

ВЕСТНИК
САРАТОВСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА
2006

№ 1 (10)
Выпуск 1

Научно-технический журнал

Издается с 2003 г.
Выходит один раз в квартал
Февраль 2006 г.

Журнал включен в перечень ведущих рецензируемых журналов и научных изданий, утвержденный президиумом ВАК Министерства образования и науки РФ, в которых публикуются основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора наук

Главный редактор д.т.н., профессор Ю.В. Чеботаревский
Зам. главного редактора д.э.н., профессор В.Р. Атоян
Ответственный секретарь д.т.н., профессор А.А. Игнатъев

Редакционный совет: д.э.н. В.Р. Атоян (заместитель председателя), д.т.н. В.И. Волчихин, д.т.н. В.А. Голенков, д.и.н. В.А. Динес, д.х.н. В. Зеленский (Польша), д.т.н. В.А. Игнатъев, д.т.н. В.В. Калашников, д.ф.-м.н. Л.Ю. Коссович, д.т.н. И.А. Новаков, д.т.н. А.Ф. Резчиков, д.т.н. Ю.В. Чеботаревский (председатель), д.ф.-м.н. Ян Аврейцевич (Польша), д.э.н. Улли Арнольд (Германия), д.ф.-м.н. Энтони Мерсер (Великобритания), д.э.н. Э. де Соуза Феррейра (Португалия), д.т.н. Т. Чермак (Чехия), д.э.н. Ю.В. Шленов.

Редакционная коллегия: д.т.н. К.П. Андрейченко, д.т.н. А.И. Андриющенко, д.т.н. Ю.С. Архангельский, д.ф.н. А.С. Борщов, д.т.н. А.С. Денисов, д.т.н. Ю.Г. Иващенко, д.т.н. Ю.Н. Климочкин, д.т.н. В.А. Коломейцев, д.т.н. А.В. Королев, д.т.н. В.А. Крысько, д.т.н. В.И. Лысак, д.т.н. В.Н. Лясников, д.т.н. В.М. Седелкин, д.социол.н. А.Ю. Слепухин, д.т.н. М.А. Щербаков.

Редактор Л.А. Скворцова
Компьютерная верстка Ю.Л. Жупиловой
Перевод на английский язык А.М. Руст

Адрес редакции:
Саратов, 410054, ул. Политехническая, 77
Телефон: (845 2) 52 74 02
E-mail: vestnik @ sstu. ru; vra @ sstu. ru
<http://dni.sstu.ru/vestnik.nsf>
Факс: (845 2) 50 67 40

Лицензия ИД № 06268 от 14.11.01
Подписано в печать 17.02.06
Формат 60×84 1/8 Бум. офсет.
Усл. печ. л. 19,0 Уч.-изд. л. 17,67
Тираж 500 экз. Заказ 76
Отпечатано в РИЦ СГТУ,
410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77

VESTNIK

Published by the Saratov
State
Technical University

2006

№ 1 (10)
Edition 1

Scientific Journal

Since 2003
Once in a quarter
February 2006

This journal is included into the list of the leading reviewed magazines and scientific periodicals approved by the Presidium of the HAC, Ministry of Education and Science of Russian Federation. Major scientific results of dissertations for the scientific degree competition, Doctor of Science, are published here.

Editor-in-chief	Doctor of Technical Sciences, Pr. Y.V. Chebotarevsky
Editor-in-chief assistant	Doctor of Economics, Pr. V.R. Atoyan
Executive secretary	Doctor of Technical Sciences, Pr. A.A. Ignatyev

Drafting committee: Pr. V.R. Atoyan (Vice of the Chairman), Pr. V.I. Volchihin, Pr. V.A. Golenkov, Pr. V.A. Dines, Pr. V. Zelensky (Poland), Pr. V.A. Ignatyev, Pr. V.V. Kalashnikov, Pr. L.Y. Kossovich, Pr. I.A. Novakov, Pr. A.F. Rezhnikov, Pr. Y.V. Chebotarevsky (the Chairman), Pr. Yan Avreytsevich (Poland), Pr. Ulli Arnold (Germany), Pr. Anthony Merser (UK), Pr. E. D'Sousa Ferreira (Portugal), Pr. T. Chermak (Czech Republic), Pr. Y.V. Shlenov.

Editorial board: Pr. K.P. Andreychenko, Pr. A.I. Andryushenko, Pr. Y.S. Arkhangelskiy, Pr. A.S. Borshov, Pr. A.S. Denisov, Pr. Y.G. Ivashenko, Pr. Y.N. Klimochkin, Pr. V.A. Kolomeitsev, Pr. A.V. Korolyov, Pr. V.A. Krysko, Pr. V.I. Lysak, Pr. V.N. Lyasnikov, Pr. V.M. Sedelkin, Pr. A.Y. Slepukhin, Pr. M.A. Sherbakov.

Editor L.A. Skvortsova
Computer-based page-proof J.L. Zhupilova
Rendering A.M. Rust

Editorial office: 77, Politechnicheskaya Street
Saratov, 410054
Russia
Telephone: +8452/52-74-02
E-mail: vestnik @ sstu. ru; vra @ sstu. ru
<http://dni.sstu.ru/vestnik.nsf>
Fax: +8452/50-67-40

Licence ID № 06268 of issue: 14.11.01
Signed for publishing: 17.02.06
Format 60×84 1/8 Paper offset.
Apr. tp. l. 19,0 Acc.-pbl. l. 17,67
Edition 500 psc. Order 76
Printed in EPC of SSTU,
77, Politechnicheskaya St., Saratov, 410054, Russia

СОДЕРЖАНИЕ

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Ильин В.С., Скляр А.Н. Стоячие электромагнитные волны без узлов и пучностей.....	5
Ильин В.С., Скляр А.Н. О сохраняемости векторных трубок электромагнитных полей.....	14
Артюхов И.И., Аршакян И.И., Коротков А.В., Погодин Н.В., Степанов С.Ф. Перестраиваемая по структуре автономная система электроснабжения технологического комплекса с многодвигательным электроприводом.....	20
Артюхов И.И., Аршакян И.И., Жабский М.В., Коротков А.В., Погодин Н.В., Тримбач А.А. Некоторые аспекты применения частотно-регулируемого электропривода в системах воздушного охлаждения компримированного газа.....	29
Мошкин В.И., Егоров А.А., Угаров Г.Г. Исследование режимов форсированного аккумулярования магнитной энергии в импульсных линейных электромагнитных двигателях	39
Егоров А.А., Угаров Г.Г., Вырыханов Д.А. Влияние предистории импульсного намагничивания магнитной системы линейного электромагнитного двигателя на энергетические показатели привода.....	44
Колесников Е.В. Системообразующие принципы проектирования и эксплуатации электротехнологического оборудования	50
Тригорлый С.В. Оптимизация термообработки диэлектриков в СВЧ камерах лучевого типа	58
Железняк А.Р., Коломейцев В.А., Комаров В.В. Метод решения внутренней краевой задачи электродинамики и теплопроводности для произвольных волноводных и резонаторных структур с частичным термодинамическим заполнением	66
Куриленко Е.А., Одуев В.В., Семенов А.Э. Собственные параметры и структура электромагнитного поля СВЧ резонаторов произвольной конфигурации.....	72
Комаров В.В., Коломейцев В.А. Электродинамические характеристики камеры СВЧ нагрева жидких сред на прямоугольном волноводе с Т-ребром	78
Колесников Е.В. Влияние внешней среды на эффективность электротермических установок	83
Калганова С.Г. Влияние СВЧ воздействия электромагнитного поля на кинетику отверждения эпоксидной смолы.....	90
Зимин Л.С., Федотов М.Е. Системный подход к проектированию индукторов.....	96
Кожевников В.Ю. Спекание керамических материалов в сверхвысокочастотном электромагнитном поле	99
Колесников Е.В. Фактор рыночной экономики в проектировании и эксплуатации электротехнологических установок	104
Головачев А.Л., Данилушкин А.И., Мишанин Е.А. Система индукционного нагрева для термообработки елочного паза дисков турбоагрегатов.....	108
Колесников Е.В. Программное обеспечение решения самосогласованной задачи технико-экономической оптимизации, синтеза электротехнологической установки и математического моделирования технологического процесса.....	113
Батищев А.М., Зиннатуллин Д.А., Крылов А.Н., Алымов А.И. Исследование и анализ процесса индукционного нагрева полистирола как объекта управления на основе численных экспериментов.....	117
Архангельский Ю.С., Тригорлый С.В. Разработка комплекса компьютерных программ для моделирования СВЧ технологических процессов и установок	123
Фоминых Е.В. Оптимизация схемы и параметров ИК пастеризатора.....	127
Доценко А.В. Оптимизация ущерба и резервирования при СВЧ диэлектрическом нагреве.....	131
Дунаева Т.Ю. Применение методов математического моделирования для оптимизации сушильных установок СВЧ диэлектрического нагрева	137
Фоминых Е.В. СВЧ пастеризатор молока	141
Скворцов А.А. СВЧ устройство на связанных прямоугольных и шестигранном волноводах для термообработки диэлектрических материалов.....	144
Горева Л.П., Кривова А.О. Инфразвуковое воздействие на персонал, обслуживающий дуговые сталеплавильные печи	148

CONTENTS

POWER ENGINEERING AND ELECTRICAL ENGINEERING

Il'in V.S., Sklyar A.N. Standing electromagnetic waves without nodes and crests.....	5
Il'in V.S., Sklyar A.N. About the retentivity of vector tubes of electromagnetic fields	14
Artjukhov I.I., Arshakyan I.I., Korotkov A.V., Pogodin N.V., Stepanov S.F. Off-line reconfigurable system of power supply of the technological complex with the multimotor electric drive.....	20
Artjukhov I.I., Arshakyan I.I., Zhabskiy M.V., Korotkov A.V., Pogodin N.V., Trimbach A.A. Some aspects of application of the controlled-velocity electric drive in air cooling systems of compressed gas.....	29
Moshkin V.I., Egorov A.A., Ugarov G.G. Forced accumulation of magnetic energy modes research in pulsed linear electromagnetic engines.....	39
Egorov A.A., Ugarov G.G., Vyrykhanov D.A. Electromechanical conversion of the pulsed linear electromagnetic engine caused by the influence of magnetic hysteresis	44
Kolesnikov E.V. Self-generated principles of designing and electrotechnological equipment operation.....	50
Trigorliy S.V. Dielectrics thermal treatment optimization in a beam type microwave chambers	58
Zheleznyak A.R., Kolomeytsev V.A., Komarov V.V. Internal boundary electrodynamic and heat conduction problem solution method for arbitrary shaped waveguide and resonator systems with partial thermoparametric filling	66
Kurilenko E.A., Oduv V.V., Semenov A.E. Proper parameters and electromagnetic field patterns of arbitrary shaped microwave resonator	72
Komarov V.V., Kolomeytsev V.A. Electrodynamic characteristics of microwave applicator for heating of liquid media on rectangular T-septum waveguide.....	78
Kolesnikov E.V. Environment influence on electrothermal installations efficiency.....	84
Kalганova S.G. Electromagnetic field microwave influence on kinetic polymerizations epoxide pitches	90
Zimin L.S., Fedotov M.E. The inductors projecting system concept.....	96
Kozhevnikov V.Y. Microwave electromagnetic sintering of ceramic solids	100
Kolesnikov E.V. Market economy factor in electrotechnological installations designing and operation	104
Golovachev A.L., Danilushkin A.I., Mishanin E.A. The induction heating system of the turboset disc herring-bone groove thermal treatment	108
Kolesnikov E.V. Self-coordinated problem decision software of technical and economic optimization, synthesis of electrotechnological installation and mathematical modelling of technological process	113
Batishev A.M., Zinnatullin D.A., Krilov A.N., Alimov A.U. Process analysis of a polystyrene induction heating as a control object based on numerical experiments	117
Arkhangelskiy Y.S., Trigorliy S.V. Computer programs development for microwave model operation procedure and installations.....	123
Fominyh E.V. Optimization of IR-pasteurizer scheme and parameters.....	127
Dotsenko A.V. Damage and reservation optimization at the microwave dielectric heating	131
Dunaeva T.Y. Mathematical modelling method application for optimization of microwave-drying plants	137
Fominyh E.V. Microwave milk pasteurizer	141
Skvortsov A.A. A microwave device on coupled rectangular and hexagonal waveguides for thermal processing of dielectric materials.....	144
Goreva L.P., Krivova A.O. Infrasonic influence on the personnel serving arc steel furnace	148

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 621.372

В.С. Ильин, А.Н. Скляр

СТОЯЧИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ БЕЗ УЗЛОВ И ПУЧНОСТЕЙ

Показана возможность существования и реализации одномерных одночастотных стоячих волн без узлов и пучностей.

V.S. Il'in, A.N. Sklyar

STANDING ELECTROMAGNETIC WAVES WITHOUT NODES AND CRESTS

The opportunity of existence and realization of one-dimensional single-frequency standing waves without nodes and crests is shown here.

Традиционное описание стоячих электромагнитных волн сводится к рассмотрению суперпозиции векторных полей $\vec{E} = \vec{E}^I + \vec{E}^II = \vec{n}_x^0 (\vec{E}^I(z,t) + \vec{E}^II(z,t))$, $\vec{H} = \vec{H}^I + \vec{H}^II = \vec{n}_y^0 (\vec{H}^I(z,t) + \vec{H}^II(z,t))$, двух встречных плоских, плоскополяризованных бегущих волн *I* и *II*, с равными частотами и амплитудами. Как известно, в этом случае в плоскостях $z_{2n} = z_0 + 2n\lambda/4$ будут располагаться пучности ($\max|\vec{E}|\rangle$), а в плоскостях $z_{2n+1} = z_0 + (2n+1)\lambda/4$ – узлы ($|\vec{E}| = 0$) напряжённости электрического поля ($n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$). Соответственно, в z_{2n} будут узлы ($|\vec{H}| = 0$), а в z_{2n+1} – пучности ($\max|\vec{H}|\rangle$) напряжённости магнитного поля.

В электродинамике поверхности, на которых тангенциальные компоненты вектора \vec{E} обращаются в ноль, принято называть Э-стенками, а поверхности обнуления тангенциальных компонент вектора \vec{H} – М-стенками. В обсуждаемой стоячей волне, очевидно, плоскости z_{2n+1} будут Э-стенками, а плоскости z_{2n} – М-стенками.

Электрические стенки без возмущения поля допускают «материализацию» хорошо проводящими металлами. Вводя в плоскостях z_{2n+1} и $z_{2n'+1}$ ($n \neq n'$) проводящие «зеркала», можно пространственно ограничить объём электромагнитного поля. Это эквивалентно рассмотрению одномерного по z резонатора с двумя плоскими зеркалами, промежуток между которыми $L = |n - n'|\lambda/2 = 2|n - n'|\lambda/4$ равен чётному числу четвертей длины волны.

Переход к резонаторной системе фактически означает рассмотрение уже не волновых, а колебательных состояний поля. По этой причине исторически принятый термин «стоячие волны» (одномерные или, в обобщённом подходе, двумерные и трёхмерные) нельзя признать удачным.

Возможность легко реализуемого пространственно-ограниченного «удержания» поля плоской, плоскополяризованной стоячей волны двумя плоскоизотропными ЭЭ-зеркалами, по-видимому, затормозила появление более расширенных представлений о возможных типах стоячих волн. Во всяком случае в учебной и научной литературе под «стоячими волнами» обычно понимаются узлопучностные полевые образования. В настоящей статье демонстрируется возможность существования и реализации одномерных одночастотных стоячих волн без узлопучностного пространственного распределения.

1. Винтовые бегущие волны

Рассмотрим в бездисперсной среде с проницаемостями ε и μ электромагнитное поле с напряжённостями

$$E_x(z,t) = E_0 \sin \Phi(z,t), \quad E_y(z,t) = -spE_0 \cos \Phi(z,t), \quad E_z(z,t) = 0, \quad (1)$$

$$H_x(z,t) = s\sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}}E_0 \cos \Phi(z,t), \quad H_y(z,t) = p\sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}}E_0 \sin \Phi(z,t), \quad H_z(z,t) = 0, \quad (2)$$

где $\Phi(z,t) = \Theta(z,t) + \Theta_0 = (pkz - \omega t) + \Theta_0$ – фазовый аргумент; $k(\omega) = \omega\sqrt{\varepsilon\mu}$ – волновое число ($\omega > 0, \varepsilon > 0, \mu > 0$); $p = \pm 1, s = \mp 1$.

Векторы (1) и (2) удовлетворяют уравнениям Максвелла:

$$\text{rot } \vec{E}(z,t) = -\mu \frac{\partial \vec{H}(z,t)}{\partial t}, \quad \text{rot } \vec{H}(z,t) = +\varepsilon \frac{\partial \vec{E}(z,t)}{\partial t}, \quad \text{div } \varepsilon \vec{E}(z,t) = 0, \quad \text{div } \mu \vec{H}(z,t) = 0. \quad (3)$$

Выражения (1) и (2) описывают бегущую волну круговой (циркулярной) поляризации. При индексе направления движения $p=+1$ волна распространяется в направлении оси z , а при $p=-1$ – против z . В случае $s=+1$ в произвольной фиксированной плоскости наблюдения $z=\text{const}$ вращение взаимно ортогональных векторов \vec{E} и \vec{H} ($(\vec{E}, \vec{H})=0$), при «взгляде навстречу волне», будет происходить по часовой стрелке, а при $s=-1$ – против часовой стрелки.

При начальных условиях $z=0$ и $t=0$, вектор (1) принимает вид

$$E_x(z=0, t=0) = E_0 \sin \Theta_0, \quad E_y(z=0, t=0) = -spE_0 \cos \Theta_0, \quad E_z(z=0, t=0) = 0. \quad (4)$$

Электрический вектор (1) представим как результат действия на вектор (4) унитарной вещественной матрицы поворота вокруг оси z на угол $sp\Theta(z,t) = sp(pkz - \omega t)$:

$$\begin{aligned} & \left[\begin{array}{cc|c} \cos sp\Theta(z,t) & -\sin sp\Theta(z,t) & 0 \\ \sin sp\Theta(z,t) & \cos sp\Theta(z,t) & 0 \\ \hline 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \cdot \begin{bmatrix} E_0 \sin \Theta_0 \\ -spE_0 \cos \Theta_0 \\ 0 \end{bmatrix} = \\ & = \begin{bmatrix} E_0 \sin(\Theta(z,t) + \Theta_0) \\ -spE_0 \cos(\Theta(z,t) + \Theta_0) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_0 \sin \Phi(z,t) \\ -spE_0 \cos \Phi(z,t) \\ 0 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (5)^*$$

Унитарная матрица поворота на угол $sp\Theta(z,t) = sp(pkz) + (-sp\omega t)$, представима в виде произведения двух унитарных коммутирующих матриц $\begin{bmatrix} \hat{T} \\ \end{bmatrix}$ и $\begin{bmatrix} \hat{Z} \\ \end{bmatrix}$ поворотов на углы $(-sp\omega t)$ и $sp(pkz) = skz$, т.е. в виде

* Здесь ввиду $sp = \mp 1$ имеют место соотношения $\cos sp\Theta = \cos \Theta$, $\sin sp\Theta = sp \sin \Theta$.

$$\begin{aligned}
 & \left[\begin{array}{cc|c} \cos sp\Theta(z,t) & -\sin sp\Theta(z,t) & 0 \\ \sin sp\Theta(z,t) & \cos sp\Theta(z,t) & 0 \\ \hline 0 & 0 & 1 \end{array} \right] = \\
 & = \left[\begin{array}{cc|c} \cos(-sp\omega t) & -\sin(-sp\omega t) & 0 \\ \sin(-sp\omega t) & \cos(-sp\omega t) & 0 \\ \hline 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \cdot \left[\begin{array}{cc|c} \cos skz & -\sin skz & 0 \\ \sin skz & \cos skz & 0 \\ \hline 0 & 0 & 1 \end{array} \right] = \\
 & = \left[\hat{T}(-sp\omega t) \right] \cdot \left[\hat{Z}(skz) \right] = \left[\hat{Z}(skz) \right] \cdot \left[\hat{T}(-sp\omega t) \right]. \quad (6)
 \end{aligned}$$

Унитарный оператор \hat{T} , ответственный за развитие электрического поля во времени, следует определить как эволюционный. В плоскости наблюдения $z=\text{const}$ \hat{T} поворачивает вектор \vec{E} на угол $(-sp\omega t)$ с угловой скоростью $\vec{\omega} = -\vec{n}_z^0 sp\omega$ ($\omega > 0$).

При действии унитарного оператора поворота \hat{Z} на начальный вектор (4), имеем

$$\left[\begin{array}{cc|c} \cos skz & -\sin skz & 0 \\ \sin skz & \cos skz & 0 \\ \hline 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \cdot \left[\begin{array}{c} E_0 \sin \Theta_0 \\ -spE_0 \cos \Theta_0 \\ 0 \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} E_0 \sin(pkz + \Theta_0) \\ -spE_0 \cos(pkz + \Theta_0) \\ 0 \end{array} \right]. \quad (7)$$

Результат (7) указывает на пространственное вращение \vec{E} на угол, равный параметру z -осевого сдвига pkz .

Это означает, что E -поверхность поляризации является винтовой (шнековой) поверхностью. Ввиду $\cos pkz = \cos kz$, $\sin pkz = p \sin kz$ характер винтовой поверхности зависит только от индекса спиральности $s = \mp 1$. В правой системе координат (x, y, z) , значение $s = +1$ определяет правовинтовую, а $s = -1$ – левовинтовую поверхности поляризации \vec{E} .*

Действие матричного оператора $\left[\hat{T} \right] \cdot \left[\hat{Z} \right]$ на начальный магнитный вектор

$$H_x = s \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} E_0 \cos \Theta_0, \quad H_y = p \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} E_0 \sin \Theta_0, \quad H_z = 0, \quad (8)$$

приводит к (2). Вектор \vec{H} также будет поляризован по винтовой поверхности, ортогональной, ввиду $\vec{H} \perp \vec{E}$, к винтовой E -поверхности. Электромагнитную волну с поляризованными по винтовым поверхностям векторами напряжённостей (1) и (2) иногда называют бегущей винтовой электромагнитной волной [1]. Если необходимо подчеркнуть ещё и геометрический характер поверхностей фронтов, то применяют термин «постоянная, поляризованная по винтовой поверхности (по винту) волна». Использование термина «винтовая волна» физически целесообразно, ибо в нём подчеркиваются внутренние поляризационные свойства волны – её винтовая симметрия, спиральности s . Действительно, поскольку векторы \vec{E} и \vec{H} находятся на линиях пересечения $\vec{E} \div \vec{H}$ винтовых поверхностей поляризации с плоскостями фазовых фронтов, при непрерывном последовательном прохождении со скоростью $\vec{v}_{\text{фаз}} = \vec{n}_z^0 v_{\text{фаз}}$ фазовых фронтов через выбранную плоскость наблюдения $z=\text{const}$ в последней, как уже отмечалось, будут наблюдаться вращения с угловой скоростью $\vec{\omega} = -\vec{n}_z^0 sp\omega$. Подоб-

* При графическом построении функций $\vec{E} = \vec{n}_x^0 E_x(z,t) + \vec{n}_y^0 E_y(z,t)$ и $\vec{H} = \vec{n}_x^0 H_x(z,t) + \vec{n}_y^0 H_y(z,t)$ необходимо использовать правую систему ортогональных декартовых координат, в которой и записаны уравнения Максвелла (3). Выбор правой системы координат удобно производить по правилу «правой руки»: большой палец – по x , указательный – по y , средний – по z .

ное вращение векторов \vec{E} и \vec{H} в плоскости $z=\text{const}$ можно «организовать» и на плоской, плоскополяризованной волне, если вращать линейно-поляризованный источник излучения относительно оси z со скоростью $\vec{\omega}$.

Таким образом, традиционный термин «плоская, поляризованная по кругу волна», введённый «по способу наблюдения», а не на основе учёта внутренней симметрии волнового объекта, может приводить не только к неоднозначностям в логическом описании, но и к затруднениям в идентификации результатов соответствующих наблюдений.

Важным, непосредственно устанавливаемым из (1) и (2) свойством напряжённостей $\vec{E}(z,t)$ и $\vec{H}(z,t)$ винтовых волн является их подчинение условиям:

$$\text{rot } \vec{E} + sk\vec{E} = 0, \quad \text{rot } \vec{H} + sk\vec{H} = 0, \quad (9)$$

т.е. \vec{E} и \vec{H} являются собственными функциями оператора rot , с собственными значениями $(-sk)$.

Очевидно, «обычные» уравнения второго порядка Гельмгольца

$$\nabla^2 \vec{E} + k^2 \vec{E} = 0, \quad \nabla^2 \vec{H} + k^2 \vec{H} = 0, \quad (k^2 = \omega^2 \epsilon \mu), \quad (10)$$

можно получить из (9), повторно действуя на них оператором rot , с использованием тождества $\text{rot rot} \equiv \text{grad div} - \nabla^2$ при $\text{div } \vec{E} = 0, \text{div } \vec{H} = 0$. Сравнение (9) с уравнениями Максвелла (3) приводит к важным соотношениям между электрическими и магнитными векторами винтовых волн:

$$\vec{E} = +s \frac{\partial \vec{H}}{\partial \omega t}, \quad \vec{H} = -s \frac{\partial \vec{E}}{\partial \omega t}, \quad (11)$$

где $\vec{E} = \sqrt{\epsilon/2} \vec{E}$, $\vec{H} = \sqrt{\mu/2} \vec{H}$.

2. Плотности энергии, потока энергии и импульса поля бегущей винтовой волны

Для определения плотностей электрической, магнитной и полной электромагнитной энергий поля (1), (2) будем использовать классические рекомендации*:

$$w_E(\vec{r}, t) = \frac{\epsilon}{2} \vec{E}^2(\vec{r}, t), \quad w_H(\vec{r}, t) = \frac{\epsilon}{2} \vec{H}^2(\vec{r}, t), \quad w(\vec{r}, t) = w_E(\vec{r}, t) + w_H(\vec{r}, t). \quad (12)$$

Подстановка (1) и (2) в (12) приводит к равенству $w_E = w_H$:

$$w_E = \frac{\epsilon}{2} E_x^2 + \frac{\epsilon}{2} E_y^2 = \frac{\epsilon}{2} E_0^2 \sin^2 \Phi(z, t) + \frac{\epsilon}{2} E_0^2 \cos^2 \Phi(z, t) = w_E^x(z, t) + w_E^y(z, t) = \frac{\epsilon}{2} E_0^2, \quad (13)$$

$$w_H = \frac{\mu}{2} H_x^2 + \frac{\mu}{2} H_y^2 = \frac{\epsilon}{2} E_0^2 \cos^2 \Phi(z, t) + \frac{\epsilon}{2} E_0^2 \sin^2 \Phi(z, t) = w_H^y(z, t) + w_H^x(z, t) = \frac{\epsilon}{2} E_0^2. \quad (14)$$

Для определения скорости движения энергетических плотностей рассмотрим линии уровня функции $w_E^x(z, t)$, определяемые условием

* В [2, 3] приведены следующие формулы для плотностей энергии: $w_E^{vv'} = \epsilon_{vv'} \left((\vec{E}^v, \vec{E}^{v'}) + \left(\frac{\partial \vec{E}^v}{\partial \omega_v t}, \frac{\partial \vec{E}^{v'}}{\partial \omega_{v'} t} \right) \right)$, $w_H^{vv'} = \epsilon_{vv'} \left((\vec{H}^v, \vec{H}^{v'}) + \left(\frac{\partial \vec{H}^v}{\partial \omega_v t}, \frac{\partial \vec{H}^{v'}}{\partial \omega_{v'} t} \right) \right)$, в которых $\vec{E}^v = \sqrt{\epsilon(\omega_v)/2} \cdot \vec{E}^v$, $\vec{H}^v = \sqrt{\mu(\omega_v)/2} \cdot \vec{H}^v$, $\epsilon_{vv'} = \begin{cases} 1/2, & v = v' \\ 1, & v \neq v' \end{cases}$, v – индекс, нумерующий выбор волны.

Эти формулы отвечают современным кинематическим требованиям описания консервативных динамических систем. Заметим, что для векторов $\vec{E}^v = \vec{E}^{v'} = \vec{E} = \sqrt{\epsilon/2} \cdot \vec{E}$, $\vec{H}^v = \vec{H}^{v'} = \vec{H} = \sqrt{\mu/2} \cdot \vec{H}$ винтовой волны использование этих формул приводит к результату (13), (14).

$$w_E^x(z, t) = a. \quad (15)$$

Выбор численного значения постоянной a параметризует конкретную линию уровня.

Очевидно, что через любую точку (z, t) проходит соответствующая ей линия уровня с соответствующим значением a .

Полный дифференциал от (15) равен нулю:

$$dw_E^x(z, t) = \frac{dw_E^x(z, t)}{d\Phi(z, t)} d\Phi(z, t) = \frac{dw_E^x(z, t)}{d\Phi(z, t)} \left(\frac{\partial\Phi(z, t)}{\partial z} dz + \frac{\partial\Phi(z, t)}{\partial t} dt \right) = 0. \quad (16)$$

Отсюда для скорости движения фазовых фронтов имеем

$$v_E^x = v_{\text{фаз}} = \frac{dx}{dt} = -\frac{\partial\Phi}{\partial t} / \frac{\partial\Phi}{\partial z} = p \frac{\omega}{k} = p \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} = p \frac{c}{n}, \quad (17)$$

где $1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0} = c$ – скорость света в вакууме, $n = \sqrt{\epsilon\mu/\epsilon_0\mu_0}$ – показатель преломления.

Как видно, скорость $v_{\text{фаз}}$ оказалась постоянной и не зависящей от численного выбора a .

Интегрируя $v_{\text{фаз}} = dz/dt$, получаем уравнение для линий уровня в виде

$$z = vt + b = p \frac{\omega}{k} t + b. \quad (18)$$

Постоянная интегрирования b , параметризующая линии уровня, связана с a соотношением

$$a = w_E^x(z, t) = \frac{\epsilon}{2} E_0^2 \sin^2 \left(pk \cdot p \frac{\omega}{k} t + kb - \omega t + \Theta_0 \right) = \frac{\epsilon}{2} E_0^2 \sin^2(kb + \Theta_0). \quad (19)$$

Конкретный числовой выбор b соответствует одной определённой линии уровня – прямой на плоскости $w_E^x(z, t) = a$, координатного пространства (z, t, w_E^x) (см. рис. 1). Из рисунка видно, что при изменении параметра движения t происходит перемещение функции $w_E^x(z, t)$ вдоль оси z (или против z – при $(p = -1)$) с постоянной скоростью $\vec{v} = \vec{n}_z^0 v_{\text{фаз}}$.

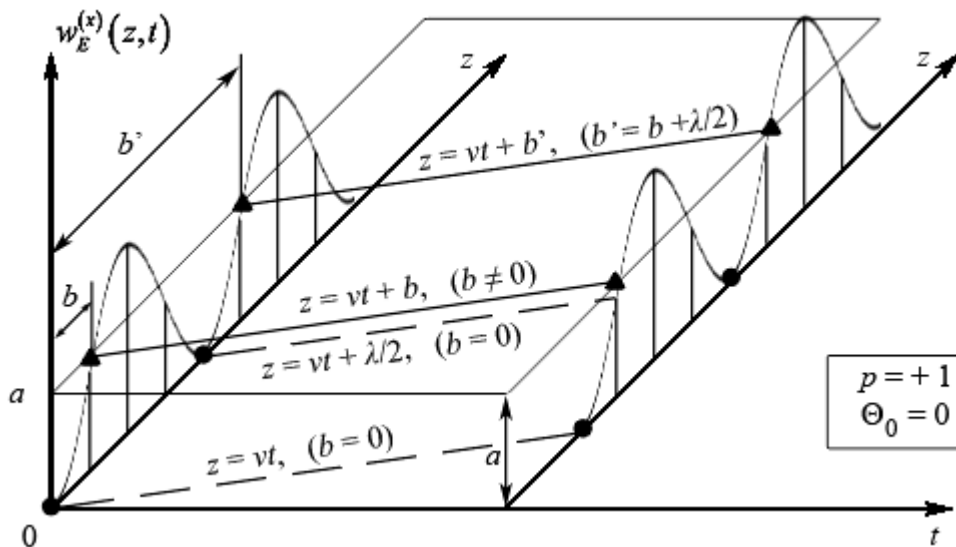


Рис. 1

Аналогично устанавливаем, что $w_E^y = (\epsilon/2)E_0^2 \cos^2 \Phi(z, t)$ движется по z с такой же скоростью \vec{v} . К такому же результату приводит и рассмотрение слагаемых $w_H^x(z, t)$ и

$w_H^y(z, t)$ плотности магнитной энергии $w_H(z, t)$. Это означает, что постоянные плотности w_E и w_H в (13) и (14) движутся с фазовой скоростью $\vec{v} = \vec{n}_z^0 p(\omega/k) = \vec{n}_z^0 p(c/n)$. С этой же скоростью перемещается и функция полной плотности энергии электромагнитного поля винтовой волны $w = w_E + w_H = \varepsilon E_0^2$.

Таким образом, в бездисперсном приближении найденная скорость $\vec{v} = \vec{n}_z^0 v_{\text{фаз}}$ является скоростью движения электромагнитной энергии.

Кинематически правильное определение плотности импульса [3, 4] формулируется

$$\vec{J} = \vec{v} \frac{w}{c^2}, \quad (20)$$

где $w/c^2 = \sigma$ – массовая плотность поля.

Соответствующее (20) определение плотности потока энергии записывается

$$\vec{S} = \vec{v} w. \quad (21)$$

Для поля бегущей винтовой волны из (20) и (21) находим

$$\vec{J} = \left(\vec{n}_z^0 p \frac{c}{n} \right) \frac{\varepsilon E_0^2}{c^2}, \quad \vec{S} = \left(\vec{n}_z^0 p \frac{c}{n} \right) \varepsilon E_0^2. \quad (22)$$

Рассмотрим классический вектор Пойнтинга от полей (1)-(2):

$$\vec{\Pi} = (\vec{E} \times \vec{H}) = \vec{n}_z^0 p \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} E_0^2 = \left(\vec{n}_z^0 p \frac{c}{n} \right) \varepsilon E_0^2. \quad (23)$$

Как видно из (22) и (23), $\vec{\Pi} = \vec{S}$. Это означает, что для рассматриваемого конкретного поля, описываемого (1) и (2), использование вектора Пойнтинга приводит к кинематически правильной зависимости между плотностью энергии и плотностью её потока.

