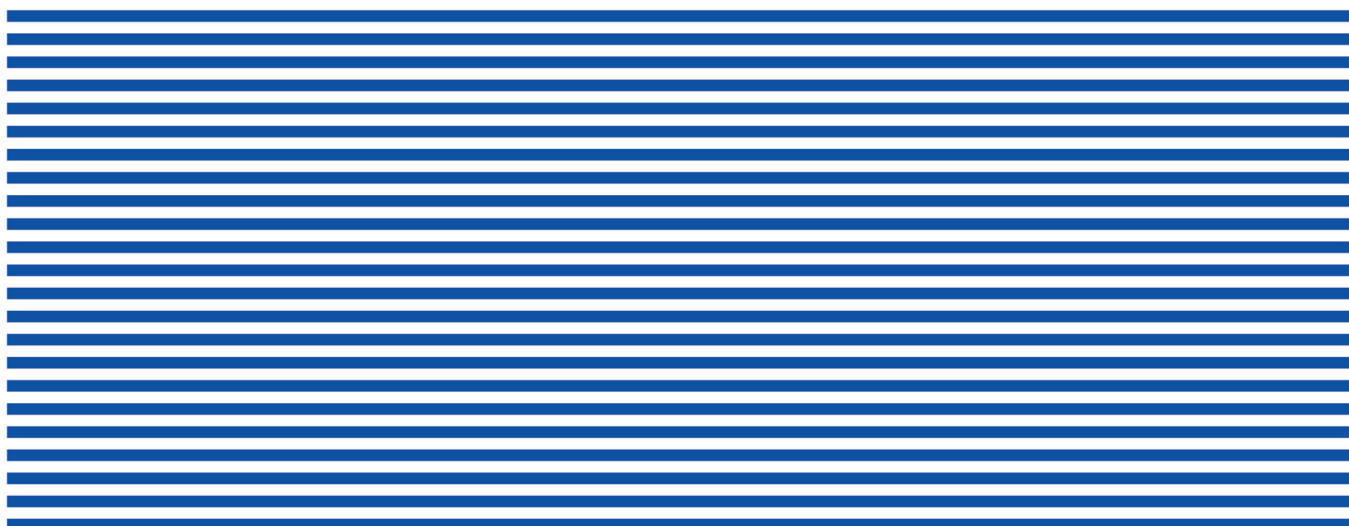




ISSN 2309-6020

ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ



2024

№ 3 (44)



В журнале публикуются статьи по следующим научным специальностям перечня ВАК:

- 2.4.1. Теоретическая и прикладная электротехника
 - 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы
 - 2.4.4. Электротехнология и электрофизика
 - 2.2.4. Приборы и методы измерения (по видам измерения)
 - 2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы
-
- 2.4.1. Theoretical and Applied Electrical Engineering
 - 2.4.2. Electrical Complexes and Systems
 - 2.4.4. Electrotechnology and Electrophysics
 - 2.2.4. Measuring Instruments and Methods
 - 2.2.11. Information-Measuring and Control Systems

Издаётся с ноября 2013 года
Выходит один раз в квартал

№ 3 (44)
Сентябрь 2024

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	АРТЮХОВ ИВАН ИВАНОВИЧ д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
Зам. главного редактора	БЕКРЕНЕВ НИКОЛАЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
Ответственный секретарь	МОЛОТ СВЕТЛАНА ВИКТОРОВНА старший преподаватель, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

Редакционная коллегия

А.А. БАЗАРОВ	д.т.н., профессор, СамГТУ, Самара
В.В. ВАХНИНА	д.т.н., профессор, Тольяттинский государственный университет, Тольятти
В.Г. ГОЛЬДШТЕЙН	д.т.н., профессор, СамГТУ, Самара
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
Ю.Б. КАЗАКОВ	д.т.н., профессор, ИГЭУ, Иваново
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
Ф.Н. САРАПУЛОВ	д.т.н., профессор, УрФУ, Екатеринбург
Ю.Б. ТОМАШЕВСКИЙ	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
А.А. ФОМИН	д.т.н., доцент СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
В.Н. ХМЕЛЕВ	д.т.н., профессор, БТИ, Бийск
В.А. ЦАРЕВ	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

Since November 2013
Published Quarterly

№ 3 (44)
September 2024

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

ARTYUKHOV IVAN IVANOVICH

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

Assistant

to the Editor-in-Chief

BEKRENEV NIKOLAY VALERIEVICH

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

Chief Executive Officer

MOLOT SVETLANA VIKTOROVNA

Senior Lecturer, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov

Editorial Board Members

A.A. BAZAROV

Dr. Sc., Professor, Samara State Technical University, Samara

V.V. VAKHNINA

Dr. Sc., Professor, Togliatti State University, Togliatti

V.G. GOLDSTEIN

Dr. Sc., Professor, Samara State Technical University, Samara

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

Yu.B. KAZAKOV

Dr. Sc., Professor, Ivanovo State Power University, Ivanovo

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

F.N. SARAPULOV

Dr. Sc., Professor, Ural Federal University, Ekaterinburg

Yu.B. TOMASHEVSKY

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

A.A. FOMIN

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

V.N. KHMELEV

Dr. Sc., Professor, Biysk Technological Institute, Biysk

V.A. TSAREV

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

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ И ЭЛЕКТРОФИЗИКА

Базаров А.А., Колпаков Д.В. Моделирование электромагнитных и тепловых процессов в системе индук- ционного нагрева вращающегося кольца.....	5
Байбурин В.Б., Комаров В.В., Артюхов И.И., Мещанов В.П., Дорошенко В.М. Влияние загрузки рабочей камеры микроволнового стерилизатора на напряженность электрического поля в области взаимодействия	17
Байбурин В.Б., Мещанов В.П., Никифоров А.А., Комаров В.В., Артюхов И.И., Дорошенко В.М., Тихомирова Е.И., Телешева Е.М., Киркица В.А. Расширение областей применения быстродействующего СВЧ-стерилизатора и обеспечение его работы в походных и полевых условиях...	22
Байбурин В.Б., Никифоров А.А., Мещанов В.П., Дорошенко В.М., Пахомов Я.А. Особенности серийного производства быстродействующих СВЧ- стерилизаторов медицинских объектов.....	29
Бирюкова О.В., Фомин А.А., Кошуро В.А. Влияние параметров лазерного воздействия на титановую мишень при вакуумном распылении на структуру и микротвердость формируемых на стали слоев	36

Кириченко Д.И., Шалаев П.Д., Шабунин Н.О. Химическая и ионно-плазменная обработка медно-молибденового композита в производстве ламп бегущей волны с высоким коэффициентом полезного действия.....	45
Коломейцев В.А., Ковряков П.В., Дрогайцева О.В. Достижение предельно допустимого уровня энергии электрического поля в диэлектрической пластине, расположенной в е-плоскости у узкой стенки прямоугольного волновода	50

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

Казанцев А.А., Косорлуков И.А., Стариков А.В. Влияние величины напряжения питания на потребление мощности штанговой скважинной насосной установкой	60
Тулупова Г.Н. Вопросы кибербез- опасности в системах электроснаб- жения современных технологиче- ских комплексов	68
Волков М.М. Сравнение признаков и статистических алгоритмов сегмен- тации многомерных временных рядов.....	74
К сведению авторов	83

CONTENTS

ELECTROTECHNOLOGY AND ELECTROPHYSICS

Bazarov A.A., Kolpakov D.V. Modeling of electromagnetic and thermal processes in the induction heating system of a rotating ring.....	5
Baiburin V.B., Komarov V.V., Artyukhov I.I., Meshchanov V.P., Doroshenko V.M. Influence of loading of an operating chamber of a microwave sterilizer on THE electric field strength in an interaction domain	17
Bayburin V.B., Meshchanov V.P., Nikiforov A.A., Komarov V.V., Artyukhov I.I., Doroshenko V.M., Tikhomirova E.I., Telesheva E.M., Kirkitsa V.A. Expanding the applications of the high-speed microwave sterilizer and ensuring its operation in the field conditions.....	22
Bayburin V.B., Nikiforov A.A., Meshchanov V.P., Doroshenko V.M., Pakhomov Y.A. Characteristics of serial production of high-speed microwave sterilizers for medical objects	29
Biryukova O.V., Fomin A.A., Koshuro V.A. Effect of the parameters of laser action on a titanium target during vacuum spraying on the structure and microhardness of steel layers	36

Kirichenko D.I., Shalaev P.D., Shabunin N.O. Chemical and ion-plasma treatment of copper-molybdenum composite in the production of high-efficiency traveling wave lamps.....	45
Kolomeytsev V.A., Kovryakov P.V., Drogaytseva O.V. Achievement of the maximum allowable level of electric field energy in a dielectric plate located in the e-plane near the narrow wall of a rectangular waveguide.....	50

ELECTRICAL COMPLEXES AND SYSTEMS

Kazantsev A.A., Kosorlukov I.A., Starikov A.V. Influence of supply voltage value on power consumption of a sucker-rod pumping unit.....	60
Tulepova G.N. Cybersecurity issues in power supply systems of modern technological complexes	68
Volkov M.M. Comparison of feature-based and statistical algorithms for segmentation of multivariate time series	74
Information for Authors.....	83

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ И ЭЛЕКТРОФИЗИКА

УДК 621.365.511

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ВРАЩАЮЩЕГОСЯ КОЛЬЦА

А.А. Базаров, Д.В. Колпаков

MODELING OF ELECTROMAGNETIC AND THERMAL PROCESSES IN THE INDUCTION HEATING SYSTEM OF A ROTATING RING

A.A. Bazarov, D.V. Kolpakov

В работе рассматривается система индукционного нагрева массивного кольца с центральным отверстием в катушке прямоугольного сечения в плоскости xz с переменной кривизной витков по координате y . Нагреваемое кольцо располагается горизонтально на круглой теплоизоляционной плите, опирающейся на вал, приводимый во вращение электроприводом с редуктором. Моделирование электромагнитных и тепловых процессов выполнено численным методом. Для обеспечения допустимого отклонения в распределении температуры выполнен поиск параметров индуктора и скорости вращения заготовки в индукторе. Полученная конструкция предотвращает замыкание наведенных токов вдоль стенок отверстия. Данное решение упрощает задачу формирования более равномерного распределения мощности тепловыделения в нагреваемой области. Найдено минимальное значение скорости вращения заготовки, при котором отклонение температуры от заданного значения не превышает пяти процентов.

Ключевые слова: кольцевая заготовка, метод конечных элементов, трехмерная геометрическая модель, индукционный нагреватель

The paper considers an induction heating system for a massive ring with a central hole in a rectangular coil in the xz plane with a variable curvature of the turns along the y coordinate. The heated ring is located horizontally on a round heat-insulating plate resting on a shaft driven by an electric drive with a gearbox. Modeling of electromagnetic and thermal processes is performed numerically. To ensure an acceptable deviation in the temperature distribution, the parameters of the inductor and the speed of rotation of the workpiece in the inductor are searched. The resulting design prevents the induced currents from short-circuiting along the walls of the hole. This solution simplifies the task of forming a more uniform distribution of heat generation power in the heated area. The minimum value of the workpiece rotation speed is found, at which the temperature deviation from the specified value does not exceed five percent.

Keywords: ring workpiece, finite element method, three-dimensional geometric model, induction heater

Введение

Процесс изготовления колес для железнодорожных вагонов зависит от марки применяемой стали. При использовании в качестве исходной заготовки цилиндрического слитка приходится последовательно выполнять процедуры его превращения в диск с отверстием и только затем придавать конечный вид. Многократное воздействие прессового оборудования и перемещения на рольганге приводят к тому, что температура заготовки опускается ниже требуемой для прессования [1-3].

Для подогрева целесообразно применение индукционного нагревателя, так как в газовой печи дополнительное образование окалины на поверхности заготовки уже недопустимо.

Задачей системы нагрева является повышение температуры заготовки с начального значения 900-950 градусов до 1100 градусов [4, 5].

При разработке системы нагрева необходимо учитывать особенности технологического процесса [6-9]. На качество процесса влияют как скорость и величина значений деформации [7, 9], так и параметры системы нагрева, как временные, так и пространственные [8, 10].

Особенностью формы заготовки является то, что длина цилиндра много меньше

его радиуса, что не позволяет использовать проходной цилиндрический индуктор. Для упрощения технологической линии и отказа от механизмов захвата довольно массивных заготовок форма индуктора выбрана прямоугольного сечения. С учетом возникающих проблем с равномерностью распределения мощности вдоль радиальной координаты и особенно в области отверстия в центре кольцевой заготовки в конструкции предусмотрено искривление витков в возле центра. Тем не менее как форма индукционной системы, так и свойства нагреваемого металла создают предпосылки для возникновения существенного отклонения температуры от заданного значения во всем объеме загрузки. На рис. 1 приведена геометрическая модель индукционного нагревателя с помещенной внутрь цилиндрической заготовкой. Для формирования желаемого распределения температуры предусмотрено наличие тепловой изоляции катушки индуктора и вращение заготовки с помощью специального привода. Опорная круглая плита, на которой располагается заготовка, выполнена из немагнитной стали. Для снижения в ней тепловыделения конструкция является не сплошной, а ребристой. Сверху на плите закрепляется слой теплоизоляции.

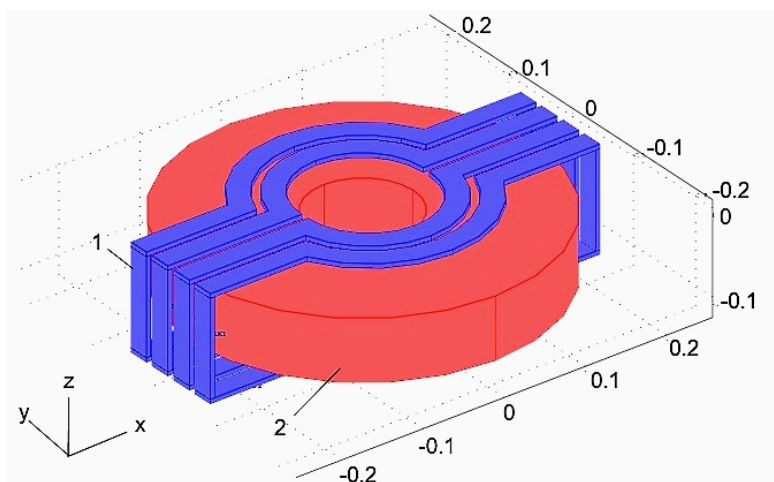


Рис. 1. Геометрическая модель индуктора с загрузкой:
1 – проводники индуктора; 2 – кольцевая заготовка

Несмотря на ряд принятых решений, полностью обеспечить выравнивание распределения мощности в объеме заготовки

невозможно. Поэтому неизбежны отклонения температуры по радиальной и аксиальной координатам.

Целью работы является расчет параметров индукционного нагревателя и обеспечение эффективного алгоритма управления процессом нагрева.

При анализе процессов индукционного нагрева в индукторе прямоугольной формы обычно актуальны вопросы электродинамического воздействия на катушку индуктора. Вибрации проводников сопровождаются не только повышенным шумом, но и снижением срока службы индуктора. В данном случае своеобразная форма индуктора способствует возникновению усилий в различных плоскостях, для обеспечения жесткости конструкции необходимо крепление витков по всей длине к внешней металлической раме и между собой через диэлектрические пластины. В то же время механическое усилие со стороны заготовки перенесено на вращающуюся опору. Поэтому вопрос учета электромагнитных сил, приложенных к индуктору, решается без специального обоснования конструкции.

Возникающие при индукционном нагреве термонапряжения и деформации в нагреваемой заготовке в данной задаче не столь значимы, так как ограниченная особенностями задачи мощность тепловыделения не приводит к значительным градиентам температуры. Кроме того, начальное значение температуры велико, это приводит к уменьшению коэффициента упругости металла и снижению возникающих термонапряжений до безопасных значений. Таким образом, анализ подобных вопросов при проектировании индуктора для подогрева кольцевой заготовки не требуется.

Для расчетов электромагнитных и тепловых процессов выбран программный комплекс Comsol, построенный на основе метода конечных элементов. Построение геометрических моделей процессов выполнено

в трехмерной формулировке, хотя сама заготовка имеет осевую симметрию. Учитывая, что при корректном решении электромагнитной задачи для системы индукционного нагрева заготовки диаметром более 0,8 м, компьютерная модель требует более 200 Гб оперативной памяти все расчеты выполнены для уменьшенной в два раза геометрической модели.

Геометрическая модель для решения электромагнитной задачи с индуктором, имеющем витки различной кривизны представлена на рис. 1. Далее такой индуктор назван криволинейным в отличие от индуктора, имеющего витки прямоугольной формы.

Центр цилиндрической пустотелой заготовки имеет координаты $x = 0$; $y = 0$; $z = 0$. Для расчета принята заготовка с геометрическими размерами: внешний диаметр $D_2 = 0,422$ м; внутренний диаметр $D_1 = 0,125$ м; высота $h = 0,072$ м.

Формулировка электромагнитной задачи

При использовании векторного магнитного потенциала электромагнитная задача формулируется в виде уравнения Пуассона

$$\nabla^2 \{\bar{A}\} - j\omega\sigma \{\bar{A}\} - \{\bar{J}\} = 0. \quad (1)$$

Основное уравнение дополняется граничными условиями на поверхности, достаточно удаленной от элементов системы:

$$\{\bar{A}\} = 0 \text{ на } S_B. \quad (2)$$

Моделирование в Comsol для трехмерной области осуществляется при использовании системы из двух уравнений вида (1) но в более подробной записи

$$\nabla \cdot (j\omega\sigma_s - \sigma_s \mathbf{v} \times (\nabla \times \mathbf{A}) + \sigma_s \nabla V - \mathbf{J}^e) = 0; \quad (3)$$

$$(j\omega\sigma_s \mathbf{A} + \nabla \times (\mu_0^{-1} \mu_r^{-1} \nabla \times \mathbf{A}) - \sigma_s \mathbf{v} \times (\nabla \times \mathbf{A}) + \sigma_s \nabla V) = \mathbf{J}^e. \quad (4)$$

Здесь σ_s – электропроводность; $\mathbf{v}$ – вектор скорости движения; $\mathbf{A}$ – векторный магнитный потенциал; V – скалярный электрический потенциал; $\mathbf{J}^e$ –

вектор источников (плотность тока); μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; μ_r – относительная магнитная проницаемость среды.

Электропроводность нагреваемой заготовки принята неизменной на всем протяжении процесса нагрева, так как в области высоких температур она практически не изменяется. В рассматриваемой задаче не использовались магнитные материалы, поэтому относительная магнитная проницаемость везде принята равной единице.

Формулировка тепловой задачи

Моделирование тепловых процессов в системе «заготовка – теплоизоляция – окружающая среда» производится с помощью решения уравнения теплопроводности, записанного в виде уравнения в частных производных, дополненного граничными условиями. Источники тепла в данной задаче определяются при решении электромагнитной задачи и могут быть непосредственно экспортированы в виде распределения мощности или заданы в специально сформированных геометрических областях.

Нестационарное уравнение теплопроводности для трехмерной области, формулируется в декартовой системе координат в следующем виде

$$\gamma C_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) - \gamma C_p \mathbf{v} \cdot \nabla T + Q; \quad (5)$$

с начальными $T(x, y, z, 0) = \text{const}$ и граничными условиями

$$\mathbf{v} \cdot (\lambda \nabla T) = \alpha [T - T_c] + \varepsilon \sigma [T_1^4 - T_2^4]. \quad (6)$$

Здесь $T(r, x, z, \tau)$, T_0 – распределение температуры в заготовке и температура окружающей среды; T_c – температура окружающей среды; T_1, T_2 – температуры поверхностей, между которыми происходит теплообмен излучением (вместо одной из поверхностей может выступать окружающая среда); $C_p(x, y, z, t)$, $\gamma(x, y, z, \tau)$, $\lambda(x, y, z, \tau)$ – соответственно удельные теплоемкость, теплопроводность и плотность металла; α , ε , σ – коэффициенты конвективного теплообмена, степень черноты и коэффициент излучения поверхности материала; Q – удельная мощность источников внутреннего тепло-

выделения; $\mathbf{v}$ – вектор скорости движения кольцевой заготовки.

Для задания скорости вращения заготовки используется аналитическое выражение, позволяющее рассчитать значения вектора для каждой точки заготовки. В целях упрощения расчетного выражения заготовка помещена в центр координат. Для составляющих вектора скорости по осям в плоскости xy выражения имеют вид:

$$v_x = v \cdot (y / (x^2 + y^2)^{0.5});$$

$$v_y = v \cdot (x / (x^2 + y^2)^{0.5}).$$

Здесь v – линейная скорость кругового движения боковой поверхности заготовки.

Теплообмен в системе тел представлен свободными конвективными потоками между поверхностями твердых тел и окружающей средой для случая неполной изоляции пространства печи, тепловыми потоками излучения между поверхностями тел системы, тепловыми потоками излучения между отдельными поверхностями и внешней средой.

Совместное решение электромагнитной и тепловой задач при комбинированном теплообмене возможно не для всех вариантов теплообмена. Для учета всех условий теплообмена и получения более корректного распределения температуры используется подход с отдельным решением электромагнитной и тепловой задач. На этапе решения электромагнитной задачи выясняется детальное расположение областей тепловыделения и определяются значения функции распределения мощности для каждой области. Неизбежно вносимые погрешности, тем не менее приводят к меньшей погрешности в расчете, чем при грубом задании граничных условий. В этом случае невозможно корректно оценить процесс теплообмена излучением между поверхностями твердых тел.

В работе выполнены расчеты как для связанных (мультифизических) задач, так и для отдельных – тепловой и электромагнитной задач.

Теплофизические свойства представлены в виде зависимостей от температуры, что позволяет повысить точность расчетов.

$$\lambda = \lambda_0 (1 + \alpha_\lambda T); \quad C = C_0 (1 + \alpha_C T).$$

Температурные коэффициенты определены с учетом перехода к шкале температуры в Кельвинах.

Моделирование электромагнитных и тепловых процессов

Расчет выполнен для двух конструкций индуктора – с прямоугольной катушкой и криволинейной катушкой для сопоставления возможностей разных вариантов.

При расчете индуктора с прямоугольной катушкой подразумевается, что использован другой способ приведение во вращение заготовки. Для этого предусмотрено наличие вращающихся опорных роликов конической формы, расположенных за пределами катушки индуктора.

В качестве материала в расчетах принят сплав 65Ф.

Заданы следующие геометрические размеры: внешний радиус заготовки $R = 0,214$ м; радиус отверстия в заготовке $R = 0,0625$ м; высота (толщина кольца) $L = 0,072$ м; ширина витка $a = 0,025$ м; зазор между индуктором и загрузкой $\Delta x = 0,016$ м.

Частота напряжения принята равной 1000 Гц. Получены следующие параметры для индуктора с криволинейной катушкой: ток индуктора $I = 7500$ А; напряжение $U = 79$ В; мощность тепловыделения в загрузке $P_2 = 45,8$ кВт; активная мощность индуктора $P_1 = 68,2$ кВт; полная мощность индуктора $S = 591$ кВА; коэффициент мощности индуктора $\cos \varphi = 0,115$; электрический КПД индуктора $\eta = 0,67$.

При заданной плотности тока индуктора полученные значения не являются максимально возможными. При необходимости ток можно увеличить так же, как и напряжение на индукторе. Ширина трубки индуктора может быть уменьшена, а число витков увеличено. Все эти меры способны упростить согласование индуктора с источником питания.

В результате расчета получено распределение плотности мощности на торцевой поверхности заготовки, приведенное на рис. 2. Как видно из рисунка, область с мощностью тепловыделения отодвинута от отверстия в кольце. На расстоянии больше глубины проникновения тока от торцевой поверхности кольца токи практически отсутствуют. Замыкание токов между плоскими поверхностями кольца осуществляется только по внешней боковой поверхности. Для индуктора с прямоугольными катушками замыкание происходит также и вдоль внутренней поверхности центрального отверстия. Этот вариант уступает в достижении равномерного распределения мощности тепловыделения, но интересен для сравнения.

Диаграммы распределения плотности мощности тепловыделения на верхней и нижней поверхностях кольца показаны на рис. 3. Нужно иметь в виду, что практически полное отсутствие мощности тепловыделения под индуктором на внешних краях кольцевой заготовки не соответствует действительности, так как токи меняют направление по более закругленной траектории.

Переход к тепловой задаче возможен двумя путями: создание мультифизической (электротепловой) задачи и создание отдельной тепловой задачи. Первый вариант с точки зрения затрат на программирование выглядит гораздо предпочтительнее. Организуется передачи мощности тепловыделения из электромагнитной в тепловую задачу и задаются граничные условия на поверхностях заготовки. Использовать все имеющиеся возможности Comsol не приходится. Самое серьезное упрощение тепловой модели заключается в невозможности организовать теплообмен излучением между поверхностями заготовки и стенок, свода, основания печи. Ограничиваемся заданием лучистого теплообмена с воздухом. При наличии таких ограничений выполнен ряд расчетов. Для снижения температуры нагрева мощность индуктора снижена. Решение электротепловой задачи при мощности тепловыделения в заготовке 20,6 кВт и теплообмене с окружающей средой в виде конвекции и излуче-

ния показало значительный градиент температуры вдоль радиальной координаты. При этом линейная скорость внешней боковой

поверхности заготовки равна 7 см/с. Реальная круговая частота вращения $\omega = v/R = 0,07/0,214 = 0,327$ рад/с.

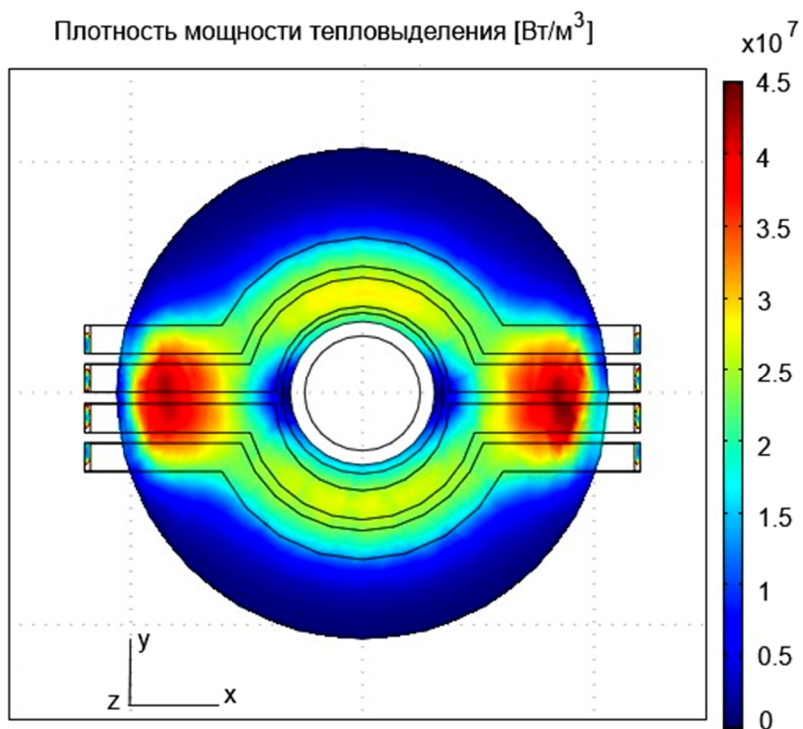


Рис. 2. Распределение плотности мощности тепловыделения на поверхности кольца

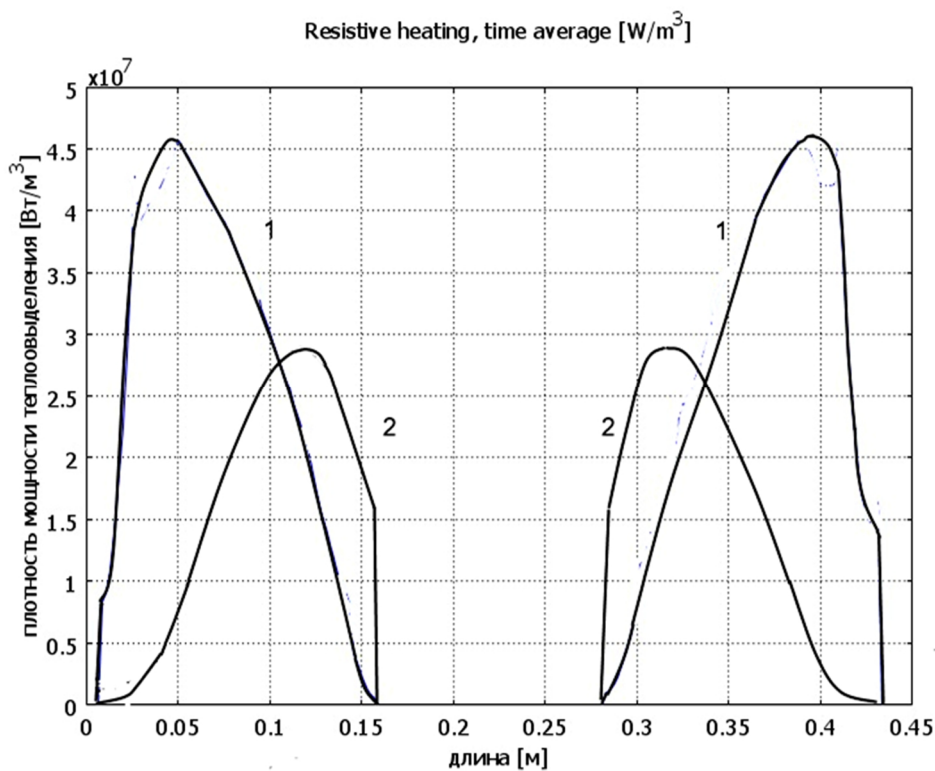


Рис. 3. Диаграммы плотности мощности тепловыделения на поверхности кольца вдоль оси x:
1 – верхняя поверхность; 2 – нижняя поверхность

Распределение температуры на верхней поверхности кольца, приведенное на рис. 4, отражает значительный перепад температуры вдоль радиальной координаты. По толщине кольца перепад имеет меньшее значение. Расчет выполнен для установившегося состояния, поэтому сложно ожидать какого-нибудь улучшения в динамическом режиме. Нужно иметь в виду, что варианты

с многоинтервальным релейным регулированием в данном случае не принесут ожидаемого эффекта, так как после окончания процесса нагрева приходит очередь транспортировки по рольгангу до пресса, что требует времени в несколько десятков секунд и приводит к изменению распределения температуры в объеме, но не к выравниванию.

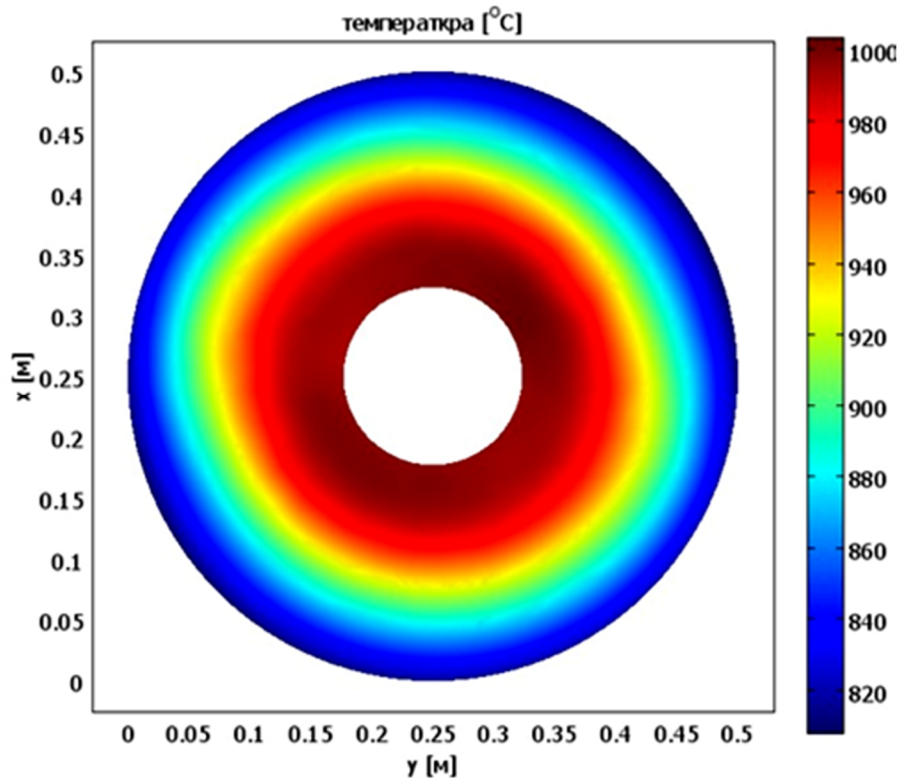


Рис. 4. Распределение температуры на поверхности вращающегося кольца при упрощенном задании условий теплообмена

Таким образом, вращение обеспечило сглаживание перепадов по угловой координате, но перепад температуры вдоль радиальной координаты не устранен.

Дальнейшие расчеты тепловых процессов проведены для отдельной тепловой модели, содержащей элементы теплоизоляции, что позволяет учесть теплообмен излучением в системе тел. Подробный анализ распределения мощности тепловыделения в заготовке позволил дополнительно создать в геометрической модели заготовки подобласти, в которых задается мощность тепловыделения разной плотности. На рис. 5 показана геометрическая модель тепловой за-

дачи нагрева вращающегося диска с системой теплоизолирующих стенок. Для удобства задания разных видов теплообмена и организации групп поверхностей, между которыми происходит теплообмен излучением, некоторые стенки разделены на секции. На рисунке верхние стенки и ближние вертикальные не выделены (не закрашены), чтобы оставались видимыми внутренние элементы. Данная модель полностью соответствует задачам нагрева в индукторах с криволинейными и прямоугольными витками. Различие заключается в системе внутренних под областей заготовки, где выделяется тепловая мощность.

Для задачи нагрева вращающегося кольца в индукторе с прямоугольными витками выполнены расчеты при разной скорости вращения. Результаты расчетов в виде диаграмм температуры на поверхности заготовки представлены на рис. 6, 7.

При расчете суммарная мощность тепловыделения подбиралась таким образом, чтобы обеспечить максимальное значение температуры на внешней поверхности кольцевой заготовки, равное 1100°C .

