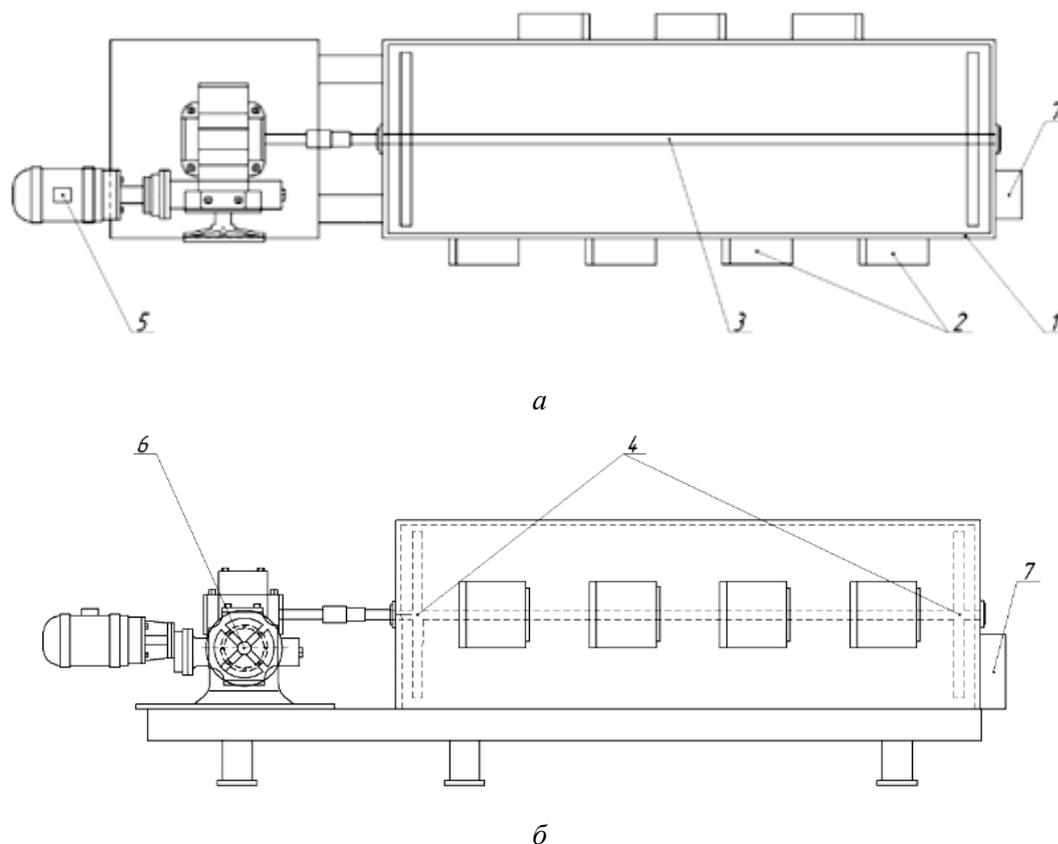


Рис. 1. Конструктивная схема технологической установки: *а* – вид сверху; *б* – вид сбоку (1 – рабочая камера; 2 – источники СВЧ энергии; 3 – вращающийся вал; 4 – рамы с креплениями для древесных заготовок; 5 – двигатель привода вращения деревянных заготовок; 6 – механизм для ручного вращения пиломатериалов; 7 – вентилятор для конвективной термообработки по удалению влаги)

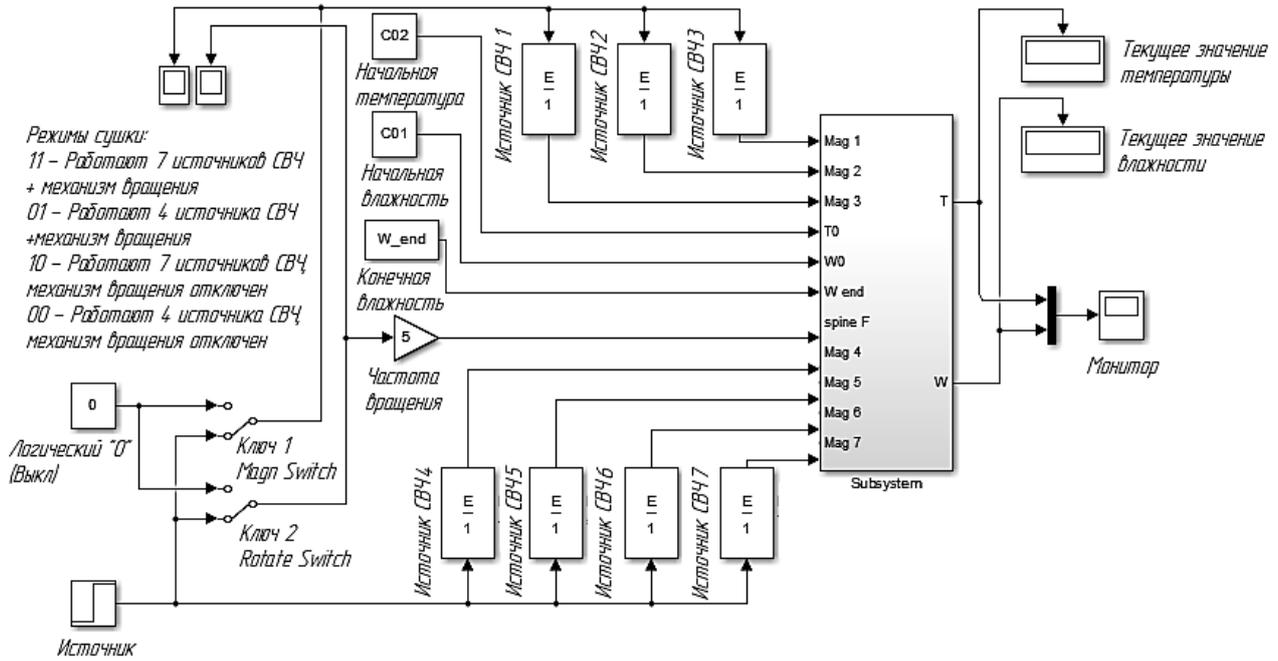


Рис. 2. Имитационная модель технологической установки в программной среде MATLAB/Simulink

Для визуализации моделируемых процессов справа размещен индикатор Score, отображающий графики изменения температуры и влажности от времени. Также в правом верхнем углу расположены два цифровых индикатора, отображающие текущие значения температуры и влажности. Вид подсистемы по рис. 2 приведен на рис. 3.

В левой части рис. 3 показаны MatLab-функции, используемые для преобразова-

ния начальных условий в логические сигналы, подающиеся в блок SWITCHES.

В правой части рис. 3 показаны 4 одноступенчатых последовательно соединенных блока, соответствующие четырем участкам выбранного режима. Каждый из блоков PART включает визуальные модели первых частей для всех четырех возможных режимов.

На рис. 4 приведен развернутый вид блока PART 1.

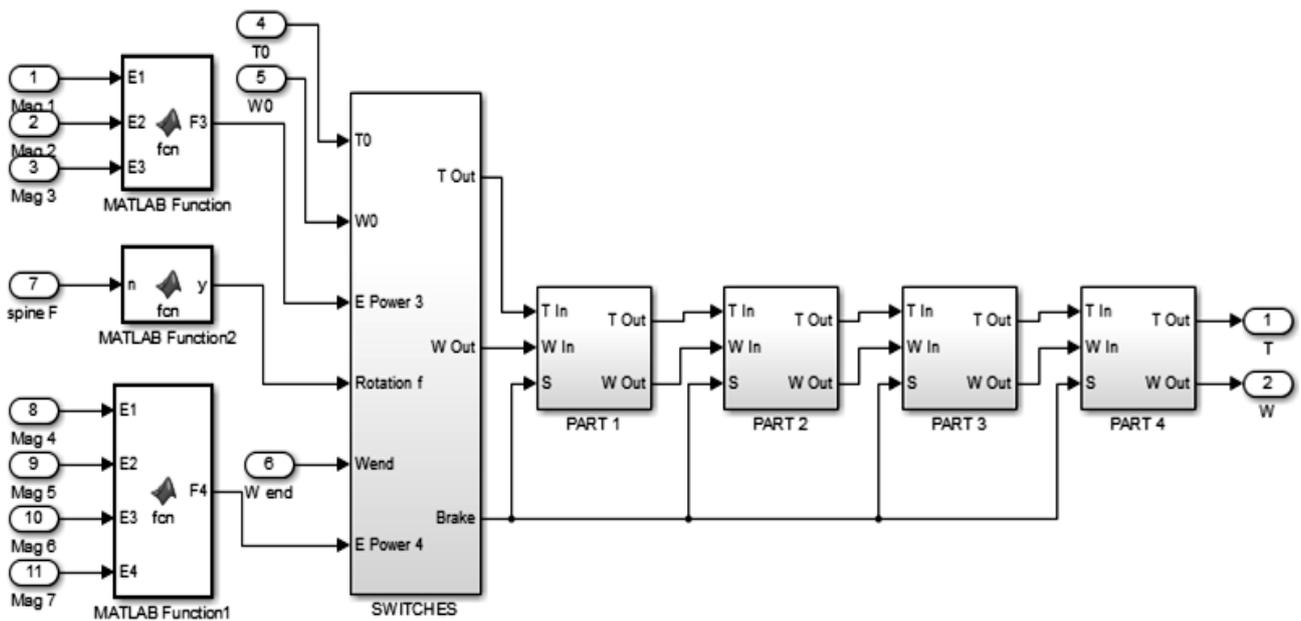


Рис. 3. Модель установки в Simulink – подсистеме

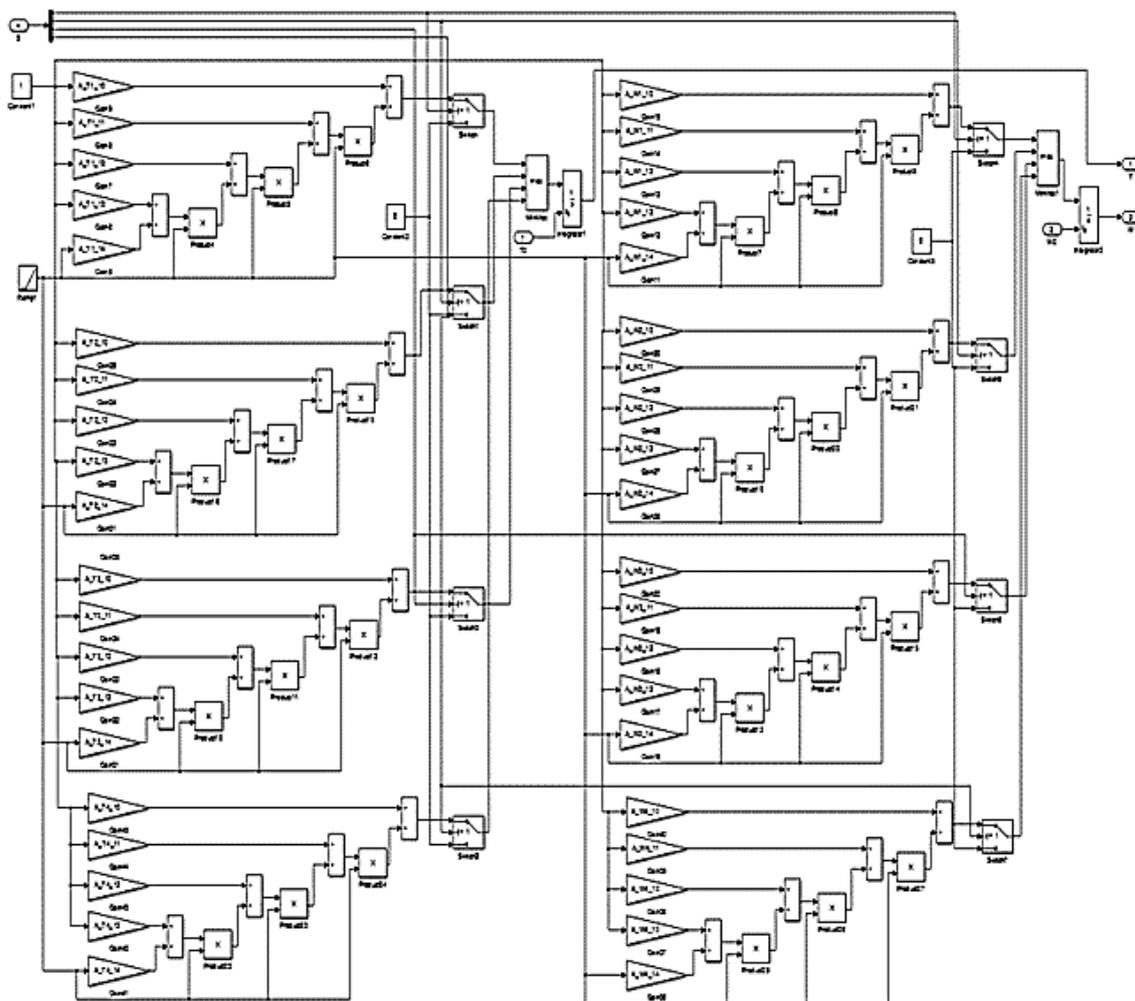


Рис. 4. Модель установки в Simulink – блок PART 1

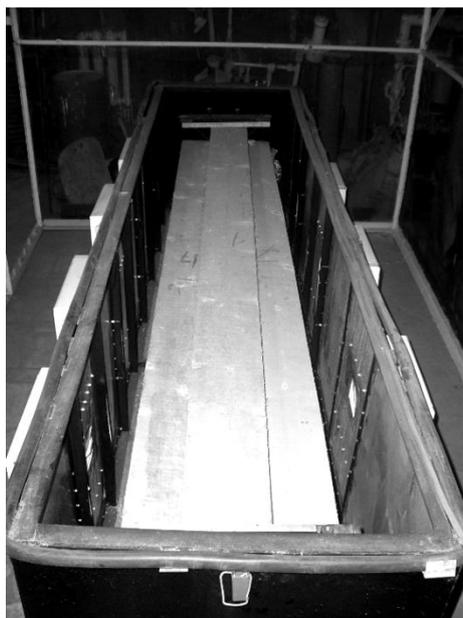
На основании имитационной модели составлена программа для моделирования СВЧ сушки пиломатериалов в различных режимах.

Общий вид технологической установки приведен на рис. 5.

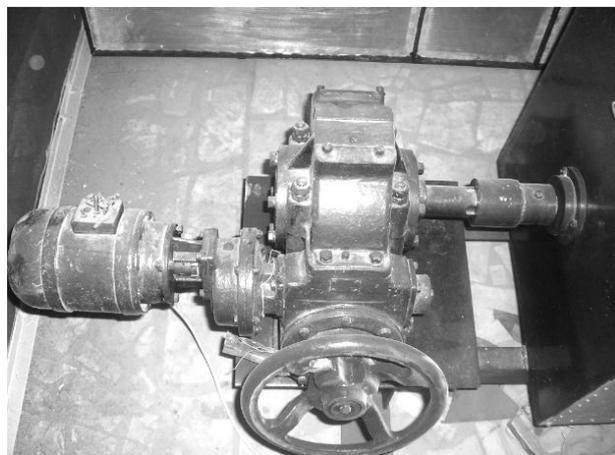
Основные конструктивные элементы установки приведены на рис. 6.



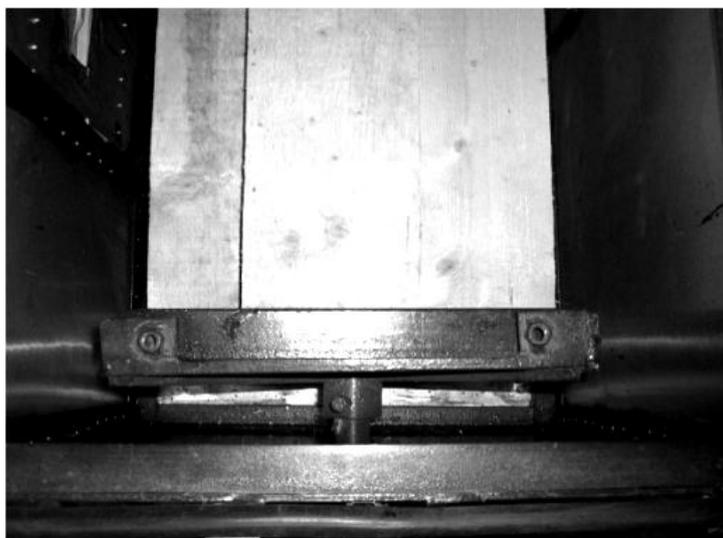
Рис. 5. Общий вид технологической установки



а



б



в

Рис. 6. Основные конструктивные элементы установки: *а* – рабочая камера; *б* – двигатель с редуктором для вращения штабеля пиломатериалов вокруг своей оси; *в* – рама для крепления штабеля пиломатериалов

Камера установки представляет собой цельнометаллический каркас. Толщина стенок составляет 3...5 мм. Наружный слой изготавливается из стали с лакокрасочным покрытием. Внутренний слой во избежание коррозии изготавливается из алюминия.

На рис. 7 приведены результаты моделирования процесса сушки штабеля пиломатериалов в технологической установке с начальными условиями: влажность 84 %, температура 24°C.

Значения влажности и температуры, полученные при моделировании, представлены в таблице.

Из рис. 7 видно, что время СВЧ сушки штабеля пиломатериалов в технологической установке с дискретным расположением магнетронов и вращением штабеля пиломатериалов вокруг своей оси составляет не более 14 часов. Конечная влажность пиломатериалов находится в пределах 6...7 %.

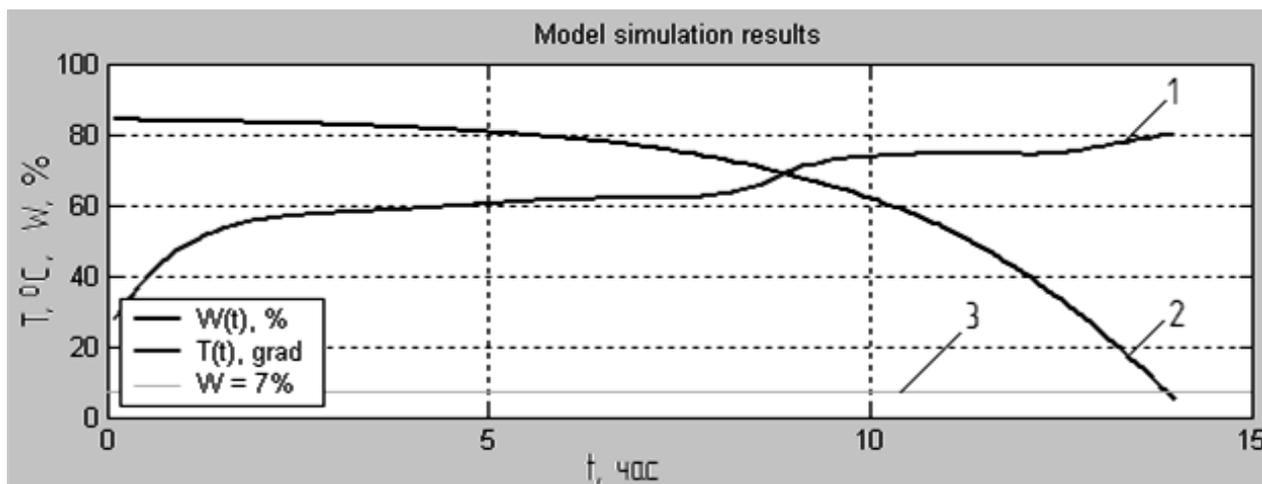


Рис. 7. Результаты моделирования процесса сушки штабеля пиломатериалов в технологической установке: 1 – изменение температуры; 2 – изменение влажности; 3 – требуемая конечная влажность 7 %

Результаты моделирования сушки штабеля пиломатериалов в технологической установке

t , ч	T , °C	ΔT	U	ΔU	t , ч	T , °C	ΔT	U	ΔU
1	48,30	1,07	0,84	0,002	8	62,90	0,8	0,73	0,007
2	55,90	1,8	0,83	0,007	9	69,45	0,47	0,68	0,015
3	57,79	0,54	0,83	0,003	10	73,53	1,68	0,62	0,008
4	58,93	0,67	0,82	0,002	11	74,44	2,09	0,54	0,01
5	60,42	0,78	0,80	0,001	12	74,35	2	0,42	0,012
6	61,55	0,35	0,79	0,008	13	75,65	1,35	0,28	0,011
7	61,80	0,45	0,76	0,006	14	79,12	2,02	0,07	0,007

Рабочий объем пространства камеры технологической установки равен $0,48 \text{ м}^3$. Расход электрической энергии на сушку штабеля пиломатериалов равен $117,6 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$,

на сушку 1 м^3 пиломатериалов затраты электрической энергии соответственно равны $245 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Математическая модель процесса сушки пиломатериалов при дискретном расположении источников СВЧ энергии / Р.С. Аипов, М.И. Тухватуллин, Р.Б. Яруллин, В.Ю. Кабашов // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2019. № 2 (50). С. 82-89.

2. Тухватуллин М.И. Результаты исследования теплового действия электромагнитного поля сверхвысокой частоты / М.И. Тухватуллин, Р.С. Аипов // 21 век:

фундаментальная наука и технологии: материалы XVIII Междунар. науч.-практ. конф. Lulu Press, Inc. 627 Davis Drive, Suite 300, Morrisville, NC. USA 27560. 2018. С. 122-125.

3. Аипов Р.С. СВЧ установка для сушки пиломатериалов / Р.С. Аипов, М.И. Тухватуллин, М.Л. Хабибуллин // Сельский механизатор [ФГОУ ВПО «МГАУ им. В.П. Горюхиной»]. 2011. № 10. С 30-31.

Тухватуллин Мидхат Ильфатович – старший преподаватель кафедры «Электро-снабжение и автоматизация технологических процессов» Башкирского государственного аграрного университета

Аипов Рустам Сагитович – доктор технических наук, профессор кафедры «Электрические машины и электрооборудование» Башкирского государственного аграрного университета

Midhat I. Tukhvatullin – Senior Lecturer, Department «Power Supply and Automation of Technological Processes» Bashkir State Agrarian University

Rustam S. Aipov – Dr. Sc., Professor, Department «Electrical Machines and Electrical Equipment» Bashkir State Agrarian University

Статья поступила в редакцию 21.09.19, принята к опубликованию 15.11.19

УДК 621.791.725

ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ПРОИЗВОДСТВЕ (ОБЗОР).

1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ И ПАЙКИ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

С.К. Сперанский, И.В. Родионов

LASER TECHNOLOGY IN SCIENCE AND INDUSTRY

Part 1: TECHNOLOGICAL FEATURES OF LASER WELDING AND SOLDERING OF VARIOUS MATERIALS

S.K. Speransky, I.V. Rodionov

В обзорной статье рассмотрены лазерные, гибридные и комбинированные схемы сварки. Показаны методы сварки различных конструкционных материалов, отличающихся по своим физическим и механическим свойствам. Приведены механизмы формирования сварного шва, разные по типу теплопроводности или парогазового канала, а также рассмотрено влияние различных защитных газов на качество сварного соединения. Описаны особенности применения газовых CO₂- и твердотельных Nb:YAG-лазеров для соединения материалов.

Ключевые слова: лазерный луч, лазерно-дуговая гибридная сварка, комбинированная головка, режим теплопроводности, режим парогазового канала

The review article discusses laser, hybrid and combined welding schemes. The methods of welding various structural materials differing in their physical and mechanical properties are shown. The mechanisms of weld formation by the type of heat conduction or vapor-gas channel are given, and the effect of various protective gases on the quality of the welded joint is considered. Features of the application of gas CO₂ and solid-state Nb: YAG lasers for joining materials are described.

Keywords: laser beam, laser-arc hybrid welding, combined head, heat conduction mode, vapor-gas channel mode

На пути создания нового устройства от эскиза до реального производства возникают различные научно-технические задачи. Среди них выделяется основная – создать изделие из легких и прочных материалов с помощью перспективных технологий и поставить процессы на поточное производство. Поэтому разработка экономичного и надежного способа соединения деталей является важной практической задачей [1-6].

Выбор для этой цели лазеров и процессов лазерной обработки является технологическим инструментом успешного решения многих ключевых задач. С помощью

лазеров можно минимизировать ширину кромки при плавлении, улучшить внешний вид конструкции, а с точки зрения машиностроения – обеспечить высокую воспроизводимость процесса [1-9].

Стыковые соединения и соединения внахлест обычно сваривают при помощи импульсных или непрерывных лазеров. В зависимости от сочетания плотности мощности и длительности воздействия лазерного излучения на материал морфология точечного или валикового сварного шва формируется по типу теплопроводности или парогазового канала (рис. 1).

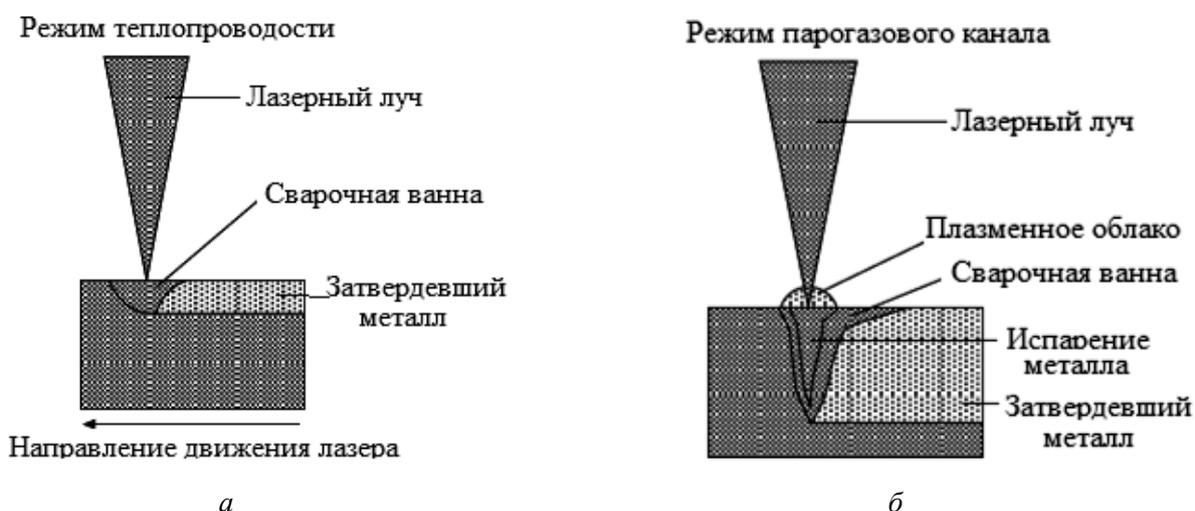


Рис. 1. Лазерная сварка по типу теплопроводности (а) и парогазового канала (б)

По первому типу лазерное излучение падает на металлическую пластину, взаимодействует со свободными электронами в металле. Абсорбция лазерной энергии приводит к повышению энергии свободных электронов, находящихся внутри зоны взаимодействия, и они сталкиваются с другими движущимися электронами, узлами кристаллической решетки, ее дефектами, структурными неоднородностями, передают им энергию. В результате при таком соударении лазерная энергия переходит в тепловую энергию решетки, и температура поверхности пластины возрастает [2, 8].

С ростом температуры твердого тела поглощение лазерного излучения увеличивается. При достижении температуры плавления абсорбция начинает возрастать и значительно увеличивается, когда темпера-

тура в облучаемой лазером области достигает точки кипения. С этого момента почти вся лазерная энергия тратится на испарение, а потери на теплопроводность становятся несущественными. Остаточное давление от испарений приводит к образованию каверны или парогазового канала. При этом над поверхностью появляется яркий светящийся факел – плазма выбрасываемых испаряющихся атомов металлов и частиц конденсированного пара. Разбрызгивание капель расплава иногда происходит из-за попадания сильной струи испарений в парогазовый канал [10-15].

Возникновение данных эффектов приводит к рефракции (искривлению световых лучей вследствие преломления в оптически неоднородной среде), появляющейся из-за разницы между оптическими плотностями

факела и окружающей среды, а также к рэлеевскому рассеянию (рассеянию света в мутных средах) из-за образования ультрадисперсных частиц. При высоком плазменном факеле и, как следствие, существовании низкого показателя преломления глубина проплавления значительно уменьшается. Механизм формирования глубины проплавления меняется от типа образования парогазового канала к типу теплопроводности (в фокальном пятне) за счет отражения луча и смещения вниз фокального пятна. При отсутствии высокого факела или области низкого показателя преломления (а именно толщины области взаимодействия плазменного факела с лазерным лучом) достигается глубокое проплавление. Глубина проплавления сварного шва определяется, главным образом, глубиной парогазового канала и частично нисходящим потоком расплава вокруг его основания [16].

Сварные швы с глубоким проплавлением формируются при увеличении длительности импульса вблизи фокального пятна, образуемого с помощью системы фокусирующих линз. Изменяя форму импульса (на медленно возрастающую и падающую во времени мощность), можно достичь снижения разбрызгивания и уменьшение пористости. Сварные швы с глубоким проплавлением эффективно формируются при сварке непрерывными лазерами с высокой мощностью.

Глубина проплавления уменьшается также и с увеличением скорости сварки. Но и на высоких скоростях она остается большой, если используется мощный узкий пучок. На низких скоростях доминирующим параметром становится мощность лазера. Однако при этом легко формируется пористость, в то время как на больших скоростях она отсутствует. Разбрызгивание металла приводит к недостаточному наполнению шва [17-20].

Лазерная сварка обычно выполняется при помощи мощного лазера. В твердотельных Nb:YAG-лазерах стержневого типа с ростом выходной мощности качество излучения ухудшается за счет появления тепловых искажений в цилиндрическом теле рабочей

среды лазера. В то же время CO₂-лазеры могут сохранять высокое качество луча даже при большой мощности [14, 20, 21].

Большинство недостатков лазерной сварки в среде CO₂ обусловлены большой длиной волны излучения (10,6 мкм). Прозрачные в видимом диапазоне спектра стекло и кварц оказываются непрозрачными для лазерного излучения с этой длиной волны. Поэтому такие оптические системы транспортировки излучения в рабочую зону сварки как кварцевые волокна в этом случае использовать нельзя, и лазерный луч может быть доставлен в рабочую зону только при помощи зеркальных отражателей.

Когда лазерный пучок попадает на материал, часть его излучения отражается от поверхности материала. Количество отраженного излучения зависит от вида материалов, состояния и температуры его поверхности и длины волны лазерного излучения. Соответственно от этих величин зависит и поглощение лазерного излучения.

В таблице приведены значения поглощения некоторых материалов при комнатной температуре в двух диапазонах длин волн, соответствующих излучению CO₂-лазера (10,6 мкм) и Nb:YAG-лазера (1,06 мкм). В целом заметна тенденция к снижению поглощения материалами излучения с уменьшением его длины волны. Небольшое количество энергии CO₂ лазеров поглощается на поверхности металла. В то же время лучи CO₂ лазера значительно поглощаются большинством керамических поверхностей. Обычно с ростом температуры поверхности поглощение излучения увеличивается. Во время лазерной сварки образование ванны расплавленного металла усиливает поглощение энергии падающего лазерного излучения. В режиме лазерной сварки с образованием парогазового канала многократное отражение лазерного луча от стенок узкого и глубокого канала значительно усиливает эффективную передачу энергии материалу [22-25].

Во время CO₂-лазерной сварки пучок высокой мощности, попадая на поверхность материала, вызывает его интенсивное испарение. Далее лазерный пучок взаимо-

действует с испаряющимся материалом и лазерной плазмой, которая образуется непосредственно над парогазовым каналом и внутри него. Падающая лазерная энергия I_0 частично поглощается в плазме обратным

тормозным излучением, что ведет к ее ослаблению. Поэтому сквозь объем плазмы длиной x , обладающей коэффициентом поглощения α , пройдет часть лазерной энергии $I = I_0 \exp(-\alpha x)$.

Поглощающая способность некоторых материалов

Материал	Длина волны $\lambda = 1,06 \mu\text{m}$ (Nb:YAG-лазер)	Длина волны $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ (CO ₂ -лазер)
Алюминий	0,2-0,4	0,1-0,4
Медь	0,1-0,3	0,05-0,1
Золото	0,02-0,04	0,01-0,02
Железо	0,25-0,32	0,12
Никель	0,15-0,35	0,05-0,15
Серебро	0,03	0,02-0,10
Al ₂ O ₃	0,05-0,1	0,90-0,99
ZrO ₂	0,1-0,2	0,85-0,98

Известно, что коэффициент поглощения прямо пропорционален квадрату длины волны λ . Таким образом, затухание лазерной энергии проявляется в большей степени при CO₂-лазерной сварке, чем при сварке твердотельным лазером и соответственно влияет на геометрию сварного шва. Из инертных газов самый высокий потенциал ионизации имеет гелий, он не ионизируется даже при сварке CO₂-лазером большой мощности. Именно по этой причине гелий часто используется в качестве защитного газа при сварке этим лазером.

Излучением газовых CO₂- и твердотельных Nb:YAG-лазеров возможно проведение сварки практически всех типов сталей. Причем наиболее эффективно использование твердотельных Nb:YAG-лазеров, так как коэффициент отражения R от поверхности сталей при длине волны излучения 1,06 мкм составляет 0,63, а при длине волны 10,6 мкм – 0,95.

При лазерной сварке с глубоким проплавлением жесткий термический цикл обеспечивает предельно высокие скорости охлаждения кристаллизующегося металла шва (3000 град/с), что способствует повышению прочности сварных соединений. Это обусловлено тем, что увеличение тем-

пературного градиента на фронте кристаллизации отстает от увеличения скорости затвердевания при повышении скорости лазерной сварки. Общий размер зоны термического влияния при лазерной сварке в 3-5 раз меньше, чем при аргонодуговой.

В процессе кристаллизации швов углеродистых и легированных сталей хрупкая мартенситная структура образуется при использовании практически всех способов сварки плавлением. Однако особенностью лазерной сварки является то, что мартенситная структура в данном случае более дисперсная, чем при дуговой сварке (толщина мартенситных игл в 5-6 раз меньше). Такая структура обладает не только повышенной прочностью, но и пониженной ликвацией (химической неоднородностью) [26-28].

Существенное влияние на свойства сварных соединений оказывают газы, находящиеся в металле. Содержание в стали кислорода, азота или их соединений может вызвать охрупчивание структуры. Наиболее сильное влияние оказывает водород, который скапливается в микропустотах и способствует развитию трещин (флокенов). При лазерной сварке легированной стали количество диффузионно-подвижного водорода в швах в 2,5 раза меньше, чем при

аргодуговой, что связано с интенсивным перемешиванием жидкого металла, вызванным гидродинамическим воздействием газов в канале проплавления при данном способе сварки. При этом из расплава улетучиваются и вредные примеси (сера, кислород, азот и др.), так как они интенсивнее, чем металл, поглощают излучение CO_2 -лазера, перегреваются и испаряются.

Процесс сварки плавлением алюминиевых сплавов связан с рядом особенностей, что сказывается на технологии получения качественных сварных соединений. При температуре выше температуры плавления происходит интенсивное окисление алюминия. Образовавшийся оксид алюминия покрывает поверхность деталей плотной и прочной пленкой с температурой плавления 2050°C . Вследствие высокой адсорбционной способности к газам и парам воды оксидная пленка является источником газов, растворяющихся в металле, и причиной возникновения в нем несплошностей различного рода. Так как коэффициент теплового расширения оксидной пленки почти в 3 раза меньше коэффициента расширения алюминия, при нагреве металла в нем образуются трещины. Существование на поверхности алюминиевых сплавов оксидной пленки затрудняет процесс сварки.

Применение флюсов для защиты шва является эффективным способом и состоит в следующем. При нагревании металла из-за разности коэффициентов теплового расширения алюминия и оксидной пленки в ней образуются микротрещины, по которым расплав флюса проникает под оксидную пленку и, вступая в реакцию, отделяет ее от металла и переводит в шлак, который удаляется после сварки. Флюс может подаваться в зону лазерной сварки совместно с защитным газом.

Специфической особенностью лазерной сварки алюминиевых сплавов является то, что расплавление металла начинается только при определенном уровне плотности мощности (выше 10^6 Вт/см^2). Это объясняется сочетанием высокого коэффициента отражения алюминия (0,95-0,97) с высокими теплопроводностью и теплоемкостью. Однако после начала процесса плавления коэффициент от-

ражения резко снижается, и происходит интенсивное проплавление материала с образованием парогазового канала. С момента образования канала имеет место линейная зависимость глубины проплавления от мощности луча, которая зависит от степени фокусировки, толщины пластины, состояния ее поверхности и скорости сварки.

Для получения высококачественных швов и точечных соединений, особенно на таких активных материалах как титан, ниобий, молибден и другие, необходима защита от окисления. При сварке низколегированных сталей защиту можно не применять, что упрощает технологию и экономит использование инертных газов.

Образование плазмы при использовании защитных газов существенно влияет на процесс формирования геометрии сварного шва. На рис. 2 показана зависимость глубины проплавления, полученная с использованием различных защитных газов. Глубина проплавления всегда меньше в среде аргона. Это вызвано ослаблением падающего лазерного излучения в плазме аргона, в то время как гелий не ионизируется, имея высокий потенциал ионизации. Со снижением скорости сварки глубина проплавления увеличивается и при скорости 50 см/мин остается постоянной.

Защиту поверхности шва от окисления рекомендуется осуществлять с помощью специального сопла гелием или смесью гелия с аргоном в соотношении 2:1, а также аргона с углекислым газом в соотношении 3:1.

В режиме лазерной сварки с образованием парогазового канала из-за испарения материалов образуется узкий и глубокий канал («кинжальный» шов). Лазерная энергия может передаваться в материал через парогазовый канал, это создает условия для узкого и глубокого проплавления. Однако парогазовый канал не постоянный, если его длина превышает длину его окружности. Парогазовый канал периодически закрывается вдоль линии проплавления и вызывает взаимодействие луча с расплавленным металлом, создавая давление отдачи. Это явление называется неустойчивостью Рэлея и приводит к появлению пористости в сварном соединении.

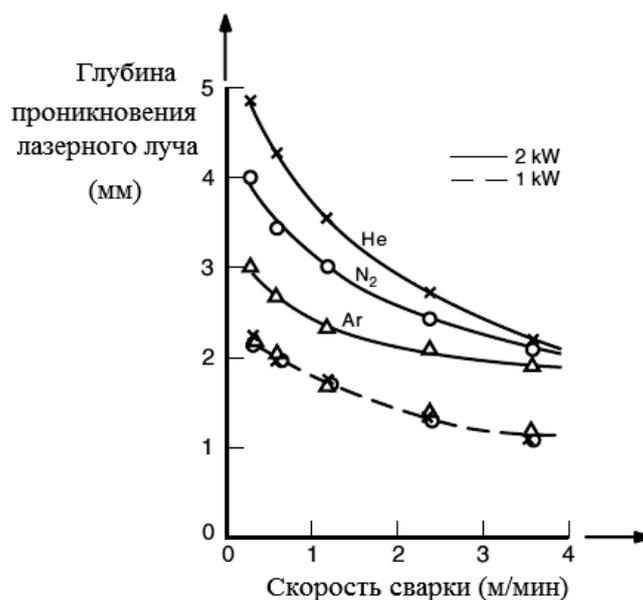


Рис. 2. Зависимость проникновения лазерного луча от скорости сварки и типа защитного газа

В качестве защитного газа для предотвращения формирования пор при сварке нержавеющей стали с высоким содержанием Cr обычно используется азот, так как растворимость азота увеличивается с ростом концентрации хрома. Пузырьки газа в процессе сварки не образуются, так как азот растворяется в ванне расплавленного металла [29, 30].

Другой способ предотвращения пористости – это стабилизация парогазового канала с помощью модуляции мощности лазера. Мощность излучения импульсного лазера модулируется на пике прямоугольного импульса и базовой мощности 20 и 12 кВт соответственно. Формирование пористости полностью прекращается при частоте модуляции мощности лазера 16 Гц. Эта частота совпадает с собственной частотой колебаний ванны расплавленного металла. Во время лазерной сварки с полным проплавлением чрезмерная лазерная энергия, которая проникает сквозь стальную пластину, образует воздушную плазму на задней поверхности. Плазма содержит много атомарного азота, который гораздо легче растворяется в расплавленной стали, чем двухатомный азот. Концентрация азота в расплаве возрастает вблизи дна, и если она превышает растворимость двухатомного азота, то в расплавленном металле образуются пузырьки,

которые приводят к образованию усадочной трещины. Небольшое денитрирование таким элементом как алюминий (обычно 0,8 %) ведет к устранению этого дефекта. Добавление никеля и углерода является также эффективным средством в предотвращении пористости. С увеличением концентрации углерода или никеля в основном металле режим затвердевания меняется с полностью ферритного на аустенитный. Более высокая растворимость азота в аустенитной фазе предотвращает образование пористости в сталях с высоким содержанием углерода или никеля.

Особенность лазерной микросварки заключается в относительно высокой скорости охлаждения затвердевающего металла. Блоки обычно сваривают из алюминиевых сплавов. При этом проплавление обычно превышает глубину 1,5 мм. Детали из этих материалов не могут быть успешно приварены из-за образования напряжения усадки как эффекта горячего растрескивания (красноломкость). Однако при использовании алюминия с высоким содержанием кремния до 12 % удается решить эту проблему [31].

Ковар (Fe – 54 %, Ni – 19 %, Co – 17 %) часто выбирают для микросварки, потому что его коэффициент теплового расширения совпадает с коэффициентом расширения ма-

териалов других компонентов, создающих соединение (спай) металла со стеклом.

Распространена скоростная лазерная микросварка аустенитных нержавеющей сталей, при которой снижается вероятность выпадения при высокой температуре на границах зерен карбидов хрома, а также уменьшение тепловой деформации и остаточных напряжений по сравнению с традиционными методами сварки. Следует избегать использования сталей обыкновенного качества (Ст 0-Ст 6), так как они содержат высокий процент серы и фосфора, которые приводят к образованию горячих и холодных трещин. Уменьшение прочности при сварке ферритных сталей вызвано образованием грубых зерен в зоне термического влияния и формированием мартенсита, который, как известно, имеет высокую твердость из-за высокой скорости охлаждения. Предварительный подогрев может снизить образование мартенсита в таком сварном соединении [2].

Титан сваривается хорошо, но из-за образования нитрида титана при его сварке нельзя использовать азот в качестве защитного газа, а требуется применять аргон или гелий.

Чистая медь обладает необходимыми металлургическими свойствами для микросварки, но имеет высокую отражательную способность для излучения YAG-лазера и обладает высокой теплопроводностью, что затрудняет достижение глубины проникновения сварных швов больше 0,5 мм. Процесс сварки можно улучшить, предварительно покрыв поверхность никелем. Бериллиевая бронза имеет лучшую свариваемость и может обеспечивать высококачественные сварные швы с чистой медью.

Медно-вольфрамовые и медно-никелевые сплавы свариваются хорошо. Латунные сплавы не подходят для соединения сваркой из-за содержания в них цинка. Температура испарения цинка близка к температуре плавления других металлов, а образующийся пар стремится выдавить металл из сварочной ванны, и при остывании образуются поры.

Серебро и золото могут быть сварены лазером, но с глубиной проплавления менее

0,5 мм из-за высокой отражательной способности и теплопроводности [32].

Многие миниатюрные технические устройства требуют соединения различных металлов. Сварка таких металлов зависит от множества различных факторов. При сварке разнородных металлов хорошая растворимость в твердом состоянии играет важную роль в обеспечении прочности соединения. Это достигается только с металлами, имеющими общий диапазон температур плавления. Микросварка разнородных металлов выполняется YAG лазерами с импульсной накачкой. Высокие пиковые мощности таких лазеров с возможностью задания формы импульсов дает возможность для сварки разнородных материалов.

Большинство материалов, используемых в микросварке, имеют специальное покрытие для повышения коррозионной стойкости или для лучшего поглощения лазерной энергии. Никель и золото – наиболее распространенные материалы для покрытия. Никель можно нанести электролитическим способом или в процессе электролиза. Ферросплавы, такие как ковар и нержавеющая сталь, должны быть покрыты электролитическим никелем. Покрытия, существующие только сверху, а не в соединении, часто испаряются под действием падающего лазерного луча и не оказывают существенного влияния на качество сварного соединения. Зазор и позиционные допуски при лазерной микросварке приведены на рис. 3.

В настоящее время используют лазеры при микросварке пластмасс к металлам или керамике. Металлы являются прочными и пластичными, пластмассы – легкими и гибкими, поэтому была разработана технология соединения таких разнородных материалов, называемая лазерно-стимулированным соединением металла и пластика (LAMP – Laser-Assisted Metal and Plastic). Лазерный луч поглощается поверхностью металла, и пластик в области соединения расплавляется за счет этой теплоты. Соединение такого типа характеризуется образованием мелких пузырьков в пластике, где нагрев должен осуществляться выше температуры разложения пластика [13].