3. Стоячая винтовая волна

Рассмотрим теперь простейший пакет $\vec{E} = \vec{E}^I + \vec{E}^II$ и $\vec{H} = \vec{H}^I + \vec{H}^II$, составленный из двух бегущих винтовых волн I и II, напряжённости полей которых описываются соотношениями:

$$\begin{aligned} E_x^I &= E_0^I \sin \Phi^I, & E_x^{II} &= E_0^{II} \sin \Phi^{II}, \\ E_y^I &= -s_I p_I E_0^I \cos \Phi^I, & E_y^{II} &= -s_{II} p_{II} E_0^{II} \cos \Phi^{II}, \\ E_z^I &= 0, & E_z^{II} &= 0, \\ H_x^I &= s_I \sqrt{\frac{\varepsilon_I}{\mu_I}} E_0^I \cos \Phi^I, & H_x^{II} &= s_{II} \sqrt{\frac{\varepsilon_{II}}{\mu_{II}}} E_0^{II} \cos \Phi^{II}, \\ H_y^I &= p_I \sqrt{\frac{\varepsilon_I}{\mu_I}} E_0^I \sin \Phi^I, & H_y^{II} &= p_{II} \sqrt{\frac{\varepsilon_{II}}{\mu_{II}}} E_0^{II} \sin \Phi^{II}, \\ H_z^I &= 0, & H_z^{II} &= 0, \end{aligned} \quad (24)$$

где $\Phi^I = p_I k^I z - \omega_I t + \Theta_0^I$, $k^I = \omega_I \sqrt{\varepsilon(\omega_I) \mu(\omega_I)}$; $\Phi^{II} = p_{II} k^{II} z - \omega_{II} t + \Theta_0^{II}$, $k^{II} = \omega_{II} \sqrt{\varepsilon(\omega_{II}) \mu(\omega_{II})}$.

Будем рассматривать встречные волны, для которых

$$p_I = +1, \quad p_{II} = -1$$

$$\omega_I = \omega_{II} = \omega, \quad \varepsilon_I = \varepsilon_{II} = \varepsilon, \quad \mu_I = \mu_{II} = \mu, \quad k^I = k^{II} = k = \omega \sqrt{\varepsilon \mu}, \quad (25)$$

$$s_I = s_{II} = s, \quad E_0^I = E_0^{II} = E_0, \quad \Theta_0^I = \Theta_0^{II} = \Theta_0.$$

В этом случае напряжённости полных пакетных электрических и магнитных полей, удовлетворяющих уравнениям Максвелла (3), запишутся

$$\begin{aligned}
 E_x &= E_x^I + E_x^{II} = 2E_0 \cos kz \cdot \sin(-\omega t + \Theta_0), \\
 E_y &= E_y^I + E_y^{II} = s2E_0 \sin kz \cdot \sin(-\omega t + \Theta_0), \\
 E_z &= E_z^I + E_z^{II} = 0, \\
 H_x &= H_x^I + H_x^{II} = s2E_0 \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} \cos kz \cdot \cos(-\omega t + \Theta_0), \\
 H_y &= H_y^I + H_y^{II} = 2E_0 \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} \sin kz \cdot \cos(-\omega t + \Theta_0), \\
 H_z &= H_z^I + H_z^{II} = 0.
 \end{aligned} \tag{26}$$

Рассмотрим плотности энергий от пакетных полей \vec{E} и \vec{H} :

$$\begin{aligned}
 w_E &= \frac{\varepsilon}{2} (\vec{E}^I + \vec{E}^{II})^2 = \frac{\varepsilon}{2} (\vec{E}^I)^2 + \frac{\varepsilon}{2} (\vec{E}^{II})^2 + \varepsilon (\vec{E}^I, \vec{E}^{II}) = w_E^I + w_E^{II} + w_E^{I,II}, \\
 w_H &= \frac{\mu}{2} (\vec{H}^I + \vec{H}^{II})^2 = \frac{\mu}{2} (\vec{H}^I)^2 + \frac{\mu}{2} (\vec{H}^{II})^2 + \mu (\vec{H}^I, \vec{H}^{II}) = w_H^I + w_H^{II} + w_H^{I,II}.
 \end{aligned} \tag{27}$$

Плотность взаимной электромагнитной энергии встречных волн I и II равна нулю:

$$w^{I,II} = w_E^{I,II} + w_H^{I,II} = \varepsilon E_0^2 \cos(\Phi^I - \Phi^{II}) + (-\varepsilon E_0^2 \cos(\Phi^I - \Phi^{II})) = 0. \tag{28}$$

Поэтому полная плотность $w = w_E + w_H$ электромагнитной энергии поля двух встречных односпиральных винтовых волн будет суммой только полных плотностей собственных энергий $w^I = w_E^I + w_H^I = \varepsilon E_0^2$ и $w^{II} = w_E^{II} + w_H^{II} = \varepsilon E_0^2$ этих волн:

$$w = w^I + w^{II} = 2\varepsilon E_0^2. \tag{29}$$

Плотности импульсов \vec{J}^I и \vec{J}^{II} волн I и II записываются

$$\vec{J}^I = \vec{v}^I \cdot \frac{w^I}{c^2} = \vec{n}_z^0 \frac{c}{n} \cdot \frac{\varepsilon E_0^2}{c^2}, \quad \vec{J}^{II} = \vec{v}^{II} \cdot \frac{w^{II}}{c^2} = -\vec{n}_z^0 \frac{c}{n} \cdot \frac{\varepsilon E_0^2}{c^2}. \tag{30}$$

Из (30) следует равенство нулю полной плотности импульса пакетного электромагнитного поля двух встречных винтовых волн:

$$\vec{J} = \vec{J}^I + \vec{J}^{II} = 0. \tag{31}$$

Соответственно, для полной плотности потока энергии имеем

$$\vec{S} = \vec{S}^I + \vec{S}^{II} = \vec{v}^I \cdot w^I + \vec{v}^{II} \cdot w^{II} = \vec{n}_z^0 \frac{c}{n} \cdot \varepsilon E_0^2 + \left(-\vec{n}_z^0 \frac{c}{n} \cdot \varepsilon E_0^2 \right) = 0. \tag{32}$$

Равенство нулю полной плотности импульса и полной плотности потока энергии пакетного электромагнитного поля двух встречных винтовых односпиральных волн означает, что рассматриваемое поле является полем стоячей волны.

Запишем выражение для вектора Пойнтинга от пакетного поля (24):

$$\begin{aligned}
 \vec{\Pi} &= (\vec{E} \times \vec{H}) = ((\vec{E}^I + \vec{E}^{II}) \times (\vec{H}^I + \vec{H}^{II})) = (\vec{E}^I \times \vec{H}^I) + (\vec{E}^{II} \times \vec{H}^{II}) + ((\vec{E}^I \times \vec{H}^{II}) + (\vec{E}^{II} \times \vec{H}^I)) = \\
 &= \vec{\Pi}^I + \vec{\Pi}^{II} + \vec{\Pi}^{I,II}.
 \end{aligned} \tag{33}$$

Непосредственной подстановкой полей (24) в (33), при учёте (25), убеждаемся, что

$$\vec{\Pi}^{I,II} = 0, \quad \vec{\Pi}^I = \vec{S}^I \quad \text{и} \quad \vec{\Pi}^{II} = \vec{S}^{II}. \tag{34}$$

Тогда из (32) устанавливаем равенство нулю полного вектора Пойнтинга для поля стоячей волны:

$$\vec{\Pi} = (\vec{E} \times \vec{H}) = 0. \quad (35)$$

Результат (35) можно получить и из непосредственной подстановки полей (26) в векторное произведение $(\vec{E} \times \vec{H})$.

Равенство нулю векторного произведения $(\vec{E} \times \vec{H})$ означает коллинеарность векторов \vec{E} и \vec{H} .

Из (31) следует

$$\vec{v} \left(\frac{w'}{c^2} + \frac{w''}{c^2} \right) = \vec{v}' \cdot \frac{w'}{c^2} + \vec{v}'' \cdot \frac{w''}{c^2} = 0. \quad (36)$$

Определённая по (36) скорость \vec{v} является скоростью центра импульса полевой системы. Ввиду $(w'/c^2 + w''/c^2) > 0$ для стоячей волны получаем $\vec{v} = 0$.

Присутствие в (26) множителя $\cos kz$ у компоненты E_x и $(-s \sin kz)$ – у E_y при одинаковом общем амплитудно-временном факторе $2E_0 \sin(-\omega t + \Theta_0)$ указывает на винтовую поляризацию вектора \vec{E} . Ввиду установленной коллинеарности векторов \vec{E} и \vec{H} винтовая поверхность поляризации вектора \vec{E} содержит и вектор \vec{H} . Модуль вектора напряжённости электрического поля записывается как

$$|\vec{E}| = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2} = 2E_0 |\sin(-\omega t + \Theta_0)|, \quad (37)$$

а модуль вектора напряжённости магнитного поля

$$|\vec{H}| = \sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2} = 2E_0 \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} |\cos(-\omega t + \Theta_0)|. \quad (38)$$

Это означает, что вектор \vec{E} , как и вектор \vec{H} , не имеет пространственной зависимости по своей величине, а только лишь по направлению своей спиральной ориентации.

4. Резонатор с полем винтовой поляризации

Пространственная независимость модулей электрической и магнитной напряжённостей рассмотренной винтовой стоячей волны, описываемой соотношениями (26), приводит к отсутствию узлолучностного распределения поля вдоль z и, следовательно, к невозможности использования идеальных изотропных Э- и М-стенок для ограничения протяжённости поля по z . Из рис. 2 видно, что на плоскости $z=0$, E_y -компонента поля имеет узел, а E_x – пучность. Соответственно, H_x имеет пучность в $z=0$, а H_y – узел. Действительно, векторное поле (26) представляет собой сумму векторных полей двух плоских, плоскополяризованных, взаимно ортогональных по поляризациям, стоячих волн 1 и 2:

$$E_x^{(1)} = 2E_0 \cos kz \cdot \sin(-\omega t + \Theta_0), \quad H_y^{(1)} = 2E_0 \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} \sin kz \cdot \cos(-\omega t + \Theta_0), \quad (39)$$

$$E_y^{(2)} = s2E_0 \sin kz \cdot \sin(-\omega t + \Theta_0), \quad H_x^{(2)} = s2E_0 \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} \cos kz \cdot \cos(-\omega t + \Theta_0). \quad (40)$$

Поля 1 и 2 удовлетворяют плоскостным симметриям [5]

$$E_x^{(1)}(z, t) = +E_x^{(1)}(-z, t), \quad H_y^{(1)}(z, t) = -H_y^{(1)}(-z, t), \quad (41)$$

$$E_y^{(2)}(z, t) = -E_y^{(2)}(-z, t), \quad H_x^{(2)}(z, t) = +H_x^{(2)}(-z, t), \quad (42)$$

соответствующим расположению в плоскости $z=0$ М-стенки для поля 1, и Э-стенки для поля 2. Очевидно, свойства Э и М не могут быть одновременно реализованы при использовании поверхностей с физической изотропией.

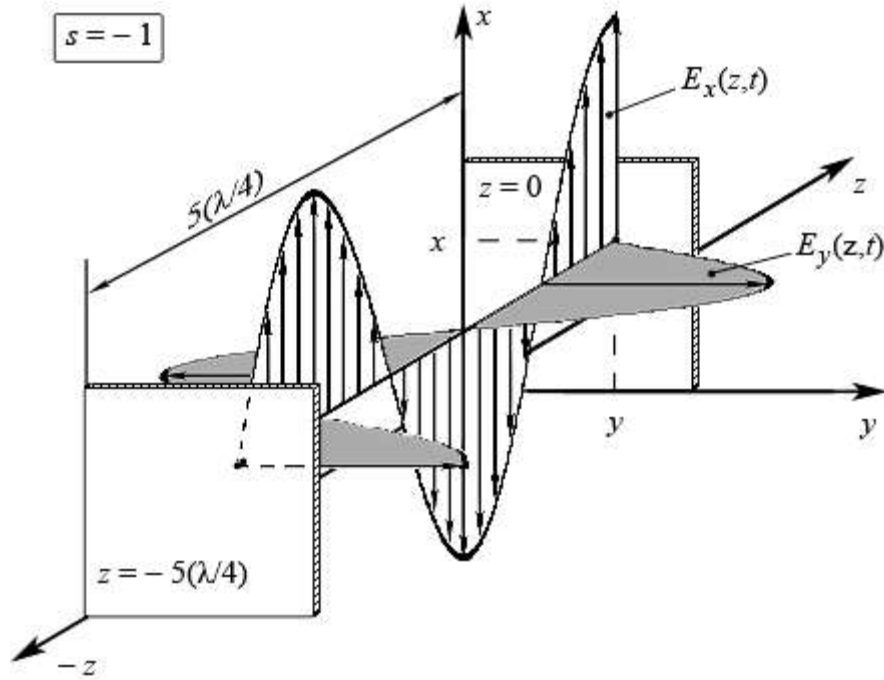


Рис. 2

Рассмотрим дроссельное устройство, представленное на рис. 3, а. Входная плоскость $z=0$ данного устройства представляет собой решётку из тонких проводников, расстояние между которыми много меньше длины волны. Решётка будет обладать высоким коэффициентом отражения для волн с вектором \vec{E} , поляризованным по направлению y , и высоким коэффициентом пропускания для волн с вектором \vec{E} , поляризованным по x . Последние будут отражаться проводящим зеркалом, расположенным на расстоянии $\lambda/4$ позади решётки. В результате входная плоскость $z=0$ устройства, показанного на рис. 3, а, для электрического поля реализует узел $\vec{E}^{(2)} = \vec{n}_y^0 E_y^{(2)}(z=0, t)$ и пучность $\vec{E}^{(1)} = \vec{n}_x^0 E_x^{(1)}(z=0, t)$, а для магнитного – пучность $\vec{H}^{(2)} = \vec{n}_x^0 H_x^{(2)}(z=0, t)$ и узел $\vec{H}^{(1)} = \vec{n}_y^0 H_y^{(1)}(z=0, t)$.

Таким образом, использование анизотропно-проводящей решётки в $z=0$ с гладким проводящим экраном в $z=\lambda/4$ (рис. 2) позволяет приближённо реализовать «непроницаемое для поля зеркало». Аналогичное, но повернутое в плоскости z на 90° дроссельное устройство следует расположить в плоскости, удаленной от $z=0$ на нечетное число четвертей длины волны (на рис.2 – в плоскости $z=5(\lambda/4)$).

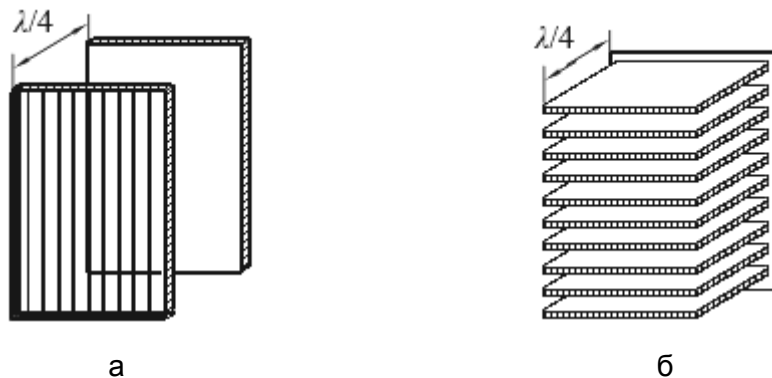


Рис. 3

Другой тип анизотропного отражателя изображён на рис. 3, б. Расстояние между тонкими проводящими пластинами «гребёнки» в данной конструкции много меньше длины волны.

Применение анизотропно-проводящих отражателей позволяет получить одномерный резонатор с полем правой ($s=+1$) или левой ($s=-1$) винтовой поляризации, в котором отсутствуют узлопучностные образования.

Практические осуществления стоячих винтовых волн могут иметь различные технологические применения. Например, в случае заполнения внутренней полости резонатора с винтовым полем однородной проводящей средой плотность мощности нагрева $\vec{i}^{(3)}\vec{E} = \sigma\vec{E}^2$, будет пространственно-однородной величиной ($\text{grad } \sigma\vec{E}^2 = 0$).

ЛИТЕРАТУРА

1. Ньютон Р. Теория рассеяния волн и частиц / Р. Ньютон. М.: Мир, 1969. 607 с.
2. Ильин В.С. Электродинамика свободных полей / В.С. Ильин. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1998. 375 с.
3. Ильин В.С. Поля Бельтрами, винтовые волны и проблема однозначного построения плотностей энергии, потока и импульса в классической электродинамике / В.С. Ильин, И.С. Нефедов // Проблемы современной физики. Дубна, 1999. С. 218-225.
4. Дьярмати И. Неравновесная термодинамика. Теория поля и вариационные принципы / И. Дьярмати. М.: Мир, 1974. 357 с.
5. Силин Р.А. Замедляющие системы / Р.А. Силин, В.П. Сазонов. М.: Сов. радио, 1966. 632 с.

Ильин Вадим Сергеевич –

доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Радиотехника» Саратовского государственного технического университета

Скляр Алексей Николаевич –

соискатель ученой степени кандидата технических наук по кафедре «Радиотехника» Саратовского государственного технического университета

УДК 621.372

В.С. Ильин, А.Н. Скляр

О СОХРАНЯЕМОСТИ ВЕКТОРНЫХ ТРУБОК ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Рассмотрены физические условия существования и сохраняемости векторных трубок и векторных линий в векторных электродинамических полях.

V.S. Il'in, A.N. Sklyar

ABOUT THE RETENTIVITY OF VECTOR TUBES OF ELECTROMAGNETIC FIELDS

Physical kinematics conditions of existence and retentivity of vector tubes and vector lines in vector fields of electrodynamics are considered in the article.

В векторных описаниях различных физических полей – в гидродинамике, аэромеханике, акустике, электродинамике и др., – важным является понятие векторных линий, позволяющее наглядно отображать пространственную структуру обсуждаемого поля.

Для векторного поля \vec{A} уравнение векторных линий задаётся условием $(\vec{A} \times d\vec{l}_A^0) = 0$ (где $d\vec{l}_A^0$ – элемент длины в направлении \vec{A}), что приводит в трёхмерном пространстве к трём уравнениям:

$$\frac{dx}{A_x} = \frac{dy}{A_y} = \frac{dz}{A_z}. \quad (1)$$

Различные значения трёх постоянных интегрирования в решениях (1) будут параметризовать различные линии.

В случае, когда поле \vec{A} является функцией не только координат, но и параметра движения – времени t , система (1) может не соответствовать физическим кинематическим требованиям. Для понимания этого обстоятельства рассмотрим простейший пример двумерного поля с компонентами $A_x = A_0 \cos \omega t$ и $A_y = A_0 \sin \omega t$. Очевидно, в каждой точке (x, y) , плоскости $z = \text{const}$ вектор \vec{A} совершает вращательное движение с угловой скоростью $\vec{\omega} = \vec{n}_z^0 \omega$. Величина производной $dy/dx = A_y/A_x = \text{tg } \omega t$, характеризующая геометрический наклон векторной линии, оказывается переменной во времени, что приводит к невозможности графического изображения линии. Таким образом, не каждое векторное поле можно представить набором неподвижных векторных линий.

Если речь идёт о каком-либо физическом поле, математически описываемом функцией $\vec{A}(\vec{r}, t)$, то любой пространственной точке \vec{r} в момент времени t должна отвечать определённая физическая субстанция, макро- или микроопределяемая как физическая частица. Движение физических частиц обуславливает движение вектора \vec{A} во времени. Пусть в точке \vec{r}_1 в момент времени t_1 выбирается элементарная площадка $d\vec{S}_1(\vec{r}_1, t_1)$, ортогональная к векторной линии поля \vec{A} , проходящей в момент времени t_1 через точку \vec{r}_1 .

Для той же векторной линии, математически описываемой уравнениями (1), построим другую элементарную площадку $d\vec{S}_2(\vec{r}_2, t_2)$. Если каждая из точек контура, ограничивающего $d\vec{S}_1$ связана линией лишь с одной точкой контура, ограничивающего $d\vec{S}_2$, и эти линии являются векторными линиями поля $\vec{A}(\vec{r}, t)$ для всех допустимых \vec{r} и t , то такое образование называют элементарной векторной трубкой от поля $\vec{A}(\vec{r}, t)$. При движении параметра t векторные трубки могут в общем случае перемещаться, вращаться, изменять свою форму и расходимость сечений. Для придания трубке не только математического, но и физического кинематического содержания необходимо потребовать, чтобы во все моменты времени векторная трубка была заполнена одними и теми же физическими частицами. Обращаясь к примеру $A_x = A_0 \cos \omega t$ и $A_y = A_0 \sin \omega t$, видим, что при $t=0$ векторная линия из точки $x=0, y=0$ проходит через все точки оси OX , а при $t=\pi/2\omega$ – через все точки оси OY . Поскольку в данном примере все точки (x, y) при наполнении их физическим содержанием могут только вращаться, но не могут покидать «своего места», то видно, что в каждый момент времени векторные линии, определяемые по (1), проходят через разные точки, то есть физически через «другие» частицы. Векторные трубки в этом случае лишены правильного физического наполнения. Таким образом, не каждое поле $\vec{A}(\vec{r}, t)$ может иметь векторные трубки и их предел – векторные линии, воспринимаемые как устойчивые физические образования. На это обстоятельство впервые обратил внимание ещё Гельмгольц [1].

Анализ ситуации для некоторых гидродинамических движений был проведён Фридманом [1], а для произвольных векторных физических полей – Кочиным [2].

Необходимым и достаточным условием сохранения векторных трубок и их интенсивностей у переменного поля $\vec{A}(\vec{r}, t)$ является условие [2]

$$\frac{d\vec{A}}{dt} - (\vec{A}, \nabla)\vec{v} + \vec{A} \operatorname{div} \vec{v} = 0, \quad (2)$$

где \vec{v} – поле скоростей физических макрочастиц, часто называемое полем скоростей движения поля $\vec{A}(\vec{r}, t)$.

Условие (2) используется в гидродинамике. Вопрос об использовании (2) в электродинамике до сих пор нигде не обсуждался. Поэтому попробуем произвести сопряжение условия (2) с электродинамическими уравнениями, что и является целью настоящей статьи.

Отметим, что из (2) автоматически следует принципиальное существование векторных трубок лишь для односкоростного движения. При многоскоростном движении, когда для отдельных областей пространства или для всего пространства имеет место наложение многих векторных трубок, что приводит, как свидетельствует «опыт гидродинамики», к турбулентности и даже к фрактальности движения, существование векторно-трубчатых образований рассматриваемого поля $\vec{A}(\vec{r}, t)$ становится невозможным.

Как показано в [1, 2], использование тождеств

$$\frac{d\vec{A}}{dt} \equiv \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + (\vec{v}, \nabla)\vec{A}, \quad (3)$$

$$\operatorname{rot}(\vec{A} \times \vec{v}) \equiv (\vec{v}, \nabla)\vec{A} - (\vec{A}, \nabla)\vec{v} + \vec{A} \operatorname{div} \vec{v} - \vec{v} \operatorname{div} \vec{A}, \quad (4)$$

позволяет переформулировать (2) к виду

$$\operatorname{rot}(\vec{A} \times \vec{v}) + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \vec{v} \operatorname{div} \vec{A} = 0. \quad (5)$$

В случае однородно-изотропной среды, комбинируя параметры проницаемостей ϵ и μ , можно задать вектор характеристической скорости в среде $\vec{v} = \vec{v}_v^0 1/\sqrt{\epsilon\mu} = \vec{n}_v^0 c/\sqrt{\epsilon\mu/\epsilon_0\mu_0}$, и векторы характеристического импеданса $\vec{Z} = \vec{n}_v^0 \sqrt{\mu/\epsilon}$ и адмитанса $\vec{Y} = \vec{n}_v^0 \sqrt{\epsilon/\mu}$ среды, где \vec{n}_v^0 – единичный вектор направления распространения. Векторы импеданса и адмитанса связаны условием взаимнообратности $(\vec{Z}, \vec{Y}) \equiv (\vec{Y}, \vec{Z}) \equiv 1$. Вектор характеристической скорости можно представлять как $\vec{v} = \vec{Z}/\mu = \vec{Y}/\epsilon$.

Введём векторы напряжённостей $\vec{E}(\vec{r}, t)$ и $\vec{H}(\vec{r}, t)$, удовлетворяющие условиям поперечности $\vec{E} \perp \vec{n}_v^0$, $\vec{H} \perp \vec{n}_v^0$ и $\vec{E} \perp \vec{H}$. Для поперечных волн используются стандартные связи

$$\vec{E} = (\vec{H} \times \vec{Z}) \text{ и } \vec{H} = (\vec{Y} \times \vec{E}). \quad (6)$$

Подстановка в (5) $\vec{A} = \epsilon \vec{E}$, а затем $\vec{A} = \mu \vec{H}$, с учётом (6) и выражений для \vec{v} , \vec{Z} и \vec{Y} , приводит к уравнениям:

$$-\operatorname{rot} \vec{H} + \frac{\partial \epsilon \vec{E}}{\partial t} + \vec{v} \operatorname{div} \epsilon \vec{E} = 0, \quad (7)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} + \frac{\partial \mu \vec{H}}{\partial t} + \vec{v} \operatorname{div} \mu \vec{H} = 0. \quad (8)$$

Величины $\rho^{\mathcal{E}} = \operatorname{div} \epsilon \vec{E}$ и $\rho^{\mathcal{M}} = \operatorname{div} \mu \vec{H}$ интерпретируются однозначно только как скалярная электрическая и псевдоскалярная магнитная зарядовые плотности, наведённые в сре-

де полями \vec{E} и \vec{H} , а $\vec{i}^\varnothing = \vec{v}\rho^\varnothing$ и $\vec{i}^M = \vec{v}\rho^M$ – как векторная и псевдовекторная плотности электрического и магнитного конвекционных токов.

Окончательно уравнения (7) и (8) переписываются в форме уравнений Максвелла

$$\text{rot } \vec{H} = \frac{\partial \varepsilon \vec{E}}{\partial t} + \vec{i}^\varnothing, \quad (9)$$

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \mu \vec{H}}{\partial t} - \vec{i}^M. \quad (10)$$

Таким образом, последовательная переформулировка условия Фридмана-Кочина (2) существования сохраняющихся векторных трубок при переходе к векторным электродинамическим полям в однородно-изотропных средах приводит к необходимости выполнения уравнений Максвелла (9)-(10).

Рассмотрим некоторые примеры.

I. Плоская, плоскополяризованная волна.

В неограниченном пространстве при распространении вдоль оси z , напряжённости плоской волны записываются в виде

$$\begin{aligned} E_x &= E_0 \sin(kz - \omega t + \Theta_0), & E_y &= E_z = 0, \\ H_y &= \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} E_0 \sin(kz - \omega t + \Theta_0), & H_x &= H_z = 0, \end{aligned} \quad (11)$$

где $k = \omega\sqrt{\varepsilon\mu}$, $\vec{v} = \vec{n}_z^0 1/\sqrt{\varepsilon\mu}$.

Для векторных полей волны (11) будут выполняться уравнения Максвелла (9)-(10), в которых $\rho^\varnothing = \text{div } \varepsilon \vec{E} = 0$, $\rho^M = \text{div } \mu \vec{H} = 0$, $\vec{i}^\varnothing = \vec{v}\rho^\varnothing = 0$ и $\vec{i}^M = \vec{v}\rho^M = 0$. Это означает, что для векторов (11) выполняется условие Фридмана-Кочина (2).

Сохраняющиеся векторные трубки \vec{E} и \vec{H} и их «предел» – векторные линии – будут перпендикулярны оси z и будут перемещаться поступательно со скоростью $\vec{v} = \vec{n}_z^0 1/\sqrt{\varepsilon\mu}$.

II. Сферическая волна от излучающего точечного электрического диполя.

Пусть в сферической системе координат (r, Θ, φ) с ортами $\vec{n}_r^0, \vec{n}_\Theta^0, \vec{n}_\varphi^0$ рассматриваются взаимно ортогональные векторы полей и скорости

$$\vec{E} = \vec{n}_\Theta^0 E(r, \Theta, t), \quad \vec{H} = \vec{n}_\varphi^0 H(r, \Theta, t), \quad \vec{v} = \vec{n}_r^0 \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}}. \quad (12)$$

Уравнения (7)-(8) в сферической системе координат для полей (12) принимают вид

$$-\vec{n}_r^0 \frac{1}{r \sin \Theta} \frac{\partial}{\partial \Theta} (H_\varphi \sin \Theta) + \vec{n}_\Theta^0 \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r H_\varphi) + \vec{n}_\Theta^0 \frac{\partial \varepsilon E_\Theta}{\partial t} + \vec{n}_r^0 \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}} \left(\frac{\varepsilon}{r \sin \Theta} \frac{\partial}{\partial \Theta} (E_\Theta \sin \Theta) \right) = 0, \quad (13)$$

$$\vec{n}_\varphi^0 \frac{1}{r} \frac{\partial (E_\Theta r)}{\partial r} + \vec{n}_\varphi^0 \frac{\partial}{\partial t} (\mu H_\varphi) = 0. \quad (14)$$

В (14), в силу аксиальной симметрии $\partial/\partial\varphi = 0$, будет $\text{div } \mu \vec{H} = \rho^M = 0$ и, следовательно, также $\vec{i}^M = 0$.

Одночастотными решениями (13)-(14) являются векторные функции:

$$\vec{E} = \vec{n}_\Theta^0 E_\Theta = \vec{n}_\Theta^0 E_0 \frac{\sin \Theta}{r} \sin(kr - \omega t), \quad (15)$$

$$\vec{H} = \vec{n}_\varphi^0 H_\varphi = \vec{n}_\varphi^0 \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} E_0 \frac{\sin \Theta}{r} \sin(kr - \omega t), \quad (16)$$

где $k = \omega \sqrt{\varepsilon \mu}$.

Решения (7)-(8) в виде полей (15)-(16) описывают поле сингулярного электрического диполя в дальней зоне, то есть собственно поле излучения диполя [3-4].

Значения зарядов и токов в (7)-(8) будут

$$\rho^\varnothing = \operatorname{div} \varepsilon \vec{E} = \frac{\varepsilon}{r \sin \Theta} \frac{\partial}{\partial \Theta} (E_\Theta \sin \Theta) = \varepsilon E_0 \frac{2 \cos \Theta}{r^2} \sin(kr - \omega t), \quad (17)$$

$$\vec{i}^\varnothing = \vec{v} \rho^\varnothing = \vec{n}_r^0 \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} E_0 \frac{2 \cos \Theta}{r^2} \sin(kr - \omega t). \quad (18)$$

Из уравнений (9)-(10) после взятия дивергенции легко получить балансные уравнения сохранения электрических и магнитных зарядов

$$\frac{\partial \rho^\varnothing}{\partial t} + \operatorname{div} \vec{i}^\varnothing = 0, \quad \frac{\partial \rho^M}{\partial t} + \operatorname{div} \vec{i}^M = 0. \quad (19)$$

Нетрудно видеть, что значения ρ^\varnothing и \vec{i}^\varnothing , найденные из (17)-(18), как и значения $\rho^M=0$, $\vec{i}^M=0$, удовлетворяют балансным уравнениям (19). Однако хорошо известные решения [3-4] для полного поля \vec{E}_Π и \vec{H}_Π точечного диполя подчинены условиям $\operatorname{div} \varepsilon \vec{E}_\Pi = 0$ и $\operatorname{div} \mu \vec{H}_\Pi = 0$ для всех $r > 0$. Поэтому появление зарядовых и токовых плотностей $\rho^\varnothing \neq 0$ и $\vec{i}^\varnothing \neq 0$, сопровождающих напряжённости поля излучения $\vec{E}_{\text{изл}} = \vec{E}$ и $\vec{H}_{\text{изл}} = \vec{H}$, описываемые формулами (15)-(16), нуждается в пояснениях. Задача о нахождении динамических полей точечного колеблющегося диполя, помещённого в точку $r=0$, для всех $r > 0$ формулируется уравнениями Максвелла:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{H}_\Pi - \frac{\partial \varepsilon \vec{E}_\Pi}{\partial t} &= 0, & \operatorname{div} \varepsilon \vec{E}_\Pi &= 0, \\ \operatorname{rot} \vec{E}_\Pi + \frac{\partial \mu \vec{H}_\Pi}{\partial t} &= 0, & \operatorname{div} \mu \vec{H}_\Pi &= 0. \end{aligned} \quad (20)$$

Если (20) включает и точку $r=0$, то в уравнениях появляются сингулярные электрические источники заряда и тока, соответствующие первому мультиполю-диполю.

При использовании классификации «ближние – дальние поля» справедлива суперпозиция

$$\vec{E}_\Pi = \vec{E}_B + \vec{E}_{\text{изл}}, \quad \vec{H}_\Pi = \vec{H}_B + \vec{H}_{\text{изл}}. \quad (21)$$

Для векторов ближних полей \vec{E}_B и \vec{H}_B и векторов полей излучения $\vec{E}_{\text{изл}} = \vec{E}$ и $\vec{H}_{\text{изл}} = \vec{H}$ можно для $r > 0$ записать уравнения Максвелла:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{H}_B - \frac{\partial \varepsilon \vec{E}_B}{\partial t} &= -\vec{i}^\varnothing(r, \Theta, t), & \operatorname{rot} \vec{E}_B + \frac{\partial \mu \vec{H}_B}{\partial t} &= 0, \\ \operatorname{div} \varepsilon \vec{E}_B &= -\rho^\varnothing, & \operatorname{div} \mu \vec{H}_B &= 0. \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{H}_{\text{изл}} - \frac{\partial \varepsilon \vec{E}_{\text{изл}}}{\partial t} &= +\vec{i}^\varnothing(r, \Theta, t), & \operatorname{rot} \vec{E}_{\text{изл}} + \frac{\partial \mu \vec{H}_{\text{изл}}}{\partial t} &= 0, \\ \operatorname{div} \varepsilon \vec{E}_{\text{изл}} &= +\rho^\varnothing, & \operatorname{div} \mu \vec{H}_{\text{изл}} &= 0. \end{aligned} \quad (23)$$

Очевидно, сумма уравнений (22) и (23) будет приводить к уравнениям (20), в которых при $r > 0$ отсутствуют источники. Наличие источников в (22) и (23) означает «зацепление» этих уравнений по функциям источников, то есть зависимость ближних и дальних полей друг от друга, если изначально постулируются уравнения (20) для полных полей, как это и делается обычно.

Знание функций $\vec{E}_{изл}$ и $\vec{H}_{изл}$ сразу позволяет найти ρ^{\varnothing} и \vec{i}^{\varnothing} в (22) и (23). Это и будут функции (17)-(18). С точки зрения описания с помощью полных полей \vec{E}_{Π} и \vec{H}_{Π} в уравнениях (20), в которых не фигурируют источники, возникающие в (22) и (23), плотности ρ^{\varnothing} и \vec{i}^{\varnothing} следует рассматривать как внутренние зарядовые и токовые плотности, обеспечивающие «сцепление» ближних и излучаемых полей. Однако если рассматривать задачу о полях излучения $\vec{E}_{изл} = \vec{E}$ и $\vec{H}_{изл} = \vec{H}$ как отдельную и самостоятельную, то ввиду $\rho^{\varnothing} = \text{div } \epsilon \vec{E}_{изл}$ и $\vec{i}^{\varnothing} = \vec{v} \rho^{\varnothing}$ уравнения (23) будут содержать только неизвестные $\vec{E}_{изл} = \vec{E}$ и $\vec{H}_{изл} = \vec{H}$. Именно это и демонстрируют уравнения (13)-(14), составленные из (7)-(8).