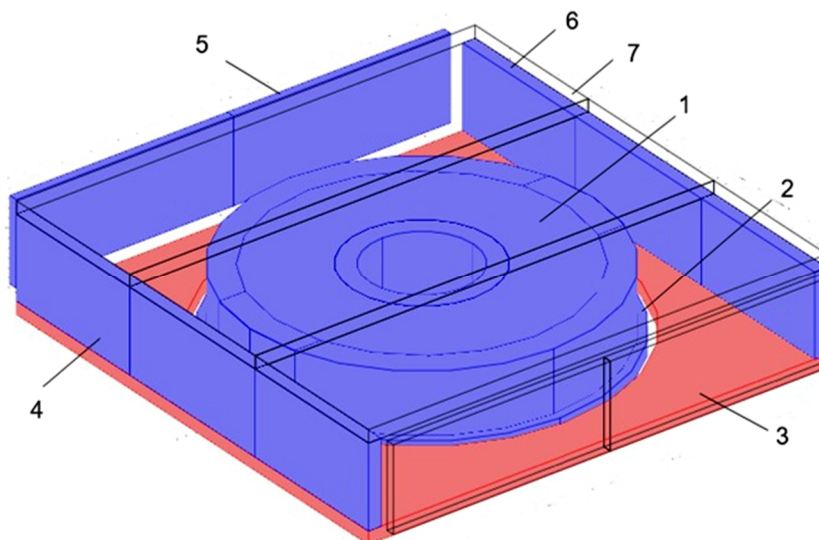


Рис. 5. Геометрическая модель тепловой задачи индукционной установки для нагрева вращающегося массивного кольца: 1 – кольцевая заготовка; 2 – опорная вращающаяся плита; 3-7 – элементы теплоизоляционных плит

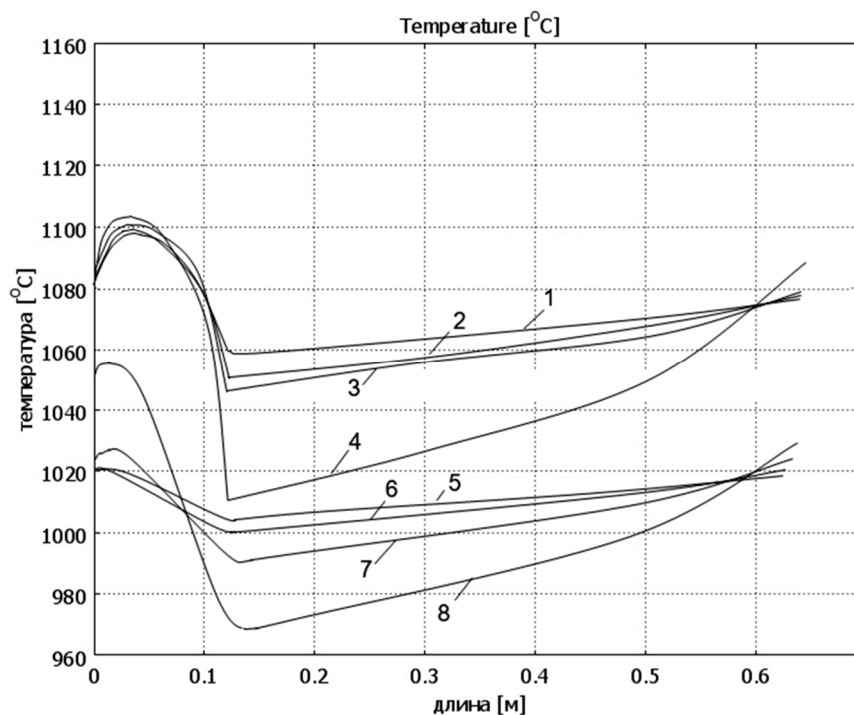


Рис. 6. Диаграммы температуры на внешней дуге нижней поверхности заготовки при скорости вращения: 1 – $\omega = 0,047$ рад/с; 2 – $\omega = 0,14$ рад/с; 3 – $\omega = 0,233$ рад/с; 4 – $\omega = 0,327$ рад/с; на внешней дуге верхней поверхности заготовки при скорости вращения: 5 – $\omega = 0,047$ рад/с; 6 – $\omega = 0,14$ рад/с; 7 – $\omega = 0,233$ рад/с; 8 – $\omega = 0,327$ рад/с

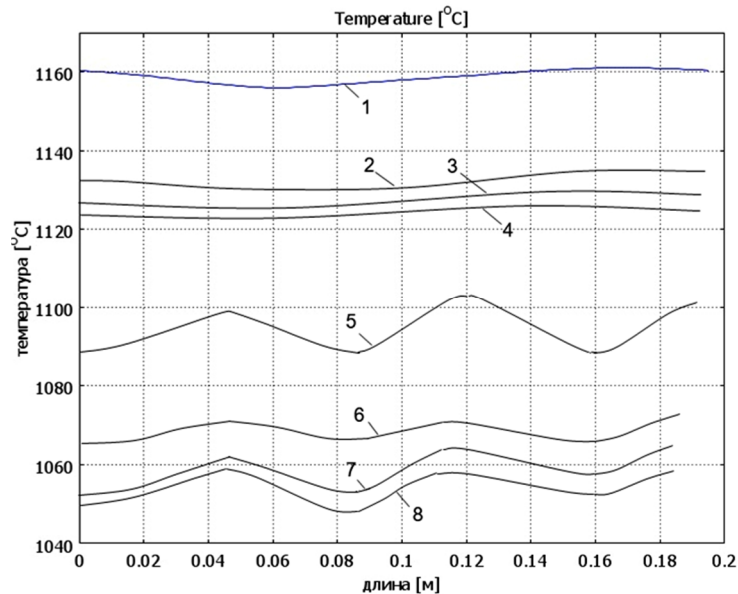


Рис. 7. Диаграммы температуры на внутренней дуге нижней поверхности заготовки при скорости вращения: 1 – $\omega = 0,047$ рад/с; 2 – $\omega = 0,14$ рад/с; 3 – $\omega = 0,233$ рад/с; 4 – $\omega = 0,327$ рад/с; а внутренней дуге верхней поверхности заготовки при скорости вращения: 5 – $\omega = 0,047$ рад/с; 6 – $\omega = 0,14$ рад/с; 7 – $\omega = 0,233$ рад/с; 8 – $\omega = 0,327$ рад/с

Диаграммы разделены на две группы из-за того, что длина дуги на внешней поверхности кольца и длина дуги отверстия сильно различаются. Для сравнения перепадов

температуры для вариантов с разной скоростью вращения найдены минимальные и максимальные значения температуры для каждой дуги сведены в табл. 2.

Таблица 2 – Перепады температуры в заготовке при разных скоростях вращения кольца при нагреве прямоугольным индуктором

ω , рад/с	Внешняя дуга		Внутренняя дуга		Перепад температуры ΔT , °C
	$T_{\max}$, °C	$T_{\min}$, °C	$T_{\max}$, °C	$T_{\min}$, °C	
0,047	1100	1005	1160	1080	155
0,14	1100	1000	1135	1085	135
0,233	1100	990	1127	1052	137
0,327	1100	970	1125	1048	145

Из материалов табл. 2 следует, что перепад температуры в заготовке при всех скоростях, заданных в расчетах, находится в районе 150 °C, что превышает допустимую величину отклонения.

Аналогичный расчет выполнен для модели, построенной с использованием индуктора с криволинейными витками. Результаты расчета приведены на рис. 8, 9 в виде диаграмм температуры на верхней и нижней поверхностях кольца.

Для удобства анализа результатов определены максимальные и минимальные значения для всех диаграмм и представлены в табл. 3. Полученные значения зависят от скорости вращения заготовки. При скорости вращения заготовки $\omega = 0,14$ рад/с ($v = 0,03$ м/с) перепад температуры снижается до допустимого значения и при дальнейшем увеличении скорости практически не изменяется.

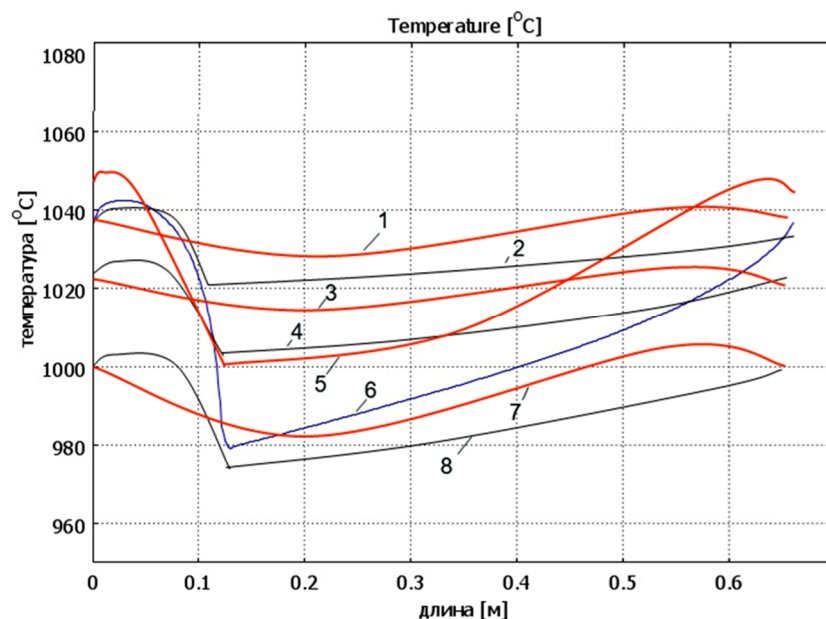


Рис. 8. Диаграммы температуры на внешней дуге загрузки: нижняя поверхность:
 1 – $\omega = 0,327$ рад/с; 2 – $\omega = 0,047$ рад/с; 4 – $\omega = 0,233$ рад/с; 7 – $\omega = 0,14$ рад/с; верхняя поверхность
 3 – $\omega = 0,327$ рад/с; 5 – $\omega = 0,233$ рад/с; 6 – $\omega = 0,047$ рад/с; 8 – $\omega = 0,14$ рад/с

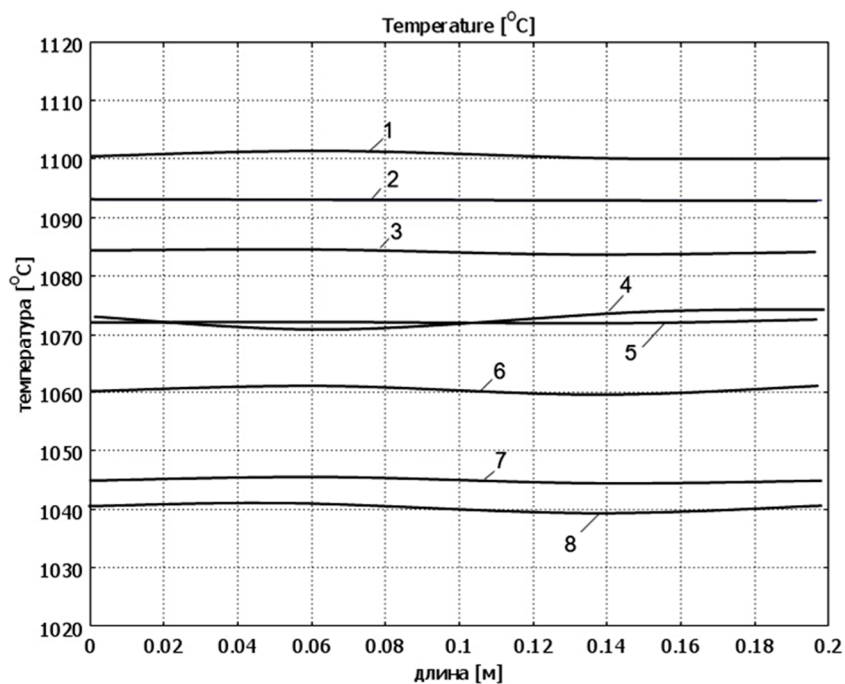


Рис. 9. Диаграммы температуры на внутренней дуге загрузки: нижняя поверхность:
 1 – $\omega = 0,047$ рад/с; 4 – $\omega = 0,327$ рад/с; 6 – $\omega = 0,233$ рад/с; 8 – $\omega = 0,14$ рад/с; верхняя поверхность
 2 – $\omega = 0,047$ рад/с; 3 – $\omega = 0,327$ рад/с; 5 – $\omega = 0,233$ рад/с; 7 – $\omega = 0,14$ рад/с

Результаты, полученные при расчете тепловых процессов в заготовке при использовании индукторов с прямоугольными и криволинейными витками, довольно близки и вполне могут быть улучшены даже при использовании индуктора с прямоуголь-

ми витками. Все варианты тепловой задачи рассчитаны для полностью закрытой конструкции. Использование только одной стенки, ближней или дальней на рисунке, приводит к сильному изменению в худшую сторону распределения температуры.

Таблица 3 – Перепады температуры в заготовке при разных скоростях вращения кольца при нагреве криволинейным индуктором

ω , рад/с	Внешняя дуга		Внутренняя дуга		Перепад температуры
	$T_{\max}$, °C	$T_{\min}$, °C	$T_{\max}$, °C	$T_{\min}$, °C	
0,047	1040	980	1100	1093	120
0,14	1007	975	1045	1040	70
0,233	1050	1000	1074	1072	74
0,327	1040	1014	1085	1070	71

Обсуждение

Распределения температуры во вращающейся кольцевой заготовке на поверхностях и на разных плоскостях среза сильно зависят от скорости вращения и от качества тепловой изоляции. Варианты конструкции индуктора отличаются по сложности изготовления и требуют различных дополнительных мер по защите металлических элементов конструкции установки.

Для индуктора с криволинейными витками необходимо предусмотреть защиту в виде экранов, чтобы предотвратить нагрев отдельных металлических элементов платформы и вращающегося вала, на котором крепится платформа. Учитывая относительно небольшой малый радиус вала (15-20 см), конструкция замкнутого трубчатого магнитопровода из шихтованного железа представляется непростой в изготовлении. С другой стороны, достигнутое выравнивание распределения мощности в кольцевой заготовке, особенно в области центрального отверстия, позволяет получить приемлемые значения перепада температуры в пределах всей заготовки. Нужно учесть, что условия в данной задаче не способствуют улучшению показателей выше определенного предела. Причина кроется в остывании поверхности заготовки во время транспортировки к прессу. К серьезным проблемам это не приводит, но все же приходится закладывать больший объем металла на удаление при точении, так как в поверхностном слое количество дефектов при прессовании возрастает.

Индуктор с прямоугольными витками проще в изготовлении, лишен необходимо-

сти использовать магнитопровод для экранирования металлических конструкций. Главная проблема заключается в значительном градиенте температуры в заготовке. Проведенные тепловые расчеты для представленной на рис. 5 конструкции печи с использованием плит небольшой толщины из материала с теплопроводностью $\lambda = 0,5$ Вт/(м·град), показали все возможности данной системы с учетом того, что были выполнены дополнительные расчеты для нестационарного режима с учетом стабилизации температуры в точке на внешней дуге под витками индуктора. Для решения проблемы необходимо существенно увеличить толщину слоя теплоизоляции со всех сторон. Это приведет к увеличению зазора между индуктором и заготовкой и дальнейшему снижению коэффициента мощности. Вероятно, в каких-то случаях такой подход себя оправдает, но в данной задаче представляется невыгодным.

Заключение

Разработана конструкция индукционной установки для подогрева вращающейся кольцевой заготовки. Выполнены задачи моделирования электромагнитных и тепловых процессов на трехмерных моделях. Для обеспечения допустимого перепада температуры в объеме заготовки индуктор выполнен с криволинейными витками, что позволяет повысить равномерность распределения мощности тепловыделения и исключить перегрев центральной области, имеющей отверстие. Дополнительно предусмотрена система теплоизоляции всей конструкции в виде плит. Загрузка и вы-

грузка осуществляются при подъеме задвижки. Отклонение температуры менее 5 % обеспечивается при скорости вращения заготовки 0,14 рад/с. Функционирование

системы не требует использования замкнутой системы регулирования, достаточно стабилизации мощности индуктора и отслеживания времени нагрева.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Совершенствование технологии штамповки колесных заготовок / А.В. Яковченко, А.А. Пугач, С.А. Снитко, Н.И. Ивлева // Вестник Приазовского государственного технического университета. Сер. Технические науки. 2012. № 24. С. 69-75.

2. Актуальные вопросы повышения эксплуатационной стойкости железнодорожных колес / М.В. Ильичев, М.Е. Гетманова, А.С. Тюфтяев, Г.А. Филиппов, Д.И. Юсупов // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2018. Т. 15. № 1. С. 42-46.

3. Развитие технологии производства железнодорожных колес / А.В. Кушнарев, А.А. Богатов, А.А. Киричков, С.С. Пузырев // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т. 14. № 1. С. 59-68.

4. Будников А.С., Деметрашвили И.С., Руденко Д.О. Разработка рациональной схемы нагрева заготовки перед операцией прошивки // Моделирование и развитие процессов ОМД. 2019. № 1 (28). С. 42-47/

5. Антонюк В.Е., Никифорович С.О., Рудый В.В. Обоснование целесообразности повторного нагрева в автоматизированной

линии для изготовления кольцевых заготовок // Механика машин, механизмов и материалов. 2021. № 3 (56). С. 61-69.

6. Вайнорюте В.В., Дычко И.Н., Богомолов А.В. Разработка технологии получения заготовки для железнодорожных колес на базе ТОО «Проммашкомплект» // Наука и техника Казахстана. 2018. № 1. С. 41-52.

7. Структурно-деформационный анализ производства заготовок железнодорожных колес методом математического моделирования / В.В. Галкин, А.Б. Калинин, Д.А. Доронин, Г.В. Пачурин // Фундаментальные исследования. 2013. № 4-1. С. 18-23.

8. Фрыгин И.В. Оптимальное управление процессом индукционного подогрева стальных колес перед раскаткой: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / Сам. гос. техн. ун-т. Самара, 2001. 22 с.

9. Процев Ю.В. Расчет суммарных степеней деформации при многопереходной раскатке кольцевых заготовок // Производство проката. 2012. № 3. С. 25-27.

10. Индуктор прямоугольной формы с магнитопроводом для нагрева массивных колец перед раскаткой / А.А. Базаров, Д.В. Колпаков, Н.Р. Штукатуров, С.И. Будко // Общество. 2023. № 4-2 (31). С. 44-50.

Базаров Александр Александрович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Самарского государственного технического университета

Колпаков Дмитрий Викторович – аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Самарского государственного технического университета

Aleksander A. Bazarov – Dr. Sc. Tech., Professor, Department of Power Supply of Industrial Enterprises, Samara State Technical University

Dmitry V. Kolpakov – Postgraduate, Department of Power Supply of Industrial Enterprises, Samara State Technical University

Статья поступила в редакцию 30.08.24, принята к опубликованию 18.09.24

УДК 621.37, 621.385.69

ВЛИЯНИЕ ЗАГРУЗКИ РАБОЧЕЙ КАМЕРЫ МИКРОВОЛНОВОГО СТЕРИЛИЗАТОРА НА НАПРЯЖЕННОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ОБЛАСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

**В.Б. Байбурин, В.В. Комаров, В.П., И.И. Артюхов,
В.П. Мещанов, В.М. Дорошенко**

INFLUENCE OF LOADING OF AN OPERATING CHAMBER OF A MICROWAVE STERILIZER ON THE ELECTRIC FIELD STRENGTH IN AN INTERACTION DOMAIN

**V.B. Baiburin, V.V. Komarov, I.I. Artyukhov,
V.P. Meshchanov, V.M. Doroshenko**

Как показано в данной работе, размеры и диэлектрические свойства стенок контейнера, в котором размещаются медицинские инструменты, могут оказывать существенное влияние на процессы микроволновой обработки этих инструментов в СВЧ-стерилизаторе. Для расчета электромагнитных полей в рабочей камере стерилизатора использовался метод конечных элементов. Экспериментальные исследования полностью подтвердили данные численного анализа.

Ключевые слова: СВЧ-стерилизация, диэлектрические свойства, контейнер, напряженность электрического поля, резонатор

Результаты теоретических и экспериментальных исследований, полученные в [1, 2] продемонстрировали эффективность использования электромагнитного (ЭМ) излучения СВЧ-диапазона для быстрой стерилизации медицинских инструментов. Чтобы устранить возможность искрений на острых краях и ребрах инструментов, их помещают в специальный контейнер, частично заполненный водным раствором. Анализ влияния такого фактора, как уровень слоя воды над поверхностью инструментов, на величину напряженности элек-

The present work demonstrates that the sizes and dielectric properties of the walls of the container in which medical instruments are placed can have a significant impact on the processes of microwave treatment in a microwave sterilizer. The finite element method was used to calculate the electromagnetic fields in the operating chamber of the sterilizer. Experimental studies fully confirmed the data of the numerical analysis.

Keywords: microwave sterilization, dielectric properties, container, electric field strength, resonator

трического поля на поверхности металлических объектов для частоты 2,45 ГГц и входной мощности стерилизатора 900 Вт был проведен в [3]. Изучение других факторов, оказывающих влияние на поведение ЭМ поля в области взаимодействия, является одной из актуальных задач дальнейшего развития данной перспективной технологии. В частности, в [1-3] инструменты размещались в рабочей камере СВЧ-стерилизатора в жаропрочном контейнере, выполненном из стекла. В настоящее время в системах микроволновой энергетики

применяются новые, более легкие материалы, например пластик.

Целью данной работы является сравнительный анализ влияния размеров и диэлектрических свойств двух разных контейнеров, изготовленных из жаропрочного стекла и специального пластика, применяемых для загрузки инструментов в рабочую камеру СВЧ-стерилизатора на напряженность электрического поля вблизи поверхности этих инструментов.

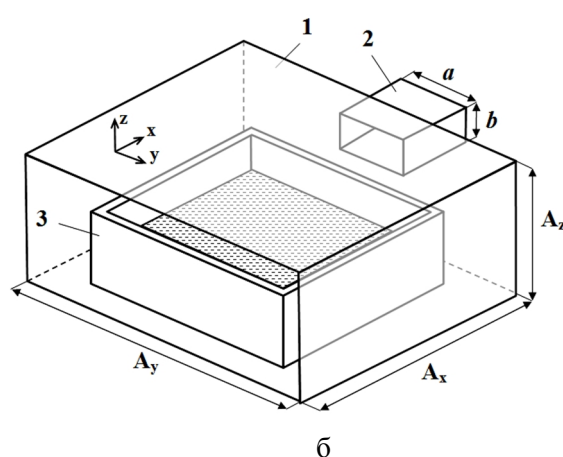
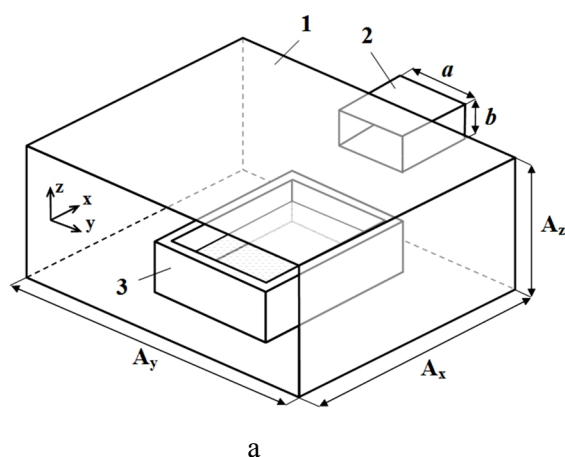


Рис. 1. Рабочая камера СВЧ-стерилизатора со стеклянным (а) и пластиковым (б) контейнерами

Габариты первого контейнера составили $D_x \times D_y \times D_z = 250 \times 180 \times 50$ мм при толщине стенок $t = 5$ мм (рис. 2 а), а второго – $D_x \times D_y \times D_z = 225 \times 280 \times 90$ мм, $t = 2$ мм (рис. 2 б). Для моделирования обрабатываемого инструмента была выбрана металлическая пластина с размерами $x \times y \times z = 15 \times 20 \times 3$ мм (для стеклянного контейнера) и $x \times y \times z = 20 \times 15 \times 3$ мм (для пластикового контейнера), то есть определяющий размер пластины совпадает с максимальным размером контейнера. Высота слоя во-

ды над поверхностью металлической пластины составила $h = 2$ мм.

Комплексная диэлектрическая проницаемость воды является функцией температуры: $\dot{\epsilon}(T) = \epsilon'(T) - j\epsilon''(T)$, где ϵ' – относительная диэлектрическая проницаемость; ϵ'' – коэффициент потерь, $20 \leq T \text{ } ^\circ\text{C} \leq 100$ – температура. В общем случае эта зависимость описывается приближенными аналитическими соотношениями, впервые полученными в [4]. Диэлектрические свойства стенок контейнеров приведены в таблице.

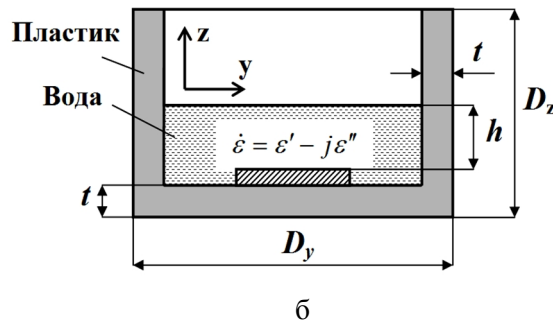
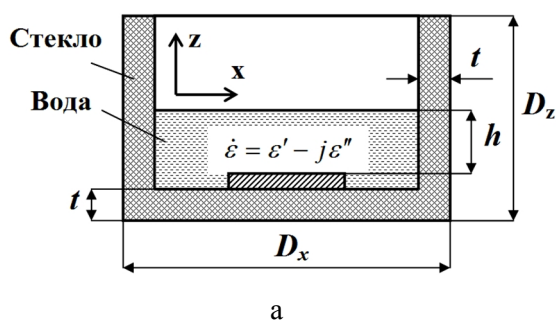


Рис. 2. Стеклянный (а) и пластиковый (б) контейнеры с инструментом, заполненные водой

Диэлектрические свойства материалов контейнера

Материал	Стекло Pyrex [5]	Пластик [6]
Диэлектрическая проницаемость	4,82	2,5
Коэффициент потерь	0,02603	0,0029
Электропроводность, Сим/м	0,00354	0,000395

Оба контейнера размещаются на высоте 40 мм от нижней стенки рабочей камеры.

Процессы рассеяния и поглощения ЭМ волн в резонаторе с объемно-неоднородным диссипативным заполнением описываются уравнением Гельмгольца, решения которого должны удовлетворять граничным условиям на металле, на границах раздела диэлектрических сред и на входе резонатора [7]. Зависимость рабочей среды (воды) стерилизатора от температуры можно учесть с помощью аналитических соотношений [4].

Для расчета ЭМ полей в рабочей камере СВЧ-стерилизатора в данной работе был использован пакет программ COMSOL V.5.2, базирующийся на трехмерном методе конечных элементов (МКЭ). В ходе численного моделирования были найдены распределения всех компонент ЭМ поля на заданной частоте при входной мощности источника 900 Вт. На рис. 3 и 4 показаны значения тангенциальной составляющей электрического поля ($\vec{E}_\tau$) на высоте 10 мкм над поверхностью металлической пластины для разных вариантов материала стенок контейнера.

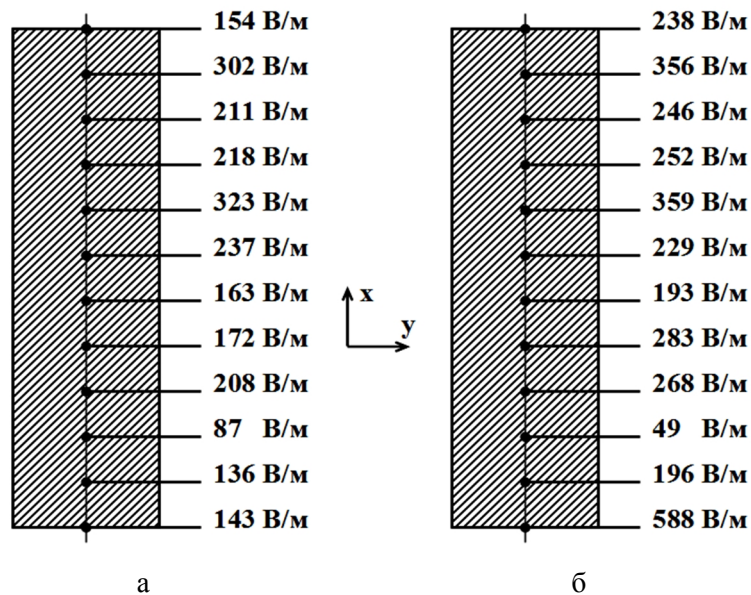


Рис. 3. Напряженность электрического поля вдоль центральной оси металлической пластины, помещенной в стеклянный контейнер, для температуры воды $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (а) и $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ (б)

Проведенные исследования продемонстрировали, что в случае замены стеклянного контейнера с толщиной стенок 5 мм на пластиковый с более тонкими стенками ($h = 2\text{ мм}$) напряженность поля в области взаимодействия возрастает и, соответственно, увеличивается скорость обработки инструментов СВЧ-излучением. При

этом если максимальная величина $\vec{E}_\tau = 588\text{ В/м}$ (рис. 3 б) для первого контейнера, то максимальное значение для второго контейнера уже составило $\vec{E}_\tau = 1056\text{ В/м}$ (рис. 4 б). Анализ всех значений $\vec{E}_\tau$ показывает повышение этого параметра примерно в 1,3...1,7 раза

при замене стеклянного контейнера пластиковым.

В данной работе с помощью ранее созданного СВЧ-стерилизатора [1, 2] была проведена экспериментальная проверка результатов численного моделирования процессов взаимодействия ЭМ излучения с рабочей средой и инструментом.

Для стеклянного контейнера температура кипения воды была достигнута за время 11 минут, в то время как для пластикового интервал времени достижения максимальной температуры составил 8 минут. Эти данные свидетельствуют об интенсификации исследуемых процессов.

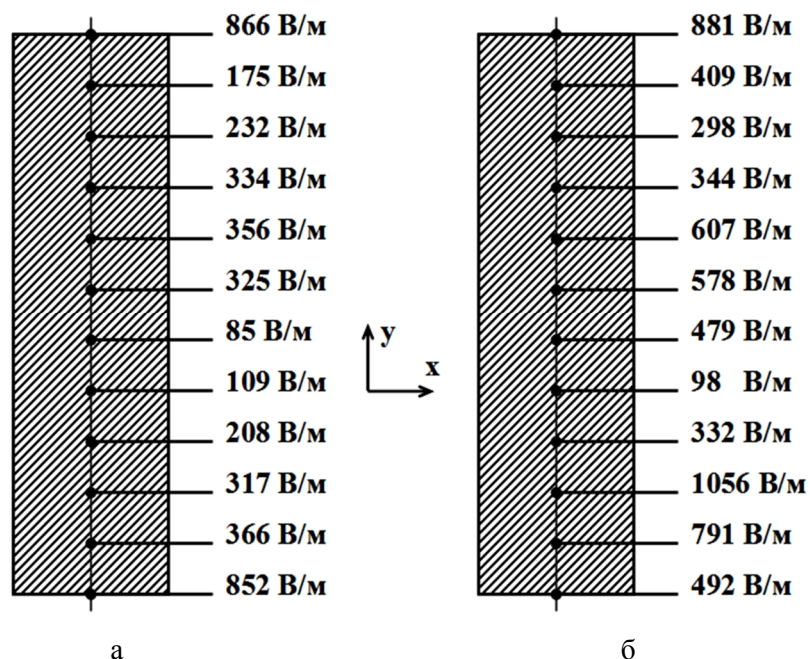


Рис. 4. Напряженность электрического поля вдоль центральной оси металлической пластины, помещенной в пластиковый контейнер для температуры воды $T = 20\text{ °C}$ (а) и 95 °C (б)

Проведенные исследования позволили установить, что в стерилизаторе с пластиковым контейнером удастся получить более высокие значения напряженности электрического поля вблизи поверхности металла, чем в ранее использованном для этих целей стеклянном контейнере. Кроме того, был выявлен еще один фактор, оказываю-

щий влияние на интенсивность СВЧ-стерилизации металлических объектов: ориентация определяющего размера инструмента вдоль стенок контейнера.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 22-19-00357).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Быстрый метод полной деkontаминации в СВЧ электромагнитном поле / В.Б. Байбурин, М.И. Балакин, В.В. Комаров и др. // Вопросы электротехнологии. 2022. № 2. С. 27-30.
2. Экспериментальные результаты СВЧ-стерилизации металлических инструментов медицинского назначения / В.Б. Байбурин, В.П. Мещанов, И.О. Лунева и др. // Биоме-

- дицинская радиоэлектроника. 2023. № 6. С. 77-82.
3. Байбурин В.Б., Комаров В.В., Мещанов В.П. Математическое моделирование электромагнитных полей в рабочей среде СВЧ-стерилизатора хирургических инструментов // Биомедицинская радиоэлектроника. 2023. № 6. С. 48-53.

4. **Ratanadecho P., Aoki K., Akahori M.** The characteristics of microwave melting of frozen packed beds using a rectangular waveguide // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2002. Vol. 50. № 6. P. 1495-1502. DOI: 10.1109/TMTT.2002.1006410.

5. **Pozar D.** Microwave Engineering. NY: Wiley, 2005. 700 p.

6. Dielectric characterization of plastic for microwave oven applications / L.C. Cos-

ta, A. Correia, A. Viegas et al. // Proceedings of the APHYS-2003 International Conference. 2003. Badajoz. Spain. 4 p.

7. **Байбурин В.Б., Комаров В.В., Мещанов В.П.** Моделирование электродинамических параметров микроволнового стерилизатора // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2022. Т. 25. № 4. С. 52-58.

Байбурин Вил Бариевич – доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Информационная безопасность автоматизированных систем» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

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

Артюхов Иван Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Мещанов Валерий Петрович – доктор технических наук, профессор, директор ООО НПП «НИКА-СВЧ», г. Саратов

Дорошенко Валентина Михайловна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Vil. B. Baiburin – Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Department of Information Security of Automated Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Vyacheslav V. Komarov – Dr. Sc. Tech., Professor, Department of Radio Electronics and Telecommunications, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Ivan I. Artyukhov – Dr. Sc. Tech., Professor, Department of Electrical and Power Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Valery P. Meshchanov – Dr. Sc. Tech., Professor, Director of JSC NPP NIKA-SVCH, Saratov

Valentina M. Doroshenko – PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor, Department of Radio Electronics and Telecommunications, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 28.08.24, принята к опубликованию 18.09.24

УДК 621.37: 621.385.69

**РАСШИРЕНИЕ ОБЛАСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ
БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕГО СВЧ-СТЕРИЛИЗАТОРА
И ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЕГО РАБОТЫ В ПОХОДНЫХ
И ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ**

**В.Б. Байбурин, В.П. Мещанов, А.А. Никифоров,
В.В. Комаров, И.И. Артюхов, В.М. Дорошенко,
Е.И. Тихомирова, Е.М. Телешева, В.А. Киркица**

**EXPANDING THE APPLICATIONS
OF THE HIGH-SPEED MICROWAVE STERILIZER AND ENSURING
ITS OPERATION IN THE FIELD CONDITIONS**

**V.B. Bayburin, V.P. Meshchanov, A.A. Nikiforov,
V.V. Komarov, I.I. Artyukhov, V.M. Doroshenko,
E.I. Tikhomirova, E.M. Telesheva, V.A. Kirkitsa**

В статье изложены основные конструкторско-технологические и динамические рабочие параметры мобильного компактного СВЧ-стерилизатора типовых медицинских инструментов, в первую очередь металлических, различного назначения. В дополнение к полученным ранее успешным результатам стерилизационной обработки хирургических инструментов, а также применяемых в косметической отрасли, изложены экспериментальные данные по стерилизации стоматологических инструментов. Были проведены эксперименты также с чисто пластиковой структурой в контейнерах, содержащих жидкость (вода), и без жидкости. С целью обеспечения работы СВЧ-стерилизатора в различного рода экспедициях, в походных и полевых условиях предложена схема электропитания магнетронного генератора, основанная на источнике постоянного тока.

Ключевые слова: стерилизация, мобильность, стоматологические инструменты, полевые и походные условия, технические параметры

The article presents the main design, technological and dynamic operating parameters of a mobile compact microwave sterilizer for thermal, primarily metal, medical instruments used for various purposes. In addition to the previously obtained successful results of sterilization processing of surgical instruments, as well as those used in the cosmetic industry, experimental data on sterilization of dental instruments are presented. Experiments were also conducted with a purely plastic structure in the containers containing liquid (water) and without liquid. In order to ensure operation of the microwave sterilizer in various expeditions, in the field conditions, a power supply circuit for a magnetron generator based on a DC source is proposed.

Keywords: sterilization, mobility, dental instruments, field and hiking conditions, technical parameters

Одним из актуальных направлений анализа и применения электротехнологии является создание различного рода аппаратуры и устройств медицинского назначения (рентгеновские установки, физиотерапевтические приборы и другие).

Известно, что одним из важнейших этапов проведения инвазивных медицинских операций является стерилизация хирургических инструментов, в особенности металлических. Традиционные методы стерилизации требуют значительного времени обработки, технологически сложны, часто связаны с применением стационарных установок высокой стоимости (несколько сотен тысяч рублей). Вместе с тем представляется перспективным использование в задачах стерилизации электромагнитного излучения, в частности СВЧ-диапазона. В данной работе приведены конкретные параметры малогабаритного компактного СВЧ-стерилизатора, результаты применения его в практике стерилизации, в том числе в стоматологии, а также предложен-

ные условия устойчивой работы стерилизатора в походных и полевых условиях.