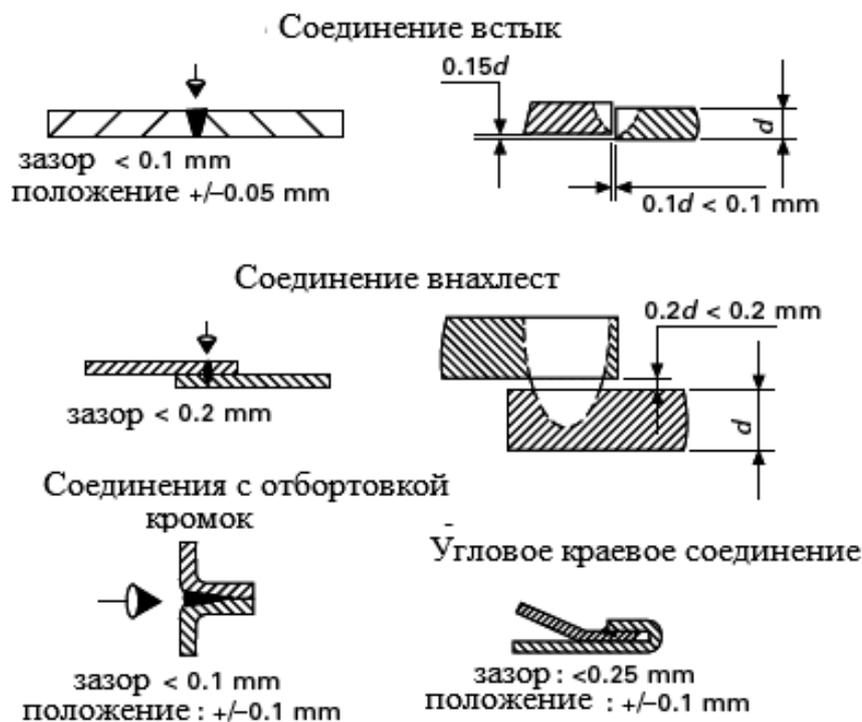


Рис. 3. Зазор и позиционные допуски при лазерной микросварке

К числу основных особенностей сварки и пайки разнородных материалов относятся следующие:

- различие в коэффициентах теплового расширения, которое может привести к чрезмерному искривлению и остаточным напряжениям;

- ограничение растворимости соединяемых частей, приводящее к хрупким интерметаллическим фазам и ухудшению прочности соединения.

Для соединения алюминия и стали чаще всего используются мощные полупроводниковые или YAG-лазеры для создания швов со стандартной геометрией (швы между листами с отогнутыми бортами и угловой сварной шов в конфигурации внахлест). В качестве припоя используется широкий круг сплавов на основе цинка, алюминия или серебра.

Для соединения алюминия и стали лазерный луч попадает на соединение со стороны алюминия (рис. 4 а). Расплавленный алюминий затем смачивает лист стали, на котором был нанесен флюс. Использование лазера мощностью 4 кВт обеспечивает скорость сварки до 8 м/мин. Аналогично производится сварка алюминия с титаном. Ли-

сты располагаются вертикально с алюминиевым листом сверху для хорошего смачивания титана под действием сил гравитации (рис. 4 б).

С целью улучшения качества соединений используются следующие комбинированные методы.

Лазерное соединение с приложенной силой – зона соединений облучается мощным лазером, тем самым, нагреваются оба материала, а алюминий расплавляется и им смачивается сталь (рис. 5). Затем прикладывается сила, которая позволяет получать сварные соединения заданной кривизны.

Лазерно-дуговая гибридная сварка – алюминиевый и стальной листы устанавливают встык, допуская при этом зазор (рис. 6 а). Лазерный луч направляют на алюминиевую сторону, которая расплавляется и совместно с присадочной проволокой, плавящейся в электрическом разряде, заполняет зазор. Сварка производится в инертном газе, а шов получается гладкий и ровный на протяжении всей длины без подрезов и наличия пор.

Бесфлюсовая лазерно-плазменная гибридная сварка характеризуется тем, что пучок плазмы используется для нагревания

стали и алюминия, активации и очистки поверхностей, тогда как луч лазера увеличивает поступление тепловой энергии и

стабилизирует плазменную дугу, обеспечивая высокую скорость соединения толстых листов алюминия (рис. 6 б).

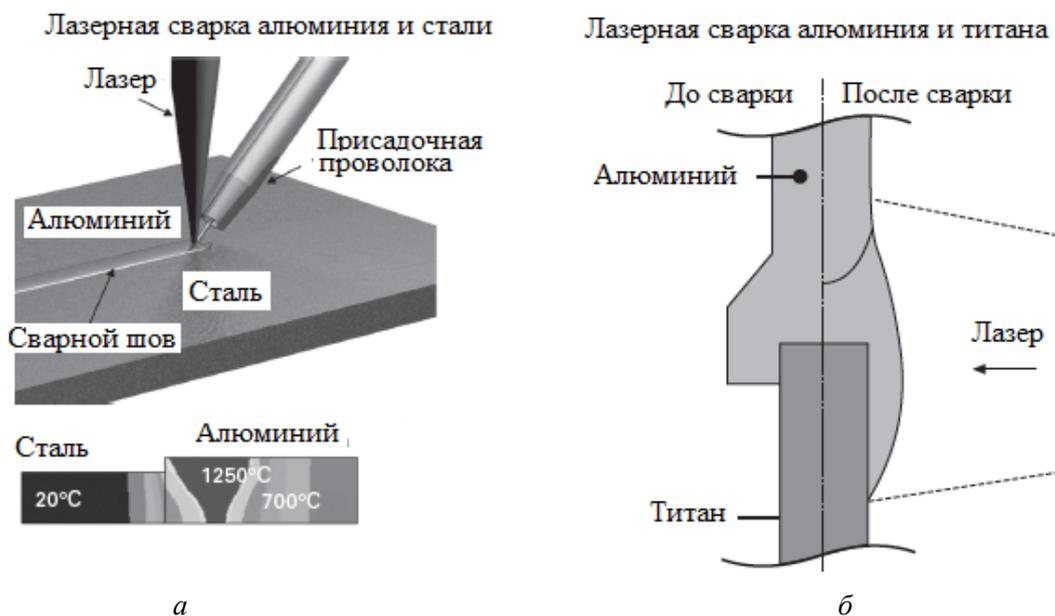


Рис. 4. Технология лазерной сварки разнородных материалов: а – сварка алюминия и стали; б – сварка алюминия и титана

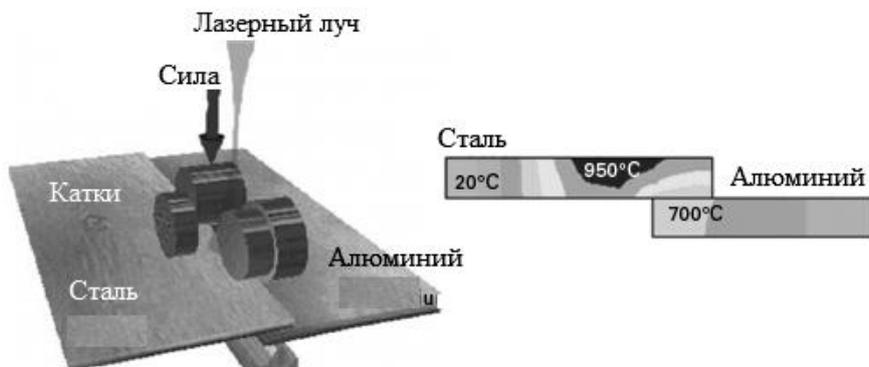


Рис. 5. Лазерная сварка с приложенной силой

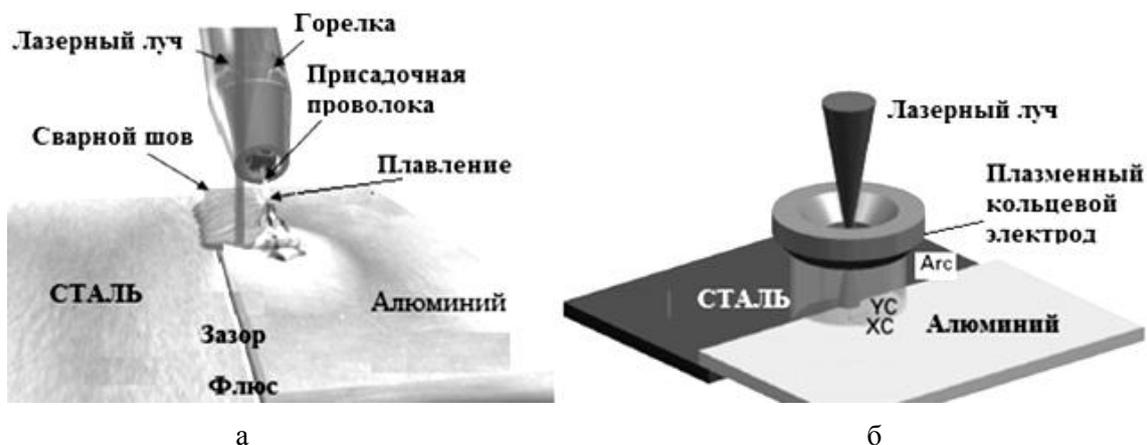


Рис. 6. Лазерно-дуговая гибридная (а) и лазерно-плазменная (б) сварка

Существуют два вида лазерной сварки пластмасс: методы прямой и трансмиссионной сварки.

В методе прямой сварки материалы нагреваются от внешнего источника до глубины в несколько миллиметров. Никакого специального абсорбента при этом в пластик не добавляют. При длине волны лазера $\lambda = 10,6$ мкм излучение сильно поглощается поверхностью пластмассы, позволяя выполнять высокоскоростное соединение тонких пленок.

При трансмиссионной лазерной сварке пластмасс поглощающие добавки для лазерного излучения помещают в нижней части или наносятся тонким слоем на поверхность соединения (рис. 7). Лазерное излучение проходит через верхнюю часть, нагревая соединение с поглощающей добавкой в нижней

части. Этот тип сварки позволяет соединять более толстые детали, и поскольку зоны воздействия тепловой энергии ограничены областью соединения, внешние признаки выполнения сварочных работ на наружной поверхности отсутствуют.

Многопроходная сварка с присадочной проволокой – один из эффективных методов соединения толстослойных материалов с помощью лазерного луча (рис. 8). В этом процессе лазерный луч не только расплавляет материал, но и частично испаряет его, образуя узкий и глубокий канал проплавления, окруженный расплавленным металлом. Низкоуглеродистые стали с толщиной сечения 150 мм можно сваривать встык лазером по узкому зазору с присадочной проволокой. Многопроходная лазерная сварка может быть выполнена с одной стороны или с обеих сторон.

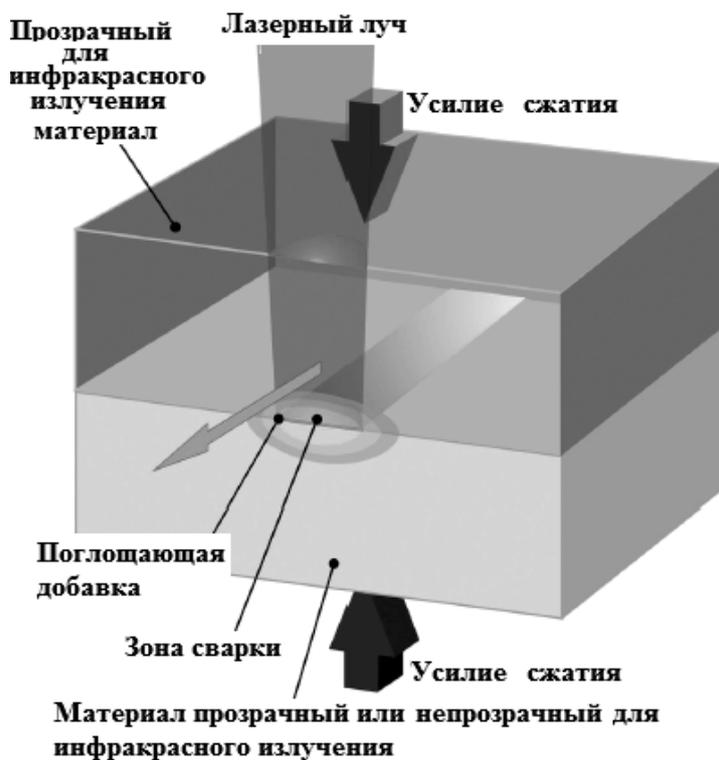


Рис. 7. Схема трансмиссионной лазерной сварки

При такой сварке используют специальные технологические приемы подготовки стыковых кромок, делая канавки с обеих сторон свариваемых заготовок с небольшим углом наклона боковых стенок. Для сокращения числа проходов сварки толщину

притупления кромки в вершине разделки шва делают настолько толстой, насколько это возможно при сварке лазерным лучом, учитывая его способность к глубокому проплавлению. Чем меньше угол наклона канавки, тем меньше объем наплавленного металла,

поэтому угол канавки должен быть как можно меньше. Проход при заварке корня шва (первый валик, образующийся в зазоре между свариваемыми кромками при многопроходной сварке) обычно проводят без присадочной проволоки. Последующие швы выполняются с помощью присадочной проволоки. Оптимальным условием сварки для формирования требуемой геометрии валика сварного шва является применение лазера мощностью 5-8 кВт со скоростью 0,5 м/мин. Для пластин толщиной 30 мм используется

обычно односторонняя сварка, а для пластин больших толщин применяется, как правило, двусторонняя. При этом толщина корневой поверхности 2-4 мм. Число свариваемых слоев – 8, из них два слоя корневой сварки без присадочной проволоки, четыре слоя стандартной наплавки и два слоя укрепляющей сварки. Увеличение содержания феррита в присадочной проволоке может предотвратить образование трещин. Схема разделки кромок для многопроходной лазерной сварки приведена на рис. 9.

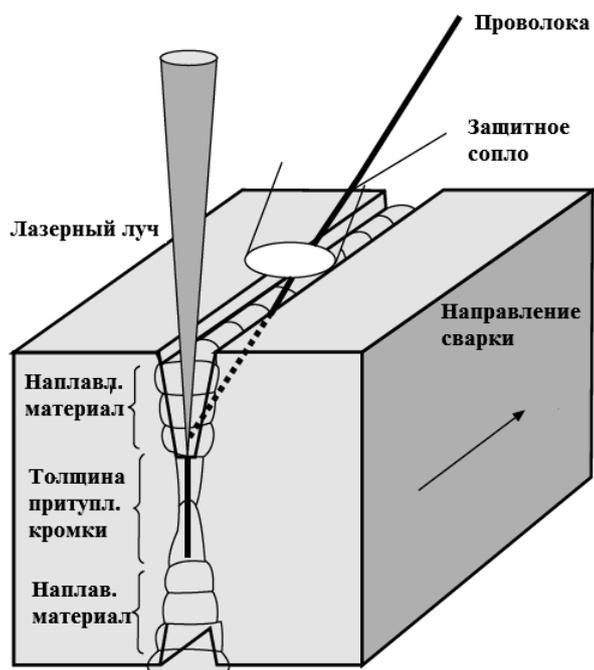


Рис. 8. Схема многопроходной лазерной сварки

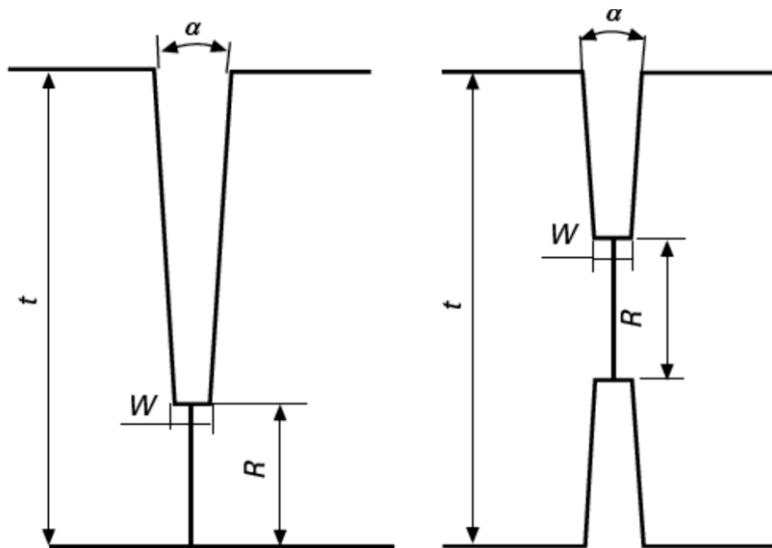


Рис. 9. Разделка кромок для многопроходной лазерной сварки материала толщиной от 30 до 60 мм

Более узкая сварная канавка и более низкий уровень подачи теплоты, а также меньшее количество проходов при лазерной сварке по сравнению с другими ведут к снижению остаточных напряжений. Толщина корневого прохода зависит от проплавляющей способности лазерного луча. При сварке нержавеющей стали лазером мощностью 10 кВт луч проникает

на глубину 18 мм. Одним из возможных способов увеличения глубины проплавления является использование газовой струи аргона высокого давления. В этом случае луч может проникать в канал проплавления без взаимодействия с поверхностью сварочной ванны. Пример многопроходной лазерной сварки толстых деталей приведен на рис. 10.



Рис. 10. Пример многопроходной лазерной сварки деталей толщиной 50 мм

В процессе обычной лазерной сварки формируется широкая и плоская поверхность расплава. В процессе газоструйной

лазерной сварки сварочная ванна сужается, а канал проплавления увеличивается и становится значительно глубже (рис. 11).

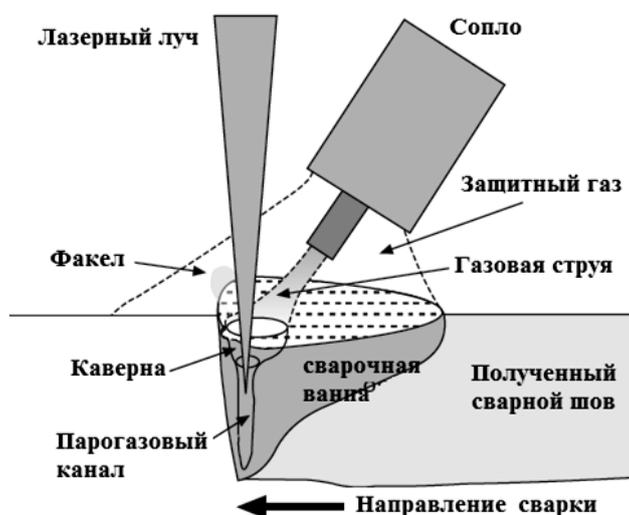


Рис. 11. Схема газоструйной лазерной сварки

Лазерный луч направляется на нижнюю часть канала проплавления при удалении расплавленного металла потоком газа. В результате луч проникает глубже

на 25 мм при той же мощности и скорости сварки.

Лазерное излучение поглощается поверхностью металла, что приводит к его

нагреву, плавлению и испарению. Избыточное давление паров выдавливает расплав, в результате образуется узкий и глубокий канал (капилляр) в ванне расплава. Этот канал, частично заполненный ионизационной смесью паров металла и защитного газа, поглощает некоторую долю лазерного излучения. Сварка лазерным излучением происходит в результате перемещения лазерного излучения вдоль шва и, как следствие, перемещения ванны расплава и парогазового канала. При использовании двулучевой сварки второй луч подкрепляет действие первого, увеличивая глубину сварки и, что более важно, мешает задней стенке канала приближаться к передней стенке, таким образом предотвращая схлопывание канала. Капилляр канала сплюснен и вытянут в направлении сварки, а его верхнее и нижнее отверстия увеличены. Правильное формирование капилляра стабилизирует процесс сварки и облегчает выход газа (такого как водород, нерастворимый в алюминии) и пара (например, пары цинка стальных листов с покрытием). Таким образом, в схеме с двумя лазерными лучами пористость и выбросы расплава значительно уменьшены.

В промышленности применяется также и гибридный лазерный метод. Сочетание лазерного излучения с совершенно другим инструментом, например струей воды, может расширить диапазон применений лазеров. Струя воды, текущая под принудительным напором, используется как жидкий лазерный волновод в зоне резки. Кроме того, струя воды способствует вы-

бросу материала из разреза. Вода обеспечивает эффективное охлаждение зоны резки и безопасную защиту поверхности материала от обломков при образовании водяной мембраны.

Часто в деталях машиностроения необходимо улучшить механические свойства сваренного металла или увеличить объем наплавки металла. В такой ситуации процесс дуговой сварки с высокой эффективностью плавления в сочетании с лазерным процессом может быть использован в качестве эффективного средства (рис. 12 а). Так как коэффициент поглощения лазерного излучения с увеличением температуры расплава увеличивается, при воздействии дуги происходит разогрев поверхностного слоя, а лазерным лучом осуществляется глубокое проплавление материала, что в комплексе значительно увеличивает скорость сварки и позволяет получить необходимую геометрию формы шва.

В режущих головках для эффективного выброса расплава из надреза следует обеспечить подачу интенсивного потока газа, распространяющегося коаксиально сфокусированному лазерному потоку, поэтому фокус пучка вместе с газовой струей достигает заготовки, расположенной ниже выходного отверстия сопла (рис. 12 б). Объектив во входном отверстии сопла фокусирует лазерный пучок, защищает камеру сопла, обеспечивая ее газопроницаемость, а также играет роль индуктивного датчика, обеспечивая сохранение постоянного расстояния от сопла до поверхности листа (около 1 мм).

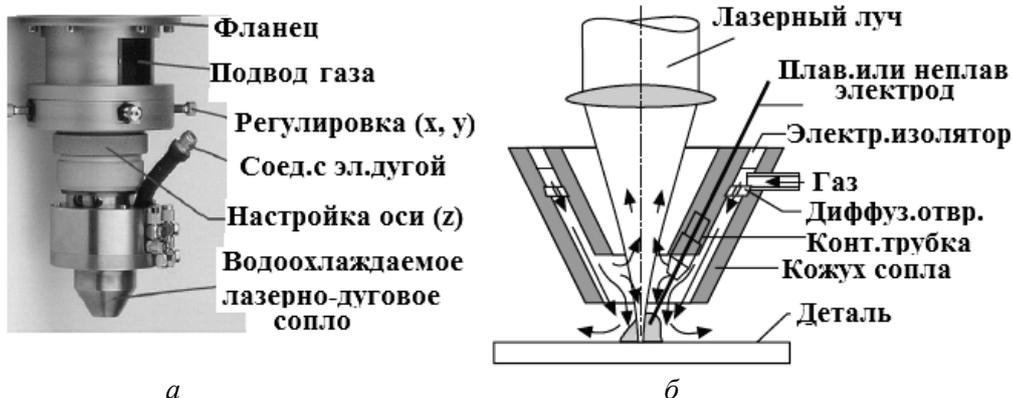


Рис. 12. Виды лазерных головок: лазерно-дуговая (а); режущая комбинированная (б)

В лазерных головках для сварки оптическая схема фокусировки и схема подачи газа иные (рис. 13). В сварочных головках с твердотельными и диодными лазерами фокусировка обеспечивается линзовой оптикой, а для фокусировки излучения CO₂-лазеров используется зеркальная оптика. Для создания бездефектных швов необходимо два потока газа: один для сдувания

плазмы (поперечная воздушная струя), а другой (технологический) для защиты шва от влияния окружающей атмосферы. Поэтому для создания потока мягкого экранирования и потока технологического газа применяются в основном внеосевые сопла, отстоящие от точки лазерного воздействия на несколько миллиметров.

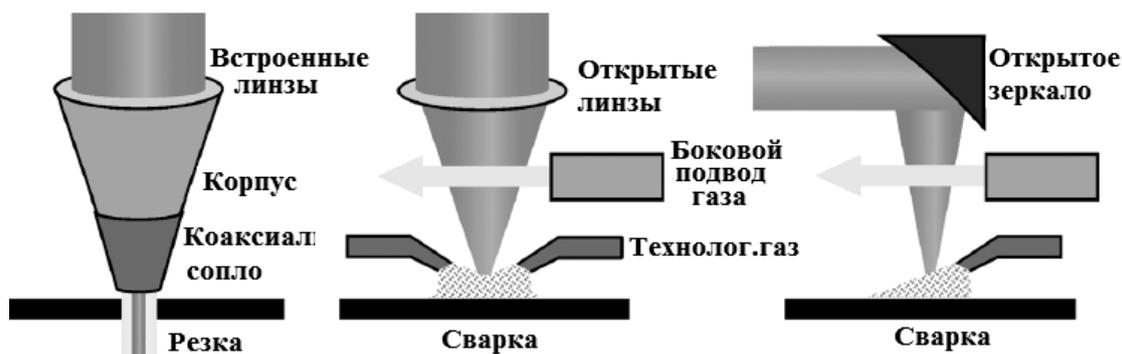


Рис. 13. Различие режущих и сварочных лазерных головок

Кроме того, для надежной защиты оптики от дыма или брызг, вылетающих из зоны сварки, между объективом и соплом технологического газа дополнительно пропускают в поперечном к оси лазера направлении перекрестную струю сжатого воздуха, то есть для сварочной головки

нужно пространство для открытого потока.

Регулируя с помощью программы ЧПУ подачу поперечной струи сжатого воздуха и фокусное положение, универсальное сопло может переключаться с режима резки на режим сварки и наоборот (рис. 14).

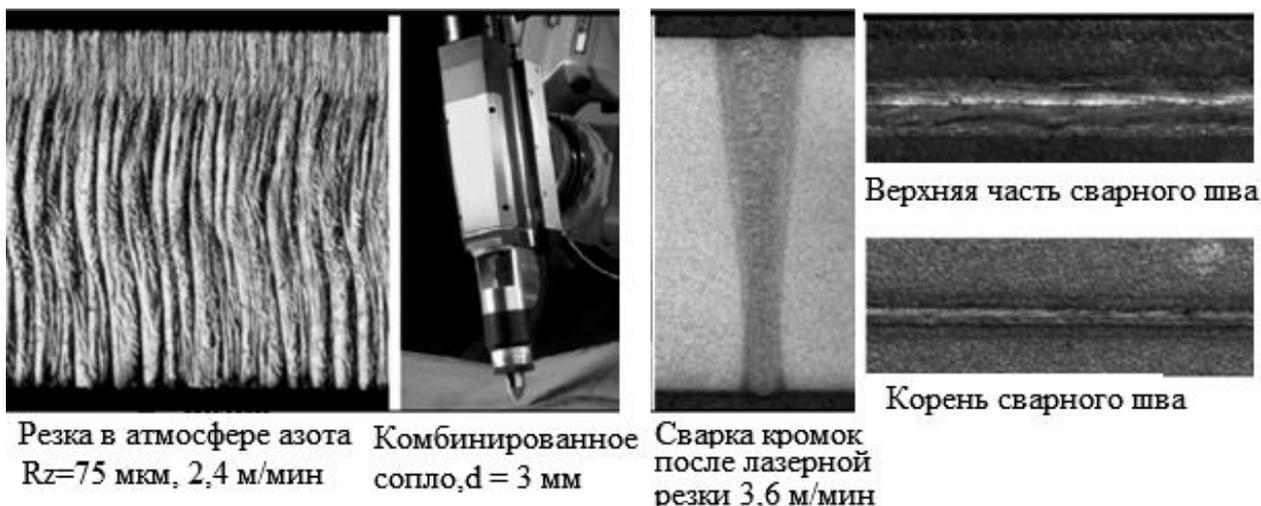


Рис. 14. Лазерная подготовка кромок с дальнейшей сваркой

Использование универсальной головки позволяет наносить точный рез края, что обеспечивает надежную сварку деталей без необходимости замены инструмента. Свар-

ка может быть реализована без системы отслеживания шва, так как точное положение шва заранее известно после предшествующей операции резки. Лазерная отделка и

резка различных по форме отверстий в высокопрочных материалах в комбинации с операциями сварки значительно сокраща-

ет технологический цикл и позволяет получить высокую точность полученных деталей (рис. 15).

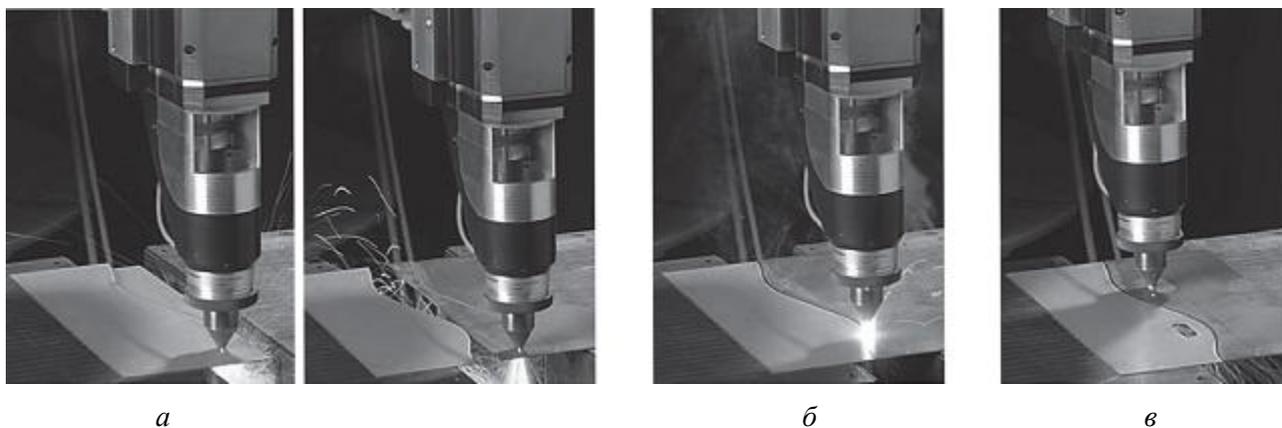


Рис. 15. Использование универсальной головки для резки в среде N_2 (а), сварки в среде Ar (б) и прошивки отверстий в среде N_2 (в)

Лазерная сварка стекла обеспечивает монолитную структуру в месте соединения с высокой механической прочностью шва и в отличие от существующих методов соединения не требует предварительного и последующего нагрева. Для сварки используются CO_2 -лазеры в непрерывном режиме сварки, а также лазеры, генерирующие излучение в ультракоротком импульсном режиме. В первом случае энергия лазера поглощается на поверхности стеклянной пластины в линейном режиме. Стекло непрозрачно для излучения с длиной волны $\lambda > 3,5$ мкм, поэтому наиболее подходящим для этих диапазонов спектра лазеров является CO_2 -лазер с $\lambda = 10,6$ мкм. Отражение Френеля (отражение плоской поляризованной волны) на этой длине волны составляет примерно 14 %, а 86 % поглощается на поверхности стекла.

Имеются два типа сварки стекла этим лазером: сварка термодиффузией и сварка с глубоким проплавлением, которые реализуются в зависимости от интенсивности лазера (рис. 16). При низкой плотности энергии лазерного пучка, недостаточной для нагрева поверхности выше температуры кипения, внутренняя часть объема стеклянной пластины нагревается за счет теплопроводности с поверхности, реализуя тер-

модиффузионную сварку. Эта сварка подходит для микросварки деталей или тонких листов стекла, поскольку расстояние тепловой диффузии ограничено низкой теплопроводностью стекла. При этом используется большое пятно лазерного пучка, процесс выполняется при низкой скорости.

Когда плотность энергии лазерного пучка высокая для нагревания, температура нагрева материала выше его точки кипения, а поверхность расплава прижимается избыточным давлением паров, то образуется неглубокая полость. Затем она начинает расти вглубь за счет отражения луча от стен полости, формируя глубокий канал проплавления. Трещины образуются, если растяжение превышает механическую прочность стекла (большой коэффициент теплового расширения) как, например, у известково-натриевого стекла. Остаточное напряжение растяжения увеличивается с ростом теплового расширения стекла, поэтому сварка может проходить без образования трещин, если у стекла небольшой коэффициент теплового расширения как у кварцевого стекла. При этом можно сваривать как толстые, так и тонкие стеклянные листы. Можно отметить, что металл в отличие от стекла обладает пластичностью даже при комнатной температуре и трещин можно избежать.

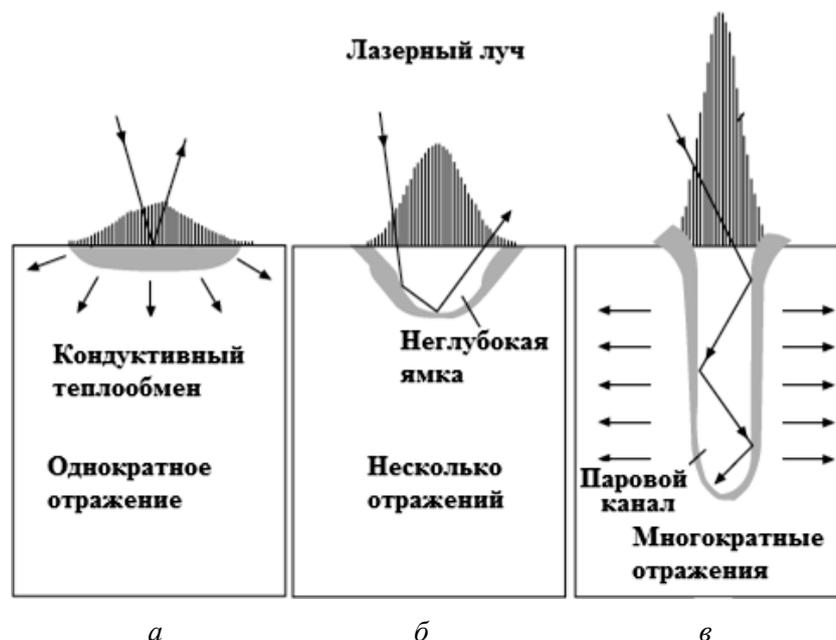


Рис. 16. Механизм нагрева лазерным лучом свариваемых деталей из стекла: *a* – кондуктивный теплообмен за счет однократного отражения; *б* – кондуктивный нагрев за счет нескольких отражений; *в* – образование парогазового канала за счет многократных отражений от стенок

Лазеры с ультракороткими импульсами изменяют состояние стекла внутри пластины благодаря уникальности процесса поглощения этих импульсов. При фокусировке излучения в объеме стекла происходит поглощение энергии за счет механизма многофотонной ионизации, затем, когда кинетическая энергия электронов достаточна для преодоления зоны проводимости, наступает лавинная ионизация, которая со-

здает больше свободных электронов. Их энергия передается решетке, и стекло нагревается после лазерного импульса. Поглощающая способность возрастает с энергией и частотой повторения импульсов. Ионизация ограничена величиной фокусного расстояния, поэтому вызывает плавление внутри пластины в том месте, где находится фокус. На рис. 17 показано сварное соединение боросиликатного стекла.

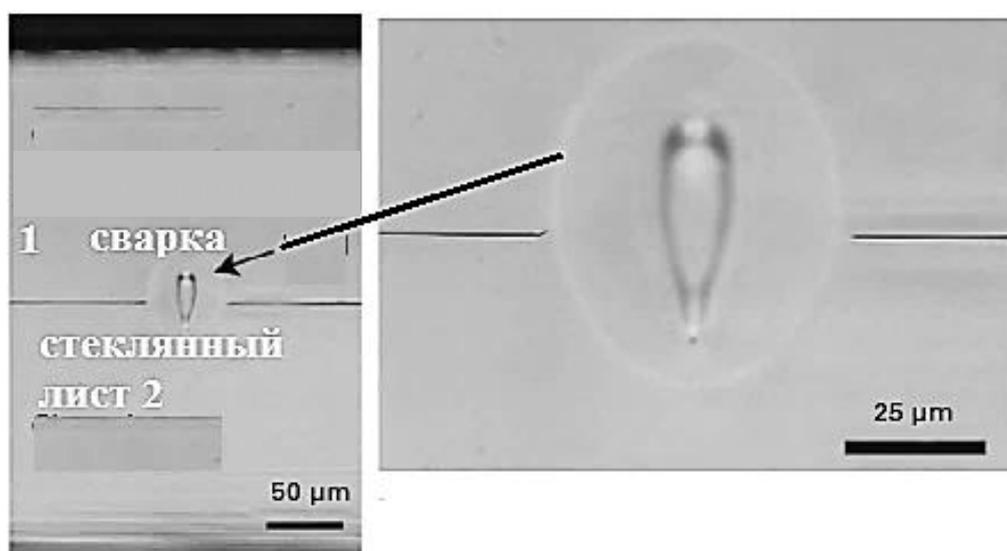


Рис. 17. Пример сварки боросиликатного стекла

Имеется два преимущества этого метода сварки. Первое – избирательное плавление внутри пластин без повреждений верхней и нижней поверхности, поскольку зона расплава находится в объеме твердого стекла, исключая пластические деформации. Второе – возможна сварка внахлест без растрескивания практически всех марок стекла. При сварке положение фокуса необходимо настроить немного ниже границы раздела стеклянных пластин, чтобы обеспечить максимально широкую область расплавления на поверхности раздела, так как область поглощения вытягивается вверх при увеличении поглощаемой энергии (рис. 17).

Для повышения эффективности на торце одной из деталей измеряют величину

проходящего внутри стекла светового потока и поддерживают его величину постоянной. Причем выходящий из торца детали световой поток преобразуют в электрический сигнал, а постоянство величины светового потока обеспечивают изменением скорости перемещения деталей и (или) изменением мощности лазерного излучения.

Перспективным направлением развития комбинированных лазерных технологий является использование лазерно-плазменной, лазерно-индукционной, лазерно-ультразвуковой сварки.

В последнее время для повышения производительности в машиностроении применяются двулучевые лазерные системы (рис. 18).

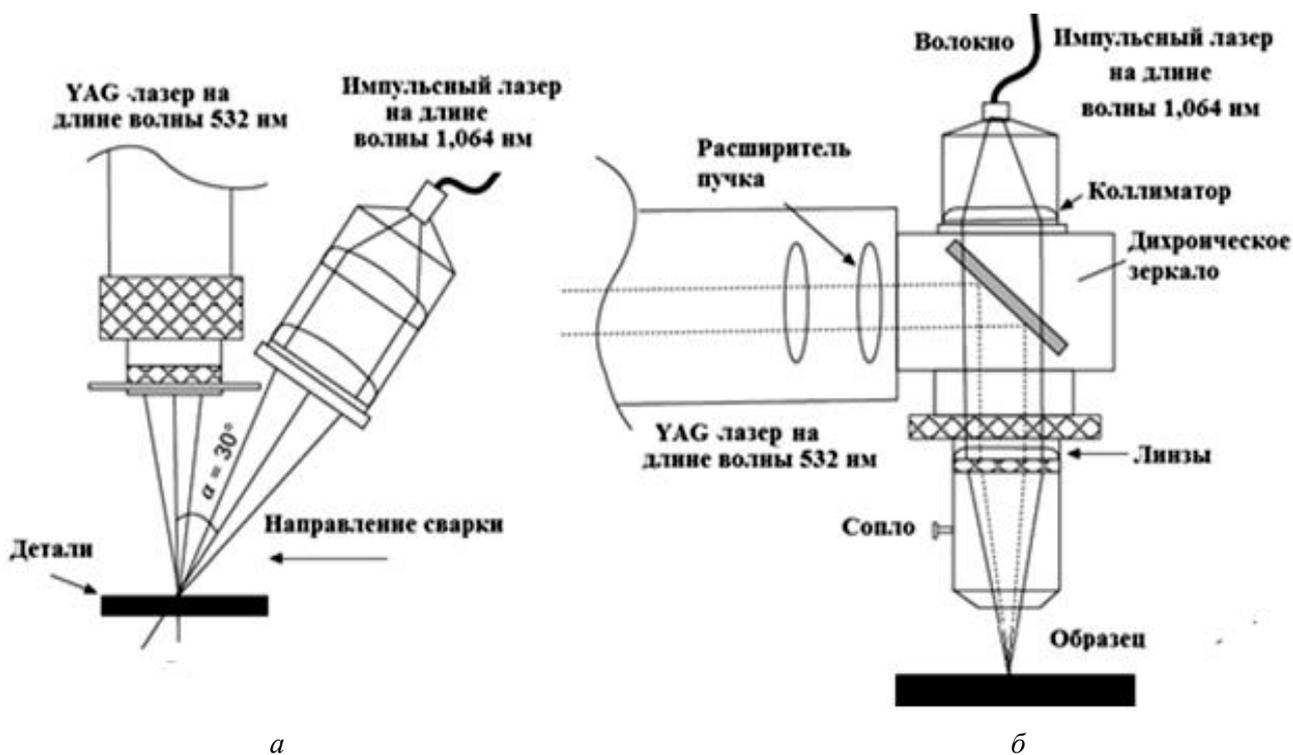


Рис. 18. Схема двулучевой лазерной системы: а – различные оптические оси; б – одна оптическая ось

Лазеры высокой мощности в общем случае отличаются невысоким качеством луча (расходимость, форма и т.д.). Комбинацией двух лучей более высокого качества, мощность каждого из которых равна половине суммы (возможно в других пропорциях), можно достичь большей глубины проплавления, чем одним лазером мощностью, равной

суммарной при комбинации лучей (рис. 19).

Появление гибких волоконных световодов позволяет сочленить лазерную головку с захватом робота и обеспечить высокую производительность и точность обработки, а также снизить вспомогательное время подачи заготовки в зону обработки и съема готовых изделий (рис. 20) [33].

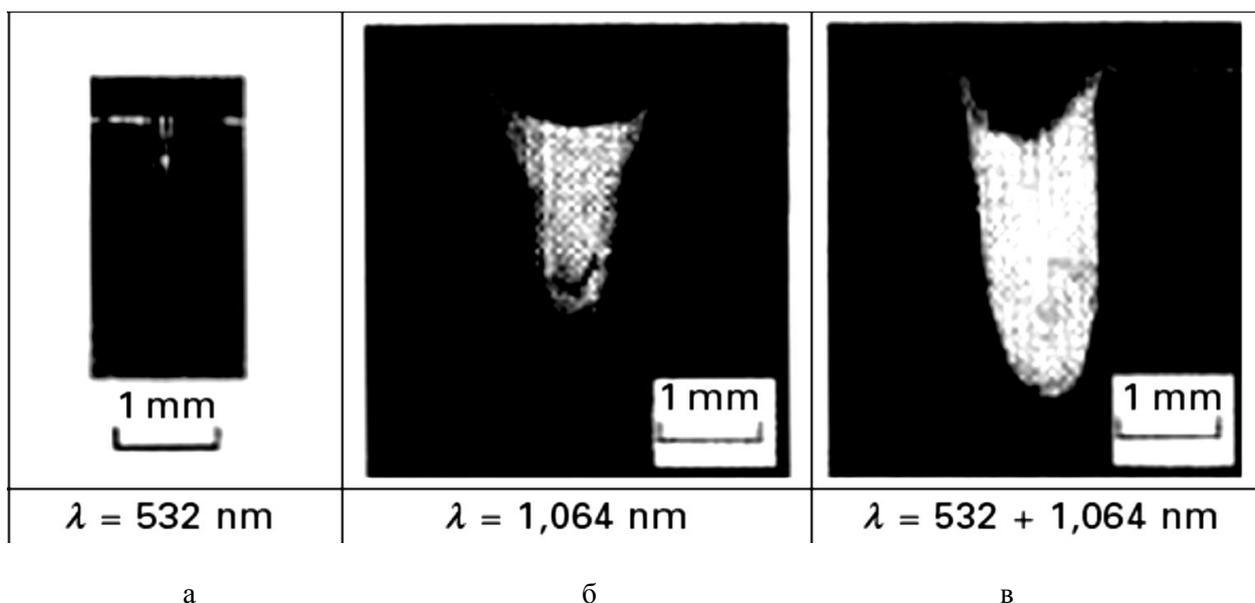


Рис. 19. Лазерная сварка сталей одним лазером при разной длине волны (а, б), сварка комбинированным лазером из двух лучей (в)

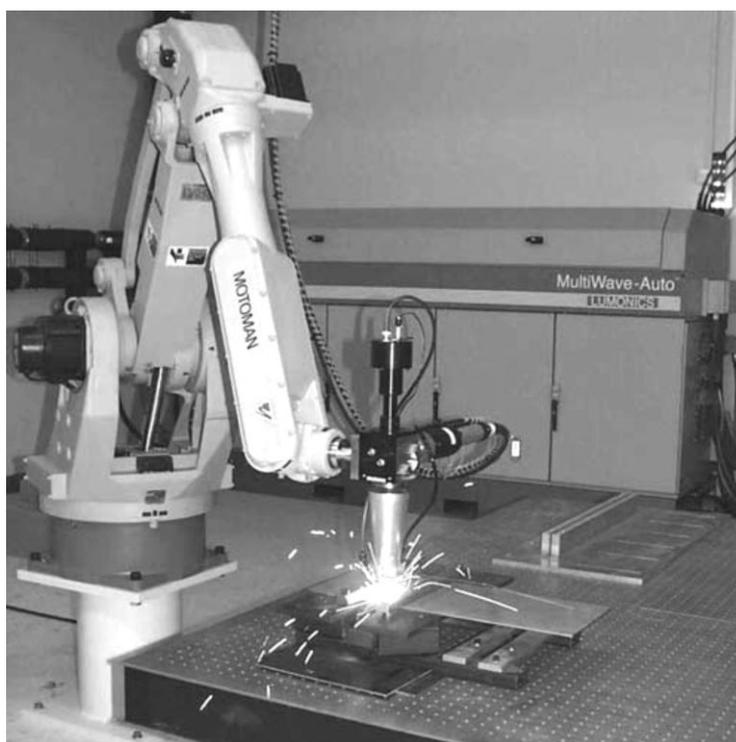


Рис. 20. Робот антропоморфного типа для лазерной сварки

Особенности, которые отличают лазерную сварку и дают ей определенные преимущества:

- за счет высокой концентрации энергии и малой площади пятна нагрева можно получать очень тонкие швы и значительно

- снизить тепловую деформацию изготавливаемых деталей;

- острая фокусировка луча и возможность передачи его на значительные расстояния с помощью световода позволяет осуществлять сварку в труднодоступных местах;

– большие скорости сварки (до 20 м/мин) обеспечивают высокую производительность процесса;

– использование материалов с сильно отличающимися физическими свойствами и, в первую очередь, с различным электрическим сопротивлением;

– механическое давление при получении сварной точки отсутствует, что позволяет соединять хрупкие и легкодеформируемые детали;

– применение гибридной лазерно-дуговой сварки дает возможность уменьшить мощность лазерного луча и потребляемую мощность из электрической сети.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Steen W.** Laser Material Processing / W. Steen, J. Mazumder. London: Springer-Verlag Limited, 2010. P. 559.

