

Издается с ноября 2013 года
Выходит один раз в квартал

№ 3 (12)
Сентябрь 2016

ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

Главный редактор
Зам. главного редактора
Ответственный секретарь

АРХАНГЕЛЬСКИЙ ЮРИЙ СЕРГЕЕВИЧ
БЕКРЕНЕВ НИКОЛАЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ
ВЫРЫХАНОВ ДЕНИС АЛЕКСАНДРОВИЧ

Редакционная коллегия

И.Н. АНТОНОВ	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
Ю.С. АРХАНГЕЛЬСКИЙ	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
Н.В. БЕКРЕНЕВ	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
В.Б. ДЕМИДОВИЧ	д.т.н., профессор, СПбГЭУ (ЛЭТИ), Санкт-Петербург
Л.С. ЗИМИН	д.т.н., профессор, СамГТУ, Самара
Н.И. ЛОВЦОВА	д.с.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
В.Н. ЛЯСНИКОВ	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
А.Н. МАКАРОВ	д.т.н., профессор, ТГТУ, Тверь
Г.А. МОРОЗОВ	д.т.н., профессор, КНИТУ имени А.Н. Туполева (КАИ), Казань
Ю.П. ПЕРЕЛЫГИН	д.т.н., профессор, ПГУ, Пенза
А.Н. ПЛОТНИКОВ	д.э.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
В.П. РУБЦОВ	д.т.н., профессор, НИУ «МЭИ», Москва
Ф.Н. САРАПУЛОВ	д.т.н., профессор, УрФУ, Екатеринбург
Б.К. СИВЯКОВ	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
А.А. СЫТНИК	д.т.н., профессор, первый проректор СГТУ имени Гагарина Ю.А.
Ю.Б. ТОМАШЕВСКИЙ	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
Г.Г. УГАРОВ	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
В.Н. ХМЕЛЕВ	д.т.н., профессор, БТИ, Бийск
В.А. ЦАРЕВ	д.т.н., профессор, СГТУ Гагарина Ю.А., Саратов
Д.А. ВЫРЫХАНОВ	к.т.н., СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

Since November 2013
Published Quarterly

№ 3 (12)
September 2016

JOURNAL OF ELECTROTECHNICS

Scientific and Technical Publication

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

Chief Editor

Assistant to the Chief Editor

Chief Executive Officer

ARKHANGELSKY YURI SERGEEVICH

BEKRENEV NIKOLAY VALERYEVICH

VIRIKHANOV DENIS ALEKSANDROVICH

Editorial Board Members

I.N. ANTONOV

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

YU.S. ARKHANGELSKIY

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

N.V. BEKRENEV

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

V.B. DEMIDOVICH

Dr.Sc., Professor, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

L.S. ZIMIN

Dr.Sc., Professor, Samara State Technical University

N.I. LOVTSOVA

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

V.N. LYASNIKOV

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

A.N. MAKAROV

Dr.Sc., Professor, Tver State Technical University

G.A. MOROZOV

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

YU.P. PERELYGIN

Dr.Sc., Professor, Penza State University

A.N. PLOTNIKOV

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

V.P. RUBTSOV

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

F.N. SARAPULOV

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

B.K. SIVYAKOV

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

A.A. SYTNIK

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

YU.B. TOMASHEVSKY

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

G.G. UGAROV

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

V.N. KHMELEV

Dr.Sc., Professor, Biysk Technological Institute

V.A. TSAREV

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

D.A. VIRIKHANOV

PhD, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОТЕРМИЯ

- Федоров А.В., Архангельский Ю.С.** Эффективность многочастотной СВЧ обработки диэлектриков в камерах лучевого типа5
- Юдина В.О., Архангельский Ю.С.** Транспортные системы СВЧ электротермических установок, работающих в методическом режиме.....10
- Юдина В.О., Архангельский Ю.С.** Особенности термообработки диэлектрика в толкательной СВЧ электротермической установке на базе камеры с бегущей волной13

ЭЛЕКТРОФИЗИКА

- Тищенко О.Д., Тищенко А.А., Зоркин А.Я.** Формирование кромок автоэмиссионных шайб комбинированного катода маломощного усилителя прямой волны М-типа16
- Фоменко Л.А., Соколова Т.Н., Сурменко Е.Л., Родионов И.В.** Влияние ультразвуковой кавитации на кинетику локального электрохимического осаждения меди в узких каналах формообразующих углублений21

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

- Вырыханов Д.А., Федоров Д.А.** Вольт-амперная характеристика процесса электро-механического преобразования энергии в реактивных преобразователях29

- Меншиков И.А.** Оценка работоспособности одноконтурной системы троллейбусного электродвигателя ДК-211БМ с помощью моделирования диагностического процесса35
- Меншиков И.А.** Оценка работоспособности электромеханического оборудования с помощью моделирования многофакторного диагностического процесса.....40

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

- Голембиовский Ю.М., Костерев А.А.** Много-модульная система электропитания многопостового комплекса для индукционной плавки металла46

ИЗМЕРЕНИЯ

- Анашкин А.А., Угаров Г.Г.** Способ адаптивного измерения поляризационного потенциала в процессе его стабилизации средствами электрохимической защиты подземного сооружения56
- К сведению авторов60

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

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

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

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

CONTENTS

ELECTROTHERMY

- Fedorov A.V., Arkhangelsky Yu.S.** Efficiency of multi-frequency microwave processing of dielectrics in the chambers of the radial type 5
- Yudina V. A., Arkhangelsky Yu.S.** Transport systems of microwave electrothermal units, working in a methodical mode 10
- Yudina V. A., Arkhangelsky Yu.S.** Features heat dielectric in pushing microwave electrothermal installations based on camera traveling wave..... 13

ELECTROPHYSICS

- Tishchenko O.D., Tishchenko A.A., Zorkin A.Ya.** The process of forming the edges of the washers combined field emission cathode for lowpower direct wave amplifier M-type..... 16
- Fomenko L.A., Sokolova T.N., Surmenko E.L., Rodionov I.V.** Kinetics of lokal electrochemical deposition of copper in narrow channels of the forming recesses under the influence of ultrasonic cavitation..... 21

ELECTROMECHANICS

- Virikhanov D.A., Fedorov D.A.** Volt-ampere characteristics of the process of Electromechanical energy conversion in the reactive converters29
- Menshikov I.A.** Performance evaluation, single-loop system of trolley motor DK-211BM modeling of the diagnostic process35
- Menshikov I.A.** Performance evaluation of electro-mechanical equipment using multi-factor simulation of the diagnostic process40

ELECTRIC POWER SUPPLY

- Golembiovsky Yu.M., Kosterev A.A.** Multi-module power supply system for complex multioperator induction melting of metals46

MEASUREMENT

- Anashkin A.A., Ugarov G.G.** Method of adaptive measurement polarization potential in the process of stabilization of the electrochemical protection of underground structures56
- Information for Authors60

DEAR AUTHORS!

Each article is provided with a short information about the author.
For this reason, please, send us the following information:

1. Author(s) (last name, patronymic and first name),
2. Place of work, position.

Additionally, we would remind you that each article should be provided with an abstract (about 4-5 sentences) in Russian and in English (including the title), and keywords.

ЭЛЕКТРОТЕРМИЯ

УДК 621.365.5

ЭФФЕКТИВНОСТЬ МНОГОЧАСТОТНОЙ СВЧ ОБРАБОТКИ ДИЭЛЕКТРИКОВ В КАМЕРАХ ЛУЧЕВОГО ТИПА

А.В. Фёдоров, Ю.С. Архангельский

EFFICIENCY OF MULTIFREQUENCY MICROWAVE TREATMENT OF DIELECTRICS IN RAY-TYPE CHAMBERS

A.V. Fedorov, Yu.S. Arkhangelsky

Рассмотрено влияние изменения длины волны СВЧ генератора СВЧ электротермической установки на ее энергетическую эффективность в процессе термообработки.

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

Для термической обработки диэлектрических материалов энергией СВЧ широко используются установки с рабочими камерами лучевого типа (КЛТ) [1]. Такая камера имеет один или несколько излучателей СВЧ энергии, расположенных у поверхности нагреваемого объекта. В работе [2] поднята проблема изменения глубины проникновения СВЧ излучения внутрь нагреваемого диэлектрика из-за изменения его диэлектрических параметров в процессе нагрева. Предложен многочастотный режим работы СВЧ генератора установки, при котором, плавно изменяя частоту СВЧ генератора в процессе нагрева, можно добиться одинакового распределения удельной мощности СВЧ энергии в глубине диэлектрика на всём протяжении нагрева.

The paper considers the influence of changes in the microwave wavelength of a microwave generator on its energy efficiency in the process of thermal treatment.

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

Другой задачей многочастотного режима работы такой СВЧ установки с КЛТ является стабилизация КПД в процессе нагрева.

Если рассмотреть КЛТ с помощью теории длинных линий, то изменение диэлектрических параметров ε' и $\operatorname{tg} \delta$ обрабатываемого объекта в процессе нагрева приводит к изменению ее входного сопротивления, отчего изменяется коэффициент отражения по мощности $|\Gamma|$ и КПД η установки. Кроме того, в СВЧ установках периодического действия на КЛТ нагреваемый объект имеет определенную толщину и лежит на транспортной ленте, подвешенной над металлической стенкой (рис. 1а) либо над приемным рупором (рис. 1б), что также влияет на характеристики рабочей камеры.

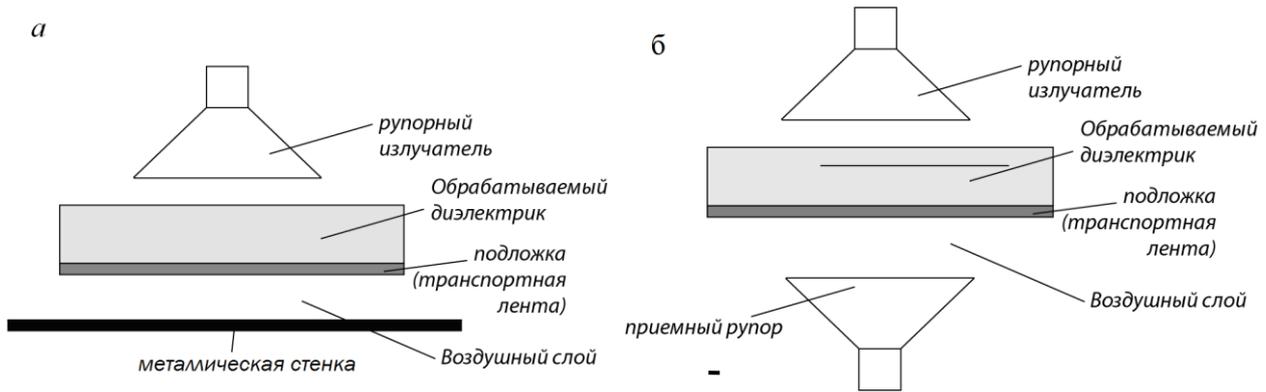


Рис. 1. Конструкция рабочей камеры лучевого типа; *а* – с металлической стенкой, *б* – с приёмным рупором

Рассмотрим КЛТ, показанную на рис. 1*а*. По теории длинных линий её можно представить как четыре отрезка линии передачи, соединённых последовательно с коротким замыканием на конце.

Входное сопротивление воздушного слоя, короткозамкнутого на конце (рис. 1*а*), равно

$$Z_{вх.в} = jZ_{0в} \operatorname{tg}(\beta l_в), \quad (1)$$

где $Z_{0в} = 377$ Ом – характеристическое сопротивление воздуха, $\beta = 2\pi/\lambda$ – фазовая постоянная коэффициента распространения в слое воздуха, λ – длина волны СВЧ генератора, $l_в$ – толщина воздушного слоя.

Значение этого сопротивления имеет только мнимую часть и является нагрузкой для отрезка длиной линии представляющего собой подложку. Если считать, что подложка без потерь, то её входное сопротивление

$$Z_{вх.п} = Z_{0.п} \frac{Z_{вх.п} + jZ_{0.п} \operatorname{tg}(\beta_{п} l_{п})}{Z_{0.п} + jZ_{вх.в} \operatorname{tg}(\beta_{п} l_{п})}, \quad (2)$$

где

$$\beta_{п} = \frac{2\pi\sqrt{\varepsilon'_{п}}}{\lambda}; \quad (3)$$

$Z_{0.п}$ – волновое сопротивление подложки:

$$Z_{0.п} = \frac{377}{\sqrt{\varepsilon'_{п}}}. \quad (4)$$

Здесь $\varepsilon'_{п}$ – относительная диэлектрическая проницаемость материала подложки;

$\beta_{п}$ – фазовая постоянная коэффициента распространения в подложке, $l_{п}$ – толщина слоя подложки, $Z_{вх.в}$ вычисляется согласно (1).

В свою очередь, $Z_{вх.п}$ является нагрузкой для слоя, представляющего собой обрабатываемый диэлектрик. На входе этого слоя

$$Z_{вх.ос} = Z_{0.ос} \frac{Z_{вх.п} + jZ_{0.ос} \operatorname{th}(\gamma_{ос} l_{ос})}{Z_{0.ос} + jZ_{вх.в} \operatorname{th}(\gamma_{ос} l_{ос})}, \quad (5)$$

причем

$$Z_{0.п} = \frac{377}{\sqrt{\varepsilon'_{ос} (1 - j \operatorname{tg} \delta_{ос})}}. \quad (6)$$

Здесь $\varepsilon'_{ос}$, $\operatorname{tg} \delta_{ос}$ – относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь нагреваемого диэлектрика; $Z_{вх.п}$ определяется по (2), $\gamma_{ос} = \alpha + j\beta$ – постоянная распространения в нагреваемом слое диэлектрика, α – постоянная затухания, β – фазовая постоянная:

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{\varepsilon'_{ос}}{2} (\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta_{ос}} - 1)}, \quad (7.a)$$

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{\varepsilon'_{ос}}{2} (\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta_{ос}} + 1)}. \quad (7.б)$$

В случае если нагреваемый слой диэлектрика лежит непосредственно на металлическом слое, в выражении (5) $Z_{вх.п} = 0$.

Зависимости $\varepsilon'_{ос}$, $\operatorname{tg} \delta_{ос}$ от температуры

для различных материалов и продуктов определяются экспериментально, например зависимости $\varepsilon'_{oc}(T)$ и $\text{tg}\delta_{oc}(T)$ для говядины показаны на рис. 2. Однако весь слой диэлектрика прогревается неравномерно, и чтобы определить его входное сопротивление, требуется учесть изменение значений диэлектрических параметров в глубину нагреваемого диэлектрика.

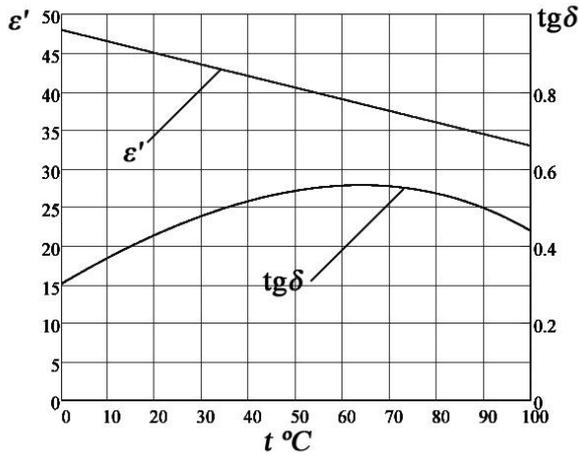


Рис.2. Зависимость диэлектрических параметров говядины от температуры

Если толщина нагреваемого объекта такова, что СВЧ мощность, пройдя через диэлектрик, в 100 раз меньше мощности на его входе, то при расчете нагрева отражённую мощность от металлической стенки можно не учитывать. В случае более тонкого обрабатываемого слоя отражённая СВЧ мощность достаточна для нагрева диэлектрика и должна учитываться.

Для учета изменения ε'_{oc} , $\text{tg}\delta_{oc}$ в глубину объекта его толщина должна быть разбита на более тонкие слои, в каждом из которых температура и диэлектрические параметры вычисляются отдельно, при этом входящая мощность в каждый последующий слой равна выходной мощности предыдущего слоя:

$$P(\lambda) = P_0 e^{-2\Delta l(\alpha(T_1, \lambda) + \alpha(T_2, \lambda) + \dots + \alpha(T_n, \lambda))}, \quad (8)$$

где P_0 – СВЧ мощность, прошедшая в диэлектрик от СВЧ генератора, α – коэффициент затухания электромагнитной волны в слое диэлектрика, вычисляемый по соот-

ношению (7a), n – номер слоя, T_n – температура слоя n , λ – длина волны СВЧ генератора.

Через время τ после включения генератора температура слоя n определяется по соотношению

$$T_n = T_0 + \frac{\Delta P_n \tau}{c \rho V}, \quad (9)$$

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

Входное сопротивление каждого последующего слоя является нагрузкой для предыдущего:

$$Z_{ex,n}(\lambda) = Z_{0,n} \frac{Z_{ex,n-1} + jZ_{0,n} \text{th}(\gamma_n l_n)}{Z_{0,n} + jZ_{ex,n-1} \text{th}(\gamma_n l_n)}. \quad (10)$$

Здесь волновое сопротивление каждого слоя $Z_{0,n}$ определяется по соотношению (6) с учетом изменившихся диэлектрических параметров при нагреве этого слоя.

Для определения температуры слоёв диэлектрика требуется знать мощность СВЧ генератора и определить мощность, прошедшую внутрь диэлектрика:

$$P_0 = P_{ген} (1 - |\Gamma(\lambda)|^2). \quad (11)$$

Здесь P_0 – мощность, прошедшая внутрь диэлектрика, $|\Gamma(\lambda)|$ – модуль коэффициента отражения верхнего слоя ($n = 1$):

$$|\Gamma(\lambda)| = \left| \frac{Z_{ex,1}(\lambda) - Z_{0,g}}{Z_{ex,1}(\lambda) + Z_{0,g}} \right|. \quad (12)$$

КПД рабочей камеры равен

$$\eta(\lambda) = 1 - |\Gamma(\lambda)|^2. \quad (13)$$

Разбив время нагрева на интервалы, определяем температуры всех слоёв, их волновые сопротивления, коэффициент отражения верхнего слоя и КПД рабочей камеры на каждом временном интервале.

В одночастотном режиме КПД рабочей камеры изменяется на каждом временном интервале так, как показано на рис.3.

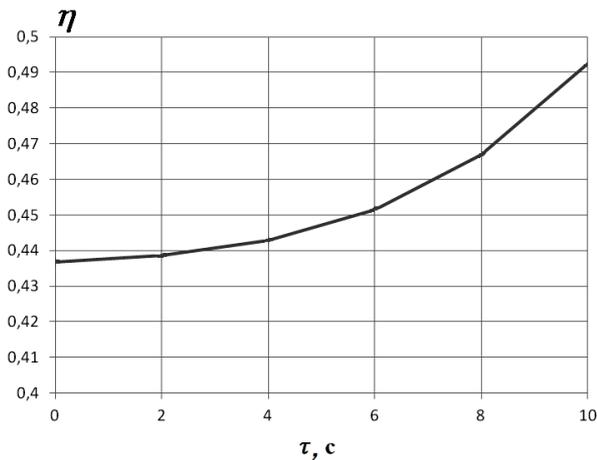


Рис. 3. Изменение КПД рабочей камеры в процессе нагрева слоя говядины в одночастотном режиме ($\lambda = 10$ см, $P_{ген} = 5$ кВт, $l_{oc} = 2,6$ см)

Как видно, при постоянной частоте η изменилось на 5,58%.

Если после каждого этапа нагрева определить λ так, чтобы при изменившихся параметрах каждого слоя результирующее входное сопротивление обрабатываемого диэлектрика оставалось постоянным, то, перестраивая генератор на каждом временном интервале нагрева на новую λ , можно стабилизировать КПД на всём протяжении термообработки диэлектрика. На рис. 4 показано изменение длины волны СВЧ генератора для поддержания КПД на одном уровне при нагреве говядины, если начальная длина волны $\lambda_{cm} = 10$ см.

Диапазон перестройки λ ограничен возможностью распространения электромагнитной волны той или иной частоты в прямоугольном волноводе, подводящем СВЧ излучение к рабочей камере. Например, при использовании стандартного волновода сечением $9 \times 4,5$ см длина волны генератора может меняться в пределах $9 < \lambda < 18$ см.

При расчёте рабочей камеры лучевого типа другой важной задачей является достижение максимально возможного КПД на всём времени нагрева. Применяя многочастотный режим работы, можно выбрать такую длину волны СВЧ генератора, при которой КПД установки будет максимально возможным для данного диэлектрика. Эта

длина волны определяется толщиной диэлектрика, его диэлектрическими параметрами и размером воздушного слоя (рис. 1а).

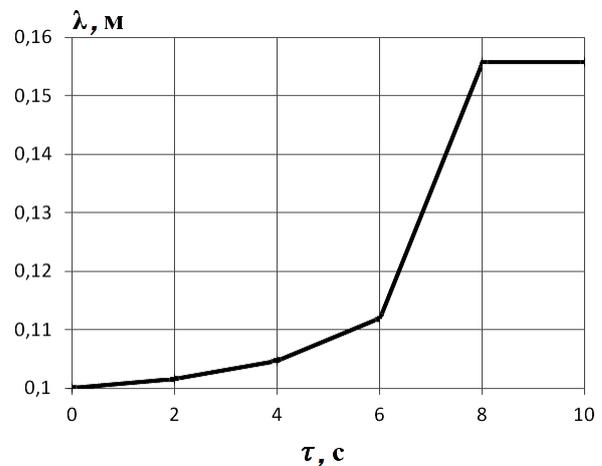


Рис. 4. Изменение длины волны генератора для поддержания на всём протяжении нагрева говядины КПД на начальном уровне

Рассмотрим вариант, когда диэлектрик лежит на металлической стенке. На рис. 5 показана зависимость КПД рабочей камеры от длины волны СВЧ генератора.



Рис. 5. Зависимость КПД рабочей камеры от длины волны при нагреве говядины

Согласно рис. 5 в рабочем диапазоне длины волны $9 < \lambda < 18$ см КПД имеет максимум. Выбрав соответствующую этому значению КПД длину волны в качестве начальной и изменяя λ синхронно с изменением диэлектрических параметров в процессе нагрева так, чтобы КПД оставался на максимально возможном уровне, можно увеличить средний КПД всего процесса нагрева по сравнению с одночастотным режимом.

ЭЛЕКТРОТЕРМИЯ

Таким образом, изменяя длину волны СВЧ генератора синхронно с изменением ε' , $\operatorname{tg}\delta$ диэлектрика, можно обеспечить максимальную энергетическую эффектив-

ность (максимальный КПД) рабочей камеры лучевого типа СВЧ электротермической установки.

ЛИТЕРАТУРА

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

2. **Федоров А.В.** Многочастотная термообработка диэлектриков в камерах лучевого типа / А.В. Федоров // Вопросы электротехнологии, 2016, №3 (12). С. 16-19.

Фёдоров Антон Витальевич – аспирант кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Anton V. Fedorov – postgraduate, Department of Automated Electrical Engineering Plants and Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

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

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

Статья поступила в редакцию 09.08.16, принята к опубликованию 19.09.16

К СВЕДЕНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

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

ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ СВЧ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИХ УСТАНОВОК, РАБОТАЮЩИХ В МЕТОДИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

В.О. Юдина, Ю.С. Архангельский

TRANSPORT SYSTEMS OF MICROWAVE ELECTROTHERMAL UNITS OPERATING UNDER A CONTINUOUS MODE

V.O. Yudina, Yu.S. Arkhangelsky

Приведены компоновка и классификация транспортных систем СВЧ электротермических установок, работающих в методическом режиме.

Ключевые слова: транспортные системы, СВЧ электротермические установки, методический режим, конвейер, толкатель, электропривод, сила тяжести, загрузка, выгрузка, перемещение

Структурная схема СВЧ электротермической установки (СВЧ ЭТУ) (рис. 1), элементная и терминологическая базы СВЧ электротермии приведены, например, в работах [1-3], однако, на наш взгляд, материалы по этой теме нуждаются в углублении, если речь идет об СВЧ электротермических установках, работающих в методическом режиме (методических СВЧ ЭТУ).