Таким образом, задача о нахождении сферических полей излучения является замкнутой по искомым полям. Её векторные решения $\vec{E}_{изл} = \vec{E}$ и $\vec{H}_{изл} = \vec{H}$, то есть функции (15)-(16), в силу вышесказанного, образуют сохраняющиеся векторные трубки и линии, перпендикулярные к направлению \vec{n}_r^0 .

Векторное поле \vec{i}^{\varnothing} также образует сохраняющиеся векторные трубки. Действительно, полагая в уравнении Фридмана-Кочина (5) $\vec{A} = \vec{i}^{\varnothing} = \vec{v} \rho^{\varnothing}$ ввиду $(\vec{v} \times \vec{v}) = 0$ сразу получаем электрическое балансное уравнение (19).

Условие Фридмана-Кочина (5) можно применять в электродинамике не только к векторам напряжённостей или к векторам тока. Так, для полей в рассмотренных примерах излучения вектор поверхностной плотности потока мощности (вектор Пойнтинга) представим в виде

$$\vec{S} = \vec{v} w, \quad (24)$$

где w – плотность энергии.

Полагая в (5) $\vec{A} = \vec{S}$, после сокращения на $\vec{v} \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = 0 \right)$ и учёта $(\vec{v} \times \vec{v}) = 0$, получаем скалярное уравнение баланса энергии в виде дифференциальной теоремы Пойнтинга

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \text{div } \vec{S} = 0. \quad (25)$$

Выполнение (25) свидетельствует о существовании сохраняющихся векторных трубок поля \vec{S} .

В данной статье рассмотрены лишь частные случаи применения необходимого и достаточного условия Фридмана-Кочина существования и сохраняемости векторных трубок и векторных линий. Это, прежде всего, касается ограничения по использованию в рассмотрении только однородно-изотропных сред. Но даже в этом случае условие Фридмана-Кочина демонстрирует органическую связку с уравнениями электродинамики.

Для современных подходов в электродинамических описаниях характерной является концепция представления поля в виде волновых пакетов, то есть концепция рассмотрения набора односкоростных элементарных движений. Для подобных движений кинематически необходимым является выполнение условий сохраняемости соответствующих величин и понятий, в том числе и условия сохраняемости векторных трубок. С этих позиций условие векторной сохраняемости Фридмана-Кочина представляется мощным критерием установления элементарности движения не только в гидромеханике (струйное движение), но и в электродинамике (фундаментальные волны).

ЛИТЕРАТУРА

1. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. М., 1970. 904 с.
2. Кочин Н.Е. Векторное исчисление и начала тензорного исчисления / Н.Е. Кочин. М.: ОНТИ, ГТТИ, 1934. С. 272-288, 356-360.
3. Стрэттон Дж.А. Теория электромагнетизма / Дж.А. Стрэттон. М.-Л.: ОГИЗ ГИТТЛ, 1948. 540 с.
4. Фелсен Л. Излучение и рассеяние волн / Л. Фелсен, Н. Маркувиц. М.: Мир, 1978. Т. 2. 477 с.

Ильин Вадим Сергеевич –

доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Радиотехника»
Саратовского государственного технического университета

Скляр Алексей Николаевич –

соискатель ученой степени кандидата технических наук по кафедре «Радиотехника»
Саратовского государственного технического университета

УДК 621.313

И.И. Артюхов, И.И. Аршакян, А.В. Коротков, Н.В. Погодин, С.Ф. Степанов

**ПЕРЕСТРАИВАЕМАЯ ПО СТРУКТУРЕ АВТОНОМНАЯ СИСТЕМА
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА
С МНОГОДВИГАТЕЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ**

Излагаются вопросы построения автономных систем электроснабжения нового поколения, которые по сравнению с существующими системами характеризуются уменьшенным расходом топлива и возможностью совместной работы генераторов с различными частотами выходного напряжения.

I.I. Artjukhov, I.I. Arshakyan, A.V. Korotkov, N.V. Pogodin, S.F. Stepanov

**OFF-LINE RECONFIGURABLE SYSTEM OF POWER SUPPLY
OF THE TECHNOLOGICAL COMPLEX
WITH THE MULTIMOTOR ELECTRIC DRIVE**

Questions of construction of off-line systems of power supply of new generation are considered in this article. In comparison with existing systems they are characterized by the reduced fuel flow and an opportunity of teamwork of generators with various frequencies of their output voltage.

На предприятиях нефтегазовой промышленности находят применение технологические комплексы с многодвигательными электроприводами переменного и постоянного тока, электроснабжение которых осуществляется от автономных источников электроэнергии. Характерным примером являются технологические комплексы предприятий, осуществляющих разведыва-

тельное бурение, добычу и магистральный транспорт нефти и газа. Необходимость автономного электроснабжения может быть обусловлена различными факторами. Прежде всего, оно является целесообразным для объектов, расположенных в отдаленных районах. В последнее время из-за снижения надежности внешнего электроснабжения и постоянного роста тарифов на электроэнергию перевод на автономное электроснабжение становится приоритетным направлением в электроэнергетике нефтегазовой и других отраслей промышленности [1].

Создание автономных систем электроснабжения (СЭС) приводит к необходимости решения ряда задач. Одна из них обусловлена тем, что существующие автономные источники энергии (АИЭ), выполненные на базе различных первичных двигателей, не позволяют во многих случаях генерировать электроэнергию с параметрами, удовлетворяющими требованиям нормативных документов. Более того, из-за жесткой зависимости мгновенной мощности АИЭ от графика электрической нагрузки уменьшается продолжительность работы электрогенераторов в номинальном режиме. Переменный характер нагрузки автономной СЭС многодвигательного электропривода технологического комплекса неизбежно приводит к недоиспользованию номинальной мощности электрогенераторов, снижению их КПД, непроизводительному расходу топлива [2].

Автономные СЭС технологических комплексов с многодвигательным электроприводом могут быть отражены укрупненной схемой, которая показана на рис. 1. Источником электрической энергии является совокупность N генераторов $\Gamma_k (k = \overline{1, N})$ с приводными двигателями $D_k (k = \overline{1, N})$. С помощью коммутаторов $K_{1k} (k = \overline{1, N})$ на общую шину с напряжением U_0 и частотой f_0 может быть включено необходимое количество генераторов. Потребители разделены на две группы, основная по мощности из которых – асинхронные двигатели $M_j (j = \overline{1, S})$. Напряжения $U_j (j = \overline{1, S})$ и частоты $f_j (j = \overline{1, S})$ на статорных обмотках этих двигателей должны регулироваться в ходе технологического процесса, поэтому они получают питание через преобразователи частоты ПЧ $_j (j = \overline{1, S})$. Для второй группы потребителей необходима электроэнергия промышленной частоты, поэтому они подключаются непосредственно к общей шине переменного тока.

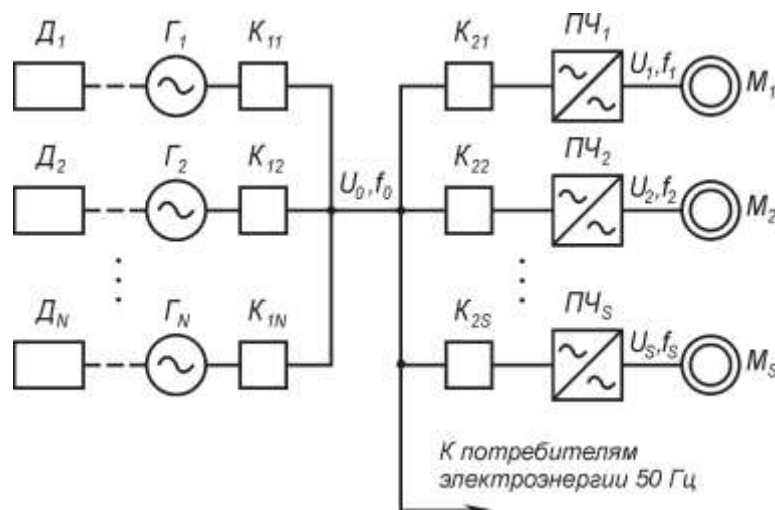


Рис. 1. Обобщенная схема автономной СЭС технологического комплекса с многодвигательным электроприводом

Для большинства технологических комплексов нефтегазовой промышленности характерным является изменение в широких пределах режимов работы многодвигательного элект-

тропривода. При этом графики электрических нагрузок генераторов $G_k (k = \overline{1, N})$ отличаются большим разнообразием.

Известно, что КПД автономных генераторов с газотурбинным приводом и приводом двигателей внутреннего сгорания тем выше, чем больше его коэффициент загрузки. Удельный расход топлива возрастает при снижении нагрузки. Одновременно с существенным увеличением удельного расхода топлива при малых нагрузках ухудшаются условия эксплуатации первичного двигателя, и сокращается его моторесурс, поэтому устанавливается минимально допустимая нагрузка. В режимах, когда нагрузка падает ниже допустимого значения, приходится увеличивать ее искусственно. Так как средняя нагрузка автономной СЭС всегда меньше, чем номинальная мощность генераторов, то значительную часть времени электроагрегаты работают в режиме с увеличенным расходом топлива.

Потребление топлива можно уменьшить, если количество и мощности одновременно работающих электроагрегатов ЭТК по схеме рис. 1 оперативно приводить в соответствие с нагрузкой СЭС. Иначе говоря, должна решаться задача минимизации функционала

$$\Phi = \sum_{k=1}^m P_{k.ном} - \sum_{j=1}^s P_j - P_{50}, \quad (1)$$

где $P_{k.ном}$ – номинальная мощность k -го электроагрегата; P_j – мощность, потребляемая j -м частотно-регулируемым приводом; P_{50} – мощность электроприемников стандартной частоты.

Для надежной работы автономной СЭС всегда необходим определенный запас по мощности ΔP , величина которого в значительной степени зависит от того, насколько быстро может быть произведена перестройка структуры СЭС. Это определяется временем запуска первичного двигателя, а также длительностью процесса ввода запускаемого генератора в синхронизм. Поэтому улучшение динамических характеристик электроагрегатов, входящих в состав ЭТК по схеме рис. 1, является важным фактором снижения топливных затрат.

Улучшение эксплуатационных характеристик автономных СЭС технологических комплексов с многодвигательным электроприводом: снижение расхода топлива, повышение надежности и качества электроснабжения, – в настоящее время происходит в основном в направлении улучшения технических параметров и характеристик отдельных блоков и узлов совершенствуемых систем без изменения их структуры [3].

Функционирование СЭС по схеме рис. 1 возможно при выполнении условий, которые предъявляются к системе параллельно работающих синхронных генераторов. Одно из них – равенство частот, с которыми вращаются валы приводных двигателей во всех режимах работы СЭС, и стабилизация их значений. Между тем сложный график изменения нагрузки СЭС, обусловленный пусками электродвигателей и изменением их загрузки, приводит к значительным колебаниям указанных частот. Кроме того, оперативность управления электроагрегатами ограничена необходимостью выполнения процедуры ввода в синхронизм при включении очередного агрегата.

Если нагрузкой автономной СЭС по схеме рис.1 является регулируемый многодвигательный частотно-регулируемый электропривод, то вообще возникает парадоксальная ситуация. Вначале прилагаются огромные усилия для того, чтобы обеспечить заданное качество электроэнергии на общих шинах переменного тока, затем полученную электрическую энергию стандартной частоты преобразуют либо в электрическую энергию постоянного тока, либо в электрическую энергию переменного тока регулируемой частоты. При этом в СЭС технологических комплексов с регулируемым электроприводом потребность в электроэнергии стандартной частоты существенно меньше, чем в электроэнергии, необходимой для функционирования приводов [4].

Преобразователи частоты в СЭС на рис.1 чаще всего выполняют по схеме с явно выраженным звеном постоянного тока, т.е. по схеме: сетевой выпрямитель + инвертор. При этом выпрямитель является неуправляемым, а функции регулирования возлагаются на ин-

вертор, построенный на IGBT модулях. Производя определенные трансформации схемы, можно получить СЭС с перестраиваемой структурой, в которой количество выпрямителей B_k равно количеству N электроагрегатов, как это показано на рис. 2.

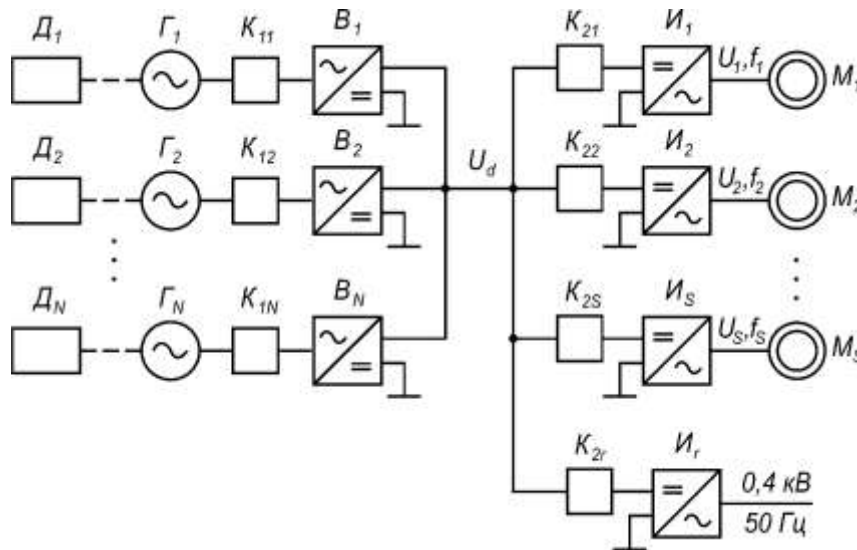


Рис. 2. Схема автономной СЭС с объединенным звеном постоянного тока

Принципиальным для схемы рис. 2 является то, что суммирование мощности генераторов осуществляется на шине постоянного тока, поэтому в ней могут быть использованы генераторы любого типа: как синхронные, так и асинхронные. При этом не ставится задача стабилизации частоты вращения первичных двигателей $D_k (k = \overline{1, N})$. Более того, вариация этого параметра может быть использована для уменьшения расхода топлива.

Эффективность автономной СЭС характеризуется, прежде всего, расходом топлива на выработку электрической энергии, которая используется для выполнения определенного технологического процесса. Если цикл технологического процесса продолжается в течение интервала времени ΔT , за который электроагрегатами будет выработано W кВт·ч электроэнергии, необходимой для работы электрооборудования комплекса, а затраты топлива на выработку указанного количества электроэнергии составят Q_T кг топлива, то критерий эффективности может быть определен выражением

$$K_{\mathcal{E}} = \frac{Q_T}{W} . \quad (2)$$

Очевидно, что при сравнении вариантов построения автономной СЭС более эффективным окажется тот, у которого величина $K_{\mathcal{E}}$ будет меньше при прочих равных условиях. Применительно к СЭС, схемы которых представлены на рис. 1 и 2, критерий эффективности может быть записан следующим образом:

$$K_{\mathcal{E}} = \frac{\sum_{k=1}^N Q_{Tk}}{W_{50} + \sum_{j=1}^s W_j} , \quad (3)$$

где Q_{Nk} – количество топлива, затраченное на работу k -го электроагрегата; W_{50} – количество электроэнергии, которое затрачено на работу потребителей промышленной частоты; W_j – количество электроэнергии, которое затрачено на работу j -го электропривода.

Если известны графики изменения нагрузки электроприводов $P_j(t)$ и потребителей промышленной частоты $P_{50}(t)$, то числитель выражения (3) может быть определен по формуле

$$\sum_{k=1}^N Q_{Tk} = \sum_{k=1}^N \int_0^{\Delta T} q_{Tk}^* \cdot P_{2k}(t) dt = \sum_{k=1}^N \int_0^{\Delta T} q_{Tk}^* \cdot \gamma_k \cdot P_2(t) dt, \quad (4)$$

где q_{Tk}^* – удельный расход топлива k -го электроагрегата, который зависит от его нагрузки $P_{2k}(t)$; γ_k – коэффициент загрузки k -го электроагрегата, причем $\sum_{k=1}^m \gamma_k = 1$.

Если в процессе производства электроэнергии участвуют одновременно m однотипных электроагрегатов, между которыми нагрузка распределяется равномерно, то коэффициент загрузки k -го электроагрегата будет обратно пропорционален количеству работающих агрегатов

$$\gamma_k = m^{-1}. \quad (5)$$

Знаменатель выражения (3) найдем с помощью формулы

$$W_{50} + \sum_{j=1}^s W_j = \int_0^{\Delta T} P_{50}(t) dt + \sum_{j=1}^s \int_0^{\Delta T} P_j(t) dt = \int_0^{\Delta T} \left[P_{50}(t) + \sum_{j=1}^s P_j(t) \right] dt = \int_0^{\Delta T} P_2(t) dt, \quad (6)$$

где $P_2(t)$ – график изменения нагрузки автономной СЭС по шине постоянного тока.

Из формул (2)-(6) видно, что эффективность автономной СЭС при заданном графике работы электрооборудования комплекса определяется числителем (4) выражения (42), который, в свою очередь, зависит от алгоритма управления электроагрегатами при возможных вариациях нагрузки.

Естественно, что минимальное значение показателя $K_{\mathcal{E}}$ достигается в том случае, когда все электроагрегаты работают с номинальной нагрузкой. При этом из (2) на основании (4) и (5) получаем

$$K_{\mathcal{E}} = q_{m,ном}^*, \quad (7)$$

где $q_{m,ном}^*$ – номинальное значение удельного расхода топлива.

На современном этапе развития техники $q_{m,ном}^*$ составляет 235 г/кВт·ч для дизель-генераторов мощностью свыше 15 кВт. Таким образом, эта величина может служить ориентиром при оценке эффективности работы автономной СЭС.

Если график нагрузки автономной СЭС с перестраиваемой структурой подвержен сильным колебаниям, то для обеспечения надежной работы электроагрегатов должно выполняться условие

$$P_{2k}(t) + \Delta P < P_{k,ном}, \quad (8)$$

где $P_{k,ном}$ – номинальная мощность k -го электроагрегата; ΔP – запас по мощности, величина которого зависит от интенсивности изменения нагрузки СЭС.

При одновременной работе m однотипных агрегатов ($P_{k,ном} = P_{ном}$) условие (8) приобретает вид

$$\frac{P_2(t)}{m} + \Delta P < P_{ном}. \quad (9)$$

Предположим, что известна максимальная скорость изменения мощности нагрузки

$$A = \max \left\{ \frac{dP_2(t)}{dt} \right\}. \quad (10)$$

Тогда за интервал времени T_c , в течение которого производится изменение структуры автономной СЭС, нагрузка отдельного электроагрегата может увеличиться на величину

$$\Delta P = \frac{A \cdot T_c}{m}. \quad (11)$$

Из-за большой длительности T_c величина ΔP может оказаться соизмеримой с номинальной мощностью $P_{ном}$ агрегата. В этом случае перестройка структуры автономной СЭС является нецелесообразной.

В типовой схеме автономной СЭС (рис. 1) длительность процесса изменения структуры

$$T_{c.min} = T_{зап.} + T_{синхр.}, \quad (12)$$

где $T_{зап.}$ – длительность запуска генератора в работу; $T_{синхр.}$ – длительность процесса синхронизации.

Для современных дизель-генераторов величина $T_{зап.}$ не превышает 5 с. При этом длительность процесса синхронизации запускаемого генератора обычно составляет 1 мин. Таким образом, для существующих систем электроснабжения ограничением по динамике изменения нагрузки является время $T_{c.min} > 65$ с.

В автономной СЭС с объединенным звеном постоянного тока процесс изменения структуры занимает время

$$T_{c.зпт} = T_{зап.} + T_{дин.}, \quad (13)$$

где $T_{дин.}$ – длительность переходных процессов.

В [5] показано, что длительность переходных процессов в звене постоянного тока составляет 0,2-0,5 с. Следовательно, реальное время ввода агрегата в работу $T_{c.зпт} < 6$ с, что на порядок меньше времени $T_{c.min}$ в типовой схеме.

В соответствии с формулой (11) это означает, что необходимый для надежной работы агрегатов запас по мощности ΔP в схеме автономной СЭС с объединенным звеном постоянного тока должен быть на порядок меньше, чем в типовой СЭС.

Кроме снижения расхода топлива, применение предлагаемой схемы СЭС позволяет увеличить ресурс работы приводных двигателей исключением режимов, близких к холостому ходу. Определенный экономический эффект может быть получен также за счет уменьшения количества выпрямителей, так как установленная мощность и стоимость N выпрямителей в схеме рис. 2 меньше, чем соответствующие показатели S выпрямителей, входящих в состав преобразователей частоты схемы рис. 1.

Рассмотрим далее варианты реализации автономных СЭС с объединенным звеном постоянного тока.

Схема перестраиваемой по структуре автономной СЭС на основе синхронных генераторов приведена на рис. 3.

С помощью выпрямителей B_k электрическая энергия переменного тока, вырабатываемая генераторами $G_k (k = \overline{1, N})$, преобразуется в электрическую энергию постоянного тока. К объединенной шине постоянного тока подключены инверторы $I_j (j = \overline{1, S})$, которые управляют асинхронными двигателями $M_j (j = \overline{1, S})$, а также инвертор I_r , который обеспечивает питание потребителей стабилизированным напряжением на частоте 50 Гц.

Управляющее устройство выполняет следующие функции:

- включение в работу необходимого количества m агрегатов, при котором обеспечивается минимизация функционала (1);
- стабилизацию напряжения U_d на шине постоянного тока при любом количестве одновременно работающих агрегатов;
- заданное распределение нагрузки между одновременно работающими агрегатами.

Для получения необходимой информации выпрямители B_k снабжены датчиками тока DT_k , выходные сигналы X_k которых пропорциональны токам I_{dk} . На выходе датчика напряжения ДН формируется сигнал X_{N+1} , пропорциональный напряжению U_d на шине постоянного тока.

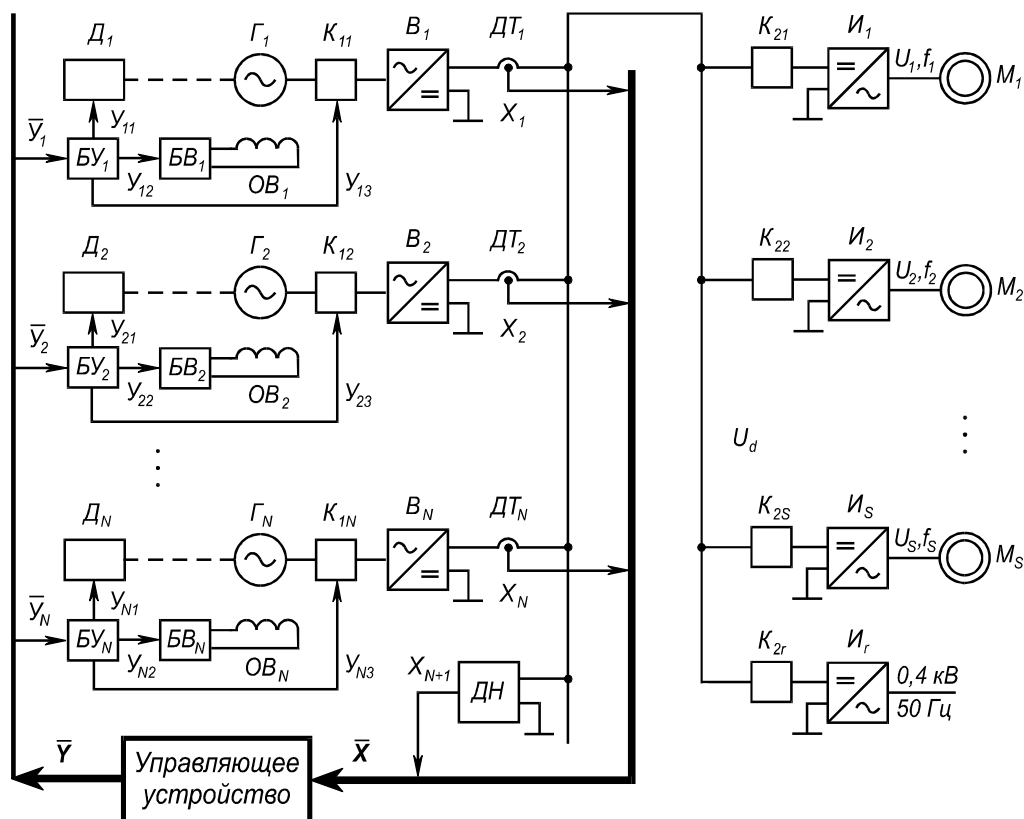


Рис. 3. Автономная СЭС на основе синхронных генераторов

Сигналы $X_1, X_2, \dots, X_N, X_{N+1}$ являются компонентами вектора входных переменных \bar{X} управляющего устройства, которое формирует вектор управляющих воздействий

$$\bar{Y} = \text{column}(\bar{Y}_1, \bar{Y}_2, \dots, \bar{Y}_N).$$

Каждый из векторов \bar{Y}_k имеет по три составляющих, одна из которых Y_{k1} управляет процессом включения – отключения приводного двигателя $Д_k$, другая Y_{k2} воздействует на величину тока возбуждения генератора $Г_k$, третья Y_{k3} задает состояние коммутатора K_{k1} .

Так как напряжение на выходе синхронного генератора является монотонно возрастающей функцией тока возбуждения, то для стабилизации напряжения U_d на шинах постоянного тока и распределения нагрузки между агрегатами может быть использовано изменение тока возбуждения. При возникновении положительной (отрицательной) разницы между током I_{dk} выпрямителя B_k и значением, определенным выражением (14), ток возбуждения соответствующего генератора должен уменьшаться (возрастать). Полученное управляющее воздействие необходимо просуммировать с сигналом контура стабилизации напряжения U_d на шинах постоянного тока. Таким образом, сигнал Y_{k2} на входе блока возбуждением k -го генератора будет иметь следующий вид:

$$Y_{k2} = D_I \left(\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m I_{dj} - I_{dk} \right) + D_U \Delta U, \quad (14)$$

где D_i, D_U – коэффициенты передачи усилительно-преобразовательных устройств в соответствующих контурах; ΔU – разность между заданным и фактическим значением напряжения U_d на шине постоянного тока.

Блоки управления возбуждением оснащают в основном регуляторами пропорционально-интегрального типа. В этом случае ток возбуждения k -го генератора определяется выражением

$$I_{Bk}(t) = A_1 Y_{k2}(t) + A_2 \int Y_{k2}(t) dt, \quad (15)$$

где A_1, A_2 – коэффициенты передачи блоков управления.

Принцип построения автономных СЭС, основанный на суммировании мощности генераторов на общей шине постоянного тока, позволяет применять не только синхронные генераторы. В последнее время получают распространение, в частности, генераторы на постоянных магнитах [6], которые имеют ряд преимуществ по сравнению с синхронными генераторами традиционной конструкции.

Схема перестраиваемой по структуре автономной СЭС на генераторах с постоянными магнитами представлена на рис. 4. Для того чтобы иметь возможность стабилизировать напряжение на шине постоянного тока и осуществлять заданное распределение нагрузки между одновременно работающими агрегатами, выпрямители B_k выполнены управляемыми с блоками управления $БУB_k$.

В соответствии с изложенными выше принципами работы СЭС углы управления выпрямителями B_k должны определяться выражением

$$\alpha_k = \alpha_0 + \Delta\alpha_k. \quad (16)$$

Здесь α_0 – составляющая, обусловленная действием контура стабилизации напряжения U_d ; $\Delta\alpha_k$ – составляющая, которая зависит от распределения нагрузки между агрегатами.

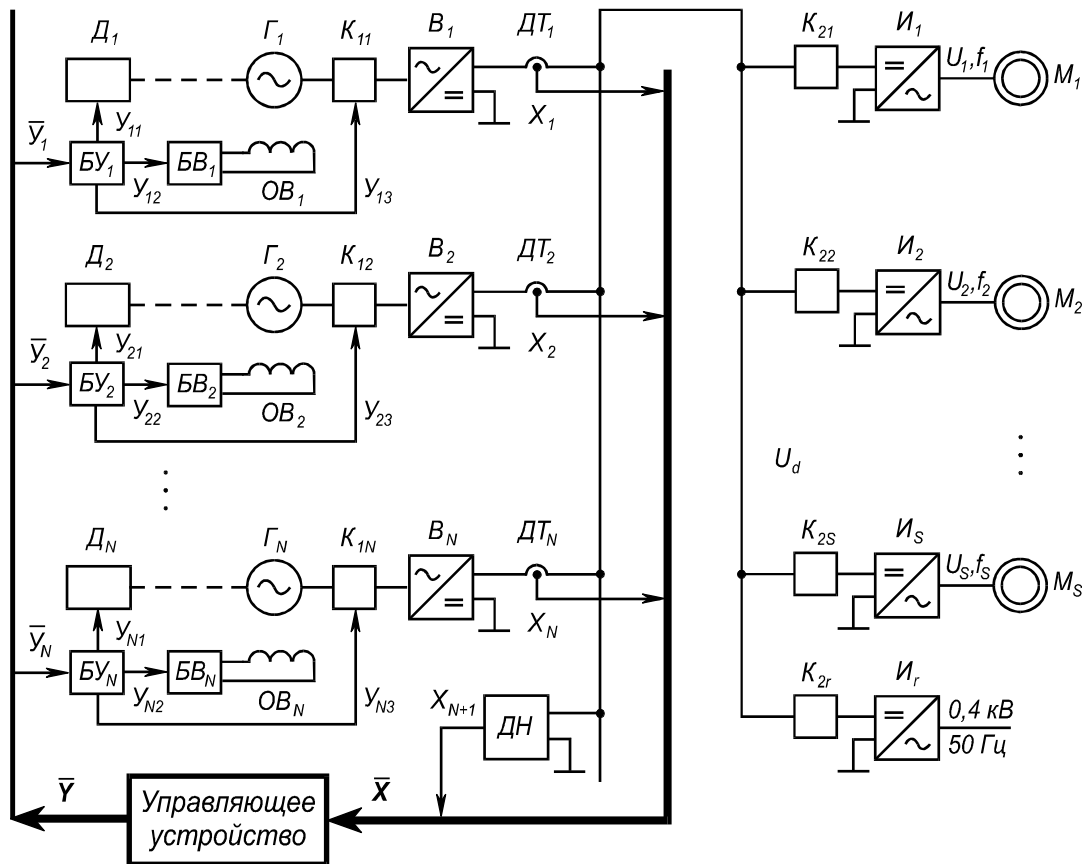


Рис. 4. Автономная СЭС на основе генераторов с постоянными магнитами

Возможны различные варианты построения управляющего устройства в схемах автономных СЭС, которые показаны на рис. 3 и 4. Наибольшими функциональными возможностями обладают, естественно, устройства на базе микропроцессоров [7, 8]. Серийный выпуск таких устройств освоен многоотраслевым производственным предприятием «Энерготехника», г. Саратов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белоусенко И.В. Энергетика и электрификация газовых промыслов и месторождений / И.В. Белоусенко, Г.Р. Шварц, В.А. Шпилевой. Тюмень, 2000. 273 с.
2. Меньшов Б.Г. Электротехнические установки и комплексы в нефтегазовой промышленности / Б.Г. Меньшов, М.С. Ершов, А.Д. Яризов. М.: Недра, 2000. 487 с.
3. Модернизация синхронных генераторов в системах электроснабжения газотурбинных компрессорных станций / И.И. Артюхов, И.И. Аршакян, А.В. Коротков, Н.В. Погодин // Вестник УГТУ–УПИ. 2003. № 5(25). Ч. 1. Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы. С. 202-205.
4. Некоторые аспекты применения силовой преобразовательной техники в автономных источниках электроснабжения / С.Ф. Степанов, И.И. Артюхов, А.В. Коротков, Н.В. Погодин // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2004. № 4(5). С. 91-96.
5. Артюхов И.И. Моделирование переходных процессов в автономной системе электроснабжения с объединенным звеном постоянного тока / И.И. Артюхов, А.В. Коротков // Проблемы электроэнергетики: межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ, 2005. С. 11-16.
6. Левин А.В. Автономные системы электроснабжения / А.В. Левин, Н.Н. Лаптев // Интеграл. 2003. № 1(9). С. 12-13.
7. Артюхов И.И. Состояние и перспективы развития систем возбуждения синхронных генераторов, установленных на объектах ОАО «Газпром» / И.И. Артюхов, А.В. Коротков, Н.В. Погодин // Новые техника и технологии в энергетике ОАО «Газпром»: материалы науч.-техн. совета (Москва, ноябрь 2001 г.). М.: ИРЦ Газпром, 2002. Ч. 1. С. 110-114.
8. Применение микропроцессорных устройств в системах электроснабжения компрессорных станций магистрального транспорта газа / И.И. Аршакян, А.В. Коротков, Н.В. Погодин и др. // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП-2002): материалы Междунар. науч.-техн. конф. Саратов: СГТУ, 2002. С. 386-390.

Артюхов Иван Иванович –

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий»
Саратовского государственного технического университета

Аршакян Игорь Ишханович –

кандидат технических наук,
начальник отдела главного энергетика ООО «Тюментрансгаз», г. Югорск Тюменской обл.

Коротков Александр Викторович –

кандидат технических наук, технический директор ООО МПП «Энерготехника»

Погодин Николай Васильевич –

главный инженер филиала «Саратоворгдиагностика» ДОО «Оргэнергогаз»

Степанов Сергей Федорович –

кандидат технических наук,
докторант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий»
Саратовского государственного технического университета

**И.И. Артюхов, И.И. Аршакян, М.В. Жабский,
А.В. Коротков, Н.В. Погодин, А.А. Тримбач**

**НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО
ЭЛЕКТРОПРИВОДА В СИСТЕМАХ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ
КОМПРИМИРОВАННОГО ГАЗА**

Оснащение систем воздушного охлаждения газа частотно-регулируемым электроприводом позволяет получить неоспоримые преимущества. Однако это возможно только при грамотном решении целого комплекса задач на стыке знаний в области теплообмена, электротехники, регулируемого электропривода и силовой электроники. Рассмотрению этих задач посвящена настоящая статья.

**I.I. Artjukhov, I.I. Arshakyan, M.V. Zhabskiy,
A.V. Korotkov, N.V. Pogodin, A.A. Trimbach**

**SOME ASPECTS OF APPLICATION OF THE CONTROLLED-VELOCITY
ELECTRIC DRIVE IN AIR COOLING SYSTEMS OF COMPRESSED GAS**

Equipping air cooling systems of compressed gas by the controlled-velocity electric drive allows receiving conclusive advantages. However it is possible only at the competent decision of the whole complex of problems on a joint of knowledge in the field of heat mass exchange, the electrical engineering, the controlled-velocity electric drive and power electronics. The article demonstrates the consideration of these problems.