2. **Katayama S.** Handbook of laser welding technologies / S. Katayama. USA: Woodhead Publishing Limited, 2013. P. 633.

3. **Schaaf P.** Laser Processing of Materials: Fundamentals, Applications and Developments / P. Schaaf. New York: Springer, 2010. P. 229.

4. **Ion C.J.** Laser Processing of Engineering Materials: Principles, Procedure and Industrial Application / J.C. Ion. UK: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005. P. 557.

5. **Olsen F.O.** Hybrid laser-arc welding / F.O. Olsen. UK: Woodhead Publishing Limited Cambridge, 2009. P. 324.

6. **Elijah J.** Principles of Laser Materials Processing / J. Elijah. Canada: Wiley&Sons, 2009. P. 821.

7. **Mittal K.** Laser Surface Modification and Adhesion / K. Mittal, T. Bahners. USA: Scrivener Publishing, 2015. P. 418.

8. **Dawes C.** Laser welding: A practical guide / C. Dawes. England: Abington Publishing, 2008. P. 258.

9. **Basting D.** Excimer Laser Technology / D. Basting, G. Marowsky. Berlin: Springer Heidelberg, 2005. P. 434.

10. **Verdeyen J.** Laser Electronics / J. Verdeyen. USA: Prentice Hall, 1995. P. 780.

11. **Siegman E.** Lasers / E. Siegman. USA: The Maple-Vail Book Manufacturing Group, 1986. P. 1283.

12. **Svelto O.** Principles of Lasers / O. Svelto. USA: Springer Science+Business Media, 1998. P. 604.

13. **Laufer G.** Introduction to Optics and Lasers in Engineering / G. Laufer. UK: Cambridge University Press, 1996. P. 476.

14. **Kapon E.** Semiconductor Lasers (*Fundamentals*) / E. Kapon. USA: Academic Press, 1999. P. 454.

15. **Titterton D.** Military Laser Technology and Systems / D. Titterton. USA: Artech House, 2015. P. 651.

16. **Injeyan H.** High-Power Laser Handbook / H. Injeyan, D. Goodno. USA: The McGraw-Hill Companies, 2011. P. 573.

17. **Ready J.** Handbook of Laser Materials Processing / J. Ready, D. Farson. USA: Laser Institute of America, 2001. P. 716.

18. **Вейко В.П.** Опорный конспект лекций по курсу «Физико-технические основы лазерных технологий». Раздел: Технологические лазеры и лазерное излучение / В.П. Вейко. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2007. 52 с.

19. **Быков В.П.** Лазерные резонаторы / В.П. Быков, О.О. Силичев. М.: Физматлит, 2004. 320 с.

20. **Пихтин А.Н.** Оптическая и квантовая электроника / А.Н. Пихтин. М.: Высшая школа, 2001. 573 с.

21. **Григорьянц А.Г.** Технологические процессы лазерной обработки / А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.И. Мисюров. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 664 с.

22. **Мак-Даниель И.** Газовые лазеры: пер. с англ. / И. Мак-Даниель. М.: Мир, 1986. 552 с.

23. Лазеры на алюмоиттриевом гранате с неодимом / Г.М. Зверев, Ю.Д. Голяев, Е.А. Шалаев, А.А. Шокин. М.: Радио и связь, 1985. 144 с.

24. **Мак А.А.** Лазеры на неодимовом стекле / А.А. Мак, Л.Н. Сомс, В.А. Фромель. М.: Наука, 1990. 288 с.

25. **Звелто О.** Принципы лазеров / О. Звелто. СПб.: Лань, 2008. 720 с.

26. **Вакс Е.Д.** Практика прецизионной лазерной обработки / Е.Д. Вакс, М.Н. Миленький, Л.Г. Сапрыкин. М.: Техносфера, 2013. 696 с.

27. **Лосев В.Ф.** Физические основы лазерной обработки материалов: учеб. пособие / В.Ф. Лосев, Е.Ю. Морозова, В.П. Ципилев. Томск: Том. политехн. ун-т, 2011. 199 с.

28. **Ковалев О.Б.** Физические основы лазерной резки толстых листовых материалов / О.Б. Ковалев, В.М. Фомин. М.: Физматлит, 2013. 256 с.

29. **Прохоров А.М.** Справочник по лазерам: в 2 т. / А.М. Прохоров. М.: Сов. радио, 1978. 504 с.

30. **Реди Дж.** Промышленные применения лазеров / Дж. Реди. М.: Мир, 1981. 638 с.

31. **Айхлер Ю.** Лазеры. Исполнение, управление, применение / Ю. Айхлер, И. Айхлер; пер. с нем. Л.Н. Казанцевой. М.: Техносфера, 2008. 440 с.

32. **Салех Б.** Оптика и фотоника: принципы и применения / Б. Салех, М. Тейх. Долгопрудный: ИД «Интеллект», 2012. 784 с.

33. **Агравал Г.П.** Применение нелинейной волоконной оптики / Г.П. Агравал. СПб.: Лань, 2011. 592 с.

Сперанский Сергей Константинович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Sergey K. Speransky – Ph.D., Associate Professor, Department of welding and metallurgy Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Родионов Игорь Владимирович – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Igor V. Rodionov – Dr. Sc., head of the Department of welding and metallurgy Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 21.09.19, принята к опубликованию 15.11.19

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.

ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ СВЧ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НА КАМЕРАХ ГИБРИДНОГО ТИПА

В.О. Юдина, Ю.С. Архангельский

THE TRANSPORT SYSTEM OF THE MICROWAVE ELECTROTECHNOLOGICAL INSTALLATIONS ON THE CAMERAS HYBRID TYPE

V.O. Yudina, Yu.S. Arkhangelsky

Рассмотрены варианты компоновки и расчет транспортных систем СВЧ электротехнологических установок на камерах гибридного типа, работающих в методическом режиме. Предложены варианты применения электропривода в таких транспортных системах.

Ключевые слова: *транспортная система, СВЧ электротехнологическая установка, камера гибридного типа, методический режим, расчет, электропривод*

Исследования и разработки в области СВЧ электротехнологии ведутся в СПИ – СГТУ имени Гагарина Ю.А. уже 50 лет. За эти годы в вузе разработаны научные основы СВЧ электротермии [1-8], математическое моделирование технологических процессов термообработки диэлектриков в СВЧ электромагнитном поле [9-11], технико-экономическая оптимизация структуры и параметров СВЧ электротермических установок [12-15], рассмотрены вопросы энергетической и экономической эффективности установок [12-14], измерений в СВЧ электротехнологии [16, 17], показано наличие нетепловой СВЧ модификации полимеров [18-20], предложены новые типы рабочих камер: камера с бегущей волной (КБВ) [1, 2, 4, 6], камеры гибридного типа (КГТ) [21-23].

Рассмотрим вопросы проектирования транспортных систем СВЧ электротехнологических установок с КГТ, работающих в методическом режиме.

Variants of arrangement and calculation of transport systems of microwave electro-technological installations on the chambers of hybrid type working in a methodical mode are considered. Variants of application of the electric drive in such transport systems are offered.

Keywords: *transport system, a microwave electro-technological installation, a methodical mode, the electromechanical system*

Для нетепловой СВЧ модификации полимерного материала, среды, изделия в рабочую камеру следует подать значительную СВЧ мощность, чтобы создать в рабочей камере весьма высокую напряженность электрической составляющей E СВЧ электромагнитного поля. Но на нетепловую СВЧ модификацию тратится небольшая доля СВЧ мощности, и если оставшаяся СВЧ мощность рассеять в балластной нагрузке, то КПД установки по использованию СВЧ энергии будет близок к нулю (рис. 1).

В КГТ оставшаяся после нетепловой СВЧ модификации СВЧ мощность подается не в балластную нагрузку, а во вторую рабочую камеру уже тепловой СВЧ модификации, где она используется для термообработки другого диэлектрика. Обе эти камеры принято называть КГТ (рис. 2). В этой камере КПД по использованию СВЧ энергии достигает 90-95 %, а установки выпускают два продукта: изделие, прошедшее нетепловую СВЧ моди-

фикацию, и изделие, прошедшее тепловую СВЧ модификацию.

Это положительно сказывается и на экономической эффективности установки.

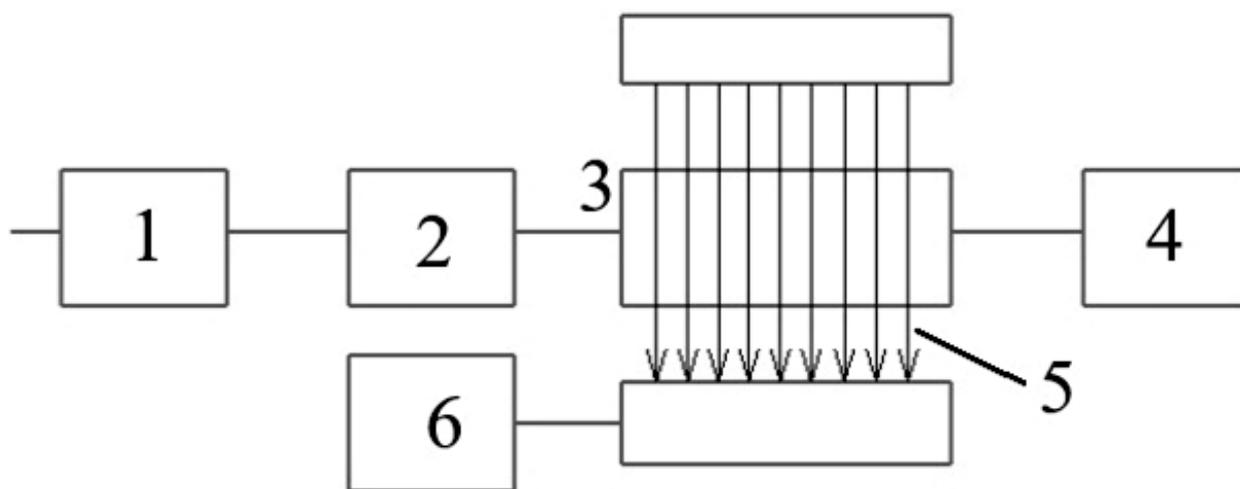


Рис. 1. Компоновка СВЧ электротехнологической установки для нетепловой СВЧ модификации полимерных нитей: 1 – источник СВЧ энергии; 2 – линия передачи (волновод); 3 – рабочая камера нетепловой СВЧ модификации; 4 – балластная нагрузка; 5 – поликапроамидные нити; 6 – электропривод

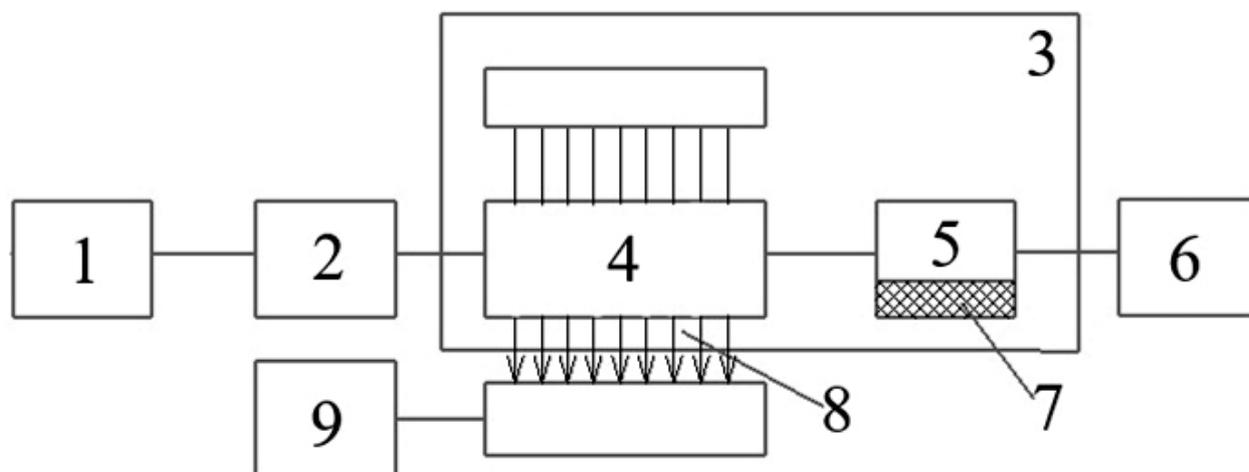


Рис. 2. Компоновка СВЧ электротехнологической установки на КГТ: 1 – источник СВЧ энергии; 2 – линия передачи (волновод); 3 – КГТ; 4 – камера нетепловой СВЧ модификации; 5 – камера тепловой СВЧ модификации; 6 – электропривод; 7 – диэлектрик, подвергаемый тепловой СВЧ модификации; 8 – диэлектрик, подвергаемый нетепловой СВЧ модификации; 9 – электропривод

Отметим, что нетепловая и тепловая СВЧ модификации могут быть организо-

ваны в КГТ, конструктивно состоящей из одной рабочей камеры (рис. 3).

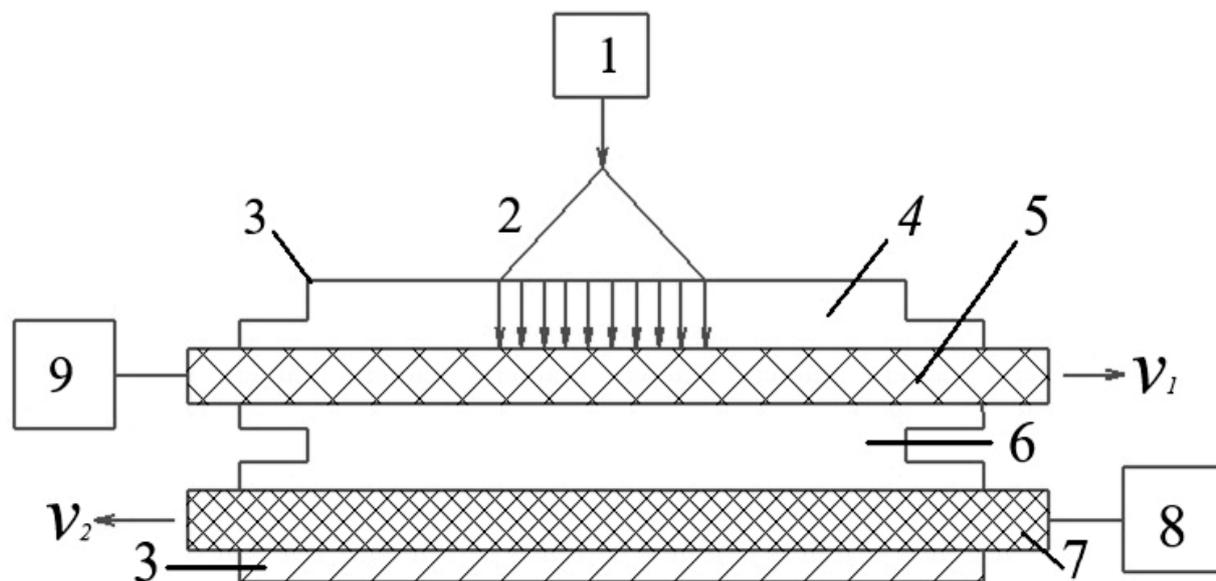


Рис. 3. Компоновка СВЧ электротехнологической установки на КГТ: 1 – источник СВЧ энергии; 2 – излучающий рупор; 3 – КГТ; 4 – воздушный слой; 5 – слой диэлектрика, подвергаемый нетепловой СВЧ модификации; 6 – воздушный слой; 7 – слой диэлектрика, подвергаемый тепловой СВЧ модификации; 8, 9 – электропривод

На рис. 2 и 3 показаны установки с транспортом обрабатываемых объектов с помощью электропривода. Такие установки называют методическими (работающими в методическом режиме). Транспортная система таких установок состоит из входного и выходного шлюзов, транспортного канала и электропривода [24]. Транспортные системы в СВЧ электротехнологии можно подразделить на использующие преобразование электрической энергии в механическую (линейный и вращающий электропривод) и использующие силу тяжести (вертикальные, желобовые), способы транспортировки. Расчетные соотношения и компоновки рассмотрены, например, в работах [25-34].

Что касается классификации электропривода, по способу передачи механической энергии исполнительному органу его можно разделить на групповой, индивидуальный и взаимосвязанный [32].

Групповой электрический привод – это электропривод с одним электродвигателем, обеспечивающий движение ис-

полнительных органов нескольких рабочих машин или нескольких исполнительных органов одной рабочей машины. Если электропривод будет работать от одного электродвигателя, движение обрабатываемых объектов будет происходить в одну сторону. Кинематическая цепь в таком приводе сложна и громоздка, а сам электропривод является неэкономичным, усложняется его эксплуатация и автоматизация технологических процессов.

Индивидуальный электрический привод характеризуется тем, что каждый исполнительный орган рабочей машины приводится в движение отдельным двигателем. Такой вид электропривода наиболее распространен, так как здесь отсутствуют механические передачи, легко осуществляется автоматизация технологического процесса, улучшаются условия обслуживания рабочей машины.

Взаимосвязанный электрический привод – это электропривод, который содержит два или несколько электрически или механически связанных между собой индивиду-

альных электроприводов, при работе которых поддерживается заданное соотношение или равенство скоростей или нагрузок, или положение исполнительных органов рабочих машин. Необходимость в таком приводе возникает по конструктивным или технологическим соображениям.

В нашем случае для установок, показанных на рис. 1 и 2, с точки зрения эко-

номической и энергетической эффективности разумнее использовать индивидуальный привод. А для СВЧ электротехнологической установки целесообразно также использовать взаимосвязанный привод, так как с его помощью можно поддерживать заданное равенство нагрузки, или два индивидуальных привода для каждого транспортного канала.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Архангельский Ю.С.** Сверхвысокочастотные нагревательные установки для интенсификации технологических процессов / Ю.С. Архангельский, И.И. Девяткин. Саратов: Из-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. **Колесников Е.В.** Проектирование электротехнологических установок / Е.В. Колесников. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2006. 283 с.
4. **Архангельский Ю.С.** Справочная книга по СВЧ электротермии / Ю.С. Архангельский. Саратов: Научная книга, 2011. 560 с.
5. Электрофизические методы СВЧ обработки / Ю.С. Архангельский, Е.М. Гришина, К.Н. Огурцов, Р.К. Яфаров. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2014. 196 с.
6. **Архангельский Ю.С.** Камеры с бегущей и со стоячей волной / Ю.С. Архангельский, Е.В. Колесников. Саратов: Буква, 2015. 232 с.
7. **Архангельский Ю.С.** Камеры лучевого типа / Ю.С. Архангельский, С.В. Тригорлый. Саратов: Амирит, 2017. 198 с.
8. Высокотемпературная СВЧ электротермия / Ю.С. Архангельский, С.В. Тригорлый, В.О. Юдина, В.В. Захаров. Саратов: Амирит, 2019. 143 с.
9. **Архангельский Ю.С.** Компьютерное моделирование СВЧ электротехнологических установок / Ю.С. Архангельский, С.В. Тригорлый. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2006. 212 с.
10. **Тригорлый С.В.** Численное моделирование процессов плавления диэлектриков / С.В. Тригорлый, В.В. Захаров // Вопросы электротехнологии. 2018. № 1 (18). С. 5-10.
11. Моделирование процессов СВЧ термообработки диэлектриков с применением пакета COMSOL Multiphysics / С.Г. Калганова, Ю.С. Архангельский, С.В. Тригорлый, В.В. Захаров // Вопросы электротехнологии. 2017. № 3 (16). С. 6-10.
12. **Архангельский Ю.С.** Технико-экономический и социальный аспекты электротехнологии / Ю.С. Архангельский, Е.В. Колесников. Саратов: Амирит, 2017. 197 с.
13. **Толстов В.А.** Эффективность электротехнологических установок / В.А. Толстов, Ю.С. Архангельский. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2000. 148 с.
14. **Архангельский Ю.С.** Элементная база СВЧ электротермического оборудования / Ю.С. Архангельский, В.А. Воронкин. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2003. 212 с.
15. **Архангельский Ю.С.** Ущерб и резервирование в СВЧ электротермии / Ю.С. Архангельский, А.В. Доценко. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2003. 212 с.
16. **Архангельский Ю.С.** Измерения в СВЧ электротехнологии / Ю.С. Архангельский, С.Г. Калганова. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2008. 152 с.

17. **Архангельский Ю.С.** Измерения в СВЧ электротехнологических установках / Ю.С. Архангельский, С. Г. Калганова, Р.К. Яфаров. Саратов: Амирит, 2018. 322 с.

18. **Архангельский Ю.С.** Исследования воздействия СВЧ электромагнитного поля на физико-химические свойства полисульфона / Ю.С. Архангельский, С.В. Тригорный, В.А. Гильмакова // Направляющие линии, функциональные устройства, элементы технологических установок СВЧ: межвуз. науч. сб. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 1997. С. 63-57.

19. **Калганова С.Г.** Нетепловое действие СВЧ электромагнитного поля на диэлектрические объекты / С.Г. Калганова, Ю.С. Архангельский // Электротехнологические СВЧ установки: межвуз. науч. сб. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2000. С. 53-56.

20. СВЧ модификация полимеров / Ю.С. Архангельский, Е.М. Гришина, В.А. Лаврентьев, С.К. Слепцова. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2012. 288 с.

21. **Архангельский Ю.С.** Гибридная СВЧ электротехнологическая установка / Ю.С. Архангельский, Е.М. Гришина // Логистика и экономика ресурсосбережения и энергосбережения в промышленности: сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. МНПК ЛЭРЭП-2 – 2007. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2007. Т. 2. С. 227-230.

22. **Добродум А.С.** СВЧ электротехнологические установки с гибридными камерами / А.С. Добродум, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. 2017. № 3 (16). С. 16-22.

23. **Добродум А.С.** Согласование производительностей гибридной камеры СВЧ электротехнологической установки по нетепловой и тепловой модификациям обрабатываемых материалов / А.С. Добродум, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. 2017. № 4 (17). С. 15-18.

24. **Юдина В.О.** Транспортные системы СВЧ электротехнологических устано-

вок, работающих в методическом режиме / В.О. Юдина, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. 2016. № 3 (12). С. 10-12.

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

26. **Юдина В.О.** Протяжные СВЧ электротехнологические установки / В.О. Юдина, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. 2016. № 1 (10). С. 9-12.

27. **Юдина В.О.** Конвейерная СВЧ электротермическая установка на базе камеры лучевого типа / В.О. Юдина, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. 2016. № 2 (11). С. 5-7.

28. **Архангельский Ю.С.** СВЧ электротермические установки для термообработки жидкости в потоке / Ю.С. Архангельский, В.О. Юдина // Вопросы электротехнологии. 2016. № 2 (11). С. 8-13.

29. **Юдина В.О.** Особенности термообработки диэлектрика в толкательной СВЧ электротехнологической установке на базе камеры с бегущей волной / В.О. Юдина, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. 2016. № 3 (12). С. 13-15.

30. **Архангельский Ю.С.** Согласованные задачи в проектировании методических СВЧ электротермических установок / Ю.С. Архангельский, В.О. Юдина // Вопросы электротехнологии. 2016. № 4 (13). С. 10-12.

31. **Юдина В.О.** Барабанные СВЧ электротехнологические установки / В.О. Юдина, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. 2017. № 2 (15). С. 25-29.

32. **Юдина В.О.** Электропривод методических СВЧ электротермических установок / В.О. Юдина, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. 2018. № 1 (18). С. 27-29.

33. **Архангельский Ю.С.** Особенности конструкции и расчета методической СВЧ электротермической установки для нагрева

вязкой жидкости в потоке / Ю.С. Архангельский, В.О. Юдина // Вопросы электро-технологии. 2018. № 2 (19). С. 39-42.

34. **Юдина В.О.** К расчету мощности электропривода методической СВЧ элек-

тротермической установки / В.О. Юдина, Ю.С. Архангельский // Вопросы электро-технологии. 2018. № 3 (20). С. 8-13.

Юдина Виолетта Олеговна – ассистент кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

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

Violetta O. Yudina – Assistant of the Department «Electric power and electrical engineering» Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Yuri S. Arkhangelsky – Honoured Worker of Science of the Russian Federation, Dr.Sc., Professor, Department «Electric power and electrical engineering» Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 30.10.19, принята к опубликованию 15.11.19

**ДВУХТАКТНЫЙ ИСТОЧНИК ВТОРИЧНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ
МАГНЕТРОНА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ УСТОЙЧИВОГО
СВЧ РАЗРЯДА В ПОТОКЕ ГАЗА**

И.Н. Антонов, А.Н. Пименов, О.Н. Пименова

**A HALF-WAVE MAGNETRON SECONDARY POWER SUPPLY
FOR THE FORMATION OF THE APPLICATION
OF A MICROWAVE DISCHARGE IN A GAS STREAM**

I.N. Antonov, A.N. Pimenov, O.N. Pimenova

Представлена конструкция двухтактного источника электропитания магнетрона, построенная на основе известных схемотехнических решений с применением серийно выпускаемых компонентов и предназначенная для устойчивой работы СВЧ плазмотрона атмосферного давления.

Ключевые слова: однополупериодный удвоитель напряжения, регулировка мощности магнетрона, устойчивый СВЧ разряд, СВЧ плазмотрон

СВЧ энергия электромагнитного поля может использоваться не только для термических процессов обработки объектов с целью удаления влаги за счет ее выпаривания, но и для получения СВЧ плазмы.

Плазма является частично или полностью ионизированным газом, состоящим из атомов, ионов, электронов и свободных радикалов, которые движутся с некоторой скоростью [1].

Передача энергии электромагнитного поля газу происходит за счет ряда столкновений заряженных частиц с нейтральными частицами газа. Характер происходящих столкновений определяется подвижностью электронов. Так как ионы обладают большей массой, под действием внешнего электрического поля приобретаемая ими энергия мала, поэтому при исследовании плазмохимических процессов рассматривают в основном электроны [2].

The article presents the design of a half-wave magnetron power supply, built on the basis of well-known circuitry solutions using batch-produced components, for the stable operation of atmospheric microwave plasma torches.

Keywords: half-wave voltage doubler, power adjustment of the magnetron, stable microwave discharge, microwave plasmatron

Выбор СВЧ диапазона объясняется тем, что для достижения эффективного энергообмена электрического поля с электронами частота столкновений электронов с нейтральными частицами газа должна находиться в пределах 10^9 - 10^{11} столкновений в 1 с. [3]. Этими частотами, лежащими в области СВЧ, и определяется верхний предел эффективного использования электрической энергии.

В качестве промежуточного устройства для преобразования энергии электромагнитного поля в высокотемпературный разряд в газе используют плазмотрон (плазменная горелка) [4].

Особенности СВЧ плазмы определяют перспективность СВЧ энергетики в будущем, при этом возникают вопросы, связанные с конструированием и изготовлением СВЧ плазмотронов.

Проблемы разработки СВЧ плазмотронов атмосферного давления состоят

в устойчивости разряда в потоке газа, поскольку разряд должен не только поддерживаться, но и быть пригодным для практического использования.

Устойчивость плазменного образования определяется непрерывностью ввода СВЧ энергии электромагнитного поля в поток газа. Поэтому особое внимание уделяется источникам питания магнетронов.

Упрощение конструкций вторичных источников питания магнетронов с целью

удешевления СВЧ электротехнологических установок привело к существенному ограничению областей применения СВЧ генераторов в технологических установках [5].

Применение серийно выпускаемых магнетронов и трансформаторов позволяет снизить себестоимость разрабатываемой СВЧ электротехнологической установки и повысить ее надежность. Принципиальная электрическая схема бытовой СВЧ-печи показана на рис. 1.

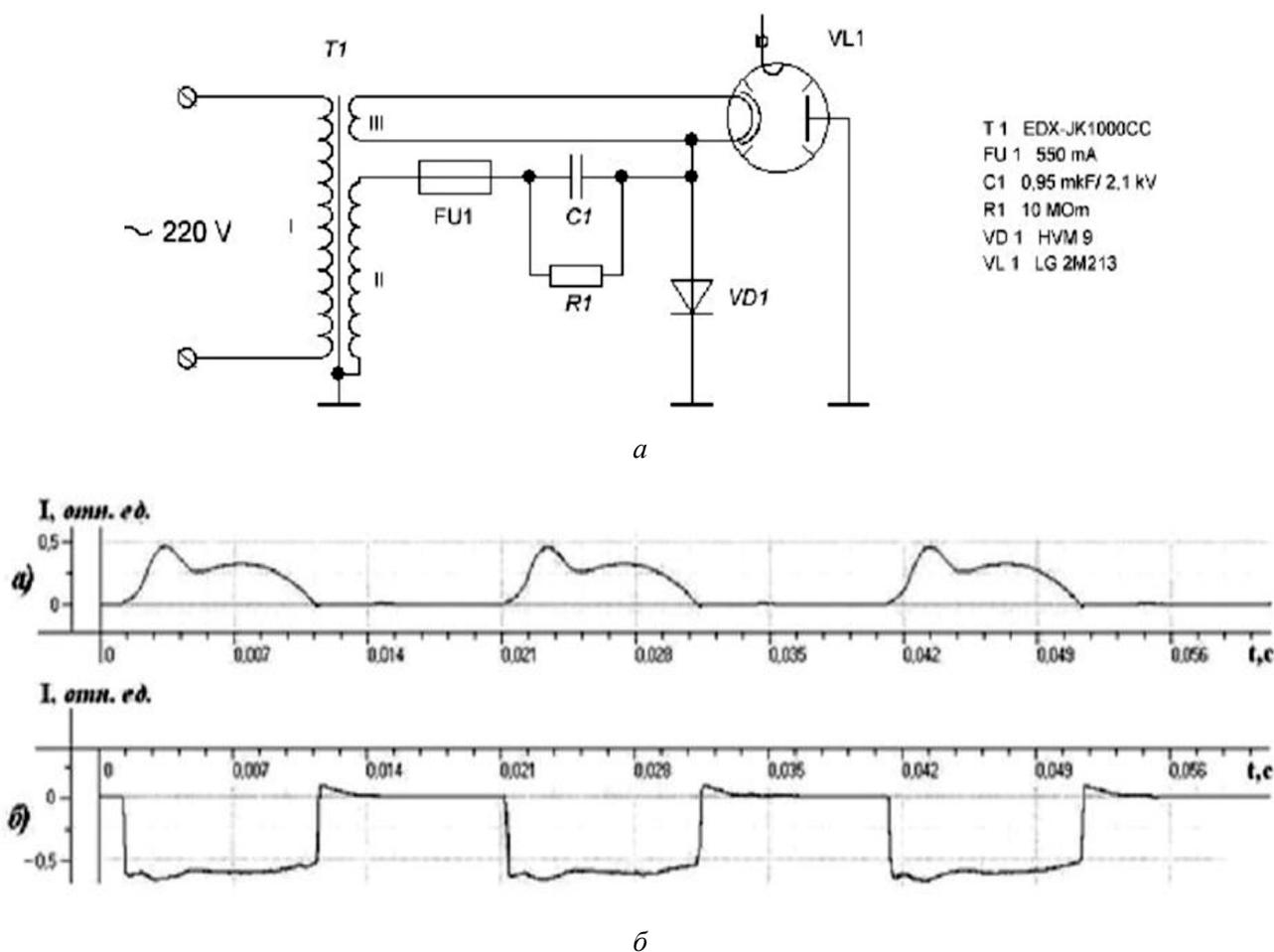


Рис. 1. Источник вторичного питания магнетрона: *а* – принципиальная электрическая схема однополупериодного удвоителя напряжения; *б* – осциллограммы регистрируемых сигналов [6] (*а* – анодный ток магнетрона; *б* – анодное напряжение магнетрона)

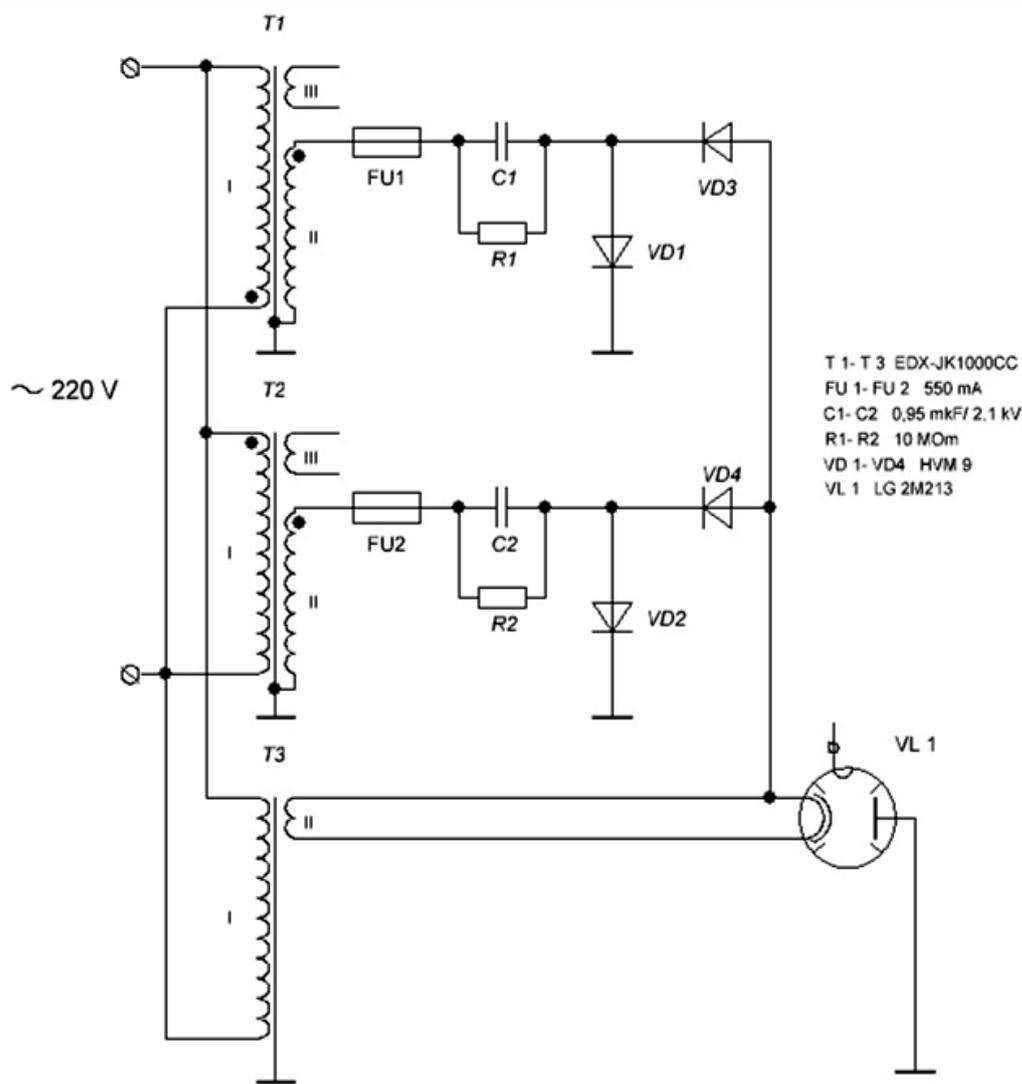
Конструктивно источник вторичного электропитания бытовой СВЧ печи состоит из повышающего трансформатора T_1 , диодного столба VD_1 и конденсатора C_1 , образующих однополупериодный удвоитель напряжения. При таком схемотехническом решении СВЧ энергия электромагнитного поля представляет со-

бой повторяющиеся импульсы длительностью 1 мс с периодом повторения 2 мс [7]. В этих условиях поддержание устойчивого горения плазмы при атмосферном давлении практически невозможно.

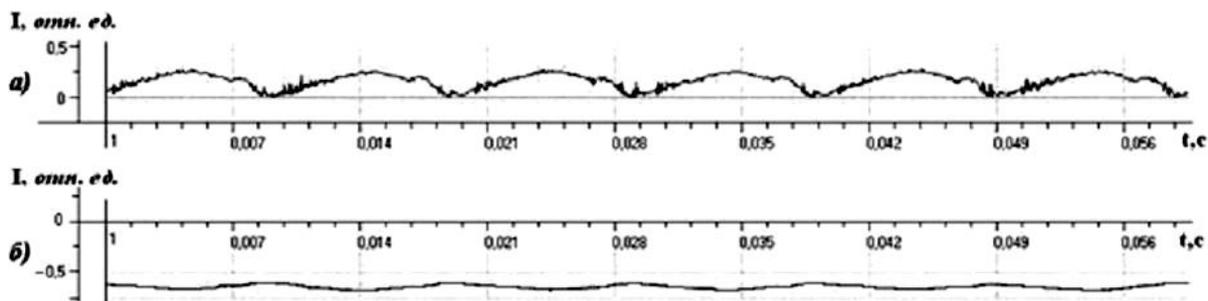
С целью увеличения энерговклада в плазму газового разряда без существенно-

го изменения конструкции энергетической системы установки было решено использовать схему с двумя источниками

питания, включенными параллельно (рис. 2). При этом продолжительность включения магнетрона возрастает.



а



б

Рис. 2. Источник вторичного питания магнетрона: *а)* принципиальная электрическая схема двух параллельно включенных однополупериодных удвоителей напряжения; *б)* осциллограммы регистрируемых сигналов [6] (*а* – анодный ток магнетрона; *б* – анодное напряжение магнетрона)

Для исключения электрического перенапряжения во вторичной обмотке трансформатора в момент включения в схему электропитания магнетрона был введен дополнительный накаливающий трансформатор. Подобное схемотехническое решение обеспечивает подогрев катода в дежурном

режиме [8]. Вторичная обмотка накаливающего трансформатора должна иметь изоляцию, выдерживающую высокое напряжение.

В соответствии с изложенным выше была предложена типовая конструкция установки (рис. 3).

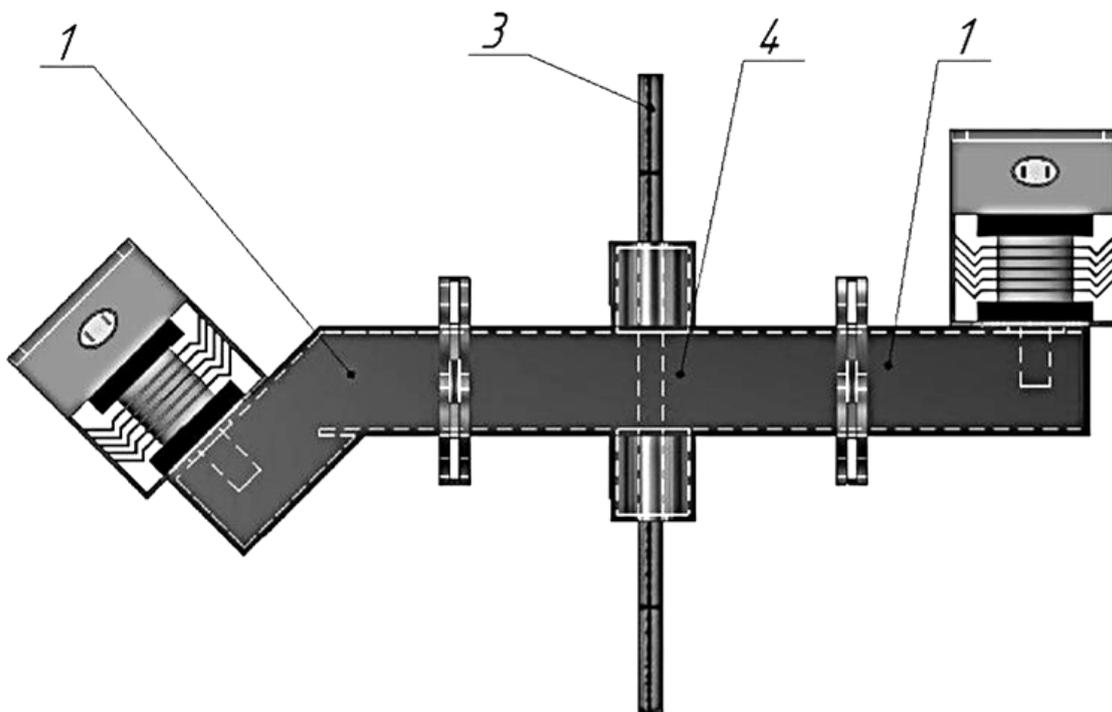


Рис. 3. Вариант конструкции СВЧ-плазмотрона атмосферного давления на волне H_{10} на стоячей волне с двумя устройствами ввода СВЧ мощности: 1 – устройство ввода СВЧ; 2 – тройник; 3 – кварцевая трубка; 4 – рабочая камера; 5 – согласованная нагрузка

На рис. 3 представлен участок прямоугольного волновода с двусторонней подачей энергии СВЧ электромагнитного поля, при этом для исключения взаимного влияния генераторов друг на друга магнетроны включены противофазно. При таком варианте включения магнетроны работают в различные неперекрывающиеся периоды времени, что обеспечивает почти непрерывную подачу энергии СВЧ электромагнитного поля в плазменный разряд.

Так как продолжительность включения каждого из магнетронов в единицу времени возросла, соответственно увеличилась и выходная мощность каждого генератора. Оценить величину мощности, подводимой к газовому разряду каждым магнетроном можно теплофизическим методом с помощью проточного калориметрического ваттметра [9] (рис. 4).

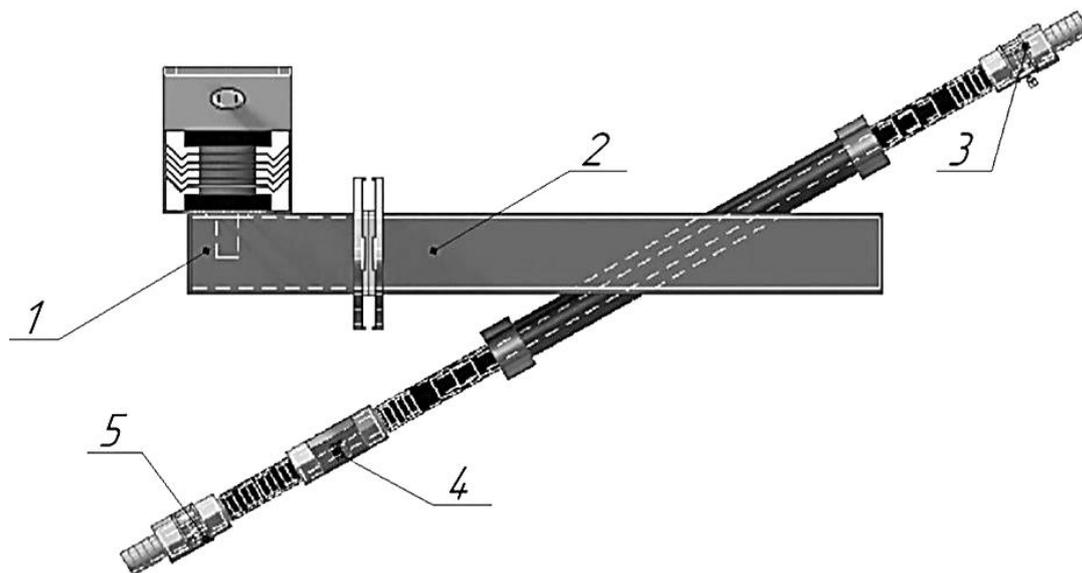


Рис. 4. Измерение выходной мощности СВЧ генератора с помощью калориметрического ваттметра: 1 – устройство ввода энергии СВЧ электромагнитного поля; 2 – согласованная нагрузка; 3 – термистор для определения начальной температуры жидкости; 4 – термистор для определения температуры жидкости на выходе нагрузки; 5 – расходомер жидкости

Численное значение мощности может быть получено из соотношения [9]

$$P = \nu \rho c \Delta T, \quad (1)$$

где ν – расход охлаждающей жидкости, м³/с; ρ – плотность жидкости, кг/м³; c – удельная теплоемкость жидкости, Дж/кг×К; ΔT – разность температур на входе и выходе ваттметра, К.

Поскольку выходная мощность магнетронов увеличится, то увеличится величина напряженности электрического поля внутри прямоугольного волновода. Связь мощности СВЧ-электромагнитного поля, вводимой в прямоугольный волновод, и напряженности электрического поля показана в соотношении [10]

$$E_m = 2 \cdot \sqrt{\frac{Z_{TE}}{a \cdot b}} \cdot P, \quad (2)$$

где Z_{TE} – характеристическое сопротивление волновода, Ом; P – выходная мощность

генератора, Вт; $a \times b$ – поперечное сечение прямоугольного волновода, м.

В ряде экспериментов было установлено, что приведенная электрическая схема вторичного источника питания является пригодной для проведения дальнейших прикладных исследований, связанных с применением СВЧ разряда. При совместной работе двух генераторов и рассматриваемого выше источника питания, удалось организовать дискретную регулировку мощности, подводимой к СВЧ разряду, за счет поочередного включения и выключения в электросеть первичных обмоток высоковольтных трансформаторов.