Как следует из материалов публикаций [1-3], разработан мобильный компактный СВЧ-стерилизатор, соответствующий следующим техническим условиям. Стерилизатор имеет габариты 500×360×280 мм и вес не более 20 кг. Объем рабочей камеры 23,5 л. Рабочая камера предусматривает размещение контейнера размерами 300×300×190 мм, в котором помещается типовый набор медицинских инструментов, погруженных в жидкость (вода). Контейнер установлен на подставке, обеспечивающей его расположение на оси вывода энергии магнетронного генератора с непрерывной мощностью до 1 кВт. При этом электронная система управления обеспечивает непрерывное изменение мощности электромагнитного излучения от 200 до 1000 Вт. Время генерирования может плавно изменяться от 30 с до 20 мин. На рис. 1 представлен общий вид стерилизатора, а на рис. 2 – контейнер с инструментами, находящимися в водной среде.



Рис. 1. Внешний вид СВЧ-стерилизатора

В работах[1-4] приведены итоговые результаты полной деконтаминации споровой и бесспорной патогенной микрофлоры при мощностях облучения 900-1000 Вт за время не более 10 мин.

Уже отмечалось, что описываемый СВЧ-стерилизатор предназначен для применения в клиниках, амбулаторных пунк-

тах, больницах, а также для научно-исследовательских задач биомедицины. Дополнительными областями применения стерилизатора, как представляется, могут быть стоматология и косметология. В этих областях также требуется стерилизационная обработка стоматологических и косметологических инструментов: металличе-

ских, металлических с включением пластиковых элементов. При этом были получены

следующие успешные экспериментальные результаты.



Рис. 2. Внешний вид контейнера со стоматологическими, косметическими и хирургическими инструментами

В первой серии экспериментов стерилизационной обработке подвергались только металлические инструменты. Для инфицирования использовались: *Bacillus Cereus* (спорообразующая бактерия), *Staphylococcus* (золотистый стафилококк). Бактериологический анализ с проведением смывов с инструментов по общепринятой методике и посевов на чашке Петри показал положительный результат стерилизации за время 10 мин.

Во второй серии экспериментов стерилизационной обработке подвергались как металлические стоматологические инструменты, так и металлические инструменты с включением полимерных материалов. При этом для инфицирования использовались как указанные выше штаммы бактерий, так и штамм *E.coli* (кишечная палочка). Результат стерилизации положительный. Время обработки 10 минут.

Таким образом, обобщая данные экспериментов, изложенные в настоящей статье, а также в работах [1-4], можно обоснованно подтвердить эффективность экспериментального образца стерилизатора в различных областях применения. Вместе с тем остается малоизученным вопрос использования СВЧ-стерилизатора в походных, полевых условиях, различного рода экспедициях, горячих конфликтных зонах. Массогабаритные пока-

затели самого СВЧ-стерилизатора допускают практически ручную его транспортировку. Остается вопрос мобильности системы электропитания. Далее излагаются возможные пути решения этого вопроса.

Генератором СВЧ-колебаний в микроволновом стерилизаторе является стандартный магнетрон непрерывного генерирования с мощностью до 1 кВт и воздушным охлаждением. Для работы магнетрона требуется система питания от двух источников: один нагревает катод, другой служит для питания анодной цепи. Следует также отметить, что из-за нелинейности вольт-амперной характеристики магнетрона его выходная мощность существенно зависит от величины анодного напряжения, которое, в свою очередь, для типовых источников питания определяется сетевым напряжением. Результаты теоретических и экспериментальных исследований [5, 6] показывают, что при изменении сетевого напряжения на 1 % мощность магнетрона меняется на 4-5 %.

Известны различные подходы и технические решения задачи стабилизации режима работы магнетронов. В [7-9] предлагается использовать высоковольтные трансформаторы с магнитными шунтами. Однако анализ этих решений показал, что они не позволяют получить высокую точ-

ность стабилизации режима работы магнетрона. Возможен также вариант применения тиристорных регуляторов в цепях питания первичных обмоток анодных трансформаторов [10]. Однако в нашем случае импульсно-фазовое регулирование анодного напряжения является малоэффективным, так как магнетрон генерирует колебания только при превышении анодного напряжения порогового значения.

Для стабилизации режима работы магнетрона в составе СВЧ-стерилизатора необходимо иметь возможность управлять амплитудой напряжения между анодом и катодом. Различные варианты решения этой задачи рассмотрены в [11, 12].

Далее предлагается наиболее приемлемая в нашем случае схема электропитания магнетрона от источника постоянного тока

(рис. 3). Напряжение U_{d1} этого источника через импульсный преобразователь и сглаживающий фильтр подается на вход инвертора, который формирует переменное напряжение u_1 на первичной обмотке трансформатора ТА. Частота напряжения u_1 составляет десятки кГц, благодаря чему трансформатор ТА имеет существенно меньшую массу и габариты, чем трансформатор в типовой схеме. Амплитуда напряжения u_2 на вторичной обмотке трансформатора ТА регулируется за счет изменения напряжения U_{d2} на входе инвертора с помощью импульсного преобразователя. В качестве источника постоянного тока могут быть применены аккумуляторы, а также дизельный или бензиновый генераторы с установленными на выходе выпрямителями.

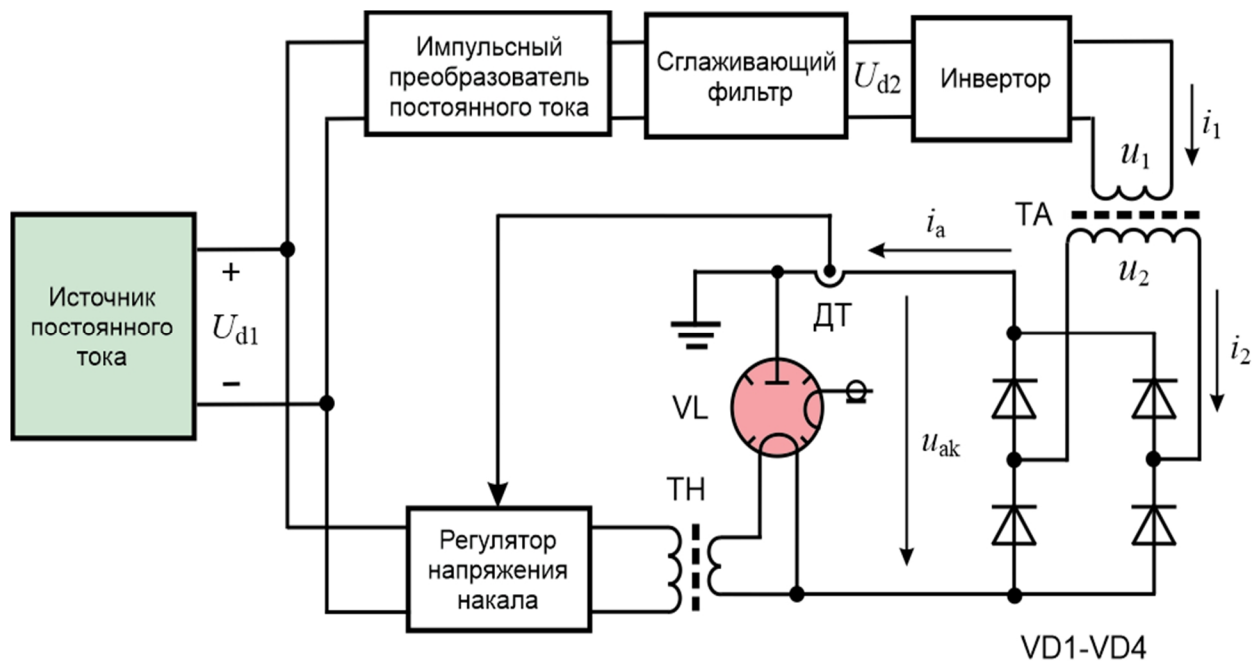


Рис. 3. Схема электропитания магнетрона от источника постоянного тока

Если источником постоянного тока является аккумуляторная батарея, то правильный выбор ее параметров является важным моментом разработки мобильного СВЧ-стерилизатора. Емкость аккумуляторной батареи Q в ампер-часах можно оценить по формуле

$$Q = \frac{P \cdot t}{U} \cdot k,$$

где P – подключаемая нагрузка; U – напряжение аккумуляторной батареи; t – время непрерывной работы; k – коэффициент, показывающий уровень использования аккумуляторной батареи.

С учетом КПД магнетрона и затрат энергии на вспомогательные цепи потребляемая СВЧ-стерилизатором от аккумуляторной батареи мощность составит порядка 1,5 кВт.

Если принять коэффициент $k = 0,8$ и напряжение 24 В, то для непрерывной работы СВЧ-стерилизатора в течение 30 минут потребуется аккумуляторная батарея емкостью

$$Q = \frac{1500 \cdot 0,5}{12} \cdot 0,8 = 50 \text{ А} \cdot \text{ч.}$$

Рассчитанное значение является минимальным. Практика показывает, что для повышения надежности следует применять аккумуляторные батареи с 20 %-м запасом емкости. Это означает, что в рассматриваемом случае емкость аккумуляторной батареи должна быть не менее 60 А·ч. Аккумуляторные батареи с такими параметрами имеют массу порядка 16 кг, объем – около 9 дм³.

Выводы

В работе изложены основные технические параметры СВЧ-стерилизатора, очерчены области практического применения, включая стоматологию. Предложена схема электропитания в экспедиционных условиях (походных, полевых условиях).

СВЧ-стерилизатор обеспечивает 100 % уничтожение всех видов патогенной микрофлоры (споровой и бесспоровой). Проект имеет надежную экономическую перспективу, в том числе на зарубежных рынках. Уже есть запросы на серийное промышленное производство стерилизаторов: «СУПРОМЕД» Узбекистан, СЭПО-ЗЭМ, Саратов, «ПРОКОНТ», Москва, и другие.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект 22-19-00357).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Результаты и перспективы применения сверхвысокочастотного излучения в задачах стерилизации биомедицинских объектов / В.Б. Байбурин, А.И. Тома, В.П. Мещанови др. // Биомедицинская радиоэлектроника. 2023. Т. 26. № 6. С. 25-32.

2. **Байбурин В.Б., Комаров В.В., Мещанов В.П.** Математическое моделирование электромагнитных полей в рабочей среде СВЧ-стерилизатора хирургических инструментов // Биомедицинская радиоэлектроника. 2023. Т. 26. № 6. С. 47-52.

3. Экспериментальные результаты СВЧ стерилизации металлических инструментов медицинского назначения / В.Б. Байбурин, В.П. Мещанов, И.О. Лунёва и др. // Биомедицинская радиоэлектроника. 2023. Т. 26. № 6. С. 76-82.

4. Factors Affecting the Process of Microwave Sterilization of Medical Instruments / V.B. Baiburin, V.V. Komarov, V.M. Doroshenko et al. // XVI International Scientific and Technical Conference Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE), Novosibirsk, Russian Federation. 2023. P. 230-233. DOI: 10.1109/APEIE59731.2023.10347580.

5. **Артюхов И.И., Земцов А.И., Тютманова В.В.** Экспериментальное исследование характеристик магнетронного генератора малой мощности // Вопросы электротехнологии. 2015. № 2 (7). С. 72-76.

6. Применение имитационного моделирования для исследования системы электропитания СВЧ электротехнологической установки / И.И. Артюхов, А.И. Земцов, Е.К. Пыльская и др. // Вопросы электротехнологии. 2020. № 4 (29). С. 56-63.

7. Optimization of high voltage power supply for industrial microwave generators for one magnetron / N. Elghazal, M. OuldAhmedou, M. Chraygane et al. // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. 2012. Vol. 46. № 1. P. 1-10.

8. **Zhang Y., Chen Y., Zhang B.** Modeling and analysis of the stable power supply based on the magnetic flux leakage transformer / International Power Electronics and Application Conference and Exposition. Shanghai, China. 2014. P. 614-618. DOI: 10.1109/PEAC.2014.7037927.

9. **Heggannavar M., Kulkarni H.** Power supply design for Magnetron power source from single-phase supply // International Con-

ference on Energy Systems and Applications. Pune, India. 2015. P. 546-551. DOI: 10.1109/ICESA.2015.7503409.

10. Artyukhov I., Zemtsov A., Pylskaya E. Power Supply System for Multi-Generator Conveyor Microwave Installation // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Sochi, Russia. 2021. P. 360-365, DOI: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446471.

11. Design and implementation of magnetron power supply and emulator /

N.A. Abodhir, A.J. Watson, C. Ji, J.C. Clare // 18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'16ECCE Europe). Karlsruhe, Germany. 2016. P. 1-10. DOI: 10.1109/EPE.2016.7695318.

12. Design of High Performance Magnetron Power Supply on the Basis of PWM Power Control / L. Jianbing, W. Hao, X. Tao, L. Pengfei // Journal of Physics: Conference Series. 1601. 2020. 022008. DOI: 10.1088/1742-6596/1601/2/022008.

Байбурин Вил Бариевич – доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Информационная безопасность автоматизированных систем» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Мещанов Валерий Петрович – доктор технических наук, профессор, директор ООО НПП «НИКА-СВЧ», г. Саратов

Никифоров Александр Анатольевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации», директор института электронной техники и приборостроения Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

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

Артюхов Иван Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Дорошенко Валентина Михайловна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Vil B. Baiburin – Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Department of Information Security of Automated Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Valery P. Meshchanov – Dr. Sc. Tech., professor, director of JSC NPP «NIKA-SVCH», Saratov

Alexander A. Nikiforov – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Radio Electronics and Telecommunications, Director of the Institute of Electronic Engineering & Instrumentation, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Vyacheslav V. Komarov – Dr. Sc. Tech., Professor, Department of Radio Electronics and Telecommunications, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Ivan I. Artyukhov – Dr. Sc. Tech., Professor, Department of Electrical and Power Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Valentina M. Doroshenko – PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor, Department of Radio Electronics and Telecommunications, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Тихомирова Елена Ивановна – доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой «Экология и техносферная безопасность» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Телешева Елизавета Михайловна – кандидат биологических наук, доцент кафедры «Экология и техносферная безопасность» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Киркица Вячеслав Александрович – аспирант, ассистент кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Elena I. Tihomirova – Dr. Sc. (Biology), Professor, Department of Ecology and Technosphere Safety, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Elizaveta M. Telesheva – PhD (Biology), Associate Professor, Department of Ecology and Technosphere Safety, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Vyacheslav A. Kirkitsa – Postgraduate, Assistant Lecturer, Department of Radio Electronics and Telecommunications, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 28.08.24, принята к опубликованию 18.09.24

УДК 621.37, 621.385.69

ОСОБЕННОСТИ СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ СВЧ-СТЕРИЛИЗАТОРОВ МЕДИЦИНСКИХ ОБЪЕКТОВ

**В.Б. Байбурин, А.А. Никифоров, В.П. Мещанов,
В.М. Дорошенко, Я.А. Пахомов**

CHARACTERISTICS OF SERIAL PRODUCTION OF HIGH-SPEED MICROWAVE STERILIZERS FOR MEDICAL OBJECTS

**V.B. Bayburin, A.A. Nikiforov, V.P. Meshchanov,
V.M. Doroshenko, Y.A. Pakhomov**

В работе указаны основные блоки, входные и выходные параметры экспериментального образца и СВЧ-стерилизатора, обеспечивающие 100% стерилизацию инструментов в широких областях применения: хирургия, стоматология, косметология. Экспериментальный образец стерилизатора адаптирован к возможностям современного технологического оборудования, что позволяет реализовать массовый серийный выпуск данного изделия. Указаны основные участки и этапы серийного производства, включающие как одновременное производство отдельных блоков и конструкций устройства, так и покупные комплектующие, связанные с этапами сборки стерилизатора в целом. При этом указано оборудование необходимое для выполнения таких технологических операций, таких как раскройка листового металла, его гибка и сварка, порошковая окраска элементов конструкции, поверхностный монтаж (SMD-монтаж) компонентов, рентгеновский и оптический контроль микроконтроллеров, производство контейнеров и др.

Ключевые слова: СВЧ-стерилизатор, серийное производство, сборка изделия, этапы сборки

Основные блоки конструкции стерилизатора на рис. 1.

The paper specifies the main units, input and output parameters of the experimental model and microwave sterilizer, providing 100% sterilization of instruments in a wide range of applications, including surgery, dentistry, and cosmetology. An experimental model of the sterilizer is adapted to the capabilities of modern technological equipment, which allows for the mass serial production of the given product. The main sections and stages of serial production are specified, including both simultaneous production of individual units and device structures, and commercial components associated with the stages of assembly of the sterilizer as a whole. The equipment necessary for performing such technological operations as cutting sheet metal, bending and welding, powder coating of structural elements, surface mounting (SMD mounting) of components, X-ray and optical control of microcontrollers, container production, etc. is specified.

Keywords: microwave sterilizer, serial production, product assembly, assembly stages

Внешний вид экспериментального образца стерилизатора представлен на рис. 2 [1].

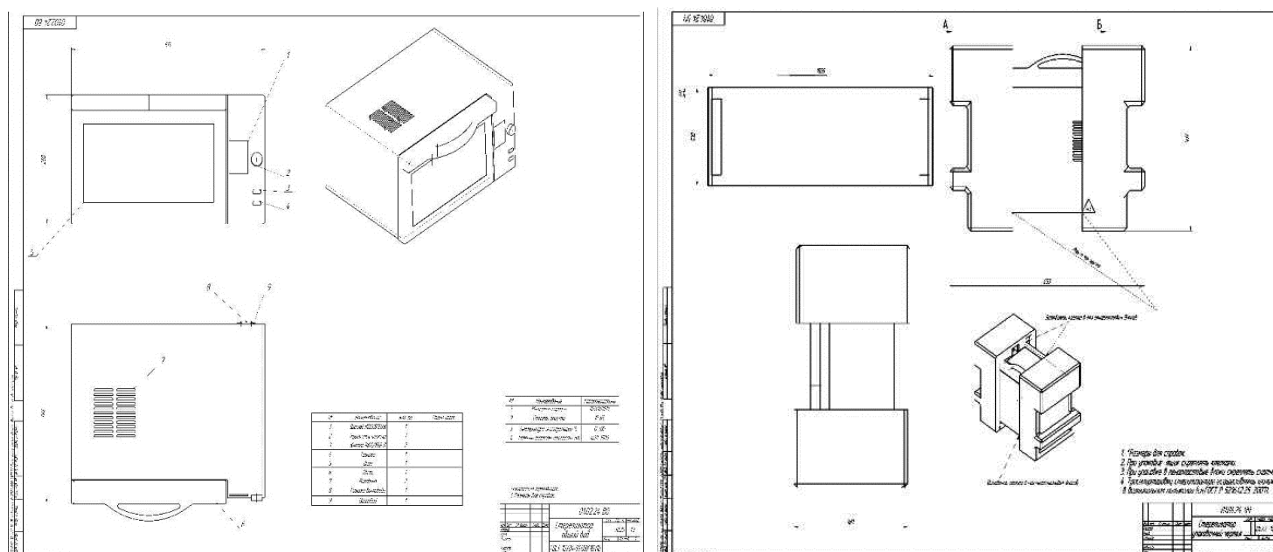


Рис. 1. Основные блоки конструкции стерилизатора



Рис. 2. Внешний вид экспериментальной установки для СВЧ-стерилизации

Контейнер с инструментами, расположенными в воде, помещался в резонатор с размерами 500×360×280 мм. Этот контейнер устанавливался на электрической подставке и располагался в пучности стоячей волны длиной 12,24 см [2].

Сам контейнер, размещаемый в рабочей камере, имеет размеры 300×300×190 мм. Таким образом, среднее расстояние между генератором и инструментами составляло 15 см. Схема исследуемой установки приведена на рис. 3.

Основными блоками конструкции являются: источник СВЧ излучения на основе магнетронного генератора, схема управления динамическими параметрами,

резонатор рабочей камеры, волноведущая структура, контейнер, содержащий инструменты в жидкой среде (вода) [3].

Типовой производственный процесс изготовления СВЧ стерилизатора включает в себя свыше пятнадцати групповых и типовых технологических процессов механической обработки и сборки. Целесообразно, чтобы производство насчитывало, как минимум пять участков.

1. Участок механической обработки.
2. Участок сборки печатных плат.
3. Участок изготовления жгутов.
4. Участок окончательной сборки изделия.
5. Участок упаковки, хранения и отгрузки стерилизаторов.

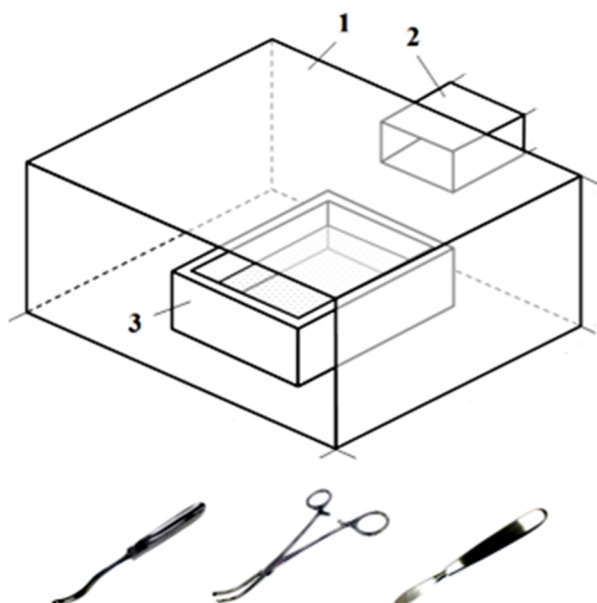


Рис. 3. Геометрическая модель микроволнового стерилизатора: полость резонатора (1), стандартный волновод (2) и пластиковый контейнер, наполненный водой (3)

На данном участке изготавливаются корпусные детали и детали для отведения тепла. Данные детали изготавливают их листовой заготовки, поэтому для их производства целесообразно использовать полуавтоматическое оборудование для об-

работки листового металла с ЧПУ. Для заготовительной операции – установка лазерной резки для раскроя нержавеющей металлического листа и формирования вентиляционных и технологических отверстий, (оптоволоконная установка лазерного раскроя с ЧПУ рис. 4), листогибочное оборудование, например (гидравлический листогибочный пресс с ЧПУ рис. 5).

Для выполнения типового технологического процесса сборки электронных плат системы управления содержащих в своём составе SMD компоненты целесообразно применение комплексной линии монтажа SMD элементов, включающих:

- систему подготовки плат к выполнению технологического процесса (миксер для подготовки паяльной пасты (рис. 6), принтер (рис. 7) и технологический трафареты для нанесения паяльной пасты на плату);
- систему установки SMD элементов (рис. 7);
- многозонную печь оплавления (рис. 8);
- систему мониторинга качества выполнения технологического процесса, включающего в себя рентген контроль (рис. 9.) и оптическую инспекцию (рис. 10).



Рис. 4. Оптоволоконный лазерный станок для резки металла



Рис. 5. Гидравлический листогибочный пресс



Рис. 5. Миксер для подготовки паяльной пасты



Рис. 6. Принтер для нанесения паяльной пасты на плату



Рис. 7. Многоцелевая система установки компонентов



Рис. 8. Многозонная печь оплавления



Рис. 9. Рентген контроль

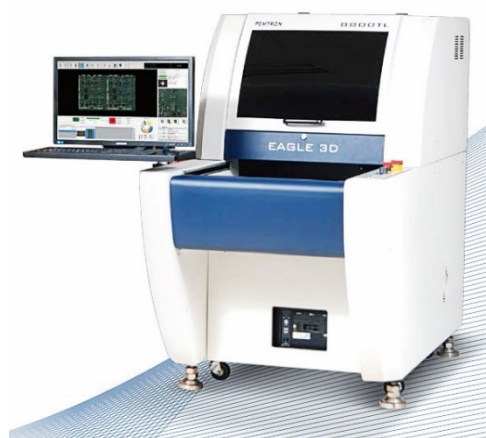


Рис. 10. Оптическая инспекция

Для печатных плат с выводным монтажом (например, силовой блок электропитания) необходимо оборудование:

– для формовки выводов в нескольких плоскостях (моторизованная установка для формовки в двух плоскостях и обрезки выводов рис. 11);

– автоматической установки элементов (интеллектуальный автоматический установщик компонентов);

– линия селективной пайки (рис. 13-14).

Последняя операция при изготовлении печатных плат – это отмывка (рис. 15) от флюса и нанесение защитного покрытия (рис. 16).

Участок изготовления жгутов должен быть оснащён станком для мерной резки и зачистки проводов и автоматизирован-

ной обжимной машиной для установки контактов.

Участок сборки должен содержать следующее оборудование: столы производственные с комплектом слесарно-сборного, измерительного и проверочного испытательного оборудования, в том числе по проверке основных динамических параметров стерилизатора (мощности и длительности генерирования).

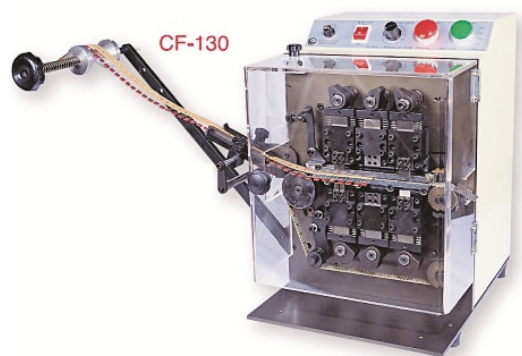


Рис. 11. Моторизованная установка для формовки в двух плоскостях и обрезки выводов



Рис. 12. Интеллектуальный автоматический установщик компонентов



Рис. 13. Линия селективной пайки

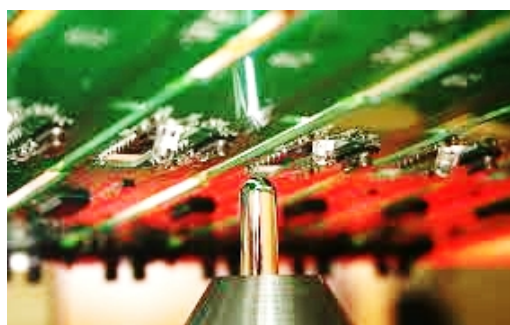


Рис. 14. Технологический процесс пайки «микроволной» припоя



Рис. 15. Отмывка плат от флюса

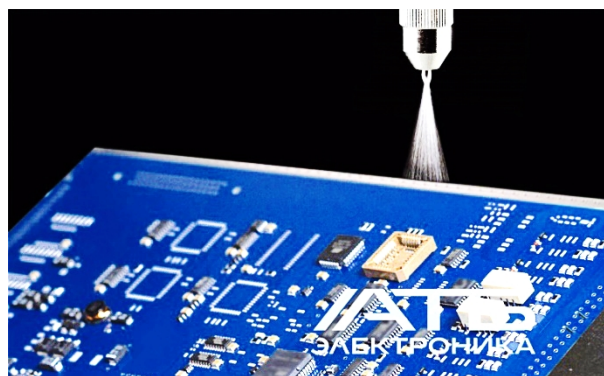


Рис. 16. Нанесение защитного покрытия

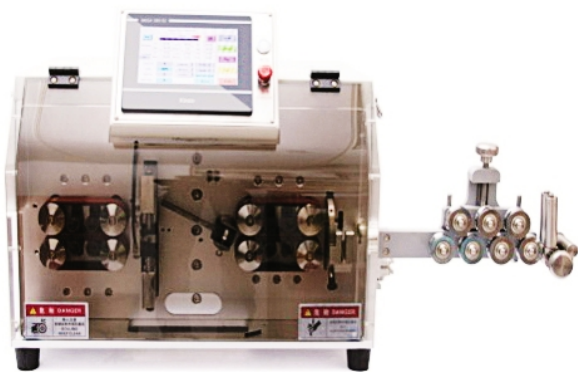


Рис. 17. Станок для мерной резки и зачистки проводов



Рис. 18. Станок для установки и фиксации контактов

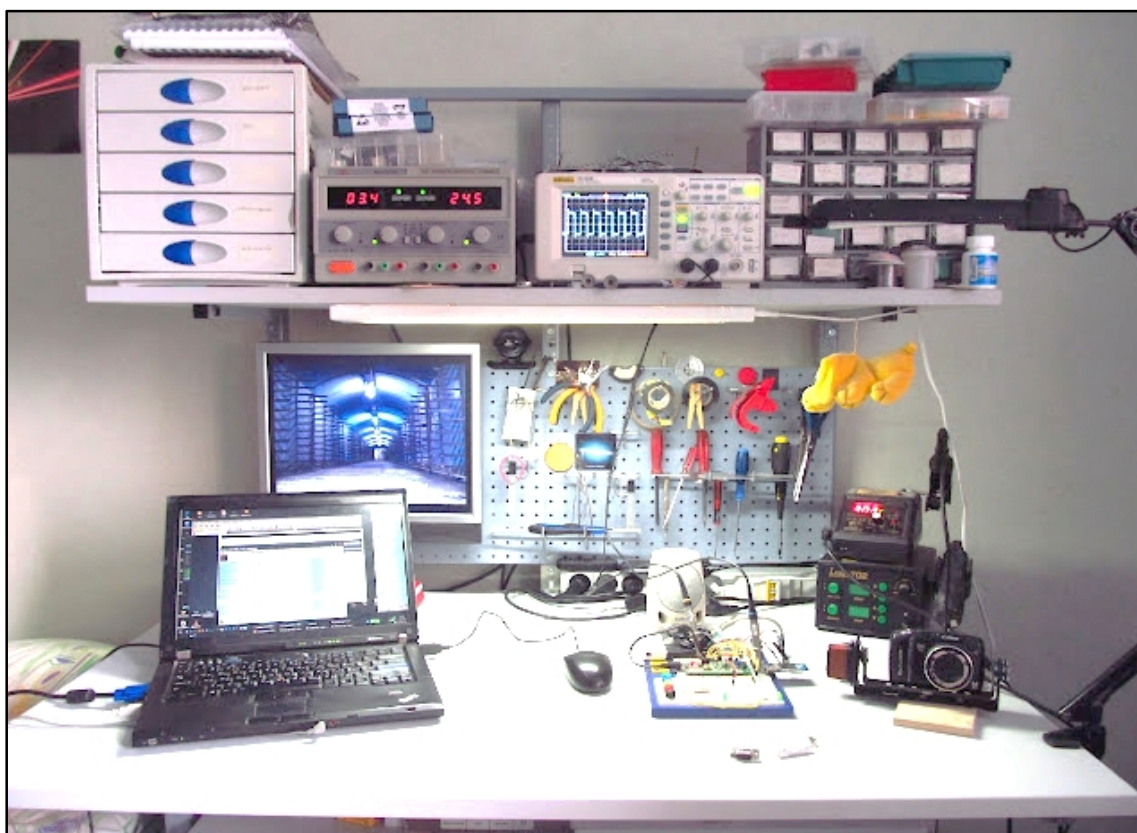


Рис. 19. Оборудованное рабочее место сборщика СВЧ стерилизатора

Участок сборки и складирования содержит оборудование автоматизированной транспортировочной линии конвейерного типа и складирования.

Конечное качество указанного по всем вышеуказанным технологическим участкам производимого оборудования определяет объём серийного выпуска продукции.

Комплектация покупными контейнерами (для загрузки обрабатываемых инструментов) реализуется в порядке укомплектования и упаковывания готовых изделий.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект 22-19-00357)

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Результаты и перспективы применения сверхвысокочастотного излучения в задачах стерилизации биомедицинских объектов / В.Б. Байбурин, А.И. Тома, В.П. Мещанов и др. // Биомедицинская радиоэлектроника. 2023. Т. 26. № 6. С. 25-32.

2. **Байбурин В.Б., Комаров В.В., Мещанов В.П.** Математическое моделирование электромагнитных полей в рабочей

среде СВЧ-стерилизатора хирургических инструментов // Биомедицинская радиоэлектроника. 2023. Т. 26. № 6. С. 47-52.

3. Экспериментальные результаты СВЧ стерилизации металлических инструментов медицинского назначения / В.Б. Байбурин, В.П. Мещанов, И.О. Лунёва и др. // Биомедицинская радиоэлектроника. 2023. Т. 26. № 6. С. 76-82.

Байбурин Вил Бариевич – доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Информационная безопасность автоматизированных систем» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Никифоров Александр Анатольевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации», директор института электронной техники и приборостроения Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Мещанов Валерий Петрович – доктор технических наук, профессор, директор ООО НПП «НИКА-СВЧ», г. Саратов

Дорошенко Валентина Михайловна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Vil B. Baiburin – Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Department of Information Security of Automated Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Alexander A. Nikiforov – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Radio Electronics and Telecommunications, Director: Institute of Electronic Engineering & Instrumentation, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Valery P. Meshchanov – Dr. Sc. Tech., Professor, Director of JSC NPP NIKA-SVCH, Saratov

Valentina M. Doroshenko – PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor, Department of Radio Electronics and Telecommunications, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 28.08.24, принята к опубликованию 18.09.24

УДК 621.793.14

**ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ
НА ТИТАНОВУЮ МИШЕНЬ ПРИ ВАКУУМНОМ РАСПЫЛЕНИИ
НА СТРУКТУРУ И МИКРОТВЕРДОСТЬ
ФОРМИРУЕМЫХ НА СТАЛИ СЛОЕВ**

О.В. Бирюкова, А.А. Фомин, В.А. Кошуро

**EFFECT OF THE PARAMETERS OF LASER ACTION
ON A TITANIUM TARGET DURING VACUUM SPRAYING
ON THE STRUCTURE AND MICROHARDNESS
OF STEEL LAYERS**

O.V. Biryukova, A.A. Fomin, V.A. Koshuro

Целью данной работы заключалась в определении возможности использования лазерного излучения для испарения мишени в условиях технического вакуума и последующего формирования титаносодержащих слоев на нержавеющей хромоникелевой стали, а также определении влияния энергии импульса и дистанции напыления на структуру и микротвердость формируемых слоев. Проводились исследования структуры, состава и микротвердости титановых покрытий, сформированных на стальных подложках лазерным распылением мишени при интенсивности лазерного излучения от 19 кВт/мм² до 41 кВт/мм², длительности прямоугольного импульса оставалась неизменной (2 мс), при постоянной частоте импульсов 2 Гц и изменяющейся дистанции между мишенью и подложкой (2,5 и 5 мм). Установлено, что в результате лазерной абляции и последующем осаждении образуются покрытия, состоящие из титана, характеризующиеся средним размером структурных элементов 31-47 мкм, поверхностной микротвердостью 311-1025 HV_{0,98}, толщиной 10-60 мкм. Установлено, что наибольшее влияние на свойства слоев оказывает интенсивность лазерного излучения. Максимальной твердостью отличаются покрытия, полученные при дистанции 5 мм и интенсивности излучения

The work is aimed determine a possibility of using laser radiation to vaporize a target in a technical vacuum and subsequent formation of titanium-containing layers over stainless chromium-nickel steel, as well as to determine the effect of pulse energy and sputtering distance on the structure and microhardness of the formed layers. The structure, composition and microhardness of titanium coatings formed over steel substrates by laser spraying of the target unit were studied at the laser radiation intensity from 19 kW/mm² to 41 kW/mm², where duration of the rectangular pulse remained unchanged (2 ms), at a constant pulse frequency of 2 Hz and a varying distance between the target and the substrate (2.5 and 5 mm). It was found that as a result of laser ablation and subsequent deposition, the coatings consisting of titanium are formed, characterized by an average size of the structural elements of 31-47 microns, the surface microhardness of 311-1025 HV_{0,98}, and thickness of 10-60 microns. It is established that intensity of laser radiation has the greatest influence on the properties of the layers. The coatings obtained at the distance of 5 mm and the radiation intensity of 26 kW/mm² differ in the maximum hardness. At the same time, the average size of the structural elements is 41 microns.