Охлаждение газа является неотъемлемой частью технологического процесса при его транспортировке по магистральным газопроводам (МГ). В процессе компримирования газ нагревается, вызывая температурный перепад на участке газопровода между компрессорными станциями (КС). Для устранения продольных температурных напряжений и деформаций трубопровода КС МГ оснащают установками охлаждения газа, которые состоят из определенного количества аппаратов воздушного охлаждения (АВО) [1]. В состав установки охлаждения газа входят обычно от 10 до 14 АВО с двумя электроприводными вентиляторами.

Технологическая схема охлаждения газа показана на рис. 1. После компримирования газ под рабочим давлением около 7,5 МПа проходит по трубчатым теплообменным секциям АВО-1...АВО-N. Через межтрубное пространство теплообменной секции с помощью электроприводных вентиляторов прокачивается воздух. За счет теплообмена с принудительно перемещаемым потоком воздуха происходит снижение температуры газа.

Конструктивные различия АВО газа заключаются в способе пространственного расположения теплопередающей поверхности и взаимном расположении теплопередающей поверхности и вентилятора, обеспечивающего перемещение охлаждающей среды. Наиболее часто АВО газа выполняют в виде горизонтальных теплообменных секций из оребренных труб в комплекте с электроприводными вентиляторами осевого типа. Широкое распространение получили аппараты отечественного производства 2АВГ-75, аппараты зарубежных фирм «Крезолуар», «Хадсон-Итальяно», «Нуово-Пиньоне» и другие.

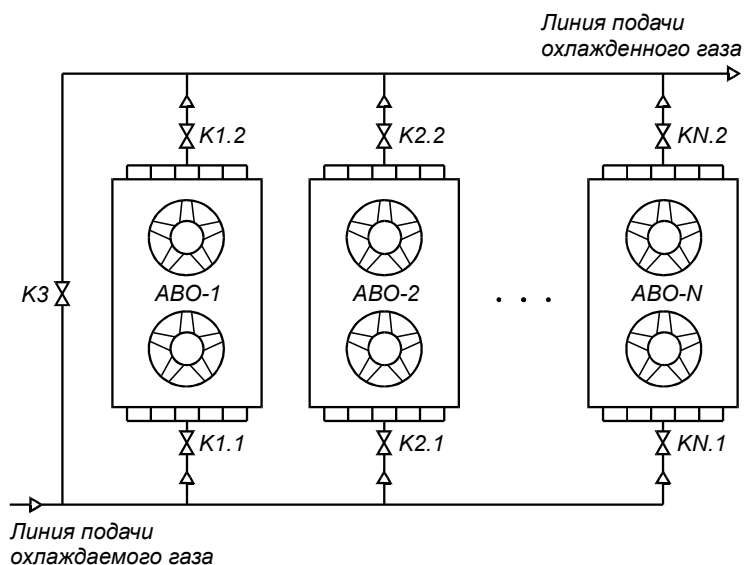


Рис. 1. Технологическая схема охлаждения газа

Типовая схема электроснабжения АВО газа показана на рис. 2. В соответствии с требованиями нормативных документов комплектные трансформаторные подстанции (КТП) имеют по два понизительных трансформатора Т1 и Т2, допустимая нагрузка которых составляет 50 или 70% для объектов 1-й и 2-й категории электроснабжения соответственно. На КТП отечественного производства устанавливают в основном трансформаторы типа ТМЗ с номинальной мощностью 630 или 1000 кВА.

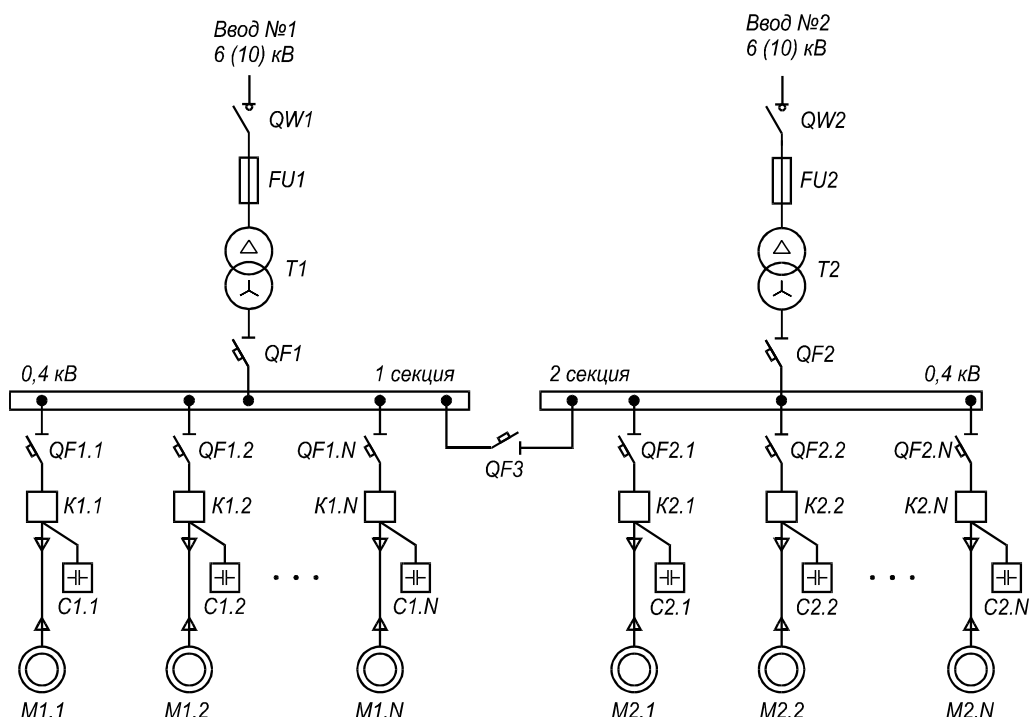


Рис. 2. Типовая схема электроснабжения АВО газа

Первичные обмотки трансформаторов подключают к кабельным линиям 6(10) кВ через выключатели нагрузки QW1, QW2 и предохранители FU1, FU2. Подача напряжения на шины секций 0,4 кВ осуществляется с помощью автоматических выключателей QF1, QF2.

Для перевода электроснабжения всех потребителей на один из трансформаторов в случае неисправности другого трансформатора служит секционный выключатель QF3.

Электродвигатели вентиляторов M1.1...M1.N и M2.1...M2.N получают питание по кабелям, которые проложены на эстакадах и подключаются к шинам секций 0,4 кВ через автоматические выключатели QF1.1...QF1.N, QF2.1...QF2.N и магнитные пускатели (контакторы) K1.1...K1.N, K2.1...K2.N. Аппаратура управления позволяет осуществлять только прямые пуски двигателей, которые приводят к переходным процессам со значительными перегрузками как для элементов схемы электроснабжения, так и механических узлов АВО [2].

Для уменьшения потерь мощности и обеспечения нагрузочной способности трансформаторов параллельно электродвигателям подключают конденсаторы C1.1...C1.N и C2.1...C2.N, параметры которых выбираются исходя из условия компенсации реактивной мощности соответствующего электродвигателя в номинальном режиме. Возможны также варианты применения централизованной компенсации реактивной мощности [3].

АВО подвержены влиянию различных факторов, от которых зависит их тепловая производительность. Возмущающими воздействиями являются параметры окружающей среды, расходы охлаждаемых продуктов и их начальная температура, степень загрязнения поверхности теплообмена. Это приводит к необходимости регулирования охлаждающего эффекта АВО для поддержания температуры технологического продукта в заданных пределах, в частности за счет изменения расхода охлаждающего воздуха.

На расход охлаждающего воздуха влияют следующие факторы: количество одновременно работающих вентиляторов, частота вращения рабочего колеса вентилятора, угол атаки лопастей. В системах охлаждения газа, которые в настоящее время эксплуатируются на КС МГ, требуемая температура газа обеспечивается за счет включения или отключения вентиляторов в сочетании с сезонной регулировкой угла атаки лопастей. Результаты энергетического обследования, проведенного на ряде предприятий газовой промышленности, показали, что во многих случаях эксплуатации АВО управление ими осуществляется вручную по командам диспетчера с местных пультов управления, расположенных непосредственно перед аппаратами. Контроль состояния АВО газа осуществляется путем обхода и осмотра оборудования. Фиксация нахождения АВО в работе, фактического времени наработки, отказов осуществляется по записям в формулярах АВО, а также в оперативных журналах сменного эксплуатационного персонала. При аварийных или нештатных ситуациях отключение вентиляторов АВО возможно с диспетчерского щита КС (дистанционное) и с местного пульта управления.

Недостатки такой технологии эксплуатации АВО газа очевидны. Эффективность управления АВО в значительной степени определяется субъективными факторами, опытом и квалификацией персонала КС. Кроме того, в течение суток имеют место значительные колебания температуры воздуха, что непосредственно влияет на процесс охлаждения газа. Естественно, что такое управление приводит к неточности поддержания температуры газа и нерациональным затратам электроэнергии. Исследованиями, в частности, установлено, что включение нескольких вентиляторов АВО при определенных условиях не приводит к заметному снижению температуры компримированного газа, однако сопровождается затратами электроэнергии [4].

Мощность, потребляемая электродвигателями АВО одного компрессорного цеха, составляет сотни киловатт, что оказывает существенное влияние на структуру электропотребления КС МГ, особенно с приводом нагнетателей от газотурбинных двигателей. На таких предприятиях ежегодный расход электроэнергии на охлаждение компримированного газа может составлять 60-70% и более электропотребления на товарно-транспортную работу. Таким образом, повышение эффективности работы установок, осуществляющих охлаждение компримированного газа, является важным фактором экономии топливно-энергетических ресурсов и снижения себестоимости транспорта газа.

Рассмотрим подробнее процессы в АВО газа. Основу их математического описания составляют три уравнения: теплового баланса, теплопередачи и аэродинамики. Проходя по теплообменным секциям АВО, охлаждаемый продукт (газ) отдает количество теплоты Q , основная часть которой воспринимается воздухом. Так как не происходит изменения агрегатного состояния продукта, уравнение теплового баланса имеет вид [5]

$$Q = c_{II} \cdot G_{II} \cdot (T_{BX} - T_{ВЫХ}) = c_B \cdot G_B \cdot (\theta_{B2} - \theta_{B1}), \quad (1)$$

где c_{II} , c_B , G_{II} , G_B – теплоемкости (кДж/(кг·К)) и массовые расходы (кг/с) газа и воздуха соответственно; T_{BX} , $T_{ВЫХ}$, θ_{B1} , θ_{B2} – значения входных и выходных температур газа и воздуха соответственно.

Значения теплоемкости воздуха c_B и его массового расхода G_B рассчитываются по формулам

$$c_B = 1,0005 + 1,1904 \cdot 10^{-4} \cdot \theta_{CP}; \quad (2)$$

$$G_B = \rho_B \cdot V_B, \quad (3)$$

где $\rho_B = \frac{3,4839 \cdot P_B}{\theta_{CP} + 273}$, кг/м³ – плотность воздуха при средней температуре $\theta_{CP} = 0,5 \cdot (\theta_{B1} + \theta_{B2})$;

P_B – давление воздуха, кПа; V_B – объемный расход воздуха, м³/с.

Количество теплоты, переданное через поверхность теплообмена с площадью F (м²), определяется выражением

$$Q = K_P \cdot \Delta t_{CP} \cdot F, \quad (4)$$

где K_P – коэффициент теплопередачи, кВт/(м²·К); Δt_{CP} – средний температурный напор, К. Коэффициент теплопередачи рассчитывается по формуле

$$K_P = \left(\frac{\psi}{\alpha_{BH}} + \frac{1}{\alpha_H} + \psi \cdot r_3 \right)^{-1}, \quad (5)$$

где α_{BH} , α_H – коэффициенты теплоотдачи со стороны продукта и воздуха соответственно, кВт/(м²·К); ψ – коэффициент увеличения поверхности, зависящий от типа оребрения и материала теплообменных труб АВО; r_3 – термическое сопротивление загрязнений внутри труб, м²·К/кВт.

Выражение для расчета среднего температурного напора имеет вид

$$\Delta t_{CP} = \frac{(T_{BX} - \theta_{B2}) - (T_{ВЫХ} - \theta_{B1})}{\ln[(T_{BX} - \theta_{B2}) / (T_{ВЫХ} - \theta_{B1})]} \cdot \varepsilon_t, \quad (6)$$

где ε_t – поправочный коэффициент на перекрестный ход.

Коэффициенты α_{BH} , α_H в формуле (3) зависят от многих факторов [6]. Основными из них являются:

- характер движения газа внутри труб;
- физические свойства газа и воздуха;
- скорости потоков газа и воздуха;
- направление тепловых потоков.

Из указанных факторов только один может быть использован для управления процессами в АВО. Это – скорость воздуха w_B в узком сечении теплообменных секций, которая входит в следующее эмпирическое выражение:

$$\alpha_H = \sigma_1 \cdot \lg w_B - \sigma_2 \cdot \theta_{CP} - \sigma_3, \quad (7)$$

где σ_1 , σ_2 , σ_3 – коэффициенты, зависящие от материального исполнения труб.

В свою очередь, скорость воздуха w_B зависит от объемной производительности вентиляторов V_B ($\text{м}^3/\text{с}$), конструктивных особенностей и температурного режима АВО:

$$w_B = \frac{B \cdot V_B \cdot n \cdot (\theta_{CP} + 273)}{F \cdot (\theta_{B1} + 273)}, \quad (8)$$

где B – коэффициент, зависящий от типа аппарата и коэффициента оребрения труб; n – число рядов труб в теплообменной секции по ходу воздуха.

Суммарный объем воздуха, который прогоняется N вентиляторами через секции АВО,

$$V_B = \sum_{k=1}^N V_{Bk}, \quad (9)$$

где V_{Bk} – производительность k -го вентилятора, которая может быть определена с помощью известной в аэродинамике формулы

$$V_{Bk} = K_V \cdot D^3 \cdot \omega_k. \quad (10)$$

В формуле (10) D – диаметр рабочего колеса вентилятора; K_V – коэффициент, зависящий от конструктивных особенностей вентилятора, в том числе от угла установки лопастей; ω_k – частота вращения рабочего колеса вентилятора.

С учетом формул (9) и (10) из выражения (3) получим

$$G_B = \rho_B \cdot K_V \cdot D^3 \cdot \sum_{k=1}^N \omega_k. \quad (11)$$

Частота вращения ω_k рабочего колеса вентилятора определяется в результате пересечения механической характеристики приводного двигателя $M=M(\omega)$ с нагрузочной характеристикой, которая в рассматриваемом случае имеет вид

$$M = K_M \cdot \omega^2, \quad (12)$$

где K_M – коэффициент вентилятора, который зависит от угла установки лопастей и физических свойств охлаждающего воздуха.

Давление воздуха, которое создается вентилятором, может быть определено на основании зависимости

$$H_B = \beta \cdot n \cdot (w_B \cdot \rho_B)^\gamma, \quad (13)$$

где β и γ – эмпирические коэффициенты, зависящие от расположения труб в теплообменных секциях и длительности эксплуатации без чистки наружной поверхности [2].

Для вновь устанавливаемых аппаратов, не имеющих пылевых и волокнистых отложений на первых рядах труб по ходу воздуха и внутри теплообменных секций, $\beta=0,5$; $\gamma=1,15$. При длительной эксплуатации значения коэффициентов приближаются к следующим величинам: $\beta=2,5$; $\gamma=1,75$.

Мощность, потребляемая электродвигателем k -го вентилятора, определяется по формуле

$$P_{Д,k} = \frac{V_{Bk} \cdot H_{Bk}}{\eta_B \cdot \eta_{II} \cdot \eta_{II}}, \quad (14)$$

где η_B , η_{II} , η_{II} – соответственно КПД вентилятора, механической передачи и электродвигателя.

КПД вентилятора является функцией производительности и угла установки лопастей.

При работе вентилятора в режиме, близком к номинальному, $\eta_B=0,6 \div 0,7$.

КПД механической передачи при непосредственной установке колеса вентилятора на вал двигателя $\eta_{II}=1$. Если привод вентилятора осуществляется через клиноременную передачу, то $\eta_{II}=0,94 \div 0,96$. При редукторном приводе $\eta_{II}=0,87 \div 0,98$.

Суммарная мощность, потребляемая электродвигателями АВО газа, определится из выражения

$$P_{Д} = \sum_{k=1}^N P_{Д,k} . \quad (15)$$

Из формулы (11) следует, что стабилизация температуры охлаждаемого продукта в рассматриваемой системе может быть осуществлена различным сочетанием управляющих воздействий ω_k за счет вариации параметров электрической энергии: напряжения U_k и частоты f_k , – на статорных обмотках электродвигателей.

Автоматизированная система стабилизации температуры газа с регулируемым приводом вентиляторов в общем случае может быть представлена структурной схемой, которая показана на рис. 3. Объектом управления являются теплообменные секции, через которые проходит охлаждаемый газ. Начальная температура газа $T_{ВХ}$, его массовый расход $G_{П}$, а также температура охлаждающего воздуха θ_B являются возмущающими воздействиями. Частоты вращения ω_k вентиляторов, определяющие массовые расходы воздуха $G_{Вk}$, служат управляющими воздействиями в системе стабилизации температуры $T_{ВЫХ}$.

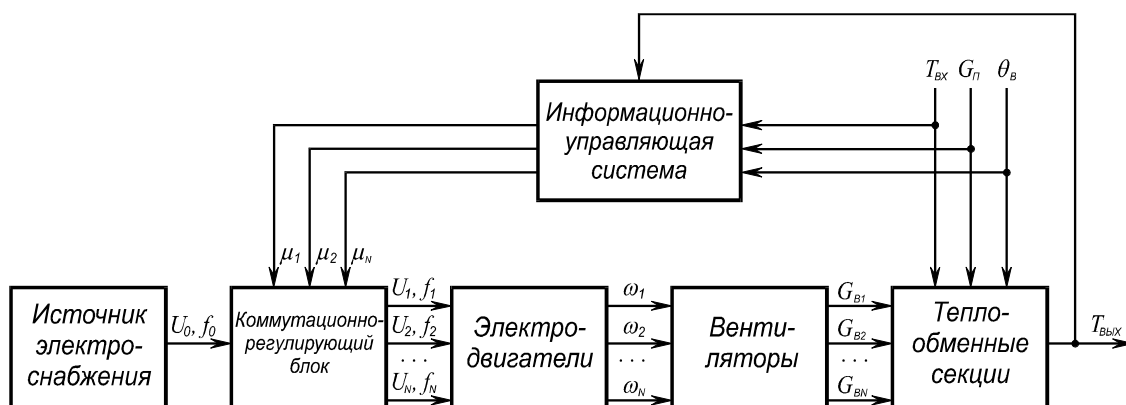


Рис. 3. Структурная схема системы стабилизации температуры газа с регулируемым электроприводом вентиляторов АВО

Информационно-управляющая система на основании информации о состоянии возмущающих воздействий и стабилизируемого параметра формирует сигналы $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_N$ на управляющих входах коммутационно-регулирующего блока, который в общем случае преобразует электрическую энергию источника электроснабжения с напряжением U_0 и частотой f_0 в N трехфазных систем напряжений U_k с частотой f_k на статорных обмотках приводных двигателей.

Алгоритм управления электродвигателями вентиляторов определяется количеством АВО, требованиями к точности стабилизации температуры, диапазоном и частотой изменения возмущающих воздействий. При достаточно большом количестве АВО необходимая точность поддержания температуры газа может быть обеспечена за счет дискретного изменения производительности вентиляторов. Задачей системы автоматизированного управления является при этом отыскание необходимого количества $n=f(T_{ВХ}, G_{П}, \theta_B)$ одновременно работающих вентиляторов, при котором температура газа после теплообменных секций будет находиться в заданном диапазоне. Напряжение U_k и частота f_k на статорных обмотках работающих двигателей будут соответствовать параметрам питающей сети. Вместе с тем параметры U_k и f_k могут изменяться в пусковых режимах для исключения токовых и механических перегрузок.

Недостатки дискретного способа управления электродвигателями вентиляторов проявляются при глубоких и частых изменениях возмущающих воздействий, в частности температуры охлаждающего воздуха θ_B . Такая ситуация имеет место при эксплуатации АВО газа в

условиях резко континентального климата, что характерно для значительного количества объектов магистрального транспорта газа. Сезонные и суточные колебания температуры воздуха приводят не только к изменению массового расхода воздуха. В соответствии с выражением (12) изменению подвержены характеристики мехатронной системы электродвигатель – вентилятор, что приводит к работе в неоптимальных режимах. Влияние сезонных колебаний температуры на режим работы АВО в настоящее время частично компенсируется регулировкой лопастей вентиляторов, которая является трудоемкой операцией, проводимой, как правило, в неблагоприятных погодных условиях. При этом мехатронная система оказывается настроенной в оптимум для некоторого усредненного значения температуры за определенный сезон. Суточные отклонения температуры от этого значения по-прежнему приводят к работе электродвигателей и вентиляторов с ухудшенными энергетическими показателями, хотя и в меньшей степени, чем без сезонной регулировки лопастей.

Оптимизация режима работы АВО газа, эксплуатируемых в условиях резко континентального климата, может быть достигнута за счет частотного регулирования производительности вентиляторов [6]. Из выражений (10), (13) и (14) следует, что мощность, потребляемая мехатронной системой электродвигатель – вентилятор, зависит от частоты вращения вентилятора примерно в третьей степени. Поэтому в заданном диапазоне изменения возмущающих воздействий затраты электроэнергии при частотном управлении электродвигателями вентиляторов будут всегда меньше, чем при дискретном управлении.

Современный уровень развития силовой преобразовательной техники позволяет реализовать различные варианты построения коммутационно-регулирующего блока в схеме рис. 3. Согласно первому из них, все электродвигатели АВО газа подключаются к выходу одного преобразователя частоты (ПЧ). В этом случае будет осуществляться регулирование производительности всех вентиляторов в функции отклонения температуры газа в выходном коллекторе от заданного значения. Недостаток варианта состоит в том, что для обеспечения требуемой надежности электроснабжения необходим резервный ПЧ такой же мощности, как и основной ПЧ.

Второй вариант предполагает установку ПЧ по количеству электродвигателей. Соответствующая схема КТП АВО газа показана на рис. 4.

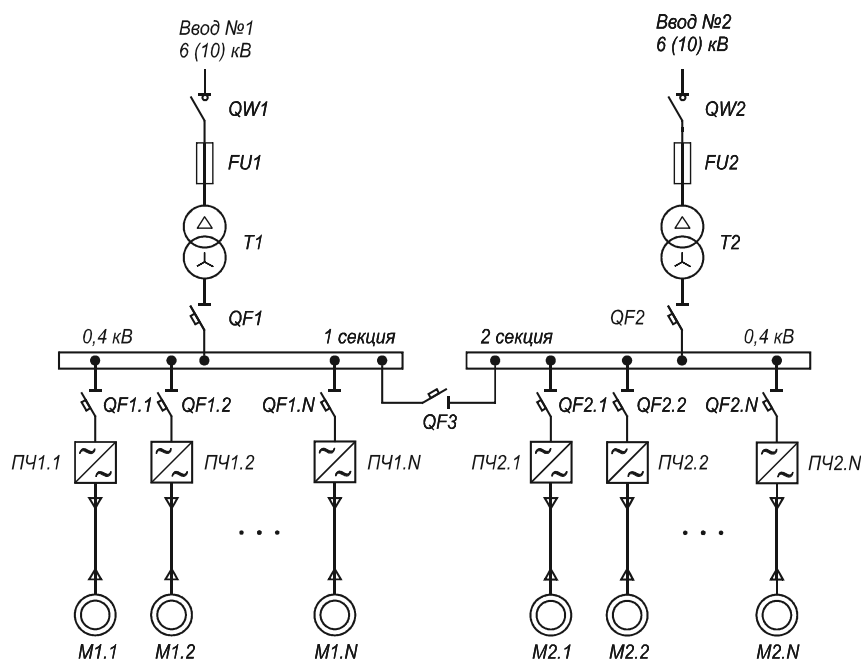


Рис. 4. Схема КТП с преобразователями частоты для регулирования производительности вентиляторов АВО газа

Возможно, что стоимость этого варианта окажется больше, чем первого. Однако его реализация предоставляет целый спектр функциональных возможностей. В частности, появляется возможность регулировать температуру в отдельных секциях, что необходимо при реально существующих разбросах в углах установки лопастей вентиляторов, степени загрязненности наружной поверхности теплообменников и состояния пластин оребрения. Можно воспользоваться заложенными в программном обеспечении большинства современных ПЧ средствами мониторинга электропривода, обеспечить индивидуальную защиту электродвигателей.

Кроме того, имеют право на рассмотрение промежуточные варианты, когда все множество электродвигателей АВО разбивается на группы, каждая из которых получает электроэнергию от соответствующего преобразователя. Для установки охлаждения газа, содержащей 12 единиц АВО газа, возможны, например, варианты подключения к одному ПЧ двух, четырех или шести электродвигателей.

Необходимо, однако, помнить о том, что применение частотно-регулируемых электроприводов имеет некоторые негативные стороны. В частности, при малых оборотах ухудшаются условия охлаждения двигателей. Отдельной проблемой является электромагнитная совместимость ПЧ с электроприемниками, которые запитаны от тех же шин, что и преобразователи, а также с другими техническими средствами, которые функционируют в непосредственной близости от частотно-регулируемого электропривода.

В настоящее время наибольшее распространение получили ПЧ, построенные по схеме: неуправляемый входной выпрямитель, сглаживающий фильтр и автономный инвертор напряжения на модулях типа IGBT с широтно-импульсной модуляцией. Несинусоидальная форма выходного напряжения ПЧ является причиной дополнительных потерь электроэнергии в двигателе. Коммутационные процессы в ПЧ приводят к излучению недопустимо высоких радиопомех, способных вызвать нарушение работы радиоэлектронного оборудования, расположенного вблизи от ПЧ или их силовых кабелей.

Высшие гармоники в кривой тока, потребляемого преобразователем, дополнительно нагружают трансформатор и кабельные линии. Происходит искажение формы напряжения на шинах КТП, что отрицательно сказывается на работе потребителей, подключенных к этим шинам, а также самих преобразовательных устройств. Возрастает вероятность сбоев в работе систем автоматики, возникают погрешности в показаниях счетчиков электрической энергии.

Ситуация усугубляется тем, что в условиях жесткой конкуренции на рынке ПЧ их производители в погоне за снижением массогабаритных и стоимостных показателей максимально вывели за пределы конструкции, называемой ПЧ, все силовые электромагнитные элементы, за исключением конденсаторов фильтра в звене постоянного тока. Это привело к тому, что потребляемые преобразователями токи имеют форму, существенно отличающуюся от синусоиды.

На рис. 5 в качестве примера приведены осциллограммы напряжений и токов, которые были получены при экспериментальном исследовании ПЧ фирмы FUJI Electric в системе электроснабжения АВО газа на одном из объектов ООО «Тюментрансгаз». На этом же рисунке показан частотный спектр потребляемого преобразователем тока при работе двигателя в номинальном режиме [7].

Питание электропривода осуществлялось от понизительного трансформатора ТМЗ-1000/10 с напряжением короткого замыкания 5,5%. При отключенных потребителях коэффициент искажения синусоидальности напряжения составлял 2,76%. После подключения к трансформатору только одного электропривода, работающего в номинальном режиме, этот коэффициент увеличился до 5,24%. Коэффициент искажения синусоидальности кривой входного тока ПЧ имеет значение 96,9%. При этом основной вклад в искажение формы тока вносят 5-я и 7-я гармоники, значения которых относительно 1-й гармоники составляют 76,6 и 52,3% соответственно. Действующее значение входного тока ПЧ равно 98,6 А, при этом амплитуда превышает это значение в 2,25 раза. Из-за указанной формы тока коэффициент мощности преобразователя составляет 0,56.

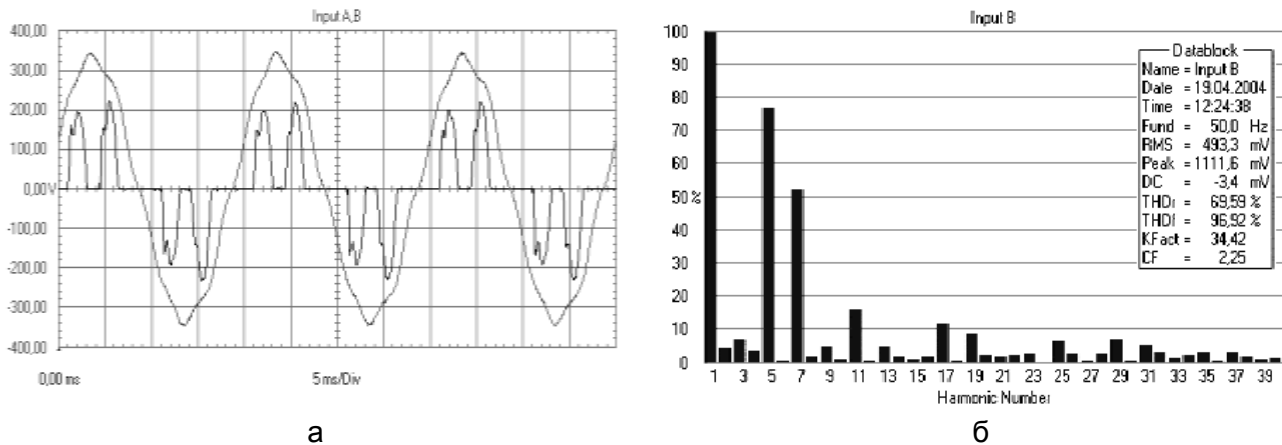


Рис. 5. Осциллограммы сетевого напряжения и входного тока (а) и спектральный состав тока (б) преобразователя частоты типа FUJI Electric Frenic 5000 FRN 45G11S-4EN

Для того, чтобы работа частотно-регулируемых электроприводов в системе электропитания происходила в соответствии с требованиями директивных документов по электромагнитной совместимости, преобразователи дополнительно оснащают входными и выходными фильтрами, которые в существующем формате торговли устройствами силовой электроники относятся к опциям и должны приобретаться за дополнительную плату. Необходимо отметить, что стоимость фильтров ЭМС достаточно высока и составляет до 30 % стоимости ПЧ. Поэтому задача по оптимизации их параметров представляется чрезвычайно актуальной.

Для получения данных о влиянии индуктивности сетевых дросселей на показатели качества тока, потребляемого преобразователем FUJI Electric Frenic 5000 FRN 45G11S-4EN, было проведено экспериментальное исследование с помощью сетевых дросселей типа КЕВ21.DR.B18.2841. После установки сетевого дросселя с индуктивностью 0,25 мГн на вход ПЧ коэффициент искажения синусоидальности тока стал равен 66,8%, относительные значения 5-й и 7-й гармоник составили 57,2 и 24,6% соответственно. Действующее значение входного тока ПЧ уменьшилось до значения 61,6 А. Благодаря этому коэффициент мощности электропривода равен 0,83. Если индуктивность сетевого дросселя увеличить до 0,5 мГн, то коэффициент искажения синусоидальности тока уменьшается до значения 41,9%. Относительные значения 5-й и 7-й гармоник составляют при этом 36,5 и 12,6%. Коэффициент мощности становится равным 0,89.

В существующих системах электроснабжения АВО газа (рис. 2) необходимая нагрузочная способность КТП обеспечивается применением конденсаторных компенсирующих устройств. При оснащении КТП АВО газа преобразователями частоты компенсация реактивной мощности не требуется, однако возникает проблема искажающего влияния преобразователей на питающую сеть. Таким образом, могут быть сформулированы следующие две взаимосвязанные задачи.

1. Заданы параметры трансформатора, кабельных линий, коммутационных аппаратов и других элементов системы электроснабжения. Требуется определить количество частотно-регулируемых электроприводов, которые можно подключить к данному трансформатору без нарушения условий эксплуатации.

2. Заданы параметры асинхронных двигателей с вентиляторной нагрузкой, управляемых с помощью ПЧ, их количество, режимы работы. Требуется определить, какие параметры должны иметь питающий трансформатор и другие элементы системы электроснабжения.

Развитием этих двух задач является третья задача, которая предусматривает нахождение структуры и параметров фильтров ЭМС, позволяющих увеличить количество

частотно-регулируемых электроприводов в задаче 1 или снизить мощность трансформатора, уменьшить сечение кабелей, выбрать коммутационные аппараты меньшего типоразмера в задаче 2.

Кроме решения задач, связанных с кондуктивным влиянием ПЧ, необходимо обратить внимание на способы монтажа преобразователей и подключения к ним электродвигателей АВО газа, которые удалены от КТП на расстояние до 100 м. Здесь может проявить себя проблема «длинного кабеля», соединяющего обмотки электродвигателей с выходом автономного инвертора. Выходное напряжение АИН с ШИМ представляет собой высокочастотную последовательность прямоугольных импульсов, прохождение которых по кабелю вызывает волновые перенапряжения на зажимах двигателя. Устранение негативного воздействия перенапряжений на изоляцию обмоток АД достигается применением специальных фильтров, включаемых в выходные цепи АИН, что, в свою очередь, приводит к увеличению стоимости электротехнического комплекса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Степанов О.А. Охлаждение газа и масла на компрессорных станциях / О.А. Степанов, В.А. Иванов. Л.: Недра, 1982. 143 с.
2. Аршакян И.И. Динамические режимы в системах электроснабжения установок охлаждения газа / И.И. Аршакян, И.И. Артюхов. Саратов: СГТУ, 2004. 120 с.
3. Аршакян И.И. Компенсация реактивной мощности в системах электроснабжения аппаратов воздушного охлаждения газа / И.И. Аршакян, И.И. Артюхов, С.Ф. Степанов // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2004. № 1(2). С. 90-98.
4. Артюхов И.И. Моделирование динамических режимов АВО предприятий подготовки и транспорта газа / И.И. Артюхов, И.В. Долотовский, Н.В. Долотовская // Актуальные вопросы промышленной теплоэнергетики и энергосбережения: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2004. С. 91-98.
5. Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения: справочник / А.Н. Бессонный, Г.А. Дрейцер, В.Б. Кунтыш и др.; под общ. ред. В.Б. Кунтыша, А.Н. Бессонного. СПб.: Недра, 1996. 512 с.
6. Направления и перспективы применения регулируемого электропривода на компрессорных станциях транспорта и хранения газа / И.И. Артюхов, И.И. Аршакян, А.В. Коротков, Н.В. Погодин // Электротехнические комплексы и силовая электроника. Анализ, синтез и управление: межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ, 2001. С. 26-30.
7. Вопросы электромагнитной совместимости при оснащении вентиляторов АВО газа частотно-регулируемыми электроприводами / И.И. Артюхов, М.В. Жабский, И.И. Аршакян, А.А. Тримбач // Проблемы электроэнергетики: межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ, 2005. С. 55-60.

Артюхов Иван Иванович –

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий»
Саратовского государственного технического университета

Аршакян Игорь Ишханович –

кандидат технических наук,
начальник отдела главного энергетика ООО «Тюментрансгаз», г. Югорск Тюменской обл.