Введение дополнительных трансформаторов в конструкцию источника питания привело к существенному увеличению массогабаритных размеров СВЧ плазмотрона, однако подобный критерий не является значимым для лабораторной модели. При этом возникла проблема, связанная с перегревом магнетронов, которую удалось решить направленным воздушным потоком от вентилятора.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Голант В.Е.** Сверхвысокочастотные методы исследования плазмы / В.Е. Голант. М.: Наука, 1968, 327 с.

2. **Мак-Доналд А.** Сверхвысокочастотный пробой в газах / А. Мак-Доналд. М.: Мир, 1969. 213 с.

3. СВЧ энергетика / под ред. Э. Окресса. М.: Мир, 1971. 248 с.

4. **Диденко А.Н.** СВЧ энергетика: теория и практика / А.Н. Диденко. М.: Наука, 2003.

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

6. Технологические комплексы интегрированных процессов производства изделий электроники / А.П. Достанко

и др. Минск: Беларуская наука, 2016. 251 с.

7. Бюджетные генераторы для микроволновых плазмотронов / В.Н. Тихонов, И.А. Иванов, А.Е. Крюков, А.В. Тихонов // Прикладная физика. 2015. № 5. С. 102-106.

8. **Явчуновский В.Я.** Микроволновая и комбинированная сушка: физические основы, технологии и оборудование / В.Я. Явчуновский. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1999. 212 с.

9. **Архангельский Ю.С.** Измерения в СВЧ электротехнологических установках / Ю.С. Архангельский, С.Г. Калганова, Р.К. Яфаров. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2008. 263 с.

10. **Кухаркин Е.С.** Основы инженерной электрофизики / Е.С. Кухаркин. М.: МЭИ, 1973. 78 с.

Антонов Игорь Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Химия и химическая технология материалов» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Пименов Арсений Николаевич – аспирант кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Пименова Ольга Николаевна – аспирант кафедры «Электронные приборы и системотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Igor N. Antonov – Dr. Sc., Professor, Department of Chemistry and chemical technology of materials Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Arseniy N. Pimenov – Postgraduate, Department of Electric power and electrical engineering Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Olga N. Pimenova – Postgraduate, Department of Electronic devices and systems engineering Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 13.10.19, принята к опубликованию 15.11.19

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ В СВЧ УСТАНОВКЕ

М.И. Тухватуллин

RESULTS OF EXPERIMENTAL RESEARCHES OF DRYING OF LUMBER IN A MICROWAVE INSTALLATION

M.I. Tukhvatullin

Приведены результаты экспериментальных исследований сушки пиломатериалов в СВЧ технологической установке с вращением их в пространстве рабочей камеры при дискретном расположении магнетронов. Рассмотрены четыре режима работы СВЧ технологической установки: два режима с вращением штабеля пиломатериалов, два режима – без вращения. Описаны технология загрузки установки и методика проведения экспериментальных исследований.

Ключевые слова: **СВЧ** технологическая установка, сосновые доски, режимы работы, магнетрон, механизм вращения штабеля пиломатериалов, температура, влажность

The results of experimental studies of drying lumber in a technological unit by rotating them in the space of the working chamber with a discrete arrangement of magnetrons are presented. Four modes of operation of the technological installation are considered: two modes with rotation of the stack of lumber, two modes – without rotation. The installation loading technology and the experimental research technique are described.

Keywords: *technological installation, pine boards, operating modes, magnetron, rotation mechanism of a stack of lumber, temperature, humidity*

Экспериментальные исследования сушки пиломатериалов в СВЧ технологической установке проведены на примере сосновых досок размерами 50×150×1000 мм, сформированных в штабель [1]. Пиломатериал закрепляют на двух рамах в два ряда по горизонтали в рабочей камере СВЧ технологической установки. Для лучшего прохождения СВЧ энергии через штабель между образцами устанавливаются деревянные прокладки толщиной 5...6 см. После укладки пиломатериалов сверху закрывается крышка, обеспечивающая электрическую герметизацию установки.

Внешний вид загруженной СВЧ технологической установки приведен на рис. 1.

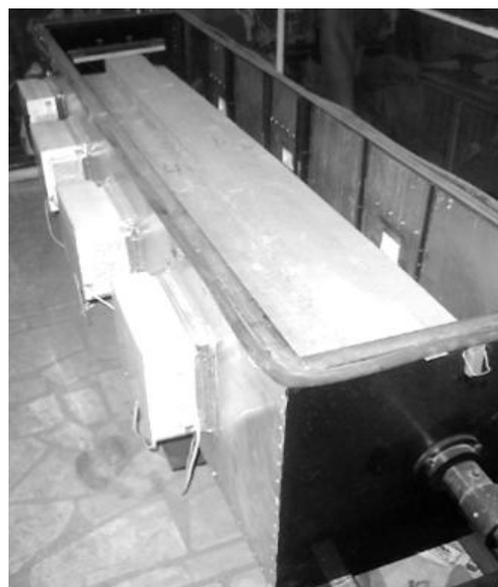


Рис. 1. Внешний вид загруженной технологической установки

Проведены экспериментальные исследования в четырех режимах: первый режим – включены 7 магнетронов и механизм вращения, второй режим – включены 4 магнетрона и механизм вращения, третий режим – включены 7 магнетронов, механизм вращения отключен, четвертый режим – включены 4 магнетрона, механизм вращения отключен.

Контроль влажности и температуры пиломатериалов в процессе сушки

в СВЧ технологической установке осуществлялся путем периодического их измерения с помощью датчиков, установленных в четырех точках по длине каждой заготовки штабеля пиломатериалов. Для этих целей разработана автоматизированная система управления СВЧ технологической установкой, функциональная схема которой представлена на рис. 2.

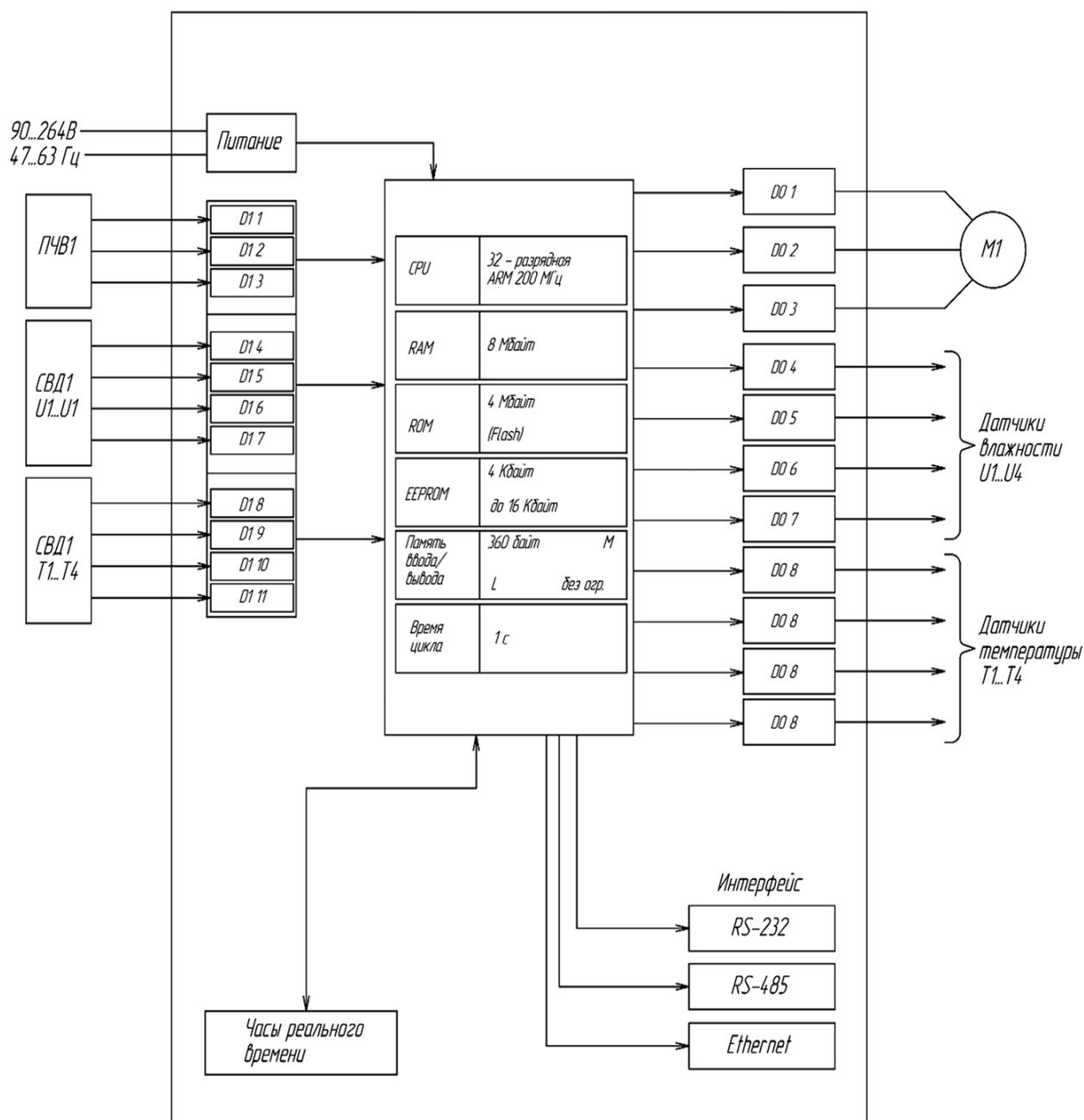


Рис. 2. Функциональная схема автоматизированной системы управления СВЧ технологической установкой: ПЧВ1 – преобразователь частоты; СВД1 – прибор измерения влажности и температуры древесины; M1 – двигатель привода вращения пиломатериала

Для проверки адекватности экспериментальных исследований использовалось следующее поверенное оборудование: прибор для измерения влажности материалов testo 606-1, поверхностный термометр testo 905-T2, инфракрасный пирометр testo 830-T1 [2]. В состав автоматизированной системы управления СВЧ технологической установкой входят:

- контроллер ОВЕН ПЛК 154 для малых систем автоматизации;
- преобразователь частоты ОВЕН ПЧВ1;
- прибор измерения влажности и температуры древесины СВД1;
- 4 кондуктометрических датчика для измерения температуры;
- 4 кондуктометрических датчика для измерения влажности.

Измерения влажности и температуры на торцах сосновых досок после сушки в СВЧ технологической установке представлены на рис. 3.

Результаты экспериментальных исследований изменения влажности и температуры от времени сушки для каждого из

четырех режимов представлены на рис. 4-7.

Внешний вид образцов сосновых пиломатериалов после СВЧ сушки в четырех режимах представлен на рис. 8.

В результате сушки штабеля пиломатериалов на первом и втором режимах коробления и обугливания древесины не выявлено, изгибы и кручение заготовок штабеля пиломатериалов отсутствуют, что говорит о качественной сушке. Трещины отсутствуют.

Качество пиломатериала соответствует II категории (допускается снижение прочности на скалывание и ударный изгиб не более 5 %). Материалы этой категории используют в столярном и мебельном производствах, пассажирском вагоностроении, автостроении, сельхозмашиностроении и др. [3]. Деградация древесины составляет менее 2 %.

В результате сушки штабеля пиломатериалов на втором и третьем режимах присутствует коробление древесины, обугливания не выявлено, изгибы и кручение заготовок штабеля пиломатериалов отсутствуют. Трещины присутствуют.

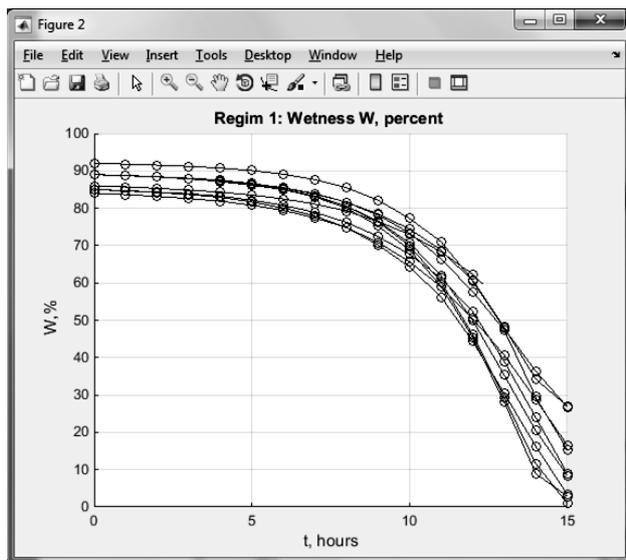


а

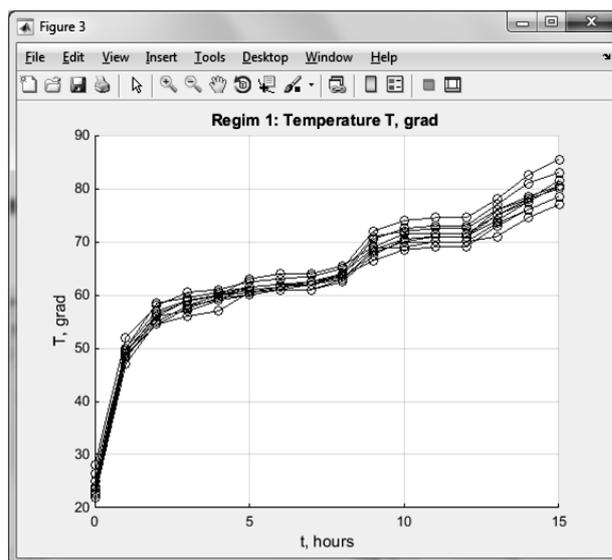


б

Рис. 3. Измерения влажности и температуры на торцах сосновых досок после сушки в СВЧ технологической установке: *а* – измерение влажности; *б* – измерение температуры

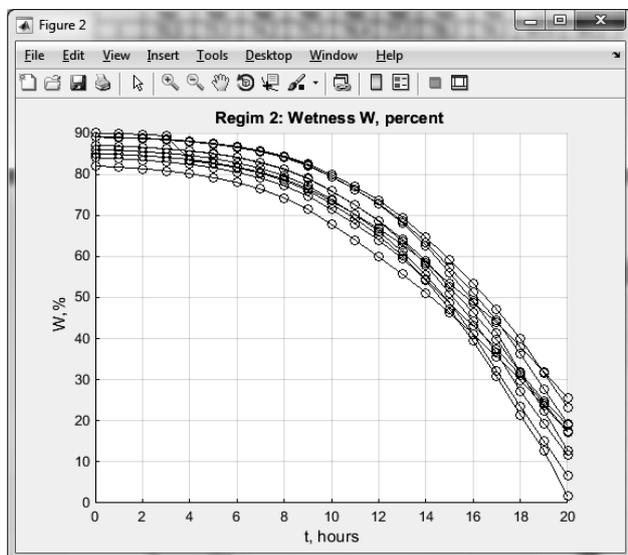


a

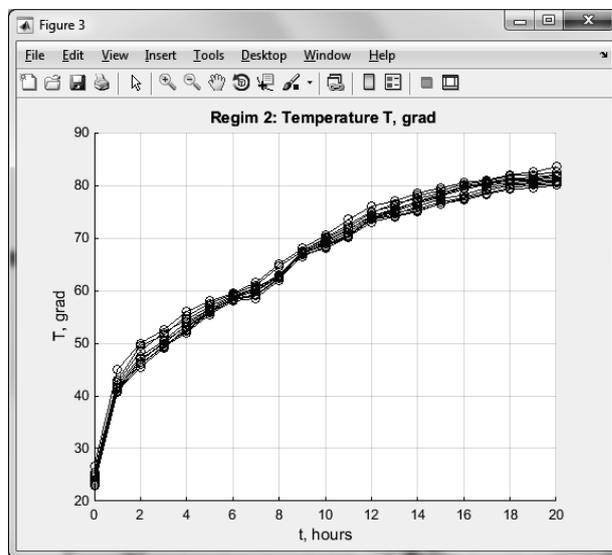


б

Рис. 4. Результаты экспериментальных исследований изменения влажности и температуры от времени сушки для первого режима: *a* – изменение влажности; *б* – изменение температуры

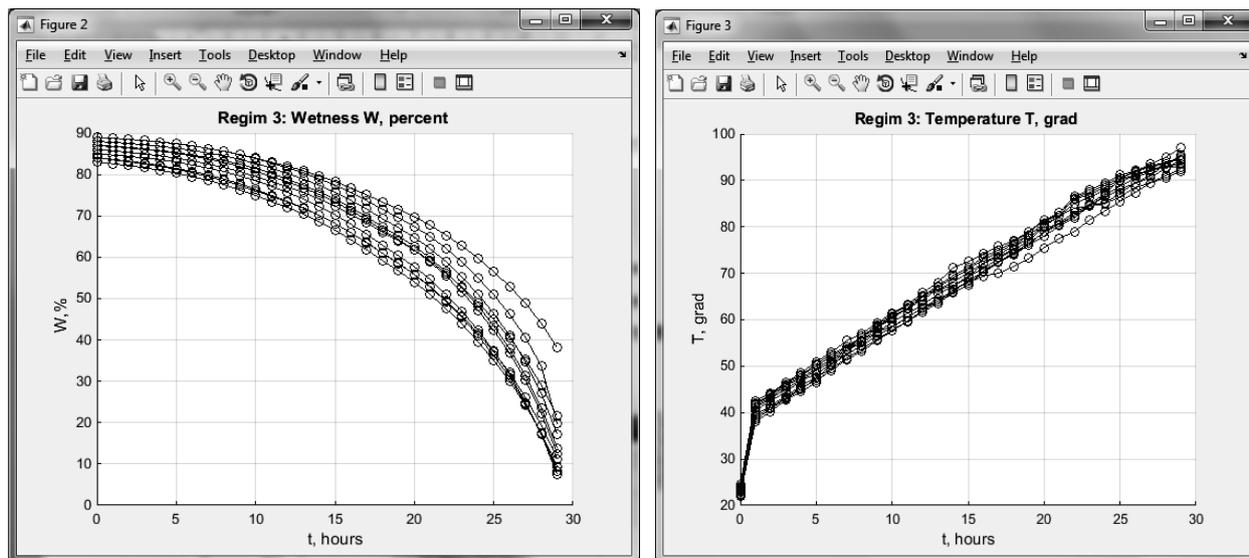


a



б

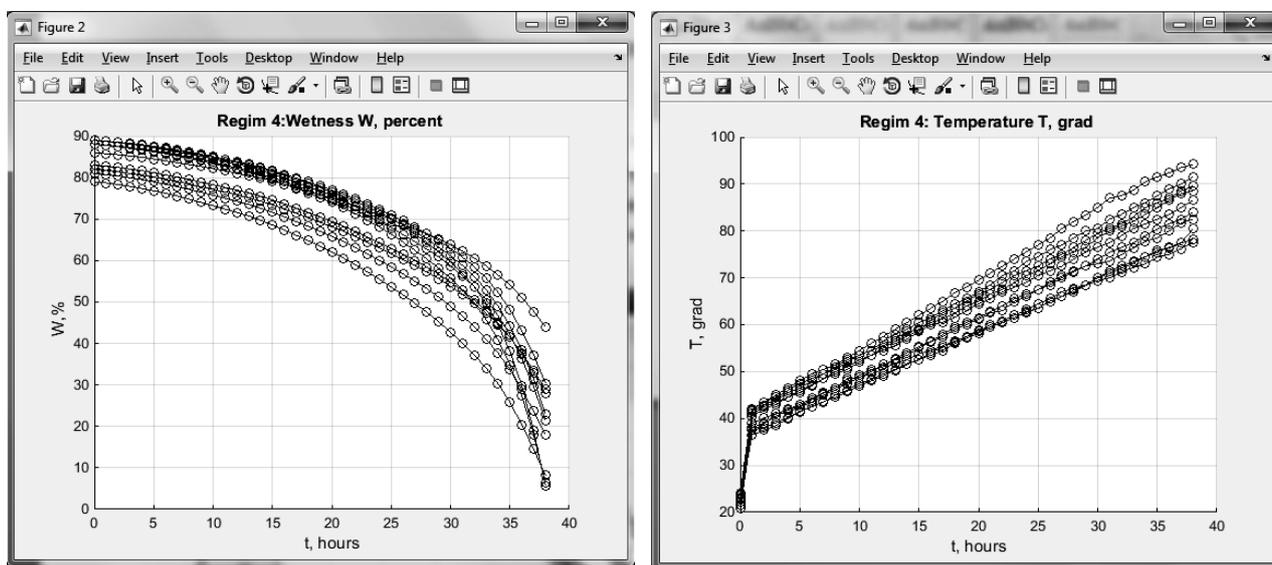
Рис. 5. Результаты экспериментальных исследований изменения влажности и температуры от времени сушки для второго режима: *a* – изменение влажности; *б* – изменение температуры



a

б

Рис. 6. Результаты экспериментальных исследований изменения влажности и температуры от времени сушки для третьего режима: *a* – изменение влажности; *б* – изменение температуры



a

б

Рис. 7. Результаты экспериментальных исследований изменения влажности и температуры от времени сушки для четвертого режима: *a* – изменение влажности; *б* – изменение температуры

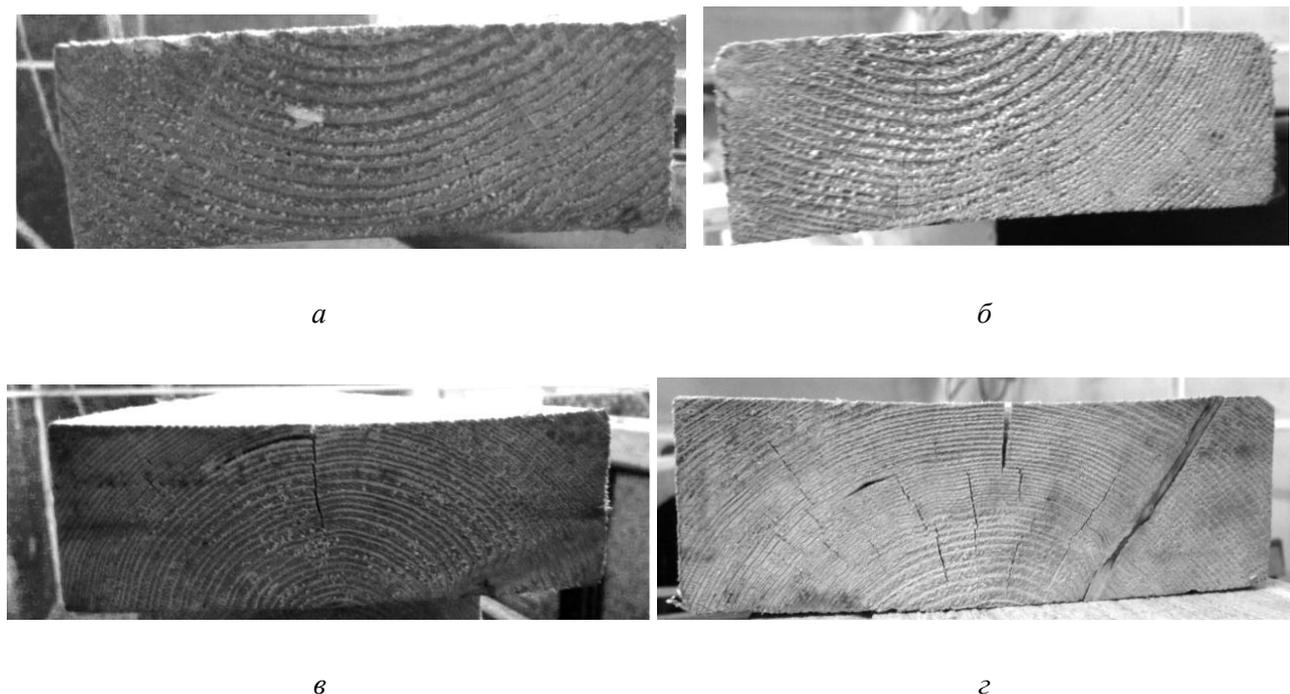


Рис. 8. Внешний вид образцов сосновых пиломатериалов после СВЧ сушки: *а* – первый режим сушки; *б* – второй режим сушки; *в* – третий режим сушки; *г* – четвертый режим сушки

Качество пиломатериала соответствует III категории с допускаемым незначительным снижением прочности древесины. Применяют такую древесину в грузовом вагонеостроении, строительстве (кроме изготовления окон, дверей и деревянных ферм), в производстве тары [3]. Деградация древесины колеблется в пределах 10...12 %.

Качество высушенных сосновых пиломатериалов соответствует ГОСТ 6782.1-75 [4].

Установлено, что вращение штабеля пиломатериалов в СВЧ технологической установке при дискретном расположении магнетронов позволяет ускорить процесс сушки с 29 до 14 часов и с 39 до 18 часов за счет более равномерного распределения СВЧ энергии. Деградация древесины уменьшилась с 12 до 1,5 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Аипов Р.С.** СВЧ установка для сушки пиломатериалов / Р.С. Аипов, М.И. Тухватуллин, М.Л. Хабибуллин // Сельский механизатор / ФГОУ ВПО «МГАУ им. В.П. Горячкина. 2011. № 10. С. 30-31.

2. **Тухватуллин М.И.** Измерение влажности и температуры в процессе СВЧ-сушки сосновых досок / М.И. Тухватуллин // Современное состояние, традиции и

инновационные технологии в развитии АПК: материалы Междунар. науч.-практ. конф. в рамках XXVIII Международной специализированной выставки «Агрокомплекс-2018». Уфа: Башкирский ГАУ, 2018. С. 285-288.

3. **Болдырев П.В.** Сушка древесины / П.В. Болдырев. СПб.: ПРОФИКС, 2002. 156 с.

4. ГОСТ 6782.1-75 Пилопродукция из древесины хвойных пород. Величина усушки

(с изменением № 1). Введ. 1976-07-01. М.: Межгосударственный стандарт, 2009.

Тухватуллин Мидхат Ильфатович – старший преподаватель кафедры «Электро-снабжение и автоматизация технологических процессов» Башкирского государственного аграрного университета

Midkhat I. Tukhvatullin – Senior Lecturer, Department «Power Supply and automation of technological processes» Bashkir state agrarian University

Статья поступила в редакцию 30.10.19, принята к опубликованию 15.11.19

К СВЕДЕНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

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

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 621.318.3

СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ

Д.А. Вырыханов, Г.Г. Угаров, В.И. Мошкин

STRUCTURAL ANALYSIS OF THE PROCESS ELECTROMECHANICAL ENERGY CONVERSION

D.A. Vyrykhanov, G.G. Ugarov, V.I. Moshkin

Представлены результаты структурного анализа процессов электромеханического преобразования энергии в наиболее общем виде без учета явлений гистерезиса, вихревых токов и потоков рассеяния магнитного поля.

Ключевые слова: *электромеханическое преобразование энергии, электрическая мощность, магнитная мощность, механическая мощность, структурная схема, энергия*

В настоящее время остается актуальным структурный анализ процессов электромеханического преобразования энергии, являющихся основой работы электрических машин и аппаратов различного назначения. основополагающий закон сохранения энергии, открытый М.В. Ломоносовым, дополненный законами движения энергии, описанными в работах Н.А. Умова, позволил представить сложные технические системы в виде преобразователей различных видов энергии. Применение формального анализа динамики работы преобразователей на основе принципов минимального действия Гамильтона позволило вывести законы Кирхгофа, наибольшее развитие получившие в анализе работы электрических цепей. При этом анализ электромеханических преобразователей [1] усложнен пространственным распределением электромагнитного поля, что требует представления их в виде систем с распределёнными

The results of the structural analysis of the processes of Electromechanical energy conversion in the most General form without taking into account the phenomena of hysteresis, eddy currents and magnetic field scattering flows are presented.

Keywords: *electromechanical energy conversion, electrical power, magnetic power, mechanical power, block diagram, energy*

в пространстве параметрами. В них присутствует дополнительная фазовая плоскость, описываемая в координатах местоположения и скоростей подвижных элементов. Сложность рассматриваемых вопросов подтверждается тем, что вплоть до середины прошлого века в научной среде велась дискуссия о формулах расчета электромагнитного усилия – объединяющего электромагнитные и механические подсистемы преобразователей энергии [2]. Все это не позволило к настоящему времени сформировать единое представление об очередности преобразования различных видов энергий в процессе электромеханического преобразования. В свою очередь, это приводит к необходимости применения численных методов интегрирования уравнений, описывающих работу электрических машин, что, хотя и позволяет достаточно быстро произвести их проектирование, но, без сомнения, сдерживает развитие теории

электрохимического преобразования энергии и не позволяет получить результаты синтеза новых конструкций преобразователей в рациональной форме.

Проведем анализ процесса электрохимического преобразования энергии в наиболее общем виде, не рассматривая при этом вопросы, связанные с явлениями гистерезиса, вихревых токов и магнитных потоков рассеяния.

Согласно академическому определению, энергия – это скалярная физическая величина, являющаяся единой мерой различных форм движения материи и мерой перехода движения материи из одних форм в другие. Таким образом, в основе понятия энергии лежит понятие «движение», которому энергия придает количественную оценку. При этом под движением подразумевается изменение произвольных физических характеристик рассматриваемых процессов, а не только перемещение в пространстве. Следует отметить, что техническая система обладает энергией в той мере, в какой она способна произвести работу по изменению собственных физических характеристик. Способность системы произвести работу определяет наличие в ее структуре накопителя энергии, способного содержать энергию в течение некоторого промежутка времени. Таким образом, процесс преобразования энергии можно определить как процесс перераспределения энергии между накопителями энергии, протекающий в течение некоторого времени и подчиняющийся взаимосвязям, определяющим уникальность рассматриваемой технической системы.

Согласно определению, электрохимическим преобразованием энергии называют процесс превращения электрической энергии в механическую или обратный процесс превращения механической энергии в электрическую. При этом в рассматриваемых процессах энергопреобразование протекает в присутствии магнитной формы энергии, а электрическая, магнитная и механическая формы энергии являются основными формами энергии, участвующими в процессе электрохимического преобразования энергии.

Помимо основных форм энергии, имеются потери энергии при тепловом рассеянии в электрических проводниках (обмотках), потери энергии на перемагничивание магнитопровода преобразователей (обусловлены явлением гистерезиса), потери энергии в паразитных полях рассеяния, не участвующих в процессе энергопреобразования, потери энергии на трение подвижных частей преобразователей.

К настоящему времени сформировалось два основных подхода к построению структурных схем электрохимического преобразования энергии. Согласно первому из них [3], преобразование является последовательным, то есть магнитный накопитель связывает между собой накопители электрической и механической видов энергий. Возможные режимы работы электрохимического преобразователя по данной структурной схеме представлены на рис. 1. Малыми стрелками показаны потоки мощности из или в накопителе электрической и механической энергий, большой стрелкой показан суммарный поток мощности, увеличивающий или уменьшающий величину магнитной энергии. В зависимости от направления потока мощности, связанного с накопителем механической энергии, можно выделить семь двигательных и семь генераторных режимов работы преобразователя. В электромагнитном режиме энергопреобразование происходит только между накопителями электрической и магнитной энергий (режимы № 8, 16), при этом изменения величины механической энергии не происходит.

Второй из возможных подходов к структурному анализу электрохимического процесса заключается в представлении его как суммы параллельных процессов энергопреобразования между отдельными накопителями электрической, магнитной и механической энергий и отдельным накопителем «электрохимической» энергии. Эта структурная схема представлена на рис. 2. Преобразование энергии представлено в виде направленных стрелок, указывающих преобразование одного вида энергии в другой. Процессы

энергопреобразования оказывают влияние друг на друга, поэтому выделение некоторой величины «электромеханической» энергии, участвующей в процессе электро-механического преобразования энергии, имеет методически обоснованный смысл. В процессе энергопреобразования каждый из накопителей энергии (электрической, маг-

нитной, механической) участвует в процессе энергопреобразования в той или иной степени. Потери энергии, условно представленные единым накопителем, в соответствии со своим физическим смыслом могут только забирать энергию из общего количества энергии, участвующей в процессе энергопреобразования.

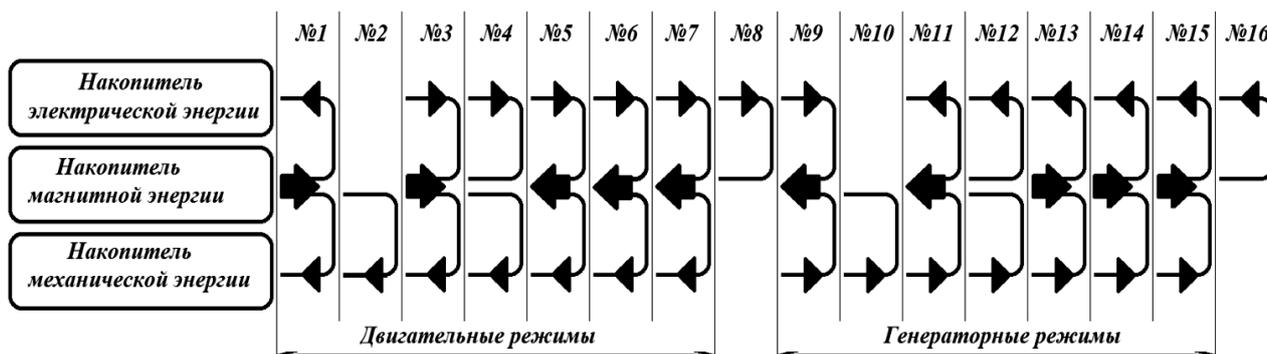


Рис. 1. Возможные режимы работы последовательной структурной схемы электромеханического преобразования

Учитывая, что внешний источник (накопитель) электрической энергии может находиться на удалении от энергопреобразователя, следует в структуре электромеханического преобразователя энергии ввести накопитель энергии электрического тока. Накопленная в нем энергия определится кинетической энергией движущихся заря-

дов. В структуре процесса электромеханического преобразования энергии также необходимо включить накопитель кинетической энергии электрического тока, связывающий энергию электромеханического преобразования с внутренним накопителем электрической энергии и накопителем магнитной энергии (рис. 3).



Рис. 2. Параллельная структурная схема процесса электромеханического преобразования энергии



Рис. 3. Уточненная параллельная структурная схема процесса электромеханического преобразования энергии

Возможность построения «последовательной» структурной схемы электромеханического преобразования энергии основана на качественном отличии процессов электромеханического преобразования энергии связанных с превращением энергии в механическую форму кинетической энергии от процессов накопления механической потенциальной энергии. Изменение индуктивности при относительном движении магнитопроводов энергопреобразователя сопровождается наличием некоторой противоЭДС в электрической подсистеме и соответственно обменом энергией между электрической и механической подсистемами. Это основной принцип, на котором строится процесс электромеханического преобразования энергии в реактивных электрических двигателях. Данное явление обуславливает взаимовлияние процессов механического движения и изменения электрических характеристик (в первую очередь электрического тока), в то время как приращение потенциальной механической энергии является вторичным процессом превращения кинетической энергии относительного движения магнитопровода преобразователя в потенциальную механическую энергию магни-

топровода. Если величина энергии электромеханического преобразования, превращенная в кинетическую энергию, зависит от динамики изменения электрического тока в обмотках возбуждения преобразователя, то величина потенциальной механической энергии не зависит от характера изменения тока, а соответствует только мгновенной величине индуктивности. Из этого можно сделать вывод о влиянии потребления электрической мощности только на процесс превращения энергии в кинетическую энергию движения магнитопровода, в то время как накопление потенциальной механической энергии является вторичным процессом превращения в нее кинетической энергии движения подвижных частей преобразователя. Таким образом, можно утверждать, что потенциальная механическая энергия является уже полезной энергией электромеханического преобразования, отдаваемой технологическому объекту.

Частные случаи электромеханического преобразования энергии определяются знаками приращения величин энергий в обозначенных нами накопителях. Исходя из общей структурной схемы, представленной на рис. 3, на рис. 4 представлены

возможные сочетания данных приращений. На рис. 4 введены следующие обозначения: $W_{эл}^{вн}$ – электрическая энергия во внешнем накопителе (системе питания); $W_{эл}^{внут}$ – электрическая энергия внутреннего накопителя энергии в виде кинетической энергии движущихся зарядов (электрического тока); $W_{маг}$ – энергия магнитного поля; $W_{мех.к}$ – механическая кинетическая энергия движущихся масс преобразователя; $W_{мех.п}$ – механическая потенциальная энергия приводимых в движения частей преобразователя.

Рассматриваемый в работе электромеханический преобразователь является открытой системой, взаимодействующей с внешним миром через приращения энергии в

собственных накопителях, то есть электромеханический преобразователь рассматривается как неконсервативная система. Учитывая неограниченную величину энергии во внешнем накопителе электрической энергии, приращение энергии в нем определится только с электромеханическим преобразователем энергии, исключив возможность $\Delta W_{эл}^{вн} = 0$. Режим, при котором потенциальная механическая энергия в процессе энергопреобразования постоянна, требует равенства нулю и приращения кинетической механической энергии. Данный режим характеризует преобразование энергии только между электрическим и магнитным накопителями. Исходя из этого, данный режим не обозначен на рис. 4.

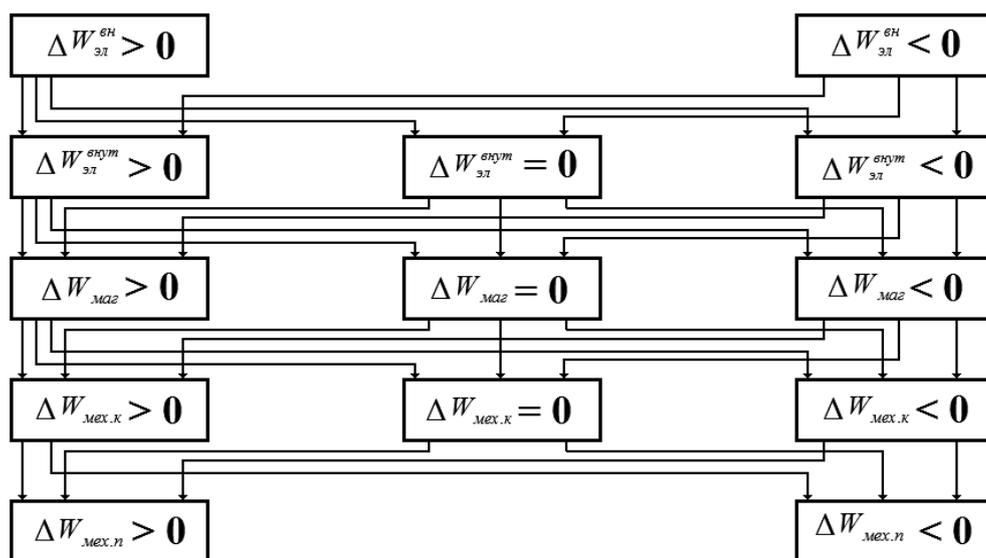


Рис. 4. Возможные соотношения между приращениями величин энергии при электромеханическом преобразовании энергии

Представленные на рис. 4 возможные варианты электромеханического преобразования энергии можно разделить на две основные группы:

- обеспечивающие увеличение кинетической механической энергии (назовем данные режимы двигательными режимами энергопреобразования);
- сопровождаемые уменьшением кинетической энергии (назовем данные режимы генераторными режимами энергопреобразования).

Построения на рис. 4 не отражают последовательность во времени перехода энергии энергопреобразования из одного накопителя (одной формы энергии) в другой (другую форму энергии).

На рис. 5 представлены возможные варианты двигательных режимов электромеханического преобразования энергии, на рис. 6 – генераторных режимов.

Для построений, представленных на рис. 5, 6, следует отметить, что режим работы зависит от внешних условий, в кото-

рых работает энергопреобразователь, таких как поданное напряжение на его обмотки возбуждения, механические силы сопротивления движению подвижных частей преобразователя. Путем динамического изменения во времени данных внешних воз-

действий становится возможным реализовать тот или иной требуемый режим энергопреобразования. На рис. 5, 6, там, где не обозначен знак приращения энергии в каком-либо накопителе, подразумевается, что он может быть произвольным.

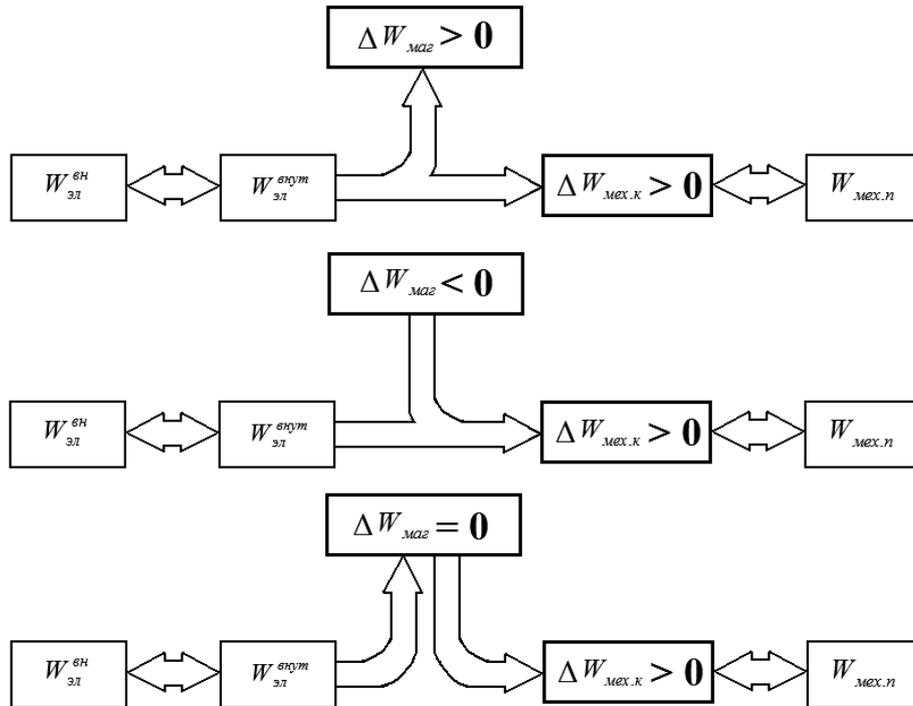


Рис. 5. Возможные двигательные режимы электромеханического преобразования энергии

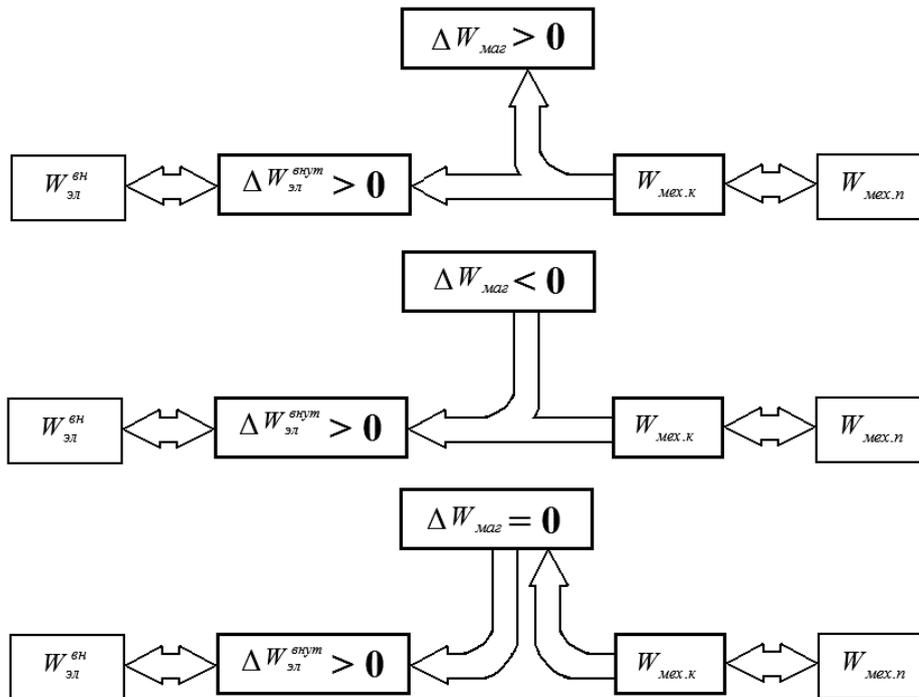


Рис. 6. Возможные генераторные режимы электромеханического преобразования энергии

Сравнивая два описанных подхода к структурному анализу процессов электромеханического преобразования энергии, можно сделать следующие выводы.

1. Последовательная структурная схема процесса электромеханического преобразования энергии (рис. 1) аналогична конструктивной схеме преобразователя,

представленной на рис. 7. Системе электрического питания соответствует накопитель электрической энергии, магнитопровод и рабочий воздушный зазор – накопитель магнитной энергии, а системе «статор-ротор» и приводимому/приводящему механизму – накопитель механической энергии.