26 кВт/мм². При этом средний размер структурных элементов составляет 41 мкм.

Ключевые слова: *нержавеющая хромоникелевая сталь, 12X10НТ, вакуумное лазерное распыление, титан, покрытие, элементный состав, структура поверхности, микротвердость*

Введение

Развитие восстановительной медицины, в том числе персонализированной, влечет за собой необходимость создания специализированных материалов, покрытий и технологий их получения.

В медицине широко применяются различные сплавы на основе железа для изготовления имплантируемых устройств, таких как ортопедические протезы, тонкостенные стенты и зубные брекеты [1]. Аустенитная нержавеющая хромоникелевая сталь марки 12X10НТ обладает высокой коррозионной стойкостью, что является важным аспектом биосовместимости. Известно, при функционировании имплантируемых изделий имеется возможность перехода ионов с поверхности в окружающую биосреду [2], а также загрязнение тканей продуктами износа, что нарушает пролиферацию и дифференцировку клеток. Вследствие этого может происходить развитие процессов воспаления и отторжения имплантатов [3-4]. С целью минимизации указанных процессов применяют нанесение упрочняющих или биосовместимых слоев из металлических и керамических материалов, например, Ti, TiNi, Nb, TiN, TiO₂, Ca₁₀(PO₄)₆(OH)₂ и др. [5-7]. Наибольшее применение для повышения функциональных характеристик нашли титановые покрытия [8].

Известны различные методы формирования титановых покрытий: газотермическое и вакуумное напыление (химическое осаждение из паровой фазы (CVD), физическое осаждение из паровой фазы (PVD) [9-11]. К недостаткам выше указанных методов можно отнести высокую стоимость оборудования, низкую производительность для PVD и CVD технологий, а для газотермического напыления не всегда удовлетво-

Keywords: *stainless chromium-nickel steel, 12X10NT, vacuum laser spraying, titanium, coating, elemental composition, surface structure, microhardness*

рительную адгезию. С развитием технологий в промышленности все чаще применяются методы лазерной обработки, в том числе для модификации поверхностных слоев. Например, воздействие концентрированного потока энергии на предварительно сформированные покрытия позволяет снизить объемную пористость и повысить адгезионно-когезионную прочность [12-13]. Таким образом, в технике и производстве наблюдается тенденция к расширению применения лазерной обработки.

Известны технологии лазерной обработки (ЛО), например обработка в реакционной среде, наплавка и распыление в вакууме, позволяющие получать покрытия с механическими, химическими и физическими свойствами, зависящими от энергетических параметров [14].

Например, лазерная наплавка при мощности 3 кВт позволяет сформировать из порошковых материалов, содержащих преимущественно кобальт или ванадий упрочненные слои. Последующая термическая обработка проводится при 500-870 °С [15]. При мощности лазерного излучения 1000-2000 Вт из порошка Fe-Cr-B-Si на поверхности аустенитной нержавеющей стали сплавлением формируют слои, характеризующиеся твердостью до 820 HV. Производительность процесса достигает 9 г/мин. Материал наплавляется однородным слоем, в ряде случаев наблюдается образование значительных трещин [16]. Технологии наплавки в основном широко применяются в инструментальном производстве.

Одним из методов является лазерное распыление материалов в вакууме (LPVD) [17-18]. Например, вакуумное лазерное напыление применяется для формирования наноструктурных слоев титана на поверхности керамики, покрытой слоем меди

толщиной 350 нм. При давлении 10^{-4} Па и воздействии лазерного луча, характеризуемого энергией импульса 200 мДж и длительностью 10 нс, под углом 45° происходит испарение титановой мишени. В результате фрактальные кластеры титана осаждаются на поверхности медного слоя. Скорость роста титанового покрытия достигает $5,7 \pm 20\%$ нм/мин [19]. Вакуумная среда в данном случае позволяет увеличить производительность, снизить содержание кислорода и иных газов в формируемых слоях. Возможно использование аргона в качестве защитной среды [20].

Следовательно, целью данной работы является определение возможности использования лазерного излучения для испарения мишени и формирования титаносодержащих слоев на нержавеющей хромоникелевой стали, а также оценить влияние энергии импульса и дистанции напыления на структуру и микротвердость характеристики получаемого покрытия.

Методика эксперимента

В исследованиях использовались образцы в виде пластин $25 \times 25 \times 3$ мм из нержавеющей хромоникелевой стали марки 12Х10НТ. Перед нанесением проводилась очистка образцов от загрязнений в водном растворе этилового спирта.

Для проведения эксперимента был выбран прямой способ формирования покрытий (рис. 1). Метод заключается в непосредственном воздействии концентрированного потока лазерного излучения на материал мишени и последующем осаждении испаренных частиц материала на подложке.

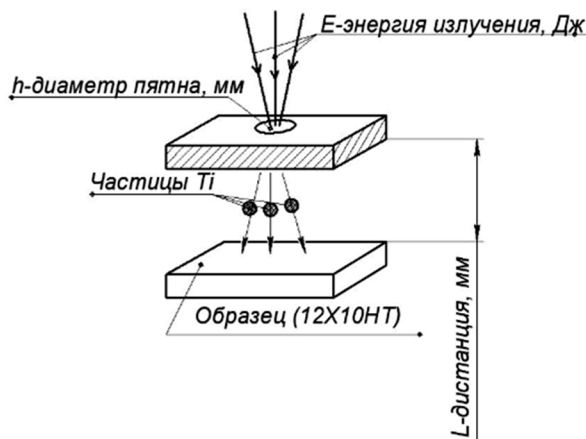


Рис. 1. Схематичное изображение прямого способа процесса формирования покрытий при воздействии лазерного излучения на материал мишени

Процесс испарения титановой мишени толщиной 0,6 мм под действием лазерного излучения проводился с использованием лабораторной вакуумной камеры (рис. 2), позволяющей проводить ЛО при давлении газовой среды 50-100 Па.

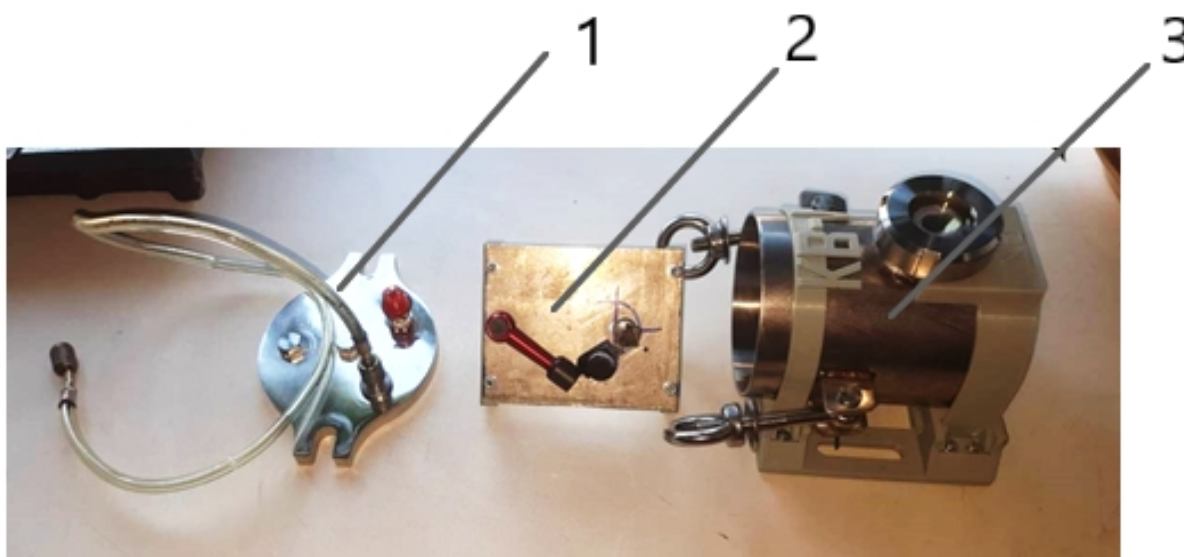


Рис. 2. Общий вид камеры:

1 – крышка камеры; 2 – столик для установки образца и мишени; 3 – камера

Процесс нанесения покрытий проводился при помощи лазерной установки LRS-50A при различных значениях напряжения лампы накачки и соответственно энергии импульса и дистанции между мишенью и образцами согласно таблице 1. Частота (3 Гц), форма (прямоугольная) и длительность (2 мс) импульса оставались неизменными.

Энергия (E , Дж) единичного импульса при различных значениях напряжения лампы накачки (U , В) и длительности воздействия (τ , мс) определялась экспериментально портативным прибором для определения мощности и энергии лазерного излучения «Laserstar» от «OPHIR», Laser Measurement

Group. Мощность импульса рассчитывалась с учетом длительности по известной формуле

$$P_{имп} = \frac{E_{имп}}{\tau}, \text{ Вт}, \quad (1)$$

где $E_{имп}$ – энергия импульса, Дж; τ – длительность импульса, с [21].

Для определения интенсивности излучения определялись фактические размеры пятна обработки путем исследования мишени после обработки с помощью анализатора изображений микроструктур «АГПМ-6М» с последующей обработкой в программе Metallograph.

Таблица 1 – Режимы лазерного распыления титановой мишени

Серия образцов	Дистанция L , мм	Напряжение лампы накачки U , В	Энергия импульса, Дж	Мощность импульса $P_{имп}$, Вт	Площадь пятна, мм ²	Интенсивность излучения, Вт/мм ²
I	5	450	5,49	2745	0,08	36387,25584
II	2,5	450	5,49	2745	0,07	41579,2543
III	5	425	4,76	2380	0,09	26227,05133
IV	2,5	425	4,76	2380	0,09	27840,6532
V	2,5	400	4,04	2020	0,10	19855,31179

Особенности структуры поверхности покрытий, сформированных на стали лазерным напылением, исследовались с использованием сканирующего электронного микроскопа Asprex EXplorer, микроскопа МБС-10 и оптической системы микротвердомера «ПМТ-3». Для исследования микроструктуры образцов изготавливались поперечные микрошлифы согласно известной методике [22]. Размер структурных элементов и толщина слоев определялись с помощью анализатора изображений микроструктур АГПМ-6М с последующей обработкой в программе Metallograph. Микротвердость определяли по методу Виккерса (ГОСТ 9450-76) с помощью микротвердомера ПМТ-3М при нагрузке на индентор 100 гс. Статистическая обработка полученных результатов проводилась с использо-

ванием программных продуктов EXEL и DATAfit 9.

В результате лазерного воздействия на поверхность титановой мишени формировался поток отдельных частиц, который и обеспечивал структурообразование покрытия на нержавеющей стали (рис. 3). На поверхности образцов наблюдалось наличие расплавленных частиц мишени, нагара, а также изменение цвета на образцах, что говорит об окислении материала мишени.

Покрyтия формировались из сплэтов округлой формы (рис. 4) со средним линейным размером от 31 мкм до 47 мкм (табл. 2). Как видно на рис. 4, сплэты частично наслаивались друг на друга, но в основном состоят из отдельных капель. На рис. 5 приведены диаграммы распределения частиц по размеру для каждой из серий.

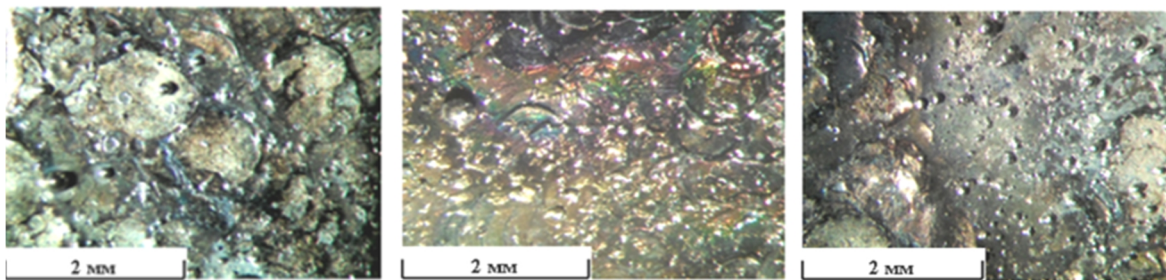


Рис. 3. Структура поверхности стальных образцов после нанесения покрытия (МБС-10)

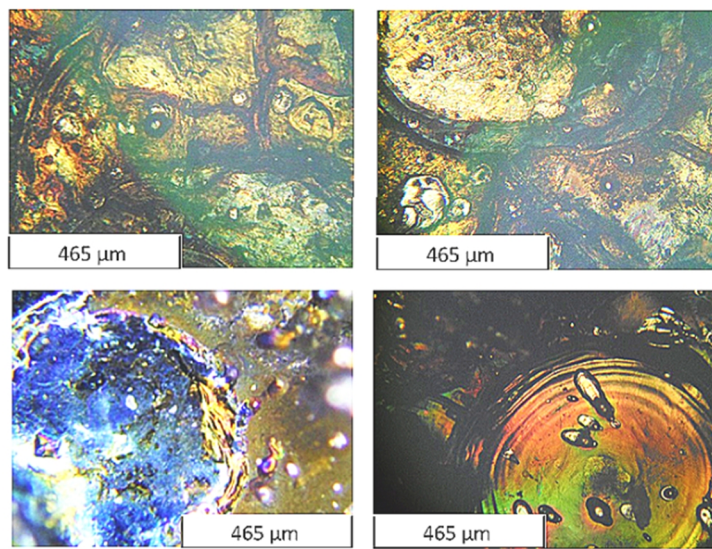
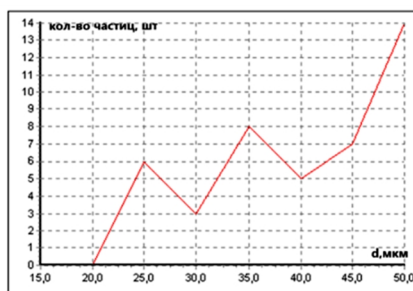


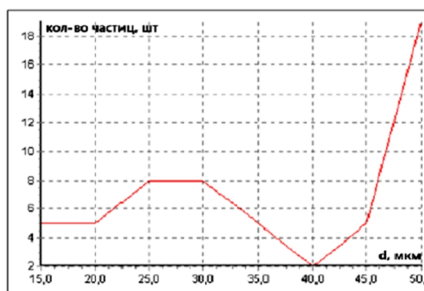
Рис. 4. Структурные элементы покрытия (микроструктура поверхности (микротвердомер пмт-3))

Таблица 2 – Линейный размер частиц

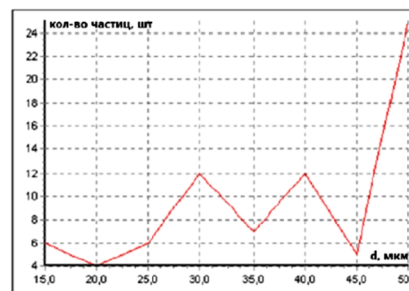
Серия образцов	Дистанция L , мм	Мощность импульса $P_{имп}$, Вт	Интенсивность излучения, Вт/мм ²	Размер частиц, мм
I	5	2745	36387,25584	31±24
II	2,5	2745	41579,2543	47±29
III	5	2380	26227,05133	41±29
IV	2,5	2380	27840,6532	38±18
V	2,5	2020	19855,31179	40±20



а



б



в

Рис. 5. Диаграммы распределения частиц по размеру: а) серия образцов II ($P_{имп}=2745$ Вт; $L=2,5$ мм); б) серия образцов III ($P_{имп}=2380$ Вт; $L=5$ мм); в) серия образцов V ($P_{имп}=2020$ Вт; $L=2,5$ мм)

Полученные данные позволяют сделать вывод, что распределение структурных элементов по размеру и количеству носит нормальный характер. При этом частицы имеют наибольший размер при меньшей дистанции (2,5 мм) и наибольшей мощности импульса 2745 Вт. Поэтому основными параметрами, оказывающими влияние на

размер частиц, являются дистанция и мощность импульса лазерного излучения.

Режимы ЛО оказывали влияние на структуру и толщину формируемых слоев. Слои в целом формировались из отдельных частиц (рис. 6 а) в ряде случаев в результате их наслоения, образующих сплошной слой (рис. 6 б).

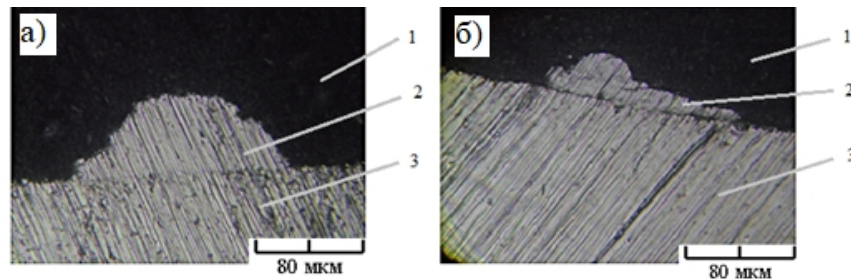


Рис. 6. Структура покрытий: а) отдельная частица, где 1 – эпоксидная смола; 2 – напыленная частица титана; 3 – основа (нержавеющая сталь); б) слой покрытия, где 1 – эпоксидная смола; 2 – слой покрытия; 3 – основа (нержавеющая сталь)

Исследование микроструктуры полученного покрытия проводилось в режиме вторичных электронов. На рис. 7 видно, что в процессе лазерного распыления титановой мишени происходило формирование покрытия, толщина которого составляет более 1 мкм, представленное как равномерным слоем, так и отдельными крупными каплями титана (рис. 3 область 3). В процессе формирования покрытия вследствие высоких температур нагрева образца сформировался диффузный слой (рис. 3, область 2).

Анализ элементного состава покрытия в режиме отраженных электронов позволил установить, что слои формируются из чистого титана. Кислорода и азота не обнаружено. Наличие железа говорит о процессе

взаимной диффузии между напыляемым материалом и стальной основой (рис 8).

В результате измерений установлено, что формируемые слои характеризуются большей, чем у нержавеющей стали, микротвердостью (табл. 3). Максимальными значениями твердости отличаются слои, полученные при максимальной дистанции между мишенью и поверхностью образца. Большой разброс данных свидетельствует о частичном окислении расплавленных частиц мишени. С увеличением энергии импульса в процессе обработки происходило оплавление поверхности, вероятно с одновременным протеканием фазовых превращений за счет высоких температур нагрева, что способствует увеличению микротвердости.

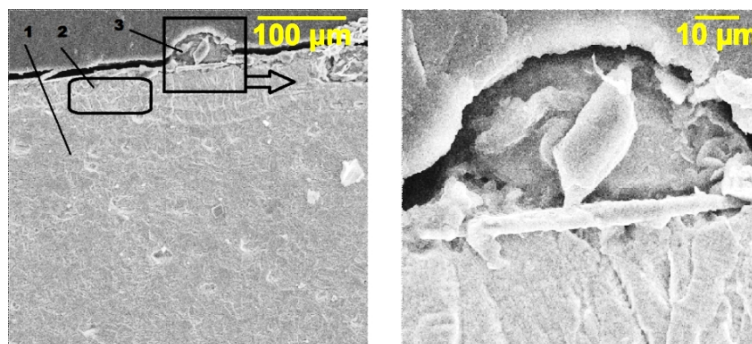


Рис. 7. Микроструктура покрытия, сформированного при $P_{имп} = 2745$ Вт; $L = 2,5$ мм, где: 1 – подложка, 2 – диффузный слой; 3 – покрытие

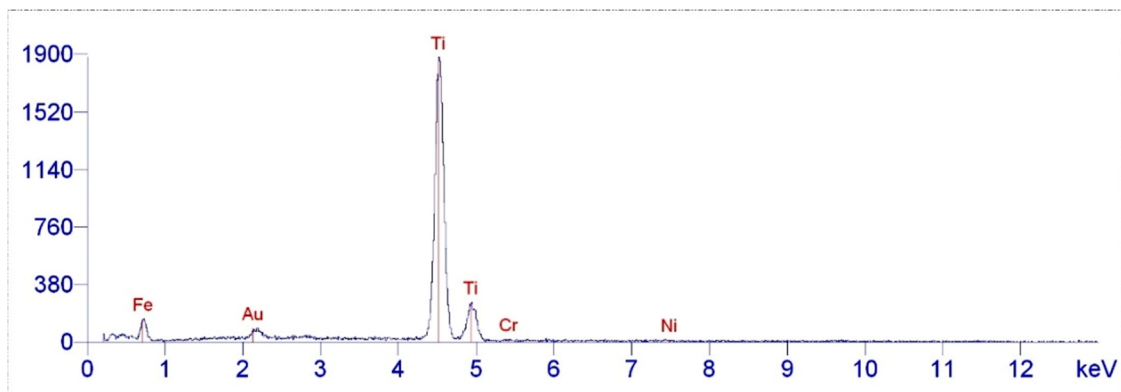


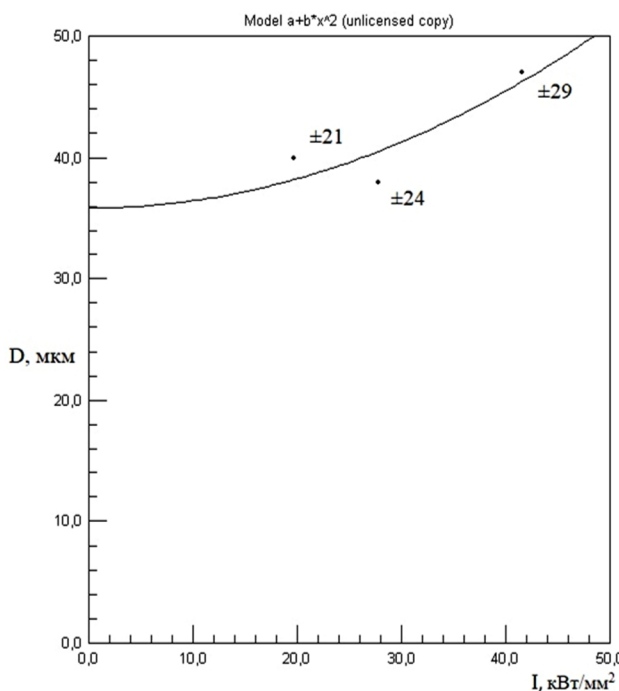
Рис. 8. Энергодисперсионный рентгеновский анализ (ЭДРА) образца I серии

Таблица 3 – Значения микротвердости образцов

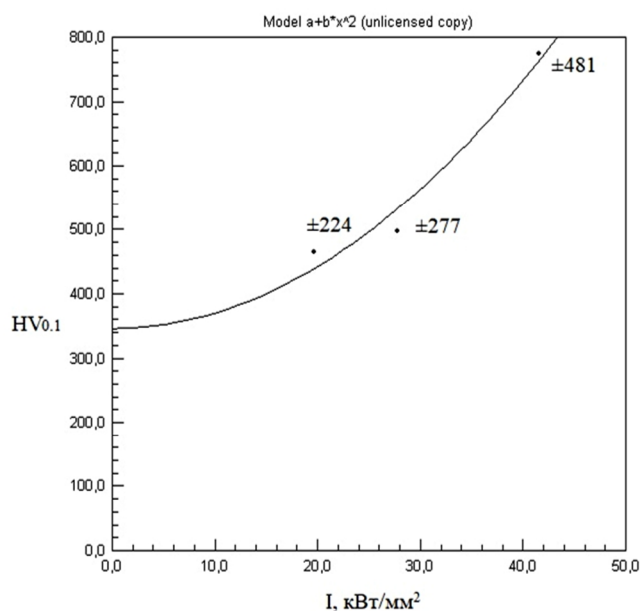
Серия образцов	Среднее значение микротвердости поверхности HV _{0,98}	Среднее значение микротвердости шлифа HV _{0,98}	Микротвердость основы, HV _{0,98}
I	416,6±91,8	326±171	238±87,3
II	311,2±39,3	774±481	177±115,6
III	1025±259,6	498±277	306±146,1
IV	649,4±195,7	497±245	228±71,1
V	583,4±113,9	465±224	198±52,8

Согласно полученным данным, значимое влияние на размер частиц (рис. 9 а)

и твердость покрытия (рис. 9 б) оказывала интенсивность лазерного излучения.



а



б

Рис. 9. Влияние интенсивности излучения I , кВт/мм² на:

а) размер частиц l , мкм; б) микротвердость HV_{0.1}, описываемые регрессионными моделями $l = 35,87 + 6,01 \cdot I^2$ ($R^2 = 0,77$) и $HV_{0.1} = 345,93 + 0,24 \cdot I^2$ ($R^2 = 0,95$)

Экспериментально доказано, что использование лазерного воздействия на титановую мишень позволяет проводить абляцию материала и за счет конденсации получить титановое покрытие, состоящее из частиц размером 31-47 мкм и характеризующееся твердостью до 1025 HV_{0,98}, с толщиной 10-60 мкм. Установлено, что

наибольшее влияние на свойства слоев оказывает интенсивность лазерного излучения. Максимальной твердостью отличаются покрытия, полученные при дистанции 5 мм и интенсивности излучения 26 кВт/мм². При этом средний размер структурных элементов составляет 41 мкм.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Santonen T., Stockmann-Juvala H., Zitting A.** Review on toxicity of stainless steel. Helsinki: Finnish Institute of Occupational Health, 2010. 87 p.

2. **Chew K., Zein S., Ahmad A.** The corrosion scenario in human body: Stainless steel 316L orthopaedic implants // *Natural Science*. 2012. Vol. 4. P. 184-188.

3. Модификация поверхностей внутрикостных имплантатов: современные исследования и нанотехнологии / В.И. Калита, Д.А. Маланин, В.А. Мамаева и др. // *Вестник Волгоградского государственного медицинского университета*. 2009. № 4 (32). С. 17-22.

4. **Карлов А.В., Хлусов И.А.** Зависимость процессов репаративного остеогенеза от поверхностных свойств имплантатов для остеосинтеза // *Гений ортопедии*. 2003. № 3. С. 46-51.

5. Sensitivity to humidity of TiO₂ thin films obtained by reactive magnetron sputtering / E.I. Radeva, I.N. Martev, D.A. Dechev et al. // *Surface and Coatings Technology*. 2006. Vol. 201. P. 2226-2229.

6. Application of TiN/TiO₂ coatings on stainless steel: composition and mechanical reliability / M.P. Nikolova, A. Genov, S. Valkov et al. // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. Vol. 992. P. 1-5.

7. **Табаков В.П., Рандин А.В.** Применение импульсной лазерной обработки для повышения работоспособности быстрорежущего инструмента с многослойными покрытиями // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2005. № 11. С. 18-21.

8. **Конюхова С.Г.** Экспериментально-клинические исследования эффективности титановых конструкций при замещении

дефектов твердых тканей и зубных рядов: дис. ... д-ра мед. наук. Пермь, 2004. 269 с.

9. **Boulos M.I.** RF induction plasma spraying: State-of-the-art review // *Journal of thermal spray technology*. 1992. Vol. 1. P. 33-40.

10. **DeBenedetti B., Grassini S., Maffia L.** Comparison between eco-profiles of innovative PA-CVD and traditional galvanic coatings // *Proceedings of International Conference on Materials for Advanced Technologies ICMAT 2005*. Singapore, 2005. P. 1-4.

11. **Probst J., Gbureck U., Thull R.** Binary nitride and oxynitride PVD coatings on titanium for biomedical application // *Surface and Coatings Technology*. 2001. Vol. 148. P. 226-233.

12. Laser surface modification and characterization of air plasma sprayed alumina coatings / R. Krishnan, S. Dash, R. Kesavamoorthy et al. // *Surface and Coatings Technology*. 2006. Vol. 200. № 8. P. 2791-2799.

13. Electrospark alloying followed by laser treatment of high-speed steel cutting tools / M.S. Koval'chenko, A.V. Paustovskii, V.P. Botvinko et al. // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 1996. Vol. 35. № 5. P. 227-230.

14. **Телегин С.В.** Использование лазерного излучения при создании упрочненных композиционных металлокерамических поверхностных слоев // *Современные технологии и автоматизация в технике, управлении и образовании: сборник трудов III Междунар. науч.-практ. конф. (23 декабря 2020 года)*. Москва: НИЯУ МИФИ; Балаково: БИТИ НИЯУ МИФИ, 2021. Т. I. С. 174-178.

15. **Chen J., Wang S. H., Xue L.** On the development of microstructures and residual stresses during laser cladding and post-heat

treatments // Journal of Materials Science. 2012. Vol. 47. № 2. P. 779-792.

16. Developing an empirical relationship to predict the wear characteristics of Ni-based hardfaced deposits on nuclear grade 316LN austenitic stainless steel / S. Gnanasekaran, S.J.S. Chelladurai, G. Padmanaban et al. // Advances in Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 2021. P. 1-10.

17. **Scheibe H.J., Siemroth P.** Film deposition by laser-induced vacuum arc evaporation // IEEE transactions on plasma science. 1990. T. 18. № 6. C. 917-922.

18. **Katayama S., Fushiya N., Matsunawa A.** Ceramic coating on metal by laser physical vapor deposition // International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics. AIP Publishing, 1994. C. 285-292.

19. Formation of fractal structures during the pulsed laser deposition of titanium in vacuum / A.A. Lozovan, S.V. Prishepov, S.V. Frangulov et al. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2016. Vol. 80 (8). P. 996-998.

20. Friction and wear properties of titanium films formed on aluminium by laser thermal spraying / M. Kaneta, K. Matsuda, J. Matsuda, A. Utsumi // Wear. 1992. Vol. 156 (1). P. 161-173.

21. **Борейшо А.С., Ивакин С.В.** Лазеры: устройство и действие: учеб. пособие. Санкт-Петербург: Лань, 2016. 304 с.

22. **Ходырев Ю.Ю., Горшков Е.В., Федоренко Е.А.** Теория и практика микрообработки. Москва: Техносфера, 2013. 352 с.

Бирюкова Ольга Васильевна – аспирант кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Фомин Александр Александрович – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Материаловедение и биомедицинская инженерия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Кошуро Владимир Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Материаловедение и биомедицинская инженерия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Olga V. Biryukova – Postgraduate, Department of Electrical and Power Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Aleksander A. Fomin – Dr. Sc., Tech., Associate Professor, Head: Department of Materials Science and Biomedical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Vladimir A. Koshuro – Ph.D. (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Materials Science and Biomedical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 26.07.24, принята к опубликованию 06.09.24

УДК 621.385.632.1

**ХИМИЧЕСКАЯ И ИОННО-ПЛАЗМЕННАЯ ОБРАБОТКА
МЕДНО-МОЛИБДЕНОВОГО КОМПОЗИТА
В ПРОИЗВОДСТВЕ ЛАМП БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ
С ВЫСОКИМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ**

Д.И. Кириченко, П.Д. Шалаев, Н.О. Шабунин

**CHEMICAL AND ION-PLASMA TREATMENT
OF COPPER-MOLYBDENUM COMPOSITE IN THE PRODUCTION
OF HIGH-EFFICIENCY TRAVELING WAVE LAMPS**

D.I. Kirichenko, P.D. Shalaev, N.O. Shabunin

В работе приведены результаты структурирования поверхности токоприёмных электродов коллектора электронов из медно-молибденового композита МД-50. Проведено сравнение структур, полученных избирательным химическим травлением меди и ионно-плазменным напылением молибдена. Показано, что на поверхности медно-молибденового композита МД-50 можно создать микро и наноразмерную структуру ионно-плазменным осаждением молибдена.

Ключевые слова: лампа бегущей волны, коллектор электронов, коэффициент полезного действия

The work presents the results of structuring the surface of the current-receiving electrodes of an electron collector made of copper-molybdenum composite MD-50. A comparison of structures obtained by selective chemical etching of copper and ion-plasma deposition of molybdenum is carried out. It is shown that on the surface of copper-molybdenum composite MD-50 it is possible to create a micro- and nano-sized structure by ion-plasma deposition of molybdenum.

Keywords: traveling wave tube, electron collector, efficiency

Введение

Лампы бегущей волны (ЛБВ), работающие в условиях ограниченного энергоснабжения, например в аппаратуре спутников связи, должны обладать высоким коэффициентом полезного действия (КПД). В аппаратуре спутников связи применяют преимущественно ЛБВ О-типа со спиральными замедляющими системами (ЗС). Однако КПД (η) этих приборов без рекуперации энергии электронного потока не превышает 40 % в длинноволновой части сантиметрового диапазона частот и уменьшается до 15-10 % вблизи границы с миллиметровым диапазоном. Повышение η сверх этих значений обеспечивают многоступенчатой рекупера-

цией части энергии электронного потока в многосекционных коллекторах электронов.

В коллекторе ЛБВ с η 50-70 % обычно имеются 3-4 последовательно расположенные рекуперрующие секции, изолированные по электрическому напряжению от ЗС, корпуса коллектора и между собой. Электрические потенциалы токоприёмных электродов этих секций меньше потенциала ЗС и потенциал электрода каждой следующей секции в направлении от ЗС меньше потенциала электрода предыдущей секции. За счёт этого в коллекторе происходит сортировка электронов электронного потока по энергиям (электроны с большей энергией оседают в секциях с меньшим потенциалом) и частич-

ная рекуперация их энергии. Осуществить полную рекуперацию энергии электронного потока нет возможности, так как непрерывный спектр энергий электронов в коллекторе делится на 3-4 части в соответствии с тормозящими потенциалами токоприёмных электродов секций коллектора.

Кроме этого, вторичная электронная эмиссия (ВЭЭ) с поверхности токоприёмных электродов существенно снижает эффективность рекуперации и η . Токоприёмные электроды коллекторов изготавливают из токопроводящих материалов, обычно из молибдена, меди или их сплавов и композитов. Полный коэффициент ВЭЭ этих материалов больше единицы, у молибдена и меди 1,5-1,7 по сведениям из разных источников информации. В сложной электронно-оптической системе коллектора первое поколение вторичных электронов может порождать на поверхности токоприёмных электродов второе поколение таких электронов и этих поколений может быть больше двух. Вторично-эмиссионные электроны движутся в соответствии с распределением электрического поля в коллекторе от электродов с меньшим электрическим потенциалом к электродам с более высоким потенциалом, включая ЗС. Это приводит к увеличению тока ЗС, повышению её температуры, увеличению потребляемой мощности ЛБВ и уменьшению η . При коэффициенте ВЭЭ больше единицы процесс «размножения» поколений вторичных электронов может быть причиной неприемлемого роста указанных выше негативных последствий для ЛБВ.

Известны способы снижения вторично-эмиссионной способности токоприёмных электродов коллектора, основанные на применении токоприёмных деталей коллектора из графита [1, 2], текстурировании поверхности электродов коллектора из углерода или меди [3], нанесения на электроды покрытий из углерода [4]. Эти способы позволяют снизить коэффициент ВЭЭ с поверхности электродов коллектора до значений меньше единицы. Но технологии производства таких коллекторов характеризуются повышенной сложностью и высокой чувствительностью к отклонению технологических режимов от

номинальных значений. Известен способ ионно-плазменного нанесения микро и нано текстурированных покрытий из титана на поверхности коллекторных электродов ЛБВ [5]. Этим способом получают покрытия поверхностей электродов коллектора, снижающие отрицательное влияние ВЭЭ на КПД и надёжность ЛБВ как за счёт уменьшения вторичных электронов из материала покрытия с низким коэффициентом ВЭЭ, так дополнительно и за счёт преимущественного рассеяния вторичных электронов на микро- и наноструктуре без выхода в секцию коллектора с более высоким электрическим потенциалом. Но внедрение в конструкцию коллектора титанового покрытия токоприёмных электродов сопряжено с необходимостью разработки технологий сборки и пайки узлов коллектора, обеспечивающих сохранность покрытий и их свойств. Например, пайка таких узлов в среде водорода может приводить к изменению характеристик покрытия.