Жабский Михаил Васильевич –

аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий»
Саратовского государственного технического университета

Коротков Александр Викторович –

кандидат технических наук, технический директор ООО МПП «Энерготехника»

Погодин Николай Васильевич –

главный инженер филиала «Саратоворгдиагностика» ДОО «Оргэнергогаз»

Тримбач Алексей Анатольевич –

аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий»

Саратовского государственного технического университета,

инженер 1-й категории ООО «Тюментрансгаз», г. Югорск Тюменской области

УДК 621.318.3

В.И. Мошкин, А.А. Егоров, Г.Г. Угаров

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ФОРСИРОВАННОГО АККУМУЛИРОВАНИЯ МАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ В ИМПУЛЬСНЫХ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

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

V.I. Moshkin, A.A. Egorov, G.G. Ugarov

FORCED ACCUMULATION OF MAGNETIC ENERGY MODES RESEARCH IN PULSED LINEAR ELECTROMAGNETIC ENGINES

The analysis of the performance of the pulsed linear electromagnetic engine has been carried out considering influence of initial counteracting effort on power and dynamic parameters for various magnetic cycles is considered here.

Среди машин, реализующих импульсные технологии в машиностроении, горном деле, строительстве, сейсморазведке, большую перспективность использования имеют силовые электромагнитные импульсные системы (СЭМИС) на основе линейных электромагнитных двигателей (ЛЭМД) [1-3]. Для дальнейшего расширения области применения СЭМИС в традиционных и новых высокоэнергетических импульсных технологиях необходимо повышение силовых и энергетических показателей ЛЭМД, определяющих их экономичность, металлоемкость, технологичность.

Одним из эффективных путей повышения энергии и КПД ЛЭМД является форсированное аккумулирование магнитной энергии в его рабочих воздушных зазорах во время рабочего цикла [1, 2].

Практическая реализация указанного способа повышения показателей состоит в приложении к якору ЛЭМД противодействующего усилия $F_{II}(\delta)$. Оно препятствует на этапе трогания якоря его движению до момента достижения током обмотки заданной величины, которая обуславливает заданное начальное противодействующее усилие – усилие удержания $F_0 = F_{II}(\delta_1)$ при $t \leq t_0$.

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

$$M \frac{d^2\delta}{dt^2} = F_3(\delta) - F_{II}(\delta),$$

можно получить уравнение энергетического баланса [3] при начальной скорости $V_1=0$:

$$\frac{M \cdot V_2^2}{2} = \int_{\delta_1}^{\delta_2} F_3(\delta) d\delta - \int_{\delta_1}^{\delta_2} f_{II}(\delta) d\delta, \quad (1)$$

где M , δ – масса и перемещение якоря; $F_3(\delta)$ – электромагнитное усилие; V_2 – конечная скорость движения якоря; δ_1 и δ_2 – начальное и конечное значения перемещения.

Пусть усилие $F_{II}(\delta)$ изменяется скачком в соответствии с графиком (рис. 1) и выражением (2):

$$F_{II}(\delta) = \begin{cases} F_0 & \text{при } t \leq t_0 \text{ и } \delta = \delta_1; \\ f_{II}(\delta) & \text{при } t > t_0 \text{ и } \delta \neq \delta_1. \end{cases} \quad (2)$$

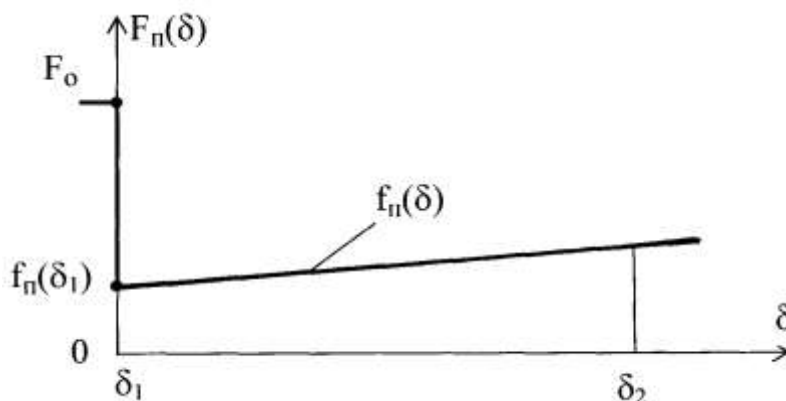


Рис. 1

Так как при движении якоря импульсного ЛЭМД в приводе машин ударного действия противодействующее усилие $F_{II}(\delta)$ обусловлено в основном возвратной пружиной, а электромагнитное тяговое усилие $F_3(\delta)$ во много раз больше $f_{II}(\delta)$, то примем $f_{II}(\delta) \approx 0$. Тогда выражение (1) упростится, а $F_3(\delta)$ будет представлять собой динамическое тяговое усилие:

$$\frac{M \cdot V_2^2}{2} = \int_{\delta_1}^{\delta_2} F_3(\delta) d\delta. \quad (3)$$

Выразим при этих условиях правую часть (3) как механическую работу A на этапе преобразования в нее магнитной энергии двигателя. Для этого воспользуемся вебер-амперными магнитными характеристиками при ненасыщенной магнитной системе ЛЭМД за время движения его якоря. В работе [2] установлены энергетические показатели элементарных магнитных циклов, линия динамического перехода которых при движении якоря представляет прямую.

В настоящей работе рассмотрено влияние начального противодействующего усилия на энергетические и динамические показатели ЛЭМД для магнитных циклов $\Psi_2 > \Psi_1$, $I_2 < I_1$ и $\Psi_1 = \text{const}$, $I_2 < I_1$, изображенных на рис. 2.

Для цикла с увеличивающимся потокоцеплением, но с уменьшающимся током, который близок к реальному циклу ЛЭМД, запасание магнитной энергии для последующего её преобразования в механическую работу происходит не только на этапе трогания якоря с то-

ком I_1 , и потокосцеплением Ψ_1 (как для цикла $\Psi=\text{const}$ [3]), но и на этапе движения якоря, когда ток обмотки уменьшается за счет противоЭДС движения до значения I_2 , а потокосцепление возрастает при этом до значения Ψ_2 .

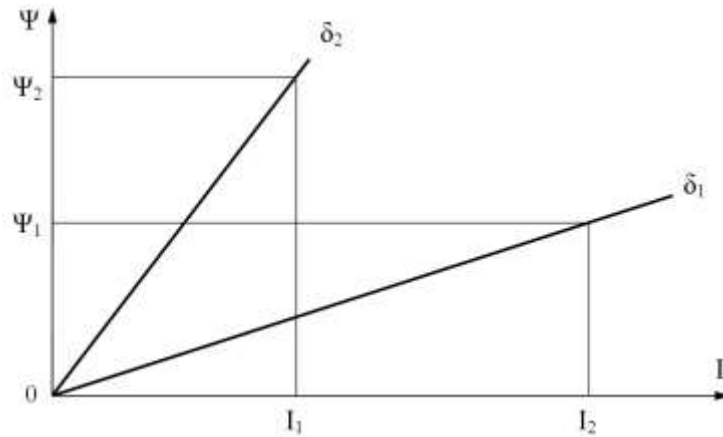


Рис. 2

Согласно [2], можно для указанных циклов записать выражения механической работы в виде энергии удара

$$A_{\text{вд}} = 0,5 \cdot L_1 \cdot I_1^2 \left(\frac{n-1}{k} \right) = 0,5 \cdot \Psi_1 \cdot I_1 \left(\frac{n-1}{k} \right), \quad (4)$$

$$A_{\text{вд}} = 0,5 \cdot \Psi_1 \cdot I_1 \left(\frac{n-1}{n} \right) = 0,5 \cdot \Psi_1 \cdot I_1 \left(\frac{k-1}{k} \right), \quad (5)$$

где $n=L_2/L_1$, $k=I_1/I_2$ – соответственно кратности изменения индуктивности и тока обмотки, причем $n>k>1$.

Тогда из (3) с учетом (4) получим выражение конечной скорости движения якоря

$$V_2 = \sqrt{\frac{\Psi_1 \cdot I_1 \cdot (n-1)}{M \cdot k}}, \quad (6)$$

и для цикла $\Psi=\text{const}$ с учетом формулы (5) получим

$$V_2 = \sqrt{\frac{\Psi_1 \cdot I_1 \cdot (n-1)}{M \cdot n}} = \sqrt{\frac{\Psi_1 \cdot I_1 \cdot (k-1)}{M \cdot k}}. \quad (7)$$

Согласно [4] начальные значения Ψ_1 и I_1 , соответствующие моменту трогания якоря, можно представить через начальную индуктивность L_1 :

$$\Psi_1 = \sqrt{2 \cdot F_0 \cdot \delta_1 \cdot L_1} ; \quad I_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot F_0 \cdot \delta_1}{L_1}}. \quad (8)$$

С учетом (6) и (8) выражение для скорости V_2 в конце перемещения примет вид для указанных циклов соответственно

$$V_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot F_0 \cdot \delta_1 \cdot (n-1)}{M \cdot k}}, \quad (9)$$

$$V_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot F_0 \cdot \delta_1 \cdot (n-1)}{M \cdot n}} = \sqrt{\frac{2 \cdot F_0 \cdot \delta_1 \cdot (k-1)}{M \cdot k}}. \quad (10)$$

Если предположить, что якорь движется равноускоренно, то легко найти время движения

$$t_{ДВ} = \frac{2 \cdot \delta_1}{V_2} = \sqrt{\frac{2 \cdot \delta_1 \cdot M \cdot k}{F_0 \cdot (n-1)}}, \quad (11)$$

причем для цикла $\Psi = \text{const}$ формула (11) справедлива при $n=k$:

$$t_{ДВ} = \frac{2 \cdot \delta}{V_2} = \sqrt{\frac{2 \cdot \delta_1 \cdot M \cdot n}{F_0 \cdot (n-1)}} = \sqrt{\frac{2 \cdot \delta_1 \cdot M \cdot k}{F_0 \cdot (k-1)}} \quad (12)$$

Для цикла с увеличивающимся потокосцеплением энергия удара

$$A_{вд} = \frac{M \cdot V_2^2}{2} = \frac{F_0 \cdot \delta_1 \cdot (n-1)}{k}, \quad (13)$$

а для цикла $\Psi = \text{const}$

$$A_{вд} = \frac{F_0 \cdot \delta_1 \cdot (n-1)}{n} = \frac{F_0 \cdot \delta_1 \cdot (k-1)}{k}. \quad (14)$$

Для анализа зависимости (11) и (13) выразим в относительных единицах, приняв за базисные величины время свободного падения якоря $T_1 = \sqrt{2 \cdot \delta_1 / g}$ массой M с высоты δ_1 и потенциальную энергию $M \cdot g \cdot \delta_1$. Тогда получим

$$t_{ДВ}^* = \frac{t_{ДВ}}{T_1} = \sqrt{\frac{k}{F_0^* \cdot (n-1)}}, \quad (15)$$

$$A_{вд}^* = \frac{A_{вд}}{M \cdot g \cdot \delta_1} = \frac{F_0^* \cdot (n-1)}{k}, \quad (16)$$

а для цикла $\Psi = \text{const}$

$$t_{ДВ}^* = \frac{t_{ДВ}}{T_1} = \sqrt{\frac{n}{F_0^* \cdot (n-1)}} = \sqrt{\frac{k}{F_0^* \cdot (k-1)}}, \quad (17)$$

$$A_{вд}^* = \frac{A_{вд}}{M \cdot g \cdot \delta_1} = \frac{F_0^* \cdot (n-1)}{n} = \frac{F_0^* \cdot (k-1)}{k}, \quad (18)$$

где $F_0^* = \frac{F_0}{M \cdot g \cdot \delta_1}$ – относительное начальное противодействующее усилие – усилие удержания якоря.

Построим семейства характеристик $t_{ДВ}^* = f(F_0^*)$ и $A_{вд}^* = f(F_0^*)$ при $k = \text{const}$ и кратности изменения индуктивности $n=5$ (для цикла $\Psi = \text{const}$ при $k=n=5$). Следовательно, для данных магнитных циклов кратность изменения тока будет лежать в пределах $1 \leq k \leq 5$. Характеристики представлены на рис. 3 и 4.

Анализ этих зависимостей позволяет сделать следующие выводы. При увеличении начального противодействующего усилия F_0^* время движения $t_{ДВ}^*$ уменьшается, а энергия удара $A_{вд}^*$ возрастает; при этом изменение F_0^* в диапазоне от 2 до 20 вызывает значительное изменение времени движения (в 2-4 раза), тогда как при $F_0^* > 50$ оно мало меняется.

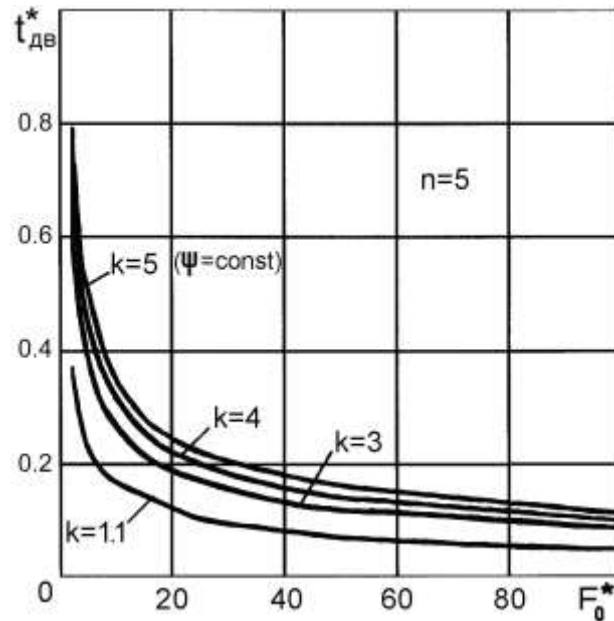


Рис. 3. Влияние начального противодействующего усилия F_0^* на время движения $t_{дв}^*$ при $k=const$ и $n=5$

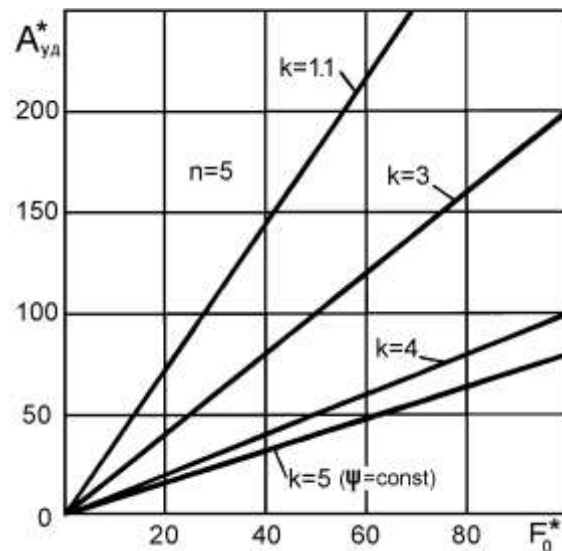


Рис. 4. Влияние начального противодействующего усилия F_0^* на энергию удара при $k=const$ и $n=5$

Приближение режимного параметра кратности тока к единице (цикл $I=const$) вызывает сокращение времени движения из-за форсированного накопления магнитной энергии в рабочих зазорах уже в процессе движения якоря. При кратности изменения тока $k=5$, что соответствует циклу $\Psi=const$, наблюдается самое медленное движение якоря из-за отсутствия накопления магнитной энергии в этом случае. Большой рост энергии удара при увеличении усилия F_0^* наблюдается также при стремлении кратности тока к единице, и наоборот, при кратности $k=4\dots5$ влияние усилия F_0^* на энергию удара снижается.

ЛИТЕРАТУРА

1. Электромагнитные прессы / Н.П. Ряшенцев и др. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1989. 216 с.
2. Мошкин В.И. Импульсные линейные электромагнитные двигатели с регулируемыми выходными параметрами: дис. ... канд. техн. наук / В.И. Мошкин. Новосибирск, 1992. 177 с.
3. Принципы повышения эффективности импульсных электромагнитных сейсмоисточников малой мощности для исследования малых глубин / В.А. Селезнев, В.А. Живодров, Г.Г. Угаров, К.М. Усанов // Приборы и системы разведочной геофизики. Саратов, 2003. № 1(03). С. 28-29.
4. Тер-Акопов А.К. Динамика быстродействующих электромагнитов / А.К. Тер-Акопов. М.-Л.: Энергия, 1965. 167 с.

Мошкин Владимир Иванович –

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Энергетика»
Курганского государственного университета

Егоров Андрей Александрович –

ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий»
Саратовского государственного технического университета

Угаров Геннадий Григорьевич –

доктор технических наук,
профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий»
Саратовского государственного технического университета

УДК 621.318.3

А.А. Егоров, Г.Г. Угаров, Д.А. Вырыханов

**ВЛИЯНИЕ ПРЕДЫСТОРИИ ИМПУЛЬСНОГО НАМАГНИЧИВАНИЯ
МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ЛИНЕЙНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ДВИГАТЕЛЯ
НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПРИВОДА**

Рассмотрено влияние предыстории импульсного намагничивания магнитной системы линейного электромагнитного двигателя на энергетические показатели привода. Предложенная методика позволяет обеспечить стабильность энергии удара с высокой эффективностью энергопреобразования. Приведены теоретические выводы и экспериментальные исследования.

A.A. Egorov, G.G. Ugarov, D.A. Vyrykhanov

**ELECTROMECHANICAL CONVERSION OF THE PULSED LINEAR
ELECTROMAGNETIC ENGINE CAUSED BY THE INFLUENCE
OF MAGNETIC HYSTERESIS**

This paper sets forth the results of theoretical and experimental study into the electromechanical conversion of the pulsed linear electromagnetic engine

caused by the influence of magnetic hysteresis. The offered technique allows providing stability of the impact energy and high efficiency of electromechanical conversion.

Широкое применение линейных электромагнитных двигателей (ЛЭМД) в различных отраслях промышленности [1] ставит перед теорией целый ряд задач, часть из которых в настоящее время пока не имеет удовлетворительного решения. Одной из таких задач является разработка математического аппарата, адекватного динамическим процессам, протекающим в нелинейной цепи ЛЭМД.

Обычно в расчетах силовых электромагнитных импульсных систем не учитывают остаточный магнетизм, который связан с явлением гистерезиса в магнитной системе (МС) [2]. Однако при экспериментальном исследовании энергетических показателей привода при питании от емкостных накопителей энергии (ЕНЭ) было установлено, что параметры энергии удара существенно зависят от предыстории импульсного намагничивания МС ЛЭМД [3]. Поэтому в устройствах с линейными электромагнитными приводами допущение о пренебрежении предысторией намагничивания МС приводит к существенным разбросам величины энергии удара, что является недопустимым, например, при использовании импульсного ЛЭМД в технологических операциях маркирования и клеймения, динамического испытания материалов и других случаях, требующих стабильных значений энергии воздействия.

В настоящей работе рассматривается вопрос о влиянии предыстории импульсного намагничивания магнитной системы ЛЭМД на значение энергии удара и обосновывается рабочий цикл, при котором обеспечивается стабильность энергии удара с высокой эффективностью энергопреобразования.

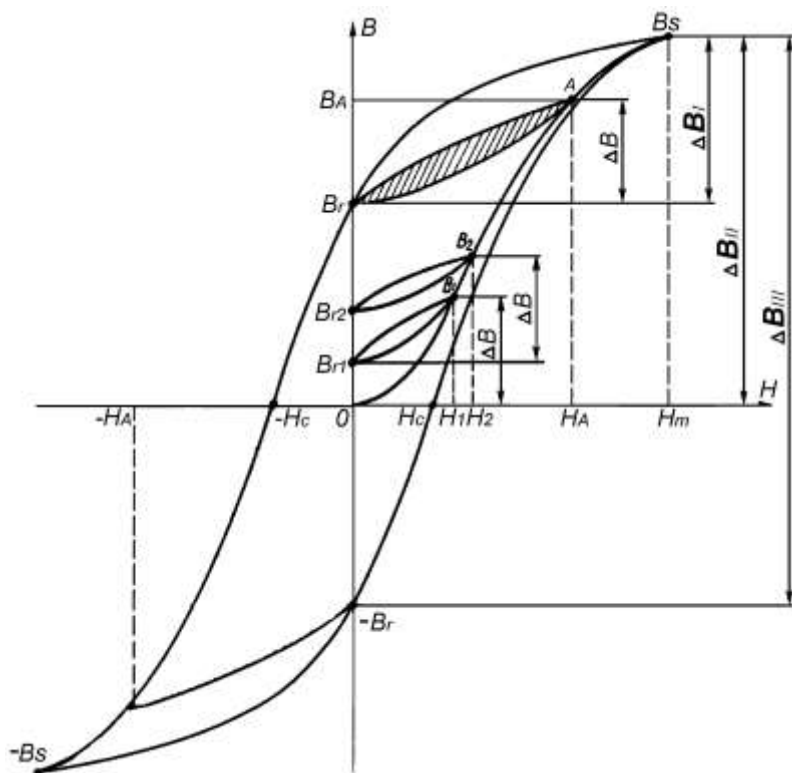
Рассмотрим процесс намагничивания МС импульсного ЛЭМД последовательностью униполярных импульсов со скважностью, достаточной для того, чтобы ток намагничивания успевал спадать до нуля к приходу следующего импульса. На данном этапе влияние вихревых токов, потоков рассеяния и размагничивающее действие воздушного зазора не учитываются. Их влияние будет учтено ниже.

При импульсном питании ЛЭМД магнитное состояние материала изменяется по частным динамическим циклам. На рисунке показан переход к установившемуся частному гистерезисному циклу (AB_r) из исходного размагниченного состояния МС ($H=0, B=0$) при подаче на обмотку возбуждения ЛЭМД ряда последовательных однополярных и одинаковых по величине импульсов напряжения. Выше точки B_r индукция подняться не может, так как эта точка лежит на пересечении предельной петли гистерезиса с осью координат. В рассматриваемом процессе характерным является то обстоятельство, что величина остаточной индукции с каждым импульсом возрастает, и каждый раз во время действия очередного импульса индукция увеличивается от уровня остаточной на величину $\Delta B = \text{const}$. Более подробно процесс перехода МС к установившемуся циклу из исходного размагниченного состояния рассмотрен в [4].

При импульсном намагничивании свойства ферромагнитной системы характеризуются средней проницаемостью на частном цикле [5]:

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta B}{\Delta H}, \quad (1)$$

где $\Delta H, \Delta B$ – приращения напряженности и индукции импульсного магнитного поля соответственно. Из формулы (1) следует, что средняя проницаемость зависит от приращения напряженности ΔH и приращения магнитной индукции ΔB , зависящей от предыстории намагничивания, т.е. от того, в каком магнитном состоянии находилась МС к моменту появления намагничивающего импульса.



Статический гистерезисный цикл намагничивания МС ЛЭМД

Определим среднюю импульсную магнитную проницаемость и сравним приращения магнитной индукции для получения магнитного поля с магнитной индукцией насыщения B_S при трех различных состояниях МС ЛЭМД (рисунок):

– МС намагничена, и точка, характеризующая магнитное состояние стали до момента действия импульса, определялась координатами $(0; B_r)$; индукция изменяется в пределах от B_r до B_S при изменении напряженности магнитного поля от нуля до H_m

$$\mu_{\Delta I} = \frac{\Delta B_I}{\Delta H} = \frac{B_S - B_r}{H_m}; \quad (2)$$

– МС размагничена, и состояние до момента действия импульса определялось координатами $(H=0; B=0)$; индукция изменяется в пределах от нуля до B_S при изменении напряженности ΔH

$$\mu_{\Delta II} = \frac{\Delta B_{II}}{\Delta H} = \frac{B_S}{H_m}; \quad (3)$$

– МС намагничена, и состояние до момента действия импульса определялось координатами $(0; -B_r)$; индукция изменяется в пределах от $-B_r$ до B_S при изменении напряженности ΔH

$$\mu_{\Delta III} = \frac{\Delta B_{III}}{\Delta H} = \frac{B_S + B_r}{H_m}. \quad (4)$$

Импульсные проницаемости и приращения магнитных индукций на частных гистерезисных циклах для рассмотренных случаев между собой соотносятся

$$\mu_{\Delta III} > \mu_{\Delta II} > \mu_{\Delta I}; \quad \Delta B_{III} > \Delta B_{II} > \Delta B_I. \quad (5)$$

Из соотношений (2)-(4) следует, что значения приращения индукции при изменении напряженности магнитного поля от нуля до H_m тем меньше, чем выше начальное значение

индукции в якоре ЛЭМД, наибольшей величиной которой является остаточная индукция предельного цикла B_r .

Обычно в ЛЭМД с импульсным питанием детали магнитной системы выполняются по технологическим и конструктивным соображениям из массивной стальной поковки (Ст10, Ст20). Массивный якорь имеет большое преимущество перед шихтованным в прочности, в результате чего в ЛЭМД достигается удельная энергия удара до 10 Дж/кг. Применение массивной МС приводит дополнительно к увеличенным потерям на вихревые токи по сравнению с шихтованной МС. Поэтому в реальных условиях магнитная проницаемость будет еще меньше значения μ_Δ , определяемого формулой (1). Объясняется это размагничивающим действием воздушного зазора и вихревых токов. Учетом это введением кажущейся магнитной проницаемости μ_k , при этом соотношения (5) не изменятся. Магнитный поток во вторичном короткозамкнутом контуре МС ЛЭМД за время импульса t_u индуцирует ЭДС e_k :

$$e_k = -w_k \frac{d\Phi_0}{dt} = -w_k \cdot \mu_k \cdot S \cdot \frac{dH_0}{dt} \cos \beta \approx -w_k \cdot S \frac{\Delta B}{t_u}, \quad (6)$$

где w_k – приведенное число витков вторичного контура МС; β – угол между осью МС и вектором напряженности магнитного поля. Будем вначале полагать, что ЭДС наводится лишь основным магнитным потоком Φ_0 , проходящим через рабочий воздушный зазор, под действием которой в короткозамкнутом контуре появляется ток $i_k = e_k / r_k$, где r_k – приведенное активное сопротивление вторичного контура.

Вследствие сложности определения и разграничения потерь в МС оценим потери приближенно.

Потери мощности на гистерезис [4]:

$$P_\Gamma = \frac{V}{t_u} \int H \cdot dB \approx \frac{V}{t_u} \Delta H \cdot \Delta B, \quad (7)$$

где V – объем МС.

Потери мощности на вихревые токи, с учетом (6):

$$P_B = \int \frac{e_k^2}{dr_k} \approx \frac{(S \cdot \Delta B)^2}{r_k \cdot t_u^2}. \quad (8)$$

С учетом (7), (8) запишем для суммарных потерь мощности в МС:

$$P_\Sigma = P_B + P_\Gamma + P_{дон} \approx \frac{V}{t_u} \Delta H \cdot \Delta B + \frac{(S \cdot \Delta B)^2}{r_k \cdot t_u^2} + P_{дон}, \quad (9)$$

где $P_{дон}$ – дополнительные потери, включающие потери на магнитную вязкость и другие потери, не учитываемые аналитическим путем.

Из выражения (9) следует, что потери в стали прямо пропорциональны приращению магнитной индукции, и, учитывая соотношение (5), запишем

$$P_{\Sigma III} > P_{\Sigma II} > P_{\Sigma I}, \quad (10)$$

т.е. из рассмотренных выше трех магнитных состояний минимальные потери мощности в МС при работе ЛЭМД будут для первого случая, когда остаточная магнитная индукция B_r униполярна по отношению к намагничивающим импульсам. Следовательно, для первого случая за время действия импульса t_u больше энергии заряда E_c ЕНЭ перейдет в полезную энергию удара E_y , и коэффициент эффективности энергопреобразования $\eta = E_y / E_c$ будет выше. С учетом (10) запишем для трех магнитных состояний:

$$E_{y(I)} > E_{y(II)} > E_{y(III)}; \quad \eta_I > \eta_{II} > \eta_{III}. \quad (17)$$

Для проверки влияния предыстории намагничивания МС на энергетические показатели ЛЭМД (E_y и η) проведено экспериментальное исследование ЛЭМД при питании от ЕНЭ для рассмотренных выше состояний МС. Основные параметры исследуемого ЛЭМД с ком-

бинированным якорем и стопом [1]: диаметр якоря $d_{\text{я}}=31$ мм, магнитная система выполнена из конструкционной углеродистой стали Ст20, обмотка возбуждения содержит 250 витков медного провода. Результаты экспериментов представлены в табл. 1.

Из полученных экспериментальных данных следует, что энергия удара E_y и эффективность энергопреобразования η при питании от ЕНЭ с фиксированными параметрами для первоначально намагниченного состояния I ($B_r > 0$) больше, чем при питании для размагниченного состояния II ($B_r = 0$), и тем более, когда первоначальное состояние МС намагничено противоположно направлению поля намагничивающего импульса III ($B_r < 0$). Следует отметить, что в рассматриваемых режимах при питании от ЕНЭ соблюдалась аperiодическая форма разряда, но при импульсном питании от ЕНЭ могут возникнуть колебания тока в цепи, в результате чего ток в обратном направлении может достигнуть величины, достаточной для размагничивания МС, а следовательно, привести к понижению E_y и η .

Таблица 1

Влияние предыстории намагничивания на энергию удара и КПД ЛЭМД

	Состояние МС	E_y , Дж	η , %	$k^{(1)}$
1) $C=6,4$ мФ $U=50$ В $E_c=8$ Дж	I ($B_r > 0$)	2,43	30,4	1
	II ($B_r = 0$)	1,9	23,8	0,78
	III ($B_r < 0$)	1,4	17,5	0,57
2) $C=1,12$ мФ $U=150$ В $E_c=12,6$ Дж	I ($B_r > 0$)	1,78	14,1	1
	II ($B_r = 0$)	1,4	11,1	0,79
	III ($B_r < 0$)	1,1	8,7	0,62
3) $C=1,12$ мФ $U=250$ В $E_c=35$ Дж	I ($B_r > 0$)	5,3	15,1	1
	II ($B_r = 0$)	4,5	12,9	0,85
	III ($B_r < 0$)	3,5	10	0,66
4) $C=2,2$ мФ $U=200$ В $E_c=44$ Дж	I ($B_r > 0$)	6,5	14,8	1
	II ($B_r = 0$)	4,9	11,14	0,75
	III ($B_r < 0$)	4,0	9,1	0,61

¹⁾ $k=E_y/E_{y(I)}$ – показатель, характеризующий отношение энергий удара для данного магнитного состояния к намагниченному состоянию I ($B_r > 0$) при питании от ЕНЭ с одинаковыми параметрами заряда C и U .

Анализ экспериментальных данных показывает, что в зависимости от предыстории намагничивания ЛЭМД величина энергии удара E_y изменяется в достаточно широких пределах, и, соответственно, изменяется показатель эффективности энергопреобразования η . Запишем пределы изменений параметров энергии удара в рассматриваемых магнитных состояниях по отношению к энергии удара в намагниченном состоянии на установившемся частном гистерезисном цикле $E_{y(I)}$:

$$E_{y(II)}=(0,75 - 0,85) \cdot E_{y(I)} - \text{для размагниченного состояния МС } II (B_r = 0);$$

$$E_{y(III)}=(0,55 - 0,65) \cdot E_{y(I)} - \text{для намагниченного состояния МС } III (B_r < 0).$$

Очевидно, что пренебрегать таким разбросом выходных параметров в ЛЭМД, использующих дозированную энергию удара, нельзя.

Экспериментально было также установлено, что энергия удара стабилизируется после подачи на обмотку ЛЭМД последовательных двух-четырёх однополярных импульсов. В табл. 2 приведены данные процесса установления стабилизации энергии удара при первоначально размагниченной МС ЛЭМД; питание производилось от ЕНЭ емкостью $C=2,2$ мФ, напряжением 200 В.

Таблица 2

Установление стабильности энергии удара и повышение энергетических показателей при питании униполярными импульсами от ЕНЭ

Номер импульса	1	2	3	4	5	6
E_u , Дж	4,92	5,93	6,41	6,50	6,52	6,50
η , %	11,18	13,48	14,57	14,77	14,82	14,77
Значение остаточной магнитной индукции	Размагниченное состояние $B_r = 0$		Промежуточные намагниченные состояния $0 < B_r < B_{r(max)}$		Установившееся намагниченное состояние $B_r = B_{r(max)}$	

Анализ данных табл. 2 показывает, что, начиная с четвертого импульса, МС переходит в установившееся намагниченное состояние с некоторым предельным значением остаточной магнитной индукции $B_{r(max)}$ для данного намагничивающего импульса, сопровождаемое стабилизацией и незначительным разбросом энергии удара E_u . Стабильность энергетических параметров после многократного намагничивания униполярными импульсами обусловлена стабилизацией средней проницаемости в верхнем слое намагниченной МС.

Экспериментальные исследования подтверждают теоретические выводы о влиянии предыстории намагничивания на стабильность энергетических показателей ЛЭМД: энергию удара E_u и эффективность энергопреобразования η .

Пренебрежение предысторией магнитного состояния МС ЛЭМД недопустимо в устройствах, использующих дозированную энергию удара. Влияние предыстории намагничивания должно учитываться при разработке новых методов расчета и моделирования динамических режимов ЛЭМД с массивной МС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ряшенцев Н.П. Электромагнитные прессы / Н.П. Ряшенцев, Г.Г. Угаров, А.В. Львицын. Новосибирск: Наука, 1989. 216 с.
2. Ряшенцев Н.П. Введение в теорию энергопреобразования электромагнитных машин / Н.П. Ряшенцев, А.Н. Мирошниченко. Новосибирск: Наука, 1987. 160 с.
3. Егоров А.А. Экспериментальное исследование линейного электромагнитного двигателя при питании от емкостного накопителя / А.А. Егоров, Д.А. Вырыханов // Электротехнические комплексы и силовая электроника: межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ, 2005. С. 4-8.
4. Вдовин С.С. Проектирование импульсных трансформаторов / С.С. Вдовин. Л.: Энергия, 1991. 206 с.
5. Кифер И.И. Испытания ферромагнитных материалов / И.И. Кифер. М.: Энергия, 1969. 360 с.

Егоров Андрей Александрович – ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета

Угаров Геннадий Григорьевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета

Вырыханов Денис Александрович – аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета

Е.В. Колесников

СИСТЕМООБРАЗУЮЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Рассмотрены принципы проектирования электротехнологического оборудования, соблюдение которых позволяет получить максимальную экономическую эффективность этого оборудования.

E.V. Kolesnikov

SELF-GENERATED PRINCIPLES OF DESIGNING AND ELECTROTECHNOLOGICAL EQUIPMENT OPERATION

Designing principles of projection and exploitation electrotechnological equipment which observance allows receiving the maximal economic efficiency of that equipment are considered here.