В таких установках принципиальную роль играют транспортные системы (ТС), обеспечивающие загрузку обрабатываемого объекта в рабочую камеру (РК), транспортировку объекта внутри РК и выгрузку обработанного объекта из РК, но на структурной схеме СВЧ ЭТУ транспортное устройство не показано.

ТС установки состоит из транспортной системы РК (ТСРК), которая является составной частью РК (на рис. 1 не показана, так как структурная схема установки не содержит структурных частей своих элементов), и системы загрузки-выгрузки, входящей в состав вспомогательного оборудования. В свою очередь, ТСРК состоит из системы, позволяющей транспортировать объект внутри камеры, входного и выходного

The paper presents the layout results and classification of transportation systems of microwave electrothermal installations operating under a continuous mode.

Keywords: transportation systems, microwave electrothermal installations, continuous mode, conveyor, pusher, electric, gravity, loading, unloading, moving

шлюзов, обеспечивающих прохождение обрабатываемого объекта и защиту от СВЧ излучений из РК.

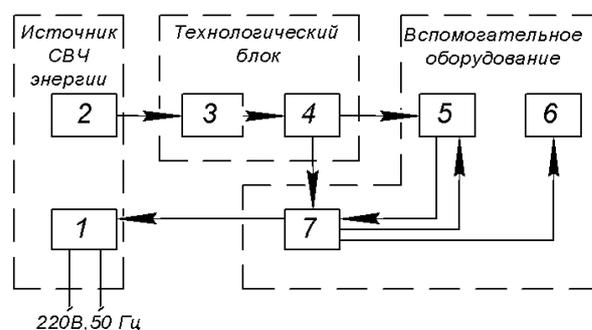


Рис. 1. Структурная схема СВЧ электротермической установки: 1 – источник питания СВЧ генератора; 2 – СВЧ генератор; 3 – линия передачи; 4 – рабочая камера; 5 – система загрузки-выгрузки; 6 – воздуходувка; 7 – система управления

Загрузка – выгрузка в СВЧ электротермии чаще всего осуществляется вручную, перемещение объекта в РК осуществляется под действием силы тяжести, насосной системы или электропривода, преобразующих электрическую энергию в механическую.

Компоновка ТС методических СВЧ ЭТУ

показана на рис. 2, а их классификация – на рис. 3. Так, ТС методических СВЧ ЭТУ можно подразделить на ТС, использующие силу тяжести (рис. 2 д, ж) и преобразование электрической энергии в механическую (рис. 2а, б, в, г, е). Первые из них делятся на вертикальные (рис. 2д) и желобковые (рис. 2ж), а вторые – на использую-

щие электропривод (рис. 2а-г) или насос (рис. 2е).

Электропривод в ТС методических СВЧ ЭТУ может обеспечивать вращение (конвейерная система (рис. 2а)), протяжная система (рис. 2б), барабанная система (рис. 2в) или линейное движение (толкательная система (рис. 2г)).

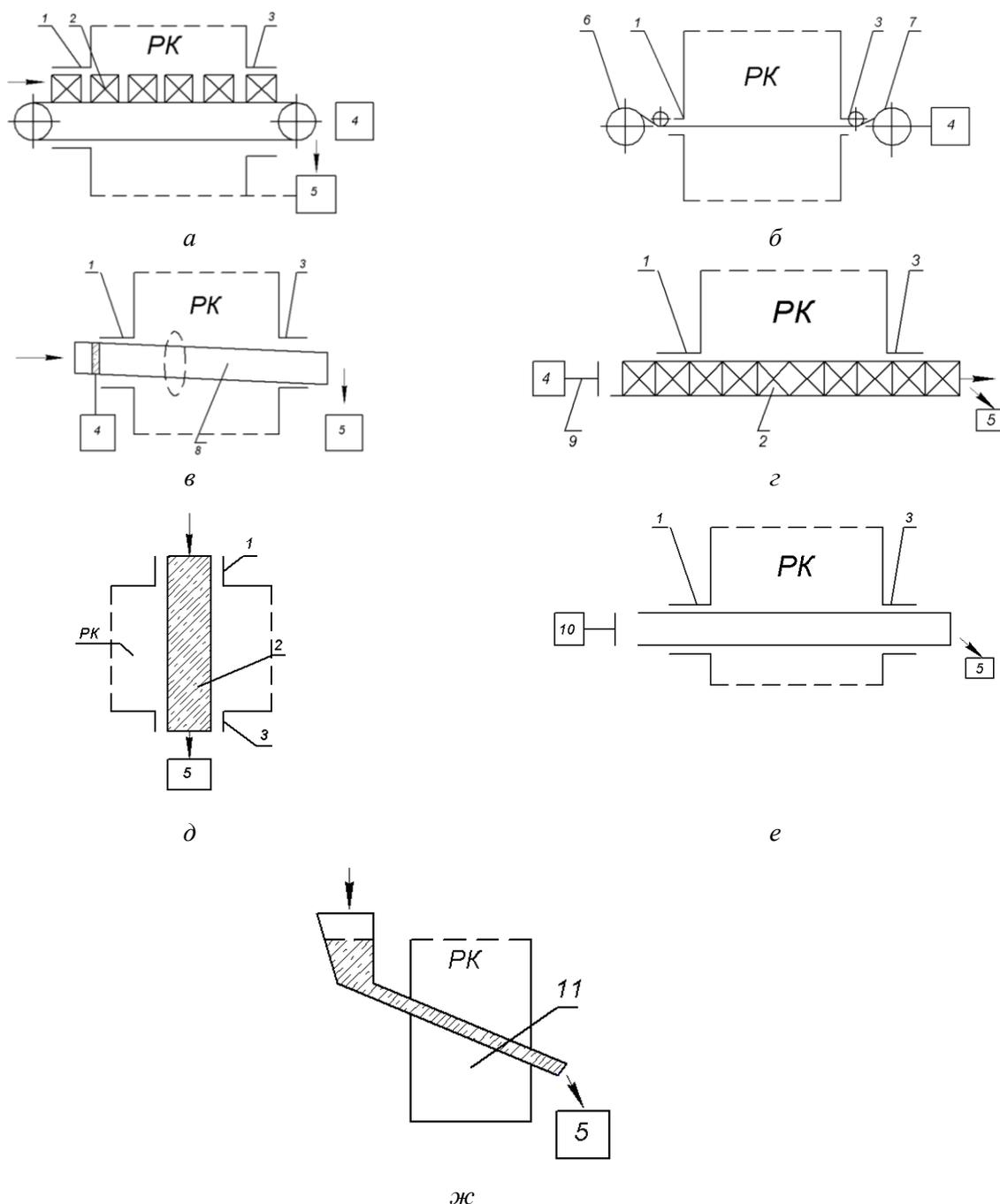


Рис. 2. Транспортные системы СВЧ электротермических установок: 1, 3 – входной и выходной шлюзы транспортной системы рабочей камеры; 2 – обрабатываемый объект; 4 – электропривод; 5 – приемная емкость; 6 – бобина с объектом, подлежащим обработке; 7 – бобина с обработанным объектом; 8 – барабан; 9 – толкатель; 10 – насос; 11 – рабочая камера



Рис. 3. Классификация транспортных систем методических СВЧ ЭТУ

Итак, приведены компоновка и классификация транспортных систем методических СВЧ ЭТУ, которые могут стать базой

для дальнейшей работы в области проектирования методических СВЧ ЭТУ.

ЛИТЕРАТУРА

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

2. **Архангельский Ю.С.** Справочная книга по СВЧ электротермии / Ю.С. Архан-

гельский. Саратов: Научная книга, 2011. 560с.

3. СВЧ модификация полимеров / Ю.С. Архангельский. и др. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2012. 288 с.

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

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

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

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

Статья поступила в редакцию 15.08.16, принята к опубликованию 19.09.16

ОСОБЕННОСТИ ТЕРМООБРАБОТКИ ДИЭЛЕКТРИКА В ТОЛКАТЕЛЬНОЙ СВЧ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОЙ УСТАНОВКЕ НА БАЗЕ КАМЕРЫ С БЕГУЩЕЙ ВОЛНОЙ

В.О. Юдина, Ю.С. Архангельский

THERMAL TREATMENT CHARACTERISTICS OF DIELECTRICS WITHIN THE PUSHER-TYPE MICROWAVE ELECTROTHERMAL INSTALLATIONS BASED ON THE TRAVELING WAVE CHAMBER

V.O. Yudina, Yu.S. Arkhangelsky

Рассмотрены компоновка толкательной СВЧ электротермической установки на камере с бегущей волной и особенности термообработки в ней диэлектрика.

Ключевые слова: толкательная СВЧ электротермическая установка, компоновка, камера с бегущей волной, термообработка

We consider the layout of the pusher-type microwave electrothermal installation to the chamber with the traveling wave, and characteristics of thermal treatment of dielectrics within the installation.

Keywords: pusher-type microwave electrothermal installation, configuration, chamber with a traveling wave, heat treatment

Компоновка СВЧ электротермической установки (СВЧ ЭТУ) на камере с бегущей волной (КБВ) показана на рис. 1. КБВ собрана на прямоугольном волноводе, частично заполненном обрабатываемым диэлек-

триком. Обрабатываемый объект перемещается внутри рабочей камеры с помощью толкателя, приводимого в движение электродвигателем.

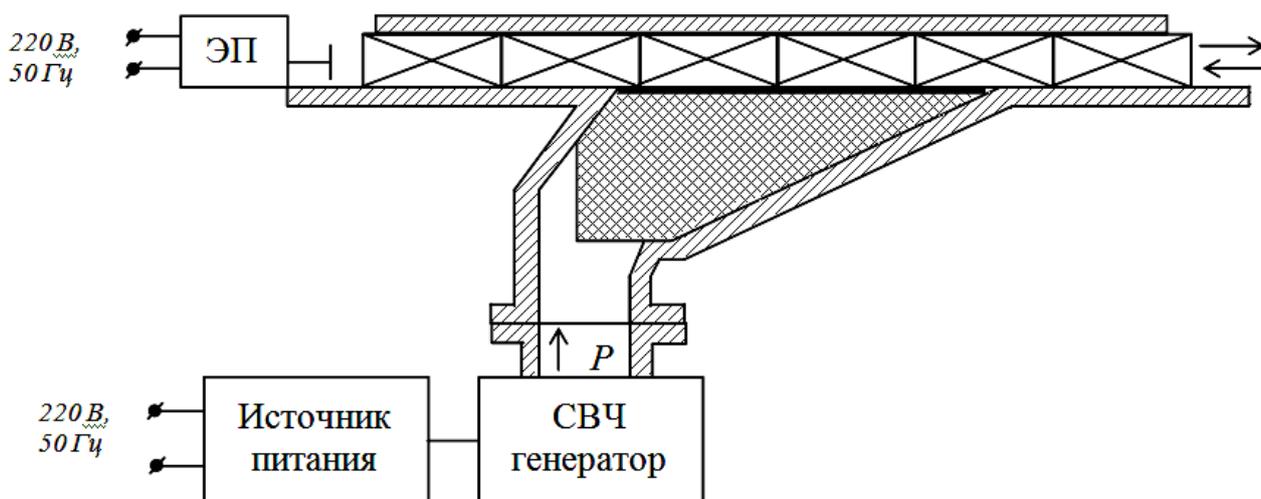


Рис. 1. КБВ на прямоугольном волноводе с толкательной транспортной системой

Термообработка в толкательной камере по сравнению с нагревом диэлектриков в

проточной или протяжной установке имеет свои особенности. При транспортировке в

проточной или протяжной СВЧ ЭТУ каждый элементарный объем обрабатываемого объекта, перемещаясь вдоль рабочей камеры, поглощает определенную долю передаваемой по КБВ СВЧ энергии в зависимости от профиля КБВ и подаваемой в рабочую камеру СВЧ мощности.

В толкательной СВЧ ЭТУ возможны следующие варианты термообработки.

Во время загрузки-выгрузки толкатель удаляет из КБВ весь нагреваемый диэлектрик, заменяя его на новый, подлежащий нагреву в следующий период, причем вре-

мя загрузки-выгрузки много меньше времени нагрева, и им можно пренебречь при математическом моделировании термообработки.

В этом случае режим нагрева ничем не отличается от нагрева в обычном непрерывном режиме (загрузка-обработка-выгрузка).

Профиль неоднородного волновода рабочей камеры, обеспечивающий равномерный нагрев обрабатываемого диэлектрика и согласование КБВ с СВЧ генератором, рассчитывается по соотношению [2]

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

где $b(z)$ – ширина узкой стенки волновода в точке z , если считать, что координата z отсчитывается от точки короткого замыкания (выходной шлюз); b_2 , a – толщина слоя обрабатываемого диэлектрика и ширина широкой стенки волновода; λ , A – длины волны генератора и в волноводе с волной H_{10} , R_n и X_n – активная и реактивная составляющие погонного сопротивления обрабатываемого диэлектрика, зависящие от относительной диэлектрической проницаемости ε' и тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta$ обрабатываемого диэлектрика [2]:

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

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

ε' и $\text{tg } \delta$ зависят от температуры диэлектрика, и R_n , X_n рассчитываются для средних значений этих параметров в рабочем диапазоне температуры.

Рассчитаным таким образом камера имеет равномерность нагрева $\pm(3-5)^\circ\text{C}$ на уровне 100°C , коэффициент стоячей волны по напряжению $K_{\text{сш}} \approx 1,2-1,5$; КПД СВЧ энергии $\eta \approx 96-99\%$.

Пусть на транспортной системе в рабочей зоне КБВ находится конечное число обрабатываемых диэлектриков. Во время загрузки-выгрузки загружается один обрабатываемый диэлектрик, который нагревается за время паузы до следующей загрузки и от загрузки к загрузке этот диэлектрик перемещается к выходному шлюзу, постепенно нагреваясь, чтобы, в конце концов, покинуть КБВ.

В режиме работы в КБВ каждый обрабатываемый объект находится при той или иной температуре, которая соответствует определенным ε' и $\text{tg } \delta$. Но в таком случае профиль КБВ, рассчитанный на средние значения ε' и $\text{tg } \delta$ всех диэлектриков, находящихся в КБВ, уже не оптимален, отчего нагрев по длине каждого обрабатываемого диэлектрика будет неравномерным, увеличивается $K_{\text{сш}}$ и уменьшается η рабочей камеры.

Оптимизировать профиль КБВ можно следующим образом. На стадии проектирования установки сначала по соотношению (1) рассчитывается профиль КБВ при значениях ε' и $\text{tg } \delta$, соответствующих начальной температуре диэлектрика. Затем с помощью соотношения

$$P(z) = P \frac{\text{Re } Z_{\text{ex}}(z)}{\text{Re } Z_{\text{ex}}(l)} \exp \left[2\beta \int_z^l \frac{\text{Im } Z_{\text{ex}}(z)}{Z_0(z)} dz \right], \quad (2)$$

где P , $P(z)$ – мощность СВЧ на входе и в сечении z КБВ; $ReZ_{ex}(l)$, $ReZ_{ex}(z)$ – активная часть входного сопротивления на входе КБВ и в координате z [2]; $\beta = 2\pi/\lambda$; $ImZ_{ex}(z)$ – реактивная часть входного сопротивления КБВ в сечении z ; $Z_0(z)$ – волновое сопротивление КБВ в сечении z [2], можно найти мощность, поглощенную в каждом отдельном обрабатываемом диэлектрике в КБВ, а зная удельную теплоемкость и плотность диэлектрика, его объем и время паузы между перемещениями диэлектрика по транспортной системе, можно рассчитать температуру каждого из обрабатываемых диэлектриков, уточнить значения ϵ' и $\tan \delta$ для каждого из них и по соотношению (1) уточнить профиль КБВ, учитывая влияние температуры диэлектриков на R_n и X_n , а, следовательно, и зависимость $b(z)$. Обычно третьего уточнения достаточно для определения оптимального $b(z)$, позволяющего равномерно нагревать каждый обра-

батываемый диэлектрик, получить согласование КБВ с генератором и высокий КПД по использованию СВЧ энергии.

Пусть, наконец, в КБВ размещается нецелое число диэлектриков, и при загрузке-выгрузке в КБВ загружаются и выгружаются обрабатываемые диэлектрики лишь частично, и потому в КБВ обрабатываемые диэлектрики по длине будут нагреваться полосами. Такой характер термообработки может быть в каких-то случаях губительным для диэлектриков из-за возникающих в них термомеханических напряжений.

В тех случаях, когда такой угрозы нет, оптимизировать профиль КБВ можно так же, как это предложено во втором случае.

Эти особенности, на наш взгляд, имеют принципиальное значение при проектировании толкательной СВЧ ЭТУ, их учет позволяет обеспечить как заданный режим, так и оценку энергетической и экономической эффективности подобных СВЧ ЭТУ.

ЛИТЕРАТУРА

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

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

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

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

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

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

Статья поступила в редакцию 09.09.16, принята к опубликованию 19.09.16

ЭЛЕКТРОФИЗИКА

УДК 621.372

ФОРМИРОВАНИЕ КРОМОК АВТОЭМИССИОННЫХ ШАЙБ КОМБИНИРОВАННОГО КАТОДА МАЛОМОЩНОГО УСИЛИТЕЛЯ ПРЯМОЙ ВОЛНЫ М-ТИПА

О.Д. Тищенко, А.А. Тищенко, А.Я. Зоркин

FORMING THE EDGES OF FIELD EMISSION CATHODE WASHERS IN CROSSED-FIELD FORWARD WAVE AMPLIFIERS WITH LOW POWER RATIO

O.D. Tischenko, A.A. Tishchenko, A.Ya. Zorkin

Проведены исследования процессов формирования кромок автоэмиссионных шайб комбинированного катода малоомощного усилителя прямой волны М-типа. Исследовано влияние параметров ультразвукового формирования кромок автокатодов от различных технологических факторов: времени звучания, положения пакета и вида технологической жидкости. Разработан чистый способ формирования рабочих кромок лезвийных автокатодов с заданной толщиной до 2 мкм методом ультразвуковой обработки пакета автокатодов. Приводятся результаты исследований эмиссионных свойств автокатодов и результаты испытаний комбинированных катодов.

Ключевые слова: автокатод, микроострия, химическое травление, ультразвуковая обработка

В настоящее время производятся интенсивные исследования по изготовлению автоэмиссионных микроострий. Их основной областью применения являются туннельные и силовые микроскопы, матричные автоэмиссионные катоды из углерода или тугоплавких материалов на основе нанотрубок. Острия могут быть выполнены с помощью различных технологий, включающих процессы фотолитографии, травления,

The paper presents a research into forming the edges of the field emission cathode washer in crossed field forward wave amplifiers having low power ratio. The focus is made on the influence of parameters of ultrasonic forming the edges of the field emission cathode on a variety of technological factors, including performance time, packet data, and type of the process fill fluid. A pure method was developed to form the working edges to the cutting field emission cathodes with the thickness up to 2 microns by means of ultrasonic processing of the field emission cathodes. We provide the results of investigations relating emission properties of the field emission cathodes and the test results referring composite cathodes.

Keywords: field emission cathodes, micro points, chemical etching, ultrasonic process

напыления, окисления как с интегрированным управляющим электродом, например катоды Спиндта, так и без него [1, 2].

Для реализации мгновенной готовности и включения с первого импульса усилителя прямой волны магнетронного типа малой мощности была предложена конструкция катода (рис. 1), рабочая поверхность которого выполняется в виде чередующихся вторичноэмиссионных и автоэмиссионных

шайб. В качестве вторичного эмиттера был выбран импрегнированный алюминатный катод, представляющий собой пористый вольфрам, пропитанный алюминатом бария и кальция ($3\text{BaO}\cdot\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$), в качестве материала автокатада предложено использовать сверхтонкую (4 мкм) танталовую фольгу.

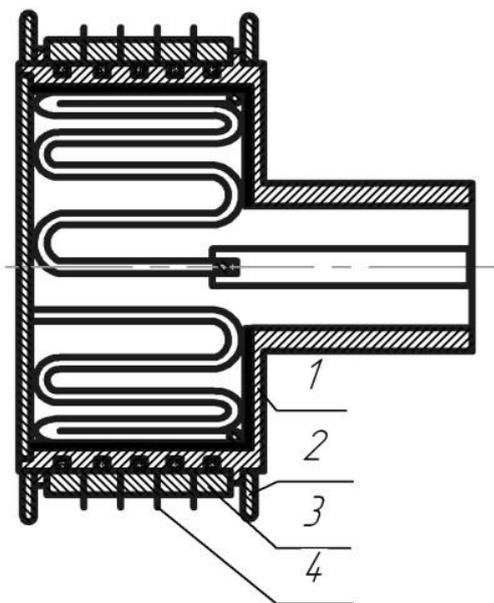


Рис. 1. Комбинированный катод. 1 – kern катода; 2 – экран; 3 – вторичноэмиссионная шайба; 4 – автоэмиссионная шайба

Целью настоящей работы явилось обеспечение безнакального включения вновь разрабатываемых приборов и повышение надежности в части безнакального включения серийно выпускаемых приборов за счет формирования кромки автоэмиссионного катода (АЭК) на заданном уровне (4; 3; 2; 1 мкм).

Были проведены исследования АЭК с кромкой ~1-2 мкм, изготовленных методом химического травления в смеси фтористоводородной и азотной кислот. АЭК с кромкой, полученной химическим травлением в смеси фтористоводородной и азотной кислот, очень критичны к технологическому процессу их изготовления. Объясняется это тем, что АЭК очень критичны ко всякого рода загрязнениям.

Использование в технологическом процессе химреактивов требует тщательной промывки. Малые толщины АЭК (~ 1 мкм)

снижают формоустойчивость и прочность. Опасность разрушения АЭК приводит к некачественной промывке. Загрязнения рабочей кромки АЭК повышают работу выхода и снижают эффективность АЭК. Это привело к поискам более чистых способов формирования кромки АЭК.

Внимание было обращено на ультразвуковую обработку, на явление кавитации, которое широко используется при ультразвуковой очистке и обезжиривании деталей. Процесс разрушения металла должен зависеть от состояния фольги и режимов ее отжига. Для определения оптимальной обработки фольги был проведен следующий эксперимент. В стеклянный стакан с деионизованной водой помещались образцы фольги, отожженные в разных режимах. Стакан помещался в ванну и подвергался воздействию ультразвука с частотой приблизительно 20 кГц в течение 20 минут. Кромка фольги контролировалась на микроскопе.

Оптимальной термической обработкой, при которой фольга остается достаточно прочной, является отжиг при 1300°C в течение 15 мин. В то же время она в нужной степени рекристаллизована, что позволяет формовать край фольги на уровне 1-2 мкм за счет скалывания кристаллов по кромке при ультразвуковой обработке. В дальнейших экспериментах использовалась только фольга, отожженная по вышеуказанному режиму.

С целью предотвращения снижения прочности фольги было решено подвергать ультразвуковой обработке не отдельные АЭК, а пакет заготовок (рис. 2). Технология изготовления АЭК, таким образом, стала следующей:

1. Сборка пакета из танталовой фольги, чередующейся с медной фольгой.
2. Механическая обработка.
3. Ультразвуковая обработка.
4. Разделение АЭК и обезжиривание.
5. Рихтовка.

По этой технологии была изготовлена партия АЭК. Исследование кромки АЭК показало, что скалывание кристаллов по кромке происходит на глубину до 23 мкм.

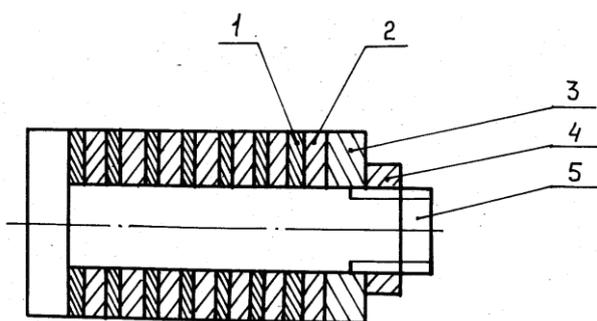


Рис. 2. Пакет заготовок в оправке. 1 – АЭК; 2 – медная прокладка; 3 – шайба; 4 – гайка; 5 – стержень

Кроме термической обработки фольги? исследовалось влияние на процесс формирования кромки АЭК ультразвуковым способом следующих технологических факторов:

- влияния первоначальной механической обработки (проточка на токарном станке, проточка с последующей шлифовкой алмазной шкуркой);
- времени УЗ-обработки;
- вида жидкости;
- положения пакета в жидкости.