При модернизации конструкции коллекторов с целью повышения КПД и надёжности ЛБВ серийного выпуска часто не допускается изменения технологии их производства в объёме, необходимом для внедрения титановых покрытий. В этом случае для снижения отрицательного влияния ВЭЭ на КПД и надёжность ЛБВ могут быть использованы покрытия электродов коллекторов другими металлами, устойчивыми к высоким температурам в защитных средах и обеспечивающие преимущественное рассеяние вторичных электронов на микро- и наноструктуре без выхода в секцию коллектора с более высоким электрическим потенциалом. Ниже представлены результаты исследования способов получения покрытий из молибдена, имеющих такую структуру поверхности.

Материалы и методы

Исследования проведены с целью модернизации коллектора серийно выпускаемой ЛБВ для повышения эффективности рекуперации энергии электронного потока в коллекторе и повышения её КПД. Коллектор обеспечивает четырёхступенчатую рекуперацию энергии электронного потока в ЛБВ. 3D модель коллектора показана на рис. 1.

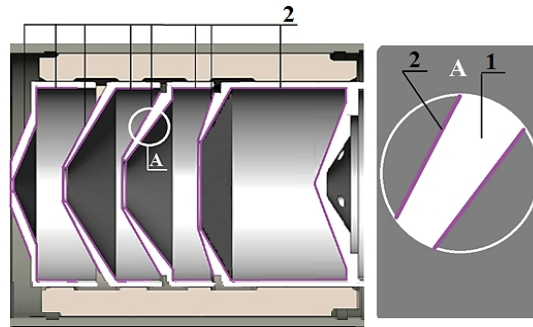


Рис. 1. Продольный разрез коллектора:

1 – токоприёмный электрод; 2 – обрабатываемые поверхности токоприёмных электродов

Материал токоприёмных электродов ЛБВ – медно-молибденовый композит МД-50. Композит содержит в своём составе 50 % молибдена, 50 % меди и представляет собой губку из спрессованного молибденового порошка, поры которой заполнены медью. В промышленном производстве коллектора и ЛБВ с этим коллектором применялся предложенный ранее способ снижения ВЭЭ [6]. При этом способе коэффициент ВЭЭ снижался за счёт изменения структуры поверхности токоприёмных электродов коллектора при избирательном вытравливании меди на глубину несколько микрон. Представлялось,

что, в результате вытравливания меди на поверхности детали возникает сотовая структура, обеспечивающая снижение коэффициента ВЭЭ. При производстве ЛБВ величина положительного эффекта (увеличения КПД ЛБВ при применении избирательного травления) оказалась значительно меньше ожидаемой. Для выяснения причин уменьшения положительного эффекта были проведены исследования поверхности деталей коллектора до и после травления [5]. Фотографии, полученные на электронном микроскопе JEOL JSM-7001F с увеличением $\times 1000$, представлены на рис. 2.

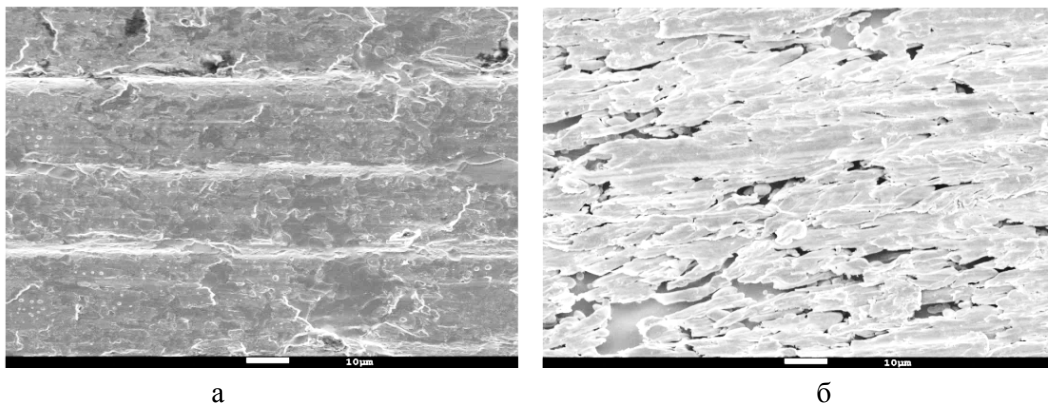


Рис. 2. Поверхность токоприёмного электрода:

а – до избирательного вытравливания меди, б – после избирательного вытравливания меди

Как видно на рис. 2 а, поверхность электрода после механической обработки покрыта слоем меди. Это может быть следствием выдавливания на поверхность более пластичного металла – в этом варианте меди. Следовательно, ВЭЭ с поверхностями таких электродов будет близка к ВЭЭ с поверхностями аналогичных медных электродов. Учесть влияние макроскопического рельефа поверхности электродов (следов от

резца, возникающих при механической обработке детали) на эффективность рекуперации энергии электронов в коллекторе сложно из-за сложных распределений траекторий первичных электронов и их энергий.

На рис. 2 б видно, что избирательное вытравливание меди на глубину несколько микрон не приводит к получению поверхности с сотовой структурой. Поверхность электрода, как видно на рис. 2 б, образована

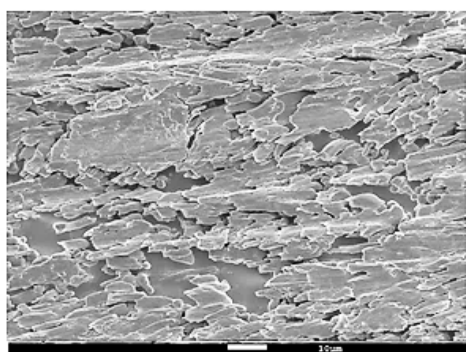
в основном молибдене. Попытка дополнительного травления меди и молибдена также не принесла желаемых результатов.

В [5] увеличены эффективность рекуперации энергии электронов и КПД мощной ЛБВ X-диапазона в результате нанесения титанового покрытия на внутреннюю поверхность электродов коллектора. Покрытие имело сложную нано- и микроструктуру, поэтому указанный положительный эффект был достигнут как за счёт низкого коэффициента ВЭЭ титана, так и за счёт структурирования поверхности покрытия. Возможность применения покрытий из титана в представленной здесь работе исключалась. Детали исследуемого коллектора паяются в узлы в водородных печах, менять эти технологические процессы по ряду причин было нецелесообразно. Поэтому поставленная в данной работе задача состояла в создании на поверхности электродов коллектора микро-, наноразмерной структуры из молибдена.

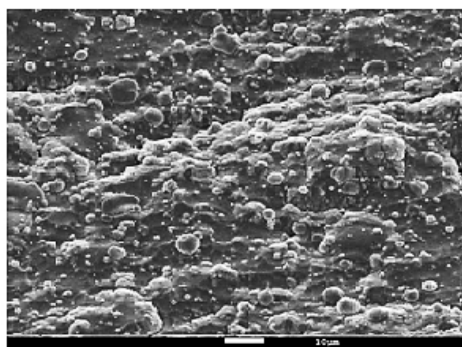
Результаты экспериментальных исследований ЛБВ

Нанесение молибдена на поверхность, показанную на рис. 2 б, позволяет получить покрытие с хорошей адгезией. После избирательного химического травления меди, микро- и наноразмерную структуру поверхности электродов получили дополнительным травлением ионами молибдена

с последующим в одном технологическом цикле ионно-плазменным напылением молибдена на травлёные поверхности. Представленные здесь результаты травления ионами молибдена и ионно-плазменного напыления молибдена на травлёные поверхности получены в вакуумной установке УРМЗ.279.048, краткое описание конструкции и режимов работы которой дано в [5]. Отличие от способа нанесения на поверхности электродов коллектора микро-, наноразмерной структуры из металла [5] состояло в том, что в плазменном источнике дугового типа вакуумной установки был использован катод из молибдена вместо катода из титана, а в последовательность технологических операций включена дополнительно операция ионно-плазменного травления для улучшения адгезии нанесённой далее плёнки молибдена. Травление проводилось ионами молибдена при напряжении смещения подложкодержателя (соответственно и детали) 140-160 В. Эта операция выполнялась после операции химического травления в вакуумной установке УРМЗ.279.048 за один технологический цикл со следующей за ней операцией ионно-плазменного нанесения плёнки молибдена. На рис. 3 а показана поверхность электрода коллектора после травления ионами молибдена и после ионно-плазменного напыления молибдена (рис. 3 б).



а



б

Рис. 3. Поверхность токоприёмного электрода: а – после травления ионами молибдена, б – после ионно-плазменного напыления молибдена на травлённую ионами молибдена поверхность

На рис. 3 а не видно существенных изменений поверхности по сравнению с рис. 2 б. Несколько большее количество пор, заполненных медью, может быть следствием фотографии другого участка поверхности электрода.

Структура поверхности, показанная на рис. 3 б, похожа на структуру, полученную в [5]. Здесь показан один из образцов структуры, образованной методом ионно-плазменного напыления из потока положительных ионов с нано-,

микроразмерными частицами паров молибдена. Изменением электрического режима работы электроискрового испарителя установки, напряжения смещения её подложкодержателя и времени выдержки в каждом из режимов в процессе ионно-плазменного осаждения можно получать разнообразные структуры поверхности токоприёмных электродов коллектора. Выбор параметров режима ионно-плазменного осаждения молибдена для внедрения в технологию производства ЛБВ для конкретного применения может быть сделан по результатам сравнительных испытаний её экспериментальных образцов.

Заключение

Экспериментально показано, что избирательное вытравливание меди из медно-молибденового композита МД-50 на глубину несколько микрон не приводит к образованию сотообразной структуры на поверхности токоприёмных электродов коллектора электродов,

обеспечивающей снижение коэффициента ВЭЭ.

На поверхности медно-молибденового композита МД-50 после избирательного вытравливания меди на глубину несколько микрон можно создать микро- и наноразмерную структуру ионно-плазменным осаждением молибдена из потока его положительных ионов и паров с нано- и микроразмерными частицами.

Технологический процесс структурирования поверхности токоприёмных электродов коллекторов из медно-молибденового композита МД-50 химическим травлением с последующими травлением ионами молибдена и ионно-плазменным напылением молибдена на травлёные поверхности может быть внедрён в производство ЛБВ с использованием отечественного технологического оборудования и без изменения технологии изготовления узлов в водородных печах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Verification of an improved computational design procedure for TWT-dynamic refocuser-MDC systems with secondary electron emission losses / P. Ramins, H.G. Kosmahl, D.A. Force et al. // IEEE Transactions on Electron Devices. 1986. Vol. ED-33. № 1. P. 85-90.

2. Углеродные материалы в теплонагруженных узлах ламп бегущей волны и клистронов (обзор) / В.И. Шестеркин, Т.М. Крачковская, П.Д. Шалаев и др. // Радиотехника и электроника. 2022. Т. 67. № 10. С. 946-954.

3. Гилмор-мл. А.С. Лампы с бегущей волной / пер. с англ. А.Г. Кудряшова; под ред. Н.А. Бушуева. Москва: Техносфера, 2013. 616 с.

4. Curren N.A., Ramins P. TWT efficiency

enhancement with textured carbon surfaces on copper MDC electrodes // International electron Dev. Meeting. 1985. P. 361-363.

5. Ионно-плазменное нанесение микро и нано текстурированных покрытий из титана на поверхности коллекторных электродов лампы бегущей волны / Д.И. Кириченко, П.Д. Шалаев, Н.О. Шабунин, В.А. Царев // Вопросы электротехнологии. 2023. № 4. С. 17-24.

6. Способ снижения коэффициента вторичной электронной эмиссии: пат. 2093915 Рос. Федерация. № 93040409/07 / В.И. Желудков, Р.Ф. Козлова; заявитель и патентообладатель Государственное научно-производственное предприятие «Алмаз»; заявл. 10.08.1993; опубл. 20.10.1997. 5 с.

Кириченко Денис Иванович – начальник отдела, «АО «НПП Алмаз», Саратов

Шалаев Павел Данилович – кандидат технических наук, главный научный сотрудник, «АО «НПП Алмаз», Саратов

Шабунин Никита Олегович – инженер, «АО «НПП Алмаз», Саратов

Denis I. Kirichenko – Head of Department at AO NPP Almaz, Saratov

Pavel D. Shalaev – Ph.D. (Technical Sciences), Chief Research Fellow at AO NPP Almaz, Saratov

Nikita O. Shabunin – Engineer, AO NPP Almaz, Saratov

Статья поступила в редакцию 28.08.24, принята к опубликованию 18.09.24

УДК 621.372.8

ДОСТИЖЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМОГО УРОВНЯ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЛАСТИНЕ, РАСПОЛОЖЕННОЙ В Е-ПЛОСКОСТИ У УЗКОЙ СТЕНКИ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ВОЛНОВОДА

В.А. Коломейцев, П.В. Ковряков, О.В. Дрогайцева

ACHIEVEMENT OF THE MAXIMUM ALLOWABLE LEVEL OF ELECTRIC FIELD ENERGY IN A DIELECTRIC PLATE LOCATED IN THE E-PLANE NEAR THE NARROW WALL OF A RECTANGULAR WAVEGUIDE

V.A. Kolomeytsev, P.V. Kovryakov, O.V. Drogaytseva

На основе аналитического решения внутренней краевой задачи электродинамики, полученного при использовании продольной X -поляризации электромагнитного поля, проведено исследование дисперсионных свойств собственных электродинамических свойств и структуры электрического поля основной продольной волны H_{10} прямоугольного волновода с диэлектрической пластинкой в E -плоскости у узкой стенки волновода, направленное на определение длины волны, на которой достигается предельно-допустимый уровень концентрации энергии электрического поля W_{e2} в пластине, то есть максимум удельной плотности тепловых источников в ней. Установлено, что максимальное значение W_{e2} достигается на длине волны $\lambda_{тр.1}$, на которой происходит переход быстрой волны H_{10} в медленную. Показано, что обеспечение равенства рабочей длины волны и $\lambda_{тр.1}$ является основным условием оптимизации конструкции рабочей камеры, обеспечивающей максимум КПД СВЧ нагревательных устройств волноводного типа.

Ключевые слова: прямоугольный волновод; дисперсионные уравнения; собственные электродинамические параметры; доминантный диапазон длин волн; критические длины волн; коэффициент интенсификации СВЧ нагрева; основная волна H_{10} ; длина волны трансформации ЭМ поля; постоянная распространения волны

Based on the analytical solution of the internal boundary value problem of electrodynamics, obtained using longitudinal X -polarization of the electromagnetic field, a study was carried out relating the dispersion properties of intrinsic electrodynamic properties and structure of the electric field of the main longitudinal wave H_{10} of a rectangular waveguide with a dielectric plate in the E -plane at the narrow wall of the waveguide, aimed at determining the wavelength where the maximum permissible level of energy concentration of the electric field W_{e2} in the plate is achieved, i.e. the maximum specific density of heat sources. It has been established that the maximum value of W_{e2} is achieved at the wavelength $\lambda_{tr.1}$, at which the transition of the fast wave H_{10} to the slow one occurs. It is shown that ensuring equality of the working wavelength and $\lambda_{tr.1}$ is the main condition for optimization of the design of the working chamber, ensuring maximum efficiency of waveguide-type microwave heating devices.

Keywords: rectangular waveguide; electric field energy; dominant wavelength range; longitudinal X -polarization of the field; field transformation wavelength; own electrodynamic parameters; critical wavelengths; wave deceleration coefficient; fast and slow main longitudinal wave; principle of polarization duality

В работе [1] получено аналитическое решение внутренней краевой задачи электродинамики для прямоугольного волновода (ПРВ) с диэлектрической пластиной в Е-плоскости (рис. 1). Показано, что в доминантном диапазоне длин волн может распространяться быстрая и медленная основная волна H_{10} . Все определяется положением длины волны $\lambda_{mp.1}$ в разрешенном диапазоне волны H_{10} , на которой происходит переход быстрой волны в медленную. Если $\lambda_{mp.1}$ находится вне доминантного диапазона, то в нем распространяется только быстрая волна. При нахождении $\lambda_{mp.1}$ в доминантном диапазоне, в нем распространяется быстрая волна при $-\lambda_{mp.1} \leq \lambda \leq \lambda_{кр.1}$ ($\lambda_{кр.1}$ – критическая длина волны основного типа – H_{10}) и медленная волна – $\lambda_{кр.2} \leq \lambda \leq \lambda_{mp.1}$ ($\lambda_{кр.2}$ – критическая длина волны первого высшего типа – H_{20}). В данном случае максимальное значение $W_{э2}$ достигается при $\lambda = \lambda_{mp.1}$.

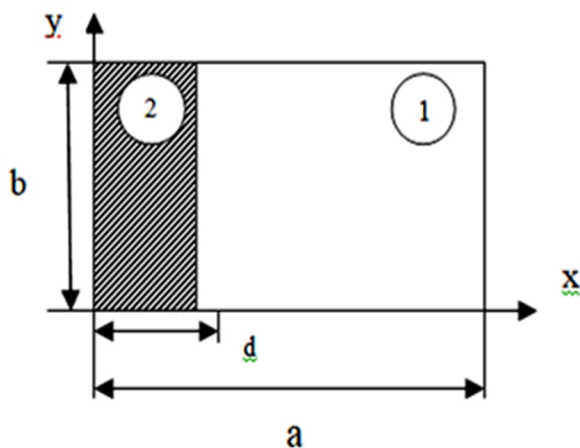


Рис. 1. Поперечное сечение прямоугольного волновода с диэлектрической пластиной в Е-плоскости

Для решения данной задачи необходимо исследовать дисперсионные свойства собственных электродинамических параметров ПРВ, приведенного на рис. 1. В работе [1] получены дисперсионные уравнения, позволяющие определить данные параметры и их дисперсионные характеристики основной волны H_{10} в доминантном диапазоне длин волн, которые в безразмерном виде имеют вид

$$-\frac{\operatorname{tg} \eta(\lambda)}{\eta(\lambda)} = \vartheta_1 \cdot \frac{\operatorname{tg} \xi(\lambda)}{\xi(\lambda)} \quad \text{при } \xi^2 > 0; \quad (1)$$

$$-\frac{\operatorname{tg} \eta(\lambda)}{\eta(\lambda)} = \vartheta_1 \cdot \frac{\operatorname{tg} |\xi(\lambda)|}{|\xi(\lambda)|} \quad \text{при } \xi^2 < 0,$$

где $\vartheta_1 = \frac{a-d}{d}$; $\xi = k_{x1} \cdot (a-d)$; $\eta = k_{x2} \cdot d$; k_{x1} , k_{x2} – волновые числа, определяющие ЭМ поле в воздушной среде и диэлектрической пластине (рис. 1) в координатном направлении оси x ; $\vartheta_1 = (a-d)/d$. Для упрощения решения уравнения (1) и учета особенностей исследуемого параметра в данной работе дополнительно используются обобщенные дисперсионные уравнения для каждой из сред, заполняющих ПРВ [2]:

$$\left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 = K_{x1}^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + \beta^2 \quad \text{для воздушной среды;} \quad (2)$$

$$\sqrt{\varepsilon'_2} \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 = \sqrt{\varepsilon'_2} \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 = K_{x2}^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + \beta^2$$

для диэлектрической пластины.

Уравнения (2) являются следствием решения внутренней краевой задачи электродинамики для ПРВ (рис. 1) методом частичных областей и разделения переменных [3].

Решение поставленной задачи начинается с определения величины доминантного диапазона длин волн, который определяется длинами волн основного типа волны – H_{10} и первого высшего типа волны – H_{20} . Необходимо отметить, что данные типы волн – $\lambda_{кр.1}$ и $\lambda_{кр.2}$ являются невырожденными типами волн ($n=0$). Условием их определения является равенство нулю постоянной распространения волны – $\beta_{10} = \beta_{20} = 0$. Подставляя данное условие в дисперсионное уравнение (2), получим

$$\xi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot (a-d); \quad \eta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \sqrt{\varepsilon'_2} \cdot d, \quad (3)$$

где ε'_2 – относительная диэлектрическая проницаемость пластины. Подставляя соотношения (3) в дисперсионное уравнение (1), и учитывая, что для волн – $\lambda_{кр.1}$, $\lambda_{кр.2}$ – $n = 0$; $\beta_{10} = 0$; $\beta_{20} = 0$, получим

$$-\frac{\operatorname{tg}\left(\frac{2\pi}{\lambda_{кр}}\sqrt{\varepsilon'_2}\right)}{\frac{2\pi}{\lambda_{кр}}\sqrt{\varepsilon'_2} \cdot d} = -\vartheta_1 \cdot \frac{\operatorname{tg}\left(\frac{2\pi}{\lambda_{кр}} \cdot (a-d)\right)}{\frac{2\pi}{\lambda_{кр}} \cdot (a-d)}; \quad (4)$$

Отметим, что первый корень дисперсионного уравнения (4) определяет величину – $\lambda_{кр.1}$, а второй корень – величину $\lambda_{кр.2}$. Уравнение (4) не имеет аналитического решения. Решая данное уравнение методом последовательных приближений, определяем $\lambda_{кр.1}$, $\lambda_{кр.2}$, а также величину коэффициента широкополосности $K_{шир}$:

$$K_{шир} = \frac{\lambda_{кр.1}}{\lambda_{кр.2}}. \quad (5)$$

В табл. 1 и 2 приведены значения критических длин волн основного и первого высшего типов волн ПрВ сечением 45×90 мм с диэлектрической пластиной в Е-плоскости (двухслойное пластинчатое заполнение) для различных ε'_2 , d/a пластины, при этом в табл. 2 приведены значения $\lambda_{кр.1}$, $\lambda_{кр.2}$ и $\lambda_{тр.1}$ при $\varepsilon'_2 = 2$ и $d/a = 0,1; 0,2; 0,3; 0,5$, а в табл. 3 при $\varepsilon'_2 = 2; 4; 6; 8$ и $d/a = 0,2$. Из анализа приведенных данных следует, что введение диэлектрической пластины в ПрВ приводит к увеличению $\lambda_{кр.1}$, $\lambda_{кр.2}$, $\lambda_{тр.1}$, при этом коэффициент широкополосности несколько уменьшился по сравнению с полым ПрВ. Это связано с тем, что диэлектрическая пластина расположена (рис. 1) в зоне минимальности электрического поля основной волны [3] H_{10} . При увеличении ε'_2 и d/a длины волн $\lambda_{кр.1}$, $\lambda_{кр.2}$, $\lambda_{тр.1}$ увеличиваются, при этом более высокое влияние на них оказывает изменение толщины пластины. Необходимо отметить, что при малых значениях $\varepsilon'_2 \leq 6$ и $d/a \leq 0,2$ в доминантном диапа-

зоне распространяется только быстрая волна H_{10} .

Таблица 1

d/a	0,1	0,2	0,3	0,5
$\lambda_{кр.1}$, см	18,18	18,6	19,5	22,4
$\lambda_{кр.2}$, см	9,15	9,79	10,5	10,6
$\lambda_{тр.1}$, см	3,45	6,6	9,4	14,0
$K_{шир}$	1,99	1,95	1,95	2,12

Таблица 2

ε'_2	2	4	6	8
$\lambda_{кр.1}$, см	18,6	19,8	21,2	22,7
$\lambda_{кр.2}$, см	9,79	11,35	12,5	13,2
$\lambda_{тр.1}$, см	6,6	11,4	14,69	17,42
$K_{шир}$	1,9	1,75	1,79	1,72

Рассмотрим методику определения длины волны $\lambda_{тр.1}$, на которой начинается переход быстрой основной волны H_{10} в медленную волну. Условием перехода является равенство $K_{зам} = \frac{c}{v_\phi} = 1$ ($v_\phi = \omega/\beta$ – фазовая скорость волны; β – постоянная распространения волны; ω – круговая частота; c – скорость света в вакууме). Подставляя данное условие в первое уравнение (2), получим $K_{x1} = \xi = 0$. Подставляя значение $\xi = 0$ в дисперсионное уравнение (1) и, учитывая, что $\frac{\operatorname{tg} \xi}{\xi} = \frac{\operatorname{tg} |\xi|}{|\xi|} \Big|_{\xi=0} = 1$, получим [4]:

$$\operatorname{tg} \eta = -\vartheta_1 \cdot \eta, \quad \text{для } \lambda = \lambda_{тр.1}. \quad (6)$$

Особенностью уравнения (6) является то, что величина η основной продольной волны H_{10} зависит от одного параметра – d/a и справедливо для произвольных ПрВ и ДН. В табл. 3 приведены значения η для d/a от 0,1 до 1, то есть до полностью заполненного диэлектриком волновода.

Таблица 3

d/a	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
η	1,64	1,72	1,81	1,91	2,02	2,17	2,35	2,57	2,83	3,14

Подставляя условие $K_{зам} = \frac{\beta c}{\omega}$, которое удобнее представить в виде $\beta = \frac{\omega}{c}$, во второе уравнение (2), определим значение $\lambda_{mp.1}$:

$$\lambda_{mp.1} = \frac{2\pi}{\eta} \cdot d \cdot \sqrt{\varepsilon'_2 - 1}. \quad (7)$$

Значения $\lambda_{mp.1}$ для различных d/a и ε'_2 ДП приведены в табл. 1 и 2. Из анализа полученных данных и соотношения (7) следует, что величина $\lambda_{mp.1}$ возрастает с увеличением толщины и ε_2 пластины. При этом если длина волны $\lambda_{mp.1}$ для конкретного ПрВ и ДП находится вне доминантного диапазона длин волн, то для обеспечения ее нахождения в ДД

$$\xi(\lambda) = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \sqrt{1 - K_{зам}^2}; \quad \eta(\lambda) = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon'_2 - K_{зам}^2} \quad \text{при } \lambda_{mp.1} \leq \lambda \leq \lambda_{кр.1}; \quad (8)$$

$$\xi(\lambda) = j \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \sqrt{K_{зам}^2 - 1}; \quad \eta(\lambda) = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon'_2 - K_{зам}^2} \quad \text{при } \lambda_{кр.2} \leq \lambda \leq \lambda_{mp.1};$$

Подставляя соотношения (8) в уравнения (1) и учитывая, что $K_{зам} = \frac{\beta c}{\omega}$, получим расчетные соотношения для волны H_{10} :

$$\frac{\operatorname{tg} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon'_2 - K_{зам}^2} \cdot d \right)}{\frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon'_2 - K_{зам}^2} \cdot d} = -\vartheta_1 \cdot \frac{\operatorname{tg} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{1 - K_{зам}^2} (a - d) \right)}{\frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{1 - K_{зам}^2} (a - d)} \quad \text{при } \lambda_{mp.1} \leq \lambda \leq \lambda_{кр.1};$$

$$\frac{\operatorname{tg} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon'_2 - K_{зам}^2} \cdot d \right)}{\frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon'_2 - K_{зам}^2} \cdot d} = -\vartheta_1 \cdot \frac{\operatorname{tn} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{K_{зам}^2 - 1} (a - d) \right)}{\frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{K_{зам}^2 - 1} (a - d)} \quad \text{при } \lambda_{кр.2} \leq \lambda \leq \lambda_{mp.1}.$$

Уравнения (9) являются трансцендентными дисперсионными уравнениями, не имеющими аналитического решения. В данной работе уравнения (9) решаются методом последовательных приближений. Первое уравнение определяет дисперсионную характеристику $K_{зам}(\lambda)$ в зоне распростране-

ний волн необходимо увеличить размер широкой стенки волновода, что позволит решить задачу интенсификации СВЧ нагрева листовых материалов при использовании данной волноводной структуры в качестве рабочей камеры СВЧ-устройств волноводного типа.

Одним из основных параметров, определяющих энергию электрического поля основной продольной волны H_{10} прямоугольного волновода с диэлектрической пластиной в Е-плоскости является коэффициент замедления волны – $K_{зам} = \frac{c}{v_\phi} = \frac{\beta c}{\omega}$. Рассмотрим методику определения данного коэффициента. С помощью дисперсионных уравнений (2) представим волновые числа ξ и η в виде

ния быстрой волны H_{10} и, соответственно, второе уравнение – аналогичную характеристику в зоне распространения медленной волны. Расчет дисперсионных зависимостей $K_{зам}(\lambda)$ проводился для ПрВ сечением 45×90 мм для диэлектрических пластин, данные которых приведены в табл. 1. Необходи-

димо заметить, что наибольшую трудность представляет определение $K_{зам}(\lambda)$ в первом приближении. При этом надо учитывать, что максимальное значение $K_{зам} = \sqrt{\epsilon'_2}$ достигается при $\lambda = 0$. Это следует из второго уравнения системы (2), которое необходимо представить в виде

$$\sqrt{\epsilon'_2} = \sqrt{\left(\frac{K_{x1}}{2\pi}\right)^2 \lambda^2 + \left(\frac{\beta c}{2}\right)^2}, \quad (10)$$

из которого следует $K_{зам} = \frac{\beta c}{\omega} = \sqrt{\epsilon'_2} \big|_{\lambda=0}$.

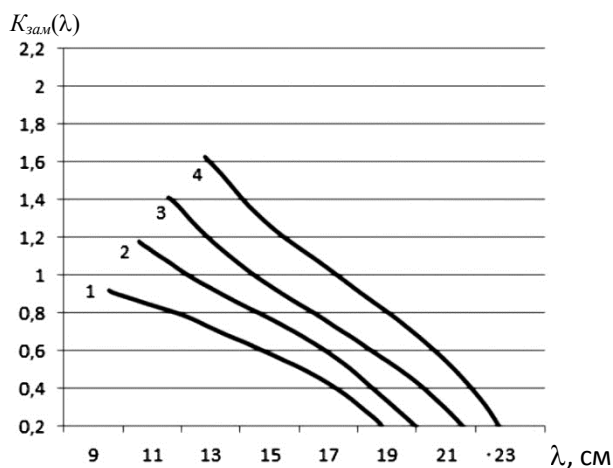


Рис. 2. Дисперсионные характеристики коэффициента $K_{зам}(\lambda)$ основной волны H_{10} ПрВ с диэлектрической пластиной у узкой стенки для $d/a = 3$ и различных ϵ'_2 :
кривая 1 – $\epsilon'_2 = 2$; кривая 2 – $\epsilon'_2 = 4$;
кривая 3 – $\epsilon'_2 = 6$; кривая 4 – $\epsilon'_2 = 8$

Диапазон длин волн, в котором может распространяться медленная (быстрая) волна H_{10} , однозначно определяется параметрами ϵ'_2 и d/a пластины, при этом переход быстрой волны в медленную происходит на длине волны – $\lambda_{кр.1}$. Как следует из соотношения (7), величина $\lambda_{кр.1}$ возрастает при увеличении ϵ'_2 и d/a пластины, что приводит к увеличению диапазона, в котором распространяется медленная волна.

На рис. 4 и 5 приведены дисперсионные зависимости волнового числа $\eta(\lambda)$, определяющего структуру ЭМ поля основной волны H_{10} в диэлектрической пластине в доминант-

ном диапазоне длин волн достигает-ся при $\lambda = \lambda_{кр.2}$, а минимальное значение – при $\lambda = \lambda_{кр.1}$.

На рис. 2 и 3 приведены дисперсионные зависимости коэффициента $K_{зам}(\lambda)$ в доминантном диапазоне длин волн ПрВ с диэлектрической пластиной в Е-плоскости (двуслойное заполнение) для различных ϵ'_2 и d/a . Из анализа приведенных данных следует, что в доминантном диапазоне может распространяться как быстрая, так и медленная основная волна H_{10} .

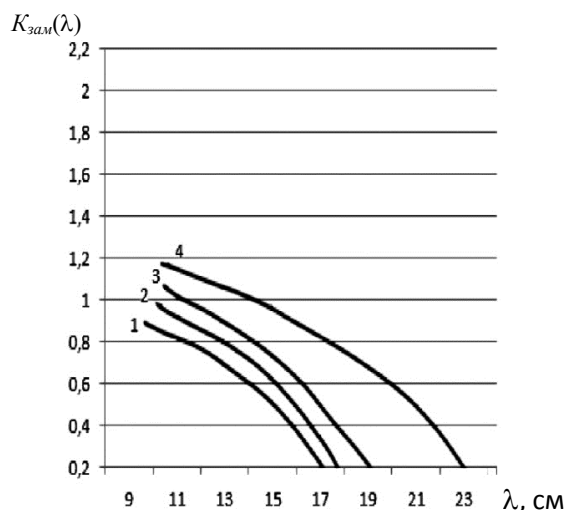


Рис. 3. Дисперсионные характеристики коэффициента $K_{зам}(\lambda)$ основной волны H_{10} ПрВ с диэлектрической пластиной у узкой стенки для $\epsilon'_2 = 2$ и различных d/a :
кривая 1 – $d/a = 0,1$; кривая 2 – $d/a = 0,2$;
кривая 3 – $d/a = 0,3$; кривая 4 – $d/a = 0,5$

ном диапазоне длин волн для различных значений ϵ'_2 и d/a . Из приведенных данных следует, что все кривые $\eta(\lambda)$ последовательно уменьшаются при увеличении λ , при этом максимальное значение $\eta_{макс}$ достигается при $\lambda_{кр.2}$, а минимальное – при $\lambda_{кр.1}$. В связи с этим представляет интерес исследование влияния дисперсионных свойств коэффициента $K_{зам}(\lambda)$ и волнового числа $\eta(\lambda)$ на распределение энергии электрического поля в диэлектрической пластине – $W_{э2}(\lambda)$ в доминантном диапазоне длин волн, что позволит определить длину волны, на которой достигается $W_{э2макс}$.