Одним из направлений создания современного технологического оборудования является широкое использование в различных отраслях электрофизических методов обработки. Это позволяет исключить или существенно сократить применение в технологических процессах термообработки в качестве топлива основных энергоносителей (угля, нефти, газа), получить высокую скорость обработки за счет высокой концентрации выделяемой энергии в сравнительно малых объемах, широкий диапазон регулирования подводимой к обрабатываемому объекту энергии, автоматизировать процесс поддержания требуемого технологического режима, обеспечить компактность технологического оборудования, исключить продукты сгорания, уменьшить пожароопасность и улучшить социально-гигиенические условия труда, обеспечить высокий темп термообработки не только металлов, но и диэлектриков.

Все эти требования удастся реализовать с помощью электротехнологических, в частности электротермических, установок. Особо следует отметить, что использование электротермических установок для СВЧ диэлектрического нагрева (У СВЧ ДН) создает возможность конверсии предприятий или трудоустройства специалистов в области СВЧ радиоэлектроники и техники СВЧ, с одной стороны, а с другой – интенсифицировать процессы термообработки диэлектрических материалов, обеспечить замену части элементной базы машиностроения из металла на изделия из диэлектрика.

Но в условиях рыночной экономики мало рассчитать установку, ее рабочую камеру, получить заданную производительность с достижением нужного качества. В условиях конкуренции необходимо стремиться к наилучшему использованию имеющихся всегда ограниченных ресурсов. Приходится, однако, констатировать, что несмотря на, безусловно, возросший в условиях рыночной экономики интерес к проблеме эффективности электротехнологического оборудования (ЭТО), пока не получили должного развития и обобщения расчеты, позволяющие с позиций системного подхода определить эффективность ЭТО, выбрать его оптимальную структуру и элементную базу, обеспечивающие максимальную эффективность его применения. На наш взгляд, само понятие эффективности ЭТО во многом остается неопределенным, так как в разных работах по проектированию этого оборудования эффективность определяется по-разному. Чаще всего речь идет о физической, энергетической, си-

стемной, экономической, энерготехнологической эффективности, а также об эффективности инвестиционного проекта и энергоэффективности [1-4].

Физическая эффективность определяется отношением конечного результата $A_{кр}$ к затратам ресурса $A_{зр}$

$$\mathcal{E}_\phi = \frac{A_{кр}}{A_{зр}}, \quad (1)$$

где $A_{кр} = A_{крн} + A_{крбн} + A_{крбс}$; $A_{крн}$, $A_{крбн}$, $A_{крбс}$ – неизбежные потери обрабатываемого объекта, неизбежный и случайный брак, так что $0 \leq \mathcal{E}_\phi \leq 1$.

Известны технологические процессы, например СВЧ вспенивание стекла, когда объем конечного продукта в $K_{раз}$ больше объема затраченного сырья. В этом случае $0 \leq \mathcal{E}_\phi \leq K$.

Если $A_{кр}$ и $A_{зр}$ – энергетические характеристики ЭТО, то (1) определяет его энергетическую эффективность (энергетический КПД)

$$\eta_{эн} = \frac{P_{ногл}}{P_{эл}}, \quad (2)$$

где $P_{ногл}$ – мощность, поглощенная объектом обработки; $P_{эл}$ – мощность, потребленная ЭТО от сети промышленной частоты. С другой стороны, например в У СВЧ ДН,

$$\eta_{эл} = \eta_{эл} \eta_T, \quad (3)$$

где $\eta_{эл} = P_{свч}/P_{эл}$ – электрический КПД; $P_{свч}$ – СВЧ мощность генератора, отдаваемая в согласованную нагрузку; $\eta_T = P_{ногл}/P_{свч}$ – тепловой КПД; $P_{ногл} = (1 - |\Gamma|^2)P_{свч}$. Если $P_{ном}$ – мощность потерь в рабочей камере; Γ – коэффициент отражения от рабочей камеры, тогда

$$\eta_T = (1 - |\Gamma|^2) - \frac{P_{ном}}{P_{свч}}, \quad (4)$$

а так как в У СВЧ ДН $P_{ном} \ll P_{свч}$, то

$$\eta_T = 1 - |\Gamma|^2. \quad (5)$$

У современных магнетронов $0,52 \leq \eta_{эл} \leq 0,85$, так что

$$\eta_{эн} = (0,52 \dots 0,85)(1 - |\Gamma|^2). \quad (6)$$

Величина $|\Gamma|$ зависит от типа рабочей камеры, так что $0,39 \leq \eta_{эн} \leq 0,83$.

Системная эффективность равна

$$\eta_c = \eta_{ум} \eta_{эн}, \quad (7)$$

где $\eta_{ум} = P_{эл}/B Q_{мс}$ – коэффициент использования топлива; B – расход топлива; $Q_{мс}$ – теплота сгорания топлива. У тепловых электростанций $\eta_{ум} = 0,35 \dots 0,38$, так что у У СВЧ ДН $0,14 \leq \eta_c \leq 0,32$. Для сравнения: системная эффективность теплотехнологических установок оценивается в пределах $0,1 \leq \eta_c \leq 0,3$ [4].

Если $A_{кр}$ и $A_{зр}$ – экономические характеристики ЭТО, то (1) определяет его экономическую эффективность

$$\mathcal{E}_\circ = \frac{\mathcal{E}_\Sigma}{K} \Rightarrow \mathcal{E}_\circ = \frac{1}{K} \left\{ \sum_{t=0}^T \left[\sum_{j=1}^n (P_{jt} C_{jt} - C_t) (1 - \gamma_{nt}) (1 - \gamma_{yt}) + C_{nt} + C_{ct} + C_{At} - C_{бпрt} - C_{\%t} - C_{дат} - C_{мит} \right] (1 - E)^{-t} + \Phi_m (1 + E)^{-m} \right\}, \quad (8)$$

где \mathcal{E}_Σ – чистый дисконтированный доход или интегральный эффект; K – капиталовложение; P_{jt} , C_{jt} – количество j -й продукции, произведенной ЭТО, и ее цены в t -й год его работы; C_t – эксплуатационные затраты; γ_{nt} , γ_{yt} – функции, учитывающие систему налогов и условия

распределения прибыли; C_{nt} , C_{ct} – стоимостная оценка сопутствующего эффекта в производственной сфере и социального эффекта; C_{At} – амортизационные отчисления; $C_{\%t}$ – дополнительные налоги и платежи; C_{int} – затраты на научные исследования в t -м году; E – норма дисконта; Φ_m – остаточная на момент времени T стоимость основных фондов; n – количество типов продукции; T – горизонт расчета.

Величина \mathcal{E} , зависит от T , измеренного количеством и величиной шагов расчета t . В качестве шага может быть выбран месяц, квартал, год, а горизонт расчета выбирают длиной в год (продолжительность выпуска данной продукции, установленной в результате маркетинговых исследований) или срок службы ЭТО, если речь идет о выпуске продукции постоянного спроса. В общем случае $0 \leq \mathcal{E} \leq \infty$, и при системном подходе к проблеме эффективности \mathcal{E} , зависит, например, у У СВЧ ДН от нескольких десятков параметров установки, объекта, технологического режима и организации производства.

В ряде случаев под эффективностью понимают совокупность решений, мероприятий, исследований, параметров и характеристик, позволяющих при создании, реконструкции или эксплуатации ЭТО наметить и реализовать меры по повышению их экономической эффективности, конкурентоспособности на рынке технологического оборудования. Энерготехнологическая эффективность предполагает формулировку и массовую реализацию электротехнологии высокого уровня, стержнем которой является создание высокопроизводительного ЭТО со сравнительно низким потреблением электроэнергии.

Особое место в вопросе о проектировании ЭТО с учетом фактора рыночной экономики занимает обоснование целесообразности применения конкретного ЭТО. Здесь уже недостаточно общих доводов о предпочтительности ЭТО. Сейчас в связи с политикой энергосбережения и защиты окружающей среды предпочтительность ЭТО, казалось бы, можно показать сокращением потребления первичной энергии при одинаковых количестве и качестве выпускаемой продукции.

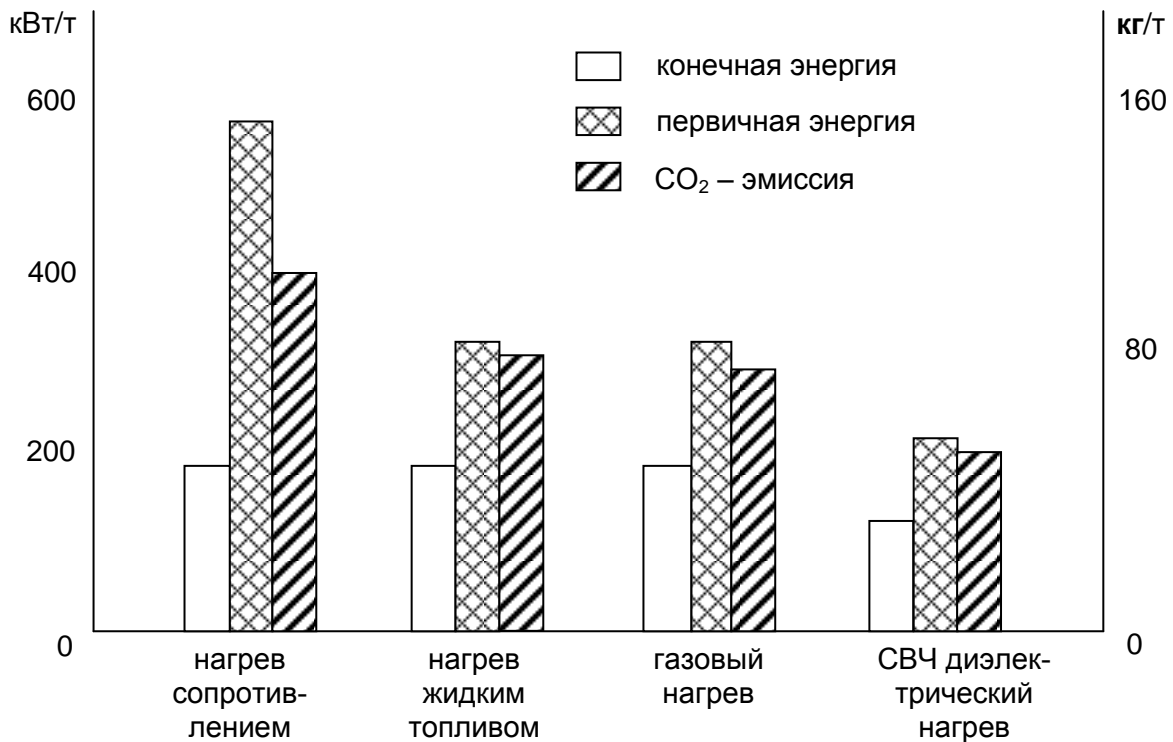
Так, на рисунке приведены данные для такого сопоставления при различных режимах сушки [4], показывающие предпочтение по этим показателям ЭТО, в данном случае У СВЧ ДН. Но такой подход не всегда оправдан: это наиболее дорогая энергия, и более высокая энергетическая эффективность ЭТО бывает недостаточной в противопоставлении повышенным затратам.

Целесообразность ЭТО определяется иными факторами: инвестиции в электротехнологию ведут к пересмотру объектов и организации производства, так что необходима системная оценка. Действительно, оплата энергии в среднем составляет только 20-30% общих затрат, так что нельзя ограничиваться анализом затрат энергии; стоимость обслуживания и ремонта может быть значительно снижена; значительно снижается загрязнение окружающей среды; может быть улучшено качество продукции. Все это естественным образом учитывает эффективность инвестиционных проектов, вопрос о которой возникает на различных уровнях управления в процессе разработки и реализации проекта. Эта эффективность характеризуется системой показателей, отражающих соотношение затрат и результатов применительно к интересам его участников (коммерческая эффективность, учитывающая финансовые последствия реализации проекта для его участников, бюджетная эффективность, отражающая финансовые последствия реализации проекта для бюджета того или иного уровня, экономическая эффективность, учитывающая затраты и результаты реализации проекта за пределами прямых финансовых интересов участников). При оценке целесообразности нового проекта различные факторы проблемы позволяет учесть так называемый сравнительный интегральный эффект

$$\Delta \mathcal{E}_{\Sigma} = \mathcal{E}_{\Sigma 1} + \mathcal{E}_{\Sigma 2}, \quad (9)$$

где индексы 1 и 2 относятся к случаю оснащения производства, скажем, базовыми тепловыми аппаратами и, например, У СВЧ ДН соответственно. Последнее эффективнее, если

$$\Delta \mathcal{E}_{\Sigma} > 0. \quad (10)$$



Сравнение требуемой конечной и первичной энергии и CO₂ – эмиссии при сушке

Если экономические расчеты не подтверждают целесообразности применения проектируемого оборудования, то всякие попытки его использования в промышленности приведут к дискредитации этого оборудования. В то же время, бесспорно, экономия энергопотребления в электротехнологии весьма желательна, и эта проблема выводит на задачи энергосбережения.

Термин «энергоэффективность» в энергосбережении и энергоаудите часто употребляют как сокращение «энергетическая эффективность». Нам представляется интересным предложение заменить термином «энергоэффективность» термин «энергосбережение» [5]. Действительно, энергосбережение идентифицируется с ограничением потребления энергии и имеет идеальным результатом полное прекращение использования энергии, тогда как энергоэффективность можно трактовать как эффект от использования единицы энергии, и идеальным результатом в этом случае будет полное, без потерь, использование энергии.

Обеспечение максимальной эффективности ЭТО требует выполнения комплекса мероприятий на стадии предпроектного исследования, проектирования, эксплуатации и реконструкции ЭТО. В рамках проектирования и эксплуатации следует говорить о системообразующих принципах, позволяющих достичь максимальную эффективность ЭТО.

На первом этапе необходимо провести тщательные расчеты целесообразности применения ЭТО. Эти расчеты приходится проводить несколько раз.

Во-первых, такие расчеты должны предшествовать разработке инвестиционного проекта. Основная трудность в проведении этих расчетов по соотношению (3) состоит в определении исходных данных по базовой и новой (прогнозируемой) установкам. Как показывает наш опыт, владельцы базовой установки зачастую не имеют полных и достоверных данных на этот счет.

Что касается нового ЭТО, то здесь возможны две ситуации: новое ЭТО имеется, его параметры и характеристики известны, и новое ЭТО предстоит спроектировать, его параметры и характеристики предстоит определить на стадии проектирования. В первом случае рас-

чет целесообразности замены базовой установки на новое ЭТО не представляет труда, а во втором случае приходится вести речь о прогнозировании целесообразности применения нового ЭТО, причем при определении некоторых параметров, например $\eta_{эн}$, цены установки приходится прибегать к экспертной оценке или экстраполяции, если известны, скажем, зависимости $C_{1,2}(P_{потреб1,2})$ и $\eta_{1,2}(P_{потреб1,2})$ на каком-то интервале значений аргумента этих функций. Похожая ситуация складывается в случае, когда проектировщик сравнивает варианты ЭТО с одним и тем же типом энергоподвода к объекту, но при разной структуре этого оборудования, тогда $P/P_{y,1,2} = N_{1,2}$, где $N_{1,2}$ – количество установок, работающих одновременно и выпускающих одну и ту же продукцию в количестве P .

Во-вторых, расчеты целесообразности применения ЭТО следует провести после решения задачи технико-экономической оптимизации ЭТО. На этой стадии проектировщику уже известны параметры и характеристики ЭТО, оптимального как по техническим (равномерность термообработки, наиболее рациональное потребление энергии и т.п.), так и экономическим характеристикам (максимальный интегральный эффект).

На втором этапе проектирования решается самосогласованная задача технико-экономической оптимизации и синтеза ЭТО. Наиболее общий подход к явлениям электродинамики обеспечивается на базе уравнений Максвелла. Применительно, например, к У СВЧ ДН дело сводится к решению самосогласованной краевой задачи электродинамики и тепло-массопереноса в капиллярно-пористом коллоидном теле (задачи синтеза ЭТО) и задачи технико-экономической оптимизации структуры и параметров У СВЧ ДН

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} H &= j + \frac{\partial D}{\partial t}, \\ \operatorname{rot} E &= -\frac{\partial B}{\partial t}, \\ \operatorname{div} D &= 0, \\ \operatorname{div} B &= 0, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial t} + v \nabla \theta &= \kappa_{11} \nabla^2 \theta + \kappa_{12} \nabla^2 U + \kappa_{13} \nabla^2 p + \frac{P_{y\theta}}{c \rho}, \\ \frac{\partial U}{\partial t} + v \nabla U &= \kappa_{21} \nabla^2 \theta + \kappa_{22} \nabla^2 U + \kappa_{23} \nabla^2 p, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} + v \nabla p &= \kappa_{31} \nabla^2 \theta + \kappa_{32} \nabla^2 U + \kappa_{33} \nabla^2 p, \\ \frac{\partial \mathcal{E}_\Sigma}{\partial x_1} &= 0, \\ &\dots \\ \frac{\partial \mathcal{E}_\Sigma}{\partial x_n} &= 0, \end{aligned} \quad (13)$$

при обычных для краевых задач граничных и начальных условиях. В (11)-(13) E, H – векторы напряженностей электромагнитного поля; D, B – векторы электрической и магнитной индукции; j – плотность тока проводимости; θ, U, p – температурный напор, влагосодержание и давление паров в обрабатываемом объекте; v – скорости транспортировки объекта в рабочей камере; $P_{y\theta}, c, \rho$ – поглощаемая единицей объема объекта СВЧ мощность, удельная теплоем-

кость и плотность объекта; $\kappa_{11}, \kappa_{12}, \dots, \kappa_{33}$ – теплообменные параметры; t – время; x_1, x_2, \dots, x_n – независимые (варьируемые) параметры технико-экономической задачи, причем в общем случае \mathcal{E}_Σ определяется в соответствии с соотношением (8).

В случае краткосрочного кредита \mathcal{E}_Σ рассматривается на интервале в один год. Если ЭТО выпускает один вид продукции, $C_n = C_c = C_{дн} = C_{ни} = 0$, что обычно имеет место, установка через год не реализуется на рынке, то

$$\mathcal{E}_\Sigma = (P\mathcal{C} - C)(1 - \gamma_n)(1 - \gamma_y) - C_A + C_\% - C_{бр}. \quad (14)$$

Соотношения для входящих в (14) величин должны быть определены дополнительно. Для У СВЧ ДН они приведены [1]. В общем случае \mathcal{E}_Σ для СВЧ сушилок зависит более чем от 30 параметров. Большинство этих параметров являются нормативными (заданными). В случае У СВЧ ДН независимые параметры – СВЧ мощность генератора P_u частота СВЧ колебаний f . Этого достаточно, чтобы рассчитать оптимальное число генераторов M , работающих на одну рабочую камеру, производительность одной установки Π_y и количество установок N , работающих параллельно, при котором достигается $\mathcal{E}_{\Sigma\max}$. Что касается входящих в (14) стоимостных характеристик ЭТО (его элементов), то их рекомендуется представлять функцией независимых параметров, например $\mathcal{C} = aP^2 + bP + c$, где \mathcal{C} – цена источника СВЧ энергии; P – мощность СВЧ генератора, a, b, c – коэффициенты аппроксимации зависимости $\mathcal{C} = \mathcal{C}(P)$.

Более сложным классом самосогласованных задач в электротехнологии являются задачи, учитывающие, кроме электродинамических и тепловых (теплообменных) процессов, еще и процессы термомеханики [6].

Общее решение самосогласованных краевых задач в электротехнологии может быть выполнено следующим образом.

Пусть речь идет о самосогласованной краевой задаче электродинамики и теплопроводности – самой распространенной из этого класса задач. В первую очередь по справочной литературе или экспериментально определяются зависимости электрофизических и теплофизических параметров обрабатываемого объекта от температуры. Затем время термообработки $t_{об}$ разбивается на интервалы Δt_i , в пределах которых эти параметры можно считать постоянными.

Тепловые процессы в нагреваемом объекте могут быть описаны решением краевой задачи теплопроводности в приближении заданного электромагнитного поля, найденного, в свою очередь, из решения краевой задачи электродинамики. Решение краевой задачи электродинамики на интервале Δt_i определяет вид функции $P_{y,об}$, что позволяет найти решение краевой задачи теплопроводности. Решение краевой задачи теплопроводности дает возможность установить электрофизические и теплофизические параметры объекта на следующем временном интервале. Подобные расчеты повторяются для все новых интервалов времени, начиная с первого, до достижения заданной или установившейся температуры объекта.

Решение самосогласованной краевой задачи электродинамики и теплопереноса (11), (12) проводится по той же схеме, но на каждом цикле расчета на интервале времени Δt_i следует проверить полученный результат на выполнение условий $T \leq T_{задан}$ и $\underline{T} \leq U_{задан}$. Расчет заканчивается по достижении заданной температуры и влагосодержания в любом элементарном объеме обрабатываемого объекта.

В качестве исходных данных, кроме физических свойств материала объекта, предусматривается ввод величины мощности и частоты СВЧ генератора и скорости движения объекта через рабочую камеру в случае работы в методическом режиме.

Из всех методов решения краевых задач в электротехнологии наибольшее распространение имеют аналитические, численные, комбинированные методы и метод схем

замещения (метод эквивалентных схем). Выбор конкретного метода зависит от того, какую цель преследует решение. Если на его базе проводится приближенный расчет рабочей камеры, а с ней и всей установки (например, для определения затрат на стадии выяснения целесообразности применения ЭТО), то расчет можно провести по упрощенной схеме, когда электрофизические и теплофизические параметры объекта принимаются постоянными и равными средним их значениям на интервале температур (влажностерождения) в процессе термообработки.

На стадии определения технически оптимальной конструкции рабочей камеры решение должно быть выполнено с точностью, достаточной для получения установки с максимальной эффективностью.

Для решения задачи технико-экономической оптимизации (13) целевую функцию \mathcal{E}_{Σ} можно упростить, если считать годовой объем продукции Π , цену единицы продукции C , затраты на сырье, а также γ_n и γ_y постоянными. Тогда соотношение (14) можно записать в виде

$$\mathcal{E}_{\Sigma} = \mathcal{E}_{\Sigma const} + \mathcal{E}_{\Sigma var}, \quad (15)$$

где $\mathcal{E}_{\Sigma const}$ и $\mathcal{E}_{\Sigma var}$ – постоянная и переменная части \mathcal{E}_{Σ} , причем

$$\mathcal{E}_{\Sigma var} = -[(C_s + C_{zn} + C_{зч})(1 - \gamma_n)(1 - \gamma_y) + C_A + C_{\%} + C_{\text{оп}}], \quad (16)$$

а потому нахождение $\mathcal{E}_{\Sigma max}$ сводится к нахождению $|\mathcal{E}_{\Sigma var}|_{min}$, а решение задачи технико-экономической оптимизации сводится к нахождению оптимальных значений варьируемых параметров $x_i opt$ в задаче о глобальном минимуме функции $|\mathcal{E}_{\Sigma var}| = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$.

Распределение параметров $\{x_i\}$ на независимые (варьируемые), зависимые и нормативные зависит от того, какая оптимизационная задача решается. Так, на стадии проектирования У СВЧ ДН к независимым следует отнести такие параметры, как мощность и частоту магнетрона, к зависимым – число магнетронов M , работающих на одну рабочую камеру, мощности, потребляемые транспортной системой, воздухоподводкой, магнетроном в дежурном режиме (период загрузки – выгрузки объекта обработки), цену установки, объем и площадь боковой поверхности объекта, условия теплообмена на его границах. Остальные параметры можно считать нормативными.

Второй этап заканчивается нахождением $P_{opt}, f_{opt}, M_{opt}, N_{opt}$.

На третьем этапе проектирования уточняется решение задачи о целесообразности применения ЭТО с учетом результатов решения самосогласованной задачи технико-экономической оптимизации и синтеза ЭТО. Если выполняются условия

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{\Sigma 2 max} &> 0, \\ \mathcal{E}_{\Sigma 2 max} - \mathcal{E}_{\Sigma 1 max} &> 0, \\ t_{\text{вн} 2} &< t_{\text{вн} 1}, \\ t_{\text{вн} 2} &< t_{\text{вн} \phi}, \end{aligned} \quad (17)$$

где $t_{\text{вн}}$ – расчетный срок возврата инвестиций; $t_{\text{вн} \phi}$ – усредненный в рассматриваемый период для данного региона фактический срок возврата инвестиций в различных отраслях хозяйства, индексы 1 и 2 относятся, как и раньше, к базовой установке и ЭТО, то разрабатывается инвестиционный проект.

Условие $t_{\text{вн} 2} < t_{\text{вн} \phi}$ может оказаться весьма жестким из-за большой доходности краткосрочных кредитов, например, в торговле. В таком случае придется искать инвестора, который будет финансировать проект, не требуя выполнения этого условия, или рассчитывать на свои силы.

На четвертом этапе проектирования в случае необходимости уточняется решение задачи синтеза ЭТО и с помощью решения самосогласованной краевой задачи электродинамики и теплопроводности (тепломассопереноса) проводится математическое моделирование технологического процесса в проектируемом ЭТО (У СВЧ ДН), с помощью которого проверяется достижение требуемых производительности и равномерности нагрева (качества продукции).

Оптимально спроектированное ЭТО требует рациональной эксплуатации. Строго говоря, при эксплуатации технологического оборудования требуется всего лишь руководствоваться технологическими картами. Но ЭТО является крупным потребителем электроэнергии, а потому вопросы рациональной эксплуатации связаны с экономией электроэнергии (снижением удельного расхода электроэнергии) и тем самым – со снижением себестоимости продукции. Для проведения государственной политики в области энергосбережения сейчас создана соответствующая правовая и нормативная базы. На стадии эксплуатации отправной точкой в энергосбережении является энергетическое обследование, проводимое в целях оценки эффективности использования энергоресурсов и снижения затрат потребителей на топливо и энергообеспечение.

Отметим недостаточную определенность в терминологии в этой области. Так, добровольное энергетическое обследование зачастую называют энергоаудитом в отличие от обязательного энергетического обследования. На наш взгляд, правильнее было бы, как это делается на практике, отождествлять понятия «энергетическое обследование» и «энергоаудит», допуская для каждого из них как обязательную, так и добровольную форму.

Реализация всех рекомендаций, полезных с точки зрения энергосбережения, сформулированных в результате энергоаудита, может оказаться для предприятия непосильной в финансовом отношении. В связи с этим проблемы энергосбережения, которые могут возникнуть на стадии эксплуатации ЭТО, должны быть сняты на стадии проектирования. Сформулированные выше системообразующие принципы проектирования и эксплуатации позволяют обеспечить максимальную эффективность (прибыль) ЭТО.

Выводы

1. Сформулированы принципы проектирования и эксплуатации электротехнологического оборудования, соблюдение которых позволяет получить его максимальную экономическую эффективность.
2. Предложен способ обоснования целесообразности применения электротехнологического оборудования.
3. Сформулирована самосогласованная задача технико-экономической оптимизации и синтеза СВЧ электротехнологического оборудования и предложен алгоритм ее решения.
4. Проблемы энергосбережения при эксплуатации электротехнологического оборудования должны быть сняты еще на стадии проектирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Толстов В.А. Эффективность электротехнологических установок / В.А. Толстов, Ю.С. Архангельский. Саратов: СГТУ, 2000. 144 с.
2. Миронова А.Н. Энерготехнологическая эффективность дуговых сталеплавильных печей / А.Н. Миронова, Ю.М. Миронов. Чебоксары: Чуваш. ун-т, 1999. 153 с.
3. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов и их отбору для финансирования: Официальное издание. М.: Госстрой России, Мин. экономики РФ, Мин. финансов РФ, Госкомпром России, 1994. 31 марта. № 7. 12/ 47.
4. Экономика в электроэнергетике и энергосбережение посредством рационального использования электротехнологии. СПб.: Энергоатомиздат. СПб отд-ние, 1998. 368 с.

5. Энергетическое обследование – способ реального энергосбережения и получения дополнительной прибыли: метод. пособие / под ред. Т.Е. Троицкого-Маркова, О.Н. Будерина, В.Н. Сучкова, В.Ю. Скобарева. М.: Спорт и культура, 2002. 209 с.

6. Архангельский Ю.С. СВЧ электротермические установки лучевого типа / Ю.С. Архангельский, С.В. Тригорлый. Саратов: СГТУ, 2000. 123 с.

Колесников Евгений Владимирович –

заместитель начальника «Ростехнадзора»,

доцент кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы»

Саратовского государственного технического университета

УДК 621.365.5

С.В. Тригорлый

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕРМООБРАБОТКИ ДИЭЛЕКТРИКОВ В СВЧ КАМЕРАХ ЛУЧЕВОГО ТИПА

Проведено математическое моделирование задачи оптимизации термообработки диэлектриков в СВЧ камерах лучевого типа. Математическая модель процесса нагрева включает взаимосвязанные уравнения Максвелла и теплопроводности. Электродинамическая задача решена аналитически для случая нормального падения плоской электромагнитной волны на поверхность диэлектрика, а задача теплопроводности – с помощью метода конечных элементов.

S.V. Trigorliy

DIELECTRICS THERMAL TREATMENT OPTIMIZATION IN A BEAM TYPE MICROWAVE CHAMBERS

Mathematical modelling of dielectrics thermal treatment optimization problem in beam type microwave chambers is carried out in this article. The mathematical model of process of heating includes the interconnected Maxwell's equations and heat transfer. The electrodynamics's problem is solved analytically for a case of a normal falling of a flat electromagnetic wave on a surface of dielectric, and a problem of heat transfer – with the help of a finite element method.

Для интенсификации процессов термообработки диэлектрических материалов применяются сверхвысокочастотные установки различного типа [1]. Перспективным направлением развития сверхвысокочастотных (СВЧ) электротехнологий является применение СВЧ установок с рабочими камерами лучевого типа [2]. Такие камеры обычно разделяют на два типа: с ограниченным объемом и неограниченным объемом. В последнем случае размеры камеры значительно превышают длину электромагнитной волны.

Использование СВЧ установок с камерами лучевого типа позволяет проводить термообработку объектов различных габаритов, обеспечивая равномерный нагрев и работу в периодическом и методическом режимах.

При разработке высокопроизводительных и энергоемких сверхвысокочастотных установок в условиях повышения требований к экономической эффективности промышленных технологий большое значение приобретает проблема достижения необходимого качества нагрева за счет оптимизации технологических процессов и управления их рабочими режимами. В данной работе эта проблема решалась применительно к СВЧ камерам лучевого типа.

Поскольку в СВЧ электротермических установках с камерами лучевого типа в общем случае СВЧ антенна перемещается относительно объекта нагрева, то эти устройства можно отнести к системам с подвижными источниками воздействия. Для этих систем независимо от происходящего технологического процесса (нагрев, сушка, плавление, размораживание и другие) можно выделить три типа основных задач управления: перевод системы из начального состояния в заданное, стабилизация и слежение [3].

В данной работе рассматривалась задача перевода объекта из начального теплового состояния $Q(M)$ в заданное Q_3 , при этом в качестве критерия оптимальности принята точность перевода к заданному моменту времени t_3 [3, 4]:

$$J_D = \max |Q(M, t_3, q) - Q_3| \leq \psi . \quad (1)$$

Здесь M – точка, принадлежащая рассматриваемой области D ; t, t_3 – текущее время и заданное время; q – управляющая функция, зависящая от вида управляющего воздействия; ψ – величина допуска на равномерность нагрева.

Для процессов термообработки диэлектриков в рабочих камерах лучевого типа могут ограничиваться следующие основные параметры [4]:

– максимальная температура объекта

$$\max T(M, t, q) \leq T_*, \quad (2)$$

где T_* – допустимая температура нагрева;

– температура окружающей среды

$$T_- \leq T_0 \leq T_+, \quad (3)$$

– мощность СВЧ генератора

$$P_- \leq P \leq P_+, \quad (4)$$

– коэффициент стоячей волны по напряжению, определяющий степень согласования СВЧ камеры с линией передачи, и коэффициент полезного действия установки

$$1 \leq K \leq K_{\max} . \quad (5)$$

Математическая модель оптимизируемого процесса СВЧ нагрева включает систему взаимосвязанных уравнений Максвелла и теплопроводности, которая должна быть дополнена соответствующими краевыми условиями.

Для камер лучевого типа из-за сложности нахождения электромагнитного поля в ближней зоне излучателя обычно рассматривают нормальное падение плоской электромагнитной волны на поверхность плоского диэлектрика (рис. 1).

Тогда на основе уравнений Максвелла для случая гармонических колебаний запишем волновое уравнение, справедливое для каждого слоя диэлектрической среды

$$\frac{d^2 \dot{E}_n}{dz^2} = \dot{k}_n^2 \cdot \dot{E}_n , \quad (6)$$

где \dot{E}_n – комплексная функция напряженности электрического поля в слое с номером n ; z – координата в направлении распространения электромагнитной волны; $\dot{k}_n = \alpha_n + j\beta_n$ – ко-

эффицент распространения; α_n и β_n – коэффициент затухания и волновое число, зависящие от электрофизических свойств ε'_n и $\text{tg } \delta_n$.