Средние значения толщины кромки для образцов со шлифовкой и без шлифовки 3,7 и 3,05 мкм соответственно. Большая величина кромки на шлифованных образцах объясняется, вероятно, тем, что после шлифовки они имеют разрыхленный торец, толщина которого значительно превышает исходную толщину фольги: при толщине фольги 4 мкм кромка до 5,3 мкм. В дальнейших экспериментах АЭК изготавливались без шлифовки.

Зависимость толщины кромки от времени обработки ультразвуком приведена на рис. 3. Время обработки выбрано от 5 до 20 минут из тех соображений, что при воздействии меньше 5 минут эффект разрушения еще не заметен, а при времени, большем 20 минут, начинается разрыхление кромки и ее скалывание.

Из рис.3 видно, что при одинаковом времени звучания интенсивность кавитационных разрушений зависит от вида технологической жидкости и, в частности, в воде интенсивность выше. Это полностью согласуется с литературными данными [3].

Ход кривых $h=f(t)$ показывает, что скорость кавитационных разрушений выше в начале процесса (от 5 до 20 мин), затем процесс замедляется (кривые идут более полого).

Как видно из кривой 1 (рис. 3), при обработке ультразвуком в воде для получения кромки 4 мкм необходимо время 5 мин (3 мкм – 10 мин, 2 мкм – 15-20 мин).

На рис. 3 приведен вид кромки после обработки ультразвуком от 5 до 20 мин. С увеличением времени звучания уменьшается число неоднородностей, бессистемно расположенных по краям кромки кристаллов, дающих хаотичные блики в отраженном свете (кристаллы скалываются, количество неоднородностей уменьшается, и при 20-минутной обработке видна узкая ровная кромка толщиной 1,7 мкм).

Таким образом, в зависимости от времени обработки ультразвуком можно получать кромку на заданном уровне (4, 3, 2 мкм). Процессы формирования кромок АЭК из танталовой и тантал-вольфрамовой фольги идут одинаково. Максимальное отклонение сформированной кромки от заданной величины составляет $\pm 14\%$.

По режимам, определенным из кривой 1 рис. 3, была изготовлена партия АЭК из фольги толщиной 4 мкм.

Зависимость процесса формирования кромки УЗ-способом от положения АЭК в жидкости исследовалась следующим образом. Пакет заготовок в оправке (см. рис. 3) помещался в стакан с деионизованной водой горизонтально и вертикально и подвергался воздействию УЗ в течение 10 мин. Эффективность процесса выше при горизонтальном положении.

Разработанный технологический процесс формирования кромок автоэмиссионных шайб комбинированного катода мало-мощного усилителя прямой волны М-типа ультразвуковым способом заключается в следующем. Пакет АЭК на стальном стержне помещается в горизонтальном положении в деионизованную воду и подвергается воздействию ультразвука с частотой 20 кГц. В зависимости от времени можно получать толщины кромки АЭК до 1,7 мкм.

Формирование автоэмиссионных свойств комбинированного катода в зависимости от времени показаны на рис. 4. При содержании углерода более 0,1% в танталовых лезвиях автоэмиссионные свойства не формируются (кривые 2, 3, 4).

При содержании углерода менее 0,05% (кривая 1) формирование автоэмиссионных свойств происходит в течение первых 20 часов, затем автоэмиссионный ток стабилизируется на уровне 800 мкА при анодном напряжении 6 кВ и расстоянии анод-катод 2 мм.

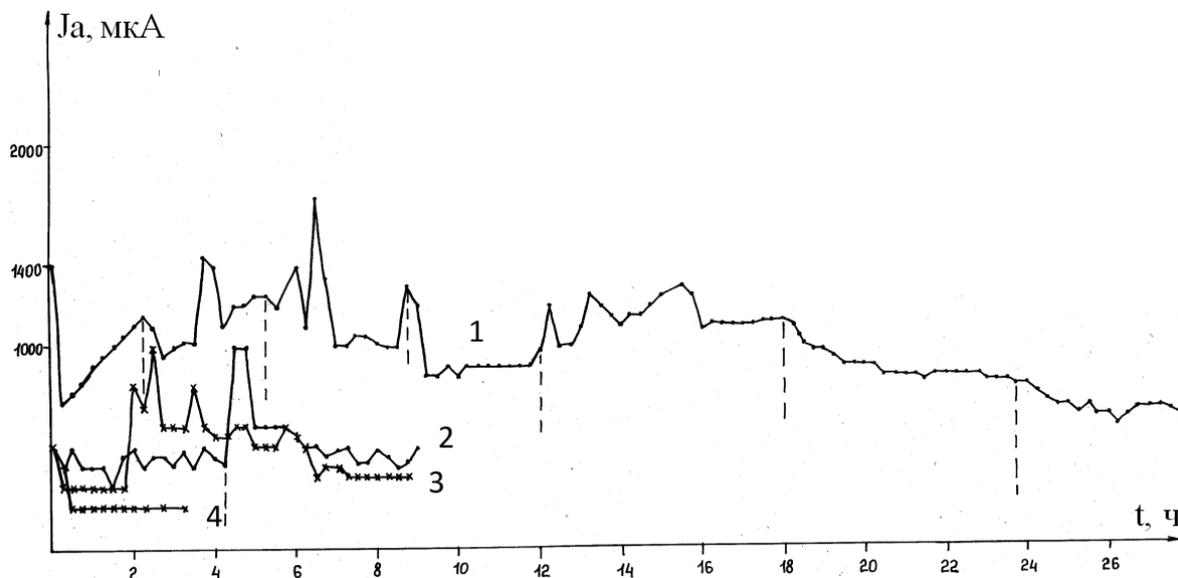


Рис. 4. Зависимость автоэмиссионного тока комбинированного катода от времени: 1 – лезвие с содержанием углерода 0,05%; 2, 3 – лезвие с содержанием углерода 0,1%; 4 – лезвие с содержанием углерода 0,15%

Итак, получены следующие основные результаты:

1. Разработан технологический процесс формирования кромки АЗК путем обработки пакета АЗК в воде ультразвуком с частотой 18-22 кГц. Исследовано влияние различных технологически факторов на процесс формирования кромки. Показано, что:

- оптимальная температура отжига фольги 1300 °С;

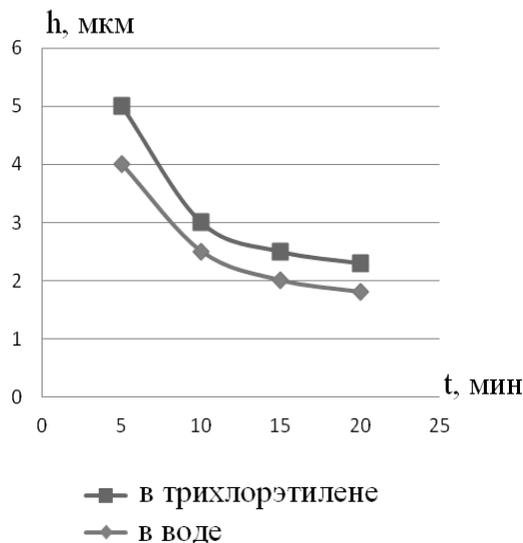


Рис. 3. Зависимость толщины кромки h АЗК из фольги толщиной 4 мкм от времени обработки ультразвуком

- по сравнению с другими жидкостями процесс идет интенсивнее в деионизованной воде;

- в зависимости от времени обработки ультразвуком можно получать кромки АЗК на заданном уровне (4, 3, 2 мкм).

- интенсивность процесса зависит от положения в жидкости оправки с пакетом АЗК, и максимальная интенсивность достигается при горизонтальном положении оправки.

2. Исследованы эмиссионные свойства АЭЖ с толщиной кромки на уровне 2,5 мкм, сформированной ультразвуковым спосо-

бом. Эмиссионный ток стабилизируется в течение 20 часов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Татаренко Н.И.**, Автоэмиссионные наноструктуры и приборы на их основе / Н.И. Татаренко, В.Ф. Кравченко. М.: Физматлит, 2006. 192 с.

2. Исследование вакуумных автоэмиссионных катодов с углеродными микро-, наноструктурами / Ю.А. Григорьев, А.А. Бурцев, П.Д. Шалаев, В.Г. Пименов //

Вестник Саратовского государственного технического университета. 2008. № 3 (2). С. 100-105.

3. **Бабилов О.И.** Ультразвук и его применение в промышленности / О.И. Бабилов. М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1958. 260 с.

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

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

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

Artem A. Tishchenko – Postgraduate, Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

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

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

Статья поступила в редакцию 07.09.16, принята к опубликованию 19.09.16

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КАВИТАЦИИ НА КИНЕТИКУ ЛОКАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ МЕДИ В УЗКИХ КАНАЛАХ ФОРМООБРАЗУЮЩИХ УГЛУБЛЕНИЙ

Л.А. Фоменко, Т.Н. Соколова, Е.Л. Сурменко, И.В. Родионов

IMPACT OF ULTRASONIC CAVITATION ON THE KINETICS OF LOCAL ELECTROCHEMICAL COPPER DEPOSITS IN THE NARROW FORM BUILDING CAVITIES

L.A. Fomenko, T.N. Sokolova, E.L. Surmenko, I.V. Rodionov

Изучена кинетика электрохимического осаждения меди в узких каналах формообразующих углублений под влиянием ультразвука на эффекте аррениусовской размерно-кавитационной селективности (АРКС). Установлено, что кинетические параметры процесса зависят от частоты и интенсивности ультразвука, а также от глубины и топологических особенностей углублений. Показано, что в оптимальных условиях величина коэффициента соноселективности осаждения может достигать значений 7-12, что доказывает возможность реализации субмиллиметровой медной соногальванопластики.

Ключевые слова: электрохимическое осаждение металлов, ультразвуковая кавитация, субмиллиметровая соногальванопластика, кинетика, соноселективность, поляризация

Действие ультразвука (УЗ) – один из мощных способов интенсификации различных электрохимических процессов. Согласно представлениям, изложенным в работах [1-4], этому способствуют весьма интенсивные акустические течения типа течений Экарта и Шлихтинга, перемешивающие приэлектродные слои электролита и в значительной степени элиминирующие массообменные конвективно-диффузионные затруднения протекания электрохимических реакций. Еще более сильно влияет на скорость электрохимических реакций

The research concerns the kinetics of electrochemical deposition of copper in the narrow channels of shape-generating cavities under the influence of ultrasound-induced Arrhenius size-cavitation selectivity (ASCS). It has been found that kinetic parameters of the process depend on the frequency and intensity of the ultrasound, as well as on the depth and topological features of the cavities. It is shown that under optimal conditions, the value of the sonoselectivity deposition coefficient may reach the values of 7-12, which proves the feasibility of submillimeter copper sonogalvanoplastics.

Keywords: electrochemical deposition of metals, ultrasonic cavitation, submillimeter sonogalvanoplastics, kinetics, sonoselectivity, polarization

УЗ-кавитация [5], что является следствием ударных волн и течений, возникающих при схлопывании кавитационных микропузырьков возле электродной поверхности, кавитационного нагрева объема электролита и его границы с электродом, эффективной дегазации и непрерывной очистки поверхности и т.д.

Настоящая работа посвящена экспериментальной проверке адекватности построенной нами математической модели процесса соноэлектрохимического осаждения (СОЭ) металлов на эффекте АРКС в узких

каналах формообразующих углублений, согласно которой линейная скорость наращивания углублений металлом увеличивается с интенсивностью и уменьшается с частотой ультразвука, зависит от топологических особенностей углублений и коэффициента теплопроводности пластины-матрицы [6].

В наших экспериментах в качестве катодов использовались прямоугольные пластины из алюминия и цинка, выбор которых обусловлен возможностью избирательного травления их в крепких щелочных растворах, с линейными размерами $3 \times 1 \text{ см}^2$ и толщиной $\ell = 0,05-0,1 \text{ см}$. Механической обработкой или лазерной прошивкой на них выполнялись формообразующие углубления в виде сквозных прямоугольных щелей ($\varphi=1$), цилиндрических ($\varphi=2$) и усеченных конических сквозных отверстий ($\varphi=3$), с характерными размерами Δ_0 , варьируемыми в субмиллиметровом диапазоне. Предварительная обработка поверхности углублений осуществлялась при высокочастотном ультразвуковом обезжиривании в этиловом спирте и последующей промывке в деионизованной воде.

Анодным материалом служила медь марки МВ.

Состав электролита (г/л): $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O} - 80$, $\text{H}_2\text{SO}_4 - 130$, синтанол ДС-10 - 1, $\text{NaOH} - 100..400$ - для селективного травления алюминия и цинка в присутствии меди.

Эксперименты выполнялись на ультразвуковой электрохимической установке, включающей генератор высоко-частотных (КД ОММ.3.541.106) или низкочастотных (УЗДН-2Т) колебаний с пьезоэлектрическим ($f_{\text{рез}}=833 \text{ кГц}$) или магнитострикционным ($f_{\text{рез}}=22-44 \text{ кГц}$) излучателем при интенсивности от 0 до $11,2 \text{ Вт/см}^2$.

Время полного окончания процесса τ_Δ при наращивании углублений фиксировалось после извлечения образца из ячейки просмотром «на просвет» на микроскопе типа МБС при нижней подсветке, с выборочной проверкой полноты заполнения по методике поперечных микрошлифов. Средняя скорость осаждения металла \bar{j}_Δ за время электролиза τ_Δ , коэффициент соноускорения осаждения металла K_Y , эксперимен-

тальная средняя скорость электроосаждения металла без наложения ультразвука $\bar{j}_{W=0}^\Delta$, коэффициент соноселективности K_C , средняя скорость осаждения металла в окне на незамаскированной поверхности образца \bar{j}_0 , вычислялись по формулам:

$$\bar{j}_\Delta = \Delta_0 / \varphi \cdot \tau_\Delta, \quad (2)$$

$$K_Y = \bar{j}_\Delta / \bar{j}_{W=0}^\Delta, \quad (3)$$

$$\bar{j}_{W=0}^\Delta = \Delta_0 / \varphi \cdot \tau_\Delta, \quad (4)$$

$$K_C = \bar{j}_\Delta / \bar{j}_0, \quad (5)$$

$$\bar{j}_0 = \Delta_m / \rho_M \cdot S_0 \tau_\Delta, \quad (6)$$

где Δ_m - приращение массы образца за время сонозлектролиза τ_Δ , измеренное на электронных весах ВЛЭ 134, ρ_M - плотность металла, j_0 - линейная скорость осаждения металла на незамаскированном «окне», S_0 - площадь незамаскированного «окна».

Коэффициент производительности K_{II} принимался численно равным

$$K_{II} = 60 / \tau_\Delta, \quad (7)$$

Коэффициент разрешения определялся из соотношения:

$$K_r = \bar{r}_{II} / \Delta_0, \quad (8)$$

где \bar{r}_{II} - средний радиус кавитационного микропузырька. При типичных значениях \bar{r}_{II} и Δ_0 коэффициент разрешения составлял 1.

Коэффициент погрешности выяснялся с помощью фотографий поперечных микрошлифов зарощенных металлом углублений и расшифровывался по формуле

$$K_\Delta = \Omega_i^\Delta / \Omega, \quad (9)$$

где Ω_i^Δ - объем металла в углублении, Ω - объем углубления.

Компромиссный индекс оптимизации определялся из соотношения:

$$K_{IO} = \frac{K_Y K_{II} K_C K_r K_\Delta}{K_Y + K_{II} + K_C + K_r + K_\Delta}. \quad (10)$$

Исследования состава поверхностного слоя гальванических осадков меди производились с помощью Оже-электронных спектров на установке 09 ИОС-10 04 с анализатором типа «цилиндрическое зеркало» методом

вторичной масс-ионной спектроскопии (ВИМС) на установке МС 7201 М и методом лазерного микроспектрального анализа [7].

Изучение морфологии поверхности осадка металла выполнялось на приборе ЭВМ-100-Б методом оттененных платиной углеродных реплик (электронная микроскопия), а крупнозернистых осадков – на приборе РЭМ-10 (растровая микроскопия).

Микротвердость гальванического покрытия по Виккерсу измерялась прибором ПМТ-3 при вдавливании алмазной пирамидки в металлический слой.

Плотность металлического осадка меди определялась по методике поперечных шлифов. Фотосъемка микрошлифов производилась на микроскопе ММР-2Р с помощью фотоаппарата «Canon».

Эксперименты выполнялись в потенциостатическом режиме, при этом вместо электродного потенциала E использовалась величина электродной поляризации ΔE , определяемая по разности между электродным потенциалом и потенциалом коррозии исследуемого металла: ($\Delta E = E - E_C$), что представляется оправданным, поскольку площадь анода намного превышает площадь поверхности формообразующего углубления [8]. Поэтому анод можно считать неполяризуемым, и он может играть роль электрода сравнения.

Теоретическими исследованиями процесса электрохимического осаждения металлов в узких каналах формообразующих отверстий при стимулирующем воздействии ультразвуковой кавитации установлено, что скорость процесса и время зарастивания углублений зависят от частоты и интенсивности ультразвука, а также топологических особенностей углублений и теплофизических свойств металла-матрицы [6]. Выяснено, что наибольшей эффективностью воздействия обладает низкочастотный ультразвук с частотой $f = 20-40$ кГц при протекании катодных реакций, стимулируемых крупными кавитационными пузырьками Минаэрта. Из полученного уравнения для коэффициента соноселективности K_C СОЭ металлов следует, что при форм-факторе симметрии углубления

$\varphi = 1-3$ K_C увеличивается с интенсивностью и уменьшается с частотой ультразвука по экспоненциальному закону.

В полном согласии с теорией экспериментально установлено, что из-за большего коэффициента теплопроводности алюминия $K = 2,04$ Вт/см·К, по сравнению с цинком $K = 1,1$ Вт/см·К, Al-матрицы оказались менее эффективными, чем Zn-матрицы, поэтому мы ограничимся обсуждением экспериментальных данных по кинетике осаждения меди в отверстиях, выполненных в Zn-пластинах-матрицах.

Метод LIBS показал, что внутри каналов осаждается медь без каких-либо сопутствующих примесей.

На рис. 1а показаны зависимости времени полного зарастивания τ_Δ и средней скорости соноэлектроосаждения \bar{j}_Δ от катодной поляризации ΔE , полученные для сквозных цилиндрических отверстий в Zn-матрице с $r_\varnothing = 0,3$ мм и $\ell = 1$ мм при интенсивности ультразвука $W = 8,4$ Вт/см². Величина τ_Δ уменьшается, а \bar{j}_Δ увеличивается с ΔE достаточно быстро, достигая насыщения, причем максимум КИО (рис. 1б) приходится на $\Delta E^* = -1,0$ В и при этой оптимальной поляризации величина τ_Δ уменьшается, а \bar{j}_Δ – возрастает с W (рис. 1в) и максимум КИО* отвечает $W^* = 11,2$ Вт/см² (рис. 1г).

При оптимальных величинах поляризации ΔE^* и интенсивности ультразвука W^* увеличение «степени раскрытости» устья отверстия $2r_\varnothing/\ell$ способствует уменьшению τ_Δ и увеличению \bar{j}_Δ (рис. 2а) и максимум КИО* наблюдается при $2r_\varnothing/\ell \geq 0,8$ (рис. 2б). Если при этом снизить толщину Al-пластины-матрицы вдвое до $\ell = 0,5$ мм, то происходит дальнейшее уменьшение τ_Δ и рост \bar{j}_Δ с $2r_\varnothing/\ell$ (рис. 2в) при увеличении КИО до КИО* $\geq 10,0$ (рис. 2з). Увеличение форм-фактора φ также приводит к уменьшению τ_Δ и росту \bar{j}_Δ (рис. 3а), однако зависимости $\ln K_i - \varphi$ нелинейны (рис. 3б), что является следствием снижения эффективности СЭО Cu в линейных прорезях с $\varphi = 1$. При этом коэффициент заполнения углублений составляет $K_\Delta = 0,8$.

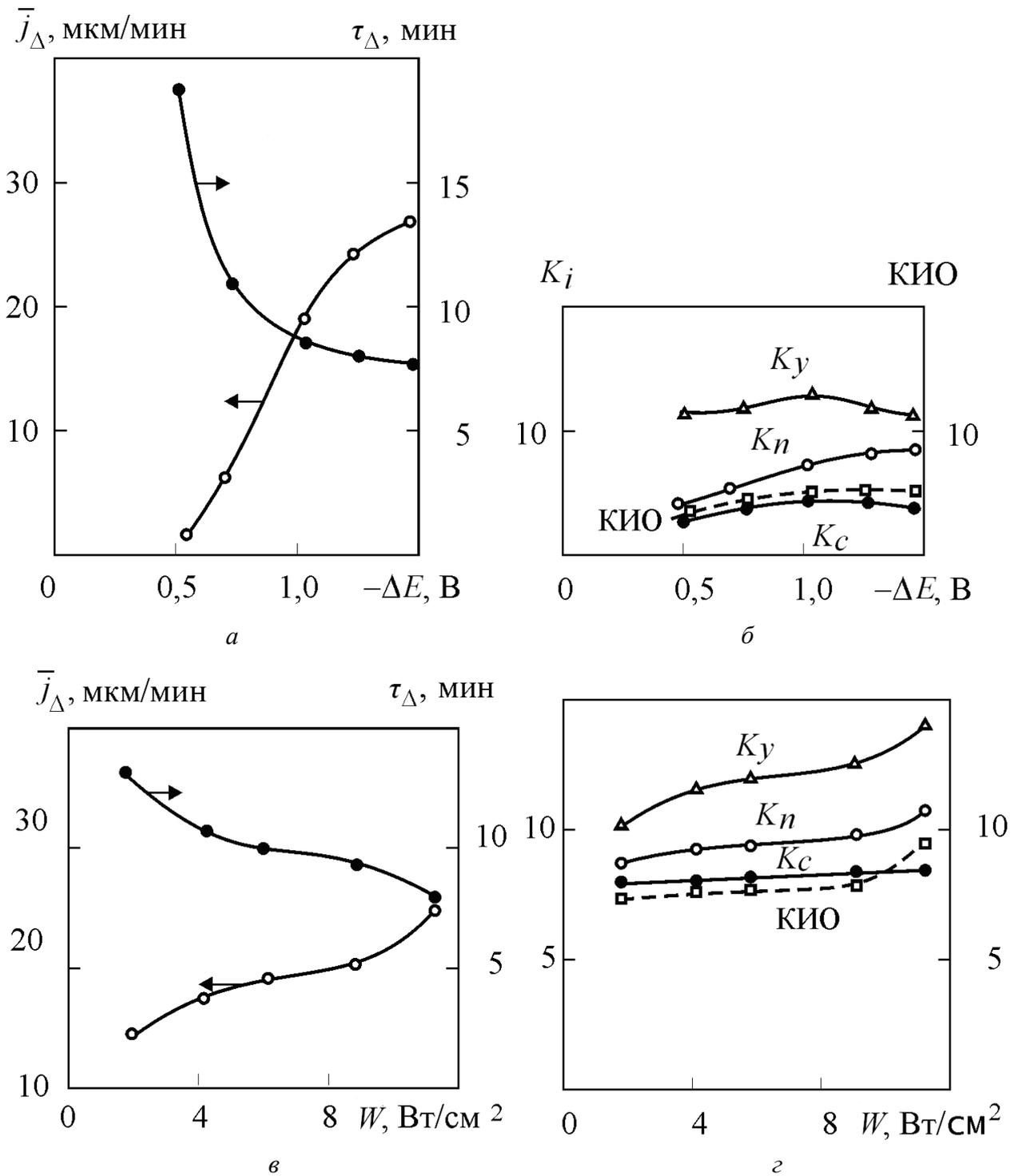


Рис. 1. Зависимости \bar{j}_Δ , τ_Δ - ΔE (а); K_i - ΔE (б); \bar{j}_Δ - W (в); K_i - W (г) для СЭО меди в сквозные отверстия Zn-пластин при $r_\phi = 0,3$ мм и $\ell = 1$ мм; $W = 8,4$ Вт/см² (а, б); $K_i = K_y, K_n, K_c$