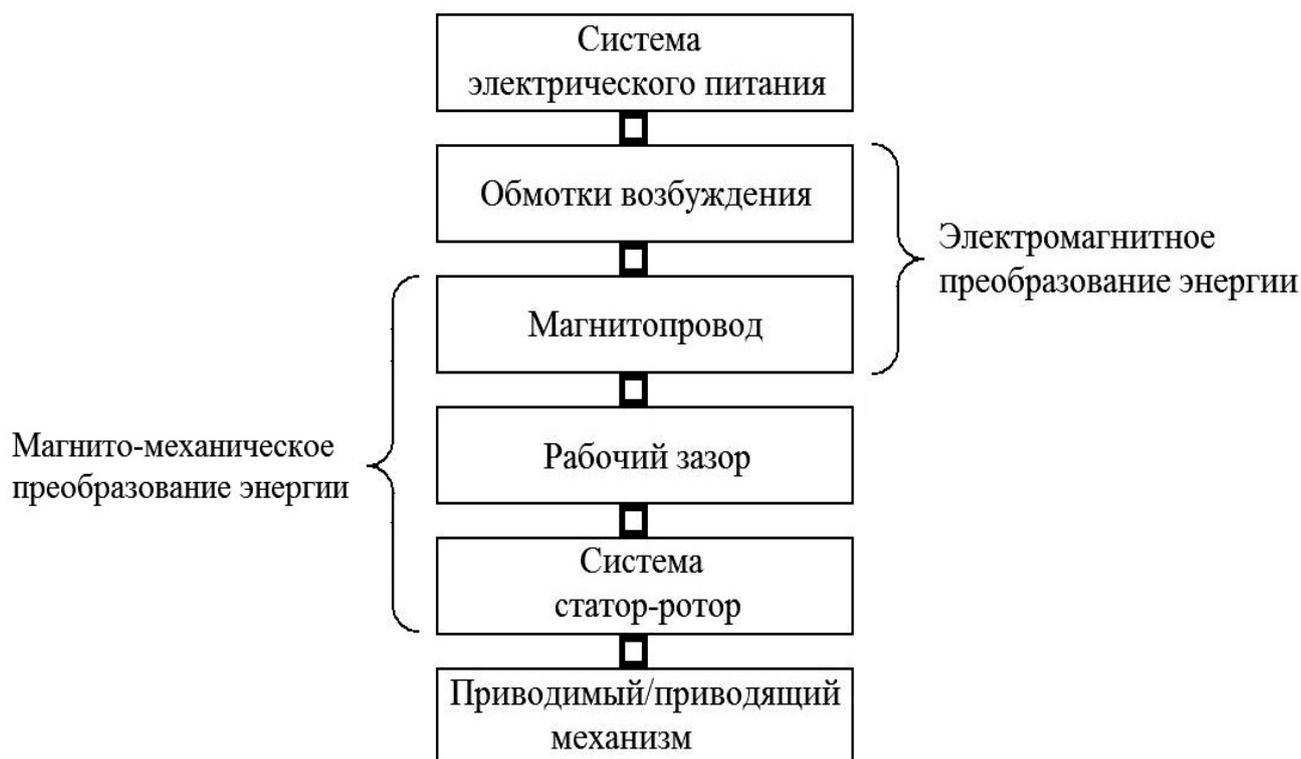


Рис. 7. Конструктивная схема энергопреобразователя

2. Параллельная структурная схема процесса электромеханического преобразования энергии (рис. 2, 3) позволяет выявить все возможные соотношения между приращениями энергий, участвующих в процессе преобразования, в том числе специфические режимы работы преобразователя характеризующиеся, например:

– увеличением кинетической энергии движущихся зарядов (тока) $\Delta W_{эл}^{внут} > 0$;

– уменьшением величины магнитного поля $\Delta W_{mag} < 0$;

– увеличением кинетической энергии движущихся масс преобразователя $W_{мех.к} > 0$.

Приведенное сочетание возможно только в неконсервативной системе при условии работы внешней силы, ускоряющей движение якоря/ротора преобразователя против электромагнитной силы. Возрастание величины тока при этом возможно за счет превышения

приложенного извне напряжения питания над величиной противоЭДС, формируемой в обмотках преобразователя. Если структурная схема последовательного преобразования энергии (рис. 1) позволяет выявить 16 режи-

мов работы преобразователя, то возможные соотношения между внутренними энергиями преобразователя в параллельной схеме (рис. 4) формируют 27 возможных режимов энергопреобразования.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Уайт Д.С.** Электромеханическое преобразование энергии / Д.С. Уайт, Г.Х. Вудсон. М.-Л.: Энергия, 1964. 528 с.

2. **Иванов-Смоленский А.В.** Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах /

А.В. Иванов-Смоленский. М.: Высш. шк., 1989. 290 с.

3. **Мошкин В.И.** Импульсные линейные электромагнитные двигатели для технологий с высококонцентрированными потоками энергии: дис. ... д-ра техн. наук / В.И. Мошкин. Курган, 2017.

Вырыханов Денис Александрович – кандидат технических наук, инженер АО «Конструкторское бюро промышленной автоматики» (г. Саратов)

Угаров Геннадий Григорьевич – доктор технических наук, профессор Камышинского технологического института филиала Волгоградского государственного технического университета

Мошкин Владимир Иванович – доктор технических наук, профессор Курганского государственного университета

Denis A. Vyrykhanov – Ph.D., engineer, JSC «Design office of industrial automatics» (Saratov)

Gennady G. Ugarov – Dr. Sc., Professor, Kamyshin Institute of technology branch of Volgograd State Technical University

Vladimir I. Moshkin – Dr. Sc., Professor, Kurgan State University

Статья поступила в редакцию 15.10.19, принята к опубликованию 15.11.19

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

УДК 621.314.1

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ МНОГОУРОВНЕВОГО ИНВЕРТОРА НАПРЯЖЕНИЯ С ЗАДАНЫМ ГАРМОНИЧЕСКИМ СОСТАВОМ ВЫХОДНОЙ КРИВОЙ

Е.Е. Миргородская, Н.П. Митяшин, Ю.Б. Томашевский,
Ю.М. Голембиовский, А.Ю. Мирошниченко

UNIVERSAL POWER SUPPLY FOR A MULTI-LEVEL VOLTAGE INVERTER WITH THE REQUIRED SPECTRUM OF THE OUTPUT VOLTAGE

Е.Е. Mirgorodskaya, N.P. Mityashin, Yu.B. Tomashevskiy,
Yu.M. Golembiovskiy, A.Yu. Miroshnichenko

Рассмотрены структура и особенности функционирования универсального источника питания многоуровневого инвертора напряжения в составе преобразователя с заданным спектром выходной кривой. Введены показатели качества работы преобразователя, приведены результаты моделирования преобразователя при реализации выходного напряжения с различными параметрами спектра. Преобразователь предназначен для реализации технологических процессов, требующих источники с заданными параметрами спектра напряжения.

Ключевые слова: многоуровневые инверторы напряжения, уровень напряжения, спектр, импульсный преобразователь, математическая модель

В ряде технологических процессов находят применение источники питания с заданным сложным спектральным составом кривой выходного напряжения. В частности, работа [1] посвящена созданию высокоэффективных двухчастотных преобразователей для тигельной плавки металлов, причем две «основные» гармоники существенно отличаются

The structure and operating features of a universal power source for a multilevel voltage inverter as a part of a converter with a required spectrum of the output voltage are considered. Parameters of the converter quality of operation are introduced. Results of the converter simulation when realizing the output voltage with various spectrum parameters are presented. The converter is intended for the realization of technological processes requiring sources with specified parameters of the voltage spectrum.

Keywords: multilevel voltage inverters, voltage level, spectrum, impulse converter, mathematical model

по частоте. Аналогичная задача возникает при индукционном нагреве металлических заготовок сложной формы, различные участки которых требуют различных частот напряжения, питающего индуктор.

В связи с этим значительное число работ посвящено методам построения многочастотных (в основном двухчастотных)

преобразователей для решения указанных технологических задач.

В работе [2] предлагается синтез двухчастотного тока индуктора осуществлять путем суммирования выходных напряжений двух резонансных преобразователей: инвертора тока и инвертора напряжения.

В работе [3] рассматривается формирование двухчастотных колебаний тока в индукторе за счет применения двухчастотного резонансного контура, причем задание соотношения гармоник определяется амплитудно-частотной характеристикой колебательной системы.

В работах [4, 5] обсуждается возможность использования многоуровневых инверторов напряжения (МИН) для формирования напряжения с требуемым гармоническим составом в установках двухчастотного индукционного нагрева. В настоящей статье рассматривается именно такой подход для реализации многочастотных источников питания технологических установок, как обобщение сформулированной выше задачи построения преобразователей для двухчастотного индукционного нагрева.

Основой такого источника может служить однофазный МИН. В общем случае спектр кривой выходного напряжения этого инвертора должен содержать помимо первой гармоники также некоторое число рабочих гармоник заданных частот и амплитуд, тогда как остальные гармоники должны быть минимизированы.

Основные проблемы при реализации этих условий следующие.

1. Определение числа уровней выходной кривой инвертора, соответствующего требуемому набору рабочих гармоник и точности реализации задаваемой структуры спектра.

2. Определение величин уровней напряжения, обеспечивающих заданный спектр кривой.

3. Реализация требуемых значений уровней в силовой схеме преобразователя.

Очевидно, что увеличение числа уровней способствует повышению точности реализации спектра требуемой структуры.

В то же время это усложняет звено постоянного тока, которое должно обеспечить большее число различных стабилизированных напряжений.

Определение величин уровней напряжений, обеспечивающих необходимый гармонический состав выходной кривой, является математической оптимизационной задачей, решение которой здесь не обсуждается.

Наиболее сложной проблемой является третья – реализация требуемых значений уровней в силовой схеме преобразователя.

В настоящей статье предлагается формирование уровней напряжения, необходимых для реализации кривой выходного напряжения МИН с произвольным гармоническим составом, с помощью универсального источника уровней (УИУ), вариант которого описан и исследован в работе [6]. Преимущество этого источника уровней состоит в том, что его структура принципиально не зависит от числа реализуемых инвертором уровней.

Необходимо отметить, что в отличие от обычного определения числа уровней многоуровневой кривой здесь понимается общее число участков постоянства значения напряжения на периоде. При этом нумерация уровней производится последовательно от начального уровня до последнего на периоде кривой.

Упрощенная схема многоуровневого преобразователя на основе УИУ показана на рис. 1. Здесь через V обозначены полностью управляемые ключи, проводящие ток в направлении, указанном стрелками.

Пунктиром выделены следующие модули: ИППН₁ и ИППН₂ – импульсные преобразователи напряжения, К – коммутатор, АИН – однофазный инвертор напряжения. При этом непосредственно к УИУ относятся импульсные преобразователи и коммутатор.

Способ формирования многоуровневой кривой, применяемый в рассматриваемом УИУ, состоит в попеременном создании требуемых уровней напряжения ИППН₁ и ИППН₂ на их соответствующих выходных конденсаторах C_1 и C_2 . В частности, не-

четные уровни формируются на конденсаторе C_1 , четные – на конденсаторе C_2 . Коммутатор K обеспечивает попеременную подачу напряжения на вход АИН в соответствии с законом формирования кривой.

При этом импульсный преобразователь, отключенный коммутатором от входа инвертора в данный интервал времени, формирует на соответствующем выходном конденсаторе следующее значение напряжения уровня своей четности.

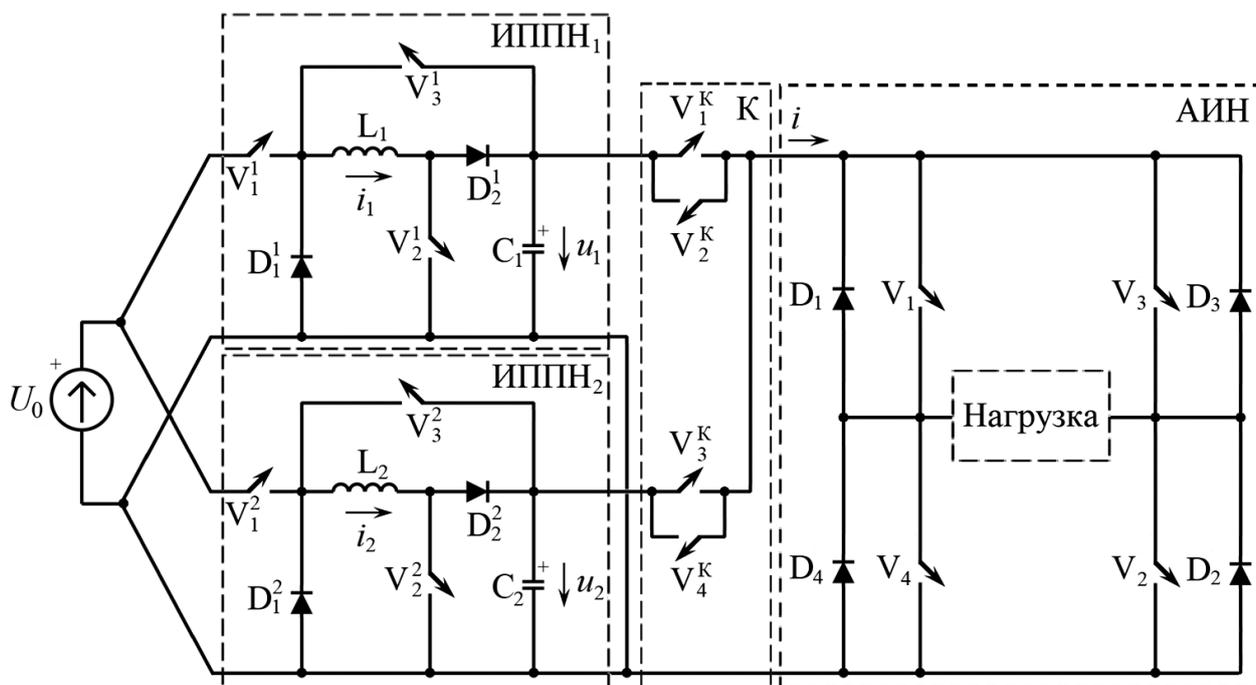


Рис. 1. Упрощенная схема многоуровневого преобразователя на основе УИУ

Указанная последовательность работы импульсных преобразователей и коммутатора синхронизирована с последовательностью переключений ключей инвертора системой управления преобразователем. При этом система управления обеспечивает также регулирование и стабилизацию текущего значения уровней.

Как было отмечено ранее, преобразователь, представленный на рис. 1, содержит два ИППН. Ясно, что за время между двумя подключениями ко входу инвертора выходного конденсатора каждого преобразователя на нем должно быть сформировано требуемое значение напряжения очередного уровня. Это предъявляет соответствующие требования к быстродействию системы управления. При увеличении основной частоты и числа уровней эти требования ужесточаются. Решением проблемы может быть добавление импульсных преобразователей, при котором

увеличивается время, предоставленное для формирования следующего уровня напряжения.

Блок-схема преобразователя имеет вид, показанный на рис. 2.

Здесь блок В – неуправляемый выпрямитель, получающий питание от промышленной сети, ИППН_{*i*} – *m* импульсных преобразователей ($m \geq 2$), К – коммутатор, АИН – однофазный автономный инвертор напряжения, Н – нагрузка, СУ – система управления преобразователем.

Смысл увеличения числа ИППН состоит, как это следует из вышесказанного, в том, что переходный процесс при требуемом изменении напряжения на выходном конденсаторе текущего значения уровня к следующему для данного преобразователя должен закончиться за время, равное $(m - 1)\tau$, где τ – длительность действия одного уровня. Здесь мы предполагаем, что

для всех уровней эта величина постоянна и равна

$$\tau = \frac{T}{N} = \frac{1}{f \cdot N},$$

где f и T – частота и период инвертирования, N – число уровней на периоде. При увеличении частоты и/или числа уровней эта величина уменьшается и, следовательно, повышаются требования к быстродействию системы перезаряда конденсатора.

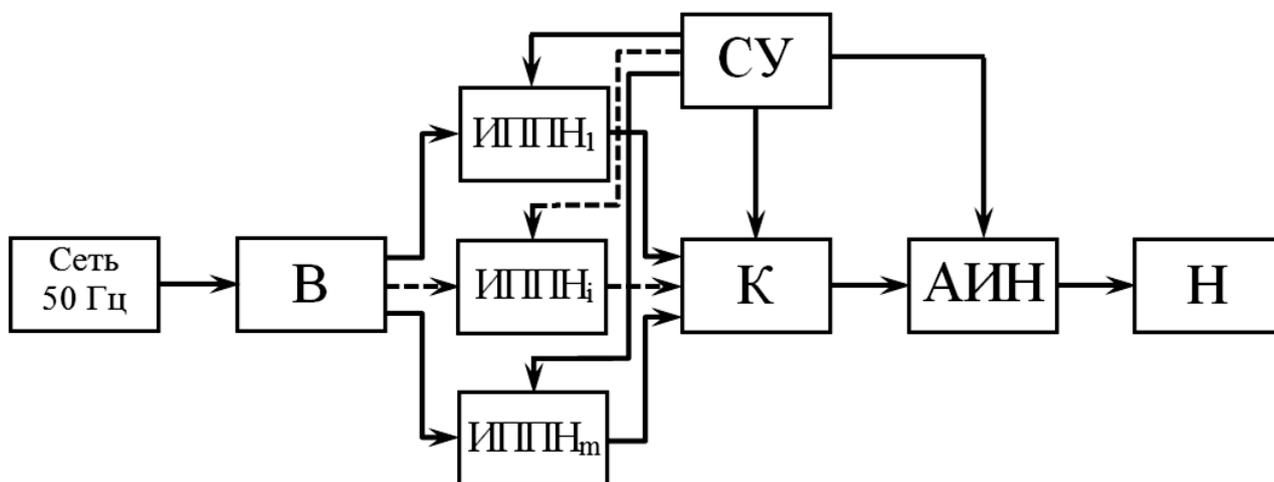


Рис. 2. Блок-схема многоуровневого преобразователя

Рассмотрим особенности предлагаемого способа построения звена постоянного тока МИН.

По существу, УИУ формирует знакопостоянное напряжение U_d на входе однофазного инвертора напряжения, работа которого не отличается от работы обычного АИН. Кривая напряжения U_d представляет собой ступенчатую однополярную кривую. Период напряжения U_d совпадает с периодом напряжения на нагрузке, изменение знака которого определяется коммутациями вентилей инвертора.

На рис. 3 показаны кривые напряжения на выходе инвертора $u(t)$, на входе инвертора $U_d(t)$, на выходных конденсаторах ИППН $u_1(t)$, $u_2(t)$, $u_3(t)$ для трех периодов работы преобразователя для случая $N = 10$ и $m = 3$. Участки графиков напряжений $u_1(t)$, $u_2(t)$, $u_3(t)$, в течение которых напряжение каждого конденсатора подключено к входу инвертора, на рисунке выделены штриховкой.

Из рис. 3 следует, что период напряжений T' на конденсаторах $u_1(t)$, $u_2(t)$, $u_3(t)$ не совпадает с периодом инвертирования. В данном случае $T' = 3T$. Кроме того, фор-

мы кривых и величины этих напряжений не совпадают.

В общем случае можно показать, что период напряжений на конденсаторах T' связан с параметрами N и m соотношением

$$T' = \frac{mT}{НОД(N, m)},$$

где $НОД(N, m)$ – наибольший общий делитель чисел N и m . Поэтому, если m нацело делит N , то период напряжений на выходных конденсаторах импульсных преобразователей совпадает с периодом инвертирования.

Практический интерес представляет также закон, по которому определяется последовательность реализации уровней каждым из импульсных преобразователей.

Пусть k – номер текущего уровня, реализуемый данным ИППН. Тогда номер следующего по времени реализуемого уровня этим преобразователем k^+ определяется по формуле

$$k^+ = \begin{cases} k + m, & \text{если } k + m \leq N, \\ k + m - N, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

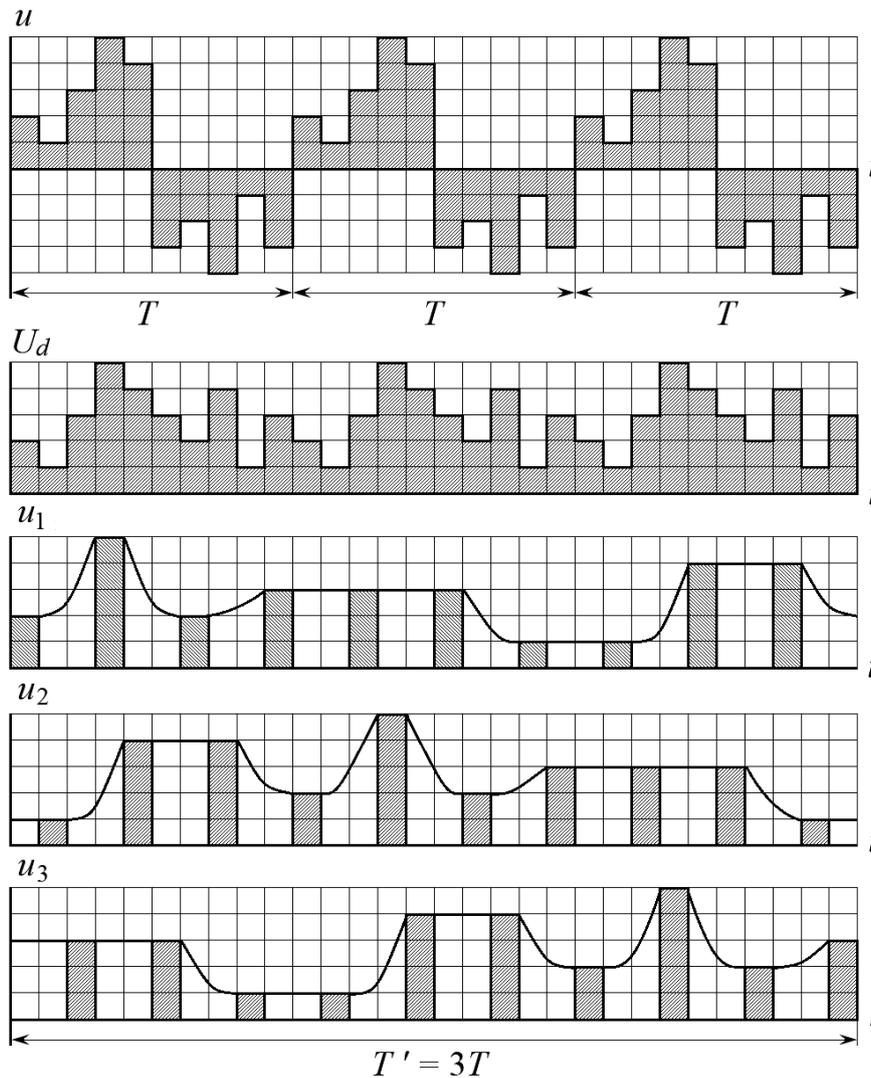


Рис. 3. Связь между кривыми напряжения на входе U_d и выходе u инвертора и напряжениями на выходных конденсаторах импульсных преобразователей $u_1(t)$, $u_2(t)$, $u_3(t)$ при $N = 10$, $m = 3$

Рассмотрим результаты моделирования реализации многоуровневых кривых с заданным составом спектра для конкретных параметров представленного универсального источника питания. С целью иллюстрации собственных спектральных свойств источника моделирование проводилось в режиме холостого хода. Работа источника под нагрузкой рассмотрена в работе [6].

Моделирование проводилось для трех значений N , равных 12, 24 и 48 и $m = 2$. Во всех случаях рассматриваются все гармоники до 40-й, включая постоянную составляющую. При этом, помимо первой, требуется обеспечить относительные значения 3-й 7-й гармоник, для которых заданными значениями выбраны $K_{U(3)}^0 = 0,3$,

$K_{U(7)}^0 = 0,6$. Все гармонические составляющие с номерами от 0 до 40, исключая перечисленные три, должны быть равны нулю, то есть для этих номеров заданные значения $K_{U(j)}^0 = 0$. Тогда степень выполнения этих условий оценивается величиной

$$R = \sqrt{\sum_{\substack{j=0 \\ j \neq 1}}^{40} (K_{U(j)} - K_{U(j)}^0)^2}.$$

Величину R можно рассматривать как ошибку в достижении цели.

Если пренебречь засоренностью спектра гармониками, заданные значения которых равны нулю, то степень достижения цели

по рабочим гармоникам, заданные значения которых отличны от 0, характеризуется величиной

$$R_1 = \sqrt{\sum_{J^+} (K_{2U(j)} - K_{2U(j)}^0)^2},$$

где J^+ – множество номеров таких гармоник.

Величину R_1 можно назвать ошибкой в реализации высших рабочих гармоник.

Для оценки зашумленности спектра кривой «ненужными» гармониками введем коэффициент

$$R_2 = \sqrt{R^2 - R_1^2}.$$

Для данной задачи он аналогичен суммарному коэффициенту гармоник K_{2U} [7].

Во всех случаях отсутствуют четные гармоники, что достигается при четном числе уровней N .

Очевидно, задача состоит в минимизации величин R_1 , R_2 и R , достигаемой за счет выбора величин уровней напряжения.

Результаты моделирования показывают, что при числе уровней $N = 24$ (рис. 4-6, таблица) ошибка R_1 имеет значение 0,11.

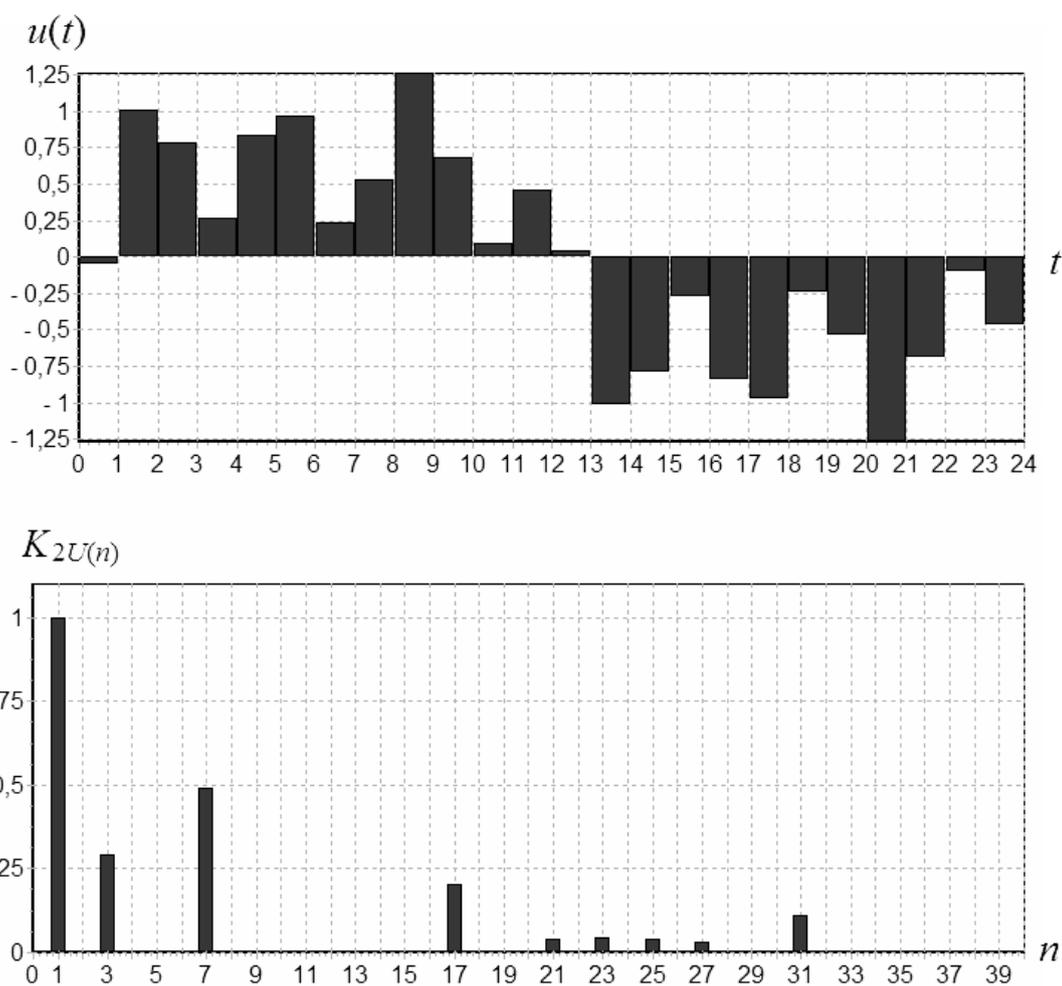


Рис. 4. Результаты моделирования: кривая выходного напряжения инвертора $u(t)$ (вверху) и ее спектр $K_{2U(n)}$ (внизу) при $N = 24$, $m = 2$; t – номер уровня на периоде, n – номер гармоники

При этом значение третьей гармоники достаточно близко к требуемому значению, тогда как по седьмой гармонике результат неудовлетворительный: $K_{2U(7)} = 0,49$ вместо 0,6. Кроме того,

спектр сильно зашумлен «ненужными» гармониками ($R_2 = 0,243$), среди которых максимальна семнадцатая, для нее коэффициент гармонической составляющей $K_{2U(17)} = 0,202$.

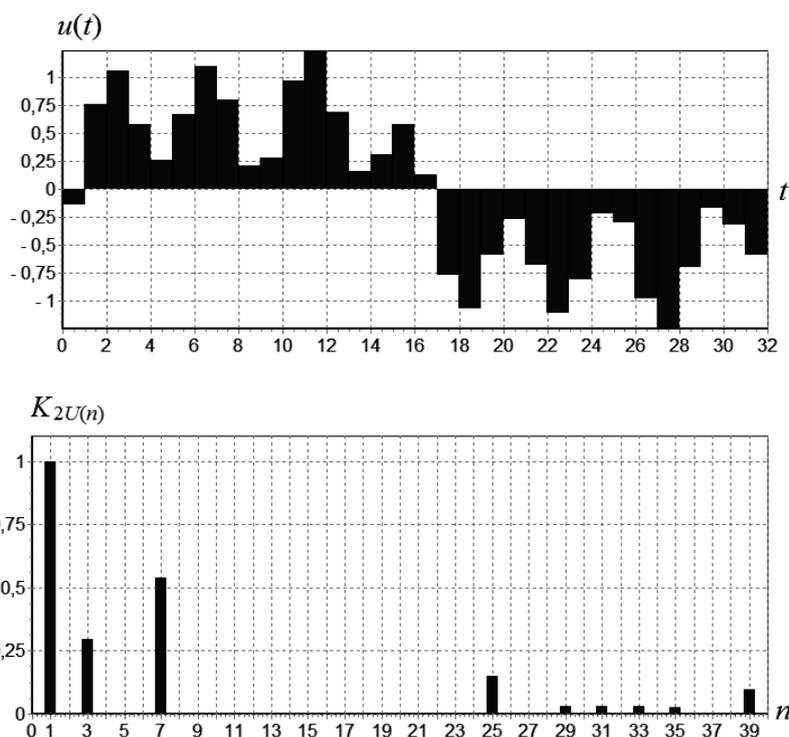


Рис. 5. Результаты моделирования: кривая выходного напряжения инвертора $u(t)$ (вверху) и ее спектр $K_{2U(n)}$ (внизу) при $N = 32, m = 2$; t – номер уровня на периоде, n – номер гармоники

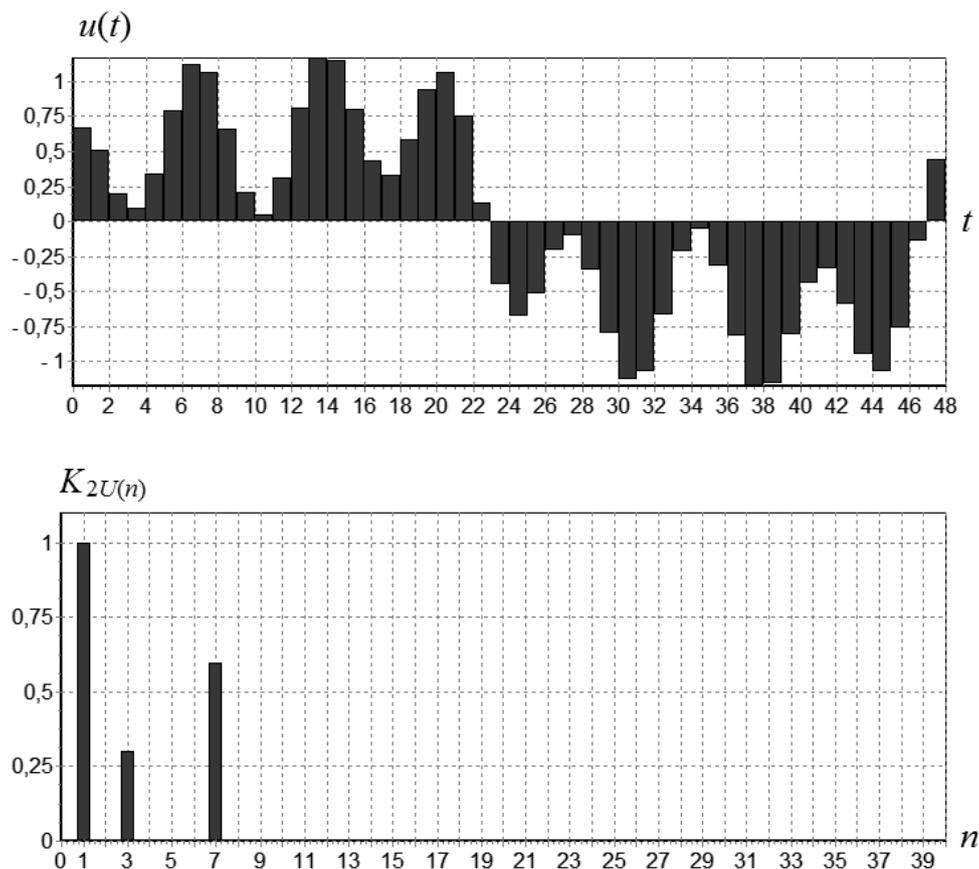


Рис. 6. Результаты моделирования: кривая выходного напряжения инвертора $u(t)$ (вверху) и ее спектр $K_{2U(n)}$ (внизу) при $N = 48, m = 2$; t – номер уровня на периоде, n – номер гармоники

Значения гармонических составляющих $K_{2U(n)}$ и коэффициентов ошибок R_1 , R_2 и R для трех значений числа уровней на периоде

Номер гармоники	Число уровней		
	$N = 24$	$N = 32$	$N = 48$
1	1	1	1
3	0,29	0,294	0,3
5	0	0	0
7	0,49	0,539	0,598
9	0	0	0
11	0	0	0
13	0	0	0
15	0	0	0
17	0,202	0	0
19	0	0	0
21	0,041	0	0
23	0,043	0	0
25	0,04	0,151	0
27	0,032	0	0
29	0	0,03	0
31	0,111	0,032	0
33	0	0	0
35	0	0,025	0
37	0	0	0
39	0	0,097	0
Максимальная четная гармоника	0	0	0
R_1	0,110	0,061	0,002
R_2	0,243	0,186	0
R	0,267	0,196	0,002

При увеличении параметра N до 32 ошибка R_1 уменьшается до 0,061, ошибка «зашумленности» R_2 уменьшается до 0,186.

Наилучший результат, близкий к идеальному, получен при $N = 48$. Как следует из таблицы, значения гармонических составляющих $K_{2U(3)}$ и $K_{2U(7)}$ с большей точностью близки к заданным значениям, а все три коэффициента R_1 , R_2 и R равны нулю.

Отметим, что все четные гармоники вплоть до 40 отсутствуют, что достигается естественным образом при четном числе уровней N .

Итак, преимущества представленного источника состоят в следующем.

1. Структура источника принципиально не зависит от числа реализуемых уровней и ограничивается только быстродействием процессов перезаряда конденсаторов ИППН, протекающих в режиме холостого хода.

2. Изменение количества уровней выходной кривой и их величины возможно в режиме реального времени средствами системы управления без изменения силовой схемы.

3. За счет выбора числа и величин уровней напряжений многоуровневого преобразователя на основе рассмотренного источника возможна с высокой точностью реализация требуемого спектра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дзлийев С.В. Принципы построения систем питания установок индукционной закалки зубчатых колес при двухчастотном нагреве / С.В. Дзлийев // АРИН 05: материа-

лы Междунар. конф. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2005. С. 193-201.

2. Синтез двухчастотного тока индуктора на основе суммирования выходных па-

раметров двух разночастотных резонансных преобразователей / С.К. Земан, Ю.М. Казанцев, А.В. Осипов, А.В. Юшков // Известия Томского политехнического университета. 2012. Т. 321. № 4. С. 144-149.

3. Формирование двухчастотных колебаний тока в системах индукционного нагрева / С.К. Земан, Ю.М. Казанцев, А.В. Осипов, А.В. Юшков // Известия Томского политехнического университета. 2009. Т. 315. № 4. С. 105-111.

4. **Земан С.К.** Гармонический синтез двухчастотных колебаний в последовательном резонансном контуре многоуровневого преобразователя частоты / С.К. Земан, А.В. Осипов, А.В. Юшков // Современные техника и технологии: материалы XV Междунар. науч.-практ. конф. Томск: Изд-во ТПУ, 2009. Т. 1. С. 285-286.

5. **Diong B.** Multilevel converter-based dual-frequency induction heating power supply / B. Diong, S. Basireddy, K. Corzine // Industrial Electronics Society, IECON'03: proceedings. Roanoke, USA, 2003. Vol. 2. P. 1992-1996.

6. **Mirgorodskaya E.E.** Universal Power Source of Single-phase Multilevel Inverters / E.E. Mirgorodskaya [et al.] // 2019 16th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems, ELMA 2019: proceedings. Varna, Bulgaria, 2019. P. 337-341.

7. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: ФГУП «Стандартинформ», 2013. 10 с.

Миргородская Екатерина Евгеньевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронные приборы и системотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Митяшин Никита Петрович – доктор технических наук, профессор кафедры «Электронные приборы и системотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Томашевский Юрий Болеславович – доктор технических наук, профессор кафедры «Электронные приборы и системотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

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

Мирошниченко Алексей Юрьевич – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Электронные приборы и системотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Ekaterina E. Mirgorodskaya – Ph. D., Associate Professor, Department of Electronic devices and system engineering Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Nikita P. Mityashin – Dr. Sc., Professor, Department of «Electronic devices and system engineering» Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Yuri B. Tomashevsky – Dr. Sc., Professor, Department of Electronic devices and system engineering of the Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Yuri M. Golembiovsky – Dr. Sc., Professor, Department of «Electronic devices and system engineering» Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Alexey Yu. Miroshnichenko – Dr. Sc., head of the Department «Electronic devices and system engineering» Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 10.10.19, принята к опубликованию 15.11.19

УДК 621.398:621.316

**УСТРОЙСТВО АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МОНИТОРИНГА
КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ПОДЗЕМНЫХ СЕТЯХ
УГОЛЬНЫХ ШАХТ**

Л.А. Плащанский, М.Ю. Решетняк

**AUTOMATED MONITORING DEVICE QUALITY OF ELECTRIC
ENERGY IN UNDERGROUND NETWORKS
COAL MINE**

L.A. Plashchansky, M.Yu. Reshetnyak

Широкое внедрение преобразовательных устройств в комплекс оборудования высокопроизводительных угольных шахт выявило ряд особенностей, которые необходимо учитывать для оценки его эффективной работы. К ним относится система электроснабжения, структуру которой необходимо скорректировать путем создания вместо единого распределительного пункта или энергопоезда нескольких распределительных пунктов, каждый из которых обеспечивает электроэнергией определенную энергоемкую группу потребителей, соединённых в единую логически связанную систему. Следует отметить, что наличие преобразовательных устройств в системе электроснабжения приводит к снижению качества электрической энергии. Выполнен анализ выемочных комбайнов высокопроизводительных угольных шахт на предмет наличия преобразовательных устройств и их удельный вес в системах электроприводов комплексов.

Для оценки влияния преобразовательных устройств на питающую сеть и корректировки показателей, оценивающих это влияние, предлагается использовать устройство автоматизированного мониторинга качества электрической энергии в подземных сетях угольных шахт. Представленное устройство позволяет осуществлять автоматизированный мониторинг показателей качества энергии; производить учет фактического коэффициента мощности, по-

The widespread introduction of Converter devices in the equipment complex of high-performance coal mines has revealed a number of features that need to be taken into account to assess its effective operation. These include the power supply system, the structure of which must be adjusted by creating, instead of a single distribution point or power train, several distribution points, each of which provides electricity to a certain energy-intensive group of consumers connected to a single logically connected system. It should be noted that the presence of Converter devices in the power supply system leads to a decrease in the quality of electric energy. The analysis of dredging combines of high-performance coal mines for the presence of Converter devices and their specific weight in the systems of electric drives of complexes is performed.

To assess the impact of Converter devices on the power supply network and adjust the indicators that assess this impact, it is proposed to use an automated monitoring device for the quality of electric energy in underground coal mine networks. The proposed device allows to implement automated monitoring of energy quality indicators; to take into account the actual power coefficient, increasing it to a nomi-

вышая его до нормативного значения, обеспечивая тем самым эффективную работу подземных потребителей угольных шахт.

Ключевые слова: угольная шахта, система электроснабжения, качество электрической энергии, автоматизированная система контроля качества электрической энергии, гармонический состав сети, подземные электрические сети, компенсация реактивной мощности, электромагнитная совместимость

Обеспечение высокой концентрации горных работ при технологических схемах «Лава-пласт» или «Лава-шахта» с высокой нагрузкой на очистной забой требует внедрения гибких технологических схем, для которых обязательна взаимосвязка и эффективное сочетание всех технологических подсистем, включая электромеханическую, от безотказности которой зависит эффективность всей системы [1-3]. Если раньше эта подсистема носила сопровождающий характер, то теперь она перешла в совершенно иное состояние, которое обеспечивает технологический процесс.

Рост мощности выемочных, проходческих и транспортных средств вызвал необходимость перехода на более высокий уровень как распределительного напряжения с 1140 В до 3300 В, так и питающего напряжения с 6 кВ до 10 кВ [4]. Это вызвало необходимость нового подхода к системе электропривода и к защитно-коммутационной аппаратуре: внедряется регулируемый электропривод для забойных машин и механизмов, создается новое поколение распределительных и защитных коммутационных аппаратов. В частности, регулируемый электропривод внедрен на механизмах подачи выемочных комбайнов, на конвейерах и др.

Такие изменения потребовали широкого внедрения преобразовательных устройств и изменение структуры системы электроснабжения, создания вместо единого распределительного пункта или энергопоезда

nal value, thus ensuring the efficient operation of underground coal mine consumers.

Keywords: coal mine, power supply system, quality of electric energy, automated system for quality control of electric energy, harmonic composition of the network, underground electric networks, reactive power compensation, electromagnetic compatibility

нескольких распределительных пунктов, каждый из которых обеспечивает электроэнергией определенную энергоемкую группу потребителей, соединённых в единую логически связанную систему. Следует отметить, что наличие преобразовательных устройств в системе электроснабжения выемочного участка приводит к снижению качества электрической энергии. Качество электрической энергии является составляющей электромагнитной совместимости, характеризующей электромагнитную среду [5]. Параметры качества электрической энергии являются динамическими величинами и зависят от многих внешних факторов, таких как изменения нагрузки энергосистемы, возникновение аварийных режимов в сети, изменения горно-геологических условий месторождения и др. [6]. Снижение качества электрической энергии может привести к изменениям режимов работы электроприёмников, в результате чего уменьшается производительность рабочих механизмов, ухудшается качество продукции, сокращается срок службы электрооборудования, повышается вероятность аварий, поэтому разработка устройства автоматизированного мониторинга качества электрической энергии в подземных сетях угольных шахт является актуальной и требующей решения научной задачей.

Анализ электромеханической системы подачи 33 высокопроизводительных выемочных комбайнов (рис. 1) позволил уста-

новить, что 36 % выемочных комбайнов используют в системе управления электроприводом систему «Тиристорный преобразователь – двигатель постоянного тока», а 64 % выемочных комбайнов используют в качестве системы управления систему «Преобразователь частоты – асинхронный двигатель». Следует отметить, что один и тот же выемочный комбайн в различных модификациях может быть оборудован как системой, построенной по системе «Тиристорный преобразователь – двигатель постоянного тока», так и по системе «Преоб-

разователь частоты – асинхронный двигатель». Это характерно для производителей выемочных комбайнов Eickhoff, JOY и др.

Анализ мощностей систем электропривода выемочных комбайнов при различных системах управления привода подачи (рис. 2) показал, что при использовании системы «Тиристорный преобразователь – двигатель постоянного тока» доля регулируемого электропривода в общем балансе мощностей выемочного комбайна составляет порядка 10 %, а в системе «Преобразователь частоты – асинхронный двигатель» – 15 %.