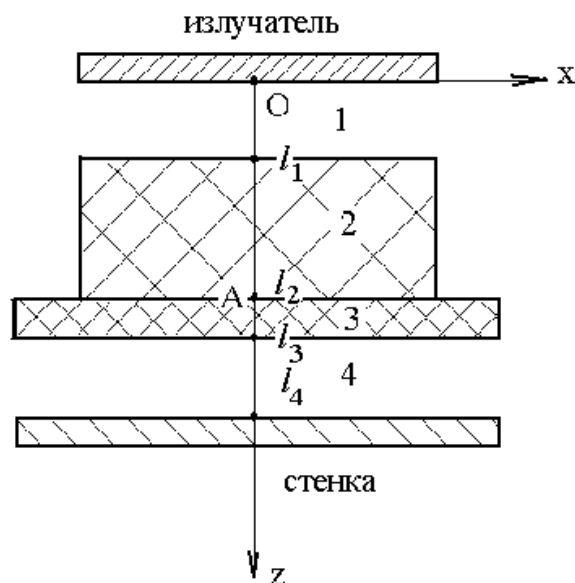


Рис. 1. Распространение электромагнитной волны в многослойной среде:
1,4 – воздух, 2 – диэлектрик, 3 – транспортная лента

Решение уравнения (4) имеет вид

$$\dot{E}_n = \dot{A}_n \cdot \exp(-\dot{k}_n \cdot z) + \dot{B}_n \cdot \exp(\dot{k}_n \cdot z) . \quad (7)$$

Напряженность магнитного поля в каждом слое равна

$$\dot{H}_n = \frac{\dot{k}_n}{j \cdot \omega \cdot \mu_n \cdot \mu_0} \cdot [\dot{A}_n \cdot \exp(-\dot{k}_n \cdot z) - \dot{B}_n \cdot \exp(\dot{k}_n \cdot z)] . \quad (8)$$

Постоянные интегрирования \dot{A}_n и \dot{B}_n определяем из следующих граничных условий:

$$\dot{E}_0 = \dot{A}_1 + \dot{B}_1 \quad \text{при } z = 0 ; \quad (9)$$

$$\dot{E}_{n-1} = \dot{E}_n, \quad \dot{H}_{n-1} = \dot{H}_n \quad \text{при } z = l_n ; \quad (10)$$

$$(n = 2, \dots, g - 1)$$

$$\dot{E}_n = 0 \quad \text{при } z = l_g , \quad (11)$$

где \dot{E}_0 – напряженность электрического поля в плоскости апертуры антенны; g - количество диэлектрических слоев. Следует заметить, что обычно известна не величина напряженности электрического поля \dot{E}_{me} на поверхности $z=0$, а плотность мощности, излучаемая антенной, которую можно записать, используя теорему Умова – Пойнтинга

$$\begin{aligned} p_0 &= 0,5 \text{Re}(\dot{E}_{me} \dot{H}_{me}^*) = \\ &= 0,5 \text{Re}\{(\dot{A}_1 + \dot{B}_1)[\dot{k}_1(\dot{A}_1 + \dot{B}_1)/(j\omega\mu_0)]^*\} , \end{aligned} \quad (12)$$

где \dot{H}_{me}^* – сопряженный комплекс напряженности магнитного поля при $z=0$. Перепишем выражения (10) и (11) с учетом (7) и (8):

$$\begin{aligned} \dot{A}_{n-1} \exp(-\dot{k}_{n-1} l_{n-1}) + \dot{B}_{n-1} \exp(\dot{k}_{n-1} l_{n-1}) = \\ = \dot{A}_n \exp(-\dot{k}_n l_{n-1}) + \dot{B}_n \exp(\dot{k}_n l_{n-1}); \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \dot{k}_{n-1} [\dot{A}_{n-1} \exp(-\dot{k}_{n-1} l_{n-1}) - \dot{B}_{n-1} \exp(\dot{k}_{n-1} l_{n-1})] = \\ = \dot{k}_n [\dot{A}_n \exp(-\dot{k}_n l_{n-1}) - \dot{B}_n \exp(\dot{k}_n l_{n-1})]; \end{aligned} \quad (14)$$

$$(n = 2, \dots, p - 1);$$

$$\dot{A}_n \exp(-\dot{k}_n l_n) + \dot{B}_n \exp(\dot{k}_n l_n) = 0; (n = p). \quad (15)$$

Таким образом, получили систему алгебраических уравнений (12)-(15) относительно комплексных постоянных \dot{A}_n и \dot{B}_n ($n=1, \dots, p$), которую решаем с помощью стандартных средств системы MathCAD 2001 [2].

Мощность внутренних источников тепла в каждом слое диэлектрика определяется из соотношения

$$q_v = 0,5 \cdot \omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon' \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot |\dot{E}|^2. \quad (16)$$

Данные о распределении $q_v(z)$ используются для определения поля температур в объекте.

Рассмотрим постановку задачи теплопроводности для случая термообработки многослойного диэлектрика в поле СВЧ. Нестационарное тепловое состояние диэлектрика возникает при следующих условиях. В начальный момент времени t_0 температурное поле объекта определяется известной функцией

$$T(x, y, z, t_0) = f(x, y, z). \quad (17)$$

В последующие моменты времени включается СВЧ энергия, и в материале объекта появляются диэлектрические потери, известные из решения электродинамической задачи. Требуется найти распределение температуры в объеме диэлектрика в зависимости от времени. Предполагаем, что общее число составных частей (слоев) объекта, включая и транспортирующую ленту, равно N .

В каждой из составных частей объемом V_m ($m=1, \dots, N$) температура T_m описывается дифференциальным уравнением теплопроводности:

$$\begin{aligned} \operatorname{div} [\lambda_m(M_m) \operatorname{grad} T_m(M_m, t)] + q_{vm}(M_m, T_m) = \\ = c_m(T_m) \rho_m \frac{\partial T_m(M_m, t)}{\partial t}; \quad M_m \in V_m, \end{aligned} \quad (18)$$

где $T_m(M_m, \tau)$ – искомое решение для температуры в каждой части тела с номером m ; $\lambda_m(M_m)$ – коэффициент теплопроводности материала диэлектрика, зависящий от положения (координат) точки M_m в объеме V_m ; $q_{vm}(M_m, T_m)$ – мощность внутренних источников тепла, зависящая от координат точки M_m в объеме V_m и от температуры; $c_m(T_m)$ и ρ_m – удельная теплоемкость и плотность материала.

На границе диэлектрик – воздух выполняются условия теплообмена с окружающей средой по закону Ньютона – Рихмана, а на границе диэлектрик- транспортная лента и между отдельными составными частями объекта – условия сопряжения.

Для расчета поля температур в нагреваемом объекте используем метод конечных элементов. На основе изложенного выше подхода разработаны алгоритм и программа расчета нагрева диэлектриков в СВЧ камерах лучевого типа [2], с помощью которых были решены задачи управления процессами термообработки диэлектриков и их оптимизации в СВЧ установках с периодическим и методическим режимом работы.

Рассмотрим возможности управления внутренними источниками тепла в процессе термообработки плиты из бука в СВЧ камере лучевого типа. В частности, изучим влияние

расположения металлической отражающей стенки относительно объекта нагрева, частоты СВЧ генератора диэлектрических свойств ϵ' и $\operatorname{tg} \delta$ на распределение мощности внутренних источников тепла и поля температуры.

Расчеты выполняем при следующих исходных данных: толщина плиты $\Delta L=5$ см; средняя плотность СВЧ мощности $p_0=3$ Вт/см²; частота $f=2450-3000$ МГц; начальная температура плиты $T_0=20^\circ\text{C}$; $\lambda=1,15$ Вт/(м·К); $c=1717$ Дж/(кг·К); $\rho=1560$ кг/м; $\epsilon'=3,4$; $\operatorname{tg} \delta=0,17$; температура окружающего воздуха $T_B=20^\circ\text{C}$.

Предполагаем, что длина плиты вдоль оси Oy значительно превосходит ее толщину, а плотность СВЧ мощности в этом направлении распределена равномерно. Поэтому теплообменом по оси Oy пренебрегаем и рассматриваем двумерную задачу теплопроводности для поперечного сечения плиты. На всей наружной поверхности задавались граничные условия третьего рода. Коэффициент теплоотдачи определяем с учетом конвекции и излучения.

Установлено, что распределение $q_v(z)$ имеет вид стоячей волны, положение минимумов и максимумов которой существенно зависит от расстояния Δl между плитой и металлической стенкой. Аналогичный характер имеет и распределение температур $T(z)$ (рис. 2). При $\Delta l=5$ см максимумы $q_v(z)$ и $T(z)$ находятся в середине пластины, а минимумы - на расстоянии $z=1$ см и $z=4$ см. После 3 мин нагрева максимальная температура равна 105°C , а минимальные составили 30 и 39°C .

При $\Delta l=1$ см картина распределения $q_v(z)$ и $T(z)$ прямо противоположна. Максимумы температур равны 83°C при $z=1$ см и 74°C при $z=4$ см, а минимум $T=33^\circ\text{C}$ при $z=2,5$ см. Управляя указанным способом распределением температур, можно интенсифицировать технологические процессы. Например, при СВЧ сушке получение максимума температур в середине объекта способствует более быстрому удалению влаги.

Приведенные выше расчетные данные получены при частоте 2450 МГц. Увеличение частоты до 3000 МГц приводит к увеличению количества максимумов и минимумов в распределении температуры по толщине диэлектрика.

Таким образом, для получения необходимого распределения температуры при нагреве диэлектриков в СВЧ камерах лучевого типа в качестве основных управляющих параметров, кроме СВЧ мощности, можно использовать расстояние от металлической отражающей стенки до объекта термообработки и частоту СВЧ генератора.

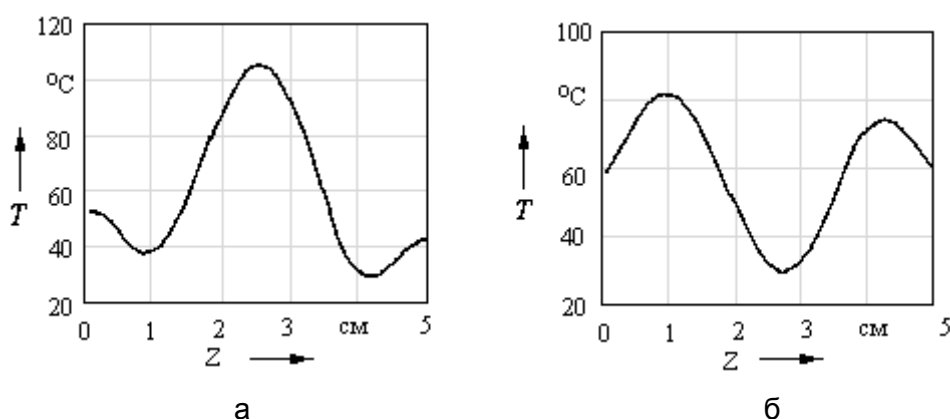


Рис. 2. Распределение по толщине диэлектрика при $t = 3$ мин: для $d = 5$ см (а) и $d = 1$ см (б)

В СВЧ электротермических установках лучевого типа, работающих в периодическом и методическом режимах, возможно соответственно стационарное расположение излучающей системы относительно нагреваемого объекта или их взаимное перемещение. Для этих

режимов рассмотрим следующие задачи оптимизации СВЧ нагрева плоских диэлектрических плит.

Задача 1. Для стационарного расположения группы излучателей (рис. 3), подключенных к отдельным СВЧ генераторам, и неподвижного объекта нагрева необходимо найти минимальную мощность каждого СВЧ генератора и максимальное расстояние между осями симметрии излучателей l , при которых максимальное отклонение температуры объекта от заданной не превысит допустимой величины (см. критерий (2)).

В качестве управляющих воздействий используем следующие параметры: мощность СВЧ генератора в случае длительной работы и импульсного режима включения при ограничении (4); температура окружающего воздуха при ограничении (3); расстояние между осями излучателей, которое не должно быть меньше ширины излучателя. Одним из ограничений является также время достижения заданной температуры t_3 .

Задача 2. Для одиночного СВЧ излучателя, перемещающегося с постоянной скоростью над поверхностью нагреваемого объекта, нужно определить минимальную мощность генератора СВЧ и максимальную скорость перемещения излучателя, при которых в квазистационарном режиме достигается заданная равномерность поля температур (2) для всего объекта или некоторой его части.

Для обеих задач принято гауссово распределение источников тепла по оси x и равномерное распределение в направлении оси y (рис. 3).

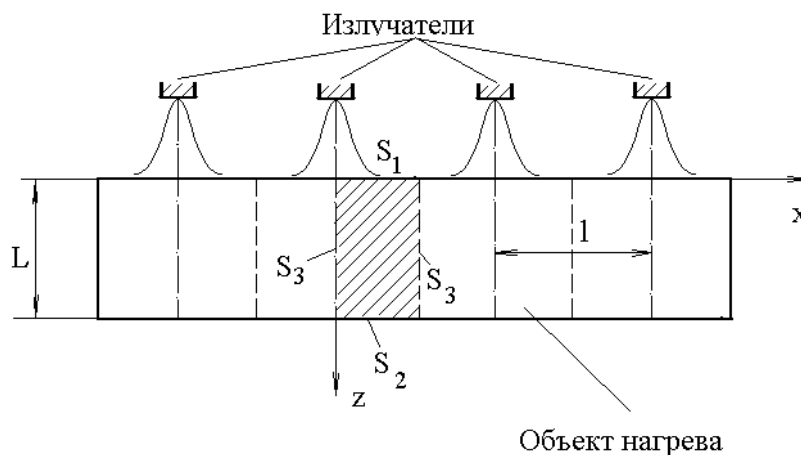


Рис. 3. Стационарное расположение излучателей

На основе рассмотренных выше математических моделей и методов направленного поиска разработан численный алгоритм решения задач оптимизации СВЧ нагрева, который включает следующие основные этапы.

Для задачи 1:

– При заданном расположении излучателей по оси x (рис. 3), известном законе распределения СВЧ мощности вдоль оси x и температуре среды T_B определяется минимальная мощность СВЧ генератора $P_{с}$, при которой максимальная из температур в узлах разбиения области на элементы достигнет допустимого значения $T_{дон}$ за время t_3 .

– Вычисляется максимальная разность между узловыми температурами и допустимым значением $T_{дон}$ и проверяется критерий оптимальности (1).

Если условие (1) выполняется, то увеличивается расстояние между осями излучателей с шагом Δl до тех пор, пока не будет найдено максимальное расстояние между излучателями, обеспечивающее заданную равномерность нагрева. Если условие (2) не выполняется на первом шаге, то расстояние l уменьшается на Δl .

– В случае, когда при $l=l_{\min}$ критерий оптимальности не выполняется, повышают температуру окружающей среды T_B с учетом ограничения (3) для получения необходимой равномерности нагрева.

– Если изменения l и T_B не приводят к требуемому результату, то для минимального расстояния l оптимизируется время импульсного воздействия СВЧ мощности на объект нагрева. При этом уровень мощности P_z устанавливается на основе предыдущих расчетов, а время включения и паузы определяется в результате проверки условия на каждом шаге по времени

$$T_{\max} < T_{\text{доп}}, \quad (19)$$

где T_{\max} – максимальная узловая температура.

Если это условие выполняется, то нагрев продолжается с той же мощностью P_z , в противном случае $P_z=0$ и наступает время паузы в течение выбранного шага Δt . По результатам расчетов определяется режим работы СВЧ генератора, обеспечивающий необходимую равномерность нагрева.

Для задачи 2:

– При неподвижном излучателе определяется необходимая мощность СВЧ генератора P_z , при которой для заданного времени t_3 максимальная узловая температура T_{\max} достигает допустимой величины $T_{\text{доп}}$.

– Вычисляется ориентировочно скорость движения по размеру излучателя a в направлении движения и времени t_3

$$v = a / t_3. \quad (20)$$

Полученные значения P_z и v используются в качестве первого приближения в дальнейших расчетах, учитывающих движение излучателя.

– Определяется начало квазистационарного теплового режима по следующему критерию

$$|T(x, z, t_j) - T(x+\Delta S, z, t_{j+1})| \leq \delta_k, \quad (21)$$

где ΔS – перемещение оси излучателя в направлении оси x за время $t_{j+1}-t_j$; $T(x, z, t_j)$ и $T(x+\Delta S, z, t_{j+1})$ – температуры узлов, находящиеся в нагреваемом объекте на одной оси с СВЧ излучателем в моменты времени t_j и t_{j+1} ; δ_k – заданная точность определения квазистационарного режима.

– Для квазистационарного режима находится узел с максимальной температурой и его координата x_{\max} . Для всех узлов, имеющих координаты $0 \leq z \leq z_1$ и x_{\max} , проверяется условие равномерности нагрева (2). Если оно не выполняется, то корректируется скорость движения излучателя или мощность генератора P_z , и расчеты повторяются.

С помощью разработанной методики решались задачи оптимизации СВЧ нагрева древесных плит (из бука) при следующих исходных данных: толщина $L=5$ см (для задачи 1), $L=25$ см (для задачи 2); частота СВЧ генератора $f=2450$ МГц; начальная температура $T_0=20^\circ\text{C}$; $T_{\text{доп}}=110^\circ\text{C}$; $\lambda=1,15$ Вт/(м·К); $c=1717$ Дж/(кг·К); $\rho=1560$ кг/м³; $\varepsilon'=3,4$; $\text{tg } \delta=0,17$.

В результате решения задачи оптимизации нагрева при неподвижных СВЧ излучателях установлено следующее.

При расположении излучателей на расстоянии $l=15$ см и повышении температуры воздуха до $T_B=70^\circ\text{C}$ распределение температур по оси x получается достаточно равномерным. Однако по глубине материала критерий оптимальности (2) при $\psi=20^\circ\text{C}$ все еще не выполняется.

В соответствии с расчетным алгоритмом далее проводим оптимизацию нагрева за счет импульсного воздействия СВЧ энергии генератора. Из приведенных на рис. 4 графических зависимостей видно, что температура различных точек плиты выравнивается с течением времени при изменении длительности включения и отключения СВЧ генератора мощностью $P_z=600$ Вт. Начиная с момента времени $t \approx 30$ мин, достигается заданная равномерность нагрева.

В результате моделирования теплового воздействия движущегося источника СВЧ излучения на пакет древесных плит получены следующие оптимальные параметры технологического режима: мощность СВЧ генератора $P_z = 600$ Вт, скорость движения излучателя $v=0,9$ см/мин. Квазистационарный тепловой режим наступает через 20 мин после начала процесса.

С этого момента времени выполняется условие заданной равномерности поля температур для области размером 3,5 см по оси z . Величина равномерно нагретого участка плиты в направлении оси x увеличивается по мере продвижения излучателя, к моменту времени $t = 40$ мин длина этого участка равна 25 см.

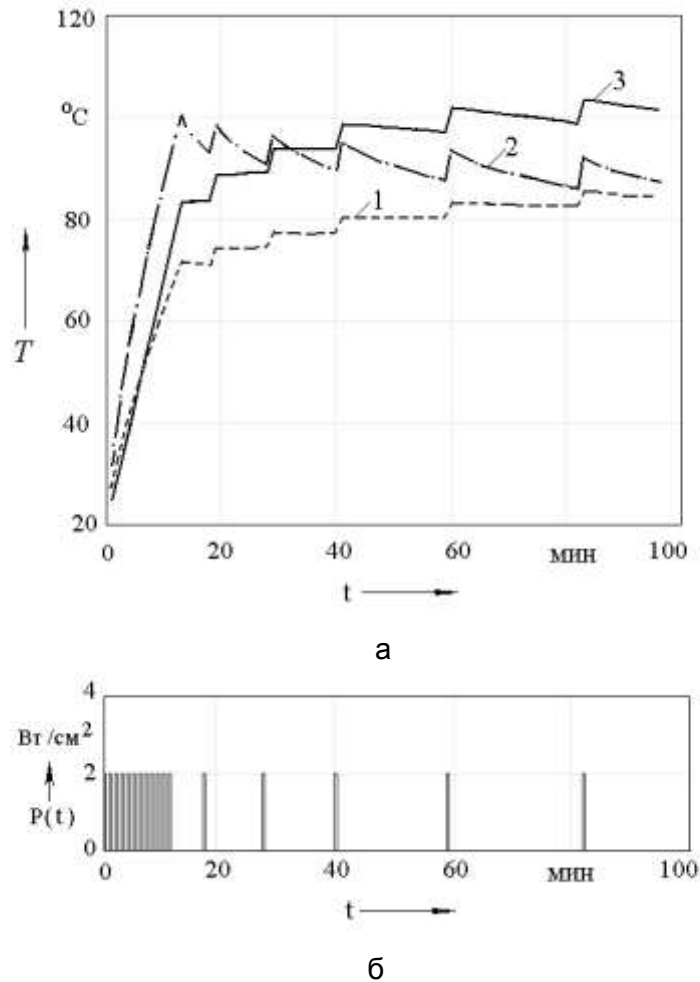


Рис. 4. Импульсный СВЧ нагрев при температуре воздуха 70°C :
 а – зависимости узловых температур от времени (1 – на нижней поверхности плиты,
 2 – в середине плиты, 3 – на верхней поверхности плиты);
 б – изменение плотности СВЧ мощности во времени

Выводы

1. Проведено математическое моделирование задачи оптимизации термообработки диэлектриков в СВЧ камерах лучевого типа, разработан численный алгоритм решения задачи при ограничениях на равномерность нагрева, мощность СВЧ генератора и температуру окружающего воздуха.

2. Определены оптимальные параметры термообработки древесных плит для достижения равномерного нагрева в СВЧ установках периодического и методического действия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Архангельский Ю.С. Сверхвысокочастотные нагревательные установки для интенсификации технологических процессов / Ю.С. Архангельский, И.И. Девяткин. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1983. 140 с.
2. Архангельский Ю.С. СВЧ электротермические установки лучевого типа / Ю.С. Архангельский, С.В. Тригорлый. Саратов: СГТУ, 2000. 122 с.
3. Чубаров Е.П. Управление системами с подвижными источниками воздействия / Е.П. Чубаров. М.: Энергоатомиздат, 1985. 288 с.
4. Тригорлый С.В. Задачи оптимизации термообработки диэлектриков в СВЧ установках лучевого типа / С.В. Тригорлый // Технологические СВЧ установки, функциональные электродинамические устройства: межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ, 1998. С. 45-53.
5. Архангельский Ю.С. Расчет камеры лучевого типа СВЧ электротермической установки / Ю.С. Архангельский, С.В. Тригорлый, Н.В. Тапилина // Электротехнологические СВЧ установки, функциональные электродинамические устройства: межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ, 1999. С. 9-13.

Тригорлый Сергей Викторович –

кандидат технических наук, доцент, заместитель директора НИЦ «Энергоком» Саратовского государственного технического университета

УДК 621.372.8

А.Р. Железняк, В.А. Коломейцев, В.В. Комаров

**МЕТОД РЕШЕНИЯ ВНУТРЕННЕЙ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ
ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ И ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ
ДЛЯ ПРОИЗВОЛЬНЫХ ВОЛНОВОДНЫХ И РЕЗОНАТОРНЫХ СТРУКТУР
С ЧАСТИЧНЫМ ТЕРМОПАРАМЕТРИЧЕСКИМ ЗАПОЛНЕНИЕМ**

Предложен метод решения совместной внутренней краевой задачи электродинамики и теплопроводности, описывающей процесс взаимодействия электромагнитных волн с диэлектрическими материалами, электрофизические и тепловые свойства которых изменяются в процессе нагрева, в произвольных волноводных и резонаторных системах.

A.R. Zheleznyak, V.A. Kolomeytsev, V.V. Komarov

**INTERNAL BOUNDARY ELECTRODYNAMIC AND HEAT CONDUCTION PROBLEM
SOLUTION METHOD FOR ARBITRARY SHAPED WAVEGUIDE AND RESONATOR
SYSTEMS WITH PARTIAL THERMOPARAMETRIC FILLING**

Method of boundary coupled electromagnetic (EM) and heat conduction problem solution, which describes processes of EM wave interaction with temper-

ature dependent dielectric materials, is proposed here. Method is valid for arbitrary shaped waveguide and resonator systems.

Большой класс диэлектрических материалов и электротехнологических процессов термообработки в СВЧ поле характеризуется значительными изменениями электрофизических и тепловых свойств обрабатываемого материала в рабочем диапазоне температур. Данное обстоятельство резко усложняет расчет и проектирование установок нагрева данных материалов. В связи с этим актуальной является разработка эффективных методов решения совместной нелинейной внутренней краевой задачи электродинамики и теплопроводности, описывающей взаимодействие электромагнитных волн с термопараметрическими материалами в произвольных волноводах и резонаторных структурах.

В работе были получены уравнения, определяющие внутреннюю краевую задачу электродинамики и теплопроводности для термопараметрических сред:

$$\begin{aligned} \nabla^2 \bar{H}(\bar{r}, \tau) - \mu \sigma(t(\bar{r}, \tau)) \cdot \frac{\partial \bar{H}(\bar{r}, \tau)}{\partial \tau} - \mu \varepsilon(t(\bar{r}, \tau)) \cdot \frac{\partial \bar{H}^2(\bar{r}, \tau)}{\partial \tau^2} = \\ \frac{\partial \sigma(t(\bar{r}, \tau))}{\partial t(\bar{r}, \tau)} \cdot \bar{I}_1(\bar{r}, \tau) - \frac{\partial \varepsilon(t(\bar{r}, \tau))}{\partial t(\bar{r}, \tau)} \cdot \bar{I}_2(\bar{r}, \tau) - \text{rot } \bar{j}_{cm}(\bar{r}, \tau), \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \nabla^2 \bar{E}(\bar{r}, \tau) - \mu \sigma(t(\bar{r}, \tau)) \cdot \frac{\partial \bar{E}(\bar{r}, \tau)}{\partial \tau} - \mu \varepsilon(t(\bar{r}, \tau)) \cdot \frac{\partial \bar{E}^2(\bar{r}, \tau)}{\partial \tau^2} = \\ \bar{I}_3(\bar{r}, \tau) + \mu \frac{\partial \bar{j}_{cm}(\bar{r}, \tau)}{\partial \tau} + \text{grad } \frac{\rho_{cm}(\bar{r}, \tau)}{\varepsilon(t(\bar{r}, \tau))}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$C_T(t(\bar{r}, \tau)) \cdot \rho_T(t(\bar{r}, \tau)) \cdot \frac{\partial t(\bar{r}, \tau)}{\partial \tau} = \lambda_T(t(\bar{r}, \tau)) \cdot \nabla^2 t(\bar{r}, \tau) + q_V(\bar{r}, \tau), \quad (3)$$

$$q_V(\bar{r}, \tau) = 0,5 \omega \varepsilon(t(\bar{r}, \tau)) \cdot \text{tg} \delta(t(\bar{r}, \tau)) \cdot |\bar{E}(\bar{r}, \tau)|^2, \quad (4)$$

где значения векторов $\bar{I}_1(\bar{r}, \tau)$, $\bar{I}_2(\bar{r}, \tau)$, $\bar{I}_3(\bar{r}, \tau)$ определяются следующим образом:

$$\begin{cases} \bar{I}_1(\bar{r}, \tau) = [\text{grad } t(\bar{r}, \tau) \cdot \bar{E}(\bar{r}, \tau)], \\ \bar{I}_2(\bar{r}, \tau) = \left[\text{grad } t(\bar{r}, \tau) \cdot \frac{\partial \bar{E}(\bar{r}, \tau)}{\partial \tau} \right], \end{cases}$$

$$\begin{aligned} \bar{I}_3(\bar{r}, \tau) = \frac{\partial \ln \sigma(t(\bar{r}, \tau))}{\partial t(\bar{r}, \tau)} \cdot \text{grad}(\bar{E}(\bar{r}, \tau) \cdot \text{grad } t(\bar{r}, \tau)) - \\ - \frac{\partial^2 \ln \sigma(t(\bar{r}, \tau))}{\partial t^2(\bar{r}, \tau)} \cdot \bar{E} \cdot |\text{grad } t(\bar{r}, \tau)|^2, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\varepsilon(t(\bar{r}, \tau)) \cdot \bar{E}(\bar{r}, \tau) = \bar{D}(\bar{r}, \tau)$; $\mu \cdot \bar{H}(\bar{r}, \tau) = \bar{B}(\bar{r}, \tau)$ – векторы электрического и магнитного смещений; $\bar{E}(\bar{r}, \tau)$, $\bar{H}(\bar{r}, \tau)$ – векторы напряженности электрического и магнитного полей; $\varepsilon(t(\bar{r}, \tau))$, μ – диэлектрическая и магнитная проницаемость среды; $\rho(\bar{r}, \tau)$ – удельная плотность заряда; $\rho_{cm}(\bar{r}, \tau)$ – удельная плотность стороннего заряда; $\bar{j}(\bar{r}, \tau)$, $\bar{j}_{cm}(\bar{r}, \tau)$ – удельная плотность тока проводимости и стороннего тока; $\sigma(t(\bar{r}, \tau))$ – удельная электропроводность среды; $t(\bar{r}, \tau)$ – температура нагрева материала; $C_T(t(\bar{r}, \tau))$, $\rho_T(t(\bar{r}, \tau))$, $\lambda_T(t(\bar{r}, \tau))$ – теплоемкость, плотность и теплопроводность термопараметрического материала; $q_V(\bar{r}, \tau)$ – удельная плотность тепловых источников в образце; \bar{r} – радиус-вектор, определяющий положение рассматриваемой точки в пространстве; τ – время.

Уравнения (1)-(5) внутренней краевой задачи электродинамики и теплопроводности получены в адиабатическом приближении. Физически это означает, что электромагнитное поле (ЭМ) практически мгновенно приходит в равновесие при изменении свойств среды в рабочем диапазоне температур. В соответствии с данным приближением электрофизические и тепловые параметры можно считать постоянными на периоде поля. Необходимо отметить, что температурная зависимость входящих в уравнения (1)-(5) параметров при решении совместной краевой задачи электродинамики и теплопроводности должна быть задана. При этом искомые решения должны удовлетворять соответствующим граничным условиям задачи электродинамики (условия Дирихле и Неймана) и теплопроводности (граничные условия 1 и 4 рода) и начальному условию.

Из соотношений (5), определяющих правую часть уравнений (1), (2) следует, что при ортогональности векторов $\bar{E}(\bar{r}, \tau)$ и $grad t(\bar{r}, \tau)$, то есть в случае, когда вектор напряженности электрического поля коллинеарен изотермической поверхности нагреваемого термометрического материала, уравнение (2) не связано напрямую с вектором $\bar{H}(\bar{r}, \tau)$, поскольку $\bar{I}_3(\bar{r}, \tau) = 0$:

$$\begin{aligned} & \nabla^2 \bar{E}(\bar{r}, \tau) - \mu \sigma(t(\bar{r}, \tau)) \cdot \frac{\partial \bar{E}(\bar{r}, \tau)}{\partial \tau} - \mu \varepsilon(t(\bar{r}, \tau)) \cdot \frac{\partial^2 \bar{E}(\bar{r}, \tau)}{\partial \tau^2} = \\ & = \mu \cdot \frac{\partial \bar{j}_{cm}(\bar{r}, \tau)}{\partial \tau} + \frac{grad \rho_{cm}(\bar{r}, \tau)}{\varepsilon(t(\bar{r}, \tau))}, \end{aligned} \quad (6)$$

то есть в случае, когда вектор напряженности электрического поля ортогонален изотермической поверхности, наблюдается обратная картина. Уравнение (1) для заданного источника ЭМ поля содержит только вектор напряженности магнитного поля ($\bar{I}_1(\bar{r}, \tau) = \bar{I}_2(\bar{r}, \tau) = 0$):

$$\begin{aligned} & \nabla^2 \bar{H}(\bar{r}, \tau) - \mu \sigma(t(\bar{r}, \tau)) \cdot \frac{\partial \bar{H}(\bar{r}, \tau)}{\partial \tau} - \mu \varepsilon(t(\bar{r}, \tau)) \cdot \frac{\partial^2 \bar{H}(\bar{r}, \tau)}{\partial \tau^2} = \\ & = -rot j_{cm}(\bar{r}, \tau). \end{aligned} \quad (7)$$

Обобщенное волновое уравнение (2) остается неизменным, при этом величина вектора $\bar{I}_3(\bar{r}, \tau)$ в данном случае максимальна. Необходимо отметить, что волновые уравнения (6), (7) при наиболее распространенном в микроволновых нагревательных системах возбуждении ЭМ волн в рабочей камере за счет не отражающего подвода СВЧ мощности от генератора посредством монотонных переходов (в данном случае $\bar{j}_{cm}(\bar{r}, \tau) = 0$, $\rho_{cm}(\bar{r}, \tau) = 0$) становятся однородными уравнениями:

$$\nabla^2 \bar{E}(\bar{r}, \tau) - \mu \sigma(t(\bar{r}, \tau)) \cdot \frac{\partial \bar{E}(\bar{r}, \tau)}{\partial \tau} - \mu \varepsilon(t(\bar{r}, \tau)) \cdot \frac{\partial^2 \bar{E}(\bar{r}, \tau)}{\partial \tau^2} = 0, \quad (8)$$

при $\bar{E}(\bar{r}, \tau) \perp grad t(\bar{r}, \tau)$,

$$\nabla^2 \bar{H}(\bar{r}, \tau) - \mu \sigma(t(\bar{r}, \tau)) \cdot \frac{\partial \bar{H}(\bar{r}, \tau)}{\partial \tau} - \mu \varepsilon(t(\bar{r}, \tau)) \cdot \frac{\partial^2 \bar{H}(\bar{r}, \tau)}{\partial \tau^2} = 0, \quad (9)$$

при $\bar{E}(\bar{r}, \tau) // grad t(\bar{r}, \tau)$.

Данное положение принципиально важно при создании микроволновых систем равномерного нагрева метрических материалов, который может быть реализован только в установках конвейерного типа при неизменной скорости протяжки обрабатываемого материала ($v=const$). При $v=const$ распределение температуры в образце в плоскости поперечного сечения волновода носит стационарный характер ($\partial t(\bar{r}, \tau) / \partial \tau = 0$) и, следовательно, коэффициент зату-

хания ЭМ волны остается неизменным во всем рабочем диапазоне температур. При этом изменение коэффициента затухания волны в направлении ее распространения носит также стационарный характер, что является необходимым условием создания микроволновых систем равномерного нагрева произвольных диэлектрических материалов [2]. Заметим, что уравнения системы (8) полностью описывают электродинамические процессы всего класса установок равномерного нагрева термодинамических материалов конвейерного типа.

Данное положение позволяет упростить искомую систему уравнений внутренней краевой задачи электродинамики и теплопроводности и привести ее к виду

$$\nabla^2 \Phi_\xi(\bar{r}, \tau) - \mu\sigma(t(\bar{r}, \tau)) \cdot \frac{\partial \Phi_\xi(\bar{r}, \tau)}{\partial \tau} - \mu\varepsilon(t(\bar{r}, \tau)) \cdot \frac{\partial^2 \Phi_\xi(\bar{r}, \tau)}{\partial \tau^2} = 0, \quad (10)$$

$$\nabla^2 t(\bar{r}, \tau) + \frac{q_y(\bar{r}, \tau)}{\lambda(t(\bar{r}, \tau))} = 0, \quad (11)$$

где

$$\begin{cases} \Phi_\xi(\bar{r}, \tau) = \bar{E}_\xi(\bar{r}, \tau) & \text{при } \bar{E}(\bar{r}, \tau) \perp \text{grad } t(\bar{r}, \tau), \\ \Phi_\xi(\bar{r}, \tau) = \bar{H}_\xi(\bar{r}, \tau) & \text{при } \bar{E}(\bar{r}, \tau) \parallel \text{grad } t(\bar{r}, \tau), \end{cases} \quad (12)$$

где $\Phi_\xi(\bar{r}, \tau)$ – составляющие вектора напряженности электрического (магнитного) поля по всем координатным направлениям. Система уравнений (10), (11) при выполнении (12) распадается на две системы, характеризующиеся однородностью волновых уравнений. Данные системы удобны тем, что к ним может быть применена продольно-поперечная поляризация ЭМ поля при решении ВКЗЭиТ.

Указанная система дифференциальных уравнений позволяет не только исследовать процесс взаимодействия электромагнитных волн с термодинамическими средами, но и определить оптимальную геометрию рабочей камеры микроволновой системы равномерного нагрева материалов с изменяющимися физическими свойствами в рабочем диапазоне температур. Поскольку система уравнений (10)-(12) описывает электромагнитные и тепловые процессы непосредственно в нагреваемом термодинамическом материале, при исследовании взаимодействия ЭМ волн с данными средами в конкретных волноводных структурах произвольного поперечного сечения с частичным термодинамическим заполнением система (10)-(12) должна быть дополнена обобщенным волновым уравнением для незаполненной части волновода, поскольку в данной области отсутствует источник тепла:

$$\nabla^2 \Phi_\xi(\bar{r}, \tau) - \mu\sigma \cdot \frac{\partial \Phi_\xi(\bar{r}, \tau)}{\partial \tau} - \mu\varepsilon \cdot \frac{\partial^2 \Phi_\xi(\bar{r}, \tau)}{\partial \tau^2} = 0, \quad \text{при } \bar{r} \in D, \quad (13)$$

где D – область поперечного сечения волновода, не занятая поглощающим материалом. Совместное рассмотрение уравнений (10)-(13) означает, что искомая ВКЗЭиТ решается классическим методом частичных областей, при котором полученные решения уравнений должны быть «сшиты» на границе раздела сред, то есть на границе раздела сред должна быть обеспечена непрерывность тангенциальных составляющих ЭМ поля.