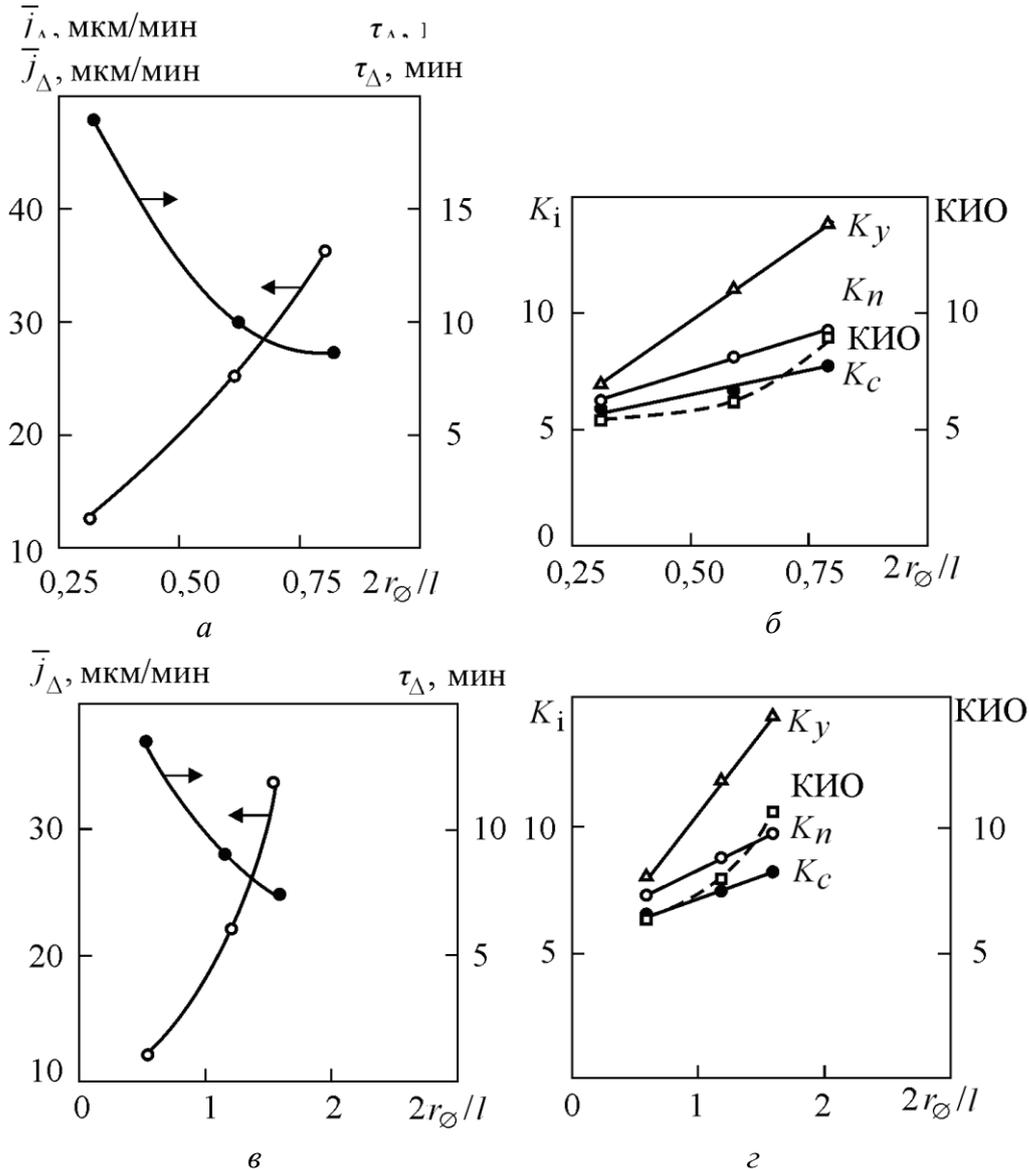


Рис. 2. Зависимости \bar{j}_Δ , τ_Δ , $K_i - 2r_0/l$ для СЭО меди в сквозные отверстия Zn-пластин-матриц при $\Delta E = -1,0$ В, $W = 8,4$ Вт/см², $\ell = 1$ мм (а, б) и $\ell = 0,5$ мм (в, г). $K_i = K_y, K_n, K_c$

Уменьшение толщины Al-пластины-матрицы с $\ell = 1$ мм до $\ell = 0,5$ мм дает дальнейший рост \bar{j}_Δ (рис. 3в) и $\ln K_i$ (рис. 3г) с φ при достижении $K_\Delta = 1$ и КИО* = 3,7. При этом зависимости $\ln K_i - \varphi$ в полном соответствии с теорией оказываются линейными.

Из экспериментальных значений коэффициентов соноселективности СЭО Си в формообразующие углубления $K_C = 2-8$ по теоретическому уравнению [6] можно оценить энергию активации A_E , наиболее реальные значения которой отвечают интервалу $A_E = 10-20$ кДж/моль при среднем зна-

чении, соответствующем энергии активации вязкого потока порядка 15-16 кДж/моль [9]. Поэтому с учетом почти линейного хода кривых $\bar{j}_\Delta - \Delta E$ (рис. 3а), можно сделать заключение о диффузионно-омическом контроле процесса. Естественно, что в таком случае эффективность локального СЭО Си должна нарастать при уменьшении длины канала углубления ℓ и увеличении «раскрытости» его устья $2\Delta_0 / \ell$ (рис. 2), а также с форм-фактором симметрии углубления φ (рис. 3). При этом рост K_C при уменьшении ℓ и увеличении φ , естественно, отвечает и теории эффекта АРКС.

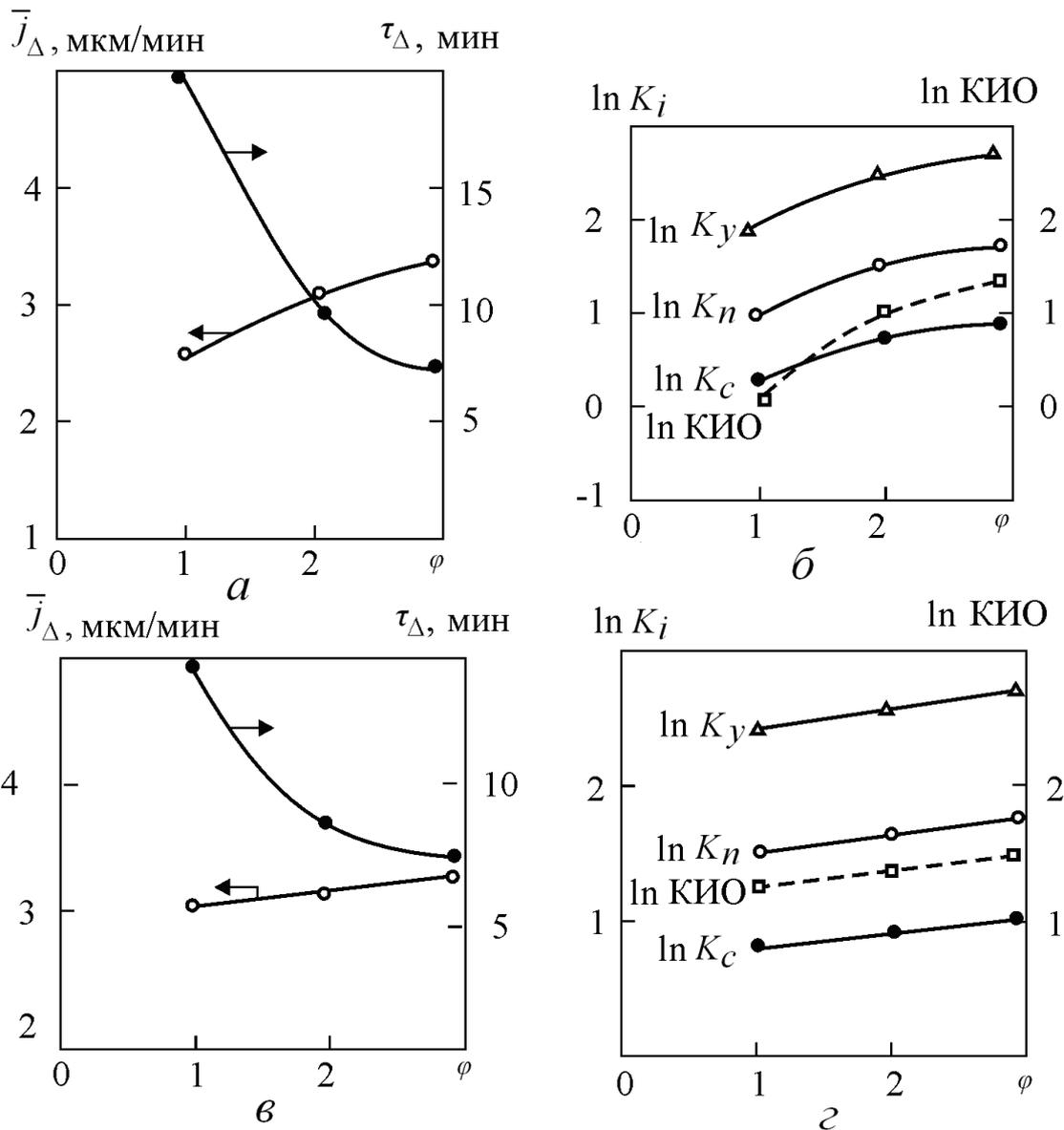


Рис. 3. Зависимости \bar{j}_Δ , τ_Δ , $K_i - \varphi$ для СЭО меди в сквозные углубления Zn-пластин-матриц при $\Delta E = -1,0$ В, $W = 8,4$ Вт/см², $\ell = 1$ мм (а, б) и $\ell = 0,5$ мм (в, г). $K_i = K_y, K_n, K_c$.

Высокотемпературные условия, создаваемые кавитацией в каналах формообразующих углублений, приводят к окислению осаждаемых металлических зерен меди. Экспериментальные измерения удельного электросопротивления «столбиков» меди, получаемых после селективного травления металла матрицы, дают величину $1,4 \cdot 10^{-4}$ Ом·см, что почти на два порядка превышает удельное сопротивление компактной меди, равное $1,75 \cdot 10^{-6}$ Ом·см. Об окисленности свидетельствует и микротвердость локальных ультразвуковых осадков меди, составляющая 103-104 ед. по

Виккерсу, в то время как микротвердость компактной меди – 86 ед. по Виккерсу.

Возможно, на повышение степени окисленности влияют интенсивное выделение водорода и защелачивание внутриканального электролита с образованием на поверхности в качестве промежуточного соединения гидроксида меди (II) – $\text{Cu}(\text{OH})_2$, переходящего затем в CuO .

Об интенсивном внутриканальном выделении водорода можно судить по хорошо различимым на фотографиях поперечных микрошлифов кавернам, располагающимся внутри осадка. Интересно отметить при

этом, что в случае локального СЭО никеля с перенапряжением выделения водорода значительно меньшим по сравнению с перенапряжением выделения водорода на меди [10], зарастания отверстия вообще не происходит и никель сосредотачивается только в устьях отверстий, образуя металлические «пробки», то есть водород вытесняет электролит из канала отверстия.

Анализ конструктивных возможностей субмиллиметрового соногальванопластического формообразования показывает, что при комбинировании соноэлектроосаждения меди в формообразующие углубления с соноэлектроосаждением меди на незамакированную поверхность алюминиевой матрицы и селективным травлением алюминия возможно изготовление самых сложных базовых медных конструкций с субмиллиметровыми размерами топологических особенностей. Такие сложные миниатюрные детали из меди не могут быть получены способами механической обработки или традиционной гальванопластики вследствие зарастания устьев субмиллиметровых углублений и прорезей за счет плохого транспорта и ограничений по рассеивающей способности электролита. Соногальванопластический эффект АРКС приводит к тому, что лимитирующим фактором формообразования является наращивание связующих горизонтальных медных

поверхностей, происходящее при малом форм-факторе $\varphi = 1$ и больших характерных размерах $\Lambda \geq \Delta_0$. Еще большие возможности формообразования открываются при сочетании эффекта АРКС с изготовлением алюминиевых и цинковых матриц с помощью фотолитографии и размерной электрохимической обработки (фотохимического фрезерования).

Итак, полученные экспериментальные результаты показали качественное согласие с теорией СЭО металлов в субмиллиметровые формообразующие углубления. При этом достигнуты значения $K_Y^* = 20$, $K_{II}^* = 4$, $K_C^* = 8$, $K_{\Delta}^* = 1$, $K_{IO}^* = 10$, свидетельствующие в пользу перспективности практического применения СЭО Cu в процессах субмиллиметровой гальванопластики, особенно при использовании селективно растворимых Zn-матриц.

Авторы выражают благодарность профессору Ю.В. Серянову, ныне покойному, за ценный вклад в развитие работы.

Работа выполнена на оборудовании ЦКП «Лазерные и оптические технологии» (Поволжский филиал), ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007—2013 годы», ГК № 02.552.11.7021 (08.05.2007) в рамках Базовой части Госзадания №732.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Агранат Б.А.** Основы физики и техники ультразвука / Б.А. Агранат, М.Н. Дубровин, Н.Н. Хавский. М., 1987. 217 с.
2. **Капустин Б.А.** Электрокристаллизация металлов в ультразвуковом поле / Б.А. Капустин, А.Н. Трофимов. М.: Наука, 1962. 172 с.
3. Физика и техника мощного ультразвука. Т. 3. Физические основы ультразвуковой технологии / под ред. Л.Д. Розенберга. М.: Наука, 1970. 688 с.
4. Ультразвук. Маленькая энциклопедия. М.: Сов. энциклопедия, 1979. 400 с.
5. **Маргулис М.А.** Основы звукохимии / М.А. Маргулис. М.: Высш. шк., 1984. 272 с.

6. **Фоменко Л.А.** Кинетика локального осаждения меди в узких каналах формообразующих углублений под влиянием ультразвуковой кавитации. Теоретические исследования / Л.А. Фоменко, Л.Г. Ловцова, Ю.В. Серянов // Вестник СГТУ. 2011. № 3 (57). Вып. 1. С. 123-132.
7. Лазерный эмиссионный спектральный анализ состава покрытий с помощью многоканального измерительного регистратора спектров МИРС / Т.Н. Соколова, Е.Л. Сурменко, А.А. Пеплов, А.П. Дёмин // Аналитика и контроль. 2005. С. 17-20.

8. Методы электрохимических исследований / Ю.В. Серянов, Л.А. Фоменко, С.Н. Барабанов, И.В. Родионов. Саратов: СГТУ, 2005. 187 с.

9. **Ротинян А.Л.** Теоретическая электрохимия / А.Л. Ротинян, К.И. Тихонов, И.А.

Шошина. Л.: Химия, Ленингр. отд-ние, 1981. 423 с.

10. **Феттер К.** Электрохимическая кинетика / К. Феттер. М.: Химия, 1967. 856 с.

Фоменко Любовь Афанасьевна – доктор технических наук, профессор кафедры «Микробиология, биотехнология и химия» Саратовского государственного аграрного университета им. Н.И. Вавилова

Соколова Татьяна Николаевна – заведующая учебно-исследовательской лабораторией лазерной техники и технологии Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Сурменко Елена Львовна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

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

Lyubov A. Fomenko – Dr.Sc., Professor, Department of Microbiology, Biotechnology and Chemistry, N.I. Vavilov Saratov State Agricultural University

Tatiana N. Sokolova – Head: Education and Research Laboratory of Laser Engineering and Technologies, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Elena L. Surmenko – PhD, Associate Professor, Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Igor V. Rodionov – Dr.Sc., Professor, Head: Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 15.09.16, принята к опубликованию 19.09.16

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 621.318.3

ВОЛЬТ-АМПЕРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ В РЕАКТИВНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ

Д.А. Выриханов, Д.А. Федоров

VOLT-AMPERE CHARACTERISTICS OF ELECTROMECHANICAL ENERGY CONVERSION FROM THE JET FLOW

D.A. Virikhanov, D.A. Fedorov

Представлены результаты исследования динамических характеристик изменения тока и составляющих электрического напряжения при электромеханическом преобразовании энергии в преобразователях реактивного типа. Определены условия формирования оптимального по КПД режима преобразования энергии.

Ключевые слова: электромеханическое преобразование энергии, механическая мощность, динамика, КПД

В последнее время получил широкое распространение анализ электрических цепей на основании изучения вольт-амперных характеристик их элементов. Решение системы уравнений, описывающей работу электрических цепей согласно закону Кирхгофа, требует сопоставления каждому из элементов цепи некоторой величины электрического напряжения. Данный метод используется при анализе цепей, содержащих элементы, преобразующие электрическую и магнитную энергии [1]. Для цепей, содержащих электромеханические преобразователи энергии, однозначных зависимостей падения напряжения на них от протекающего тока, пока что не сформулировано. Составление уравнений по законам Кирхгофа для цепей, содержащих электро-

The paper presents the results of research into dynamic characteristics of current flow and the voltage constituents under electromechanical energy conversion using jetting flow. The conditions needed to form the optimal efficiency mode of energy conversion were determined.

Keywords: electromechanical energy conversion, mechanical power, dynamics, efficiency

механические преобразователи энергии, требует выделения в их структуре элемента, протекание тока по которому приводит к падению напряжения, пропорционального развиваемой механической мощности. Это представляет трудность в связи с невозможностью разделения преобразователя на две отдельные составляющие, ответственные за преобразование энергии в магнитную и в механическую формы. На это указывает и автор [2], отмечая, что известные выражения законов Кирхгофа впервые были введены Максвеллом [3] и что данные «...уравнения с сосредоточенными параметрами соответствуют теории обобщенных сил и обобщенных координат Лагранжа – Максвелла с кинетической энергией, не зависящей явно от времени и не

раскрывающей внутренний механизм процессов преобразования механической энергии в движении электрических машин (вращающихся и поступательных)». Так что вопрос изучения вольт-амперных характеристик процесса электромеханического преобразования энергии до настоящего времени остается актуальным.

В настоящей статье приводится анализ результатов математического моделирования электромеханического преобразователя реактивного типа (линейного электромагнитного двигателя). Построение модели и апробация результатов моделирования на основании экспериментальных данных приведены в работе [4]. В результате анализа вольт-амперной характеристики электромеханического преобразователя энергии выявлены особенности процесса преобразования энергии, оказывающие влияние на мощность преобразования энергии, коэффициент полезного действия.

Известное выражение закона Кирхгофа [5, 6] для цепи, содержащей последовательно соединенные электро-механический преобразователь энергии с изменяющейся индуктивностью L , активное сопротивление R при напряжении питания u и при i

$$u = i \frac{dL}{dt} + L \frac{di}{dt} + iR, \quad (1)$$

где t – время, не позволяет выделить некоторое сопротивление $R_{\text{мех}}$, мощность энергопреобразования в котором будет соответствовать механической мощности $P_{\text{мех}}$, определяемой соотношением

$$P_{\text{мех}} = i^2 R_{\text{мех}}. \quad (2)$$

Из соотношения (1) однозначно выражается только тепловая мощность, выделяющаяся на активном сопротивлении.

В [5] предложен пример определения механической мощности (2) как одной из составляющих рэлеевой функции рассеяния F , при записи уравнения Эйлера-Лагранжа, описывающего процесс электромеханического преобразования в неконсервативных системах:

$$F = \frac{1}{2} Ri^2 + \frac{1}{2} \alpha \dot{x}^2, \quad (3)$$

где \dot{x} – скорость изменения геометрической координаты x преобразователя; α – сопротивление вязкого трения движению якоря электромеханического преобразователя.

Из выражения (3) можно определить механическую мощность, развиваемую преобразователем при преодолении сил вязкого трения, сопровождающих движение якоря:

$$P_{\text{мех}} = \alpha \dot{x}. \quad (4)$$

При этом выражение (4) не учитывает механическую мощность изменения кинетической энергии подвижных частей преобразователя.

Используя уравнение (3), авторы работы [5] приводят запись закона Кирхгофа для электромеханического преобразователя:

$$\frac{d\psi(i, x)}{di} + iR = u, \quad (5)$$

где $\psi(i, x)$ – потокосцепление магнитного потока с обмоткой возбуждения электромеханического преобразователя, зависящее от геометрической координаты x и тока в обмотке возбуждения магнитного поля i . Выражение (5) с учетом зависимости между потокосцеплением и током через коэффициент индуктивности $\psi = f(i, L(i, x))$ является другой записью выражения (1). При этом в [5] не приводится переход от рассмотрения механической мощности в виде (4) к виду, подобному выражению (2), что не позволяет провести анализ электрических цепей на основании закона Кирхгофа, минуя запись и решение уравнений Эйлера – Лагранжа. Данное обстоятельство усложняет анализ электромеханических преобразователей, их проектирование и управление.

Рассмотрим иной принцип построения вольт-амперной характеристики рассматриваемого типа электромеханических преобразователей.

В процессе электромеханического преобразования электрическая энергия преобразуется в три основные формы:

а) в тепловую энергию, выделяющуюся на активном сопротивлении обмотки возбуждения двигателя. Мощность $P_{мен}$ преобразования определяется соотношением

$$P_{мен} = i^2 R. \quad (6)$$

Уравнению (6) соответствует вольт-амперная характеристика активного сопротивления обмотки возбуждения магнитного поля преобразователя (прямой линией согласно закону Ома) (рис. 1);

б) в энергию магнитного поля. В соответствии с [3, 7, 8] мощность $P_{маг}$ энергии преобразуемой в магнитную форму, представим в виде

$$P_{маг} = i \frac{d\psi_{маг}}{dt}, \quad (7)$$

где $\frac{d\psi_{маг}}{dt}$ – «магнитная» противоЭДС.

Уравнению (7) соответствует вольт-амперная зависимость мгновенных значений «магнитной» противоЭДС от величины потребляемого тока. Магнитная мощность (7) зависит от режима работы преобразователя и в общем случае может быть представлена параметрической зависимостью

$$\begin{cases} i = f_1(t), \\ \frac{d\psi_{маг}}{dt} = f_2(t). \end{cases} \quad (8)$$

в) в механическую энергию. Механическую мощность $P_{мех}$ определим в виде

$$P_{мех} = i \frac{d\psi_{мех}}{dt}. \quad (9)$$

где $\frac{d\psi_{мех}}{dt}$ – «механическая» противоЭДС.

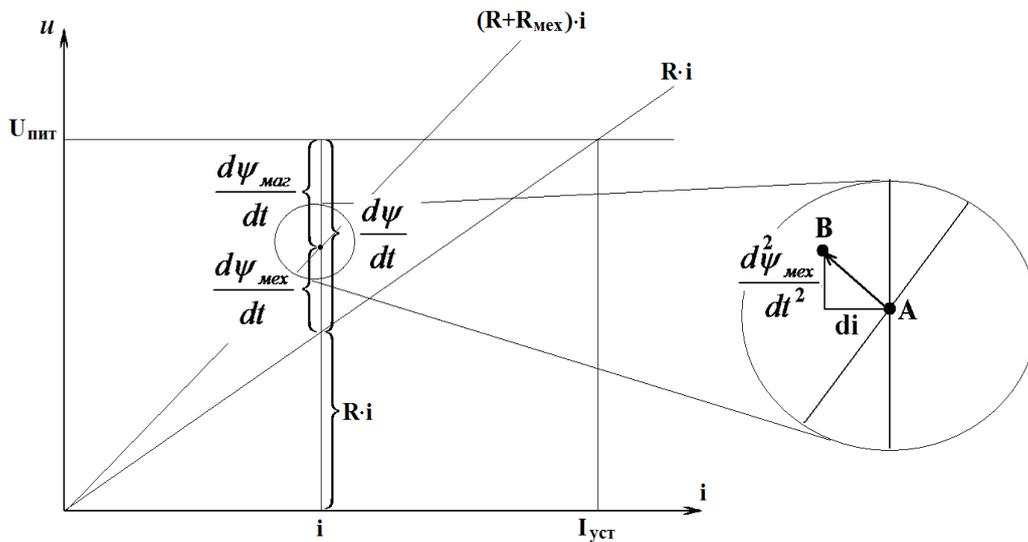


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика процесса электромеханического преобразования энергии

Аналогично (8) вольт-амперная характеристика структурного элемента преобразователя, преобразующего механическую энергию, может быть определена параметрической зависимостью тока и «механической» противоЭДС:

$$\begin{cases} i = f_1(t), \\ \frac{d\psi_{мех}}{dt} = f_3(t). \end{cases} \quad (10)$$

Соотношения (8)-(10) иллюстрированы рис. 1. Напряжение питания $U_{пит}$ распределяется на соответствующие ЭДС. При этом возникновение механической мощности можно рассматривать как внесение в схему дополнительного активного сопротивления $R_{мех}$.