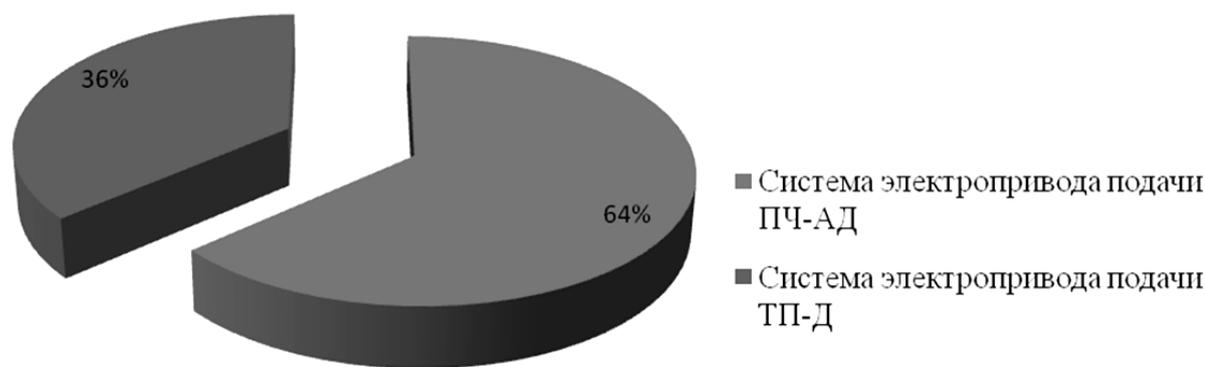


Рис. 1. Анализ систем электропривода органов подачи выемочного комбайна

Увеличение доли регулируемых электроприводов в общем балансе мощностей выемочных участков привело к появлению факторов, не характерных ранее для подземных электрических сетей. К таким факторам относятся: повышенное потребление реактивной энергии, изменение гармонического состава сети, появление высших гармоник тока и напряжения, оказывающих влияние на питающую сеть, нагрев электрооборудования, увеличение потерь мощности и электроэнергии [7], что способствует снижению качества электрической энергии в протяженных подземных сетях угольных шахт. Следует отметить, что рядом зарубежных ученых ведутся работы по изучению параметров качества электрической энергии и их динамики в подземных сетях угольных шахт [8-10]. Однако все эти исследования сво-

дятся к анализу коэффициентов мощности подземного оборудования угольных шахт и возможности его повышения до приемлемых значений. В ряде публикаций приводятся результаты исследования параметров качества электрической энергии горнодобывающих предприятий, однако эти исследования проведены на предприятиях, ведущих добычу открытым способом [11, 12], и использование этих результатов в условиях подземных горных работ угольных шахт не представляется возможным. Это обусловлено значительными отличиями горного оборудования, отличиями технологических операций добычи, систем транспортировки энергоресурсов при подземных горных работах, а также значительным отличием аэрологической обстановки внутри горных выработок и контролем за ней.

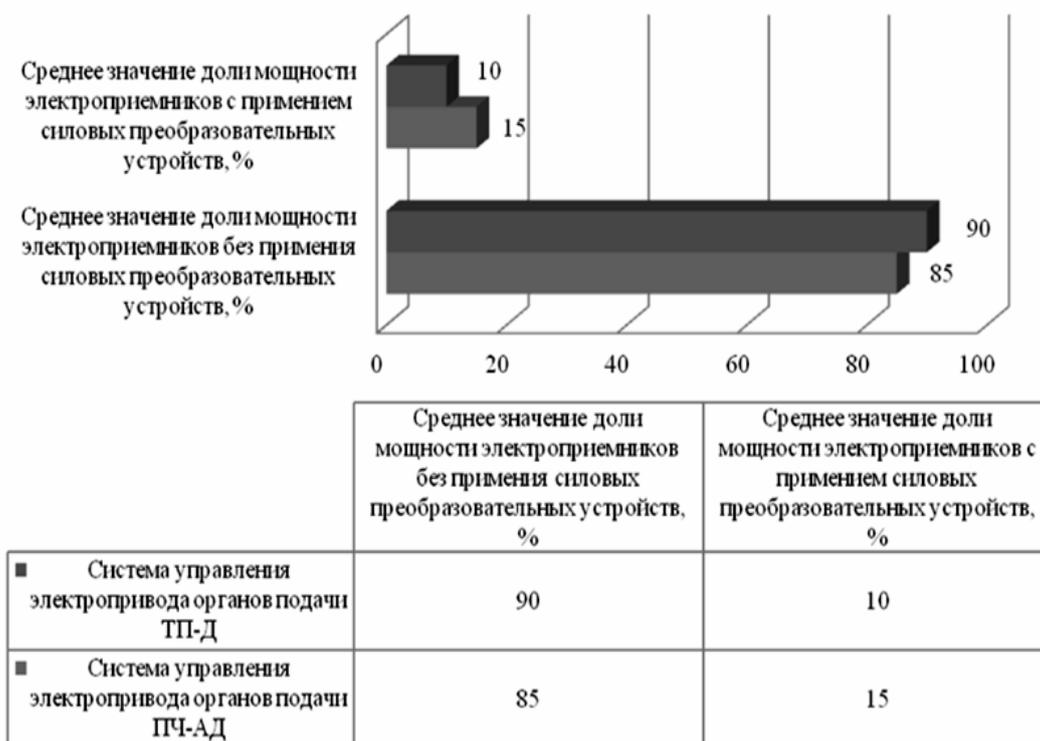


Рис. 2. Анализ мощностей систем электропривода выемочного комбайна при различных системах управления подачи

Использование преобразовательной техники и внедрение ее в состав электромеханических систем позволило значительно расширить диапазон режимов работы технологического оборудования в подземных условиях.

В связи с этим возникает задача выявления степени влияния высших гармоник на устойчивость работы подземной электрической сети, качественного и количественного состава гармоник, возможности снижения их уровня, и, по возможности, их устранения. Выполнен ряд исследований по снижению негативного влияния преобразовательной техники на питающую сеть с помощью активных фильтров высших гармоник [13, 14] и также повышению параметров электромагнитной совместимости в электрических машинах [15], однако использование результатов таких исследований в специфических условиях подземных горных работ весьма затруднительно. Это обусловлено тем, что в подземных условиях угольных шахт, особенно опасных по внезапным выбросам газа и пыли, провести замеры параметров качества элек-

трической энергии, весьма затруднительно. Это объясняется тем, что анализаторы качества электрической энергии требуют непосредственного присоединения к потребителю или понизительной подстанции, что неприемлемо в соответствии с основным документом, регламентирующим технологические работы в угольных шахтах – «Правила безопасности в угольных шахтах» (с изменениями на 8 августа 2017 года), пункты 407, 408.

Решению этой проблемы могут способствовать специальные меры, к числу которых относится устройство, компенсирующее высшие гармоники в соответствии с применяемыми преобразователями и способствующие улучшению качественных показателей сети. Такое устройство разработано и запатентовано сотрудниками кафедры «Энергетика и энергоэффективность горной промышленности» НИТУ МИСиС [16]. Устройство, структурная схема которого представлена на рис. 3, позволяет не только регулировать гармонический состав сети, но и улучшать коэффициент мощности. Исполнение устройства позво-

ляет использовать его в подземных электрических сетях угольных шахт, опасных по внезапным выбросам газа и пыли.

Предлагаемое устройство переносное, во взрывозащищенной оболочке. Оно состоит из трех измерительных трансформаторов тока, измерительного трехфазного

трансформатора напряжения, анализатора качества электрической энергии со встроенным контроллером реактивной мощности, медиаконвертера, запоминающего устройства, активного фильтра высших гармоник и блока компенсации реактивной мощности.

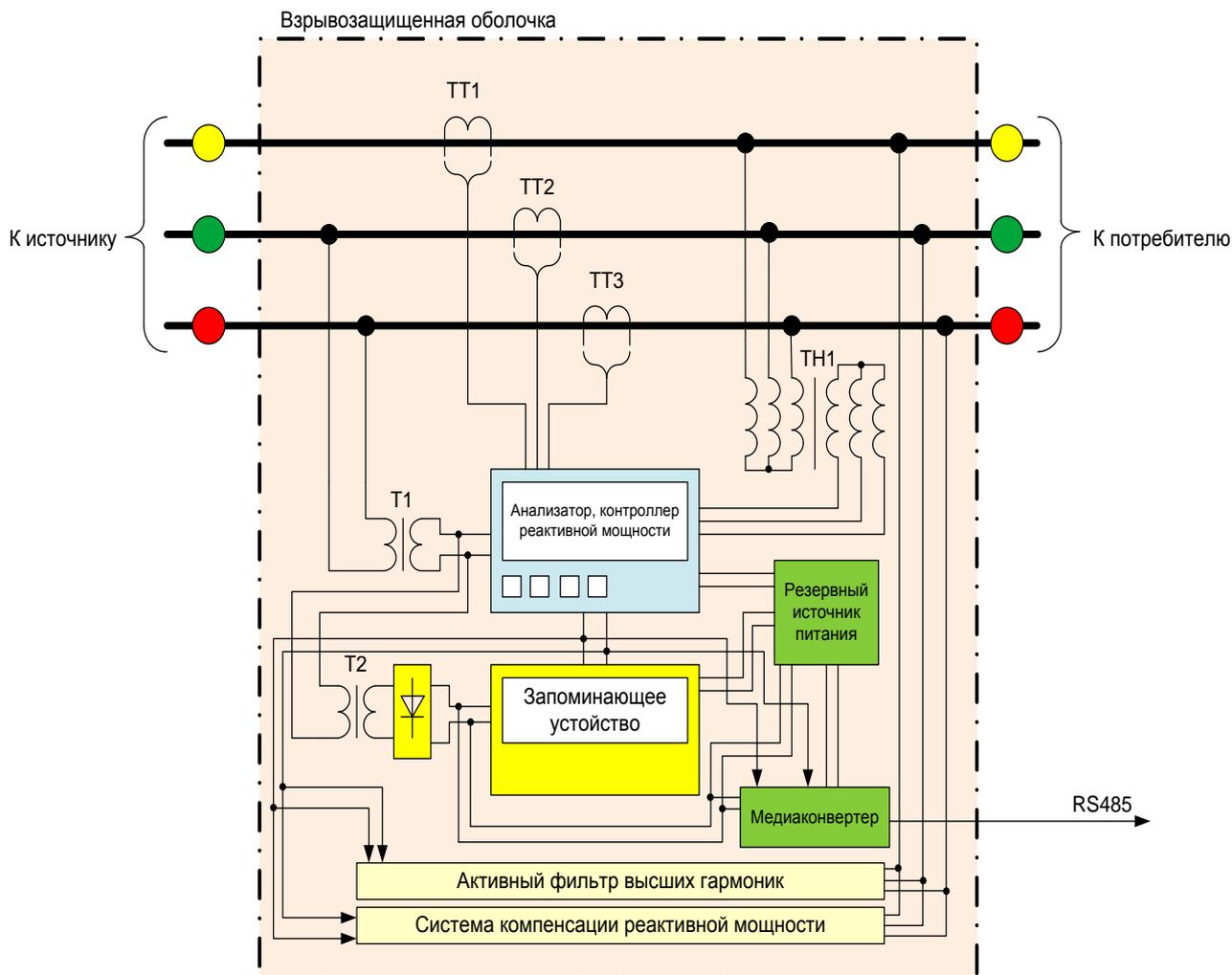


Рис. 3. Структурная схема высоковольтного устройства автоматизированного мониторинга качества электрической энергии в подземных сетях угольных шахт

В устройстве предусмотрены резервный источник питания, понижающий трансформатор для питания анализатора качества электрической энергии со встроенным контроллером реактивной мощности, а также понижающий трансформатор с неуправляемым выпрямителем для питания медиаконвертера и запоминающего устройства. От него же осуществляется подзарядка аккумуляторов резервного источника питания.

Устройство предусматривает технологию Ethernet (10/100 mb/s), организованную по медным или оптическим линиям связи, а также может иметь дополнительные средства коммутации связи при использовании сетевого интерфейса RS-485 для создания с помощью технологии Ethernet локальной сети.

Принцип действия данного устройства можно описать следующим образом. Высоковольтное переносное устройство во

взрывозащищенной оболочке, подключается между источником питания и потребителем. Через устройство протекает ток, величина которого, преобразуемая в значения, удобные для измерения с помощью измерительных трансформаторов тока, поступает на анализатор качества электрической энергии со встроенным контролером реактивной мощности. Для контроля качества напряжения на анализатор качества электрической энергии поступает напряжение сети через измерительный трехфазный трансформатор напряжения. Питание анализатора качества электрической энергии со встроенным контролером реактивной мощности осуществляется от понижающего трансформатора. С анализатора качества электрической энергии цифровые сигналы управления поступают на медиаконвертер, служащий преобразователем сигналов для дальнейшей их передачи по линиям связи и на запоминающее устройство. Помимо этого, сигнал с анализатора качества электрической энергии поступает на активный фильтр высших гармоник, который демпфирует негативное влияние гармонического состава сети в автоматическом режиме. Сигнал также поступает на блок компенсации реактивной мощности, который в автоматическом режиме производит мониторинг значения коэффициента мощности и при необходимости повышает его до нор-

мативных значений. Для питания медиаконвертера и запоминающего устройства предусмотрен понижающий трансформатор с неуправляемым выпрямителем, производящий также подзарядку аккумуляторных батарей источника питания.

Итак, запатентованное устройство позволяет осуществлять автоматизированный мониторинг показателей качества энергии; производить учет фактического коэффициента мощности, повышая его до нормативного значения, что позволит обеспечить эффективную работу подземных потребителей угольных шахт.

Предлагаемое изобретение позволяет оперативно реагировать на изменение уровня напряжения в подземных электрических сетях, позволяя планировать рациональное размещение энергопоездов, тем самым снижая затраты на создание участковых подземных систем электрообеспечения.

Установка данного устройства на ряде понизительных подстанций, расположенных в специфических условиях подземных горных выработок угольных шахт, способствует созданию современной автоматизированной информационно-измерительной системы непрерывного мониторинга качества электрической энергии и мобильности энергопоездов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Проблемы обеспечения высокой производительности очистных забоев в метанообильных шахтах / А.Д. Рубан, В.Б. Артемьев, В.С. Забурдяев и др. М.: Московский издательский дом, 2009. 396 с.
2. **Копылов К.Н.** Актуальность повышения уровня энергоэффективности и безопасности выемочного участка угольной шахты / К.Н. Копылов, С.С. Кубрин, С.Н. Решетняк // Уголь. 2018. № 10. С. 66-70.
3. **Кубрин С.С.** Автоматизированная информационно-измерительная система технического учета электроэнергии для подземных горных работ / С.С. Кубрин, С.Н. Решетняк // Горный журнал. 2016. № 1. С. 87-90.
4. **Плащанский Л.А.** Методика выбора уровня питающего напряжения мощных очистных комплексов / Л.А. Плащанский, В.Л. Беляк // Горный журнал. 2010. № 4. С. 70-73.
5. Электромагнитная совместимость потребителей / И.В. Жежеленко, А.К. Шидловский, Г.Г. Пивняк и др. М.: Машиностроение, 2012. 351 с.
6. **Плащанский Л.А.** Актуальность оценки показателей качества электроэнергии в подземных электрических сетях угольных шахт / Л.А. Плащанский,

М.Ю. Решетняк // Горный информационно-аналитический бюллетень (Mining Informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)). № 48 (специальный выпуск). М.: Горная книга, 2018. С. 313-321.

7. Качество электрической энергии горных предприятий / Н.М. Кузнецов, Ю.В. Бебихов, А.В. Самсонов и др. М.: Изд. дом Академии естествознания, 2012. 68 с.

8. **Xu X.** Research on power quality control of coal mine power grid / **X. Xu** // Industry Hi-Tech. 2017. № 28 (1) P. 1690-1694.

9. **Fangxia L.** Research on reactive power compensation in coal power system / L. Fangxia, S. Xia // Machine Building and Automation. 2009. № 38 (5). P. 147-149.

10. **Michalak M.** Large equipment emission testing in underground mines / M. Michalak, M. Szafranska, K. Spalt // IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. 2016. P. 855-858.

11. **Cheng M.** Research on application of active power filter in harmonic wave suppression of coal mine / M. Cheng, L. Yanbin // Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science). 2014. № 28 (11). P. 107-110.

12. **Regula M.** Voltage quality analyses in laboratory environment / M. Regula, D. Szabo,

A. Otcenasova // Proceedings of the 7th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering ELEKTROENERGETIKA 2013. Stara Lesna, Slovakia, 2013. P. 300-303.

13. Inverter-based motor drive systems: An overview from the electromagnetic compatibility perspective / H. De Paula, C.G.D. Fuccio, P.C.T. Pereira et al. // 14th Brazilian Power Electronics Conference. COBEP 2017, 2018, January. P. 1-6.

14. **Litran S.P.** Electromagnetic compatibility analysis of a control strategy for a hybrid active filter / S.P. Litran, P. Salmeron // Electric Power Systems Research. 2017. № 144. P. 81-88.

15. Concerns on electromagnetic compatibility and power quality issues at a three-phase transformer / P.M. Nicolae, M.S. Nicolae, I.D. Smarandescu, I.D. Nicolae // IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. 2017. P. 377-382.

16. Пат. на полезную модель № 185421. Высоковольтное устройство автоматизированного мониторинга качества электрической энергии в подземных сетях угольных шахт / Л.А. Плащанский, А.В. Ляхомский, М.Ю. Решетняк, С.Н. Решетняк. 04.12.2018 г.

Плащанский Леонид Александрович – почетный работник угольной промышленности, почетный работник высшего профессионального образования РФ, кандидат технических наук, профессор кафедры «Энергетика и энергоэффективность горной промышленности» Национального исследовательского технологического университета «МИСиС»

Решетняк Мария Юрьевна – аспирант кафедры «Энергетика и энергоэффективность горной промышленности» Национального исследовательского технологического университета «МИСиС»

Leonid A. Plashchansky – Honored worker of the coal industry, honored worker of higher professional education of the Russian Federation, Ph.D., Associate Professor, Department of energy and energy efficiency of the mining industry National Research Technological University MISIS

Maria Yu. Reshetnyak – Postgraduate, Department of energy and energy efficiency of mining industry National Research Technological University MISIS

Статья поступила в редакцию 21.10.19, принята к опубликованию 15.11.19 г.

ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.3.032.21

ФОРМИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИМПРЕГНИРОВАННЫХ КАТОДОВ ПРИБОРОВ М-ТИПА С МГНОВЕННОЙ ГОТОВНОСТЬЮ НА ОСНОВЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

О.Д. Тищенко, А.Я. Зоркин, И.В. Родионов,
А.А. Тищенко, Е.Н. Горбунова

FORMATION OF CHARACTERISTICS OF IMPREGNATED CATHODES OF M-TYPE DEVICES WITH INSTANT READINESS ON THE BASIS OF IMPROVEMENT OF ELECTROTECHNOLOGICAL PROCESSES

O.D. Tishchenko, A.Ya. Zorkin, I.V. Rodionov,
A.A. Tishchenko, E.N. Gorbunova

Впервые применен метод индукционной пайки импрегнированных втулок и разработана модель индукционной пайки, учитывающая двухслойную конструкцию катода. Идентифицированы параметры модели, к которым относятся удельное сопротивление импрегнированных втулок и поверхностная мощность по экспериментальной зависимости.

Ключевые слова: *импрегнированный катод, индукционная пайка, модель, удельное сопротивление, поверхностная мощность*

Для стабильной работы ЭВП необходимы низкие рабочие и остаточные давления газов в объеме прибора. Для этого проводят процесс откачки ЭВП. В некоторых случаях процесс откачки проводится совместно с процессом пайки эмиттеров. Откачкой называется процесс удаления газов из объема ЭВП и снижения скорости их выделения из внутренних элементов прибора, включая и оболочку, до величины меньшей или равной скорости поглощения этих газов обезгаженными внутренними элементами. При этом, если процесс удаления га-

For the first time, the method of induction soldering of impregnated bushings was applied and a model of induction soldering was developed, taking into account the two-layer design of the cathode. The parameters of the model, which include the resistivity of impregnated bushings and surface power according to the experimental dependence, are identified.

Keywords: *impregnated cathode, induction soldering, model, resistivity, surface power*

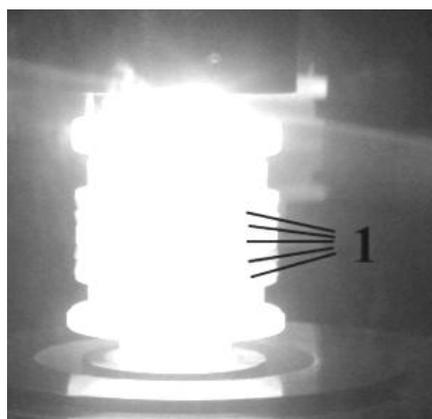
зов из объема ЭВП не вызывает особых затруднений и длится (в зависимости от его объема) от десятков секунд до десятков минут, процесс снижения скорости выделения газов из внутренних элементов прибора требует длительного их обезгаживания при высокой температуре.

Состав и количество выделяющихся при обезгаживании ЭВП газов зависит от материалов, использованных для изготовления различных деталей приборов, от размеров этих деталей и температуры их обезгаживания. Целью откачки ЭВП является полу-

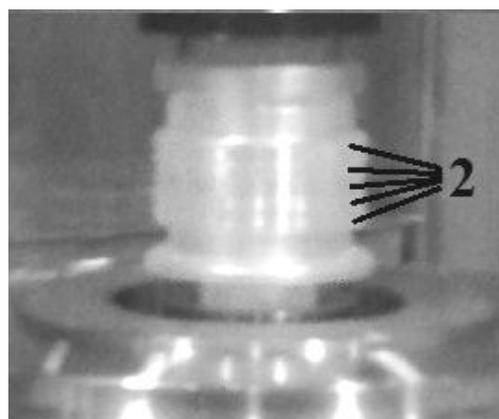
чение низких рабочих и остаточных давлений газов в объеме прибора. В большинстве современных ЭВП рабочее давление составляет $0,1 \cdot 10^{-6}$ Па. Столь низкие давления в рабочем пространстве приборов необходимы для обеспечения их нормальной работы, то есть предотвращения окисления электродов и отравления активного покрытия катодов (особенно оксидных); достижения большой длины свободного пробега электронов, чтобы при полете электронов от катода к аноду не было их рассеивания под действием соударений с молекулами газа; снижения интенсивности ионной бомбардировки отрицательно заряженных электродов, вызывающей появление обратных токов с этих электродов или разрушение активного покрытия катода [1-7].

Пайка вторично-эмиссионных втулок с керном катода наиболее ответственная,

поскольку требует повышенного внимания оператора и контролируется визуально по равномерности свечения втулок (рис. 1). На данной стадии наиболее вероятное появление брака получается в результате передержки (более 60 секунд) или недостаточного времени пайки. Пайка проводится молибден-кобальтовым припоем при температуре 1280 °С. Однако данная температура может изменяться в пределах 50-100°С в зависимости от партии припоя (после изготовления припоя он помещается в печь и доводится до расплавления, температура плавления передается в сопроводительном листе) что существенно осложняет процесс пайки. Спаянным считается изделие, у которого втулки имеют равномерное свечение.



а



б

Рис. 1. Импрегнированные втулки: *а* – до операции пайки; *б* – после операции пайки

Пайка, так же как и операция обезгаживания, проводится с помощью технологического подогревателя резистивным нагревом. Основными недостатками резистивного нагрева являются малая воспроизводимость и неповторяемость результатов спаиваемости импрегнированных втулок с керном (рис. 2), а также значительное напыление материала с разрушающегося под воздействием температуры технологического подогревателя на рабочую поверхность катодов и алундового покрытия (рис. 3), что негативно влияет на работу прибора.

Некачественный спай импрегнированных втулок при последующей тренировке, динамических испытаниях и работе прибора приводит к неравномерному нагреву эмитирующей поверхности катода, что уменьшает плотность тока и снижает эмиссионную способность катода.

Напыления материала с разрушающегося под воздействием температуры технологического подогревателя на рабочую поверхность катода и алундового покрытия при последующей тренировке, динамических испытаниях и работе прибора приводит к миграции напыления на ламели за-

медлящей системы и другие поверхности прибора. Как показывает опыт производства ЭВП М-типа, напыление ламелей вы-

зывает неравномерный нагрев ламелей и, как следствие, их оплавление, что значительно снижает срок службы приборов.

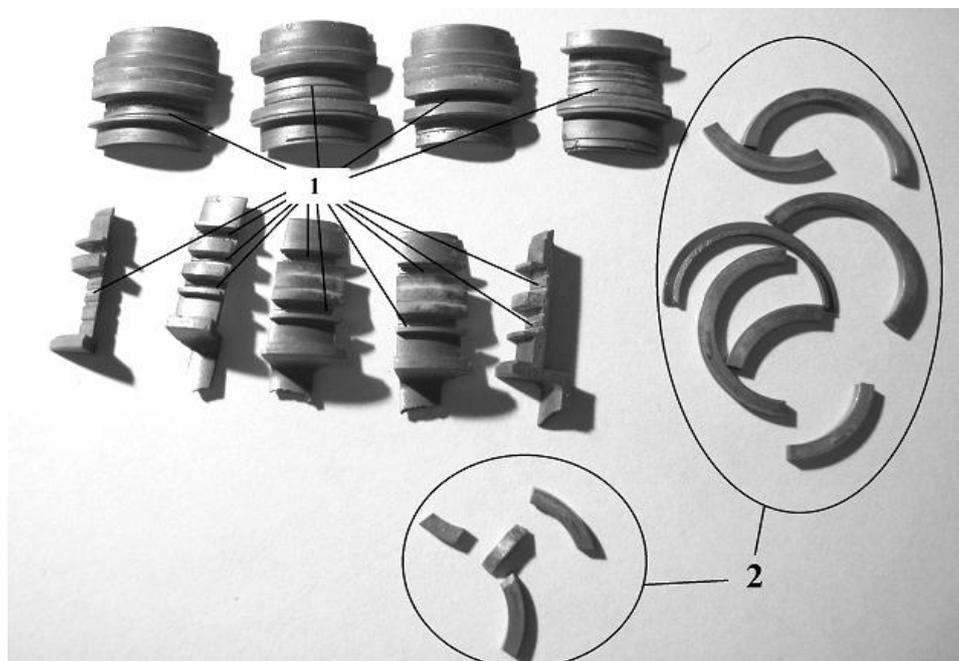


Рис. 2. Импрегнированные катоды: 1 – места некачественного спая импрегнированных втулок к керну катода; 2 – втулки, не припаявшиеся к керну



Рис. 3. Узел «Ножка катодная»: *а* – до операции обезгаживания и пайки; *б* – после операции обезгаживания

Для устранения данных дефектов был применен метод индукционной пайки. Методом индукционной пайки было изготовлено десять образцов. На рис. 4 представлены импрегнированные втулки в составе узла «ножка катодная» после операции пайки.

Как можно видеть, втулки, паянные резистивным методом (рис. 4, узел 1) имеют ярко выраженное напыление на рабочей поверхности, а втулки, паянные индукционной пайкой (рис. 4, узел 2), имеют ровный металлический блеск на рабочей поверхности.

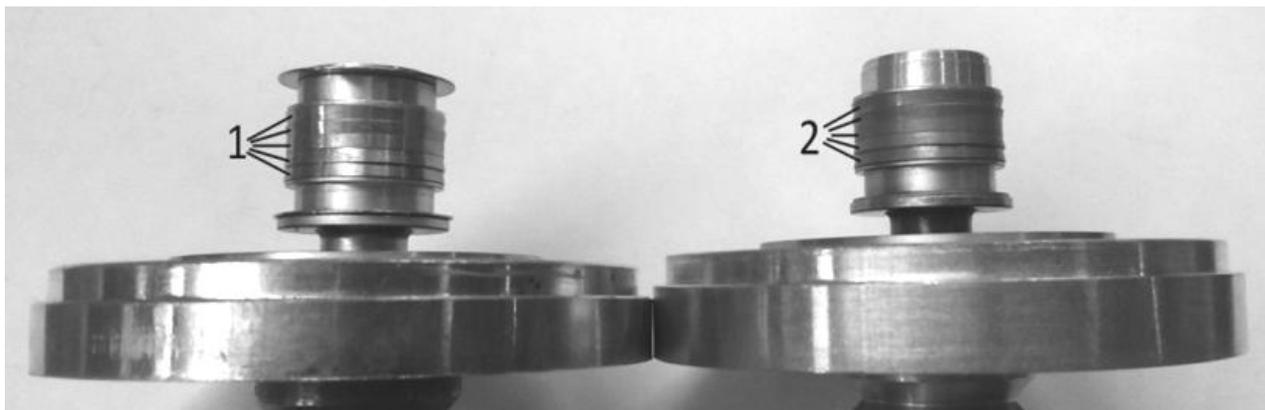


Рис. 4. Узел «ножка катодная» после операции пайки: 1 – втулки, паянные резистивным методом; 2 – втулки, паянные индукционной пайкой

Для проведения анализа спаиваемости импрегнированных втулок и керна катода индукционной пайкой было проведено вскрытие катодной ножки (рис. 5). Как видно из рисунка, метод индукционной пайки поз-

воляет получать качественный спай импрегнированных втулок с керном катода, обеспечивающий равномерный нагрев эмитирующей поверхности при тренировке, динамических испытаниях и работе прибора.



Рис. 5. Импрегнированные катоды, паянные методом индукционной пайки

К причинам, препятствующим широкому использованию индукционного метода в промышленности, относят:

- относительно низкую производительность процесса вследствие штучного нагрева деталей и длительного периода охлаждения их в вакууме;

- ограниченную область применения, процесс пригоден в основном для пайки малогабаритных деталей цилиндрической формы в массовом производстве;

- сложность создания станков-автоматов для вакуумной пайки и эксплуатации вакуумного оборудования.

Данные недостатки не препятствуют применению индукционной пайки для разработываемых нами ЭВП М-типа, поскольку производство не требует высокой производительности процесса, деталь является малогабаритной и имеет цилиндрическую форму.

Был рассчитан индукционный нагрев двухслойного цилиндра, схема которого показана на рис. 6.

Экспериментальные значения времени и температуры катода приведены на рис. 7.

Теоретическая модель зависимости температуры от времени на поверхности катода выглядит следующим образом [8, 9]:

$$T_{2m}(u, t) := 2 \cdot \frac{u_1 \cdot R_2}{\lambda_1} \cdot (\tau(t) + S_1(u_0, f, x_k, 0)),$$

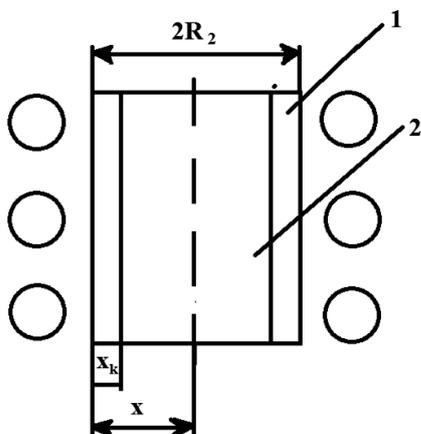


Рис. 6. Схема индукционного нагрева

Неизвестные параметры определяются с помощью оператора *genfit* (программа Mathcad), реализующего нелинейный метод наименьших квадратов:

$$ur1 := \text{genfit}(te, Te, u1, f3),$$

$$ur1 := \begin{pmatrix} 9,816 \times 10^4 \\ 2,628 \times 10^5 \end{pmatrix},$$

где *f3* – матрица, задающая модель и производные модели по неизвестным параметрам

$$f3(t, u1) = \begin{pmatrix} 2 \cdot \frac{u_1 \cdot R_2}{\lambda_1} (\tau(t) + S_1(u_1, f, x_k, 0)) \\ T_{2u_0}(u_1, f, x_k, u_1) \\ T_{2u_1}(u_1, f, x_k, u_1) \end{pmatrix},$$

где T_{2u_0} – частная производная от u_0 ; T_{2u_1} – частная производная от u_1 .

Таким образом, удельная проводимость составляет $9,816 \cdot 10^4 \text{ (Ом} \cdot \text{м)}^{-1}$, а поверхностная мощность – $2,628 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$.

Экспериментальные расчетные зависимости температуры поверхности катода от времени с идентифицированными параметрами показаны на рис. 8.

где u_0 – вектор неизвестных параметров; u – проводимость импрегнированной втулки; u_1 – поверхностная мощность нагрева импрегнированных втулок.

$$te := \begin{pmatrix} 10 \\ 20 \\ 30 \\ 40 \\ 50 \\ 60 \\ 70 \\ 80 \end{pmatrix} \quad Te := \begin{pmatrix} 200 \\ 400 \\ 700 \\ 900 \\ 1100 \\ 1150 \\ 1300 \\ 1500 \end{pmatrix} \quad (1)$$

a *б*

Рис. 7. Экспериментальные значения импрегнированного катода: *a* – времени (с); *б* – температуры (°C)

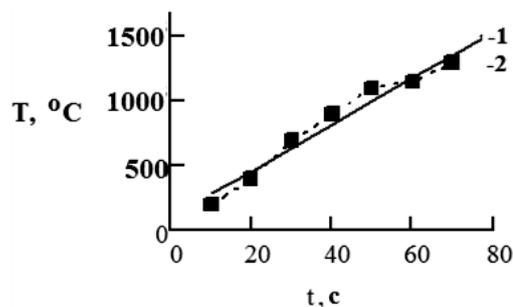


Рис. 8. Зависимость температуры импрегнированного катода от времени воздействия: 1 – расчетное, 2 – экспериментальное

Распределение температуры в двухслойном цилиндре задается выражением [8]:

$$T_1(\gamma_1, f, x_k, x, t, p_0) = 2 \cdot \frac{p_0 \cdot R_2}{\lambda_1} \cdot (\tau(t) + S_x(\gamma_1, f, x_k, x)),$$

где p_0 – удельная мощность на поверхности цилиндра, Вт/м²; R_2 – радиус цилиндра, м; λ_1 – коэффициент теплопроводности наружного слоя, Вт/мК; f – частота, Гц; x_k – толщина первого слоя, м; x – текущая координата, отсчитываемая от внешней границы цилиндра; t – время, с.

Приведенное время определяется по формуле

$$\tau(t) = a \cdot \frac{t}{R_2^2},$$

где $a = \frac{\lambda_1}{c_1 \rho_n}$ – коэффициент температуро-

проводности наружного слоя, м²/с; c_1 – теплоемкость наружного слоя; ρ_n – плотность наружного слоя, кг/м³.

Функция S_x определяется из выражения

$$S_x(\gamma_1, f, x_k, x) = \begin{cases} f \leftarrow S_1(\gamma_1, f, x_k, x) \text{ if } \zeta(\gamma_1, f, x_k) > x, \\ f \leftarrow S_2(\gamma_1, f, x_k, x) \text{ if } \zeta(\gamma_1, f, x_k) < x, \\ f \end{cases}$$

$$S_1(\gamma_1, f, x_k, x) = \frac{-\alpha(\gamma_1, f, x_k)^2}{8 \cdot (1 - \alpha(\gamma_1, f, x_k)^2)} \left(2 \cdot \beta(x)^2 + \alpha(\gamma_1, f, x_k)^2 - 3 - 4 \cdot \ln(\beta(x)) \right),$$

$$S_2(\gamma_1, f, x_k, x) = \frac{\beta(x)^2}{4} + \frac{\alpha(\gamma_1, f, x_k)^2}{8} + \frac{\alpha(\gamma_1, f, x_k)^2 \cdot \ln(\alpha(\gamma_1, f, x_k))}{2 \cdot (1 - \alpha(\gamma_1, f, x_k)^2)},$$

где $\alpha(\gamma_1, f, x_k) = 1 - \frac{\zeta(\gamma_1, f, x_k)}{R_2}$; $\beta(x) = 1 - \frac{x}{R_2}$.

Распределение температуры в зависимости от x показано на рис. 9.

$$\frac{T_1(\gamma_1, 30000, 2 \cdot 10^{-3}, x, 8, 2 \cdot 10^6)}{T_1(\gamma_1, 30000, 2 \cdot 10^{-3}, x, 10, 2 \cdot 10^6)}$$

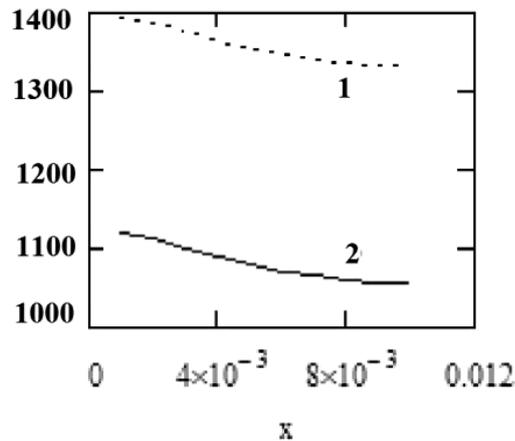


Рис. 9. Распределение температуры K в зависимости от x при $f = 30$ кГц, $\gamma = 9,8 \cdot 10^4$ Ом·м⁻¹, $x_k = 2$ мм, $p_0 = 2 \cdot 10^6$ Вт: 1 – время нагрева 10 с, 2 – время нагрева 8 с

Время нагрева на глубине первого слоя x_k до заданной температуры T_k определяется по формуле

$$t_k(\gamma_1, f, x_k, p_0) = \left(\frac{\lambda_1 \cdot T_k}{2 \cdot p_0 \cdot R_2} - S_x(\gamma_1, f, x_k, p_0) \right) \cdot \frac{R_2^2}{a}.$$

Зависимость времени нагрева до заданной температуры пайки от частоты показана на рис. 10.

Таким образом, время нагрева до температуры пайки T_k составляет 8-9 с и уменьшается с увеличением частоты генератора.

Ток индуктора определяется по формуле

$$I_u(\gamma_1, f, x_k, p_0) = \frac{L_u \cdot H_{me}(\gamma_1, f, x_k, p_0)}{\omega_u \cdot \sqrt{2}},$$

где L_u – длина индуктора; H_{me} – напряженность магнитного поля на внешней поверхности цилиндра, А/м; ω_u – число витков индуктора.

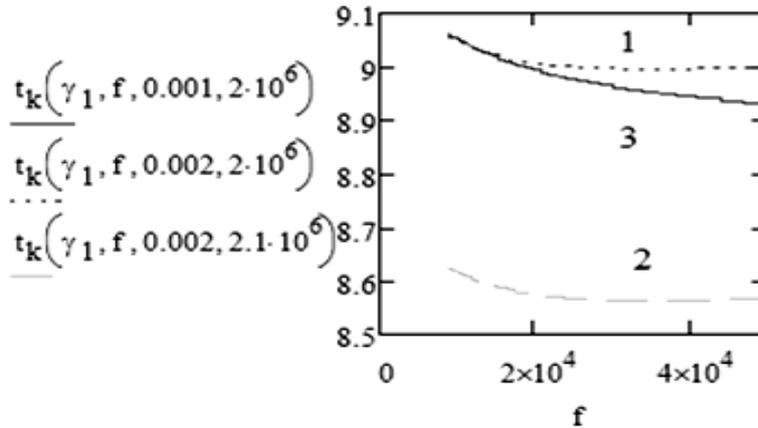


Рис. 10. Зависимость времени нагрева до заданной температуры пайки от частоты: 1 – $x_k = 2$ мм, $p_0 = 2 \cdot 10^6$ Вт; 2 – $x_k = 2$ мм, $p_0 = 2,1 \cdot 10^6$ Вт; 3 – $x_k = 1$ мм, $p_0 = 2 \cdot 10^6$ Вт

Напряженность магнитного поля на поверхности равна

$$H_{me}(\gamma_1, f, x_k, p_0) = \sqrt{\frac{p_0}{1,405 \cdot 10^{-3} \cdot K(\gamma_1, f, x_k) \cdot \cos(\varphi(\gamma_1, f, x_k)) \cdot \sqrt{\frac{f}{\gamma_1}}}}$$

Напряжение на индукторе примет вид

$$U_u(\gamma_1, f, x_k, p_0) = I_u(\gamma_1, f, x_k, p_0) \cdot Z_u(f)$$

где Z_u – комплексное сопротивление цепи;

$$Z_u(f) = \sqrt{(r_1(f) + r_2(f))^2 + (x_1(f) + x_2(f) + x_B(f))^2},$$

где r_1, x_1 – активное/реактивное сопротивление индуктора, Ом; r_2, x_2 – активное и реактивное сопротивления наружного слоя,

Ом; x_B – реактивное сопротивление воздушного зазора между индуктором и цилиндром.

$$r_1(f) = \omega_u^2 \cdot \pi \cdot 2 \cdot R_1 \cdot \frac{P_u}{L \cdot \Delta_u(f)}$$

$$x_1(f) = \omega_u^2 \cdot \pi \cdot 2 \cdot R_1 \cdot \frac{P_u}{L \cdot \Delta_u(f)}$$

$$r_2(f) = \omega_u^2 \cdot \pi \cdot 2 \cdot R_1 \cdot \frac{P_1}{L \cdot \Delta_1(\gamma_1, f)} \cdot (K(\gamma_1, f, x_k) \cdot \cos(\varphi(\gamma_1, f, x_k))),$$

$$x_2(f) = \omega_u^2 \cdot \pi \cdot 2 \cdot R_2 \cdot \frac{P_1}{L \cdot \Delta_1(\gamma_1, f)} \cdot (K(\gamma_1, f, x_k) \cdot \sin(\varphi(\gamma_1, f, x_k))),$$

$$x_B(f) = \mu_0 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \pi \cdot (R_1^2 - R_2^2) \cdot \frac{\omega_u^2}{L}$$

Зависимость тока индуктора от частоты при поверхностной мощности $P_0 = 2 \cdot 10^6$ Вт/м² показана на рис. 11.

С увеличением частоты ток индуктора уменьшается. Зависимость мощности гене-

ратора от поверхностной мощности показана на рис. 12.

Мощность генератора при поверхностной мощности нагрева $2 \cdot 10^6$ Вт/м² составляет 5 кВт.

Такая мощность обеспечивает прогрев на глубину 2 мм до температуры пайки за 9 с при внешнем диаметре цилиндра 20 мм.

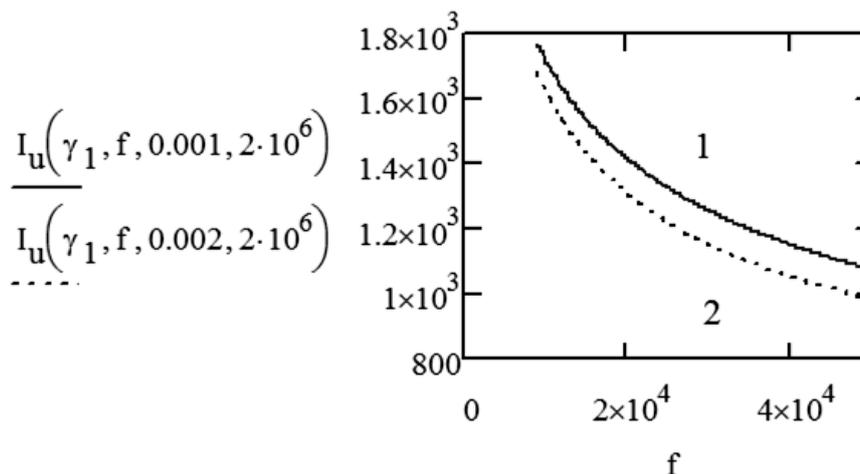


Рис. 11. Зависимость тока индуктора от частоты: 1 – $x_k = 1$ мм; 2 – $x_k = 2$ мм

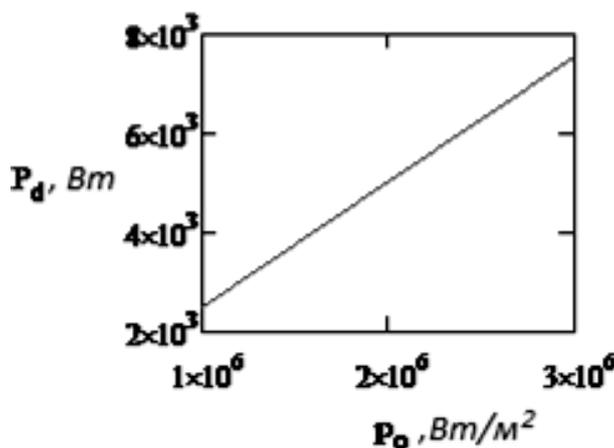


Рис. 12. Зависимость мощности генератора от поверхностной мощности

Разработанная новая аналитическая модель вакуумной индукционной пайки импрегнированных втулок, основанная на экспериментальных данных, учитывает двухслойную конструкцию катода и дает возможность адекватно оценить важные для контроля качества пайки параметры процесса, такие как средняя удельная проводимость и поверхностная мощность.

Предложенная методика проведения технологического процесса индукционной пайки импрегнированных втулок с керном катода позволяет увеличить выход годных маломощных СВЧ приборов М-типа на 10 % за счет исключения брака при динамических испытаниях приборов и снизить время тренировки приборов в диодном режиме не менее чем на 50 %.

Обнаруженная экспериментальная зависимость поверхности катода от времени процесса и потребляемой мощности позволяет оперативно определить допустимые температурные режимы процесса обезгаживания импрегнированных катодов и поддерживать требования к вакууму на операции обезгаживания катодного узла, при которых не происходит отравления катодов остаточными газами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Парциальное газовыделение при откачке ЭВП / А.Я. Зоркин, Г.В. Сахаджи, А.С. Мясников, С.В. Семенов // Вакуумная техника и технология. 2010. Т. 20. № 2. С. 111-114.

2. **Зоркин А.Я.** Теория и практика откачки мощных электровакуумных приборов / А.Я. Зоркин, Г.В. Конюшков, А.В. Гаранин // Электроника и вакуумная техника: приборы и устройства, технология, материалы: матер. науч.-техн. конф. Саратов: Изд-во СГУ, 2004. С. 90-92.

3. Исследование режимов обезгаживания ЭОС и активирование катодов в процессе вакуумной обработки / Т.П. Дементиевская, Ю.В. Мохов и др. // Электронная техника. Сер. 4. Электровакуумные и газоразрядные приборы. 1988. № 1. С. 69-71.

4. **Фромм Е.** Газы и углерод в металлах / Е. Фромм, Е. Гебхард. М.: Metallurgia, 1980. 712 с.