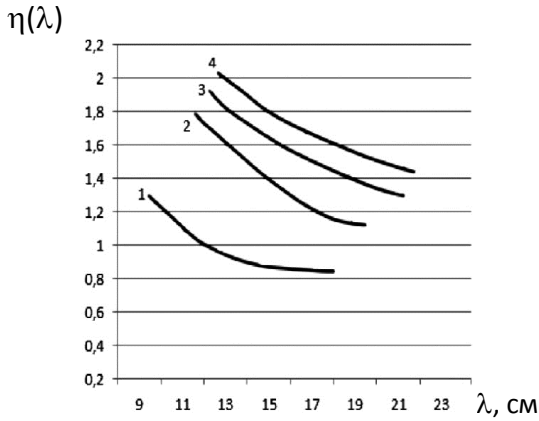


Рис. 4. Дисперсионные зависимости $\eta(\lambda)$ основной волны H_{10} для $d/a = 0,2$ и различных ε'_2 диэлектрической пластины: 1 – $\varepsilon'_2 = 2$; 2 – $\varepsilon'_2 = 4$; 3 – $\varepsilon'_2 = 6$; 4 – $\varepsilon'_2 = 8$

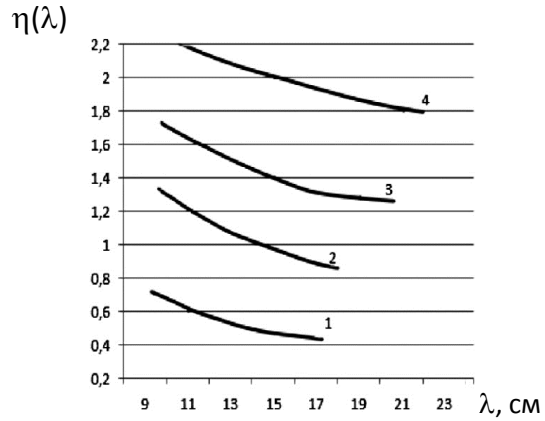


Рис. 5. Дисперсионные зависимости $\eta(\lambda)$ основной волны H_{10} для $\varepsilon'_2 = 2$ и различных d/a диэлектрической пластины: 1 – $d/a = 0,1$; 2 – $d/a = 0,2$; 3 – $d/a = 0,3$; 4 – $d/a = 0,5$

Как показано в работе [5], электрическое поле основной продольной волны H_{10} ПрВ с диэлектрической пластиной в Е-плоскости,

$$\begin{cases} E_{y1}(x) = b_1 \cdot \frac{\omega \mu \beta \sin(k_{x1}(x-a))}{K_{nx}^2 \cos k_{x1} \cdot a} & \text{при } K_{x1}^2 > 0; \\ E_{y1}(x) = j b_1 \cdot \frac{\omega \mu \beta \operatorname{sh}(k_{x1}|(x-a)|)}{K_{nx}^2 \operatorname{ch}|k_{x1}| \cdot a} & \text{при } K_{x1}^2 < 0; \end{cases} \quad (11)$$

$$E_{y2}(x) = b_2 \cdot \frac{\omega \mu \beta}{K_{nx}^2} \cdot \sin(k_{x2} \cdot x).$$

Для основной продольной несопряженной волны H_{10} волновое число $K_{nx} = \beta$ (поскольку $n = 0$). Используя граничное

условие $E_{y1}(x) = E_{y2}(x)|_{x=d}$, приведем соотношения (11) к единой амплитуде – b_2 :

$$\begin{cases} E_{y1}(x) = b_2 \cdot \frac{\omega \mu}{\beta} \frac{\sin(k_{x2} d)}{\sin(k_{x1}(a-d))} & \text{при } K_{x1}^2 > 0; \\ E_{y1}(x) = j b_2 \cdot \frac{\omega \mu}{\beta} \frac{\operatorname{sh}(k_{x1}|(x-a)|)}{\operatorname{ch}|k_{x1}| \cdot a} & \text{при } K_{x1}^2 < 0; \end{cases} \quad (12)$$

$$E_{y2}(x) = b_2 \cdot \frac{\omega \mu}{\beta} \cdot \sin(k_{x2} \cdot x).$$

Соотношения (12) позволяют определить среднюю энергию в поперечном сечении диэлектрической пластины и воздуш-

ной прослойки ПрВ, которую, согласно [6, 7], можно представить в виде (7):

$$\overline{W}_{\varepsilon q}(x) = \frac{\varepsilon_q}{d_q} \int_{x_{q-1}}^{x_q} E_{yq}(x) \cdot E_{yq}^*(x) dx, \quad (13)$$

где $E_{yq}^*(x)$ – комплексно-сопряженное значение величины $E_{yq}(x)$. Подставляя соотно-

шения (12) в выражение (13) и интегрируя его, получим

$$\begin{aligned} \bar{W}_{\vartheta 2}(\lambda) &= 0,5 \varepsilon'_2 \left(b_2 \frac{\omega \cdot \mu}{\beta} \right)^2 \cdot \left(1 - \frac{\sin(2\eta(\lambda))}{2\eta(\lambda)} \right); \\ \left\{ \begin{aligned} \bar{W}_{\vartheta 1}(\lambda) &= 0,5 \left(b_2 \frac{\omega \cdot \mu}{\beta} \right)^2 \left(\frac{\sin \eta(\lambda)}{\sin \xi(\lambda)} \right)^2 \left(1 - \frac{\sin 2\xi(\lambda)}{\sin \xi(\lambda)} \right); & K_{x1}^2 > 0 \\ \bar{W}_{\vartheta 1}(\lambda) &= 0,5 \left(b_2 \frac{\omega \cdot \mu}{\beta} \right)^2 \left(\frac{\sin \eta(\lambda)}{\sin \xi(\lambda)} \right)^2 \left(1 - \frac{\operatorname{sh} \xi(\lambda) \cdot 2}{2\xi(\lambda)} - 1 \right); & K_{x1}^2 < 0. \end{aligned} \right. \end{aligned} \quad (14)$$

Соотношения (14) позволяют исследовать диапазонные свойства энергии электрического поля в каждом диэлектрическом слое – $\bar{W}_{\vartheta q}$ в зонах распространения быстрой основной волны – $\lambda_{mp.1} \leq \lambda \leq \lambda_{kp.1}$ и медленной волны H_{10} в доминантном диапазоне длин волн.

Проведем исследование дисперсионных свойств энергии электрического поля в каждом диэлектрическом слое, заполняющем ПрВ в доминантном диапазоне длин волн с целью определения длины волны, на которой достигается максимум энергии $\bar{W}_{\vartheta 2}$ в диэлектрической пластине. В работе [8] для решения аналогичной задачи для ПрВ с диэлектрической пластиной, распо-

ложенной в центре широкой стенки волновода, введены безразмерные параметры:

$$\begin{aligned} K_{\vartheta 1}(\lambda) &= \frac{\bar{W}_{\vartheta 1}(\lambda)}{\bar{W}_{\vartheta 1}(\lambda_{kp.2})}; \\ K_{\vartheta 2}(\lambda) &= \frac{\bar{W}_{\vartheta 2}(\lambda)}{\bar{W}_{\vartheta 2}(\lambda_{mp.1})}. \end{aligned} \quad (15)$$

Подставляя в соотношения (16) значения $\bar{W}_{\vartheta 1}$ и $\bar{W}_{\vartheta 2}$ из (14), получим:

$$\begin{aligned} K_1(\lambda) &= \frac{K_{зам}^2(\lambda_{kp.2})}{K_{зам}^2(\lambda)} \cdot F_1(\lambda); \\ K_2(\lambda) &= \frac{1}{K_{зам}^2(\lambda)} \cdot F_2(\lambda), \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \left\{ \begin{aligned} F_1(\lambda) &= \left(\frac{\sin \eta(\lambda)}{\sin \xi(\lambda)} \cdot \frac{\sin \xi(\lambda_{kp.2})}{\sin \eta(\lambda_{kp.2})} \right)^2 \cdot \frac{\left(1 - \frac{\sin 2\xi(\lambda)}{\sin \xi(\lambda)} \right)}{\left(1 - \frac{\sin 2\xi(\lambda_{kp.2})}{\sin \xi(\lambda_{kp.2})} \right)} & \text{при } K_{x1}^2 > 0; \\ F_1(\lambda) &= \left(\frac{\sin \eta(\lambda)}{\sin \xi(\lambda)} \cdot \frac{\sin \xi(\lambda_{kp.2})}{\sin \eta(\lambda_{kp.2})} \right)^2 \cdot \frac{\left(\frac{\operatorname{sh} 2\xi(\lambda)}{2\xi(\lambda)} - 1 \right)}{\left(\frac{\operatorname{sh} 2\xi(\lambda_{kp.2})}{2\xi(\lambda_{kp.2})} - 1 \right)} & \text{при } K_{x1}^2 < 0; \end{aligned} \right. \quad (17) \\ F_2(\lambda) &= \frac{\left(1 - \frac{\sin 2\eta(\lambda)}{2\eta(\lambda)} \right)}{\left(1 - \frac{\sin 2\eta(\lambda_{mp.1})}{2\eta(\lambda_{mp.1})} \right)}. \end{aligned}$$

Использование коэффициентов (17) упрощает расчет дисперсионных характеристик $\bar{W}_{\vartheta q}$ в диэлектрической пластине и воздушной прослойке ПрВ. Особый инте-

рес представляют характеристики $\bar{W}_{\vartheta 2}(\lambda)$, которые позволяют определить длину волны, на которой достигается предельно допустимый уровень энергии $\bar{W}_{\vartheta 2}(\lambda)$ и рав-

номерности ее распределения в поперечном сечении пластины, что позволяет интенсифицировать СВЧ нагрев листовых материалов повысить качество их термообработки. При решении данной задачи необходимо учитывать, что в доминантном диапазоне длин волн могут распространяться быстрая и медленная основная продольная волны H_{10} . В работе [8] показано, что в диапазоне распространения медленной волны – $\lambda_{кр.1} \leq \lambda \leq \lambda_{тр.1}$ максимум $W_{э2}$ достигается при $\lambda_{тр.1}$, а минимум – при $\lambda_{кр.2}$. В зоне распространения быстрой волны значение $W_{э2max}$ достигается при $\lambda_{кр.1}$, а минимум – при $\lambda_{тр.1}$ ($\lambda_{тр.1} \leq \lambda \leq \lambda_{кр.1}$). Как показано в работе [9], при использовании ПрВ (рис. 1) в качестве рабочей камеры СВЧ нагревательной установки для термообработки листовых материалов для устойчивости одномодового режима термообработки рабочая длина волны должна находиться в диа-

пазоне $1,15 \cdot \lambda_{кр.2} \leq \lambda_{раб} \leq 0,925 \cdot \lambda_{кр.1}$ ($\lambda_{кр.1}^* = \lambda_{кр.1}$). Расчет проведем в диапазоне $\lambda_{кр.2} \leq \lambda \leq \lambda_{кр.1}$ для ПрВ сечением 45×90 мм с диэлектрической пластиной толщиной $d/a = 2$ для $\epsilon' = 2, 4, 6, 8$.

В табл. 4 приведены значения коэффициента $K_{инт}(\lambda)$ в доминантном диапазоне длин волн для ПрВ с диэлектрической пластиной толщиной $d/a = 0,2$ для малых значений $\epsilon'_2 = 2, 4, 6, 8$. Первое значение длины волны соответствует – $\lambda_{кр.1}^*$, последнее – $\lambda_{кр.2}$.

Цель исследования – определение влияния положения $\lambda_{тр.1}$ на дисперсионные свойства энергии $\bar{W}_{э2}(\lambda)$ в зонах распространения быстрой и медленной волны H_{10} и определение длины волны, на которой достигается максимум энергии $\bar{W}_{э2max}$

Таблица 4

$\epsilon'_2 = 2$	$\lambda, \text{ см}$	17,2	16	14	12	10	9,8	$\lambda_{тр} = 6,8 \text{ см}$
	$K_2(\lambda)$	3,12	1,63	1,17	1,15	1,14	1,13	
$\epsilon'_2 = 4$	$\lambda, \text{ см}$	18,3	17	16	14	12	11,35	$\lambda_{тр} = 11,4 \text{ см}$
	$K_2(\lambda)$	5,2	3,42	2,58	1,87	1,54	1,36	
$\epsilon'_2 = 6$	$\lambda, \text{ см}$	19,6	18	17	16	14,7	12,5	$\lambda_{тр} = 14,3 \text{ см}$
	$K_2(\lambda)$	6,87	2,65	2,2	1,63	1,0	0,94	
$\epsilon'_2 = 8$	$\lambda, \text{ см}$	21	20	17,4	16	14	13,2	$\lambda_{тр} = 17,4 \text{ см}$
	$K_2(\lambda)$	7,2	2,49	1,0	0,96	0,71	0,64	

Из анализа данных табл. 4 следует, что при малых значениях $d/a \leq 0,2$ и $\epsilon'_2 < 4$ пластины длина волны $\lambda_{тр.1}$ находится вне доминантного диапазона длин волн ($\lambda_{тр.1} \leq \lambda_{кр.2}$), при этом в волноводе распространяется быстрая волна H_{10} , значение $\bar{W}_{э2max}$ которой достигается при $\lambda_{кр.1}^*$, а минимальное – при $\lambda_{кр.2}$. При $d/a > 0,2$ и $\epsilon'_2 > 2$ длина волны $\lambda_{тр.1}$ находится в доминантном диапазоне длин волн, что при-

водит к разделению ДД длин волн на диапазон, в котором распространяется быстрая волна H_{10} – $\lambda_{тр.1} \leq \lambda \leq \lambda_{кр.1}$ и диапазон – $\lambda_{кр.2} \leq \lambda \leq \lambda_{тр.1}$, в котором может распространяться медленная волна H_{10} . При этом значение $\bar{W}_{э2max}$ в зоне распространении быстрой волны достигается при $\lambda_{кр.1}^*$, а $\bar{W}_{э2min}$ – при $\lambda_{тр.1}$.

Рассмотрим дисперсионные свойства энергии $\bar{W}_{э2}$ в диэлектрической пластине

при более высоких значениях ε'_2 и d/a .
В табл. 5 приведены значения $K_2(\lambda)$ для

пластины с $\varepsilon'_2 = 9, 16, 25$ и $d/a = 0,4$. Волновод тот же – 45×90 мм.

Таблица 5

$\varepsilon'_2 = 9$	λ , см	31,5	30	25	20	17,5	15,2	$\lambda_{mp} = 33,5$ см
	$K_2(\lambda)$	0,96	0,81	0,37	0,26	0,23	0,2	
$\varepsilon'_2 = 16$	λ , см	45	40	35	30	25	19,4	$\lambda_{mp} = 45,8$ см
	$K_2(\lambda)$	0,94	0,8	0,25	0,18	0,15	0,11	
$\varepsilon'_2 = 25$	λ , см	55,8	50	45	40	30	23,9	$\lambda_{mp} = 58$ см
	$K_2(\lambda)$	0,92	0,7	0,33	0,19	0,1	0,07	

Из анализа приведенных в таблице данных следует, что увеличение параметров d/a и ε'_2 приводит к смещению ($\lambda_{mp.1}$ в длинноволновую область. Так, для всех значений ε'_2 длина волны ($\lambda_{mp.1}$ превосходит $\lambda_{кр.1}^*$. Это позволяет посредством изменения размера широкой стенки волновода (увеличением a) добиться равенства ($\lambda_{mp.1} = \lambda_{кр.1}^*$, то есть равенства максимальных значений $\bar{W}_{\varepsilon 2 \max}$ быстрой и медленной волн H_{10} . Данное равенство является основным критерием оптимизации размеров ПрВ (рис. 1), направленной на достижение предельно допустимого уровня энергии $\bar{W}_{\varepsilon 2}$ и повышение качества СВЧ-термообработки листовых материалов. При этом повышение качества термообработки достигается за счет распространения во всем рабочем диапазоне длин волн – $\lambda_{кр.2} \leq \lambda_{раб} \leq \lambda_{кр.1}^*$ медленной волны H_{10} , трансформация ЭМ поля которой в воздушной прослойке приводит к стягиванию электрического поля к поверхности пластины, частично проникая в нее. Это приводит к уменьшению теплоотдачи в окру-

жающую среду, к повышению равномерности распределения тепловых источников. Заметим, что данный эффект наиболее полно реализуется в ПрВ с диэлектрической пластиной в центре широкой стенки.

Заключение

На основе аналитического решения задачи электродинамики, полученного на основе принципа поляризационной двойственности с использованием продольной Х-поляризации ЭМ поля, проведено исследование дисперсионных свойств ПрВ с диэлектрической пластиной у узкой стенки волновода. Установлено, что энергии $\bar{W}_{\varepsilon 2}$ в пластине в рабочем диапазоне длин волн – $\lambda_{кр.2} \leq \lambda_{раб} \leq \lambda_{кр.1}^*$ достигается при $\lambda_{mp.1} = \lambda_{кр.1}^*$. При этом данное равенство обеспечивается подбором соответствующего размера широкой стенки волновода. Равенство $\lambda_{mp.1} = \lambda_{кр.1}^*$ является основным критерием оптимизации конструкции рабочей камеры СВЧ нагревательных устройств волноводного типа для термообработки листовых материалов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Собственные электродинамические параметры прямоугольного волновода с двухслойным диэлектрическим заполнением / Д.А. Баринов и др. // Вопросы электротехнологии. 2016. № 2 (11). С. 46-57.

2. Пименов Ю.В., Вольман В.И. Техническая электродинамика. Москва: Радио и связь, 2000. 536 с.

3. Баскаков С.И. Электродинамика и распространение радиоволн. Москва: Высшая школа, 1992. 416 с.

4. Ковряков П.В., Коломейцев В.А., Кузьмин Ю.А. Электродинамические свойства прямоугольного волновода с диэлектрической пластиной в Е-плоскости // Радиотехника. 2020. Т. 7. М. 156-158.

5. Коломейцев В.А., Ковряков П.В., Барин Д.А. Аналитическое определение электродинамических параметров медленных волн в прямоугольном волноводе с диэлектрической пластиной в Е-плоскости у боковой стенки волновода // Вопросы электротехнологии. 2019. № 4 (25). С. 91-100.

6. Егоров Ю.В. Частично-заполненные прямоугольные волноводы. Москва: Энергия, 1967. 216 с.

7. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров. Москва: Наука. Гл. ред. физ-мат. лит., 1965. 685 с.

8. Коломейцев В.А., Ковряков П.В., Дрогайцева О.В. Интенсификация процесса термообработки листовых диэлектрических материалов в СВЧ устройствах на основе прямоугольного волновода // Вопросы электротехнологии. 2024. № 1 (42). С. 5-13.

9. Фельдштейн А.Л., Явич А.Р., Смирнов В.П. Справочник по элементам волноводной техники. Москва: Сов. радио, 1969. 652 с.

10. Определение собственных электродинамических параметров прямоугольного резонатора с двухслойным диэлектрическим заполнением / В.А. Коломейцев, Д.А. Барин, В.Н. Посадский, А.Э. Семенов // Радиотехника. 2014. № 10. С. 41-45.

Коломейцев Вячеслав Александрович – доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ. Саратов, Россия

Ковряков Павел Валерьевич – соискатель кафедры «Радиотехника и телекоммуникации» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Дрогайцева Ольга Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиотехника и телекоммуникации» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Vyacheslav A. Kolomeytsev – Dr. Sc. Tech., Professor, Honored Scientist of the Russian Federation, Saratov, Russia

Pavel V. Kovryakov – Applicant, Department of Radio Engineering and Telecommunications, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Olga V. Drogaytseva – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Radio Engineering and Telecommunications, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 22.07.24, принята к опубликованию 06.09.24

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.3.078

ВЛИЯНИЕ ВЕЛИЧИНЫ НАПРЯЖЕНИЯ ПИТАНИЯ НА ПОТРЕБЛЕНИЕ МОЩНОСТИ ШТАНГОВОЙ СКВАЖИННОЙ НАСОСНОЙ УСТАНОВКОЙ

А.А. Казанцев, И.А. Косорлуков, А.В. Стариков

INFLUENCE OF SUPPLY VOLTAGE VALUE ON POWER CONSUMPTION OF A SUCKER-ROD PUMPING UNIT

A.A. Kazantsev, I.A. Kosorlukov, A.V. Starikov

В статье рассмотрена штанговая скважинная насосная установка с плунжерным насосом. Приведены аналитические зависимости, связывающие силы и моменты, действующие на редуктор скважинной установки. Получены формулы, позволяющие определить среднюю скорость вращения вала асинхронного двигателя штанговой скважинной насосной установки и потребляемую активную и реактивную мощность при вариации величины питающего напряжения. Приведен пример расчета прогнозируемого потребления активной, реактивной и полной мощности для конкретного типа штанговой скважинной насосной установки и двух значений питающего напряжения.

Ключевые слова: *штанговая скважинная насосная установка, плунжерный насос, асинхронный двигатель, потребляемая мощность*

Введение

Штанговые скважинные насосные установки (ШСНУ), так же как и погружные центробежные насосы, предназначены для подъема пластовой жидкости из скважины на поверхность земли. В настоящее время ШСНУ, как правило, применяют на сква-

The article considers a sucker-rod pumping unit with a plunger pump. Analytical dependencies are given that connect the forces and moments acting on the borehole unit gearbox. The formulas are obtained that allow to determine the average speed of rotation of the asynchronous motor shaft of the sucker-rod borehole pumping unit and the consumed active and reactive power with a variation in the value of the supply voltage. The provided example demonstrates the calculation of the predicted consumption of active, reactive and apparent power for a specific type of sucker-rod borehole pumping unit and two values of the supply voltage.

Keywords: *sucker-rod pumping unit, plunger pump, asynchronous motor, consumed power*

жинах с дебитом до 30...40 м³ жидкости в сутки, реже до 50 м³ при средних глубинах подвески 1000...1500 м. В неглубоких скважинах установка обеспечивает подъем жидкости до 200 м³/сут. В отдельных случаях может применяться подвеска насоса на глубину до 3000 м.

Широкое распространение ШСНУ обуславливают следующие факторы:

- простота ее конструкции;
- простота обслуживания и ремонта в промышленных условиях;
- удобство регулировки;
- возможность обслуживания установки работниками низкой квалификации;
- малое влияние на работу ШСНУ физико-химических свойств откачиваемой жидкости;
- высокий КПД;

– возможность эксплуатации скважин малых диаметров.

Установка состоит из привода, устьевого оборудования, насосных штанг, глубинного насоса, вспомогательного подземного оборудования, насосно-компрессорных труб. Привод предназначен для преобразования энергии двигателя в возвратно-поступательное движение колонны насосных штанг.

В большинстве ШСНУ в качестве привода применяют балансирные станки-качалки (рис. 1).

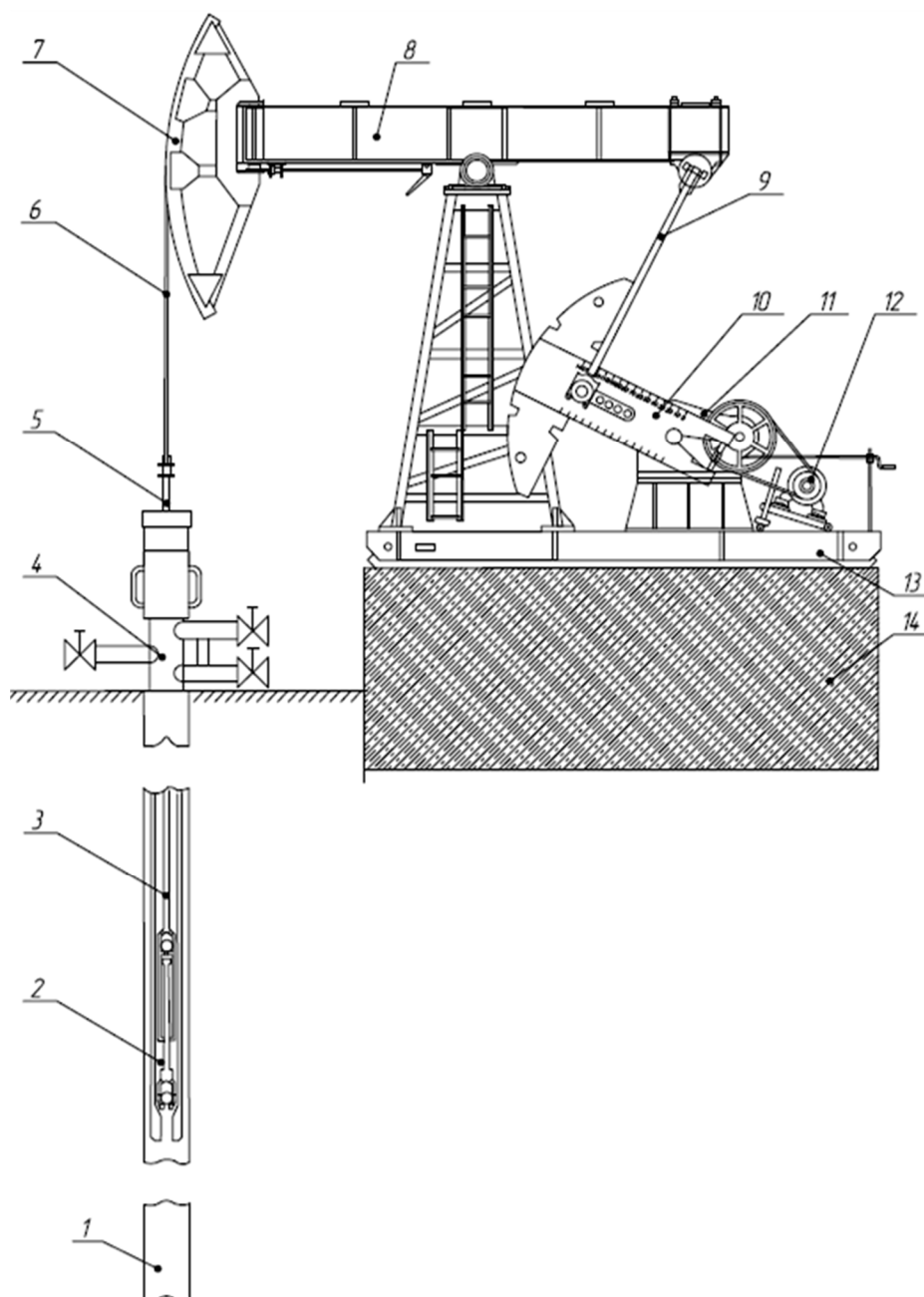


Рис. 1. Штанговая скважинная насосная установка с балансирным станком-качалкой

Балансирный станок-качалка состоит из рамы 13, установленной на массивном фундаменте 14. На раме смонтирована: стойка, на которой с помощью шарнира укреплен балансир 8, имеющий на одном конце головку 7 на другом – шарнир, соединяющий его с шатуном 9. Шатун соединен с кривошипом 10, укрепленным на выходном валу редуктора. Входной вал редуктора 11 посредством клиноременной передачи соединен с электродвигателем 12. Головка балансира 7 соединена со штоком 5 с помощью канатной подвески 6. Устьевая арматура 4 предназначена для герметизации полировочного штока 5, направления потока жидкости потребителю, подвешивания насосно-компрессорных труб в обсадной колонне 1, замера затрубного давления, проведения исследовательских работ в скважине и соединения канатной подвески 6 насоса 2 с плунжером. Насосные штанги 3 собираются из отдельных штанг [1].

В ШСНУ вместо балансирных станков-качалок могут также использоваться цепные приводы.

При решении задач выбора оптимального напряжения промышленной подстанции важно знать зависимость потребляемой двигателем ШСНУ активной и реактивной мощности от напряжения на статоре.

В связи с этим целью проводимого исследования является определение этой зависимости с учетом напорной характеристики погружного насоса и кинематических особенностей ШСНУ.

Решение задачи

Штанговые глубинные насосы, как правило, плунжерные, обладают следующей напорной характеристикой (рис. 2) [2]. Плунжерные насосы относятся к объемным насосам, принцип действия которых основан на вытеснении замкнутых объемов жидкости. В таких насосах зависимость между напором $H_{нас}$ и производительностью $Q_{нас}$ представляет собой вертикальную линию, которая показывает, что подача насоса является постоянной величиной, не зависящей от напора.

Однако из-за наличия утечек жидкости через уплотнения, возрастающих с увеличением давления, реальная характеристика отличается от теоретической.

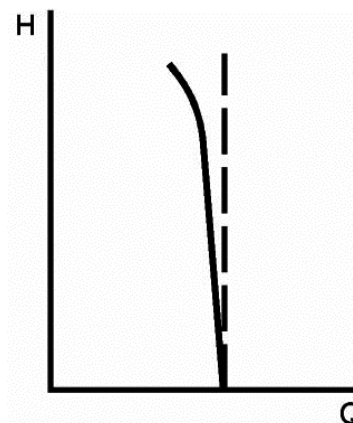


Рис. 2. Напорная характеристика плунжерного насоса

Активную мощность, потребляемую асинхронным двигателем ШСНУ, можно определить по известной формуле [3]

$$P_{ад} = \frac{M_c \omega}{\eta_{ад}}, \quad (1)$$

где M_c , ω и $\eta_{ад}$ – момент на валу, скорость и коэффициент полезного действия двигателя.

В то же время реактивная мощность, потребляемая этим двигателем, определяется выражением [3]

$$Q_{ад} = 3U_1^2 \left(\frac{s^2 X_k}{R_{2Г}^2 + s^2 X_k^2} + \frac{U_1^v}{X_m} \right), \quad (2)$$

где U_1 – фазное напряжение статора; $s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$ – фактическое скольжение ротора двигателя; ω_0 – скорость идеального холостого хода; $R_{2Г}$, X_k и X_m – параметры Г-образной схемы замещения; v – коэффициент, учитывающий нелинейность характеристики намагничивания.

Формулы (1) и (2) показывают, что на потребление активной и реактивной мощности влияют момент на валу электродвигателя и скорость вращения.

Момент на валу двигателя ШСНУ зависит от силы, действующей на кривошипный механизм, которую при подъеме жидкости и движении штанги вверх приблизительно можно описать уравнением [4]

$$F_{ред1} = G_{ум} + G_{ж} + \frac{P_{буф}}{\rho g} + k_v V_{ум1} - G_{нв}, \quad (3)$$

где $G_{ум}$ – приведенная сила веса штанг; $G_{ж}$ – приведенная сила веса столба жидкости; $G_{нв}$ – сила, создаваемая противовесом; k_v – коэффициент, связывающий силы вязкого и сухого трения со скоростью перемещения штанг; $V_{ум1}$ – линейная скорость движения штанги вверх; $P_{буф}$ – буферное давление на устье скважины; ρ – плотность добываемой жидкости; g – ускорение свободного падения.

При движении плунжера насоса вниз, сила, действующая на редуктор, будет равна

$$F_{ред2} = G_{нв} - G_{ум} + k_v V_{ум2}, \quad (4)$$

где $V_{ум2}$ – линейная скорость движения штанги вниз.

Следовательно, на вал асинхронного двигателя, приводящего в движение станок-качалку, действует переменный момент сопротивления, равный, исходя из формул (3) и (4)

$$M_{c1} = \frac{F_{ред1} r_{зв}}{i_{ред} \eta_{ред}} = M_{G1} + k_{M2} \omega_1, \quad (5)$$

$$M_{c2} = \frac{F_{ред2} r_{зв}}{i_{ред} \eta_{ред}} = M_{G2} + k_{M2} \omega_2, \quad (6)$$

где M_{G1} – момент, создаваемый силами веса и буферного давления при движении штанг вверх; M_{G2} – момент, создаваемый силами веса при движении штанг вниз; k_{M2} – коэффициент, связывающий дополнительный момент на валу асинхронного двигателя, вызванный силами вязкого и сухого трения, со скоростью вращения ω ; ω_1 и ω_2 – скорости вращения вала асинхронного двигателя ШСНУ при дви-

жении вверх и вниз соответственно; $i_{ред}$ – общее передаточное число ременной передачи и редуктора; $\eta_{ред}$ – общий коэффициент полезного действия ременной передачи и редуктора; $r_{зв}$ – радиус приложения силы к рычагу кривошипа.

Скорость вращения ротора двигателя при одном и том же значении напряжения статора будет меняться в зависимости от направления движения штанг. Это объясняется тем, что момент нагрузки на валу двигателя будет иметь существенно разную величину при движении штанг вверх и вниз. Следовательно, падение скорости $\Delta\omega_1$ относительно скорости идеального холостого хода ω_0^{50} , также будет менять свое значение. Тем не менее, пользуясь методикой, предложенной в работе [5], можно найти среднее значение падения скорости под действием момента нагрузки за период качания ШСНУ

$$\Delta\omega_1 = \frac{(\omega_0^{50} - \omega_{ном})(M_{c1} + M_{c2})}{2M_{ном}}. \quad (5)$$

Отсюда следует, что средняя скорость вращения ротора двигателя ШСНУ при номинальном напряжении статора будет равна

$$\omega = \omega_0^{50} - \frac{(\omega_0^{50} - \omega_{ном})(M_{c1} + M_{c2})}{2M_{ном}}. \quad (6)$$

Формулами, аналогичными (3) – (6), описываются также силы, моменты и скорости вращения наземных асинхронных двигателей ШСНУ с цепным приводом.

Следует отметить, что моменты, действующие на вал электродвигателя станка-качалки или ШСНУ с цепным приводом, можно определить по динамограмме, фиксируемой датчиком силы.

При изменении напряжения U_1 на статоре асинхронного двигателя происходит изменение его механических характеристик (рис. 3) [5, 6].

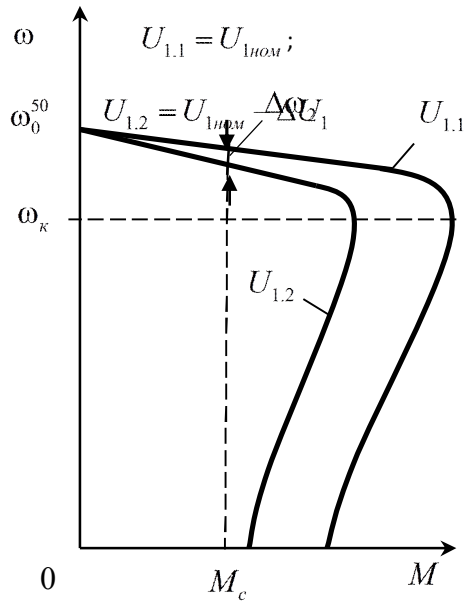


Рис. 3. Механические характеристики асинхронного двигателя при изменении напряжения на статоре

Статическое изменение скорости $\Delta\omega_2$ под действием вариации напряжения статора и момента нагрузки можно вычислить с помощью линеаризованной математической модели асинхронного двигателя [7], в которую входит коэффициент передачи асинхронного двигателя по отношению к ΔU_1

$$k_{du}^U = \frac{\Delta\omega_2}{\Delta U_1} = \frac{A_{71}A_{65} + A_{62}A_{76}}{A_{71}A_{84} + A_{63}A_{76}}, \quad (7)$$

где

$$A_{62} = (1 + B^2 - DF)(AB - C)D + A_{20}A_{30};$$

$$A_{63} = [\psi_{2y0}A_{20} + \psi_{2x0}(1 + B^2 - DF)](1 + B^2)T_2;$$

$$A_{65} = A_{30} \left[(1 + B^2) \psi_{1y0} - BF\psi_{2x0} - F\psi_{2y0} \right] + (1 + B^2 - DF) \left[(C - AB)\psi_{2x0} - (A + BC)\psi_{2y0} \right];$$

$$A_{71} = (1 + B^2 - DF)^2 + A_{20}^2;$$

$$A_{76} = (1 + B^2 - DF) \left[(1 + B^2) \psi_{1x0} - F\psi_{2x0} + BF\psi_{2y0} \right] - A_{20} \left[(1 + B^2) \psi_{1y0} - BF\psi_{2x0} - F\psi_{2y0} \right];$$

$$A_{84} = (1 + B^2) \psi_{2y0} \left[(1 + B^2) \psi_{1y0} - F\psi_{2y0} - BF\psi_{2x0} \right] T_2;$$

$$A = C = T_1; \quad B = \frac{2\pi T_1 f_{10}}{Z_n}; \quad D = \frac{L_0}{L_1}; \quad F = \frac{L_0}{L_2}; \quad H = \frac{2\pi T_2 f_{10}}{Z_n};$$

$$A_{20} = (H - T_2\omega_{00})(1 + B^2) + BDF; \quad A_{30} = D(A + BC);$$

ω_{00} и f_{10} – начальные значения угловой скорости вращения магнитного поля и частоты питающего напряжения; ψ_{1x0} , ψ_{1y0} , ψ_{2x0} и ψ_{2y0} – начальные условия проекций потокоцеплений статора и ротора на вращающуюся вместе с магнитным полем систему координат Oxy ; $T_1 = \frac{\Delta}{R_1 L_2}$, $T_2 = \frac{\Delta}{R_2' L_1}$ –

электромагнитные постоянные времени цепей статора и ротора; L_1 и R_1 – индуктивность и активное сопротивление цепи статора; L_2' и R_2' – приведенные индуктивность и

активное сопротивление цепи ротора; L_0 – взаимная индуктивность; $\Delta = L_1 L_2' - L_0^2$.

Коэффициент (7) определяется для начальных условий, соответствующих номинальной частоте питающего напряжения и номинальному моменту нагрузки двигателя. Тогда, предполагая линейную зависимость падения скорости $\Delta\omega_2$ от момента нагрузки M_c , можно рассчитать изменение скорости вращения ротора асинхронного двигателя при вариации напряжения статора по формуле

$$\Delta\omega_2 = \frac{k_{du}^U \Delta U_1 M_c}{M_{ном}}. \quad (8)$$

Формулы (6) и (8) позволяют получить зависимость для расчета средней скорости наземного асинхронного двигателя ШСНУ при изменении фазного напряжения статора ΔU_1 относительно номинального значения

$$\omega = \frac{M_{ном} \omega_0 - M_0 (\omega_0^{50} - \omega_{ном} - k_{\partial y}^U \Delta U_1)}{M_{ном} + k_{M2} (\omega_0^{50} - \omega_{ном} - k_{\partial y}^U \Delta U_1)}, \quad (9)$$

где $M_0 = \frac{M_{G1} + M_{G2}}{2}$.