Мощность, идущая на выделение тепловой энергии, может иметь только положи-

тельное значение (энергия рассеивается). Потоки мощности, направленные на магнитную и механическую составляющие, могут иметь различные знаки в зависимости от режима работы преобразователя в качестве двигателя или генератора.

Анализ режимов работы линейных электромагнитных двигателей в настоящее время у большинства авторов (например, в работах [5, 6]) проводится в координатах $\psi = f(i)$. При этом не принимается в учет процесс, связанный с выделением энергии на активном сопротивлении двигателя. Из построений на рис. 1 видно, что режим работы ЛЭМД можно изобразить на его вольт-амперной характеристике в виде соотношения между приращением тока di и величиной второй производной от потокосцепления $\frac{d^2\psi_{мех}}{dt^2}$, которое определяет перемещение рабочей точки из местоположения А в Б.

В процессе электромеханического преобразования рабочая точка А описывает некоторую траекторию на плоскости рис. 1. Каждой точке на плоскости рис. 1 соответствуют некоторые величины потребляемых преобразователем электрической, механической $P_{мех} = f(u, i)$ и магнитной $P_{маг} = f(u, i)$ мощностей.

Моделирование рабочих процессов в электромеханическом преобразователе электромагнитного реактивного типа с линейным перемещением якоря [4] позволило построить его частную вольт-амперную характеристику, представленную на рис. 2. Питание преобразователя задавалось постоянным напряжением 50 В. Моделирование проводилось с момента подачи напряжения на обмотку двигателя до момента выбора всего рабочего зазора.

Переходная характеристика движения рабочей точки по плоскости рис. 2 формируется согласно закону сохранения энергии. При этом величина тока стремится к установившемуся значению, чему сопутствуют два фактора:

1. Стремление к максимуму величины механической противо-ЭДС. Механическая

противо-ЭДС является основополагающей в формировании движения рабочей точки в вертикальном направлении;

2. Стремление к минимуму величины магнитной противо-ЭДС. Магнитная противо-ЭДС является основополагающей в формировании движения рабочей точки в горизонтальном направлении, так как потокосцепление пропорционально току (коэффициентом пропорциональности является индуктивность L) который стремится к установившемуся значению.

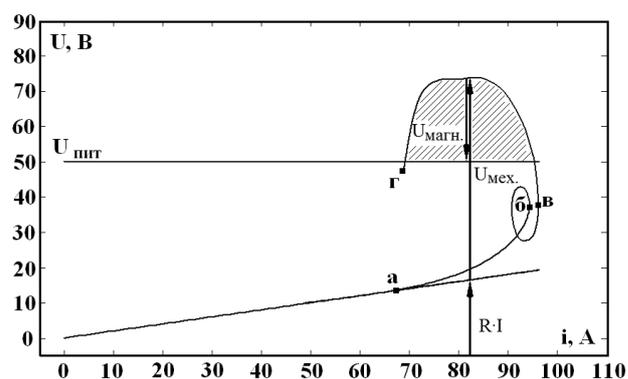


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика электромеханического процесса преобразования

Петлеобразную форму вольт-амперной характеристики (рис. 2) можно объяснить одновременным действием следующих условий:

1. Уменьшение (увеличение) «магнитной» противоЭДС связано с увеличением (уменьшением) тока. При этом преобразователь стремится к накоплению максимальной величины магнитной энергии, которая, в свою очередь, пропорциональна квадрату потребляемого тока, стремящемуся к установившемуся значению;

2. Увеличение «механической» противоЭДС приводит к уменьшению тока пропорционально скорости движения якоря преобразователя.

При относительно малых значениях тока «магнитная» противоЭДС преобладает над «механической» что приводит к движению рабочей точки в сторону увеличения тока. При достаточном разгоне якоря преобразователя («механическая» противо-ЭДС начинает преобладать над «магнитной») рабочая точка начинает движение в сторону уменьшения тока.

Разделение процесса электромеханического преобразования энергии на три основные стадии наглядно представлено на рис. 3, на котором приведено семейство вольт-амперных характеристик преобразователя, полученное при изменении уровня напряжения питания последовательно от 30 до 80 В. Из рис. 3 следует, что петлеобразная форма вольт-амперной характеристики наблюдается при напряжении питания от 40 до 70 В. В этом промежутке величины «механической» и «магнитной» противоЭДС примерно одинаковы, а мощности преобразования энергии в магнитную и в механическую формы примерно равны. В то же время, при напряжении питания ниже 40 В преобладает «механическая» составляющая противоЭДС, что приводит к значительному снижению тока к концу цикла преобразования (когда якорь полностью выбирает собственный рабочий ход).

При напряжении питания выше 70 В наблюдается преобладание «магнитной» противоЭДС. Это говорит о том, что преобразование характеризуется в основном накоплением магнитной энергии, сопровождаемым относительно большим увеличением тока.

На рис. 4 представлены зависимости величин электрической, магнитной, механической и тепловой энергий, преобразованных на момент завершения цикла срабатывания преобразователя, в зависимости от величины напряжения питания. Максимум КПД соответствует некоторому значению напряжения питания (в данном случае 40 В).

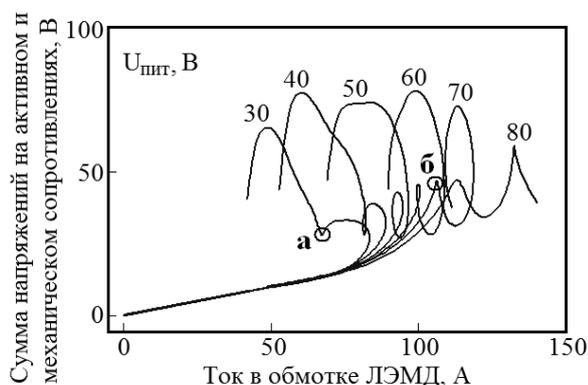


Рис. 3. Семейство вольт-амперных характеристик процесса электромеханического преобразования энергии

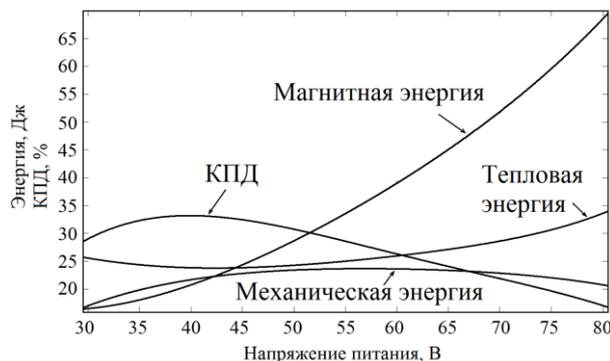


Рис. 4. Энергетические показатели процесса электромеханического преобразования энергии

Итак, процесс электромеханического преобразования в общем случае разделен на три этапа:

а) этап достижения равенства между величинами магнитной и механической мощностями (отрезок вольт-амперной характеристики а-б на рис. 2);

б) этап петлеобразной формы вольт-амперной характеристики, характеризующийся последовательной сменой преобладания механической мощности над магнитной и наоборот (отрезок б-в на рис. 2);

в) завершающий этап процесса электромеханического преобразования энергии, характеризуемый увеличением механической мощности и возможным формированием отрицательной магнитной мощности, что говорит о преобразовании магнитной энергии в механическую форму (отрезок в-г на рис. 2).

Изменение напряжения питания электромеханического преобразователя приводит к вырождению петлеобразного этапа в точку излома вольт-амперной характеристики (точки а и б на рис. 3). При этом снижение напряжения питания формирует вольт-амперную характеристику, содержащую точку типа «а», а увеличение напряжения питания формирует характеристику с точкой типа «б».

Максимальный коэффициент полезного действия электромеханического преобразователя может быть сформирован при некотором уровне напряжения питания, которому будет соответствовать максимальная величина площади, заштрихованной на рис. 2, которая пропорциональна энергии магнитного поля, преобразованной в механическую форму.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бессонов Л.А.** Теоретические основы электротехники / Л.А. Бессонов. М.: Гардарики, 2002.
2. **Иосифьян А.Г.** Эволюция физических основ электротехники и электродинамики / А.Г. Иосифьян // Электричество, 1989. № 9. С. 16-26.
3. **Максвелл Дж.К.** Избранные сочинения по теории электромагнитного поля / Дж. К. Максвелл. М.: ГИТТЛ, 1954.
4. Оптимизация режима конденсаторного питания линейного электромагнитного двигателя в приводе ударных машин / Д.А. Вырыханов, А.А. Егоров, Г.Г. Угаров, К.М. Усанов // Вестник СГТУ, 2006. № 3. С. 78-83.
5. **Уайт Д.** Электромеханическое преобразование энергии / Д. Уайт, Г. Вудсон. М.: Энергия, 1964. 312 с.
6. **Гордон А.В.** Электромагниты постоянного тока / А.В. Гордон, А.Г. Сливинская. М.: Госэнергоиздат, 1960.
7. **Вырыханов Д.А.** Математическая модель процесса электромеханического преобразования энергии / Д.А. Вырыханов, Г.Г. Угаров // Вопросы электротехнологии. 2013. № 1 (1). С. 61-64.
8. **Вырыханов Д.А.** Алгоритм расчета динамических зависимостей токов и пространственных координат обобщенного электромеханического преобразователя энергии / Д.А. Вырыханов, Г.Г. Угаров // Вопросы электротехнологии, 2014, №1(2). С. 90 – 95.
9. **Вырыханов Д.А.** Матричная математическая модель обобщенного электромеханического преобразователя энергии / Д.А. Вырыханов, Г.Г. Угаров // Вопросы электротехнологии. 2014. № 4 (5). С. 30-33.

Вырыханов Денис Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Федоров Дмитрий Александрович – студент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Denis A. Virikhanov – Ph.D., Associate Professor, Department of Power Supply for Industrial Facilities, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Dmitry A. Fedorov – Undergraduate, Department of Power Supply for Industrial Facilities, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 10.09.16, принята к опубликованию 19.09.16

ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ ОДНОКОНТУРНОЙ СИСТЕМЫ ТРОЛЛЕЙБУСНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ДК-211БМ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

И.А. Менщиков

PERFORMANCE EVALUATION OF THE SINGLE PHASE TROLLEY MOTOR DK-211BM USING SIMULATION-BASED DIAGNOSTICS

I. A. Menshikov

Приведены результаты исследования диагностики троллейбусных тяговых электрических машин с повышенным ресурсом. Проблемы оценки работоспособности тяговых электрических машин городского электротранспорта с повышенным ресурсом предлагается решать с помощью имитационного моделирования в пакете MATLAB & Simulink. Имитационное моделирование базируется на использовании математических моделей электрических машин постоянного тока и выбранных наиболее информативных контролируемых параметров функционирования тягового электродвигателя.

Ключевые слова: диагностика, электродвигатель

Структурная схема электромеханической системы с исполнительным электродвигателем ДК-211БМ, управляемым по цепи постоянного тока, представлена на рис.1. Структурная схема включает электродвигатель ДК-211БМ, представленный последовательно включенными апериодическим звеном первого порядка и интегрирующим звеном, охваченным обратной связью через безынерционное звено K_E [1-3].

Электродвигатель ДК-211БМ управляется от силового регулятора, представленного звеном $W_{cp}(S)$. Силовой агрегат (широтно-импульсный преобразователь) управляется от регулятора с передаточной функцией $W_p(S)$, на вход которого подается

The paper presents the research results referring the diagnosis of long lasting electric traction motors for trolleys. It is proposed to solve the problems with efficiency assessment of the long lasting electric traction motors used in the city electric transport by means of simulation modeling in the MATLAB & SIMULINK. The simulation is based on mathematical modeling of electrical DC machines and most information-bearing and monitored parameters relating operation of traction motors.

Keywords: diagnosis, reliability

разность сигнала управления и обратной связи по скорости.

Рассмотрим функционирование работоспособной электромеханической системы с электродвигателем ДК-211БМ, в которой момент нагрузки является независимым от координат системы функционирования. В этом случае момент нагрузки является возмущением, которое система должна компенсировать.

Для электромеханической системы с электродвигателем ДК-211БМ, когда постоянные времени сильно отличаются ($T_2 \gg T_1$), целесообразно переменить регулятор, который компенсировал бы большую постоянную времени ТЭД.

$$W_p(S) = \frac{(T_2S + 1) \cdot K_p}{T_2S} = K_p + \frac{K_p}{T_2S} = K_{II} + \frac{K_{II}}{S} \quad (1)$$

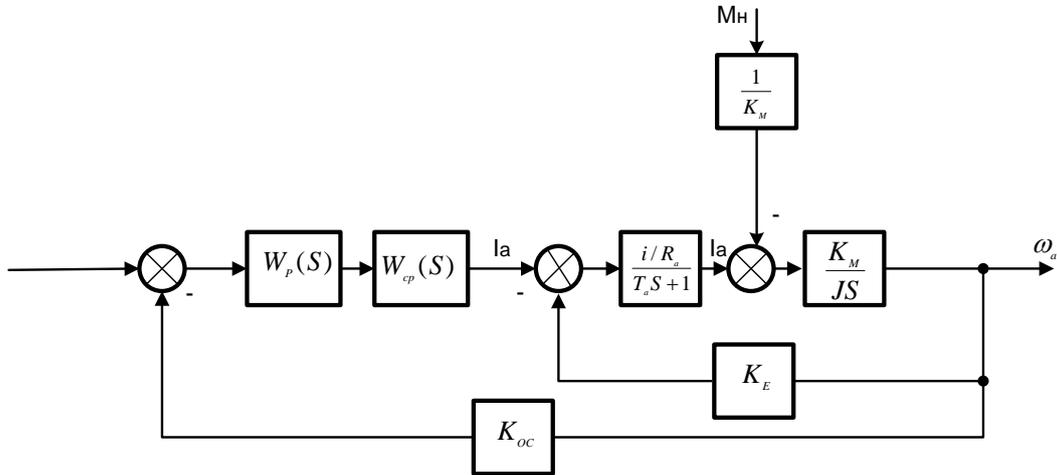


Рис. 1. Структурная схема одноконтурной скоростной системы электродвигателя ДК-211БМ

Тогда передаточная функция разомкнутой системы будет равна

$$W_{PA3}(S) = \frac{(T_2S + 1) \cdot K_{CP} K_P K_{OC}}{T_2S} \cdot \frac{1/K_E}{(T_1S + 1) \cdot (T_2S + 1)} = \frac{K_{CP} K_P K_{OC} / K_E}{T_2S \cdot (T_1S + 1)} \quad (2)$$

При $\frac{T_2 K_E}{K_{CP} K_P K_{OC}} = 2T_1$, определяем коэффициенты передачи пропорциональной и интегральной частей регулятора:

$$K_{II} = K_P = \frac{T_2 K_E}{2T_1 K_{CP} K_{OC}}, \quad K_{II} = \frac{K_P}{T_2} \quad (3)$$

Модель электромеханической системы с электродвигателем ДК-211БМ приведена на рис. 2. Электродвигатель ДК-211БМ представлен звеньями Transfer Fcn, Transfer Fcn1, K_E. Момент нагрузки модулируется блоками Step, K_M. Силовой регулятор представлен безынерционным звеном K_CP с насыщением, которое определяется конечной величиной напряжения питания силового регулятора.

При коэффициенте усиления по сигналу управления $K_{CP}=10$ и коэффициенте усиления по сигналу обратной связи $K_{OC}=0,1$ параметры регулятора, рассчитанные по уравнению (3), равны $K_{II}=85,12$, $K_{II}=0,125$. Переходные процессы в замкнутом скоростном контуре по току (моменту) и скорости при скачке входного сигнала (напряжение питания) в момент времени $t=0$ и скачке возмущающего сигнала (момент на валу ЭМ) в момент времени $t=0,5$ с представлены на рис. 3. Расчетные данные двигателя ДК-211БМ представлены в таблице.

В замкнутой электромеханической системе по возмущению процесс апериодический, при этом постоянная времени T_a компенсации возмущающего сигнала приблизительно равна постоянной времени возмущающего сигнала.

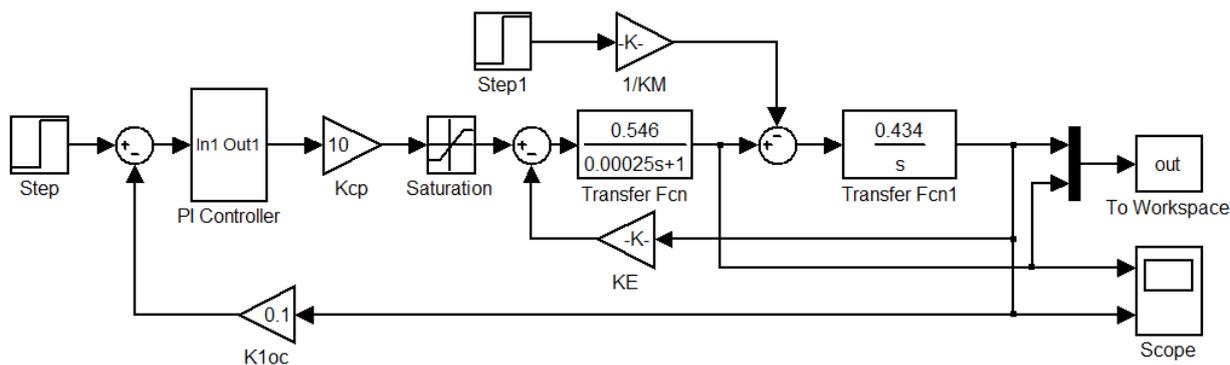


Рис. 2. Компьютерная модель диагностического процесса оценки работоспособного состояния электродвигателя ДК-211БМ

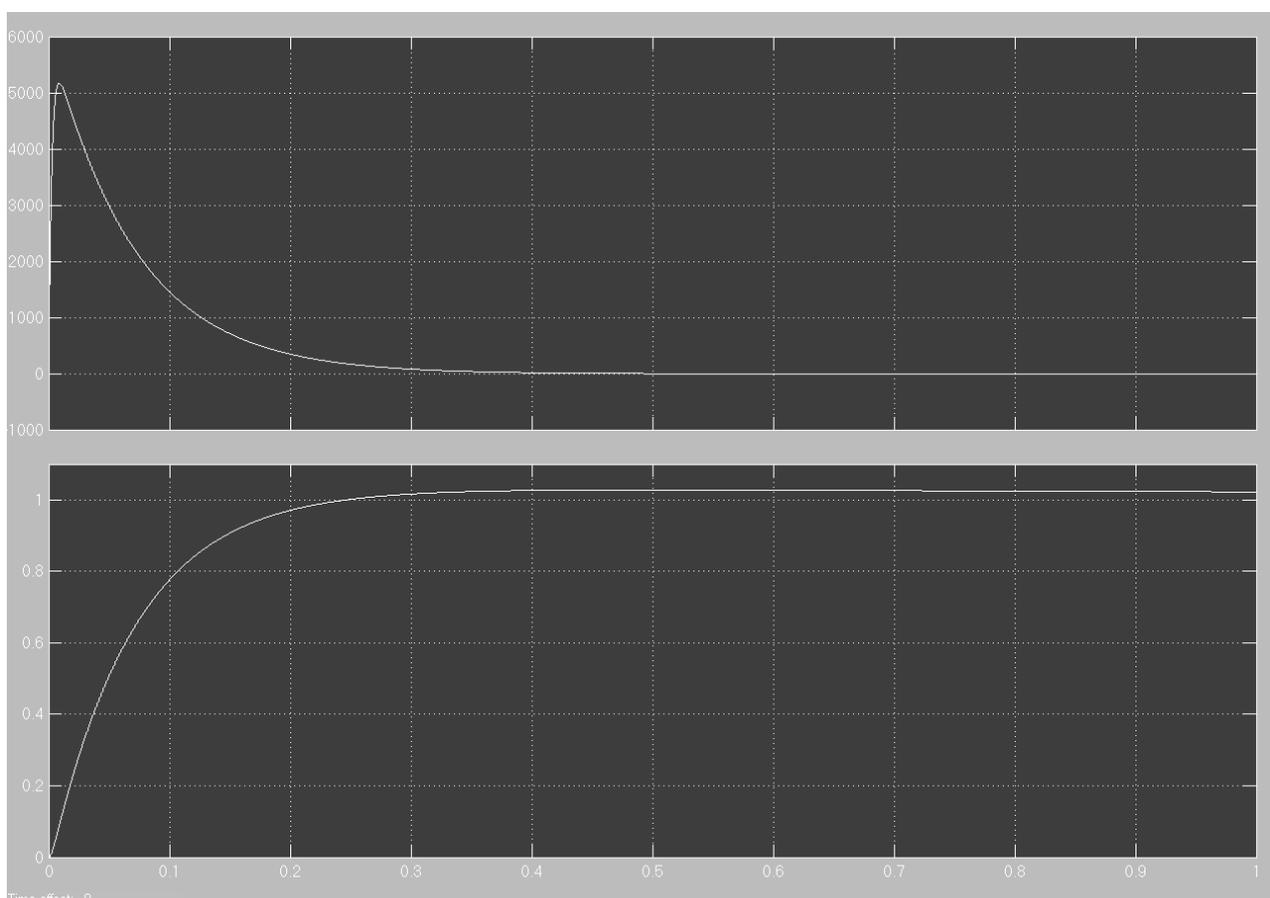


Рис. 3. Переходные процессы в работоспособном электродвигателе ДК-211БМ

Расчетные данные двигателя ДК – 211БМ при неработоспособном состоянии
(сопротивления изоляции в цепи якоря ниже нормы)

K_1	K_2	K_M	K_E	T_a	T_1	T_2	S_1	S_2
1/Ом	1/Амс ²	Нм/А	Вс	с	с	с	-	-
125	1492	46,3	52,3	7,503	125	0,341	-0,067-j3604	-0,067+j5600

При моделировании снижения качества изоляции ТЭД и нарушения коммутации КЩУ на ПЭВМ (рис. 4) коэффициент передачи по управлению K_E изменяет свои параметры $K_E=52,2$, так как изменяются внутренние структурные параметры ДК-211БМ

(сопротивление цепи якоря R_a уменьшается и устанавливается в пределах от 0,0081 до 0,0089 Ом, а ток цепи якоря увеличивается от номинального значения 300 А до максимального 350 А).

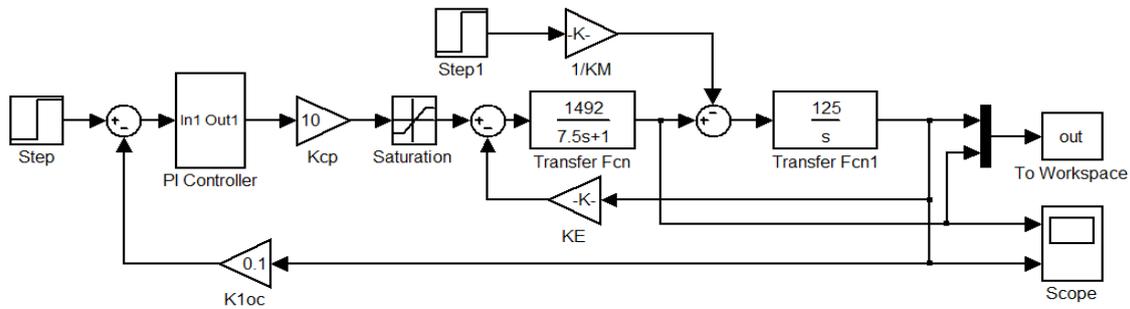


Рис. 4. Компьютерная модель диагностического процесса при неработоспособном состоянии двигателя ДК-211БМ

На рис. 5 представлен ток переходного процесса в цепи якоря неисправного двигателя ДК-211БМ.