5. **Розанов Л.Н.** Вакуумная техника / Л.Н. Розанов. М.: Высш. шк., 1982. 207 с.

6. **Черепнин Н.В.** Основы очистки, обезгаживания и откачки в вакуумной технике / Н.В. Черепнин. М.: Сов. радио, 1967. 350 с.

7. **Сушков А.Д.** Вакуумная электроника: физико-технические основы / А.Д. Сушков. СПб.: Лань, 2004. 464 с.

Тищенко Ольга Дмитриевна – аспирант кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Зоркин Александр Яковлевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Родионов Игорь Владимирович – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Тищенко Артем Александрович – аспирант кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Горбунова Елена Николаевна – преподаватель филиала Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. в г. Петровске

Olga D. Tishchenko – Postgraduate, Department of Welding and metallurgy Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Alexander Ya. Zorkin – Dr. Sc., Professor, Department of Welding and metallurgy Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Igor V. Rodionov – Dr. Sc., head of the Department of welding and metallurgy Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Artem A. Tishchenko – Postgraduate, Department of Welding and metallurgy of the Saratov State Technical University named after Yuri Gagarin

Elena N. Gorbunova – Lecturer, Petrovsk branch of Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 01.11.19, принята к опубликованию 15.11.19

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

УДК 621.372.8

ВЛИЯНИЕ ПЕРЕХОДА БЫСТРОЙ ВОЛНЫ ОСНОВНОГО ТИПА В МЕДЛЕННУЮ НА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРЯМОУГОЛЬНОГО ВОЛНОВОДА С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЛАСТИНОЙ В Н-ПЛОСКОСТИ

Д.А. Баринов, П.В. Ковряков, В.А. Коломейцев, Ю.А. Кузьмин

THE EFFECT OF THE TRANSITION OF A FAST DOMINANT WAVE INTO A SLOW ONE ON THE ELECTRODYNAMIC PROPERTIES OF A RECTANGULAR WAVEGUIDE WITH A DIELECTRIC PLATE IN THE H-PLANE

D.A. Barinov, P.V. Kovryakov, V.A. Kolomeytsev, Yu.A. Kuzmin

Приведено аналитическое решение задачи электродинамики для прямоугольного волновода с диэлектрической пластиной в Н-плоскости при использовании продольной Y-поляризации электромагнитного поля, которое позволило определить влияние перехода быстрой основной волны в медленную на собственные параметры и структуру электромагнитного поля: Показано, что при этом электромагнитное поле в менее плотной среде (воздушная среда) стягивается к поверхности раздела сред, частично проникая в диэлектрическую пластину, что приводит к интенсификации процесса ее нагрева. Данное положение представляет особый интерес при создании конвейерных СВЧ нагревательных установок для термообработки листовых материалов.

Ключевые слова: прямоугольный волновод; диэлектрическая пластина; принцип поляризационной двойственности; уравнение Гельмгольца; собственные электродинамические параметры; быстрая и медленная волна; критические длины волн; принцип суперпозиции и ортогональности; дисперсионные уравнения

An analytical solution of the electrodynamics problem for a rectangular waveguide with a dielectric plate in the H-plane using the longitudinal Y-polarization of the EM field is given, which allowed us to determine the effect of the transition of the fast dominant wave to the slow one on the proprietary parameters and structure of the EM field: a less dense medium (air) is pulled to the interface of the media, partially penetrating into the dielectric plate, which leads to an intensification of the heating process. This provision is of particular interest when creating microwave conveyor heating systems for heat treatment of sheet materials.

Keywords: rectangular waveguide; dielectric plate; principle of polarization duality; Helmholtz equation; proprietary electrodynamics parameters; fast and slow wave; critical wavelengths; principle of superposition and orthogonality; dispersion equations

Рассмотрим электродинамические свойства прямоугольного волновода (ПрВ), на нижней стенке которого расположена диэлектрическая пластина толщиной – d и шириной – a (рис. 1).

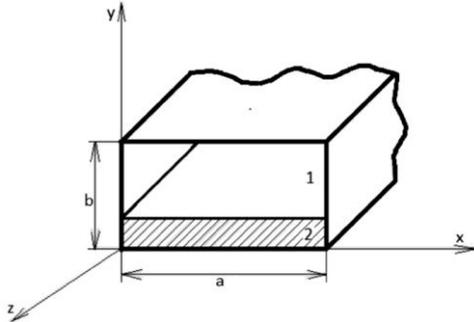


Рис. 1. Прямоугольный волновод, частично заполненный обрабатываемым диэлектриком

Как показано в работе [1], данное расположение пластины в ПрВ при использовании продольной Y-поляризации электромагнитного (ЭМ) поля (E_y, H_y) позволяет получить аналитическое решение внутренней краевой задачи электродинамики (ВКЗЭ), на основе которого определяются собственные электродинамические параметры и структуры ЭМ поля. Волновое уравнение Гельмгольца для данного случая имеет вид

$$\nabla^2 \vec{E}_{yq}(\vec{r}, \tau) - \mu \cdot \epsilon_q \cdot \frac{\partial^2 \vec{E}_{yq}(\vec{r}, \tau)}{\partial \tau^2} = 0 \quad (1)$$

для E-типов волн;

$$\begin{aligned} E_{xqmn}(x, y) &= \frac{1}{\kappa_{\perp mn}^2} \left(\frac{m\pi}{a} \right) K_{ynq} \cos\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \left(-a_{1qn} \sin(K_{ynq} y) + b_{1qn} \cos(K_{ynq} y) \right), \\ E_{yqmn}(x, y) &= \sin\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \cdot \left(a_{1qn} \cos(K_{ynq} y) + b_{1qn} \sin(K_{ynq} y) \right), \\ E_{zqmn}(x, y) &= \frac{1}{\kappa_{\perp mn}^2} \beta_{mn} K_{ynq} \sin\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \left(-a_{1qn} \sin(K_{ynq} y) + b_{1qn} \cos(K_{ynq} y) \right), \\ H_{xqmn}(x, y) &= \frac{-j}{\kappa_{\perp mn}^2} \omega \epsilon_q \beta_{mn} \sin\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \left(a_{1qn} \cos(K_{ynq} y) + b_{1qn} \sin(K_{ynq} y) \right), \\ H_{zqmn}(x, y) &= -j \omega \epsilon_q \frac{1}{\kappa_{\perp mn}^2} \left(\frac{m\pi}{a} \right) \cos\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \left(a_{1qn} \cos(K_{ynq} y) + b_{1qn} \sin(K_{ynq} y) \right), \end{aligned} \quad (3)$$

где $\kappa_{\perp mn}^2 = \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 + \beta_{mn}^2$.

$$\nabla^2 \vec{H}_{yq}(\vec{r}, \tau) - \mu \cdot \epsilon_q \cdot \frac{\partial^2 \vec{H}_{yq}(\vec{r}, \tau)}{\partial \tau^2} = 0$$

для H-типов волн, где $q = 1$ определяет воздушную среду, а $q = 2$ – диэлектрическую пластину.

Решая уравнения (1) методом разделения переменных и удовлетворяя полученные решения стандартным граничным условиям на металлической поверхности волновода [2], получим

$$E_{yq}(x, y, z, \tau) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} E_{yqmn}(x, y) \cdot e^{j(\omega\tau - \beta_{mn}z)}, \quad (2)$$

$$H_{yq}(x, y, z, \tau) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} H_{yqmn}(x, y) \cdot e^{j(\omega\tau - \beta_{mn}z)},$$

при этом $\beta = 2\pi/\Lambda_g$ – постоянная распространения волны; Λ_g – длина волны в волноводе.

Соотношения (2) показывают, что искоемое ЭМ поле в ПрВ представляется в виде суперпозиции E и H-типов волн. В данном случае рассматривается спектр прямых ортонормированных волн, распространяющихся в положительном направлении оси Z. Остальные компоненты ЭМ поля определяются на основе принципа поляризационной двойственности [3] через составляющие E_y, H_y . Так, для E-типов волн ($E_y \neq 0, H_y = 0$) структура ЭМ поля представлена следующими соотношениями:

Соответственно для Н-типов имеет следующий вид:
волн ($E_y = 0$; $H_y \neq 0$) структура ЭМ поля

$$\begin{aligned}
 E_{xqmn}(x, y) &= \frac{j\omega\mu}{\kappa_{\perp mn}^2} \beta_{mn} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \left(a_{2qn} \cos(K_{ynq}y) + b_{2qn} \sin(K_{ynq}y)\right), \\
 E_{zqmn}(x, y) &= \frac{-j\omega\mu}{\kappa_{\perp mn}^2} \left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \left(a_{2qn} \cos(K_{ynq}y) + b_{2qn} \sin(K_{ynq}y)\right), \\
 H_{xqmn}(x, y) &= -\frac{K_{ynq}}{\kappa_{\perp mn}^2} \left(\frac{m\pi}{a}\right) \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \left(-a_{2qn} \sin(K_{ynq}y) + b_{2qn} \cos(K_{ynq}y)\right) \quad (4) \\
 H_{yqmn}(x, y) &= \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \left(a_{2qn} \cos(K_{ynq}y) + b_{2qn} \sin(K_{ynq}y)\right), \\
 H_{zqmn}(x, y) &= -j \frac{\beta_{mn}}{\kappa_{\perp mn}^2} \left(\frac{m\pi}{a}\right) \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \left(-a_{2qn} \sin(K_{ynq}y) + b_{2qn} \cos(K_{ynq}y)\right)
 \end{aligned}$$

Удовлетворяя соотношения (3), (4) граничным условиям на металлических стенках ПрВ и поверхности раздела сред

в координатном направлении оси – Y (при $y = 0$; $y = b$; $y = d$)

$$\begin{aligned}
 E_{x1} = 0|_{y=b}, \quad E_{x2} = 0|_{y=0}, \quad E_{x1} = E_{x2}|_{y=d}, \quad E_{z1} = E_{z2}|_{y=d}, \\
 \frac{\partial H_{x1}}{\partial y} = 0|_{y=b}, \quad \frac{\partial H_{z1}}{\partial y} = 0|_{y=d}, \quad \frac{\partial H_{x2}}{\partial y} = 0|_{y=0}, \quad \frac{\partial H_{z2}}{\partial y} = 0|_{y=0}, \quad (5) \\
 H_{x1} = H_{x2}|_{y=d}, \quad H_{z1} = H_{z2}|_{y=d}, \quad H_{y1} = H_{y2}|_{y=d}, \quad \varepsilon_1 \cdot E_{y1} = \varepsilon_2 \cdot E_{y2}|_{y=d},
 \end{aligned}$$

получим следующую систему алгебраических уравнений, определяющих коэффици-

енты a_{11} , a_{12} , b_{11} , b_{12} , и связь между ними для Е-типов волн:

$$\begin{aligned}
 E_{x2} = E_{z2} = 0|_{y=0} &\Rightarrow b_{21} = 0, \\
 E_{x1} = E_{z1} = 0|_{y=b} &\Rightarrow b_{11} = a_{11} \operatorname{tg} K_{yn1} b, \\
 \begin{aligned}
 E_{x1} = E_{x2}|_{y=d} \\
 E_{z1} = E_{z2}|_{y=d}
 \end{aligned} &\Rightarrow a_{11} K_{yn1} \frac{\sin(K_{yn1}(b-d))}{\cos(K_{yn1}b)} = -a_{12} K_{yn2} \sin(K_{yn2}d), \quad (6) \\
 E_{y1}\varepsilon_1 = E_{y2}\varepsilon_2|_{y=d} &\Rightarrow a_{11} \varepsilon_1 \frac{\cos(K_{yn1}(b-d))}{\cos(K_{yn1}b)} = a_{12} \varepsilon_2 \cos(K_{yn2}d).
 \end{aligned}$$

Проделаем ту же операцию для Н-типов волн. В результате получим

$$\begin{aligned}
 E_{x1} = E_{z1} = 0 \Big|_{y=b} &\Rightarrow a_{21} = -b_{21} \operatorname{tg}(K_{yn1}b), \\
 E_{x2} = E_{z2} = 0 \Big|_{y=0} &\Rightarrow a_{22} = 0, \\
 \left. \begin{aligned} E_{x1} = E_{x2} \\ E_{z1} = E_{z2} \end{aligned} \right|_{y=0} &\Rightarrow b_{22} \sin(K_{yn2}d) = b_{21} \frac{\sin(K_{yn1}(b-d))}{\cos(K_{yn1}b)}, \\
 \left. \begin{aligned} H_{z1} = H_{z2} \\ H_{x1} = H_{x2} \end{aligned} \right|_{y=d} &\Rightarrow b_{22} K_{yn2} \cos(K_{yn2}d) = b_{21} K_{yn1} \frac{\cos(K_{yn1}(b-d))}{\cos(K_{yn1}b)}.
 \end{aligned} \tag{7}$$

Заметим, что в третьем и четвертом соотношениях систем (6), (7) учтены значения коэффициентов, определяемых первым и вторым уравнениями. Поделив третье со-

отношение на четвертое, получаем дисперсионное уравнение для Е и Н-типов волн ПрВ с двухслойным диэлектрическим пластинчатым заполнением:

$$\operatorname{tg} K_{yn1}(b-d) = -\frac{\varepsilon_1 K_{yn2}}{\varepsilon_2 K_{yn1}} \operatorname{tg} K_{yn2} d \text{ для Е-типов волн,} \tag{8}$$

$$\operatorname{tg} K_{yn1}(b-d) = -\frac{K_{yn1}}{K_{yn2}} \operatorname{tg} K_{yn2} d \text{ для Н-типов волн.}$$

Каждое из дисперсионных уравнений (8) содержит две неизвестные величины K_{yn1} , K_{yn2} , следовательно, для их однозначного решения требуется дополнительное уравнение, связывающее между собой данные волновые числа. Как показано в работе [4], таким вспомогательным уравнением является обобщенное дисперсионное уравнение, которое для двухслойного заполнения ПрВ распадается на уравнения для воздушной и диэлектрической пластины:

$$\begin{aligned}
 \omega^2 \varepsilon_1 \mu_1 &= \beta_{mn}^2 + \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + K_{yn1}^2, \\
 \omega^2 \varepsilon_2 \mu_2 &= \beta_{mn}^2 + \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + K_{yn2}^2.
 \end{aligned} \tag{9}$$

При этом $\varepsilon_1 = \varepsilon_0$ – абсолютная диэлектрическая проницаемость воздуха, $\mu_1 = \mu_2 = \operatorname{const}$. Соотношения (9) удобнее для последующего анализа представить в виде

$$(\omega/c)^2 = \beta_{mn}^2 + \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + K_{yn1}^2, \tag{10}$$

$$\varepsilon'_2 (\omega/c)^2 = \beta_{mn}^2 + \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + K_{yn2}^2,$$

где $\varepsilon'_2 = \varepsilon_2/\varepsilon_1$ – относительная диэлектрическая проницаемость пластины.

Переход быстрой волны в медленную происходит при коэффициенте замедления

$$K_z = \frac{c}{v_\phi} = \beta c/\omega = 1, \text{ где } v_\phi \text{ – фазовая скорость распространения волны; } c \text{ – скорость света в воздухе.}$$

Условием начала процесса перехода быстрой волны в медленную применительно к первому уравнению системы (10) является

$$(\omega/c)^2 = \beta_{mn}^2, \tag{11}$$

при этом из первого уравнения (10) следует

$$K_{yn1} = j\left(\frac{m\pi}{a}\right). \tag{12}$$

Согласно соотношению (12), дисперсионные уравнения (8) для медленных

волн представляются в виде

$$\begin{aligned} \operatorname{th}(K_{yn1}(b-d)) &= \frac{1}{\varepsilon'_2} \frac{K_{yn2}}{K_{yn1}} \operatorname{tg}(K_{yn2}d) \text{ для E-типов волн,} \\ \operatorname{th}(K_{yn1}(b-d)) &= -\frac{K_{yn1}}{K_{yn2}} \operatorname{tg}(K_{yn2}d) \text{ для H-типов волн.} \end{aligned} \quad (13)$$

Таким образом, соотношения (8) позволяют определить спектр критических длин волн E и H-типов, а также длин волн, на которых происходит переход быстрой волны ($\beta c/\omega < 1$) в медленную ($\beta c/\omega \geq 1$). Совместное использование дисперсионных уравнений (9), (13) позволяет определить диапазонные свойства основных электродинамических параметров $\beta c/\omega(\lambda)$, $K_{yn1}(\lambda)$,

$K_{yn2}(\lambda)$, которые однозначно определяют структуру ЭМ поля. При этом структуры поля различаются для быстрых и медленных волн, и данное отличие возрастает при уменьшение рабочей длины волны λ . Для быстрых волн структура ЭМ поля E-типов волн согласно соотношениям (3), (6) для воздушной среды может быть представлена в следующем виде:

$$\begin{aligned} E_{x1mn}(x, y) &= a_{11n} \left(\frac{m\pi}{a} \right) \frac{\sin(K_{yn1}(b-y))}{\cos(K_{yn1}b)} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \frac{K_{yn1}}{K_{\perp mn}^2}, \\ E_{y1mn}(x, y) &= a_{11n} \frac{\cos(K_{yn1}(b-y))}{\cos(K_{yn1}b)} \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right), \\ E_{z1mn}(x, y) &= -j a_{11n} \beta_{mn} \frac{\sin(K_{yn1}(b-y))}{\cos(K_{yn1}b)} \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \frac{1}{K_{\perp mn}^2}, \\ H_{x1mn}(x, y) &= -\omega \varepsilon_0 a_{11n} \frac{\cos(K_{yn1}(b-y))}{\cos(K_{yn1}b)} \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \frac{\beta_{mn}}{K_{\perp mn}^2}, \\ H_{z1mn}(x, y) &= j \omega \varepsilon_0 a_{11n} \left(\frac{m\pi}{a} \right) \frac{\cos(K_{yn1}(b-y))}{\cos(K_{yn1}b)} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \frac{1}{K_{\perp mn}^2}. \end{aligned} \quad (14)$$

Соответственно для области, заполненной диэлектрической пластиной,

структура ЭМ поля имеет вид

$$\begin{aligned} E_{x2mn}(x, y) &= a_{12n} \left(\frac{m\pi}{a} \right) \sin(K_{yn2}y) \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \frac{K_{yn2}}{K_{\perp mn}^2}, \\ E_{y2mn}(x, y) &= a_{12n} \cos(K_{yn2}y) \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right), \end{aligned}$$

$$E_{z2mn}(x, y) = -j a_{12n} \beta_{mn} \sin(K_{yn2}y) \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \frac{K_{yn2}}{K_{\perp mn}^2}, \quad (15)$$

$$H_{x2mn}(x, y) = -\omega \varepsilon_2 a_{12n} \cos(K_{yn2}y) \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \frac{\beta_{mn}}{K_{\perp mn}^2},$$

$$H_{z2mn}(x, y) = j \omega \varepsilon_2 a_{12n} \left(\frac{m\pi}{a}\right) \sin(K_{yn2}y) \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \frac{1}{K_{\perp mn}^2}.$$

Соотношения (14), (15) определяют структуру ЭМ поля быстрых волн $\left(\frac{\beta c}{\omega} < 1\right)$

Е-типа в воздушной среде и диэлектрической пластине. В диапазоне длин волн, в котором распространяются медленные волны, значение волнового числа K_{yn1} , становится мнимой величиной, что приводит к деформации поля в воздушной среде, при

этом данный эффект усиливается при уменьшении длины волны. Заметим, что при двухслойном заполнении ПрВ величина волнового числа K_{yn2} остается действительной величиной во всем разрешенном диапазоне длин волн – $0 \leq \lambda \leq \lambda_{кр}$. Структура ЭМ поля медленных волн Е-типа в воздушной среде определяется следующим образом:

$$E_{x1mn}(x, y) = j a_{11n} \left(\frac{m\pi}{a}\right) \frac{sh\left(\left|K_{yn1}\right|(b-y)\right)}{ch\left(\left|K_{yn1}\right|b\right)} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \frac{\left|K_{yn1}\right|}{K_{\perp mn}^2},$$

$$E_{y1mn}(x, y) = a_{11n} \frac{sh\left(\left|K_{yn1}\right|(b-y)\right)}{ch\left(\left|K_{yn1}\right|b\right)} \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right),$$

$$E_{z1mn}(x, y) = a_{11n} \beta_{mn} \frac{sh\left(\left|K_{yn1}\right|(b-y)\right)}{ch\left(\left|K_{yn1}\right|b\right)} \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \frac{1}{K_{\perp mn}^2}, \quad (16)$$

$$H_{x1mn}(x, y) = -\omega \varepsilon_0 a_{11n} \frac{ch\left(\left|K_{yn1}\right|(b-y)\right)}{ch\left(\left|K_{yn1}\right|b\right)} \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \frac{\beta_{mn}}{K_{\perp mn}^2},$$

$$H_{z1mn}(x, y) = j \omega \varepsilon_0 a_{11n} \left(\frac{m\pi}{a}\right) \frac{ch\left(\left|K_{yn1}\right|(b-y)\right)}{ch\left(\left|K_{yn1}\right|b\right)} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \frac{1}{K_{\perp mn}^2}.$$

В отличие от быстрой волны нормальная составляющая медленной волны E_{y1mn} согласно соотношению (16) возрастает при приближении к поверхности раздела сред. Аналогичный эффект наблюдается для тангенциальных составляющих электрического поля. Это означает, что электрическое поле в менее плотной среде (воздушная среда) стягивается к границе раздела сред,

что приводит к снижению величины мощности волны, распространяющейся в воздушной среде. При постоянстве подводимой мощности в ПрВ это приводит к увеличению мощности волны, распространяющейся в диэлектрической пластине, что при постоянстве удельной электропроводности пластины приводит к увеличению уровня поглощенной мощности – P_{noz} и, со-

ответственно, к интенсификации процесса нагрева диэлектрической пластины с помощью энергии ЭМ поля. В связи с этим данный эффект представляет несомненный интерес в технике и энергетике СВЧ при проектировании рабочих камер СВЧ нагревательных устройств для непрерывной термообработки листовых материалов.

Рассмотрим Н-волны. Структура Н-типов волн, исходя из системы уравнений (4) при удовлетворении граничным условиям (5), может быть представлена для области ПрВ, заполненной воздухом $d \leq y < b$ для волн Н-типа (при $\frac{\beta c}{\omega} \leq 1$) в виде

$$\begin{aligned}
 E_{x1mn}(x, y) &= -\frac{\omega \mu_1}{K_{\perp mn}^2} b_{21n} \beta_{mn} \frac{\sin(K_{yn1}(b-y))}{\cos(K_{yn1}b)} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right), \\
 E_{z1mn}(x, y) &= j \frac{\omega \mu_1}{K_{\perp mn}^2} b_{21n} \left(\frac{m\pi}{a}\right) \frac{\sin(K_{yn1}(b-y))}{\cos(K_{yn1}b)} \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right), \\
 H_{x1mn}(x, y) &= -\frac{K_{yn1}}{K_{\perp mn}^2} b_{21n} \left(\frac{m\pi}{a}\right) \frac{\cos(K_{yn1}(b-y))}{\cos(K_{yn1}b)} \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right), \\
 H_{y1mn}(x, y) &= b_{21n} \frac{\sin(K_{yn1}(b-y))}{\cos(K_{yn1}b)} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right), \\
 H_{z1mn}(x, y) &= j \frac{K_{yn2}}{K_{\perp mn}^2} b_{21n} \beta_{mn} \frac{\cos(K_{yn1}(b-y))}{\cos(K_{yn1}b)} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right).
 \end{aligned} \tag{17}$$

Соответственно для области ПрВ, заполненной диэлектрической пластиной

(для $\frac{\beta c}{\omega} \leq 1$), получим

$$\begin{aligned}
 E_{x2mn}(x, y) &= -\frac{\omega \mu_2}{K_{\perp mn}^2} b_{22n} \beta_{mn} \sin(K_{yn2}y) \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right), \\
 E_{z2mn}(x, y) &= j \frac{\omega \mu_2}{K_{\perp mn}^2} b_{22n} \left(\frac{m\pi}{a}\right) \sin(K_{yn2}y) \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right), \\
 H_{x2mn}(x, y) &= -\frac{K_{yn2}}{K_{\perp mn}^2} b_{22n} \left(\frac{m\pi}{a}\right) \cos(K_{yn2}y) \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right), \\
 H_{y2mn}(x, y) &= b_{22n} \sin(K_{yn2}y) \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right), \\
 H_{z2mn}(x, y) &= j \frac{K_{yn2}}{K_{\perp mn}^2} b_{22n} \beta_{mn} \sin(K_{yn2}y) \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right).
 \end{aligned} \tag{18}$$

Для медленных волн Н-типа (при $\frac{\beta c}{\omega} > 1$) при мнимой величине волнового числа K_{yn1}

получим следующие соотношения, определяющие структуру ЭМ поля в области ПрВ, заполненной воздухом:

$$\begin{aligned}
 E_{x1mn}(x, y) &= -j \frac{\omega \mu_1}{K_{\perp mn}^2} b_{21n} \beta_{mn} \frac{sh\left(\left|K_{yn1}\right|(b-y)\right)}{ch\left(\left|K_{yn1}\right|b\right)} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right), \\
 E_{z1mn}(x, y) &= -\frac{\omega \mu_1}{K_{\perp mn}^2} b_{21n} \left(\frac{m\pi}{a}\right) \frac{sh\left(\left|K_{yn1}\right|(b-y)\right)}{ch\left(\left|K_{yn1}\right|b\right)} \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right), \\
 H_{x1mn}(x, y) &= -\frac{K_{yn1}}{K_{\perp mn}^2} b_{21n} \left(\frac{m\pi}{a}\right) \frac{ch\left(\left|K_{yn1}\right|(b-y)\right)}{ch\left(\left|K_{yn1}\right|b\right)} \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right), \\
 H_{y1mn}(x, y) &= j b_{21n} \frac{sh\left(\left|K_{yn1}\right|(b-y)\right)}{ch\left(\left|K_{yn1}\right|b\right)} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right), \\
 H_{z1mn}(x, y) &= j \frac{K_{yn1}}{K_{\perp mn}^2} b_{21n} \beta_{mn} \frac{ch\left(\left|K_{yn1}\right|(b-y)\right)}{ch\left(\left|K_{yn1}\right|b\right)} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right).
 \end{aligned} \tag{19}$$

Как следует из соотношений (14)-(19), зависимости тангенциальных поверхности раздела сред составляющих векторов напряженности электрического и магнитного поля от координаты Y для быстрых и медленных волн Е и Н-типа идентичны между собой, что подтверждает идентичность физического процесса изменения структуры ЭМ поля при переходе быстрой волны в медленную при уменьшении рабочей длины волны. При этом ЭМ поле в менее плотной среде стягивается к поверхности более плотной среды, что приводит к уменьшению ЭМ энергии, переносимой волной в воздушной среде, и увеличению данной энергии в диэлектрической пластине при заданном уровне подводимой в ПрВ СВЧ мощности, что позволяет увеличить $P_{ног}$. Представляет интерес методика расчета длины волны $\lambda_{пер}$ перехода быстрой волны в медленную. В качестве примера рассмотрим расчет $\lambda_{пер}$ для волны H_{01} .

Подставляя условие перехода быстрой волны в медленную $\frac{\omega}{c} = \beta_{mn}$ в первое соотношение системы (9), получим $K_{yn1} = 0$.

Представим дисперсионное уравнение (8) в удобном для последующего анализа виде:

$$\xi \operatorname{tg} \xi = -\frac{1}{\varepsilon_2'} \cdot \vartheta_0 \cdot \eta \cdot \operatorname{tg} \eta, \tag{20}$$

$$\vartheta_0 \frac{\operatorname{tg} \xi}{\xi} = -\frac{\operatorname{tg} \eta}{\eta},$$

где $\xi = K_{yn1}(b-d)$; $\eta = K_{yn2}d$; $\vartheta_0 = \frac{b-d}{d}$.

Подставляя значение $K_{yn1} = 0$, то есть $\xi = 0$ и учитывая, что $\operatorname{tg} \xi / \xi |_{\xi=0} = 1$, получим

$$\vartheta_0 = -\frac{\operatorname{tg} \eta}{\eta}. \tag{21}$$

Рассмотрим наиболее востребованный на частоте $\nu = 2450$ МГц, ПрВ сечением 45×90 мм, на нижней стенке которого расположена диэлектрическая пластина толщиной $d = 10$ мм. Для данного волновода $\vartheta_0 = 3,5$. Подставляя данное значение в дисперсионное уравнение и учитывая, что левая часть представляет собой табулированную функцию, получаем $\eta = 1,734$, то есть $K_{yn2} = 17,31$ 1/см. Вычитая из второго уравнения системы (10) первое уравнение и учитывая, что $K_{yn1} = 0$, получим соотношение, определяющее $(\lambda_{nep})_{0n}$ Н-типов волн:

$$(\lambda_{nep})_{mn} = \frac{2\pi}{(K_{yn2})_0} \cdot \sqrt{(\varepsilon'_2 - 1)}. \quad (22)$$

Из соотношения (22) следует, что в воздушной среде, заполняющей весь внутренний объем ПрВ, замедления волн не происходит. С увеличением ε'_2 величина λ_{nep} возрастает. Для практического использования эффекта стягивания ЭМ поля к поверхности более плотной среды необходимо, чтобы λ_{nep} находилась в доминантном диапазоне волн:

$$\lambda_{кр0} \leq \lambda_{nep} \leq \lambda_{кр1}, \quad (23)$$

где $\lambda_{кр0}$, $\lambda_{кр1}$ – критические длины волн основного и первого высшего H_{0n} -типа волн. При неизменности электрофизических параметров нагреваемого диэлектрического материала (разогрев продукта в микроволновых печах) рабочая длина волны должна располагаться в диапазоне:

$$\lambda_{nep} \leq \lambda \leq \lambda_{кр1}. \quad (24)$$

Определим длину волны перехода быстрой волны в медленную λ_{nep} для произвольной волны ПрВ с двухслойным пластинчатым диэлектрическим заполнением. Для этого вычтем из второго уравнения системы (10) первое уравнение и получим

$$\left(\left(\frac{2\pi}{\lambda_{nep}} \right)_{mn} \right)^2 \cdot (\varepsilon'_2 - 1) = K_{yn2}^2 + K_{yn1}^2. \quad (25)$$

Учитывая, что при переходе быстрой волны в медленную $K_{yn1}^2 = \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2$,

получим выражение для $(\lambda_{nep})_{mn}$:

$$(\lambda_{nep})_{mn} = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{(\varepsilon'_2 - 1)}{K_{yn2}^2 + \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2}}. \quad (26)$$

Соотношение (20) справедливо для Е и Н-типов волн, при этом волновое число K_{yn2} для Е-типов волн определяется первым уравнением системы (13), и для Н-типов волн – вторым уравнением, которые для удобства последующего анализа по аналогии с системой уравнений (20) целесообразно представить в виде

$$\begin{aligned} \eta \cdot \operatorname{tg} \eta &= \frac{\varepsilon'_2}{\vartheta_0} \cdot |\xi| \cdot \operatorname{th} |\xi|; \text{ для Е – типов волн,} \\ \frac{\operatorname{th} \eta}{\eta} &= -\vartheta_0 \cdot \frac{\operatorname{tg} |\xi|}{|\xi|}; \text{ для Н – типов волн.} \end{aligned} \quad (27)$$

Особенностью системы уравнений (27) при расчете длины волны перехода быстрой волны в медленную является постоянство правой части уравнений для заданного типа волны, размеров поперечного сечения ПрВ, диэлектрической проницаемости и толщины прямоугольной пластины, что упрощает определение $(\lambda_{nep})_{mn}$.

На рис. 2 приведены кривые зависимости волнового числа K_{yn2} , которые, согласно соотношению (26), однозначно определяют длину волны перехода быстрой волны $\left(\beta c / \omega < 1 \right)$ в медленную для волн Н-типа в ПрВ сечением $4,5 \times 9,0$ см с диэлектрической пластиной, расположенной в Н-плоскости на нижней широкой стенке волновода. Характерной особенностью данных кривых является то, что при $d = 0$ (полый волновод) они сходятся в одной точке $K_{yn2} = \infty$, при этом, согласно соотношению (26), $(\lambda_{nep})_{mn} = 0$. Это означает, что в полном ПрВ не наблюдается трансформация ЭМ поля. При $d = b$, так же как и при $d = 0$ все кривые $K_{yn2}(d)$ для различных H_{mn} типов волн сходятся в одной точке $K_{yn2} = \pi/b$. Как следует из кри-

вых, приведенных на рис. 3, $(\lambda_{пер})_{mn}(d)$ при $d = b$ происходит переход быстрой волны в медленную, но при этом структура ЭМ не меняется. Это свойство полно-

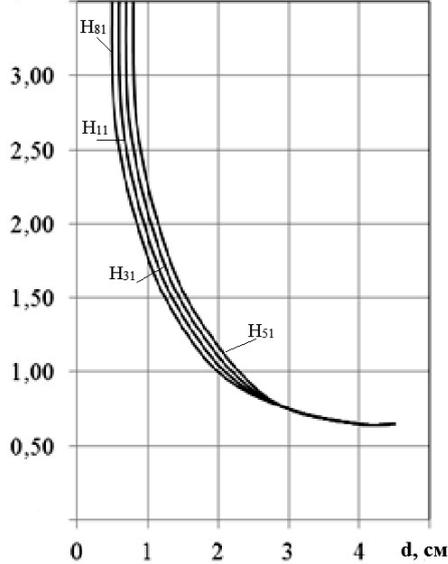


Рис. 2. Зависимость волнового числа K_{yn2} от толщины пластины d для Н-типов волн ПрВ поперечного сечения $4,5 \times 9,0$ см

стью заполненного диэлектрическим материалом волновода [5].

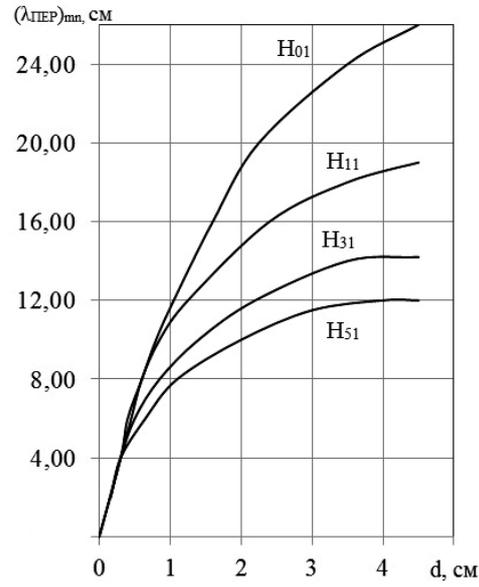


Рис. 3. Зависимость длины волны перехода быстрой волны Н-типа в медленную от толщины пластины. ПрВ $4,5 \times 9,0$ см; $\epsilon'_2 = 9$

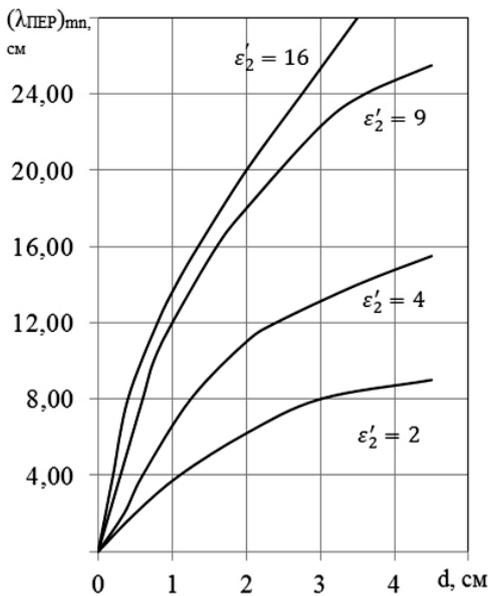


Рис. 4. Зависимость $\lambda_{пер}(d)$ H_{01} типа волны для различных ϵ'_2 прямоугольной пластины. ПрВ $4,5 \times 9,0$ см

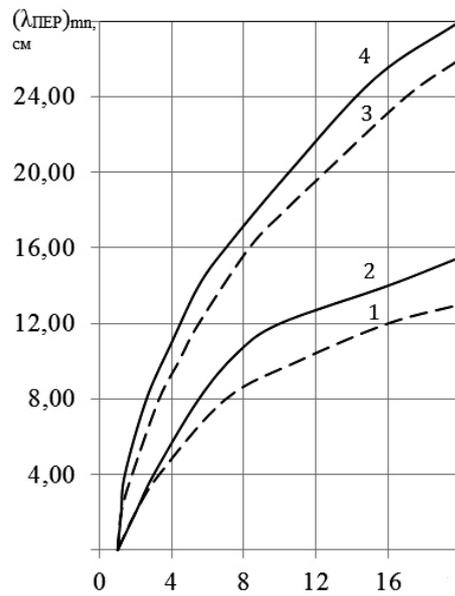


Рис. 5. Зависимость $(\lambda_{пер})_{mn}(\epsilon'_2)$ Н-типов волн для ПрВ $4,5 \times 9,0$ см с диэлектрической пластиной толщиной $d = 1,0$ см (кривые 1, 2) и $d = 2$ (кривые 3, 4). Сплошные кривые – H_{01} , пунктирные – H_{11} тип волны

Кроме того, с увеличением волнового числа $K_{xm} = \frac{m\pi}{a}$, (то есть числа m) величина $(\lambda_{пер})_{m1}$ уменьшается, что связано с увеличением знаменателя в соотношении (26).

С увеличением толщины пластины d (рис. 3-5) и относительной диэлектрической проницаемости ϵ'_2 величина $(\lambda_{пер})_{m1}$ возрастает. Приведенные на рис. 2-5 результаты определяют возможность интенсификации СВЧ термообработки кон-

кретного листового материала в СВЧ устройствах конвейерного типа посредством обеспечения в ПрВ режима распространения медленной волной основного типа, при этом условием термообработки в ЭМ поле медленной волны является $\lambda_{кр1} \leq (\lambda_{пер})_o$, где λ – рабочая длина волны; $\lambda_{кр1}$ – критическая длина волны первого высшего типа; $(\lambda_{пер})_o$ – длина волны перехода быстрой волны в медленную волну основного типа.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Баринов Д.А.** Собственные электродинамические параметры прямоугольного волновода с двухслойным диэлектрическим заполнением / Д.А. Баринов // Вопросы электротехнологии. 2016. № 2 (11). С. 46-57.

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

3. **Вайнштейн Л.А.** Электромагнитные волны / Л.А. Вайнштейн М.: Радио и связь, 1988. 440 с.

4. Определение спектра собственных резонансных частот и структуры электромагнитного поля прямоугольного резонатора с частичным диэлектрическим заполнением / В.А. Коломейцев, П.В. Ковряков, И.И. Салимов, В.А. Лойко // Успехи современной радиоэлектроники. 2015. № 6. С. 68-88.

5. **Красюк Н.П.** Электродинамика и распространение радиоволн / Н.П. Красюк, Н.Д. Дымович М.: Наука, 1970. 720 с.

Баринов Дмитрий Анатольевич – заместитель директора АО «НПЦ «Алмаз-Фазотрон»

Ковряков Павел Валерьевич – соискатель ученой степени кандидата технических наук кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Коломейцев Вячеслав Александрович – заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор

Кузьмин Юрий Александрович – начальник отдела АО «НПЦ «Алмаз-Фазотрон»

Dmitry A. Barinov – Deputy Director of JSC «SPC «Almaz-Fazotron»

Pavel V. Kovryakov – Applicant for the degree PhD, Department of Radioelectronics and telecommunications Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Vyacheslav A. Kolomeitsev – Honored scientist of the Russian Federation, doctor of technical Sciences, Professor

Yuri A. Kuzmin – Head of Department JSC «SPC «Almaz-Fazotron»

Статья поступила в редакцию 30.09.19, принята к опубликованию 15.11.19

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.78

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ОБМАЗОЧНОГО СЛОЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ 12X18H10T ПОСЛЕ ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ

В.И. Проскуряков, И.В. Родионов, Е.Л. Сурменко, Т.Н. Соколова

INFLUENCE OF THE COMPOSITION OF THE COATING LAYER ON THE SURFACE CHARACTERISTICS OF STEEL 12X18H10T AFTER LASER PULSE ALLOYING

V.I. Proskuryakov, I.V. Rodionov, E.L. Surmenko, T.N. Sokolova

Представлены результаты исследования процесса лазерного легирования нержавеющей хромоникелевой стали 12X18H10T в слое модифицирующей обмазки. Рассмотрено влияние обмазочного слоя на физико-механические характеристики и элементный состав поверхности стали после лазерной обработки. Установлено, что для упрочнения поверхности нержавеющей стали целесообразно использовать обмазку, состоящую из графитовой пасты или из графитовой пасты и порошка наночастиц анатаза TiO_2 . Лазерное легирование поверхности с используемыми составами обмазок позволяет формировать на стали упрочненный модифицированный слой толщиной до 70 мкм, с величиной твердости 3.33 ± 0.1 и 3.15 ± 0.1 ГПа соответственно при суммарной пористости до 37 %.

Ключевые слова: *нержавеющая хромоникелевая сталь, лазерное легирование, морфология, микротвердость*

Благодаря повышенной коррозионной стойкости, а также доступности нержавеющей хромоникелевые стали нашли широкое применение в машиностроении, авиастроении, медицинской технике и других отраслях промышленности как в России, так и за рубежом [1-3]. Однако зача-

The results of a study of the process of laser alloying of 12X18H10T stainless chromium-Nickel steel in a layer of modifying coating are presented. The influence of the coating layer on the physical and mechanical characteristics and elemental composition of the steel surface after laser treatment is considered. It was found that it is advisable to use a coating consisting of graphite paste or graphite paste and TiO_2 nanoparticle powder to harden the surface of stainless steel. Laser alloying of the surface with the used coating compositions allows forming a hardened modified layer with a thickness of up to 70 microns on the steel, with a hardness value of 3.33 ± 0.1 and 3.15 ± 0.1 GPa, respectively, with a total porosity of up to 37 %.

Keywords: *stainless chromium-Nickel steel, laser alloying, morphology, microhardness*

стью изделия из данных сталей, работающие под воздействием различных агрессивных сред или в условиях контактного трения, могут подвергаться преждевременному износу. В этой связи возникает потребность в продлении срока службы и увеличении функциональной надежности

таких изделий при эксплуатации. Зачастую для повышения эксплуатационных характеристик достаточно поверхностного упрочнения металлических изделий [4].

Сегодня известно множество технологий поверхностного упрочнения, однако наиболее актуальной является технология лазерной модификации материалов [5-7]. Лазерная обработка характеризуется возможностью формирования высокотвердой, следовательно, механически прочной поверхности. Благодаря своей относительной простоте реализации широкое распространение получил метод лазерного легирования с заранее подготовленной поверхностью [8]. Подготовка предусматривает нанесение на материал обмазки определенного компонентного состава, от которого зависит комплекс получаемых свойств. Данный способ требует создания предварительной шероховатости поверхности для обеспечения надежной адгезии обмазки. Следует отметить, что легирование пастами имеет определенные недостатки, а именно возможность трещинообразования, возникающую за счет появления больших внутренних напряжений и вероятность повышения пористости за счет выделения газов при выгорании различных неметаллических включений, входящих в элементный состав легирующей обмазки.

Известен перечень химических элементов и соединений, применяемых для легирования стали 12X18H10T. Так, для увеличения твердости и износостойкости, а также для уменьшения склонности к межкристаллитной коррозии в состав хромоникелевых сплавов вводят титан и ниобий. Однако на сегодняшний день нет промышленно изготавливаемых обмазок [9, 10].

Цель работы заключается в исследовании влияния обмазочного слоя, состоящего из графитовой пасты и наночастиц порошка анатаза TiO_2 , на морфологию, микротвердость и элементный состав поверхности нержавеющей хромоникелевой стали 12X18H10T.

В качестве экспериментальных образцов использовали пластины размером $10 \times 10 \times 3 \text{ мм}^2$ из нержавеющей хромонике-

левой стали марки 12X18H10T. Модифицируемая поверхность подвергалась предварительной абразивно-струйной обработке (АСО) при давлении воздуха 0,4-0,5 МПа частицами порошка электрокорунда дисперсностью 200-250 мкм и последующей очистке от технологических загрязнений методом ультразвуковой обработки с использованием ультразвуковой ванны «Кристалл-2.5» в водных растворах поверхностно-активных веществ и этилового спирта в течение 20 минут.

В исследованиях были использованы пять способов нанесения легирующей обмазки, в том числе при различном соотношении компонентов:

– слой графитовой пасты (ГОСТ 8295-73) толщиной 100-150 мкм;

– слой порошка диоксида титана (анатаза) дисперсностью менее 25 мкм толщиной 100 ± 20 мкм, равномерно распределенный на поверхности стали путем прессования при давлении 250 МПа;

– смешанные до образования однородной массы графитовая паста и порошок диоксида титана при соотношении порошок – паста 1:1;

– смешанные до образования однородной массы графитовая паста и порошок диоксида титана при соотношении порошок – паста 1:4;

– смешанные до образования однородной массы графитовая паста и порошок диоксида титана при соотношении порошок – паста 4:1.

Также для сравнительного анализа была проведена лазерная модификация поверхности образца без легирующей обмазки.