При этом активная мощность, потребляемая асинхронным двигателем ШСНУ, будет определяться формулой

$$P_{AD} = \frac{k_{M2} \omega^2 + M_0 \omega}{\eta_{AD}}, \quad (10)$$

а реактивная мощность рассчитывается по выражению (2).

Пример расчета

Для примера рассмотрим фактическую динамограмму, полученную со скважины, оборудованной приводом ЦП-60 (рис. 4) [1]. Из динамограммы следует, что при подъеме сила $F_1 = 9,81 \cdot 4750 = 46598$ Н, а при спуске штанг – $F_2 = 9,81 \cdot 2250 = 22073$ Н.

Установка оснащена плунжерным насосом НСН 2В с диаметром плунжер $d_{пл} = 0,044$ м. Насос спущен на глубину $L_{сн} = 875$ м на насосно-компрессорных трубах с диаметром $d_{нкт} = 0,06$ м, причем диаметр штанг равен $d_{шт} = 0,022$. Сила, создаваемая противовесом, равна $G_{пв} = 24000$ Н. Из этих данных можно рассчитать, что сила, вызванная весом штанги, будет равна $G_{шт} = 25451$ Н.

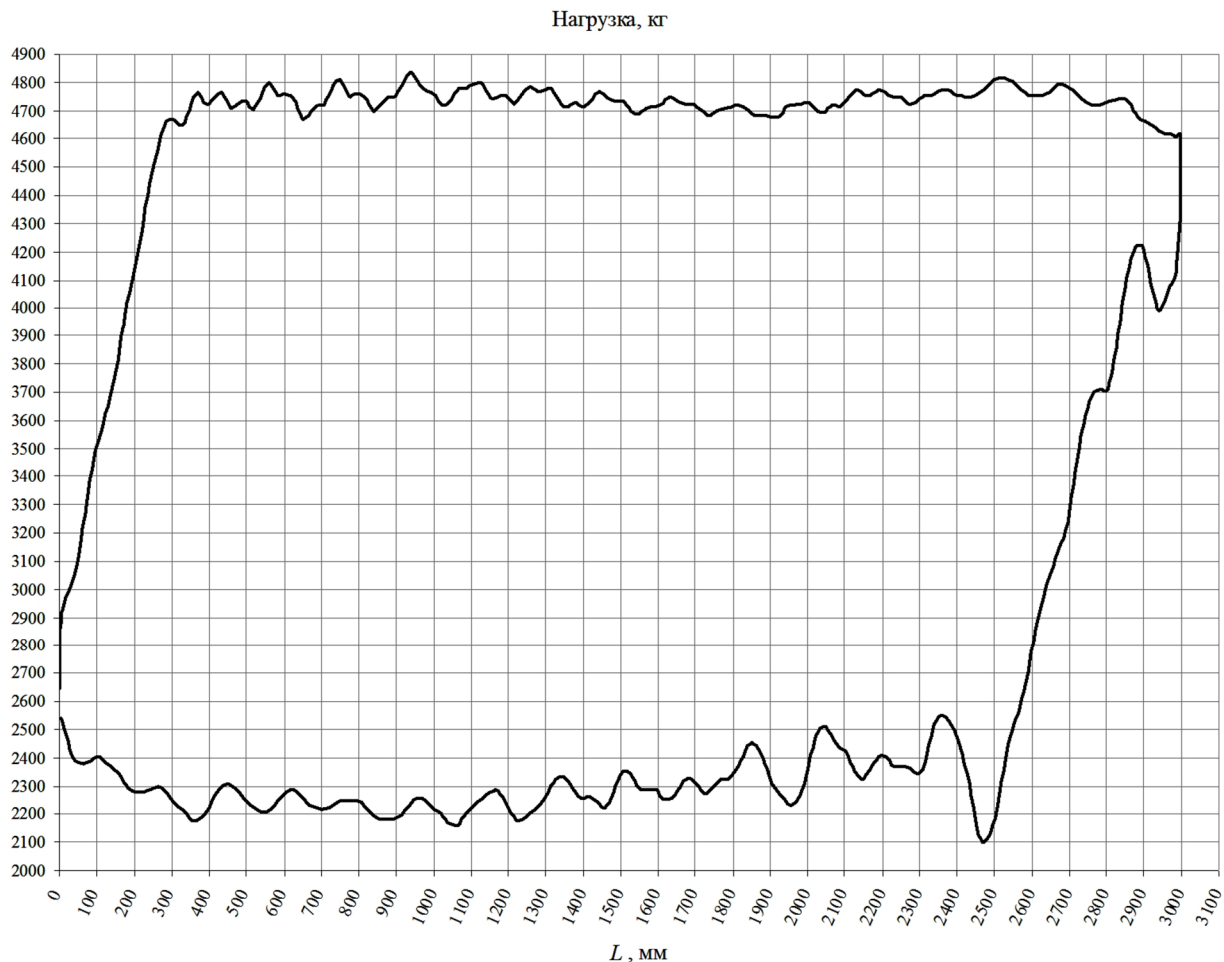


Рис. 3. Фактическая динамограмма работы ШСНУ с цепным приводом

При длине хода плунжера $L_{хода} = 3$ м, периоде цикла качания $t_u = 41$ с, радиусе $r_{3\phi} = 0,112$ м и общем коэффициенте редукции $i_{ред} = 80$ скорость вращения вала приводного асинхронного двигателя будет равна $\omega = 104$ рад/с.

При этом следует учесть, что $G_{умт} - F_2 = k_{M2} \omega$. Тогда из динамограммы можно определить величину коэффициента $k_{M2} = 0,0495$ Нмс/рад и величину $M_{G2} = 8,061$ Нм. Кроме того, надо иметь

в виду, что $F_1 = G_{умт} + G_{жс} + \frac{P_{буф}}{\rho g} + k_v V_{умт1}$. Это

позволяет определить момент на валу двигателя, вызванный силами веса и давления $M_{G1} = 39,46$ Нм и величину $M_0 = 23,76$ Нм.

Следовательно, максимальный момент на валу асинхронного электродвигателя, соответствующий подъему жидкости, равен $M_{c1} = 44,593$ Нм, а минимальный (при спуске штанг) – $M_{c2} = 13,193$ Нм.

В рассматриваемом ШСНУ с цепным приводом используется асинхронный двигатель ВА132S6 со следующими номинальными данными: мощность $P_{ном} = 5,5$ кВт; линейное напряжение $U_{л.ном} = 380$ В; ток $I_{л.ном} = 12,3$ А; коэффициент полезного действия $\eta_{ном} = 85\%$; $\cos \varphi = 0,8$; скольжение $s_{ном} = 0,033$; число пар полюсов $Z_n = 3$; скорость идеального холостого хода $\omega_0 = 104,72$ рад/с; номинальная скорость $\omega_{ном} = 101,264$ рад/с; номинальный момент $M_{ном} = 54,313$ Нм; $R_{2Г} = 0,732$ Ом; $X_k = 3,249$ Ом; $X_m = 33,921$ Ом; $T_1 = 0,0082$ с; $X_k = 3,249$ Ом; $X_m = 33,921$ Ом; $T_2 = 0,0141$ с.

Моделирование двигателя ВА132S6 при номинальной частоте и напряжении и номинальном моменте нагрузки позволяет определить начальные значения потокосцепле-

ний $\psi_{1x0} = 2,248$ Вс, $\psi_{1y0} = -1,851$ Вс, $\psi_{2x0} = 2,143$ Вс; $\psi_{2y0} = -1,817$ Вс и рассчитать по формуле (7) значение коэффициента $k_{dy}^U = 0,0096$ рад/Вс.

Подставляя полученные коэффициенты в формулу (9), найдем среднюю скорость двигателя ШСНУ при номинальном напряжении, когда $\Delta U_1 = 0$, $\omega_1 = 102,884$ рад/с. Следовательно, в соответствии с формулами (9) и (2) двигатель будет потреблять активную $P_{АД1} = 3665$ Вт, реактивную $Q_{АД1} = 4417$ вар и полную мощность $S_{АД1} = 5739$ ВА. При уменьшении фазного напряжения статора на 10 %, то есть при $\Delta U_1 = -22$ В, средняя скорость двигателя за период качания ШСНУ станет равной $\omega_2 = 102,772$ рад/с, а потребление мощности составит $P_{АД2} = 3660$ Вт, $Q_{АД2} = 3591$ вар, $S_{АД2} = 5128$ ВА. Следовательно, уменьшение напряжения питания приводит к небольшому снижению потребления активной мощности штанговой скважинной насосной установкой, но к довольно существенному уменьшению потребления полной мощности.

Выводы

1. Проведенные исследования позволяют оценить влияние напорных характеристик и кинематических особенностей штанговых скважинных насосных установок на потребление электрической энергии при механизированной добыче нефти.

2. Полученные аналитические зависимости позволяют по данным плунжерного насоса, глубине спуска, кинематическим характеристикам штанговой установки и параметрам асинхронного двигателя спрогнозировать потребление электрической энергии при вариации величины питающего напряжения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гарифуллина А.Р. Рациональное управление реактивной мощностью электротехнических комплексов добывающей скважины и отходящей линии нефтегазодобывающего предприятия: дис. ... канд. техн. наук: 09.05.03. Санкт-Петербург, 2012. 123 с.

2. Сабуров А.Г., Гуляева Ю.Н. Основы гидравлики гидравлических машин и гидропривода. Санкт-Петербург: СПбГУиНПТ, 2008. 178 с.

3. Вайнштейн Р.А., Коломиец Н.В., Шестакова В.В. Основы управления ре-

жимами энергосистем по частоте и активной мощности, по напряжению и реактивной мощности: учеб. пособие. Томск: Том. политехн. ун-т, 2010. 96 с.

4. **Топольников А.С.** Моделирование динамических нагрузок на полированный шток станка-качалки при неисправностях в работе штангового насоса // Труды Института механики им. Р.Р. Мавлютова, УНЦ РАН. 2014. Т. 10. С. 95-101.

5. **Starikov A., Tabachnikova T., Kosorlukov I.** Calculation of the Rotation Speed of a Submersible Induction Motor for the Tasks of Determining the Optimal

Value of the Supply Voltage // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). 2020.

6. **Михайлов О.П.** Автоматизированный электропривод станков и промышленных роботов. Москва: Машиностроение, 1990. 304 с.

7. Линеаризованная математическая модель погружного асинхронного двигателя / А.В. Стариков, С.Л. Лисин, Т.В. Табачникова и др. // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. 2019. № 4 (64). С. 155-167.

Казанцев Александр Андреевич – старший преподаватель кафедры «Автоматизированные электроэнергетические системы» Самарского государственного технического университета

Косорлуков Игорь Андреевич – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Электропривод и промышленная автоматика» Самарского государственного технического университета

Стариков Александр Владимирович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электропривод и промышленная автоматика» Самарского государственного технического университета

Alexander A. Kazantsev – Senior Lecturer, Department of Automated Electric Power Systems, Samara State Technical University

Igor A. Kosorlukov – PhD (Technical Sciences), Head: Department of Electric Drives and Industrial Automation, Samara State Technical University

Alexander V. Starikov – Dr. Sc. Tech., Professor, Head: Department of Electric Drives and Industrial Automation, Samara State Technical University

Статья поступила в редакцию 28.08.24, принята к опубликованию 18.09.24

УДК 621.314

**ВОПРОСЫ КИБЕРБЕЗОПАСНОСТИ В СИСТЕМАХ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ**

Г.Н. Тулепова

**CYBERSECURITY ISSUES IN POWER SUPPLY SYSTEMS
OF MODERN TECHNOLOGICAL COMPLEXES**

G.N. Tulepova

В статье проводится анализ угроз, с которыми сталкиваются системы электроснабжения современных технологических комплексов в контексте киберпространства. Приводятся конкретные примеры несанкционированного воздействия на объекты энергетики. Детально рассмотрены сценарии развития событий в результате кибератаки на технологический комплекс с частотно-регулируемым электроприводом.

Ключевые слова: *система электроснабжения, технологический комплекс, кибератаки, кибербезопасность*

Энергетическая отрасль имеет важнейшее значение для функционирования множества секторов экономики. Поэтому практически любой элемент энергетического комплекса – это стратегический объект. Это прекрасно понимают и злоумышленники, для которых данный сектор является одной из основных мишеней кибератак [1].

Стремительное развитие цифровизации, автоматизация различных процессов, возможность удаленного управления, несомненно, повышают качество и эффективность работы отрасли. С другой стороны, это дает возможность злоумышленникам заполучить контроль над важнейшими процессами. По данным исследования Kaspersky ICS CERT, во второй половине 2021 года кибератаки были заблокированы почти на трети (32,4 %)

The article analyzes the threats faced by power supply systems of modern technological complexes in the context of cyberspace. Specific examples of unauthorized impact on energy facilities are given. The scenarios of events developed because of a cyber-attack on the technological complex with the frequency-controlled electric drive are analyzed in detail.

Keywords: *power supply system, cyberattacks, cybersecurity*

компьютеров автоматизированных систем управления (АСУ) в энергетической отрасли по всему миру [2].

Наиболее распространенными кибератаками являются насыщение сетевого оборудования большим количеством внешних запросов или перехват управления системы в сети SCADA через украденные аккаунты, отправка команд на отключение систем бесперебойного питания, которые уже были реконфигурированы. После этого злоумышленники отключают систему безопасности, что приводит, например, к прерыванию подачи электроэнергии. Еще один способ, которым активно пользуются хакеры, – уничтожение информации на серверах и рабочих станциях, несанкционированное вмешательство в АСУ. С помощью удаленного доступа злоумышленник может

перехватить управление устройством и вызвать сбой, например, внести изменения в данные, передаваемые оператору, повредить оборудование или вызвать полный, или частичный отказ устройства.

Одной из самых громких кибератак в энергетике в 2021 году стал взлом сайта Белорусской атомной электростанции [3]. Хакерам удалось разместить фейковое объявление якобы от имени сотрудников АЭС. При этом технология, которая использовалась злоумышленниками, позволяла получить контроль над всем содержимым сайта, заменить имеющуюся там информацию или полностью удалить содержимое. Месяц спустя в США хакерская атака заблокировала работу крупнейшего оператора трубопроводов Colonial Pipeline [4]. Из-за этого транспортировка по трубопроводам была остановлена на несколько дней. Результат – скачок цен на бензин и временный дефицит топлива на всем Юго-Востоке США.

Но самой масштабной кибератакой на объект энергетики, пожалуй, можно считать случай в Венесуэле, который произошел в 2019 году [5]. Как сообщили власти страны, хакеры атаковали автоматическую систему контроля крупнейшей ГЭС имени Симона Боливара в Эль-Гури. Правительство Венесуэлы решило временно остановить работу гидроэлектростанции, что привело к отключению электричества практически по всей стране. Почти сутки без света находился 21 штат из 23, в том числе социальные объекты: школы, больницы.

Несмотря на то, что энергетический сектор является критически важной отраслью для любой страны и его безопасности уделяется должное внимание, он остается одним из самых уязвимых секторов для кибератак. Это связано с тем, что энергетическая отрасль довольно медленно обновляет инфраструктуру и программное обеспечение, что играет на руку хакерам. Устаревшее ПО – это идеальная мишень для DDoS-атак и эксплойтов (последовательность команд, использующих различные уязвимости в ПО для проведения атак).

Ситуация с кибербезопасностью СЭС обостряется, если ее нагрузкой является

электрооборудование современного технологического комплекса. Вследствие интеграции информационных технологий и автоматизации в энергосистемах и технологических комплексах кибербезопасность стала реальной проблемой [6].

СЭС прошлого века были неустойчивы для киберпреступников. Электрическая энергия вырабатывалась синхронными генераторами с аналоговыми системами управления. Электродвигатели подключались и отключались к сети автоматическими выключателями и магнитными пускателями.

В современных технологических комплексах широко применяется частотно-регулируемый электропривод. Для реализации заданных алгоритмов управления технологическими процессами электродвигатели насосов, вентиляторов и других производственных механизмов подключают к питающей сети через преобразователи частоты (ПЧ). Это позволяет снизить расходы электроэнергии, повысить надежность работы оборудования за счет уменьшения пусковых токов электродвигателей, снижения механических и тепловых нагрузок на электродвигатели и трансмиссию.

Производители ПЧ применяют в основном концепцию промежуточного звена постоянного тока. Поэтому схема ПЧ содержит неуправляемый входной выпрямитель с фильтром электромагнитной совместимости, сглаживающий фильтр, чаще всего в виде конденсатора, а также автономный инвертор на IGBT модулях с широтно-импульсной модуляцией. Управление ПЧ осуществляется микропроцессорной системой, которая имеет аналоговые и цифровые входы [7].

Большинство современных ПЧ имеют встроенный интерфейс передачи данных RS485 с протоколом Modbus, на других ПЧ существует возможность установки карты расширения с указанным интерфейсом. При работе с ПЧ по промышленной сети возможно использовать две реализации протокола Modbus – ASCII и RTU. Вариант RTU обеспечивает более высокую скорость передачи данных и чаще применяется для соединения с ПЧ.

Объединение ПЧ по шине RS485 позволяет осуществлять удаленную диагностику и настройку параметров ПЧ. Однако, как показали результаты исследований, стандартный протокол Modbus не содержит никаких функций шифрования или обеспечения безопасности [8]. Reid Wightman, исследователь безопасности в Digital Bond Labs, обнаружил, что хакер может удаленно взломать ПЧ. К сожалению, это может быть достигнуто без особых усилий. Были протестированы ПЧ для управления вентиляторами и насосами четырех известных производителей. В результате установлено, что в них отсутствуют базовые функции безопасности. Электроприводы с такими ПЧ практически не требуют аутентификации для изменения своих настроек, а это означает, что любой хакер, который может связаться с киберпространством и найти его, может относительно легко изменить настройки. Хуже того, ПЧ также передают данные о своей максимальной безопасной скорости электродвигателей, давая хакерам прекрасный шанс задать им ограничение скорости, а затем дать им команду превысить его. Увеличение скорости двигателя до критического значения или выше может нанести значительный ущерб. Вибрации могут разрушить подшипники, вал двигателя и трансмиссию. При этом служба эксплуатации не сразу определит, по какой причине оборудование вышло из строя.

Известны случаи кибератак на технологические комплексы с ПЧ. Ярким примером является кибератака на завод по обогащению урана в Иране [9]. Печально известный червь Stuxnet вызвал физическое разрушение ядерных центрифуг. В 2014 году Германия сообщила о случае физического разрушения печи на сталелитейном заводе в результате хакерской атаки на систему управления предприятия [10]. Злоумышленники получили доступ к контрольным панелям печей благодаря фишинговой атаке. На первом этапе операции они разослали заражённые электронные письма офисным сотрудникам завода, не участвовавшим в производственном процессе. Заразив их рабочие компьютеры,

хакеры затем смогли внедриться в систему контрольных панелей, с которой осуществлялось управление автоматизированной линией печей. Взлом не был единовременным. Атака представляла собой серию отдельных проникновений в системы завода, одно из которых в итоге и привело к отказу механизма отключения печей.

Интерес представляет анализ развития событий в результате кибератаки на технологический комплекс, который обеспечивает необходимый температурный режим магистрального транспорта газа. Компримированный газ, имеющий начальную температуру T_{in} и массовый расход G_{gas} , распределяясь и проходя по теплообменным секциям аппаратов воздушного охлаждения (АВО), передает определенное количество тепловой энергии Q охлаждающему воздуху, который принудительно с массовым расходом G_{air} продувается через теплообменные секции электроприводными вентиляторами с частотой вращения вала ω . В результате температура воздуха повышается от начального значения θ_{air1} , равного температуре окружающей среды, до значения θ_{air2} , а температура газа в объединенном выходном коллекторе понижается до усредненного значения T_{out} .

Тепловая производительность АВО зависит от многих возмущающих факторов, главными из которых являются расход и температура технологического газа после компримирования, степень загрязнения поверхности теплообменников, температура наружного воздуха. Если принять, что первые три вышеперечисленных фактора являются постоянными для заданного режима транспорта газа, то тогда колебания температуры наружного воздуха (суточные и сезонные) являются основным возмущающим фактором, непосредственно влияющим на процесс охлаждения газа. Для поддержания температуры технологического газа в заданных пределах возникает необходимость регулирования охлаждающего эффекта АВО. Это достигается за счет изменения расхода через АВО охлаждающего воздуха, на который влияет количество одновременно работающих вентиляторов, частота вра-

щения рабочего колеса вентилятора, угол «атаки» лопастей [12].

Наиболее эффективным является способ стабилизации температуры газа с примене-

нием частотно-регулируемого электропривода вентиляторов АВО [11]. Структурная схема системы, реализующей данный способ, показана на рис. 1.

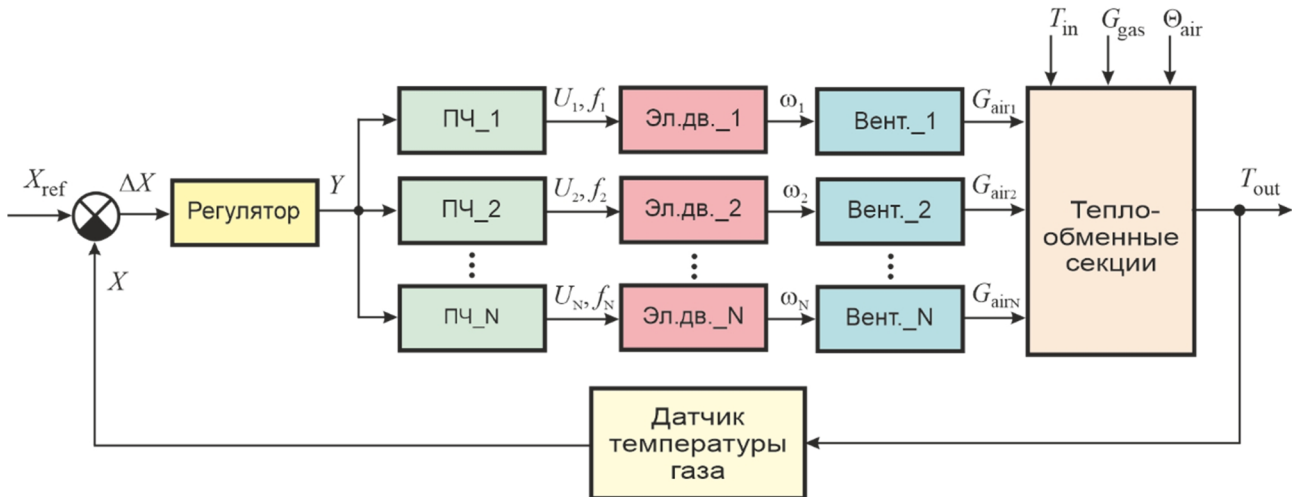


Рис. 1. Структурная схема системы стабилизации температуры газа с частотно-регулируемым электроприводом вентиляторов АВО

Сигнал X , пропорциональный температуре T_{out} с выхода датчика температуры газа подается на элемент сравнения и вычитается из сигнала уставки X_{ref} , который пропорционален заданному значению температуры газа. Полученная разность сигналов $\Delta X = X_{ref} - X$ поступает на вход регулятора, который с помощью сигнала Y задает частоту f и напряжение U на выходе ПЧ. Если в силу каких-либо причин температура газа на выходе АВО газа отличается от заданного значения, то регулятор так изменяет частоту f и напряжение U , чтобы за счет изменения частоты вращения ω и соответствующего изменения расхода воздуха, создаваемого вентиляторами, температура T_{out} стремилась к заданному значению.

Частота вращения ω лопастей вентилятора определяется частотой f и величиной напряжения U на выходе ПЧ, которые зависят от сигнала Y на управляющем входе. В настройках ПЧ вначале задается зависимость частоты f от сигнала Y , затем задается зависимость напряжения U от частоты f . Нормированный диапазон изменения сигнала Y составляет от нуля до 10 В. Если, в частности, максимальное значение частоты

f составляет 50 Гц, то коэффициент передачи преобразователя $K_{ПЧ} = f / Y$ будет равен 5 Гц/В.

Если в системе стабилизации температуры газа применяется регулятор пропорционально-интегрального типа, то соответствующая передаточная функция имеет вид

$$W_{pec}(s) = K_1 + K_2 / s,$$

где K_1 , K_2 – соответствующие коэффициенты регулятора, которые задаются в процессе настройки и могут быть подвергнуты изменениям в результате хакерской атаки.

На рис. 2 приведены графики, характеризующие поведение системы при различных настройках регулятора. Результаты получены в [12] путем имитационного моделирования системы в среде MATLAB с пакетом расширения Simulink.

В штатном режиме работы системы пропорциональный K_1 и интегральный K_2 коэффициенты передачи регулятора были равны 0,5 и 0,006 соответственно. Переходная функция (график 1) для этого режима после некоторого перерегулирования приходит к установившемуся значению.

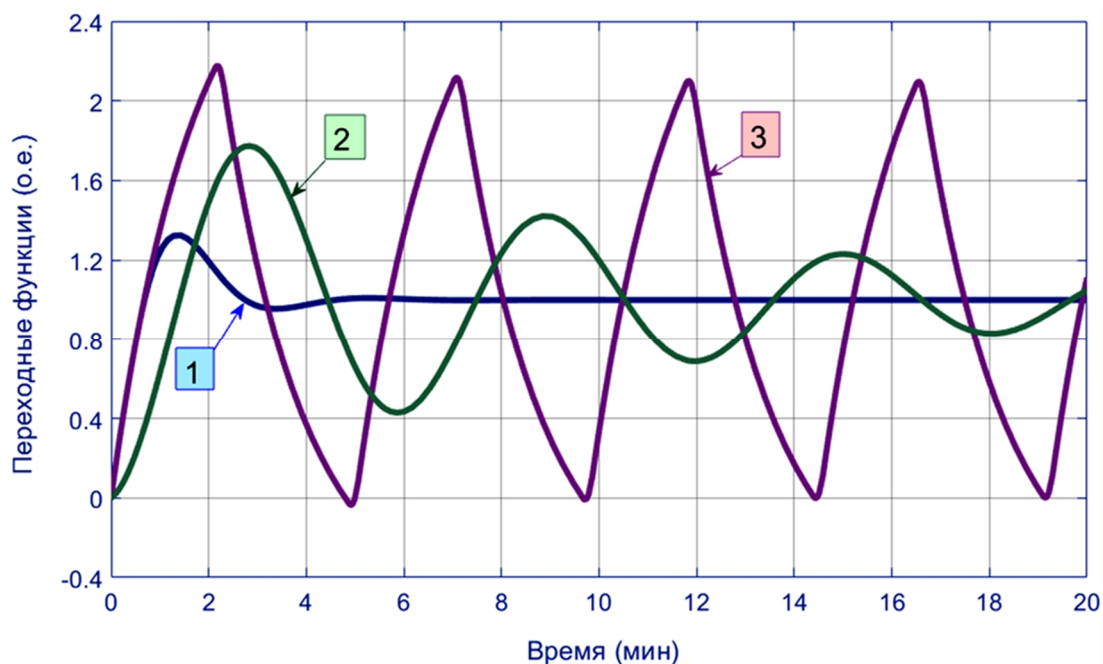


Рис. 2. Переходные функции при различных настройках регулятора:
1 – в штатном режиме; 2 и 3 – после кибератак

Графики 2 и 3 показывают поведение системы после воздействия кибератаки на регулятор. График 2 получен для ситуации, когда пропорциональный коэффициент передачи регулятора был уменьшен на порядок. В этом случае переходная функция приобретает колебательный характер с большим временем затухания. График 3 соответствует ситуации, когда преднамеренно в 10 раз был увеличен интегральный коэффициент. Это привело к тому, что возникли автоколебания, система стала неустойчивой. Как следствие, вентиляторы АВО будут с определенной периодичностью раскручиваться от минимальной частоты вращения до максимальной, величины которых ограничены настройками ПЧ, затем снова замедлять скорость вращения.

Выводы

Энергетика является критически важной отраслью для любой страны и ее безопас-

ности уделяется должное внимание, однако она остается одним из самых уязвимых секторов для кибератак.

Стремительное развитие цифровизации, автоматизация различных процессов, возможность удаленного управления, несомненно, повышают качество и эффективность работы энергетической отрасли. При этом интеграция информационных технологий и автоматизация СЭС и технологических комплексов делают кибербезопасность реальной проблемой.

В ПЧ для управления электроприводами отсутствуют базовые функции кибербезопасности, поэтому существует вероятность несанкционированного изменения их настроек. В результате хакерской атаки может быть нарушена работоспособность технологического комплекса. Поэтому для надежной работы комплекса должны быть предусмотрены меры, исключающие несанкционированный доступ к настройкам ПЧ и регулятора.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Issues of Cybersecurity in Electric Power Systems / N.I. Voropai, I.N. Kolosok, E.S. Korkina, A.B. Osak // Energy Systems Research. 2020. Vol. 3. № 22. P. 19-28.

2. Сектор энергетики стал одной из основных мишеней кибератак. URL: <https://rg.ru/2022/05/17/sektor-energetiki-stal-odnoj-iz-osnovnyh-mishenej-kiberatak.html>.

3. В Минске сообщили о взломе хакерами сайта Белорусской АЭС. URL: <https://www.rbc.ru/rbcfreenews/60854a3c9a794725531600b4>.
4. Темные хроники: к чему привела атака на Colonial Pipeline. URL: <https://ics-cert.kaspersky.ru/publications/reports/2021/05/21/darkchronicles-the-consequences-of-the-colonial-pipeline-attack/>.
5. Власти Венесуэлы назвали кибератаку причиной отключения света в стране. URL: <https://www.rbc.ru/rbcfreenews/5c994f5b9a79478c70f8413d>.
6. **Dagoumas A.** Assessing the Impact of Cybersecurity Attacks on Power Systems // *Energies*. 2019. 12,725. doi:10.3390/en12040725.
7. **Ustun T.S.** Cybersecurity Vulnerabilities of Smart Inverters and Their Impacts on Power System Operation // *Proceedings of International Conference on Power Electronics, Control and Automation*. 2019. doi: 10.1109/ICPECA47973.2019.8975537.
8. **Shah H., Spada S.** Variable Frequency Drive Systems and Cybersecurity. URL: <https://www.arcweb.com/blog/variable-frequency-drive-systems-and-cybersecurity/>.
9. **Ромашкина Н.П., Махукова А.В.** Компьютерная вредоносная атака на ядерную программу Ирана // *Информационные войны*. 2013. № 4 (28). С. 88-98.
10. Хакеры вывели из строя печи на металлургическом заводе в Германии. URL: <https://zlonov.ru/hackers-knocked-out-of-the-furnace-at-a-metallurgical-plant-in-germany/>.
11. **Smirnova E., Artyukhov I., Zemtsov A.** Consequence Development Analysis as a Result of Cyberattacks on a Technological Complex with Variable-Frequency Drives // *Proceeding of 4th Scientific School on Dynamics of Complex Networks and their Application in Intellectual Robotics (DCNAIR)*, Innopolis, Russia, 2020, pp. 231-233. doi: 10.1109/DCNAIR50402.2020.9216784.
12. Ресурсосберегающая технология охлаждения газа на компрессорных станциях / И.И. Артюхов, И.И. Аршакян, Р.Ш. Тарисов и др. // *Вестник Саратовского государственного технического университета*. 2011. Т. 1. № 3 (54). С. 131-139.

Тулупова Гульсим Нуржановна – сеньор-лектор Департамента интеллектуальных систем и кибербезопасности, Astana IT University, Казахстан

Gulsim N. Tulepova – Senior Lecturer, Department of Intelligent Systems and Cybersecurity, Astana IT University, Kazakhstan

Статья поступила в редакцию 26.08.24, принята к опубликованию 18.09.24

УДК 519.246.8:621.3

СРАВНЕНИЕ ПРИЗНАКОВЫХ И СТАТИСТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ СЕГМЕНТАЦИИ МНОГОМЕРНЫХ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ

М.М. Волков

COMPARISON OF FEATURE-BASED AND STATISTICAL ALGORITHMS FOR SEGMENTATION OF MULTIVARIATE TIME SERIES

M.M. Volkov

Массовое использование систем мониторинга, наблюдения и контроля электротехнических комплексов обуславливают постоянную необходимость в развитии научно-методического аппарата параллельной обработки функционально связанных диагностических сигналов, представленных временными рядами. Одной из проблем здесь является выбор достоверного признакового и/или статистического алгоритма распознавания состояний (класса, типа) наблюдаемого объекта по сигнатурам кривых временных рядов. В статье представлено математическое описание основных признаковых и статистических обнаружителей, структура используемого моделирующего комплекса, а также представлены результаты сравнения основных признаковых и статистических алгоритмов сегментации на примере данных вибродиагностики электромеханического оборудования.

Ключевые слова: диагностирование электротехнических комплексов, временной ряд, сегментация, сигнатура кривой, статистический обнаружитель, метрика, комплексирование, достоверность распознавания

В большинстве современных интеллектуальных систем технического диагностирования электротехнических комплексов с целью повышения наблюдаемости и достоверности контроля часто используются датчики измерения широкого спектра физических величин [1]. Формат данных датчиков-преобразующей аппаратуры представляет собой временной

Mass use of monitoring, observation and control systems of electrical engineering complexes causes a constant need for adaptation of the scientific and methodological apparatus for parallel processing of functionally related diagnostic signals represented by time series. One of the problems is the choice of a reliable sign and/or statistical algorithm for recognizing the states (class, type) of the observed object by time series curve signatures. The paper presents a mathematical description of the main feature and statistical detectors, the structure of the used modeling complex, and presents the results of comparison of the main feature and statistical segmentation algorithms on the example of vibration diagnostics data of electromechanical equipment.

Keywords diagnostics of electrical engineering complexes, time series, segmentation, curve signature, statistical detector, metrics, complexing, reliability of recognition

ряд отсчетов значений измеряемой физической величины (рис. 1). В случае многопараметрического мониторинга состояния, например, изделий электромеханической техники средствами акустического, вибрационного, теплового, электрического контроля выходной формат данных представляет собой семейство функционально связанных

плоских кривых в формате многомерного временного ряда:

$$S = \begin{array}{c|ccc} & t_1 & \dots & t_N \\ \hline \overline{s_1} & s_{11} & \dots & s_{1N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \hline \overline{s_M} & s_{M1} & \dots & s_{MN} \end{array}, \quad (1)$$

где $s_{ij} = s_i(t_j)$, $i = \overline{1, N}$, $j = \overline{1, M}$ – отсчет j -й кривой в i -й момент времени.

Анализ рядов данных мониторинга электротехнических комплексов, как правило, заключается в сегментации (распознавании положения на временной оси) фрагментов кривых, являющихся шаблонами каких-либо технических состояний диагностируемого электротехнического оборудования.

Методы сегментации по форме кривых временного ряда (по сигнатуре) разделены на два больших класса – признаковые и статистические.