При этом динамическая характеристика ДК-211БМ по управлению и по возмущению представляет собой колебательное звено, в результате чего электромеханическая система имеет неустойчивый характер, так как переходный процесс по цепи управления и возмущения представляет

собой колебания тока разрыва цепи якоря I_a и угловой частоты вращения ротора ω_a . Система неустойчива по определению А.М. Ляпунова, так как корни характеристического уравнения переходного процесса пуска ТЭД комплексносопряженные. Расчетные данные двигателя при снижении сопротивления изоляции показаны в таблице. ДК-211БМ считается неработоспособным.



Рис. 5. Переходные процессы при неработоспособном состоянии двигателя ДК-211БМ

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гольдберг О.Д.** Надежность электрических машин / О.Д. Гольдберг, С.П. Хелемская. М.: Изд. центр «Академия», 2010. 288 с.

2. **Герман-Галкин С.Г.** Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем

на ПК / С.Г. Герман-Галкин. СПб.: Корона Век, 2011. 368 с.

3. **Меншиков И.А.** Эффективные методы автоматизации контроля технического состояния электромеханических систем / И.А. Меншиков. Саратов: Изд. центр «Наука», 2014. 141 с.

Меншиков Игорь Александрович – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю. А.

Igor A. Menshikov – PhD, Associate Professor, Department of Power Supply for Industrial Facilities, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 11.09.16, принята к опубликованию 19.09.16

ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИРОВАНИЯ МНОГОФАКТОРНОГО ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

И.А. Менщиков

PERFORMANCE EVALUATION OF ELECTROMECHANICAL EQUIPMENT USING SIMULATION-BASED COMPLEX DIAGNOSTICS

I. A. Menshikov

Приведены результаты исследования диагностики троллейбусных тяговых электрических машин с отработанным ресурсом. Оценка работоспособности тяговых электрических машин городского электротранспорта с повышенным ресурсом предлагается проводить с помощью моделирования многофакторного диагностического процесса в пакете MATLAB & Simulink. Имитационное моделирование базируется на использовании математических моделей электрических машин постоянного тока и выбранных наиболее информативных контролируемых параметров функционирования тягового электродвигателя.

Ключевые слова: диагностика, электродвигатель

Судить о работоспособности тягового электродвигателя (ТЭД) можно непосредственно по характеристикам или их показателям, проверяя условия работоспособности или контролируя совокупность параметров. Если контролировать все нестабильные параметры, то можно с полной достоверностью (с вероятностью, равной единице) определить работоспособность системы [1-3]. Однако ТЭД имеют параметры, контроль которых оказывается сложным. В связи с этим возникает задача выбора для контроля из всего множества совокупности параметров системы только ограниченного числа эффективных параметров. Очевидно, что в этом случае судить

The paper presents the results of research into diagnostics of electric traction trolley motors with expired service life. The author proposed to assess the efficiency of long life electric traction motors used in the city electric transport using complex diagnostics with MATLAB & SIMULINK. The simulation is based on the mathematical models of electrical DC machines and the highlighted information-bearing and monitored parameters relating the operation of traction motors.

Key words: diagnostics, reliability

о работоспособности системы можно только с вероятностью, меньшей единицы. Для облегчения задачи выбора ограниченного числа информативных контролируемых параметров всю совокупность параметров системы целесообразно упорядочить.

С помощью компьютерной модели электродвигателей ДК-211Б, ДК-821, ДК-220 с широтно-импульсным преобразователем произведем выбор из множества параметров, характеризующих функционирование электромеханической системы, наиболее информативных контролируемых параметров (рис. 1). Для описания переходных процессов в ТЭД примем полином общего вида

$$W(P) = b_0 + \sum_1^k b_i x_i + \sum_1^k b_{ij} x_i^2 + \sum_1^k b_{ij} x_i^n + \dots, \quad (1)$$

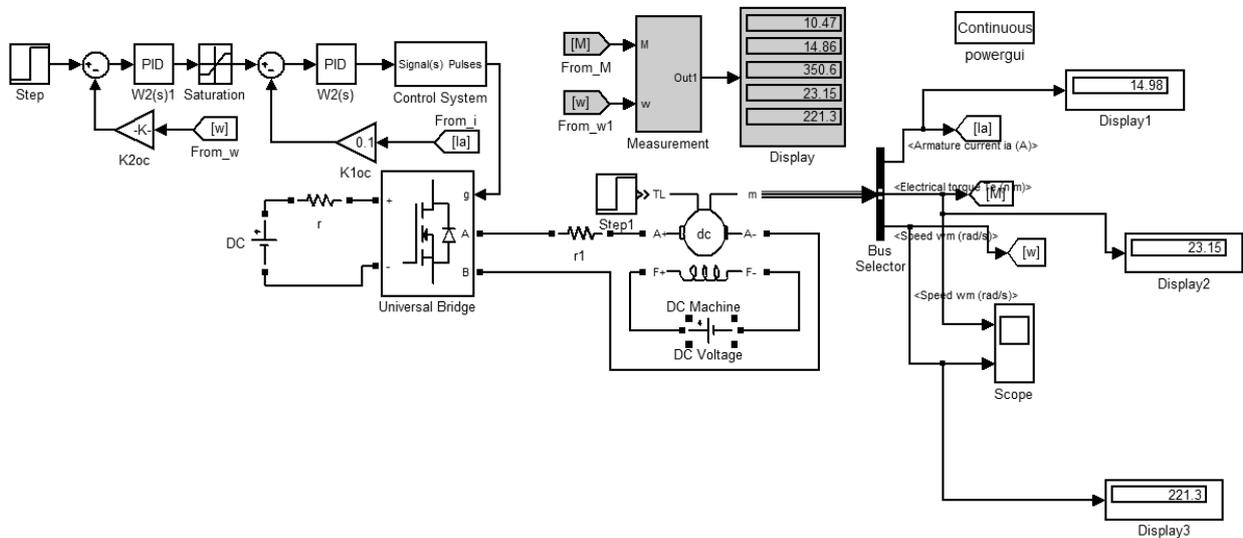


Рис. 1. Имитационная компьютерная модель диагностического процесса исследования электродвигателей ДК-211БМ; ДК-220; ДК- 821

В качестве входных параметров, характеризующих переходные режимы работы ТЭД, приняты номинальный момент нагрузки на роторе M_c ; напряжение на якоре ТЭД U_a ; ток в обмотке возбуждения ТЭД I_b .

Выходными контролирующими параметрами, характеризующими качество переходного процесса пуска ТЭД, являются: угловая скорость вращения якоря ω_a ; электромагнитный момент ротора ТЭД $M_{эм}$; ток в цепи якоря I_a . Матрица планирования эксперимента представлена в табл. 1.

Для моделирования определены интервалы варьирования входных параметров (табл. 2).

Выбор исследуемых параметров проводился на основании обзора научной литературы и теоретических предпосылок настоящего исследования. Для определения степени влияния каждого входного параметра на выходной был принят план Бокса – Бенина, обеспечивающий минимальные затраты на эксперимент и допускающий экстраполяцию, представленный в табл. 2-4 [1-3].

Чтобы воспользоваться стандартной матрицей значений факторов, кодируем их по формуле

$$x_i = \frac{x_j - \bar{x}_{jcp}}{x_{jcp} - x_{jmin}} = \frac{x_j - \bar{x}_{jcp}}{x_{jmax} - \bar{x}_{jcp}}, \quad (2)$$

где: x_{jmax} и x_{jmin} – верхний и нижний пределы изменения каждого фактора в ходе эксперимента; \bar{x}_{jcp} – среднее значение фактора

$$\bar{x}_{jcp} = \frac{(x_{jmin} + x_{jmax})}{2} \quad (3)$$

и соответственно

$$x_j = \bar{x}_{jcp} + x_i \cdot \delta. \quad (4)$$

Здесь: $\delta = (\bar{x}_{jcp} - x_{jmin}) = (x_{jmax} - \bar{x}_{jcp})$ – интервал варьирования фактора.

Если x_j на нижнем уровне, то $x_i = -1$; если x_j на верхнем уровне, то $x_i = +1$; если x_j на среднем уровне, то $x_i = 0$.

Таблица 1

Матрица планирования для трех факторов

X0	X1	X2	X3	X1X2	X1X3	X2X3	X1X2X3
+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1
+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1
+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1
+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1
+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1
+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1
+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1
+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1

Таблица 2

Интервалы варьирования входных параметров модели функционирования электродвигателей ДК-211БМ, ДК -220, ДК – 821

Входные параметры	Напряжение на якоре U_a (В)	Момент статической нагрузки M_C (Нм)	Ток в цепи обмотки возбуждения I_B (А)
Кодовое обозначение	X1	X2	X3
Средний уровень	550	1520	1,37
Интервал варьирования	50	120	0,12
Верхний уровень	600	1640	1,5
Нижний уровень	500	1400	1,25

Таблица 3

План проведения и результаты исследования устойчивости функционирования электромеханических систем

Номер опыта	Планирование				Результат, устойчивое состояние		
	X0	X1 U_a (В)	X2 M_C (Нм)	X3 I_B (А)	y1 I_a (А)	y2 $M_{эм}$ (Нм)	y3 ω_a (рад/с)
1	+1	-1	-1	-1	15,64	24,17	175,6
2	+1	+1	-1	-1	15,64	27,17	175,6
3	+1	-1	+1	-1	15,64	24,17	175,6
4	+1	+1	+1	-1	15,38	28,52	178,8
5	+1	-1	-1	+1	16,16	24,96	175,7
6	+1	+1	-1	+1	16,16	24,96	175,7
7	+1	-1	+1	+1	15,91	29,49	178,9
8	+1	+1	+1	+1	15,91	29,49	178,9

План проведения и результаты исследования неустойчивости функционирования электромеханических систем

Номер опыта	Планирование				Результат, устойчивое состояние		
	X0	X1	X2	X3	y1	y2	y3
		Ua (В)	Mc (Нм)	Iв (А)	Ia (А)	Mэм (Нм)	ωa (рад/с)
1	+1	-1	-1	-1	15,18	23,45	175,6
2	+1	+1	-1	-1	15,18	23,45	175,6
3	+1	-1	+1	-1	15,09	27,98	178,8
4	+1	+1	+1	-1	15,09	27,98	178,8
5	+1	-1	-1	+1	15,33	23,69	175,7
6	+1	+1	-1	+1	15,33	23,69	175,7
7	+1	-1	+1	+1	15,25	28,28	178,9
8	+1	+1	+1	+1	15,26	28,51	178,9

Коэффициенты, определяющие степень влияния факторов на диагностический параметр, определяются по формуле

$$b_i = \frac{\sum_{j=1}^{2^k} y_i x_{ij}}{2^k}, \quad (5)$$

где b_i – коэффициент регрессии i -го фактора; y_i – значение диагностического параметра при i -м опыте; x_{ij} – кодированное значение i -го фактора в j -м опыте; k – число входных параметров.

На рис. 2 представлены графики моделирования переходного процесса исправного двигателя ДК-211БМ.

Ошибка эксперимента подсчитывается по формулам:

$$S_{bi} = \sqrt{\frac{S_{он}^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (y_{ij} - \bar{y}_i)^2}{nn_i(m-1)}}, \quad (6)$$

$$S_{он} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_i} \sum_{j=1}^{m_i} (y_i - \bar{y})^2 (m_i - 1)}{n_i \sum_{j=1}^m (m_i - 1)}}, \quad (7)$$

где \bar{y}_i – среднее арифметическое значение диагностического параметра y_i в повторном опыте; y_{ij} – значение диагностического параметра; m – количество повторений каждого опыта; n_i – количество опытов с повторениями.

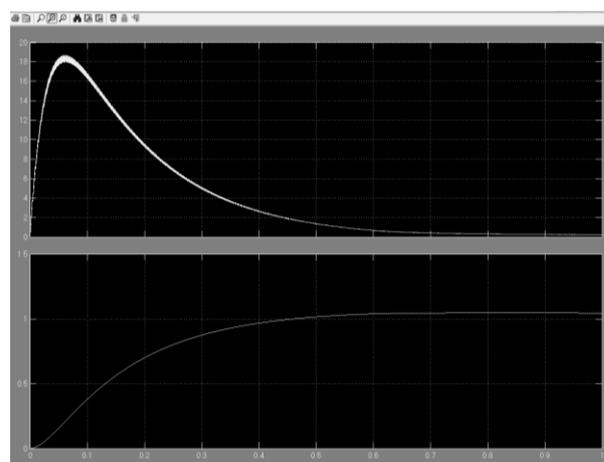


Рис. 2. График моделирования переходных процессов в работоспособном электродвигателе ДК-211БМ

Поскольку изменение выходных величин носит случайный характер, в каждой точке проводилось m опытов ($m=3$), результаты которых усреднялись.

Перед реализацией плана проведена рандомизация вариантов варьирования параметров с помощью таблицы равномерно распределенных случайных чисел.

После проведения эксперимента осуществлена проверка его воспроизводимости по критерию Кохрена G , позволяющему проверить гипотезу об однородности оценок дисперсий.

Критерий равен отношению наибольшей из дисперсий к сумме их всех [1, 3].

$$G = \frac{\max \{S_g^2\}}{\sum_{g=1}^{N_{\Phi}} S_g^2} \leq G_{кр}, \quad (8)$$

где S_g^2 – оценка дисперсии в каждой точке эксперимента; N – общее число сравнительных дисперсий.

$$y_1 = 15,85 - 0,033x_1 - 0,095x_2 + 0,023x_3 - 0,033x_1x_2 - 0,033x_1x_3 - 0,033x_2x_3 + 0,033x_1x_2x_3; \quad (9)$$

$$y_2 = 26,16 - 0,919x_1 + 1,301x_2 + 0,609x_3 + 0,169x_1x_2 - 0,919x_1x_3 + 0,96x_2x_3 - 0,169x_1x_2x_3; \quad (10)$$

$$y_3 = 177,25 - 1,6x_2 + 0,05x_3. \quad (11)$$

Таблица 5

Таблица обработки результатов эксперимента устойчивого состояния функционирования двигателей серии ДК – 211БМ

Номер опыта	y1	y2	y3	S_{y1}^2	S_{y2}^2	S_{y3}^2
1	15,64	24,17	175,6	0,449	7,344	2,723
2	15,64	27,17	175,6	0,449	7,344	2,723
3	15,64	24,17	178,8	0,578	3,312	2,403
4	15,38	28,52	178,8	0,578	3,312	2,403
5	16,16	24,96	175,7	0,27	6,101	2,403
6	16,16	24,96	175,7	0,27	6,101	2,403
7	15,91	29,49	178,9	0,36	4,494	2,723
8	15,91	29,49	178,9	0,348	5,523	2,723
\bar{y}_{cp}	15,85	26,16	177,25	0,412	5,441	2,563
$\sum S_{iy}^2$				3,302	43,531	20,504

Уравнения регрессии неустойчивого функционирования ТЭД имеют следующий вид (см. табл. 6):

$$y_1 = 15,214 - 0,00125x_1 - 0,041x_2 + 0,079x_3 + 0,00125x_1x_2 + 0,00125x_1x_3 + 0,00375x_2x_3 + 0,00125x_1x_2x_3. \quad (12)$$

$$y_2 = 25,85 + 2,28x_2 + 0,135x_3 + 0,015x_2x_3. \quad (13)$$

$$y_3 = 177,25 + 1,6x_2 + 0,05x_3. \quad (14)$$

Полученная модель оценки работоспособности электродвигателя ДК – 211БМ,

связывающая выходные параметры реакции системы (ток якоря I_a , электромагнитный момент $M_{эл}$, угловая скорость вращения якоря ω_a), может быть использована для построения автоматизированной системы контроля технического состояния электромеханических систем.

Таблица 6

Результаты эксперимента неустойчивого состояния функционирования двигателей серии ДК – 211БМ

№ опыта	y1	y2	y3	S_{y1}^2	S_{y2}^2	S_{y3}^2
1	15,18	23,45	175,6	0,0009	5,905	2,723
2	15,18	23,45	175,6	0,0009	5,905	2,723
3	15,09	27,98	178,8	0,014	4,41	2,403
4	15,09	27,98	178,8	0,014	4,41	2,403
5	15,33	23,69	175,7	0,014	4,796	2,403
6	15,33	23,69	175,7	0,014	4,796	2,403
7	15,25	28,28	178,9	0,0016	5,76	2,723
8	15,26	28,51	178,9	0,0025	6,917	2,723
\bar{y}_{cp}	15,21	25,88	177,25	0,01	5,36	2,56
$\sum S_{iy}^2$				0,0619	42,899	20,54

По полученным результатам исследования переходного процесса пуска электропривода, используя метод дискриминантных функций, можно определить, к какому классу следует отнести техническое состояние испытуемого ТЭД. Затем прини-

мается решение с учетом предыстории и технического состояния ТЭД о наиболее эффективном управляющем воздействии, чтобы предупредить возникновение опасных отказов и с целью повышения показателей надежности ТЭД.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гольдберг О.Д. Надежность электрических машин. / О.Д. Гольдберг, С.П. Хелемская. М.: Изд. центр «Академия», 2010. 288 с.
2. Герман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК / С.Г. Герман-Галкин. СПб.: Корона Век, 2011. 368 с.

3. Менщиков И.А. Эффективные методы автоматизации контроля технического состояния электромеханических систем / И.А. Менщиков. Саратов: ООО «Издательский Центр «Наука», 2014. 141 с.

Менщиков Игорь Александрович – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю. А.

Igor A. Menshikov – PhD, Associate Professor, Department of Power Supply for Industrial Facilities, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 14.09.16, принята к опубликованию 19.09.16

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

УДК 621.314

МНОГОМОДУЛЬНАЯ СИСТЕМА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ МНОГОПОСТОВОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ИНДУКЦИОННОЙ ПЛАВКИ МЕТАЛЛОВ

Ю.М. Голембиовский, А.А. Костерев

A MULTIPLE MODULE POWER SUPPLY SYSTEM IN MULTI- OPERATION COMPLEXES USED FOR INDUCTION MELTING OF METALS

Yu.M. Golembiovsky, A.A. Kosterev

Обоснован способ подключения индукционных печей в многопостовой системе к многомодульному источнику питания с использованием двунаправленных полупроводниковых ключей, что исключает взаимное влияние узлов коммутации постов и обеспечивает устойчивое функционирование системы питания в динамических режимах отключения печей. Разработана имитационная модель многомодульной системы электропитания многопостовой нагрузки, позволившая исследовать электромагнитные процессы в такой системе. Показано, что применение многомодульных систем электропитания многопостовых индукционных печей в 1,5–2 раза повышает срок эксплуатации силового оборудования.

Ключевые слова: инвертор, многомодульные источники питания, многопостовая нагрузка, индуктор, адаптация

Концепция модульности источников питания позволяет с новых позиций подойти к построению многопостовых комплексов для индукционной плавки металлов. Возможность адаптации структуры источника к изменяющимся в широких пределах параметрам нагрузки в виде стохастически включаемых индукционных печей открывает перспективу создания экономичных и

The article demonstrates a method of connecting induction furnaces in multi-operation systems to a power source using bidirectional semiconductor switches, and therefore eliminate the mutual influence of the switching nodes of posts, and ensure stable operation of power systems at dynamic furnace shutdown modes. The new simulation model for a multiple module power supply system to a multiple operator load allowed us to investigate the electromagnetic processes of the given system. The article shows that utilization of multiple module power supply systems to multiple operator induction furnaces increases the operation life of the power equipment by 1.5–2 times.

Keywords: inverter, multiple module power sources, multiple operator load, inductor, adaptation

надежных систем энергообеспечения литейных производств [1–4].

Следует в то же время отметить, что для создания указанных систем требуется решить целый ряд задач, основными из которых являются:

– модернизация схмотехники одноключевых резонансных инверторов с целью исключения взаимного влияния модулей при изменении количества подклю-

чаемых и отключаемых печей в процессе плавки [5];

– исследование динамики электромагнитных процессов, возникающих при перестройке структуры системы электропитания с целью выяснения условий и требований, обеспечивающих надежное функционирование всего комплекса;

– оценка эффективности применения многомодульных источников питания (МИП) многопостовых плавильных систем (МПС) с точки зрения экономии ресурса работоспособности всей системы электропитания индукционных печей [1].

Основной идеей ныне существующих МПС является подключение постов к одному источнику питания, который может содержать в своем составе один или не-

сколько инверторов. Каждый из таких инверторов подключен к одной индукционной печи. Недостатком такого схемотехнического решения является необходимость строгого поддержания определенного временного сдвига технологических циклов плавки в каждой из печей относительно друг друга для того, чтобы суммарная мощность, потребляемая нагрузкой, не превосходила номинальную мощность источника. Это приводит к ограничению по мощности использования источника питания в случае нарушения синхронизации работы печей, а также по количеству одновременно подключенных индукторов.

Структурная схема многомодульной системы электропитания многопостовой нагрузки представлена на рис. 1.

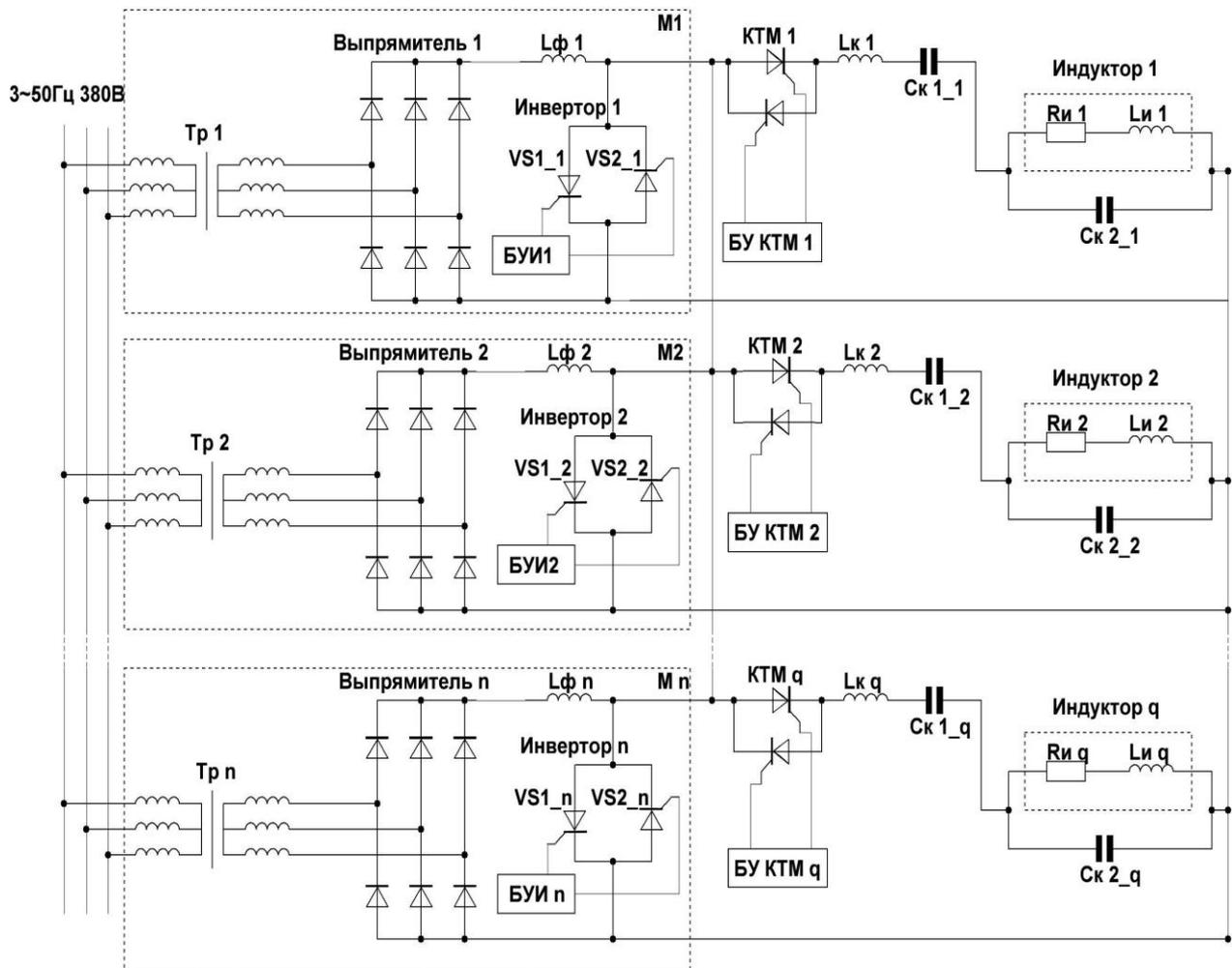


Рис. 1. Структурная схема МПК с многопостовым индукционным комплексом

В отличие от существующих схем количество модулей n в общем случае не равно количеству постов q . Подключение и отключение каждого индуктора осуществляется независимо от остальных в соответствии с технологическим циклом литейного производства.