Лазерная обработка осуществлялась с использованием автоматизированной установки для термофизической когерентной модификации поверхности LRS-50A при напряжении импульса $U = 300 \text{ В}$. Длительность τ импульсного воздействия составляла 0,5 мс. Луч фокусировался в пятно диаметром 1 мм. Сканирование поверхности осуществлялось при частоте следования импульсов 15 Гц с шагом 0,2 мм.

Морфология поверхности исследовалась с использованием оптической систе-

мы микротвердомера ПМТ-3М. Анализ морфологии проводили согласно известной методики по изображениям участков поверхности площадью $0,55 \text{ мм}^2$ с использованием программного комплекса Metallograf [11].

Элементный состав модифицируемого слоя исследовался методом лазерного эмиссионного микроспектрального анализа с использованием установки «Спектр-2000».

Микротвердость измерялась с использованием твердомера ПМТ-3М с индентором Виккерса при нагрузке на индентор 1.961 Н (ISO 6507-1:2005).

Морфология поверхности стали 12X18H10T после лазерной модификации в зависимости от легирующего компонентного состава имеет существенные различия. Получить равномерно распределенную структуру поверхностного слоя удалось на образцах, где в качестве легирующего компонента была нанесена графитовая паста и обмазка из графитовой пасты и наночастиц порошка анатаза при соотношении порошок-паста 1:4 (рис. 1). На образцах стали, обмазку которых подготавливали способами № 2-4, визуализируется оплавление и хаотичность кристаллизовавшихся поверхностных частиц (рис. 2).

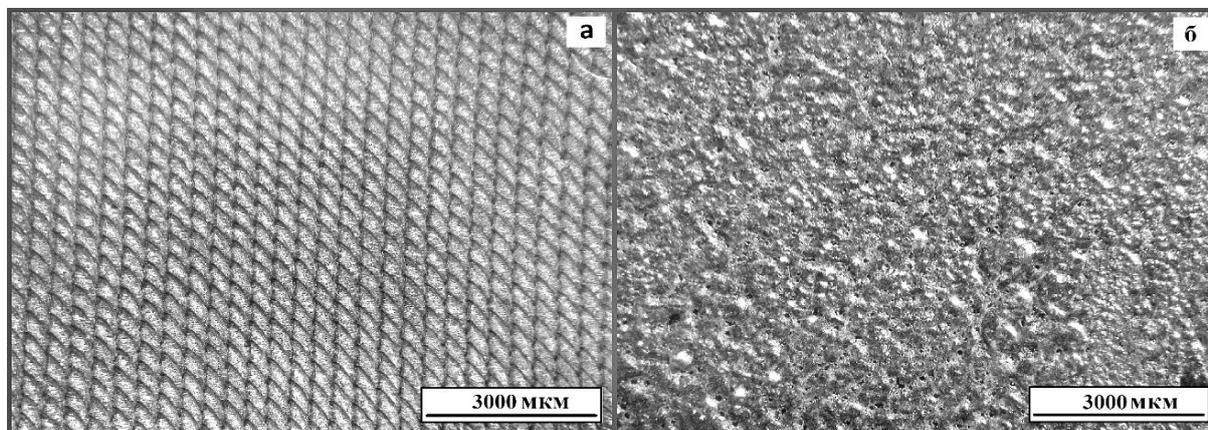


Рис. 1. Морфология стали 12X18H10T после лазерного легирования поверхности с различными обмазками: *а* – графитовая паста; *б* – паста + порошок 4:1

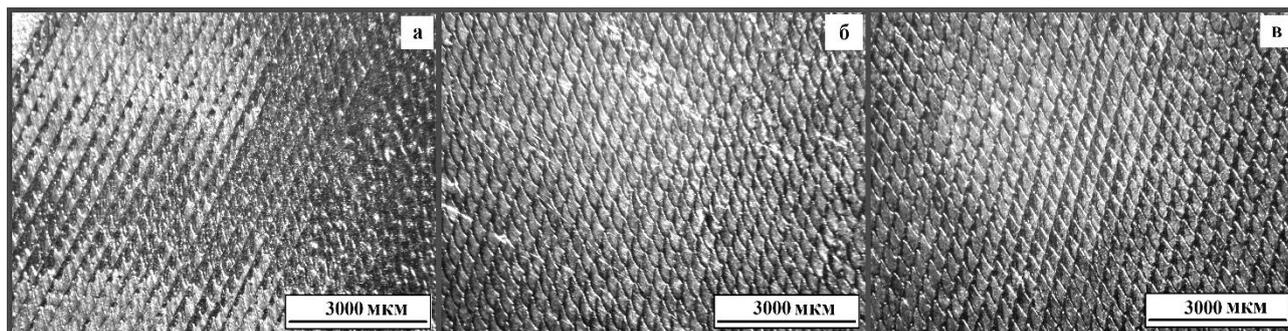


Рис. 2. Морфология стали 12X18H10T после лазерного легирования поверхности с различными обмазками: *а* – порошок; *б* – паста + порошок 1:1; *в* – паста + порошок 1:4

В ходе исследований были обнаружены изменения значений суммарной открытой пористости. Выявлено, что легирование стали порошком диоксида титана приводит к повышению пористости до 37-39%. При этом значение пористости образцов, обработанных без использования легирующей об-

мазки при тех же параметрах работы лазерной установки, составляет 28%. Согласно данным гранулометрического анализа установлено, что в результате лазерной обработки компонентный состав легирующей обмазки оказывает существенное влияние на размер и количество пор и зерен (табл. 1).

Результаты гранулометрического анализа поверхности стали 12X18H10T
после лазерного легирования

Состав обмазки	Характеристики поверхности стали						
	Зерна			Поры			
	кол-во, шт.	среднее значение, мкм	диспер- сия, мкм ²	кол-во, шт.	среднее значение, мкм	диспер- сия, мкм ²	суммар- ная пори- стость, %
Графитовая паста	2137	6,66	15,02	1131	8,82	20,98	29
Порошок	2036	7,09	11,81	492	8,70	21,87	37
Паста + порошок 1:1	2748	6,15	10,44	746	9,08	26,25	39
Паста + порошок 1:4	3474	4,99	8,34	113	12,36	60,12	32
Паста + порошок 4:1	2666	6,50	6,37	242	6,76	29,37	37
Без обмазки	628	7,93	19,27	2295	7,19	6,29	28

Согласно проведенному анализу измерения микротвердости установлено, что в результате лазерного легирования на увеличение данного показателя в большей степени оказывает влияние присутствие в обмазке графитовой пасты (табл. 2). Это

объясняется наличием в ней высокого содержания углерода, приводящего к образованию в поверхностном слое стали карбидных фаз, вызывающих развитие закалочных структур.

Таблица 2

Результаты среднестатистических значений микротвердости поверхности
стали 12X18H10T в результате лазерного легирования

Номер образца	Состав обмазки	Микротвердость Н, ГПа
1	Графитовая паста	3,33
2	Порошок	2,80
3	Паста + порошок (1:1)	2,24
4	Паста + порошок (1:4)	2,65
5	Паста + порошок (4:1)	3,15
6	Без обмазки	2,67

Для определения содержания диоксида титана в поверхностном слое образцов № 2-5 был использован метод лазерного микроспектрального анализа. Применён метод трёх проботборов с последовательным заглублением на ориентировочную глубину 35, 45, 50 мкм.

Исследование элементного состава поверхности показало, что самое интенсивное и глубокое внедрение анатаза происходит

на образце, где в качестве легирующего компонента выступает исключительно порошок диоксида титана (анатаз). На данном образце диоксид TiO₂ в массовом количестве свыше 3 % проникает на глубину более 70 мкм, однако распределяется неравномерно. Минимальное количество диффундирующего элемента 1,16 % было получено на образце, где соотношение ле-

гирующих компонентов, а именно графитовой пасты и порошка, 1:1. Глубина проникновения здесь составляет не более 45 мкм. У образцов № 4, 5 внедрение диоксида титана в структуру поверхности среднее по интенсивности и глубине (более 2 %, до 45 мкм). Однако стоит отметить, что образец № 5 отличается более равномерным внедрением и распределением анатаза в модифицированном поверхностном слое образцов.

Установлено, что импульсное лазерное легирование с использованием обмазочных паст является эффективным и легко реализуемым способом модификации поверхности нержавеющей хромоникелевой стали 12Х18Н10Т.

Равномерно распределенная структура поверхности формируется на образцах, где в качестве легирующего компонента выступает графитовая паста или смесь, в которой паста находится в большем соотношении с порошком диоксида TiO_2 .

Наиболее высокие значения микротвердости 3.33 и 3.15 ГПа были получены на образцах № 1 и 5, что объясняется наличием в легирующей обмазке высокого содержания углерода.

Исследования выполнены в рамках гранта РФФИ (конкурс на лучшие проекты фундаментальных научных исследований, выполняемые молодыми учеными, обучающимися в аспирантуре – «Аспиранты»), проект № 19-33-90101.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бердникова Г.Г.** Влияние хлорид-ионов на коррозионную стойкость нержавеющей хромоникелевой стали в разбавленных серноокислых растворах / Г.Г. Бердникова, М.П. Михеева // Вестник Тамбовского университета. Сер. Естественные и технические науки. 2014. Т. 19. № 1. С. 149-152.

2. **Молодец А.М.** Температурная зависимость откольной прочности и уравнение состояния аустенитной хромоникелевой стали 18-10 / А.М. Молодец // Физика твердого тела. 2015. Т. 57. № 10. С. 1992-1997.

3. Исследования по технологии изготовления высокобористой аустенитной стали для элементов нейтронной защиты / А.П. Чуканов, Б.В. Сафронов, Б.Ф. Миняйло и др. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Материаловедение и новые материалы. 2013. № 2. С. 67-80.

4. **Родионов И.В.** Применение процессов термического оксидирования для упрочнения поверхности стали 12Х18Н9Т / И.В. Родионов, А.А. Фомин, А.Н. Ромашин // Технология металлов. 2013. № 10. С. 24-32.

5. **Зюзин Д.М.** Повышение износостойкости нержавеющей стали путем высокотемпературного азотирования / Д.М. Зюзин, Л.Г. Петрова // Вестник Московского авто-

мобильно-дорожного института (государственного технического университета). 2004. № 2. С. 30-36.

6. Упрочнение и повышение качества поверхности деталей из аустенитной нержавеющей стали алмазным выглаживанием на токарно-фрезерном центре / В.П. Кузнецов, А.В. Макаров, А.Л. Осинцева и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2011. № 11. С. 16-26.

7. Влияние предварительной деформационной обработки на упрочнение и качество азотированной поверхности аустенитной нержавеющей стали / А.В. Макаров, Г.В. Самойлова, А.С. Мамаев и др. // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2017. № 4. С. 67-74.

8. **Грязнов М.Ю.** Эффект мезоструктурного упрочнения стали 316L при послойном лазерном сплавлении / М.Ю. Грязнов, С.В. Шотин, В.Н. Чувильдеев // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2012. № 5 (1). С. 43-50.

9. **Ким В.А.** Локальное лазерное легирование нержавеющей стали 12Х18Н10Т / В.А. Ким, О.В. Башков, И.В. Сатаева // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2016. Т. 1. № 2. С. 64-70.

10. **Григорьев С.Н.** Моделирование термокапиллярной конвекции расплава с дисперсной примесью при лазерном поверхностном упрочнении материалов / С.Н. Григорьев, А.М. Гурин, О.Б. Ковалёв //

Металлофизика и новейшие технологии. 2013. № 35 (7). С. 965-980.

11. Surface morphology of zirconium after treatment with high-frequency currents / M. Fomina, A. Voyko, I. Rodionov et al. // Composite Structures. 2018. 202. P. 210-215.

Проскуряков Виталий Игоревич – ассистент кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Vitaly I. Proskuryakov – Assistant of the Department of welding and metallurgy Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Родионов Игорь Владимирович – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Igor V. Rodionov – Dr. Sc., head of the Department of Welding and metallurgy Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Сурменко Елена Львовна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Elena L. Surmenko – Ph.D., Associate Professor, Department of Welding and metallurgy Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Соколова Татьяна Николаевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Tatyana N. Sokolova – Ph.D., Associate Professor, Department of Welding and metallurgy Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 25.10.19, принята к опубликованию 15.11.19

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.

ИЗМЕРЕНИЯ

УДК 621.396.96

АЛГОРИТМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ КООРДИНАТ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

У.Р. Наимов, С.Н. Данилов

ALGORITHM FOR FUNCTIONING OF INFORMATION-MEASURING SYSTEM FOR ASSESSING COORDINATES OF UNMANNED AERIAL VEHICLES

U.R. Naimov, S.N. Danilov

Распространение использования беспилотных воздушных систем поставило множество проблем – от того, как обеспечить надежное слежение за беспилотным воздушным объектом, до того, как организовать и представить данные этого слежения. Концепции построения перспективных радиолокационных систем показывают, что это будут комплексы интегрального типа. Создание таких комплексов предполагает наличие в их составе информационной системы, состоящей из каналов, которые производят функционально завершённую процедуру обработки сигналов и информации в интересах решения конкретной задачи. Повышение качества обработки сигналов и информации (точности, помехоустойчивости, надёжности, целостности) в информационной системе возможно по двум взаимодополняющим направлениям. Первое – это совершенствование устройств и систем, входящих в состав радиоэлектронного комплекса, а также введение в его состав новых, имеющих более высокие характеристики качества функционирования. Второе – это разработка соответствующего алгоритмического обеспечения.

Ключевые слова: *фильтр, информационная система, маневр, функционирование, слежение, маневренность*

The widespread use of unmanned aerial systems (UAV) in civilian and military operations posed many problems: from how to ensure reliable tracking of an unmanned aerial object, before organizing and presenting data in a meaningful way. The concepts for constructing promising radar systems (radar) show that these will be complexes of the integral type. The creation of such complexes implies the presence in their composition of an information system consisting of channels that produce a functionally completed procedure for processing signals and information in the interest of solving a specific problem. Improving the quality of signal and information processing (accuracy, noise immunity, reliability, integrity) in the information system is possible in two mutually complementary directions. The first is the improvement of the devices and systems that make up the electronic complex, as well as the introduction of new ones with higher performance characteristics. The second is the development of appropriate algorithmic support.

Keywords: *filter, information system, maneuver, functioning, tracking, maneuverability*

Необходимо иметь автоматическую систему слежения за воздушным объектом, состоящую из нескольких подсистем с различными структурами, назначение которых состоит в обеспечении работы в различных режимах при наличии естественных и организованных помех, возможных нарушений регулярного процесса сопровождения, резкого изменения поведения параметров сигнала вследствие непредвиденных причин.

Необходимость прогнозирования и отслеживания траектории движения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), требует решать задачу бессрывного высокоточного измерения их координат, в том числе и в условиях помех. Это возможно путем применения адаптивных следящих измерителей, в которых в зависимости от ситуации могут изменяться как структура систем, так и параметры следящих фильтров [1, 2].

Характерными особенностями указанной задачи и соответствующих следящих систем являются структурная неопределенность (необходимость смены структуры в случайные моменты времени) и стохастичность процессов в них. Обе эти особенности являются объективными характеристиками процесса функционирования сложных динамических систем, получивших название стохастических систем со сменой структуры в случайные моменты времени.

Пусть система слежения подвергается воздействию двух типов дестабилизирующих факторов: относительно медленных изменений отслеживаемых параметров и быстрых изменений [3].

Задачей анализа переходных процессов является получение алгоритмов функционирования следящих систем, оптимальных в том или ином смысле. В общем случае оптимальными являются алгоритмы, обеспечивающие высокую точность и устойчивость следящих систем, а также их низкую чувствительность к изменению условий функционирования при наличии неопределенности в поведении динамической системы (ДС) [4].

В настоящее время при вторичной обработке радиолокационной информации ши-

рокое применение получают оптимальные алгоритмы оценивания, базирующиеся на дифференциальных или разностных уравнениях, полученных на основе методов фильтрации.

При отслеживании маневренного БПЛА наилучшими являются алгоритмы, обеспечивающие высокую точность оценивания параметров относительного движения БПЛА и устойчивость к срыву слежения, а также имеющие низкую чувствительность к изменению условий функционирования при наличии неопределенности в поведении ДС.

Исходные модели выбираются в соответствии с задачами, решаемыми системами слежения и возможностями современных цифровых вычислительных машин (ЦВМ) с точки зрения скорости и объема памяти. Модель состояния для каждого маршрута должна обеспечивать оптимальную оценку всех необходимых фазовых координат для современных и перспективных методов наведения и выдачи команд для БПЛА [5].

Как отмечалось в [6], характерной особенностью существующих измерителей является низкий порядок устойчивости следящей системы и одноконтурный принцип ее построения, при котором чувствительный дискриминатор, пеленгатор, формирователь оценок и исполнительное устройство составляют единый контур. В такой системе слежения требования к точности, скорости и устойчивости противоречат друг другу. Следовательно, невозможно одновременно обеспечить высокую точность, скорость и надежность отслеживания на достаточном интервале времени особенно при интенсивном изменении координат БПЛА.

Если БПЛА совершает маневр, в ходе которого возникают производные отслеживаемых координат, порядок которых превышает порядок астатизма следящей системы, то это приводит к нарастанию динамических ошибок сопровождения. В результате при длительном маневре неизбежным будет нарушение отслеживания, а соответственно и срыв наведения. Снижение влияния маневра цели за счет

повышения усиления в контурных измерителях приводит к существенному снижению запаса устойчивости.

В связи с отмеченными особенностями существующих следящих измерителей решение задачи эффективного сопровождения беспилотников, особенно обладающих сверхманевренными свойствами, становится весьма проблематичным.

В техническом плане сверхманевренные БПЛА предъявляют существенно более жесткие требования к точности, быстродействию и устойчивости их сопровождения систем слежения как при слежении за одиночными целями, так и при одновременном сопровождении нескольких объектов.

Качественное улучшение маневренных свойств БПЛА дает возможность получения таких маневров, которые позволяют как ухудшать показатели систем сопровождения, реализуя так называемые алгоритмические воздействия, так и улучшать показатели своих радиолокационных систем наблюдения, содействуя системе траекторного управления наблюдением самого БПЛА.

Примером первого направления является целенаправленное выполнение маневра, при котором достаточно сильно проявляется третья и более высокие производные изменения дальности, скорости и угловых координат, приводящие к срыву сопровождения. Выполнение таких маневров, существенно расширяющих возможности уклонения от управляемых средств поражения, невозможно без алгоритмов оценивания в РЛС относительных ускорений и их производных. Возможность сброса скорости до околонулевых значений и зависание в воздухе также приводит к срыву сопровождения сверхманевренных БПЛА импульсно-доплеровскими РЛС противоборствующей стороны.

При решении задач сопровождения интенсивно маневрирующих воздушных целей модели состояния должны учитывать интенсивные изменения координаты в дальномерном канале, пеленгов в азимутальной и угломерной плоскости φ_r и φ_b , соответственно, угловой скорости линии визирования в угломерном канале. Использо-

вание скоростей обусловлено необходимостью учета маневров цели в процессе слежения. Например, выполнение такого маневра, при котором становятся существенными третьи и более высокие производные координат значительно расширяет возможности сопровождения цели.

Рассмотрим кинематические уравнения для метода наведения в наивыгоднейшую упрежденную точку. Для упрощения, рассмотрим эти уравнения только для горизонтальной плоскости. Геометрия взаимного перемещения БПЛА и РЛС в этой плоскости показана на рис. 1.

На основании этого рисунка можно получить следующее выражение:

$$\varphi = \varepsilon - \psi, \quad (1)$$

где φ – пеленг БПЛА; ε – угловое положение линии визирования; ψ – курсовой угол РЛС.

Из выражения (1) следует, что

$$\dot{\varphi} = \omega_\varphi = \omega, \quad (2)$$

где ω_φ – угловая скорость изменения угла пеленга, $\omega = \dot{\varepsilon}$ – угловая скорость линии визирования.

При этом относительное движение БПЛА и РЛС определяется следующим уравнением кинематики [7]:

$$\dot{\omega} = -\frac{2 \cdot V_{CB}}{D} \cdot \omega, \quad (3)$$

где D – дальность до цели; V_{CB} – скорость сближения.

С учетом выражений (2) и (3) получим детерминированную часть модели состояния:

$$\begin{aligned} \dot{\varphi} &= \omega, \\ \dot{\omega} &= -\frac{2 \cdot V_{CB}}{D}. \end{aligned} \quad (4)$$

В дискретной форме она будет иметь вид

$$\varphi(k+1) = \varphi(k) + \omega(k) \cdot T,$$

$$\omega(k+1) = \left(1 - \frac{2 \cdot V_{CB}(k)}{D(k)} \cdot T\right) \cdot \omega(k). \quad (5)$$

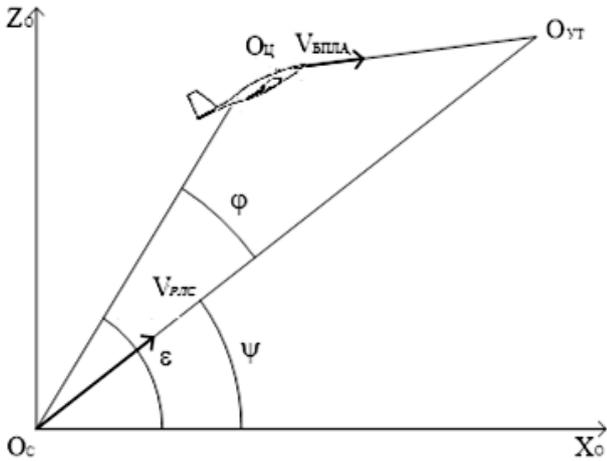


Рис. 1. Перемещения БПЛА и РЛС

В матричной форме с учетом случайных воздействий модель состояния будет иметь вид

$$x(k+1) = \Phi^{(i)}(k) \cdot x(k) + \xi^{(i)}(k), \quad (6)$$

$$\Phi^{(i)}(k) = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & \left(1 - \frac{2 \cdot V_{CB}(k)}{D(k)} \cdot T\right) \end{bmatrix},$$

где $x(k)$ – m -мерный вектор фазовых координат; $\xi^{(i)}(k)$ – последовательности стати-

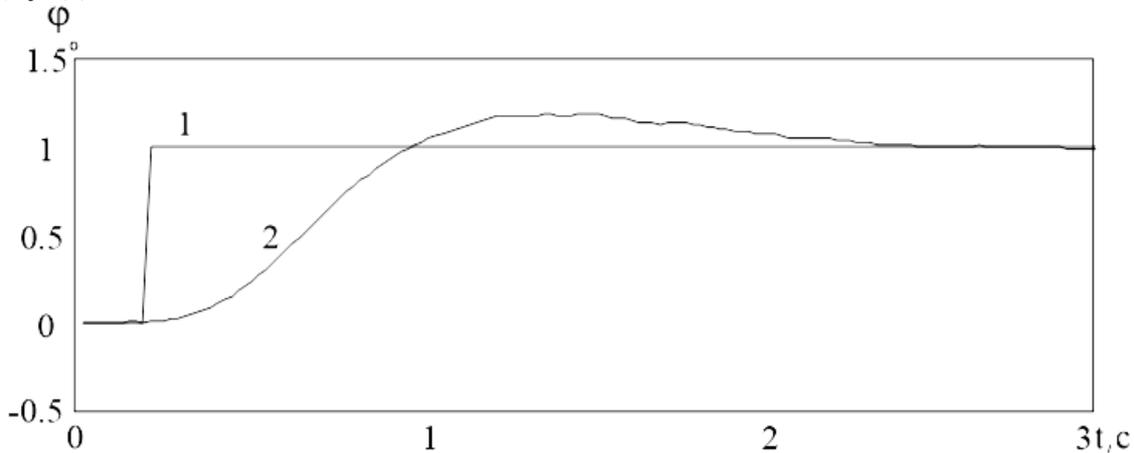


Рис. 2. Переходная характеристика для основной следящей системы

Из рисунка видно, что при достаточно высокой точности отслеживания наблюдаемого процесса в установившемся режиме скорость обработки быстроменяющегося

стически независимых между собой и во времени случайных величин с гауссовской плотностью вероятности.

Начальные измерители (формирователи наблюдения процесса) должны гарантировать формирование оценок и всех необходимых координат вектора состояния. Обоснованность действия этой гарантии можно проверить на основе критериев наблюдения. Из этой проверки следует, что в любой группе функционально связанных координат, подлежащих оцениванию, должны, как минимум, наблюдаться нулевые производные оцениваемых координат. В нашем случае это пеленги целей в горизонтальной и вертикальной плоскостях, которые измеряются первичными измерителями РЛС.

Недостатком такой модели является, как уже говорилось, невозможность одновременно обеспечить точность и быстроту реагирования на изменение входного сигнала. Это хорошо видно на рис. 2, на котором изображена переходная характеристика такой следящей системы, где кривая 1 – входной сигнал в форме единичного скачка, кривая 2 – оценка входного сигнала, получаемая с помощью вышеописанного фильтра.

входного сигнала невысока. Это приводит к необходимости применения в дополнение к модели (4) быстродействующего фильтра,

который будет обеспечивать быструю обработку резкого изменения входного воздействия возможно и при меньшей точности.

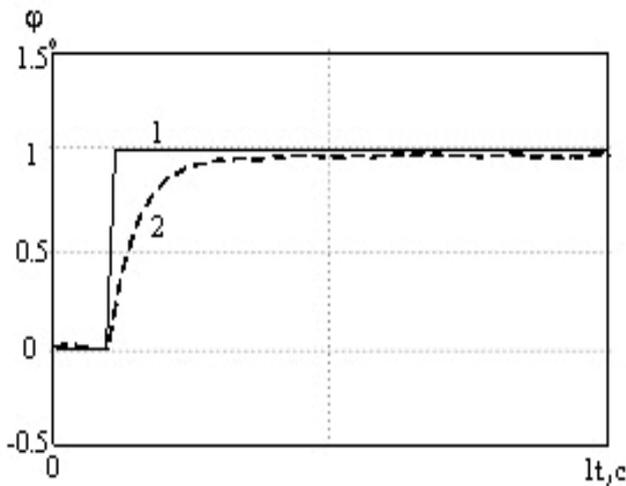
Модель состояния для этого случая имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \dot{\varphi} &= -\hat{\omega}_{\psi} + \xi_j(k), \\ \dot{\omega} &= -\frac{2 \cdot V_{CB}}{D} \cdot \omega. \end{aligned} \quad (7)$$

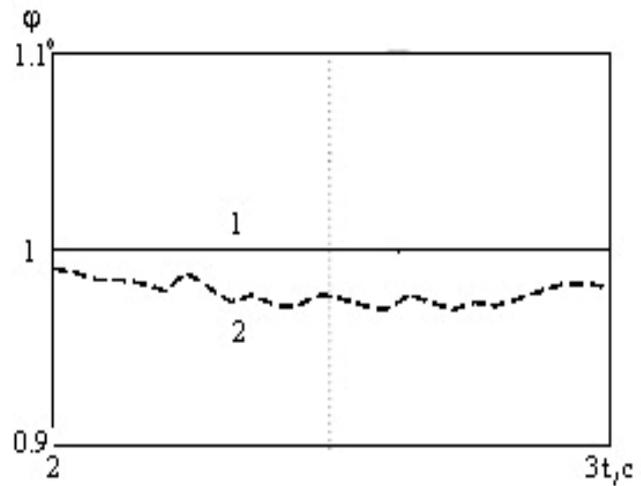
Существенным элементом модели (7) является только первое уравнение, но для формального согласования ее с моделью (4) при синтезе (сохранения размерности 2×1) сохранено второе уравнение.

В дискретной форме модель (7) будет иметь вид

$$\begin{aligned} \varphi(k+1) &= \varphi(k) - \hat{\omega}_{\psi}(k) \cdot T + \xi_j(k), \\ \omega(k+1) &= \left(1 - \frac{2 \cdot V_{CB}(k)}{D(k)} \cdot T\right) \cdot \omega(k). \end{aligned} \quad (8)$$



a



б

Рис. 3. Переходная характеристика для быстродействующей следящей системы

Исходя из вышеизложенного, для синтеза алгоритма функционирования системы автоматического сопровождения интенсивно маневрирующих воздушных целей в режиме обзора выбираем модель, состоящую из двух частей: фильтра, построенного на основе выражения (4), быстродействующе-

В матричной форме модель (7) будет иметь вид

$$x(k+1) = \Phi^{(i)}(k) \cdot x(k) + \xi^{(i)}(k), \quad (9)$$

$$\Phi^{(i)}(k) = \Phi(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \left(1 - \frac{2 \cdot V_{CB}(k)}{D(k)} \cdot T\right) \end{bmatrix}.$$

На рис. 3 а, б изображены переходная характеристика $\varphi(t)$ следящей системы, синтезированной на основе модели (7), где линия 1 – входной сигнал в виде единичного скачка, линия 2 – оценка входного сигнала, получаемая с помощью вышеописанной следящей системы.

Хорошо видно (рис. 3 а), что такая следящая система быстро обрабатывает резкое изменение входного воздействия, но в то же время имеет большую установившуюся ошибку (рис. 3 б).

го фильтра на основе выражения (7). Окончательная оценка отслеживаемого параметра определяется на основе теории систем со случайной структурой. В соответствии с методом синтеза систем со случайной структурой, получен алгоритм функционирования угломерного канала.

Оценки пеленга, угловой скорости линии визирования и нормального ускорения на

выходе фильтра первой модели могут быть получены на основе следующих выражений:

$$\hat{\phi}^{(1)}(k) = \hat{\phi}^{(1)}(k-1) + \hat{\omega}^{(1)}(k-1) \cdot T + K^{(1)}(k-1) \cdot v^{(1)}(k-1), \quad (10)$$

$$\hat{\omega}^{(1)}(k) = \left(1 - \frac{2 \cdot V_{CB}(k-1)}{D(k-1)} \cdot T\right) \cdot \hat{\omega}^{(1)}(k-1) + K^{(1)}(k-1) \cdot v^{(1)}(k-1), \quad (11)$$

соответствующие оценки для фильтра второй модели:

$$\hat{\phi}^{(2)}(k) = \hat{\phi}^{(2)}(k-1) - \hat{\omega}_{\psi}(k-1) \cdot T + K^{(2)}(k-1) \cdot v^{(2)}(k-1), \quad (12)$$

$$\hat{\omega}^{(2)}(k) = \left(1 - \frac{2 \cdot V_{CB}(k-1)}{D(k-1)} \cdot T\right) \cdot \hat{\omega}^{(2)}(k-1) + K^{(2)}(k-1) \cdot v^{(2)}(k-1), \quad (13)$$

где v – невязки, вычисляемые по формулам:

$$v^{(1)}(k) = z(k) - H \cdot \hat{x}^{(1)}(k/k-1), \quad (14)$$

$$v^{(2)}(k) = z(k) - H \cdot \hat{x}^{(2)}(k/k-1). \quad (15)$$

Априорная ковариационная матрица дисперсий ошибок определяется следующим образом:

– для первой модели:

$$P_{11}^{(1)}(k/k-1) = P_{11}^{(1)}(k-1/k-1) + P_{12}^{(1)}(k-1/k-1) \cdot T + P_{21}^{(1)}(k-1/k-1) \cdot T + P_{22}^{(1)}(k-1/k-1) \cdot T^2,$$

$$P_{12}^{(1)}(k/k-1) = \left(P_{12}^{(1)}(k-1/k-1) + P_{22}^{(1)}(k-1/k-1) \cdot T\right) \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot V_{CB}(k-1) \cdot T}{D(k-1)}\right), \quad (16)$$

$$P_{21}^{(1)}(k/k-1) = \left(P_{21}^{(1)}(k-1/k-1) + P_{22}^{(1)}(k-1/k-1) \cdot T\right) \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot V_{CB}(k-1) \cdot T}{D(k-1)}\right),$$

$$P_{22}^{(1)}(k/k-1) = P_{22}^{(1)}(k-1/k-1) \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot V_{CB}(k-1) \cdot T}{D(k-1)}\right)^2;$$

– для второй модели:

$$P_{11}^{(2)}(k/k-1) = P_{11}^{(2)}(k-1/k-1),$$

$$P_{12}^{(2)}(k/k-1) = P_{12}^{(2)}(k-1/k-1) \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot V_{CB}(k-1) \cdot T}{D(k-1)}\right),$$

$$P_{21}^{(2)}(k/k-1) = P_{21}^{(2)}(k-1/k-1) \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot V_{CB}(k-1) \cdot T}{D(k-1)}\right),$$

$$P_{22}^{(2)}(k/k-1) = P_{22}^{(2)}(k-1/k-1) \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot V_{CB}(k-1) \cdot T}{D(k-1)}\right)^2.$$

Далее определяем апостериорную ко-
вариационную матрицу дисперсий

ошибок:
– для первой модели:

$$\begin{aligned} P_{12}^{(1)}(k/k) &= P_{12}^{(1)}(k/k-1) - P_{12}^{(1)}(k/k-1) \cdot K^{(1)}_{11}(k), \\ P_{11}^{(1)}(k/k) &= P_{11}^{(1)}(k/k-1) - P_{11}^{(1)}(k/k-1) \cdot K^{(1)}_{11}(k), \\ P_{21}^{(1)}(k/k) &= P_{21}^{(1)}(k/k-1) - P_{11}^{(1)}(k/k-1) \cdot K^{(1)}_{21}(k), \\ P_{22}^{(1)}(k/k) &= P_{22}^{(1)}(k/k-1) - P_{12}^{(1)}(k/k-1) \cdot K^{(1)}_{21}(k), \end{aligned} \quad (17)$$

– для второй модели:

$$\begin{aligned} P_{11}^{(2)}(k/k) &= P_{11}^{(2)}(k/k-1) - P_{11}^{(2)}(k/k-1) \cdot K^{(2)}_{11}(k), \\ P_{12}^{(2)}(k/k) &= P_{12}^{(2)}(k/k-1) - P_{12}^{(2)}(k/k-1) \cdot K^{(2)}_{11}(k), \\ P_{21}^{(2)}(k/k) &= P_{21}^{(2)}(k/k-1) - P_{11}^{(2)}(k/k-1) \cdot K^{(2)}_{21}(k), \\ P_{22}^{(2)}(k/k) &= P_{22}^{(2)}(k/k-1) - P_{12}^{(2)}(k/k-1) \cdot K^{(2)}_{21}(k). \end{aligned} \quad (18)$$

Ковариационные матрицы одношагово-
го предсказания вектора наблюдений:

– для первой модели:

$$V_{11}^{(1)}(k) = P_{11}^{(1)}(k/k-1) + \sigma_{\varphi}^2; \quad (19)$$

$$K_{11}^{(1)}(k) = 1,$$

$$K_{21}^{(1)}(k) = \frac{P_{21}^{(1)}(k/k-1)}{P_{11}^{(1)}(k/k-1)}, \quad (21)$$

– для второй модели:

$$V_{11}^{(2)}(k) = P_{11}^{(2)}(k/k-1) + \sigma_{\varphi}^2. \quad (20)$$

– для второй модели

$$K_{11}^{(2)}(k) = 1,$$

Коэффициенты усиления фильтров:

– для первой модели:

$$K_{21}^{(2)}(k) = \frac{P_{21}^{(2)}(k/k-1)}{P_{11}^{(2)}(k/k-1)} \quad (22)$$

Гауссовская плотность вероятности невязки находится по выражениям:
– для первой модели:

$$N[v^{(1)}(k) | 0, V^{(1)}(k)] = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot |V^{(1)}|}} \cdot \exp \left\{ \frac{-|v^{(1)}(k)|^2}{2 \cdot |V^{(1)}|} \right\}; \quad (23)$$

– для второй модели:

$$N[v^{(2)}(k) | 0, V^{(2)}(k)] = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot |V^{(2)}|}} \cdot \exp \left\{ \frac{-|v^{(2)}(k)|^2}{2 \cdot |V^{(2)}|} \right\}. \quad (24)$$

Вероятности номеров структуры системы:

$$W^{(1)}(k) = \frac{\pi(\theta(k) = 1 | \theta(k-1) = 1) \cdot N[v^{(1)}(k) | 0, V^{(1)}(k)] \cdot W^{(1)}(k-1)}{U(k)} + \frac{\pi(\theta(k+1) = 1 | \theta(k-1) = 2) \cdot N[v^{(2)}(k) | 0, V^{(2)}(k)] \cdot W^{(2)}(k-1)}{U(k)}, \quad (25)$$

$$W^{(2)}(k) = \frac{\pi(\theta(k) = 2 | \theta(k-1) = 1) \cdot N[v^{(1)}(k) | 0, V^{(1)}(k)] \cdot W^{(1)}(k-1)}{U(k)} + \frac{\pi(\theta(k) = 2 | \theta(k-1) = 2) \cdot N[v^{(2)}(k) | 0, V^{(2)}(k)] \cdot W^{(2)}(k-1)}{U(k)},$$

$$U(k) = \pi(\theta(k) = 1 | \theta(k-1) = 1) \cdot N[v^{(1)}(k) | 0, V^{(1)}(k)] \cdot W^{(1)}(k-1) + \pi(\theta(k) = 1 | \theta(k-1) = 2) \cdot N[v^{(2)}(k) | 0, V^{(2)}(k)] \cdot W^{(2)}(k-1) + \pi(\theta(k) = 2 | \theta(k-1) = 1) \cdot N[v^{(1)}(k) | 0, V^{(1)}(k)] \cdot W^{(1)}(k-1) + \pi(\theta(k) = 2 | \theta(k-1) = 2) \cdot N[v^{(2)}(k) | 0, V^{(2)}(k)] \cdot W^{(2)}(k-1). \quad (26)$$

где

Результирующая оценка угловых координат:

$$\hat{\varphi}(k) = \hat{\varphi}^{(1)}(k) \cdot W^{(1)}(k) + \hat{\varphi}^{(2)}(k) \cdot W^{(2)}(k),$$

$$\hat{\omega}(k) = \hat{\omega}^{(1)}(k) \cdot W^{(1)}(k) + \hat{\omega}^{(2)}(k) \cdot W^{(2)}(k).$$

Структурная схема алгоритма функционирования следящей системы представлена на рис. 4.

Структура системы включает два фильтра, вырабатывающих каждый свою парциальную оценку, и устройство весо-

вой обработки, рассчитывающее общую оценку угловых координат.

Итак, появление способности БПЛА к маневренному движению значительно по-

вышает требования к следящим системам по точности и устойчивости их функционирования.

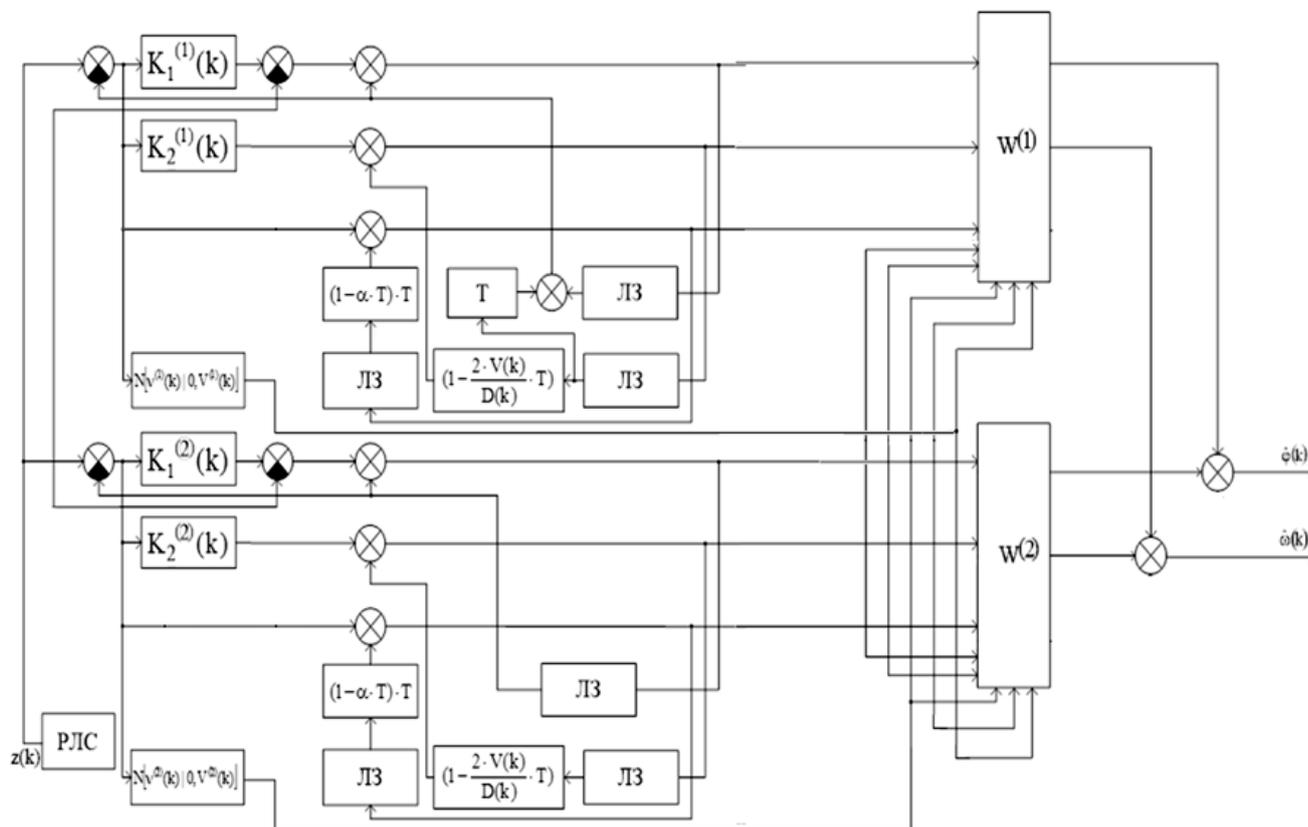


Рис. 4. Структурная схема алгоритма функционирования следящей системы

Это приводит к необходимости применения в дополнение к модели (7) быстродействующего фильтра, который будет

обеспечивать быструю обработку резкого изменения входного воздействия возможно и при меньшей точности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Концепция построения и структура перспективного информационно-измерительного комплекса / У.Р. Наимов, С.Н. Данилов, А. П. Пудовкин и др. // Вестник ТГТУ. 2018. Т. 24. № 1. С. 30-34.

2. Пудовкин А.П. Перспективные методы обработки информации в радиотехнических системах / А.П. Пудовкин,

С.Н. Данилов, Ю.Н. Панасюк. СПб.: Экспертные решения, 2014. 256 с.

3. Иванов А.В. Оценка влияния точности оценивания квазидальности на порог обнаружения приемных каналов спутниковых радионавигационных систем / А.В. Иванов // Радиотехника. 2003. № 5. С. 66-69.

4. **Максимов М.В.** Радиоэлектронные системы самонаведения / М.В. Максимов, Г.И. Горгонов. М.: Радио и связь, 1982. 304 с.

5. **Наимов У.Р.** Синтез канала слежения за параметрами случайного процесса в условиях их скачкообразного изменения / У.Р. Наимов, С.Н. Данилов, А.П. Пудовкин // Радиотехника. 2019. № 2. С. 84-89.

6. **Наимов У.Р.** Оценивание координат беспилотного летательного аппарата на основе модели маневренного движения / У.Р. Наимов // Вестник ТГТУ. 2019. Т. 24. № 2. С. 236-239.

7. **Максимов М.В.** Радиоэлектронные системы самонаведения / М.В. Максимов, Г.И. Горгонов. М.: Радио и связь, 1982. 304 с.

Наимов Умеджан Розибекович – соискатель ученой степени кафедры «Радиотехника» Тамбовского государственного технического университета

Данилов Станислав Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Радиотехника» Тамбовского государственного технического университета

Umejan R Naimov. – Applicant for the degree Ph.D., Department of Radio engineering Tambov State Technical University

Stanislav N. Danilov – Dr. Sc., Professor, Department of Radio engineering Tambov State Technical University

Статья поступила в редакцию 10.10.19, принята к опубликованию 15.11.19

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

В разделе «Летопись» можно опубликовать воспоминания, рассказ, информацию об ученых, преподавателях, представителях промышленности, бизнеса, работающих в области электротехнологии.

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) 99-86-95 – Юдина Виолетта Олеговна (ответственный секретарь).

Просьба направлять публикации по адресу:

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

Требования к оформлению публикаций

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

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

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

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

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

Редактор Л.А. Скворцова
Компьютерная верстка О.В. Пачина, Ю.Л. Жупилова
Перевод на английский язык А.Х. Аскарова

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

Подписано в печать 25.12.2019
Формат 60×84 1/8 Бум. офсет.
Усл. печ. л. 14,75 Уч. изд. л. 5,5
Тираж 500 экз. Заказ 83 Цена свободная
Отпечатано в Издательстве СГТУ, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77.
E-mail: izdat@sstu.ru
Полная электронная версия журнала размещена в системе РИНЦ
в открытом доступе на платформе eLIBRARY.RU
Подписной индекс 70841 (каталог «Газеты. Журналы» на 1-е полугодие 2020 г.)
Свидетельство о регистрации СМИ *ПИ № ФС77-54621 от 01.07.2013*

Editor L.A. Skvortsova
Computer-assisted layout by O.V. Pachina, Yu.L. Zhupilova
Translation into English by A.H. Askarova

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

Print date: 25.12.2019
Paper size: 60×84 1/8 Offset-Print
Conventional printed sheet 14,75 Publication base sheet 5,5
Circulation: 500 printed copies Order 83 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*