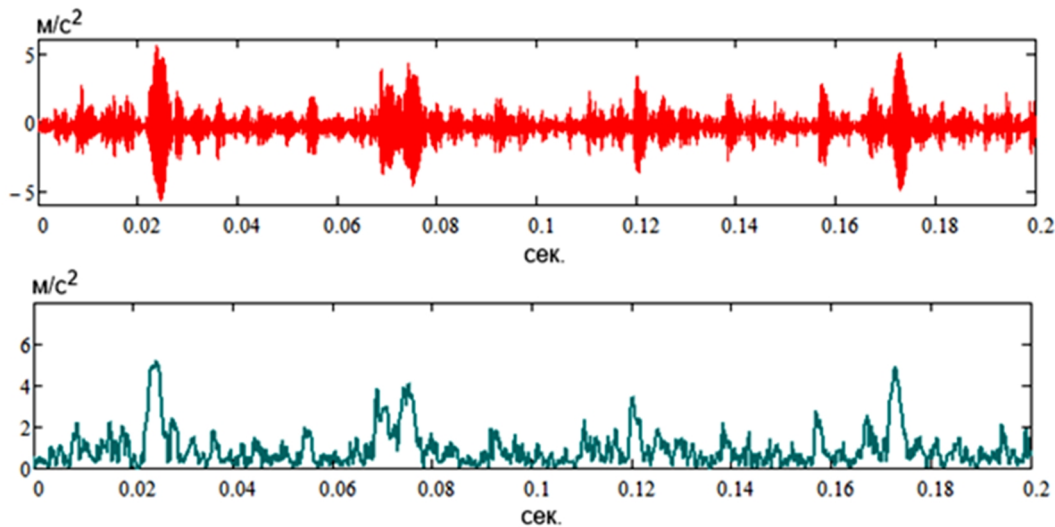


Рис. 1. Кривая временного ряда датчика виброускорения и его огибающая (снизу) [2]

Признаковые методы основаны на вычислении количественной оценки геометрической меры близости векторов признаков (шаблона и распознаваемого образца). Векторами признаков могут быть и сами отсчеты фрагментов или вычисленные ста-

тистические и эвристические характеристики кривых.

Если представить в N -мерном пространстве признаков два сличаемых фрагмента в виде двух точек X и A , то **евклидово расстояние** между ними вычисляется как [3]:

$$l_2(X, A) = \sqrt{(x_1 - a_1)^2 + (x_2 - a_2)^2 + \dots + (x_n - a_n)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - a_i)^2}. \quad (2)$$

Если евклидово расстояние возвести в квадрат, то при классификации назначаются большие веса более отдаленным друг от друга объектам.

При $v \rightarrow \infty$ в формуле

$$l_v^\mu(X, A) = \left(\sum_{j=1}^N |x_j - a_j|^v \right)^{\frac{\mu}{v}}, \quad \text{расстояние (по}$$

Чебышёву) равно максимальному отклонению по какой-либо из координат $l_\infty = \max_{1 \leq j \leq N} |x_j - a_j|$,

т. е. выбор данной меры расстояния с большой степенью дает резкое выделение класса с наименьшим расстоянием до кривой [4].

Например, если две кривые динамической подписи, представленные тремя отсчетами, представить двумя точками в трехмерном пространстве

$$A(x_1, y_1, z_1) = A(2, 3, 4)$$

$$\text{и } X(x_2, y_2, z_2) = X(5, 9, 11),$$

то чебышёвское расстояние между ними:

$$l_{\infty}(X, A) = \max\{|x_2 - x_1|, |y_2 - y_1|, |z_2 - z_1|\} = \max\{|2 - 5|, |3 - 9|, |4 - 11|\} = \max\{3, 6, 7\} = 7.$$

Для оценки степени линейной зависимости двух кривых X и A пользуются статистическим коэффициентом корреляции [5]:

$$r_{xa} = \frac{\mu_{xa}}{\sigma_x \sigma_a}, \quad (3)$$

где σ_x^2 , σ_a^2 – дисперсии, а μ_{xa} – их ковариация (совместная дисперсия). При наличии k наблюдений в каждом фрагменте

$$\mu(X, A) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x})(a_i - \bar{a}). \quad (4)$$

В качестве нормированной корреляционной функции применялась:

$$r_k = \frac{\sum_{t=1}^{n-k} X_t A_{t+k} - \sum_{t=1}^{n-k} A_t \sum_{t=1}^{n-k} X_{t+k} / (n-k)}{\sqrt{\left[\sum_{t=k}^{n-k} A_t^2 - \sum_{t=k}^{n-k} A_t^2 / (n-k) \right] \left[\sum_{t=k+1}^n X_t^2 - \sum_{t=k+1}^n X_t^2 / (n-k) \right]}}. \quad (6)$$

В том месте, где параметр (6) имеет максимальное значение, начинается реализация искомой сигнатуры.

Статистические методы обнаружения, как и большинство методов распознавания, основаны на гипотезе компактности, согласно которой фрагменты кривых одного класса (образа) более близки друг другу, чем фрагменты кривых разных классов [6]. Расстояние (информационное расхождение, дивергенция – является безразмерной величиной) Кульбака – Лейблера – это метрика между распределениями случайных величин, или расстояние $D_{KL}(P||Q)$ от статистического распределения P значений кривой образца до статистического распределения Q значений кривой шаблона. В непрерывном случае [7]:

$$D_{KL}(P||Q) = \int p(x) \ln(p(x)/q(x)) dx, \quad (7)$$

для дискретного случая:

$$D_{KL}(P||Q) = \sum_{i=1}^n P_i \ln(P_i/Q_i), \quad (8)$$

или

$$p_I(t_1, t_2) = \frac{K_I(t_1, t_2)}{\sigma_I(t_1) \sigma_J(t_2)}$$

$$p_I(t_1, t_2) = \frac{K_I(t_1, t_2)}{\sqrt{K_I(t_1, t_1)} \sqrt{K_J(t_2, t_2)}}, \quad (5)$$

где I – значения отсчетов кривой образца; J – значения отсчетов кривой эталона.

Для обнаружения места на временной оси совпадения двух фрагментов временных рядов (сканируемой последовательности X и шаблона A) как коэффициент корреляции между x_t и a_{t+k} в зависимости от номера отсчета k вычисляется параметр [9]:

где P_i , Q_i – отсчеты значений функции распределения двух кривых.

Так как рассогласование Кульбака – Лейблера между шаблоном и скользящим окном d_{kl}^1 в общем случае не равно рассогласованию между скользящим окном и шаблоном d_{kl}^2 , для его использования в качестве расстояния применяется показатель $d_{KL} = (d_{kl}^1 + d_{kl}^2)/2$ [8].

В качестве исходных данных для экспериментального исследования и сравнения достоверности сегментации фрагментов временных рядов с помощью различных методов использовались данные [10].

Для исследования использована программная процедура, реализующая сценарий статистического моделирования (рис. 2). В сценарии статистического моделирования реализованы вышеописанные методы сегментации посредством многократного обнаружения номера отсчета на каждой сканируемой кривой массива синхронных измерений, с которого начинается искомый (сегментируемый) фрагмент.

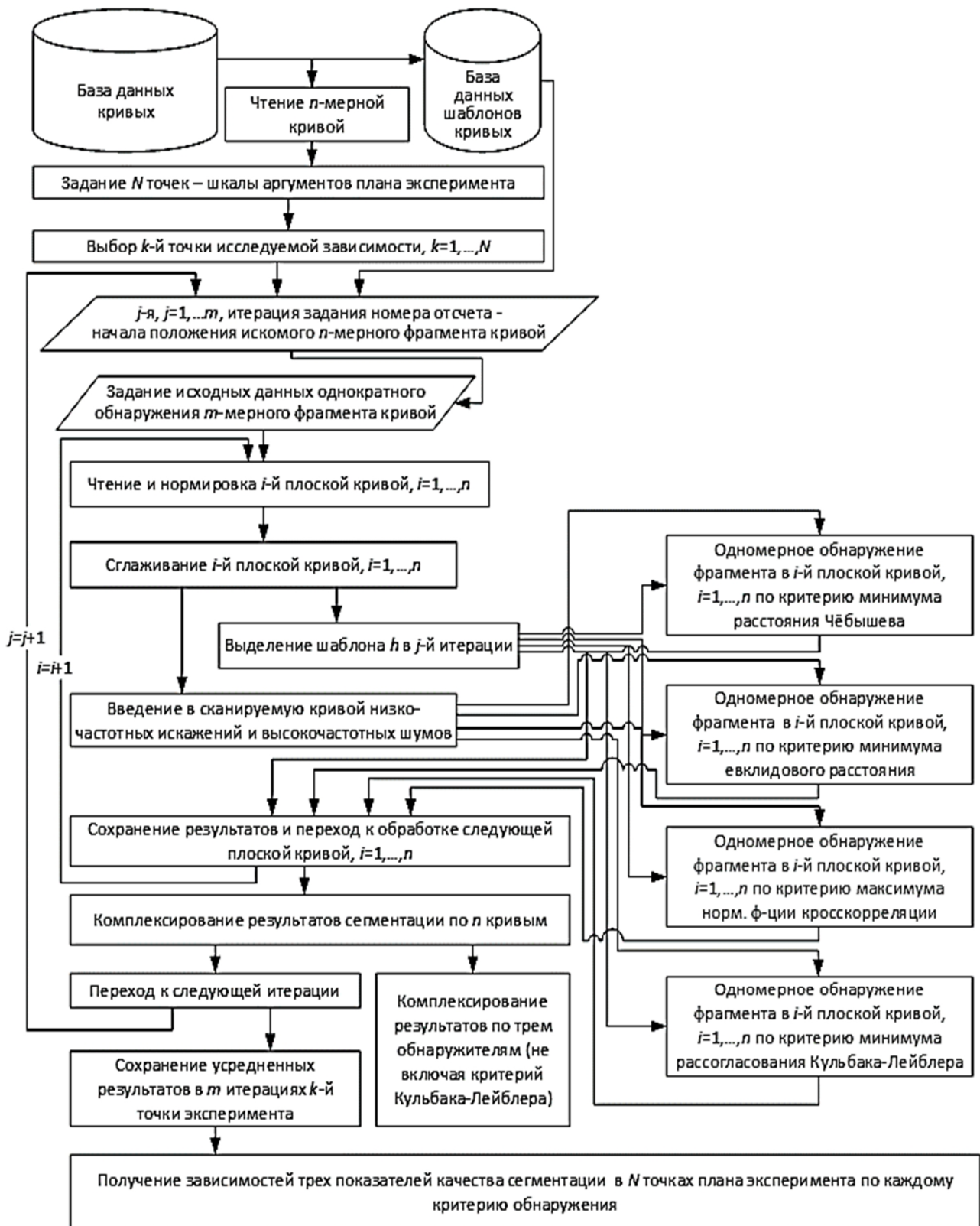


Рис. 2. Сценарий статистического моделирования методов сегментации временных рядов

Результаты сегментации объединяются по всем кривым и всем обнаружителям (кроме обнаружителя по критерию Кульбака –

Лейблера). Сканируемая кривая длиной L_1 и шаблон длиной L_2 представлены в дискретном виде, причем $L_1 \gg L_2$. В ре-

зультате однократного обнаружения фрагмента каждым из четырех обнаружителей рассчитываются два показателя качества многомерной сегментации временного ряда:

1) отношение амплитуды максимального отклика к амплитуде ближайшего по высоте отклика $R_1 = S_{\max} / S_{\max-1}$;

2) отношение максимального отклика к СКО всех остальных откликов $R_2 = S_{\max} / \sigma_s$;

Путем задания соответствующих параметров выполнения сценария имеется возможность осуществлять графический анализ результатов искажений последовательностей, включая временные реализации кривых и их спектры (рис. 3) и результатов

обнаружения по каждому параметру в отдельности (рис. 4).

По завершении работы всех четырех обнаружителей в сценарии запускается двухэтапная процедура комплексирования результатов сегментации:

1) на первом этапе по совокупности кривых в рамках каждого обнаружителя (рис. 5, верхние графики); на втором этапе – по совокупности всех трех обнаружителей (рис. 5, нижний график);

2) ввиду низкой помехоустойчивости обнаружитель по рассогласованию Кульбака – Лейблера в итоговом результате не компенсируется, а используется для исследования условий, при которых данный критерий применим.

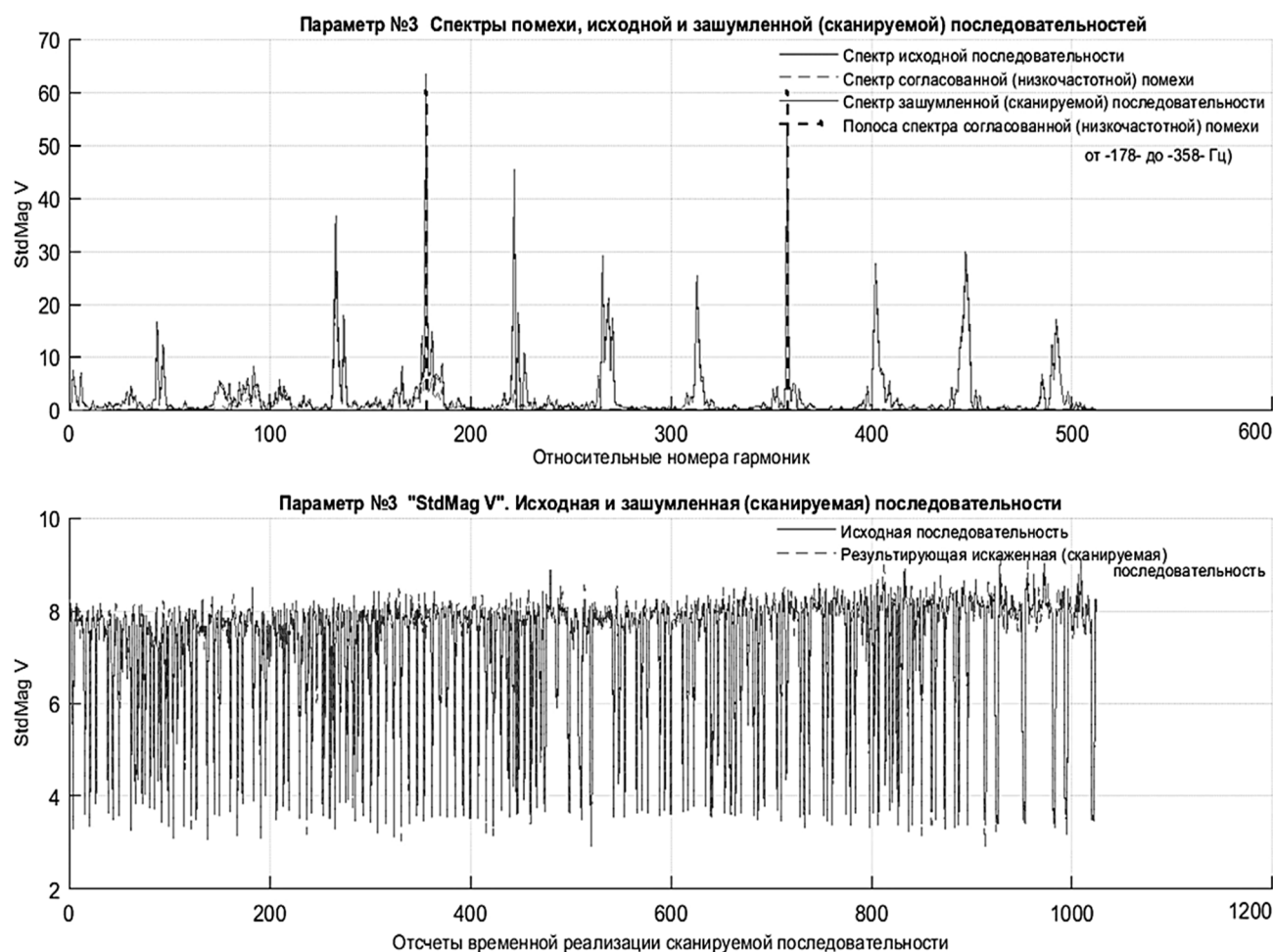


Рис. 3. Верхний график – спектры низкочастотной помехи, исходной и зашумленной сканируемой последовательности; нижний – последовательность до и после искажения

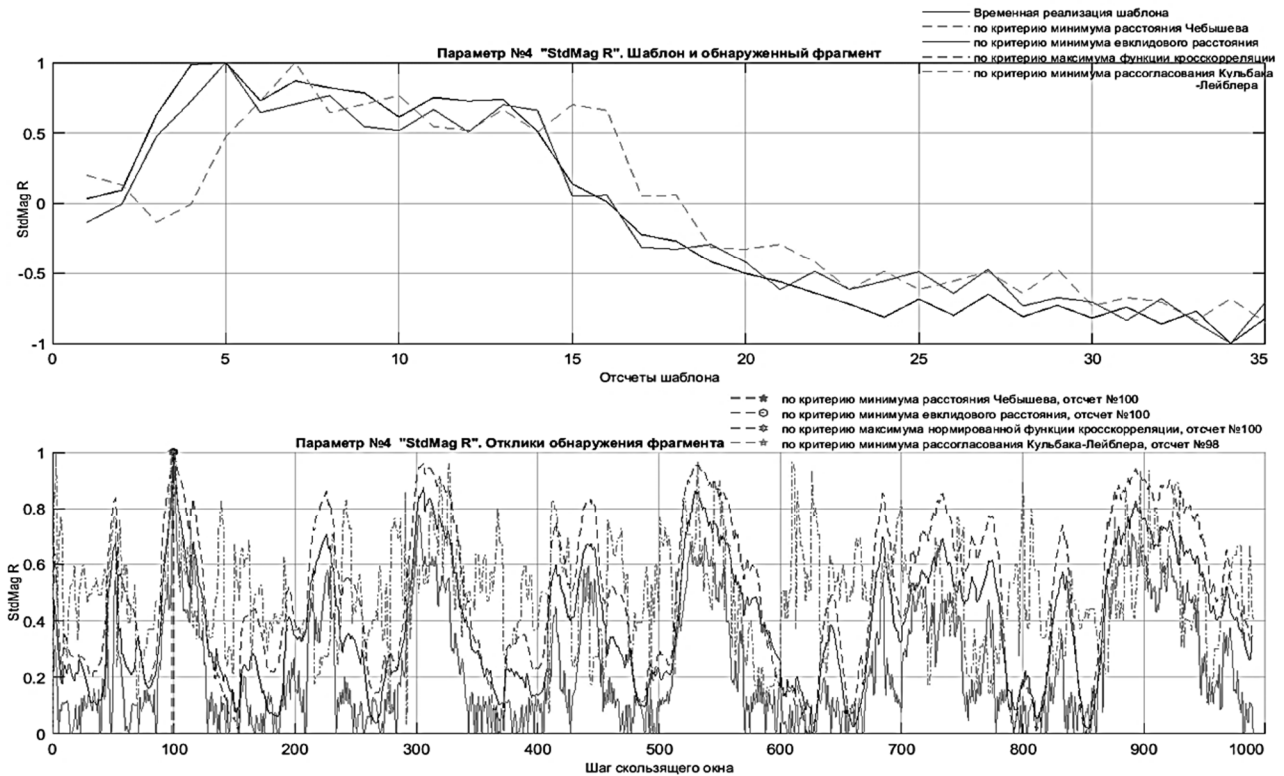


Рис. 4. Верхний график – шаблон и фрагменты, сегментированные разными обнаружителями; нижний график – отклики обнаружителей

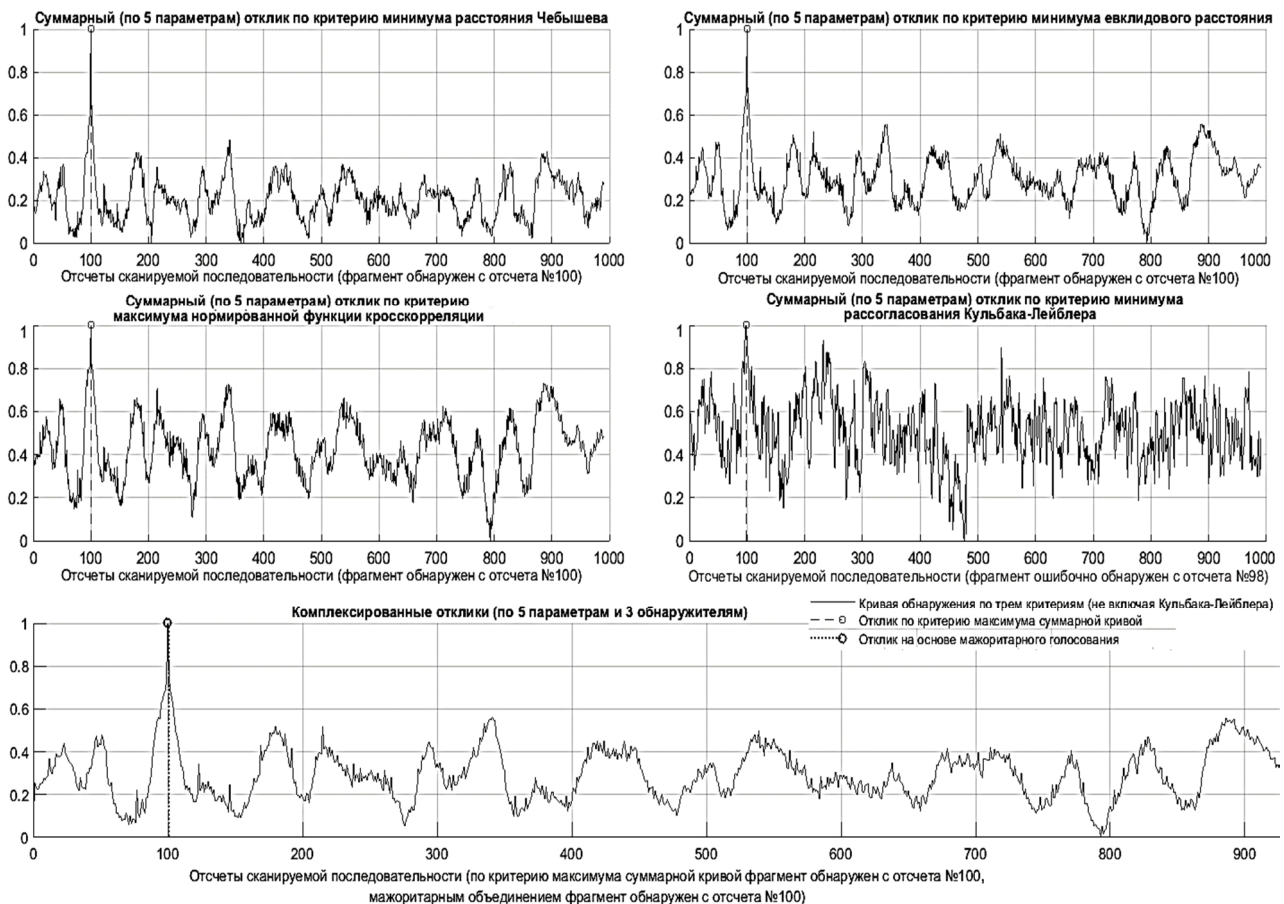


Рис. 5. Результаты комплексирования обнаружителей

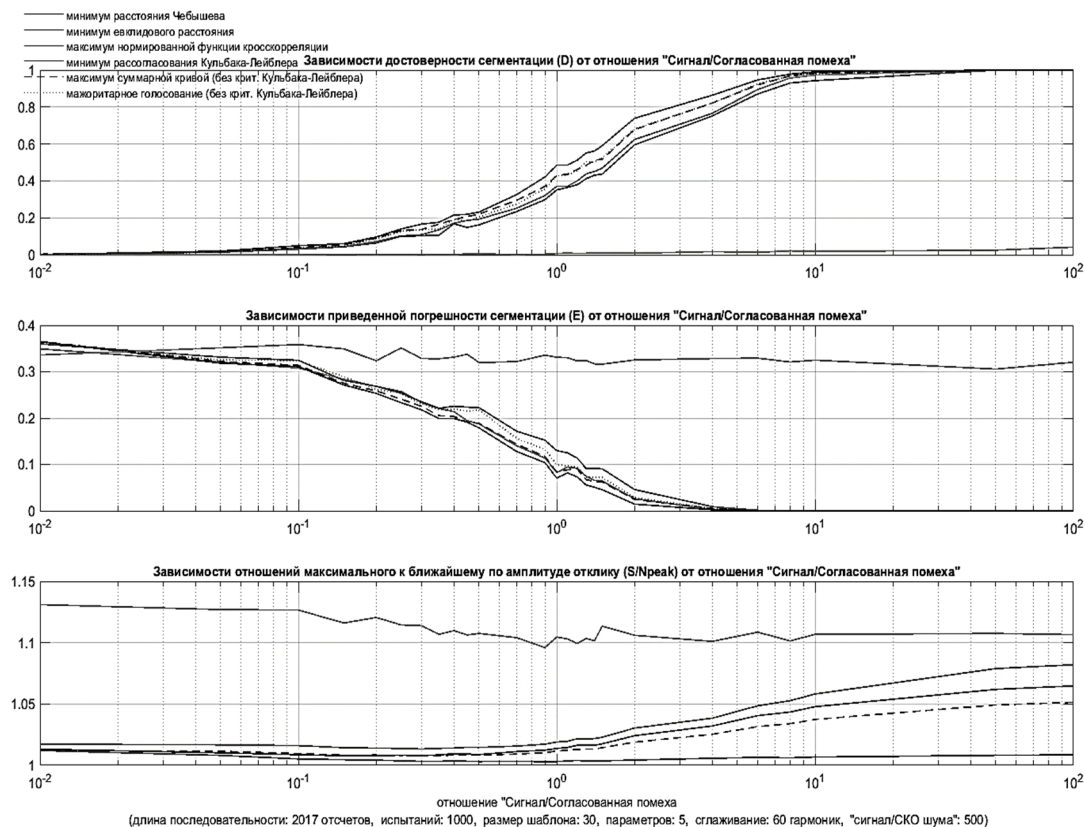


Рис. 6. Результаты многократного обнаружения при построении зависимостей показателей качества сегментации фрагмента многомерной кривой от отношения «Сигнал/согласованная помеха» по амплитуде

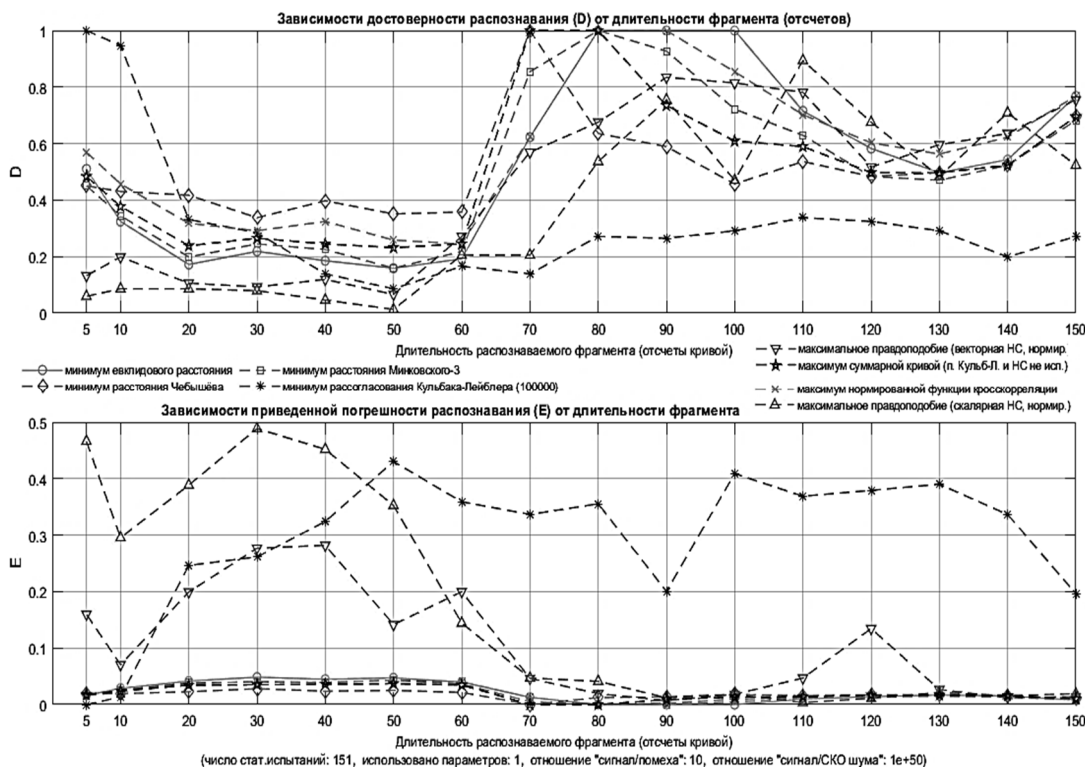


Рис. 7. Зависимость достоверности (верхний график) и погрешности сегментации от длительности фрагмента наблюдения различными алгоритмами при доминирующих низкочастотных искажениях формы кривой

Комплексирование результатов сегментации на каждом этапе осуществляется двумя способами:

1) по форме обобщенной кривой, образованной суммированием и нормировкой отсчетов M кривых блеска в диапазон $[0, 1]$;

2) на основе мажоритарного голосования (2 из 3), при котором результаты совпадений номеров отсчетов хотя бы двух из трех обнаружителей признаются итоговыми (при различии результатов всех трех обнаружителей итоговым признается результат по критерию максимума нормированной функции кросс-корреляции).

По совокупности обнаружений по нескольким кривым (первый этап комплексирования), помимо показателей качества сегментации R_1 и R_2 , дополнительно вычисляется абсолютная погрешность сегментации каждого обнаружителя как количество отсчетов между максимальным откликом и истинным номером отсчета, с которого начинается шаблон: $\Delta = |S - S_{\max}|$.

Запуск статистической процедуры для определения показателей качества исследуемых методов сегментации реализован посредством многократного обнаружения фрагментов (выполнения операций 3-6) каждый раз при случайном положении шаблона на сканируемой последовательности. Исследуются зависимости:

1) достоверности сегментации многомерной кривой, т. е. вероятности правильного определения номера ее отсчета, с которого начинается фрагмент, подобный шаблону, вычисляемой как

$$D = N_+ / N_{\Sigma}, \quad (9)$$

где N_+ – число опытов с правильным обнаружением номера отсчета; N_{Σ} – общее число опытов многократного обнаружения;

2) погрешности сегментации, приведенной к длительности сканируемой последовательности, вычисляемой как

$$E = \left(\frac{1}{N_{\Sigma}} \sum_{i=1}^{N_{\Sigma}} \Delta_i \right) / (L_2 - L_1), \quad (10)$$

где Δ_i – модуль разности истинного и обнаруженного отсчета начала искомого фрагмента; L_1 – длина шаблона кривой; L_2 – длина сканируемой кривой;

3) среднего (по трем обнаружителям, N_{Σ} и N_P) отношения истинного и максимального из ложных откликов s^1/s^2 (либо отношение максимального и следующего по амплитуде отклика при неверном обнаружении):

$$S = \frac{1}{3N_{\Sigma}N_P} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{N_{\Sigma}} \sum_{k=1}^{N_P} \frac{s_{ijk}^1}{s_{ijk}^2}, \quad (11)$$

где N_P – число параметров (синхронных кривых, участвующих в анализе); s_{ijk} – отклик i -го обнаружителя в j -й реализации по k -му параметру.

По результатам многократного обнаружения построены зависимости трех показателей качества сегментации (рис. 6, 7), на основании которых формулируются выводы относительно достоверности того или иного обнаружителя.

В результате проведенных экспериментов по временным рядам базы данных [10] установлено, что:

1) при преимущественном воздействии на значения временного ряда низкочастотных составляющих высокую достоверность показывает метод сегментации на основе рассогласования Кульбака – Лейблера;

2) наличие незначительных высокочастотных составляющих значительно снижает достоверность сегментации метода Кульбака – Лейблера, и при малых отношениях сигнал/шум он становится неприемлемым;

3) при наличии искажений всех видов наиболее устойчивыми алгоритмами являются метрический по критерию минимума расстояния Чебышёва и корреляционный – по критерию максимума нормированной функции кросс-корреляции.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ковалев В.З., Щербаков А.Г., Ковалев А.Ю. Идентификация параметров и характеристик математических моделей электротехнических устройств: монография. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2005. 108 с.
2. Вибродиагностика. URL: <https://vibro-expert.ru/vibrodiagnostika-opredelenie.html>.
3. Биргер И.А. Техническая диагностика. Москва: Машиностроение, 1978. 240 с.
4. Айвазян С.А., Мхитарян В.С. Прикладная статистика и основы эконометрики. Москва: ЮНИТИ, 2022. 1005 с.
5. Куренков А.М. Статистика. Москва: Перспектива, 2012. 770 с.
6. Гусаров В. М., Проява С.М. Общая теория статистики. Москва: ЮНИТИ-ДАНА, 2022. 207 с.
7. Громыко Г.Л. Теория статистики: практикум. Москва: ИНФРА-М, 2018. 238 с.
8. Теория статистики: учебник / Р.А. Шмойлова, В.Г. Минашкин, Н.А. Садовникова, Е.Б. Шувалова; под ред. Р.А. Шмойловой. Москва: Финансы и статистика, 2014. 656 с.
9. Шахтарин Б.И. Обнаружение сигналов: монография. Москва: Горячая линия-Телеком, 2015. 464 с.
10. Mechanical Gear Vibration Dataset [online]. URL: <https://www.kaggle.com/datasets/hieudaotrung/gear-vibration>.

Волков Михаил Михайлович – аспирант Волгоградского государственного технического университета, ведущий инженер отдела по обеспечению поддержки проектной деятельности, ООО «РИТЭК», Волгоград

Mikhail M. Volkov – Postgraduate, Volgograd State Technical University, Leading Engineer of the Project Activity Support Department, RITEK LLC, Volgograd

Статья поступила в редакцию 26.08.24, принята к опубликованию 18.09.24

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 телефону:

8 (8452) 99-87-64 – приемная главного редактора.

Просьба направлять публикации по адресу:

Россия, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, ком. 1/134, главному редактору журнала «Вопросы электротехнологии» Артюхову И.И. и по электронной почте eltech@sstu.ru

Требования к оформлению публикаций

- Рукопись статьи оформляется в программе Microsoft Word для Windows
 - Формат страницы – А4, ориентация книжная
 - Размеры полей страниц: верхнее и нижнее – по 25 мм, левое и правое – по 20 мм
 - Абзацный отступ – 0,63 см
 - Шрифт текста рукописи – Times New Roman, размер 12 pt
 - Междустрочный интервал – 1,0
 - Общий объем рукописи (включая иллюстрации и таблицы) – не более 10 страниц.
- Указанное ограничение объема рукописи не распространяется на сведения об авторах.

Иллюстрации (рисунки, графики, фотографии) располагаются в тексте статьи и должны иметь номер и подпись. Чертежи, схемы и другие графические материалы выполняются с хорошей проработкой деталей в программах Corel Draw (с расширением *.cdr) или других редакторах (с расширением *.jpeg или *.tiff). Все графические материалы должны быть доступны для редактирования, поэтому необходимо представлять их в исходном формате. Цветные иллюстрации должны быть адаптированы для черно-белой печатной версии журнала. Таблицы располагаются непосредственно в тексте статьи. Каждая таблица должна иметь номер и заголовок.

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 Р 7.0.5-2008 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 Ю.Л. Жупиловой
Перевод на английский язык А.Х. Аскаровой

Адрес редакции:
410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77
Телефон: (8452) 99-87-64
e-mail: eltech@sstu.ru

Подписано в печать 20.09.2024 Дата выхода в свет 27.09.2024

Формат 60×84 1/8 Бум. офсет.

Усл. печ. л. 9,5 Уч. изд. л. 4,1

Тираж 500 экз. Заказ 29 Цена свободная

Отпечатано в Издательстве СГТУ имени Гагарина Ю.А.

Адрес: 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 2024 г.)

Свидетельство о регистрации СМИ *ПИ № ФС77-54621*
выдано Роскомнадзором от 01.07.2013

Editor L.A. Skvortsova
Computer-assisted layout by Yu.L. Zhupilova
Translation into English by A.H. Askarova

Address of the editorial office:
77 Politekhnikeskaya Str., 410054, Saratov, Russia
Tel.: (8452) 99-87-64
e-mail: eltech@sstu.ru

Print date: 20.09.2024 Date of publication: 27.09.2024

Paper size: 60×84 1/8. Offset-Print

Conventional printed sheet 9,5 Publication base sheet 4,1

Circulation: 500 printed copies. Order 29 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*

Issued by Roscomnadzor 01.07.2013