Особенностями схемотехники МПК являются:

1. Последовательный коммутирующий LC-контур ($L_{K1}, C_{K2_1} .. (L_{Kq}, C_{K2q})$) включен в цепь каждого поста, входящего в состав комплекса. В качестве устройства подключения индуктора к источнику питания применяется контактный тиристорный модуль (КТМ), представляющий собой встречно-параллельное соединение двух тиристоров. Блок управления (БУ) КТМ управляет моментами подключения индукторов к источнику питания. Выпрямитель выполнен на базе неуправляемого трехфазного диодного моста.

2. Схемотехническая модель автономного инвертора выполнена по несимметричной схеме с закрытым входом.

Чтобы исследовать электромагнитные процессы и оценить необходимый количественный состав модулей преобразовательного комплекса, рассмотрим имитационную модель четырехмодульного источника питания, нагруженного на четырехпостовую нагрузку. Отличительной особенностью подключения многопостовой нагрузки к инверторным модулям является применение вентильных контакторов, состоящих из двух встречно-параллельно включенных тиристоров и схемы управления.

Для поддержания в замкнутом состоянии контакторного модуля достаточно сохранять положительный потенциал на управляющем электроде тиристоров, входящих в его состав, на всем протяжении работы инвертора. Таким образом, при появлении на аноде тиристора напряжения,

превышающего пороговое значение $U_{вкл}$, осуществляется его естественное включение. При отрицательной полуволне анодного напряжения происходит автоматическое выключение тиристора.

С целью компенсации реактивной составляющей мощности индукторов, а также для обеспечения резонансного режима работы инверторов используется последовательно-параллельное соединение коммутирующих конденсаторов. Коэффициент мощности индуктора $\cos \varphi$ в процессе плавки из-за изменений электрофизических параметров (ЭФП) каждой индукционной печи изменяется в пределах от 0,38 при максимальных параметрах нагрузки до 0,14 при нагреве металла выше точки Кюри и падении его магнитной проницаемости до единицы.

Расчеты показывают (таблица), что в зависимости от изменения параметров нагрузки и состава подключенных постов ток инвертора может изменяться в 9,45 раза. При этом минимальный ток инвертора обеспечивается подключением к источнику питания одного индуктора, когда его ЭФП соответствуют точке перехода магнитной проницаемости металла через точку Кюри, а максимальный – в момент одновременного включения всех постов с максимальными ЭФП, соответствующие температуре металла в печи ≈ 500 °С.

Учитывая такое значительное изменение тока инвертора, предлагается применение модульной структуры источника. Исследование электромагнитных процессов, протекающих в системе «многомодульный источник питания – многопостовая нагрузка», проводилось для случая последовательного подключения четырех индукционных печей к четырехмодульному источнику (рис. 2).

Изменение тока инвертора при многопостовой нагрузке

	$\text{ЭФП}_{нагр.} = \max$ (подключены 4 поста)	$\text{ЭФП}_{нагр.} = \min$ (подключен 1 пост)
$I_{инв}, \text{А}$	3260	345
$I_{инв.max} / I_{инв.min}$	9,45	

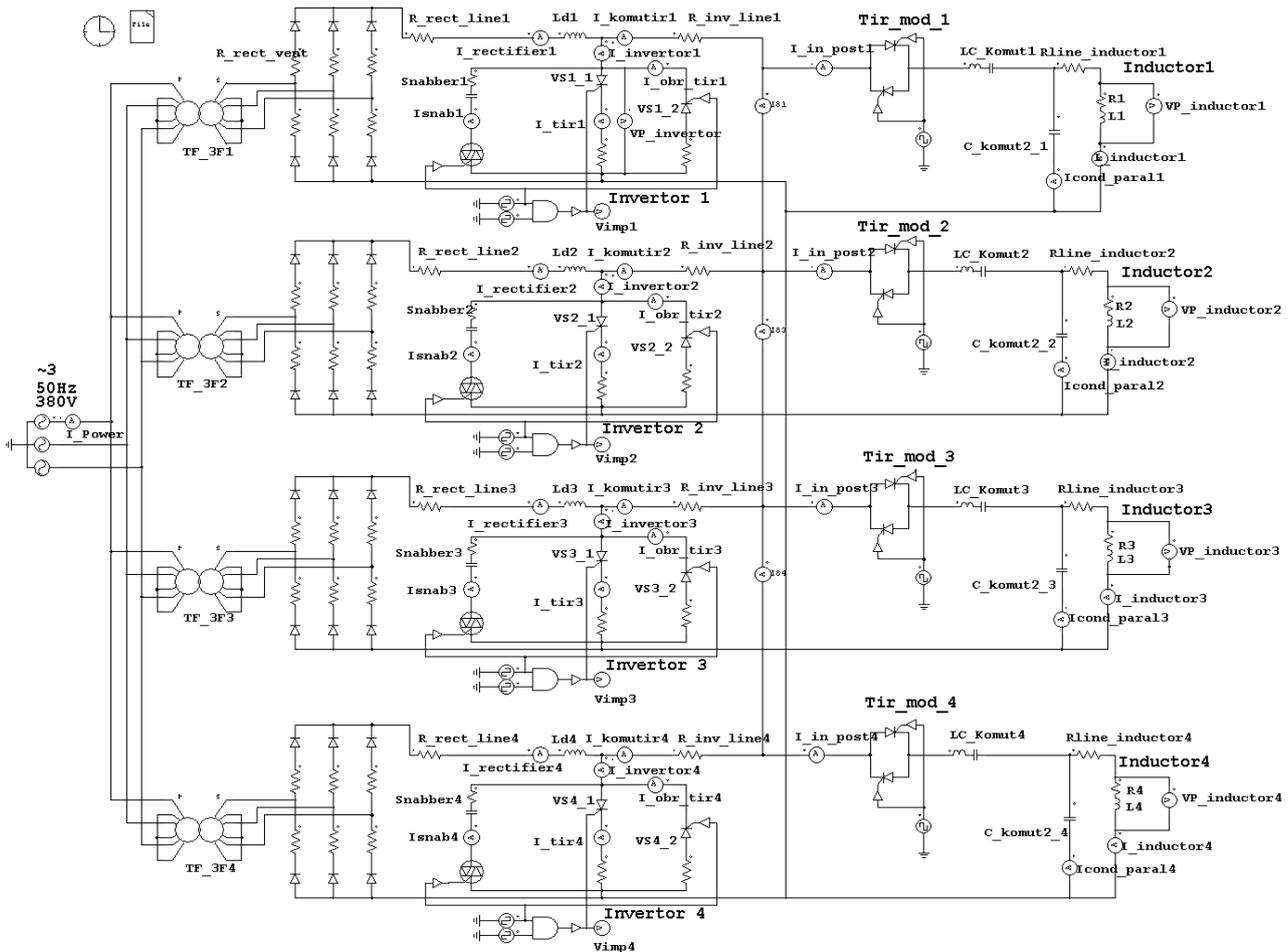


Рис. 2. Модель четырехмодульного преобразовательного комплекса, нагруженного на четырехпостовую нагрузку

Основным преимуществом организации многопостовой нагрузки в отличие от существующих систем является возможность независимого подключения отдельных постов к источнику питания, то есть момент их включения может меняться по стохастическому закону. В качестве примера в данной статье рассматривается случай, когда индукторы подключаются последовательно с интервалами времени относительно включения первого поста 7, 17, 24 мин. При этом соблюдаются следующие допущения: металл в индукторе представляет собой сплошной цилиндр; в точке Кюри (точка магнитных превращений) магнитная проницаемость нагреваемой шихты равняется единице; параметры индукторов и степень загруженности металлом одинаковы. На рис. 3 показаны

изменения ЭФП каждой из печи с течением времени, а также временной сдвиг моментов подключения постов к источнику питания (t_0, t_1, t_2, t_3).

Моменты t_4, t_5, t_6, t_7 обозначают время отключения индукторов. Расчет зависимости изменения ЭФП нагрузки от времени проводился исходя из опыта плавки на базе существующих систем. В среднем нагрев металла в печи типа ИСТ-0,16 осуществляется со скоростью 30 °С в минуту. Необходимо отметить, что данная зависимость, принятая во внимание при построении диаграммы (рис. 3), не влияет на характер выходных параметров работы комплекса и служит лишь для наглядного отображения процессов, происходящих в преобразовательном комплексе и нагрузке.

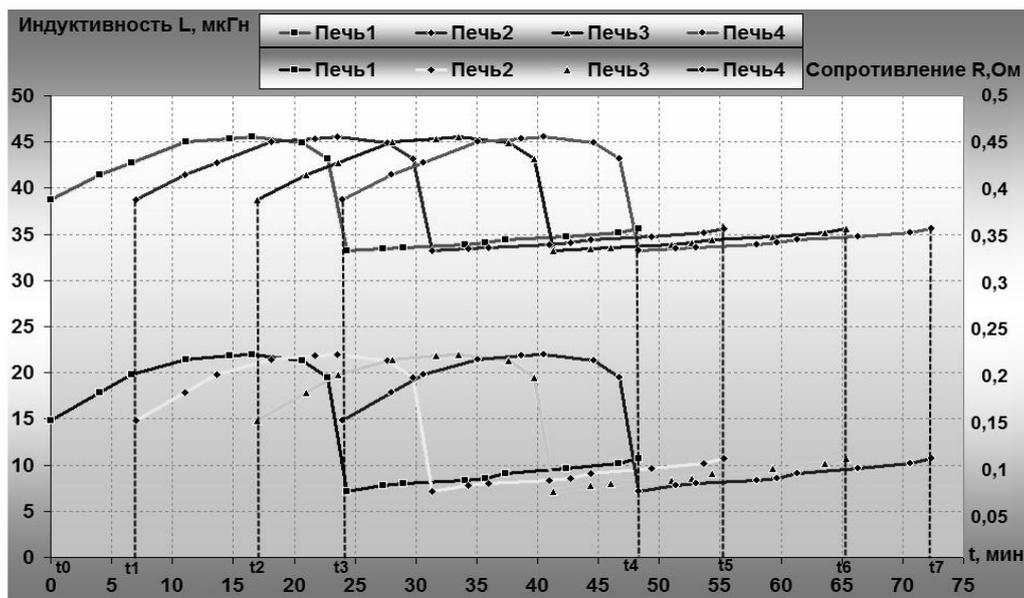


Рис. 3. Изменение ЭФП четырехпостовой нагрузки при сдвиге моментов включения отдельных индукторов

Учитывая особенности схемы источника питания, подключения нагрузки и коммутирующих элементов, поддерживать в каждой печи один из режимов индукционного нагрева (постоянства тока индуктора $I_{инд} = const$, постоянства напряжения на индукторе $U_{инд} = const$, постоянства мощности в индукторе $P_{инд} = const$) в чистом виде не представляется возможным. Это связано с тем, что ЭФП каждой печи в один и тот же момент времени могут отличаться, и при регулировании частотой управления выходного параметра в одном из индукторов в других постах этот параметр также будет изменяться. Поэтому в данном случае целесообразным является сохранение в процессе плавки заданной частоты управления модулями.

На рис. 4 показано изменение напряжения на индукторах в процессе перестройки нагрузки по вышеописанному закону. Максимальное отклонение напряжения не превосходит 5,4 % от среднего значения. В моменты $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7$ при изменении количества подключенных к источнику питания постов происходят

незначительные (в пределах 2 %) изменения напряжения на индукторах, оставшихся подключенными после перестройки.

Рассмотрим процесс подключения модуля с условием, что моменты подачи импульсов управления тиристорами инверторов синхронизированы. В этом случае не наблюдается неблагоприятных переходных процессов при перераспределении суммарного тока, отдаваемого работающими модулями. Выходное напряжение источников питания постов $VP_Invertor$ остается неизменным (рис. 5). Процесс изменения состава модулей источника питания в сторону уменьшения числа параллельно подключенных к нагрузке модулей также осуществляется без видимых признаков неблагоприятных переходных процессов (рис. 6). В очередной момент подачи импульсов управления на тиристоры один из инверторов остается не подключенным и с учетом принципа функционирования резонансных инверторов происходит плавное нарастание тока тиристоров, распределенного поровну между оставшимися в работе модулями.

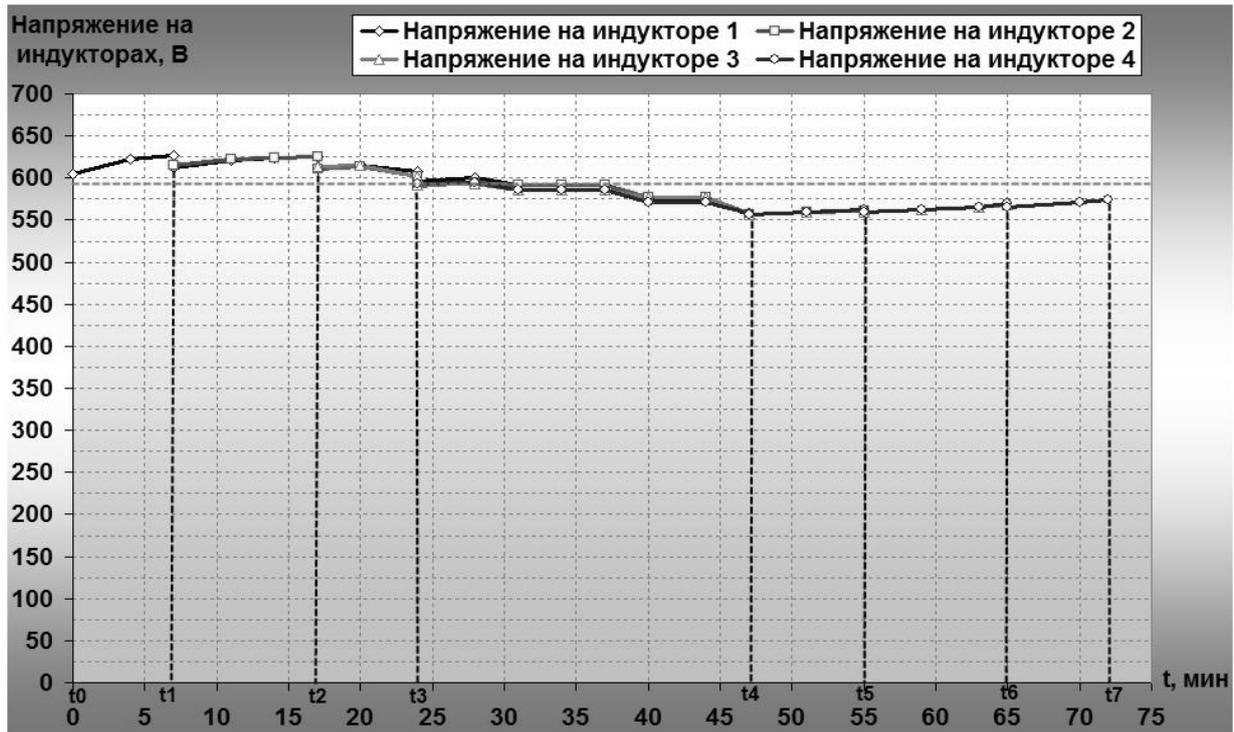


Рис. 4. Изменение напряжений на индукторах в процессе перестройки структуры нагрузки в режиме постоянства частоты управления инверторами

При этом напряжение на инверторах остается прежним и определяется величиной нагрузки. Исходя из амплитудного значения

напряжения ($U_{ампл.инв.}$) на инверторе выбираются тиристоры подходящего класса.

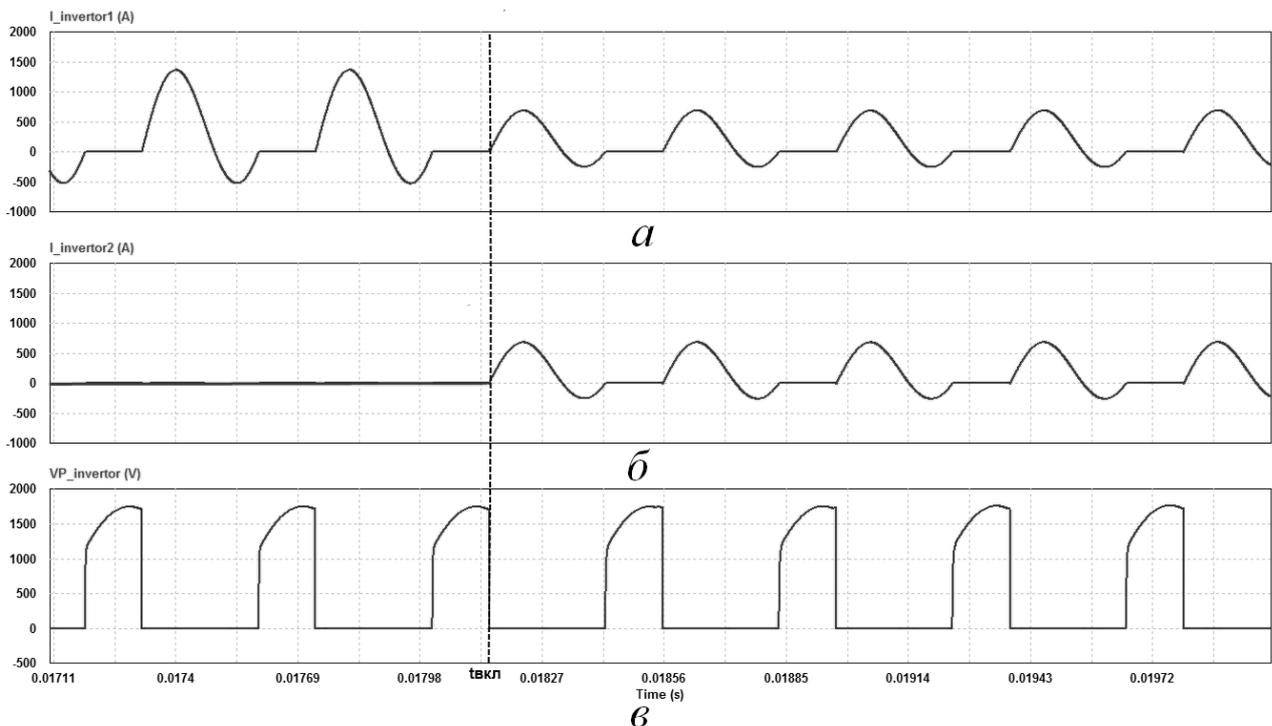


Рис. 5. Процесс подключения инвертора: *а* – ток работающего инвертора; *б* – ток подключаемого инвертора; *в* – напряжение на выходах инверторов

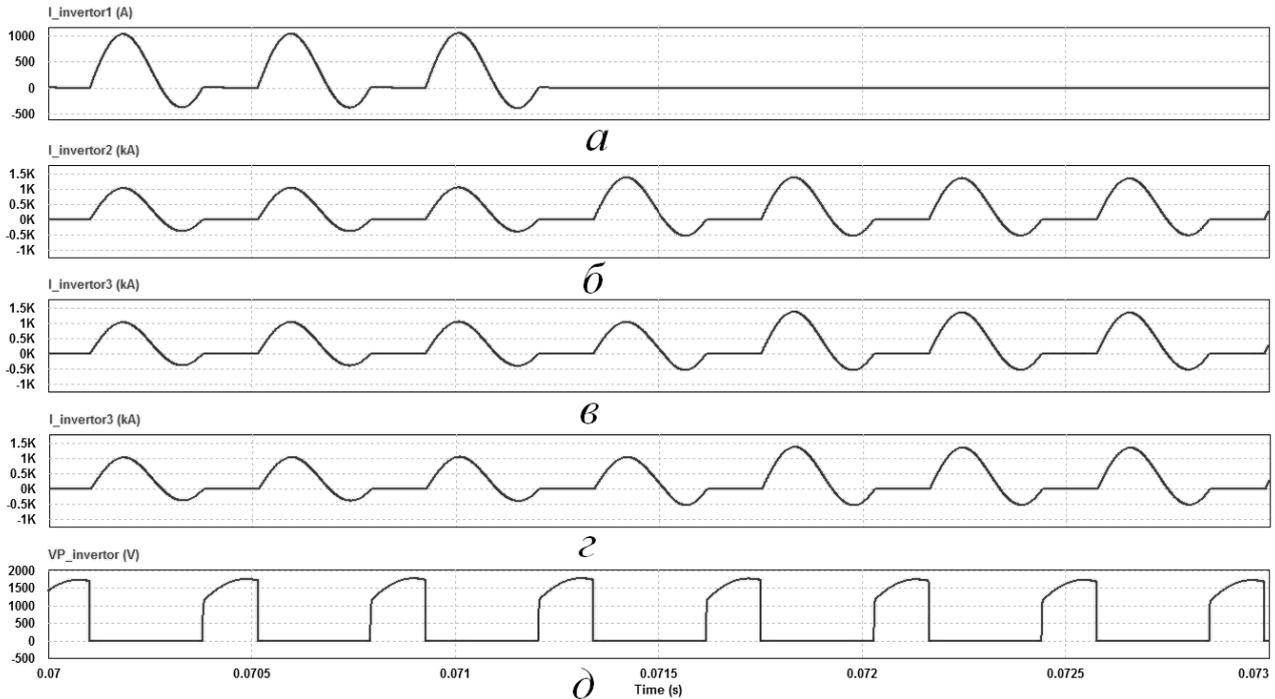


Рис. 6. Процесс отключения модуля: *а* – ток отключаемого инвертора; *б, в, г* – токи работающих инверторов; *д* – напряжение на инверторах

Согласно принятому ранее порядку подключения индукторов исследуем изменение $U_{ампл.инв}$. Напряжение каждого инвертора принимает ненулевое значение в моменты непроводящего состояния прямого и обратного тиристора – фаза нулевого тока инвертора. В зависимости от длительности этой фазы формируется форма кривой напряжения на выходе каждого модуля.

Так как частота управления остается неизменной, то изменение напряжения коррелирует с изменением периода колебаний тока инверторов, характеризующего изменение результирующей резонансной частоты многопостовой нагрузки (рис. 7). В течение всего времени плавки амплитуда напряжения изменяется в пределах 25%.

Оставляя в стороне известные достоинства модульной концепции, оценим, в какой степени применение модульной организации источника питания многопостовой нагрузки влияет на его срок эксплуатации. Другими словами, насколько возможность адаптации структуры системы электропитания к изменяющимся параметрам нагрузки позволяет экономить ресурс работоспособности силового оборудования.

С этой целью необходимо определить среднюю величину суммарной установленной мощности инверторов $P_{ср}$, используемых в течение времени многопостовой плавки. Будем ориентироваться на ту последовательность подключения индукционных печей, которая принята на рис. 3. Интервалы между соседними моментами подключения в целом соответствуют реальной эксплуатационной ситуации и включают время загрузки шихты и разлива металла.

Вычисление $P_{ср}$ может быть произведено по следующей формуле:

$$P_{ср} = \frac{\sum_{i=1}^k n_i \Delta P \tau_i}{T_{пл}} = \Delta P \frac{\sum_{i=1}^k n_i \tau_i}{T_{пл}}, \quad (1)$$

где i – номер интервала стационарного состояния топологии системы электропитания; k – количество интервалов; ΔP – установленная мощность одного модуля; n_i – количество включенных на параллельную работу модулей на i -м интервале; τ_i – длительность i -го интервала; $T_{пл}$ – общее время плавки в q -постовой системе.

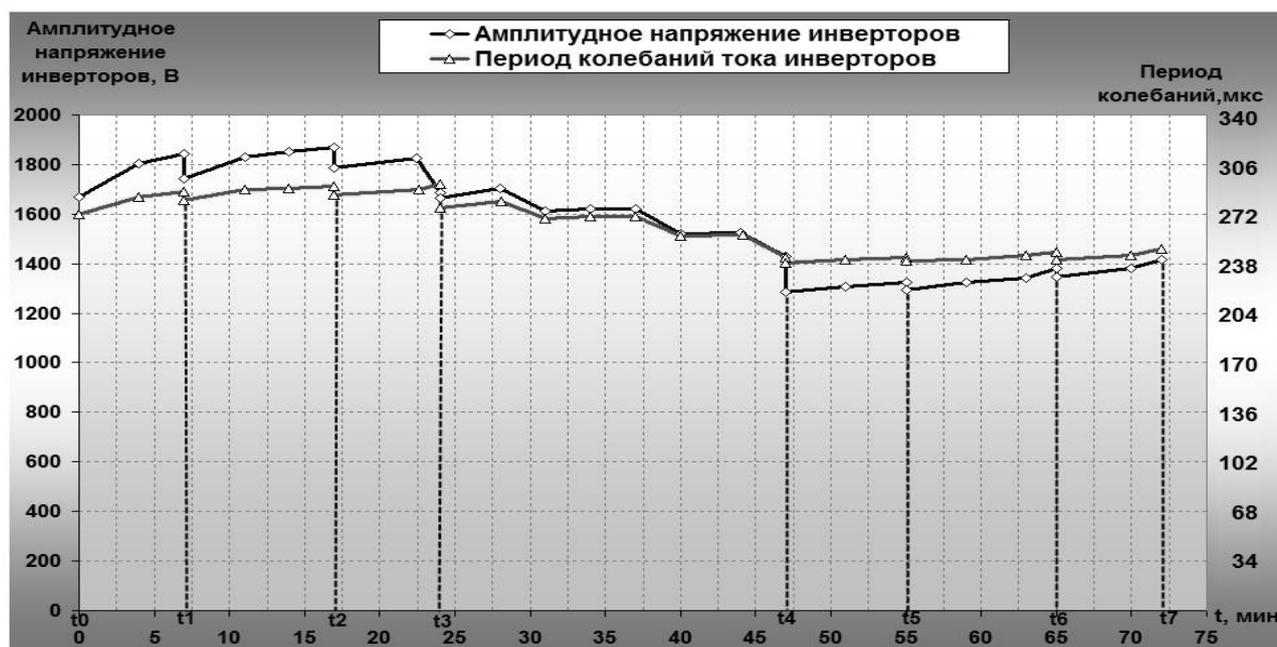


Рис. 7. Изменение амплитудного значения напряжения инверторов и периода колебаний тока инверторов в процессе плавки

Степень использования силового оборудования δ_n за период q -постовой плавки, как это следует из (1), равна

$$\delta_n = \frac{P_{\text{ср}}}{n \cdot \Delta P} = \frac{\sum_{i=1}^k n_i \tau_i}{n \cdot T_{\text{пл}}}, \quad (2)$$

где n – общее количество модулей преобразовательного комплекса.

Для четырехмодульной системы в соответствии с диаграммой изменения состава включаемых на параллельную работу инверторов, представленной на рис. 8, найдем, используя формулу (2), значение коэффициента δ_4 :

$$\delta_4 = \frac{\sum_{i=1}^9 n_i \tau_i}{4 \cdot 72} = \frac{194,98}{288} = 0,68.$$

Приведенные расчеты показывают, что при четырехмодульной системе питания на всем периоде плавки работают только 68 % инверторов. Заметим, что при одномодуль-

ной структуре источника питания индукционных печей этот единственный модуль работает в течение всего периода плавки, то есть его использование составляет 100 %.

Значения коэффициентов δ_m можно использовать для вычисления среднего времени непрерывной работы каждого модуля за период технологического цикла q -постовой плавки.

$$T_{\text{ср}} = \delta_m T_{\text{пл}}. \quad (3)$$

Применительно к рассматриваемой четырехпостовой нагрузке среднее время работы модуля при $T_{\text{пл}}=72$ мин для четырехмодульной системы электропитания равно

$$T_{\text{ср}4} = \delta_4 T_{\text{пл}} = 0,68 \cdot 72 = 48,96 \text{ мин.}$$

Следовательно, среднесуточная загрузка силовых приборов в многомодульных системах сокращается в 1,5-2 раза, что пропорционально увеличивает срок их эксплуатации.

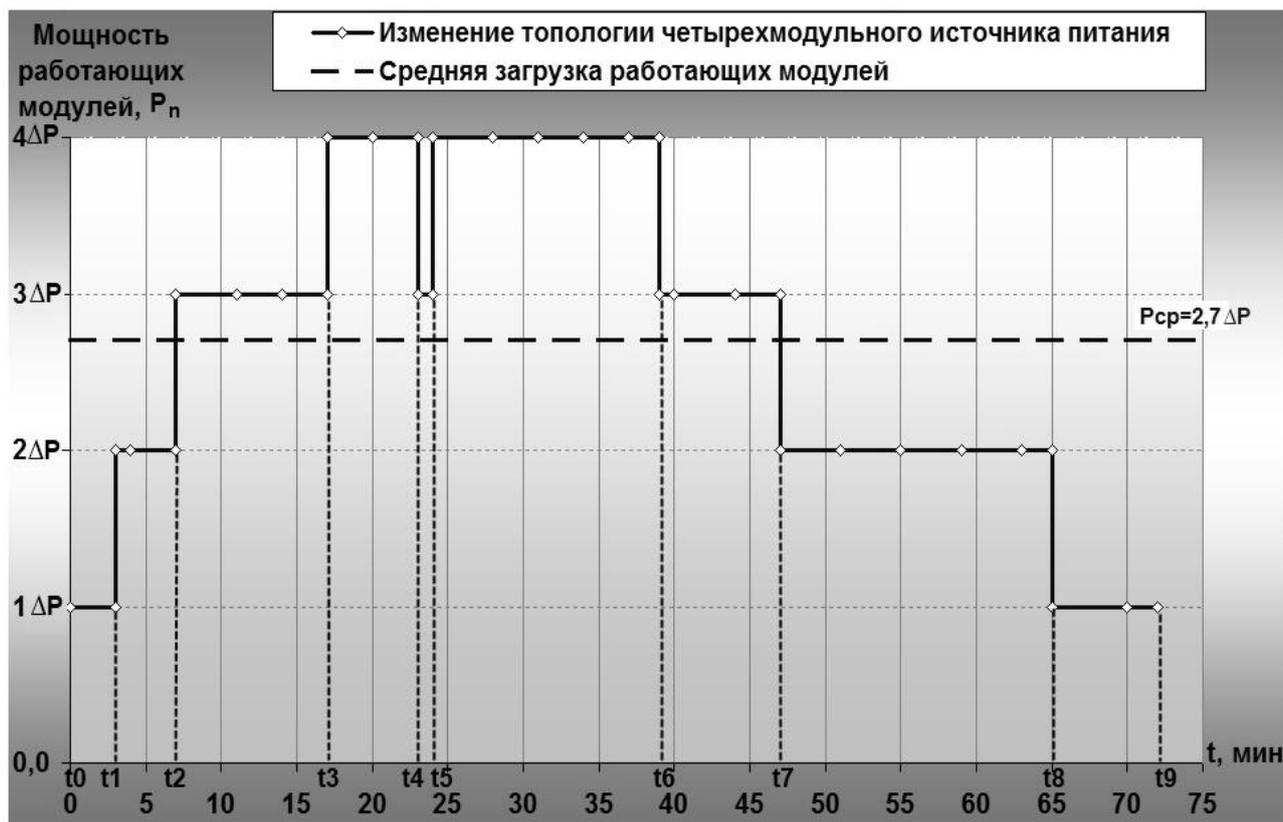


Рис. 8. Изменение мощности работающих модулей для случая четырехмодульного источника питания ($P_n = n_i \Delta P$)

ЛИТЕРАТУРА

1. Кантер И.И. Система централизованного электроснабжения на базе параллельно работающих преобразователей частоты / И.И. Кантер, Ю.Б. Томашевский, Ю.М. Голембиовский // Электричество. 1991. № 1. С. 39-47.

2. Голембиовский Ю.М. Модульность как средство повышения эффективности систем индукционного нагрева / Ю.М. Голембиовский, А.А. Костерев // Вестник СГТУ. 2011. Т. 4. № 4 (62). С. 144-149.

3. Голембиовский Ю.М. Система адаптивного управления многомодульным преобразовательным комплексом для индукционной плавки металлов / Ю.М. Го-

лембиовский, А.А. Костерев // Вестник СГТУ. 2013. Т. 3. № 1 (72). С. 102-107.

4. Голембиовский Ю.М. К вопросу об адаптации структуры многомодульного источника питания для индукционной установки / Ю.М. Голембиовский, А.А. Костерев, Н.Н. Беспалов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2013. № 2 (26). С. 101-109.

5. Голембиовский Ю.М. Исследование параллельной работы quarter-bridge инверторов для индукционной плавки металлов / Ю.М. Голембиовский, А.А. Костерев // Вестник СГТУ. 2012. Т. 2. № 2 (66). С. 49-54.

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

Yuri M. Golembiovsky – Dr.Sc., Professor, Department of Systems Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Костерев Андрей Александрович – аспирант кафедры «Системотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Andrey A. Kosterev – Postgraduate, Department of Systems Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 05.09.16, принята к опубликованию 19.09.16



ИЗМЕРЕНИЯ

УДК 620.197.5

СПОСОБ АДАПТИВНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА В ПРОЦЕССЕ ЕГО СТАБИЛИЗАЦИИ СРЕДСТВАМИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ПОДЗЕМНОГО СООРУЖЕНИЯ

А.А. Анашкин, Г.Г. Угаров

A METHOD FOR ADAPTIVE ESTIMATION OF POLARIZATION POTENTIAL STABILITY USING ELECTROCHEMICAL PROTECTION OF UNDERGROUND STRUCTURES

A.A. Anashkin, G.G. Ugarov

Описан способ измерения поляризационного потенциала, при реализации которого выбор времени задержки измерения осуществляется с учётом результатов измерения времени спада омической составляющей суммарного потенциала конкретного сооружения, применительно к которому предполагается проводить измерения потенциала. Приведены снимки потенциальной кривой, снятой цифровым осциллографом на реальном трубопроводе, отражающие графическую зависимость изменения во времени потенциала на вспомогательном электроде после его отключения от защищаемого сооружения.

Ключевые слова: станция для катодной защиты, защищаемое сооружение, вспомогательный электрод, естественный стационарный потенциал, поляризационный потенциал, время задержки измерения, омическая составляющая суммарного потенциала, время спада омической составляющей суммарного потенциала

Одним из факторов, существенно влияющих на эффективность электрохимической защиты от коррозии подземных ме-

This paper describes a method for estimating polarization potential, where the choice of estimation delay time is made taking into account the estimation results the fall time of the resistive component to the total capacity of a particular structure utilized for assessment of the potential. We provide pictures of the potential curve taken by the digital oscilloscope on the real pipeline. These pictures show the characteristic curve which determines the time behavior of the potential in the subsidiary electrode after it is disconnected from the protected the AP.

Keywords: cathodic protection station, protected structure, subsidiary electrode, natural stationary potential, polarization potential, estimation delay time, resistive element, fall time resistive component

таллических сооружений, является качество контроля поляризационного потенциала (ПП) защищаемого сооружения (ЗС).

Метод измерения ПП подробно описан во многих информационных источниках, например [1-3], и используется в серийных приборах для измерения параметров электрохимической защиты сооружений, например в приборах: «ПКИ-02», «Орион ИП-01», «ИПП-01 Менделеевец», «Мультиметр 43313», а также применяется в серийных станциях для катодной защиты с автоматическим управлением, например: «ПКЗ-АР», «СКЗ-ИП», «МПН-ОПЕ-М14», «НГК-ИПКЗ-Евро».

Суть метода измерения поляризационного потенциала в кратком его изложении заключается в периодическом подключении к ЗС вспомогательного электрода (ВЭ) с целью выравнивания их потенциалов и последующего измерения остаточного потенциала ВЭ через определённую временную задержку после отключения ВЭ от ЗС. Наличие временной задержки измерения (ВЗИ) в алгоритме измерения ПП позволяет исключить из результата измерения потенциала омическую составляющую (ОМС), которая не содержит полезной информации о степени защищённости сооружения от коррозии. ВЗИ должна превышать время, в течение которого ОМС спадает после отключения ВЭ от ЗС до уровня, не влияющего на качество измерения ПП.

Минимальная погрешность измерения ПП достигается, если момент измерения ПП максимально приближен к моменту окончания спада ОМС. Однако время спада ОМС зависит, как от параметров конкретного сооружения, так и от условий его эксплуатации, в том числе от состава и состояния окружающего сооружения грунта, что является причиной большого разброса значений, которые может принимать время спада ОМС в каждом конкретном случае. Следствием разброса значений времени спада ОМС является отклонение заданного ВЗИ при измерении ПП от оптимального значения, соответствующего конкретному сооружению и условиям его эксплуатации, что приводит к погрешности измерения ПП. Кроме этого, для грунта характерны существенные сезонные колебания его па-

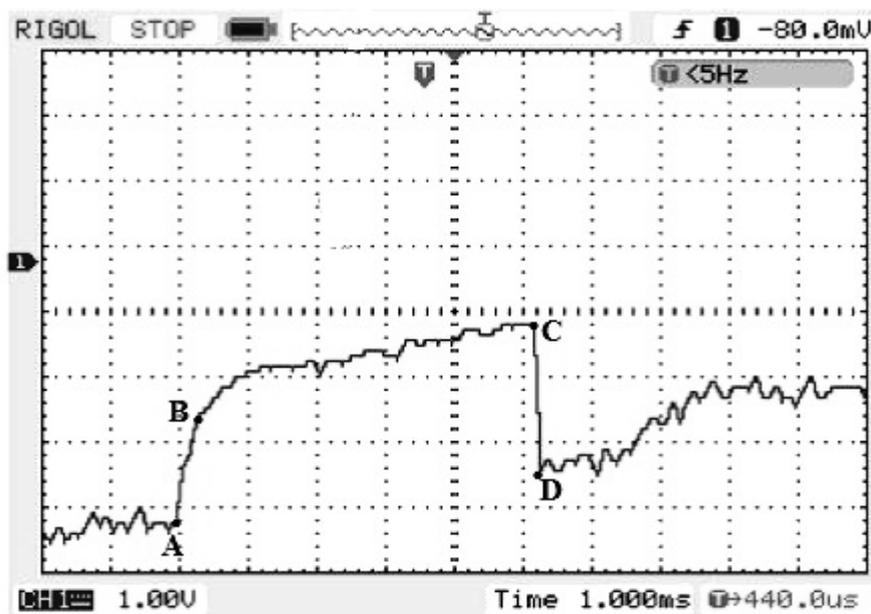
раметров, что накладывает на приведённое выше постоянное отклонение времени спада ОМС от среднестатистического значения ещё и изменяющуюся составляющую отклонения.

Так, в [1] приведены данные о времени спада ОМС порядка 10^{-8} с, но диапазон значений ВЗИ рекомендован до 10^{-3} с, в [4] приведены данные о значениях времени спада ОМС порядка 0.1 мс, в [3] приведён диапазон рекомендуемых значений ВЗИ от 0.2 мс до 1,6 мс, практически во всех серийных приборах измерения ПП («ПКИ-02», «Орион ИП-01», «ИПП-01 Менделеевец») используют диапазон значений ВЗИ: от 0.2 до 1,6 мс с дискретным набором значений ВЗИ: 0.2; 0,4; 0,8; 1.6 мс. В то же время измеренные на реальных трубопроводах авторами данной статьи значения времени спада ОМС не выходили за пределы диапазона 0,05-0,8 мс.

Из вышеизложенного следует очевидный вывод: выбор значения ВЗИ при измерении ПП для конкретного сооружения и конкретных условий его эксплуатации, основанный на среднестатистических данных, при отсутствии представления о реальном времени спада ОМС конкретного сооружения, на котором предполагается проводить измерения, то есть фактически «вслепую», обуславливает высокую погрешность измерения ПП.

Реальное представление об изменении потенциала ВЭ после его отключения от ЗС даёт осциллограмма. На рисунке приведён снимок потенциальной кривой, снятой цифровым осциллографом на реальном трубопроводе, отражающий графическую зависимость изменения во времени потенциала ВЭ после его отключения от ЗС.

Потенциал ВЭ уменьшается от значения поляризации до значения естественного стационарного потенциала сооружения, принятого для стали, равным $E_{ст} = -0,55$ В. Нулевое значение потенциала указано на осциллограмме маркером, снабжённым цифрой 1 и расположенным слева от вертикальной границы прямоугольного окна с изображением потенциальной кривой.



Осциллограмма изменения потенциала на вспомогательном электроде после его отключения от защищаемого сооружения (интервал А-С)

Точка А на потенциальной кривой соответствует моменту отключения ВЭ от ЗС, а точка С соответствует его подключению к ЗС. Более крутой участок потенциальной кривой А-В соответствует наличию в измеряемом потенциале, как омической, так и потенциальной составляющей, а более пологий её участок В-С соответствует наличию только потенциальной составляющей измеряемого потенциала. Участок С-Д соответствует возрастанию потенциала ВЭ до значения поляризации защищаемого сооружения после очередного его подключения к сооружению. Применительно к отображённой на рисунке потенциальной кривой время спада ОМС до уровня, при котором существенно снижено влияние ОМС на результат измерения ПП, составляет 0,2 мс, а время спада ОМС до уровня ничтожно малого по сравнению с результатом измерения ПП соответствует 0,8 мс. Исходя из этого, предпочтительным значением ВЗИ является значение 0,8 мс. Однако измерения с помощью осциллографа трудоемки, требуют определённой квалификации обслуживающего персонала и неприменимы в СКЗ с автоматическим управлением процесса стабилизации защитного потенциала.

Способ измерения ПП [5], позволяющий автоматически определить оптималь-

ное для конкретного сооружения и конкретных условий его эксплуатации значение ВЗИ при измерении ПП в процессе его стабилизации, заключается в циклическом чередовании двух стадий: «стадии инициализации» и «стадии измерения». В ходе «стадии инициализации» осуществляется измерение поляризационного потенциала с автоматической сменой ВЗИ во всем диапазоне возможных значений ПП. При этом в памяти контроллера, входящего в состав технического средства, обеспечивающего реализацию данного способа, сохраняется зависимость изменения текущего значения потенциала ВЭ от времени после его отключения от ЗС. Путём последовательных измерений крутизны поляризационной кривой определяется момент времени, соответствующий существенному уменьшению её крутизны (точка В на рисунке). После этого вычисляется интервал времени, начиная от момента отключения ВЭ от ЗС, (точка А на рисунке) до окончания времени спада ОМС (точка В на рисунке). Полученное значение времени спада ОМС используется для определения оптимального значения ВЗИ. Для конкретного примера, приведённого на рисунке, время спада ОМС имеет значение от 0.2 мс (существенное снижение ОМС) до 0.8 мс (окончательное

исчезновение ОМС), следовательно, оптимальным временем задержки измерения можно считать значение 0,8 мс. В ходе «стадии измерения» устройство для измерения ПП, реализующее описываемый способ, работает в штатном режиме измерения ПП, но с тем значением ВЗИ, которое было определено в ходе «стадии инициализации». При этом не имеет значения, в составе какого устройства используется описываемый способ измерения ПП, либо в составе прибора для контроля параметров электрохимической защиты сооружения, либо в составе СКЗ с автоматическим управлением. Время, в течение которого СКЗ работает с неизменной ВЗИ, выбранной в процессе проведения последней «стадии инициализации», определяет служба эксплуатации конкретного сооружения, которое защищает данная СКЗ.

Итак, описанный способ адаптивного измерения поляризационного потенциала при выборе временных параметров алгоритма измерения и в первую очередь вре-

мени задержки измерения ВЗИ базируется на результатах измерения и отслеживания во времени дополнительного критерия: времени спада омической составляющей суммарного потенциала ОМС конкретного сооружения, применительно к которому должны проводиться измерения. В результате такого подхода достигается возможность выбора значения ВЗИ, обеспечивающего минимальную погрешность измерения поляризационного потенциала, а отслеживание данного критерия во времени позволяет адаптивно изменять значение ВЗИ, компенсируя негативное влияние внешних воздействий.

Описанный способ в отличие от традиционного метода измерения ПП позволяет повысить достоверность результатов измерения поляризационного потенциала и обеспечить адаптивность временных параметров алгоритма измерения ПП к изменению, как параметров сооружения, так и условий его эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Стрижевский И.В.** Защита подземных теплопроводов от коррозии / И.В. Стрижевский, М.А. Сурис. М.: Энергоатомиздат, 1983. 308 с.

2. ГОСТ ИСО 9.602-2005. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии. Введ. 2005-06-25. М.: Изд-во стандартов, 2006.

3. Устройство для измерения потенциалов подземных трубопроводов: Патент РФ № 2 229 704, МПК (2006.1) G01N27/00 / И.Г. Кулаков, А.И. Логвинов, А. А. Енин; заявитель и патентообладатель ООО «Завод газовой аппаратуры «НС» –

№2002128305/282002128305/28; заявл. 21.10.2002; опубл. 27.05.2004; Бюл. № 15.

4. ВРД 39-1.10-026-2001. Методика оценки фактического положения и состояния подземных трубопроводов. Введ. 2001-01-29.-М.: ООО «ВНИИГАЗ», 2001. 3 гл., 3.3 разд.

5. Устройство для измерения потенциалов подземного сооружения: Патент РФ № 2 513 666, МПК (2006.1) G01R19/00. / А.А. Анашкин, В.В. Чулючкин; заявитель и патентообладатель г. Саратов, Анашкин А.А. – №2012121997/28; заявл. 28.05.2012; опубл.20.04.2014; Бюл. № 11.

Анашкин Анатолий Александрович – инженер Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

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

Anatoly A. Anashkin – Engineer, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

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

Статья поступила в редакцию 21.09.16, принята к опубликованию 26.09.16

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

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

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

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

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

Просьба направлять публикации по адресу:

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

Требования к оформлению публикаций

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

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

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

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

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

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

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

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

Публикации принимаются в течение всего года.

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

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

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

INFORMATION FOR AUTHORS

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

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

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

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

Please send the publication to the address:

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

Requirements for registration of publications

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

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

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

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

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

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

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

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

Publications are accepted throughout the year.

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

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

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

Редактор Л.А. Скворцова
Компьютерная верстка – Д.А. Вырыханов
Перевод на английский язык – А.Х. Аскарова

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

Подписано в печать 27.09.16
Формат 60×84 1/8 Бум. офсет.
Усл. печ. л.8,5 Уч. изд. л. 3,2
Тираж 500 экз. Заказ 97 Цена свободная
Отпечатано в Издательстве СГТУ, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77.
E-mail: izdat@sstu.ru
Полная электронная версия журнала размещена в системе РИНЦ
в открытом доступе на платформе eLIBRARY.RU
Подписной индекс 70841 (каталог «Газеты. Журналы» на 1-е полугодие 2016 г.)
Свидетельство о регистрации СМИ *ПИ № ФС77-54621 от 01.07.2013*

Editor L.A. Skvortsova
Computer-assisted layout by D.A. Virikhanov
Translation into English by A.H. Askarova

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

Print date: 27.09.2016
Paper size: 60×84 1/8 Offset-Print
Conventional printed sheet 8,5 Publication base sheet 3,2
Circulation: 500 printed copies Order 97 Subscription and individual copies: open rates
Published by SSTU Publishing, 410054 Saratov, 77 Politekhnikeskaya Str.
Online at www.eLIBRARY.RU
The certificate of media source registration: *PI No. FS77-54621 dated 1 July 2013*

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ»



22-23 сентября 2016 года в Саратовском государственном техническом университете имени Гагарина Ю.А. проводилась 12-я Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (АПЭП-2016). Организаторы конференции: Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи имени А.С. Попова, НПЦ «ЭлМа-Т» СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратовское отделение IEEE, МТТ/ED/AP/CPMT.

В рамках конференции работали секции:

- микроволновая электроника; вакуумная микроэлектроника и наноэлектроника;
- электродинамика и микроволновая техника;
- технологии производства электронных приборов, силовая электроника, прикладные аспекты электронного приборостроения.

Материалы конференции опубликованы в сборнике «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (АПЭП-2016), изданном в двух томах. В первом томе собраны доклады, представленные на первой и второй секциях, во втором томе – на третьей секции.