Учитывая особенности ВКЗЭиТ для термодинамических, поглощающих СВЧ мощность материалов, можно заключить, что невозможно получить аналитическое решение данной задачи. Решение искомой совместной задачи электродинамики и теплопроводности может быть проведено в несколько этапов. На первом этапе необходимо разделить решение уравнений электродинамики и теплопроводности путем использования метода последовательных приближений, который оказывается наиболее перспективным методом при решении сложных нелинейных взаимосвязанных систем уравнений математической физики. Последо-

вательность итерационных процессов и направление этапов приближенного решения ВКЗЭиТ во многом определяются начальным агрегатным состоянием обрабатываемого материала, а также функциональной зависимостью связующего волновые уравнения теплопроводности – $q_v(\bar{r}, \tau)$. Учитывая, что в начальный момент времени термообработки температура нагрева материала равна температуре окружающей среды (t_{cp}), то есть температурный напор в объеме образца – $t_n(\bar{r}, \tau) = t(\bar{r}, \tau) - t_{cp} = 0|_{\tau=0}$, а следовательно и $grad t(\bar{r}, \tau) = 0$, а также то, что удельная плотность тепловых источников $q_v(\bar{r}, \tau)$ определяется на основе решения задачи электродинамики, решение ВКЗЭиТ в первом приближении начинается с решения волновых уравнений (1)-(2) при $\varepsilon(t(\bar{r}, \tau)) = const$ и $\delta(t(\bar{r}, \tau)) = const$. При этом значения ε_x, δ_x соответствуют $t(\bar{r}, \tau) = t_{cp}$ и определяют электрофизические параметры среды в первом приближении. Волновые уравнения в данном случае можно представить в виде

$$\nabla^2 \Phi_\xi(\bar{r}, \tau) = \mu \sigma_x \cdot \frac{\partial \Phi_\xi(\bar{r}, \tau)}{\partial \tau} - \mu \varepsilon_x \cdot \frac{\partial^2 \Phi_\xi(\bar{r}, \tau)}{\partial \tau^2} = 0, \quad (14)$$

где $\Phi_\xi(\bar{r}, \tau)$ – компонент ЭМ поля в первом приближении. Удовлетворяя полученные решения граничным условиям на внутренней поверхности волновода (условия Дирихле и Неймана) и границе раздела сред, определим структуру электрического поля в объеме обрабатываемого материала, а следовательно функцию плотности тепловых источников $q_v(\bar{r}, \tau)$, то есть неоднородную часть уравнения теплопроводности в первом приближении:

$$\frac{1}{a^2_{TX}} \cdot \frac{\partial t_1(\bar{r}, \tau)}{\partial \tau} - \nabla^2 t_1(\bar{r}, \tau) = \frac{q_{v1}(\bar{r}, \tau)}{\lambda_{TX}}, \quad (15)$$

где

$$q_{v1}(\bar{r}, \tau) = 0,5 \omega \varepsilon_x \cdot tg \ x \ \delta \cdot |\bar{E}(\bar{r}, \tau)|^2. \quad (16)$$

Решение уравнения (15) для полученного значения $q_{v1}(\bar{r}, \tau)$ (16) при заданных граничном и начальном условиях позволяет определить температурное поле в образце, а следовательно и пространственное распределение $\varepsilon_1(t(\bar{r}, \tau), \delta_1(t(\bar{r}, \tau)))|_{\tau=const}$ которые являются исходными данными решения совместной задачи электродинамики и теплопроводности для термopараметрических материалов во втором приближении, которое проводится по аналогии решения ВКЗЭиТ в первом приближении. Число циклов замкнутого итерационного процесса вычисления структуры электромагнитного и тепловых полей определяется требуемой точностью решения совместной задачи электродинамики и теплопроводности для конкретного технологического процесса обработки термopараметрического материала. Необходимо отметить, что во всех приближениях структура электромагнитного поля определяется на основе системы волновых уравнений и уравнений теплопроводности, носящих пространственно-параметрический характер:

$$\nabla_n^2 \Phi_\xi(\bar{r}, \tau) = \mu \sigma_n(t(\bar{r}, \tau)) \cdot \frac{\partial_n \Phi_\xi(\bar{r}, \tau)}{\partial \tau} - \mu \varepsilon_n(t(\bar{r}, \tau)) \cdot \frac{\partial_n^2 \Phi_\xi(\bar{r}, \tau)}{\partial \tau^2} = 0, \quad (17)$$

$$C_{Tn}(t(\bar{r}, \tau)) \cdot \rho_{Tn}(t(\bar{r}, \tau)) \frac{\partial t_n(\bar{r}, \tau)}{\partial \tau} = \lambda_{Tn}(t(\bar{r}, \tau)) \cdot \nabla^2 t_n(\bar{r}, \tau) + q_{vn}(\bar{r}, \tau), \quad (18)$$

$$q_{vn}(\bar{r}, \tau) = 0,5 \omega \varepsilon_n(t(\bar{r}, \tau)) \cdot tg \ \delta_n(t(\bar{r}, \tau)) \cdot |\bar{E}_{n-1}(\bar{r}, \tau)|^2. \quad (19)$$

Решения уравнений (17)-(19) должны удовлетворять граничным условиям Неймана и Дирихле на металлических стенках, описываемых контуром Г:

$$E_z = 0 ; \quad \frac{\partial H_z}{\partial n} = 0 , \quad (20)$$

где E_z и H_z – продольные составляющие ЭМ поля, а такие граничному условию Ньютона-Рихмана для теплового поля:

$$\alpha_n(t-t_0) = -\lambda_n \cdot \frac{\partial t_n}{\partial n} , \quad (21)$$

где α_n – коэффициент теплоотдачи; t_0 – температура окружающей среды. Кроме того, на границе раздела сред для тангенциальных компонент ЭМ поля должны выполняться условия непрерывности:

$$E_{\tau_1} = E_{\tau_2} ; \quad H_{\tau_1} = H_{\tau_2} . \quad (22)$$

Принципиальным методом решения нестационарной ВКЗЭиТ методом последовательных приближений является определение момента времени τ_n , при котором находятся пространственное распределение температуры нагрева образца и соответственно значения физических параметров $\varepsilon_n(t(\bar{r}, \tau))$, $\delta_n(t(\bar{r}, \tau))$, $\lambda_{r,n}(t(\bar{r}, \tau))$, $a_n(t(r, \tau))$, являющиеся исходными данными решения совместной задачи электродинамики и теплопроводности в следующем приближении. Величина t_n определяется из нестационарного уравнения теплопроводности (2) при условии, что на временном интервале $\nabla\tau = \tau_n - \tau_{n-1}$ не происходит резкого изменения температуры $\nabla t(\bar{r}, \tau)$ в поперечном сечении образца, а физические параметры, определяющие процесс нагрева термопараметрического материала в заданном интервале $\nabla\tau$, меняются незначительно.

Практическая реализация метода последовательных приближений при решении совместной краевой задачи электродинамики и теплопроводности для произвольных волноводных структур, частично заполненных термопараметрическим поглощающим СВЧ мощностью материалом, требует четкого определения поляризации электромагнитного поля, используемой при решении конкретной задачи электродинамики. В данной работе используется продольно-поперечная поляризация – $\bar{E}_\perp(\bar{r}, \tau)$, $\bar{E}_z(\bar{r}, \tau)$, при $\bar{E}(r, \tau) \perp \text{grad } t(\bar{r}, \tau)$, и $\bar{H}_\perp(\bar{r}, \tau)$, $\bar{H}_z(\bar{r}, \tau)$, при $\bar{E}(\bar{r}, \tau) // \text{grad } t(\bar{r}, \tau)$. Остальные компоненты электромагнитного поля $\bar{H}_\perp(\bar{r}, \tau)$, $\bar{H}_z(\bar{r}, \tau)$ при ориентации вектора напряженности электромагнитного поля вдоль изотермических поверхностей в обрабатываемом материале и $\bar{E}_\perp(\bar{r}, \tau)$, $\bar{E}_z(\bar{r}, \tau)$ при ортогональности вектора $\bar{E}(\bar{r}, \tau)$, и изотермической поверхности определяются соответственно из второго и первого уравнений Максвелла для термопараметрических сред $\bar{E}_\perp(\bar{r}, \tau)$, $\bar{H}_\perp(\bar{r}, \tau)$ – составляющие векторов напряженности электрического и магнитного полей, нормальные направлению распространения волны. Нормировка амплитуд составляющих электромагнитного поля осуществляется на основе третьего и четвертого уравнений Максвелла. Нормировка амплитуд поля должна проводиться с учетом уровня подводимой в рабочую камеру микроволновой установки СВЧ мощности.

Заметим, что практическая реализация предложенного метода решения ВКЗЭиТ для произвольных волноводных структур, частично заполненных термопараметрическим материалом, требует определения температурной зависимости физических параметров, определяющих процесс термообработки. Наиболее приемлемым способом решения данной задачи является использование эффективных численных методов и, в частности, метода конечных элементов с применением принципа Галеркина и метода взвешенных невязок, что позволит провести комплексные исследования электродинамических и тепловых свойств произвольных волноводных структур с частичным термопараметрическим заполнением и создать на их основе микроволновые системы равномерного нагрева данных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коломейцев В.А. Взаимодействие электромагнитных волн с поглощающими средами и специальные СВЧ системы равномерного нагрева: дис. ... д-ра техн. наук / В.А. Коломейцев; Сарат. гос. техн. ун-т. Саратов, 1999. 432 с.
2. Коломейцев В.А. Микроволновые системы с равномерным объемным нагревом / В.А. Коломейцев, В.В. Комаров. Саратов: СГТУ, 1997. Ч. 1. 160 с.
3. Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре / Г.Н. Дульнев. М.: Высшая школа, 1984. 286 с.
4. Брандт А.А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах / А.А. Брандт. М.: Физматлит, 1963. 450 с.

Железняк Александр Робертович –
инженер кафедры «Радиотехника»
Саратовского государственного технического университета

Коломейцев Вячеслав Александрович –
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Радиотехника»
Саратовского государственного технического университета

Комаров Вячеслав Вячеславович –
кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Радиотехника»
Саратовского государственного технического университета

УДК 621.372.8

Е.А. Куриленко, В.В. Одуев, А.Э. Семенов

СОБСТВЕННЫЕ ПАРАМЕТРЫ И СТРУКТУРА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ СВЧ РЕЗОНАТОРОВ ПРОИЗВОЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

Методом конечных разностей во временной области, реализованным в системе MATLAB, численно устанавливаются резонансные частоты СВЧ резонатора. Приводится сравнение численных и аналитических данных.

E.A. Kurilenko, V.V. Oduev, A.E. Semenov

PROPER PARAMETERS AND ELECTROMAGNETIC FIELD PATTERNS OF ARBITRARY SHAPED MICROWAVE RESONATOR

Resonance frequencies of microwave cavity resonator are simulated numerically using finite-difference time-domain method and MATLAB procedures. Numerical results are compared with analytical data.

Наибольшее распространение в пищевой промышленности и в сфере бытового применения получили электротехнологические установки на основе камер со стоячей волной (объемный резонатор). Это вызвано технологической простотой и низкой стоимостью изготовления установки, относительной универсальностью камеры, позволяющей обрабатывать

материалы различной формы и с различными свойствами. В то же время универсальность камер со стоячей волной ведёт к тому, что получить аналитическое решение уравнений Максвелла как во временной, так и в частотной области, даже для простых резонаторных камер (прямоугольной, цилиндрической) становится невозможным из-за разнообразия и сложности форм обрабатываемых материалов и нестабильности их параметров. Найти параметры камеры в этом случае можно посредством численных методов решения уравнений Максвелла.

Относительной простотой отличается численное нахождение структуры электромагнитного поля исследуемой камеры во временной области посредством метода конечных разностей [1].

При таком подходе задача решения уравнений Максвелла во временной области сводится к выбору положения узлов сетки и определению набора эквивалентных алгебраических уравнений, удовлетворяющих граничным условиям.

Решение находится для системы уравнений Максвелла, представленной в прямоугольных координатах:

$$\begin{cases} \vec{B} = \mu \vec{H} \\ \vec{D} = \varepsilon \vec{E} \end{cases}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} -\frac{\partial B_x}{\partial t} = \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z}, \\ \frac{\partial B_y}{\partial t} = \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x}, \\ -\frac{\partial B_z}{\partial t} = \frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x}, \\ \frac{\partial D_x}{\partial t} = \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - J_x, \\ -\frac{\partial D_y}{\partial t} = \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - J_y, \\ -\frac{\partial D_z}{\partial t} = \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - J_z. \end{cases} \quad (2)$$

Важным этапом формирования алгебраических уравнений, эквивалентных системе (1), (2), является определение пространственного положения сеточных точек для E и H областей. В прямоугольной системе координат в исследуемой области Ω условно выделяются сеточные узлы с пространственными координатами: $(i, j, k) = ([i-1]\Delta x, [j-1]\Delta y, [k-1]\Delta z)$, где i, j, k – порядковые номера узла по координатам x, y, z соответственно; $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ – шаги сетки по соответствующим координатным направлениям. При выборе взаимной ориентации данных точек критерием оптимальности служит простота реализации граничных условий. Для прямоугольной системы координат удобно размещать сеточные узлы для каждой из компонент поля так, как показано на рис. 1.

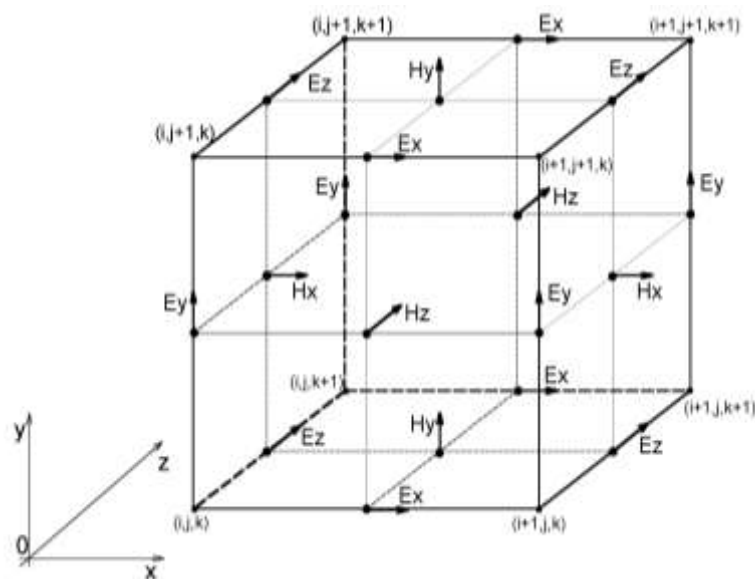


Рис. 1. E-компоненты расположены в середине рёбер;
H-компоненты расположены в центре граней

При таком расположении в узлах, соответствующих внутренней поверхности стенок исследуемой камеры, компоненты определяются в соответствии с граничными условиями. Например, если нижняя грань куба, изображенного на рис. 1, является металлической стенкой камеры, то определяемые на ней \vec{E}_x , \vec{E}_z , \vec{H}_y всё время равны нулю. Остальные компоненты поля будут определяться из алгебраических уравнений, эквивалентных системе (1), (2). Для этого все производные в системе (1) заменяются на разностные операторы [1], соответствующие сеточным узлам, приведенным на рис. 1. Необходимо учитывать, что пространственное изменение электрического поля (\vec{E}) порождает изменение магнитного поля во времени (\vec{B}), и соответственно пространственное изменение магнитного поля (\vec{H}) вызывает изменение электрического поля (\vec{E}) [2]. Это означает, что векторы \vec{B} и \vec{D} должны быть «разнесены» во времени, то есть пространственные изменения вектора \vec{E} (\vec{D}) в момент времени $\tau=n\cdot\Delta\tau$ порождают магнитное поле в момент времени $\tau=(n+1/2)\cdot\Delta\tau$, а изменение вектора \vec{H} (\vec{B}) при $\tau=(n+1/2)\cdot\Delta\tau$ порождает электрическое поле \vec{D} (\vec{E}) в следующий временной отсчет $\tau=(n+1)\cdot\Delta\tau$.

С учетом временного смещения на $0,5\Delta\tau$ и рис. 1 уравнения системы (1) можно представить следующим образом. Для магнитных компонент поля

$$\begin{aligned}
 & -\mu \frac{H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j+1/2, k+1/2) - H_x^{n-\frac{1}{2}}(i, j+1/2, k+1/2)}{\Delta\tau} \approx \\
 & \approx \frac{E_z^n(i, j+1, k+1/2) - E_z^n(i, j, k+1/2)}{\Delta y} - \frac{E_y^n(i, j+1/2, k+1) - E_y^n(i, j+1/2, k)}{\Delta z}.
 \end{aligned} \tag{3}$$

Аналогичные уравнения составляются для H_y , H_z компонент.

Для электрических компонент поля

$$\varepsilon \frac{E_x^n(i+1/2, j, k) - E_x^{n-1}(i+1/2, j, k)}{\Delta t} \approx \frac{H_z^{n-\frac{1}{2}}(i+1/2, j+1/2, k) - H_z^{n-\frac{1}{2}}(i+1/2, j-1/2, k)}{\Delta y} - \frac{H_y^{n-\frac{1}{2}}(i+1/2, j, k+1/2) - H_y^{n-\frac{1}{2}}(i+1/2, j, k-1/2)}{\Delta z} - J_x^{n-\frac{1}{2}}(i+1/2, j, k). \quad (4)$$

Аналогичные уравнения составляются для E_y , E_z компонент.

Таким образом, решение неоднородной системы уравнений Максвелла (1) сводится к последовательному пересчёту E - и H -компонент в соответствующих сеточных узлах, начиная с момента формирования начальных условий, посредством ранее полученных уравнений.

Пространственные шаги должны подбираться таким образом, чтобы за один шаг в любом из направлений x , y , z электромагнитное поле изменялось незначительно. Это означает, что для получения достоверных результатов для большего числа мод, возбуждаемых в резонаторе, необходимо, чтобы Δx , Δy , Δz были только частью длины волны интересующей высшей моды.

Кроме того, для получения устойчивого решения необходимо наложить ограничение на временной шаг Δt по отношению к заданным Δx , Δy , Δz . Если ε и μ – переменные величины, строгий критерий устойчивости получить трудно. В этом случае это соотношение целесообразнее определить опытным путем, варьируя значения Δt , поскольку расхождение решения легко обнаруживается за сравнительно малое число временных отсчётов. В любом случае для получения устойчивого решения ВКЗЭ необходимо выполнение неравенства [3]:

$$\Delta t / \Delta h^2 \leq 0,5, \quad (5)$$

где Δh – минимальный пространственный шаг.

Практические вычисления полей для трёхмерных прямоугольных объёмных резонаторов с частичным диэлектрическим заполнением с неизменными ε и μ диэлектрика в вычислительной среде MATLAB [4] показали, что для получения устойчивого решения необходимо выполнение условия

$$\Delta t = C1 \cdot \Delta h \cdot \sqrt{\mu\varepsilon}; \quad C1 \leq 0.55, \quad \sqrt{\mu\varepsilon} \geq \sqrt{\mu_0\varepsilon_0}. \quad (6)$$

Полученный набор алгебраических уравнений (3), (4) и соответствующее ему распределение сеточных узлов (рис.1) позволяют рассчитать структуру электромагнитного поля в замкнутой области Ω . При этом наличие J -компонент в (1) позволяет говорить о получении численного решения задачи возбуждения исследуемой конечной области.

Недостатком в данном случае является то, что предложенное расположение узлов сетки наиболее применимо к прямоугольной структуре Ω , поскольку, если область Ω не является прямоугольной, возникает дополнительная погрешность из-за неточности аппроксимации границы области. Кроме того, растёт время, затрачиваемое на вычисление структуры поля в данной области из-за увеличения числа процедур, описывающих границу поверхности.

Проводя достаточно длительный расчет структуры электромагнитного поля камеры, можно смоделировать процесс образования стоячих волн. Если же мы будем проследивать, как изменяется за это время в каком-либо из узлов число компонент поля, то, проведя впоследствии спектральный анализ полученной функции, можно получить резонансные частоты, соответствующие возбуждаемым в камере модам. Такой подход позволяет относительно просто определять собственные колебания объёмного резонатора, частично заполненного диэлектриком произвольной формы, что практически невозможно сделать аналитически,

причём для нахождения собственных колебаний достаточно в начальный момент задать какую-либо из компонент поля не равной нулю.

Поскольку структура электромагнитного поля исследуемой камеры при таком подходе представляет собой набор дискретных функций конечной длины, спектральный анализ поля удобней всего проводить с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ) [5]. В настоящее время процедуры, реализующие алгоритм БПФ, входят практически во все математические библиотеки языков программирования высокого уровня и специализированные пакеты для математических вычислений.

Для получения достаточной точности определения частоты колебаний необходимо, чтобы за один пространственный шаг в любом из направлений (Δx , Δy , Δz), при вычислении структуры поля электромагнитное поле изменялось незначительно. При этом найденная частота будет достоверна до тех пор, пока шаги Δx , Δy , Δz будут только частью длины волны моды.

В качестве примера в вычислительной среде MATLAB [4] были найдены собственные колебания волны H_{mn} -типа для прямоугольного резонатора со сторонами, равными 0,4 м. Вычисление структуры поля проводилось методом конечных разностей, а соответствующие этой структуре моды определялись на основании алгоритма БПФ, реализованного специальным пакетом среды MATLAB.

Резонансные частоты пустого двухмерного прямоугольного резонатора определяются по формуле [2]

$$f_{рез} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}. \quad (7)$$

На рис. 2 приведены полученные нормированные по максимальной амплитуде ($E_{z\max}$) возбуждённые моды в пустом резонаторе при заданных $\Delta x = \Delta y = 0,01$ м.

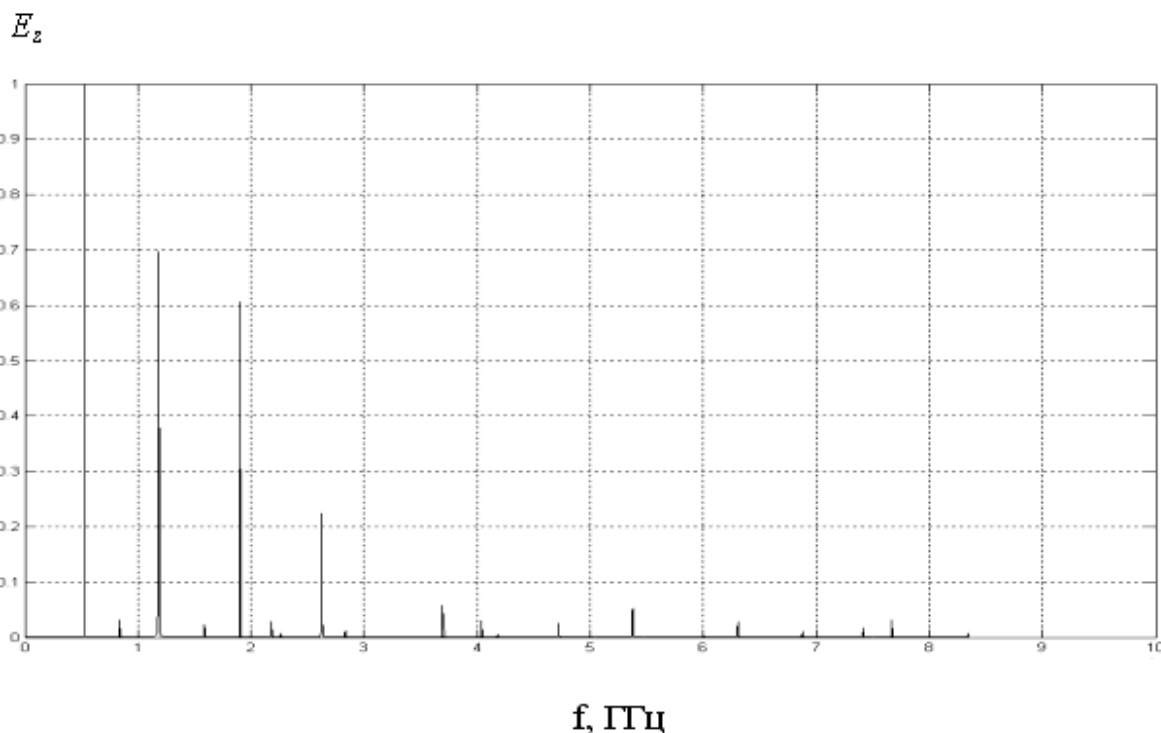


Рис. 2. Нормированные по максимальной амплитуде ($E_{z\max}$) возбуждённые моды в пустом резонаторе при заданных $\Delta x = \Delta y = 0,01$ м

В таблице выборочно приведены частоты мод (амплитудой не менее $0,04E_{z \max}$), найденные по формуле (7) и определённые по рис. 2.

Тип волны	H_{11}	H_{13}	H_{15}	H_{17}
$f_{рез}, \text{ ГГц (1)}$	0,530	1,186	1,912	2,652
$f_{рез}, \text{ ГГц (рис. 1)}$	0,531	1,184	1,905	2,625

Выше частоты 2,652 ГГц численное определение мод не достоверно, поскольку длина волны моды ($\lambda_{17}=c/f_{рез}=3 \cdot 10^8 / 2,652 \cdot 10^9 \approx 0,113$ м) становится соизмеримой с пространственными шагами сетки, и одной и той же численно найденной моде можно сопоставить несколько аналитически найденных частот.

Подробный анализ рисунка показывает, что в спектре присутствуют практически все резонансные частоты (на рис. 3 показан увеличенный участок спектра, изображенного на рис. 2).

Более интересным численный метод представляется в случае частичного заполнения резонатора, когда аналитически проводить исследование не представляется возможным. На рис. 4 приведён спектр ранее рассмотренного резонатора с теми же исходными и расчетными данными и с помещённым в центр резонатора диэлектриком размером $0,2 \times 0,2$ м с относительными диэлектрической и магнитной проницаемостями: $\epsilon' = 20$, $\mu' = 1$ соответственно.

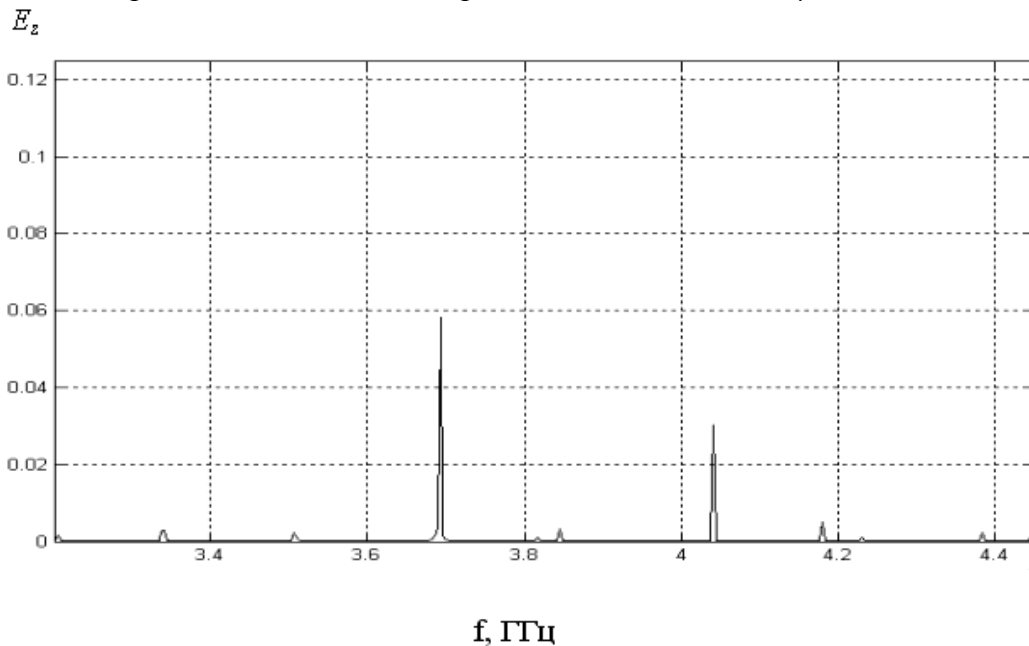


Рис. 3. Увеличенный участок спектра моды в пустом резонаторе при заданных $\Delta x = \Delta y = 0,01$ м

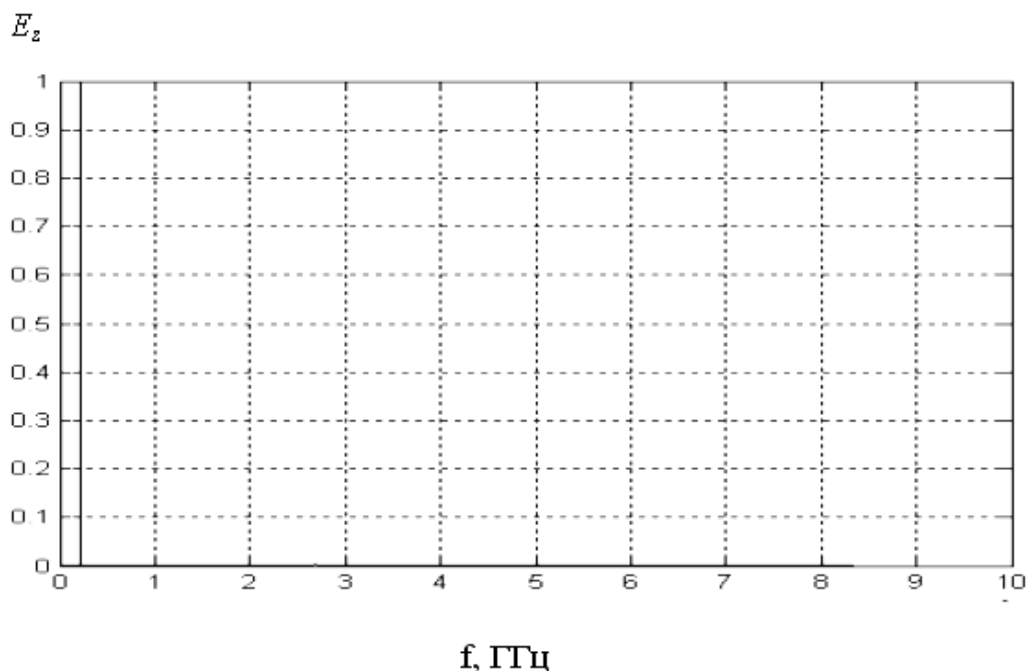


Рис. 4. Спектр резонатора с помещённым в центр диэлектриком размером $0,2 \times 0,2$ м с относительными диэлектрической и магнитной проницаемостями: $\epsilon' = 20$, $\mu' = 1$

Таким образом, совмещение численного нахождения решения уравнений Максвелла во временной области с последующим спектральным анализом позволяет достаточно точно находить собственные колебания исследуемой резонансной камеры. Особенно актуальным это становится в случае частичного заполнения резонатора, когда аналитически проводить анализ невозможно. Кроме того, такой подход отличается большей наглядностью и приближённостью к реальным ситуациям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Самарский А.А. Численные методы / А.А. Самарский, А.В. Гулик. М.: Наука, 1989. 244 с.
2. Баскаков С.И. Электродинамика и распространение радиоволн / С.И. Баскаков. М.: Высшая школа, 1992. 416 с.
3. Поршнев С.В. Вычислительная математика: курс лекций / С.В. Поршнев. СПб.: БХВ-Петербург, 2004. 320 с.
4. Потёмкин В.Г. Matlab 5: справочное пособие / В.Г. Потёмкин. М.: Диалог-МИФИ, 1998. 314 с.
5. Гольденберг Л.М. Цифровая обработка сигнала / Л.М. Гольденберг, Б.Д. Матюшкин. М.: Радио и связь, 1985. 312 с.

Куриленко Екатерина Александровна –
 ассистент кафедры «Радиотехника»
 Саратовского государственного технического университета

Одоев Вячеслав Валерьевич –
 ассистент кафедры «Радиотехника»
 Саратовского государственного технического университета

Семенов Александр Эдгарович –
 заместитель генерального директора ГНПП «Алмаз – Фазотрон»

В.В. Комаров, В.А. Коломейцев

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАМЕРЫ СВЧ НАГРЕВА ЖИДКИХ СРЕД НА ПРЯМОУГОЛЬНОМ ВОЛНОВОДЕ С Т-РЕБРОМ

Методом конечных элементов проведен анализ собственных значений и собственных функций электромагнитного поля доминантной волны прямоугольного волновода с Т-ребром и неоднородным диссипативным заполнением емкостного зазора.

V.V. Komarov, V.A. Kolomeytsev

ELECTRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF MICROWAVE APPLICATOR FOR HEATING OF LIQUID MEDIA ON RECTANGULAR T-SEPTUM WAVEGUIDE

Proper values and proper functions of electromagnetic field of dominant mode in rectangular T-septum waveguide with inhomogeneous dissipative filling of capacitance gap are analyzed using finite element method.

В настоящее время для термообработки жидких диэлектрических сред с помощью электромагнитной (ЭМ) энергии наряду с хорошо известными конструкциями камер прямоугольной [1] и цилиндрической (www.MicroThermics.com) конфигурации успешно применяются СВЧ нагревательные устройства на волноводах сложной формы [2-4]. Одним из таких устройств является камера лабораторного анализа для исследования процессов СВЧ стерилизации физиологических растворов на прямоугольном волноводе с Т-ребром (ПВТР), описанная в работе [5]. При этом возможны две модификации данной системы с одной (рис. 1, а) и двумя фторопластовыми трубками, заполненными жидкостью и размещаемыми в емкостном зазоре волновода, где напряженность поперечного электрического поля (E_{τ}) максимальна. В работе [6] методом конечных элементов (МКЭ) были установлены зависимости нормированных критических длин волн двух низших типов, распространяющихся в неоднородном ПВТР, от геометрических размеров системы, показанной на рис. 1, а, и значений диэлектрической проницаемости заполнения технологического канала в интервале $2 \leq \epsilon' \leq 81$, а также структуры полей этих типов для $\epsilon' = 4, 9, 25, 81$. Кроме того, в [6] были проведены измерения характеристик согласования для данной системы вблизи рабочей частоты генератора $f_0 = 2375$ МГц, продемонстрировавшие приемлемый уровень отраженной мощности ($K_{СВ} \leq 1.5$) для случая, когда трубка диаметром 5 мм заполнена водой, а размеры камеры соответствуют нормированным значениям: $b/a = 0,5$; $l/a = 0,05$; $t/a = 0,6$; $d/b = 0,3$ (рис. 1).

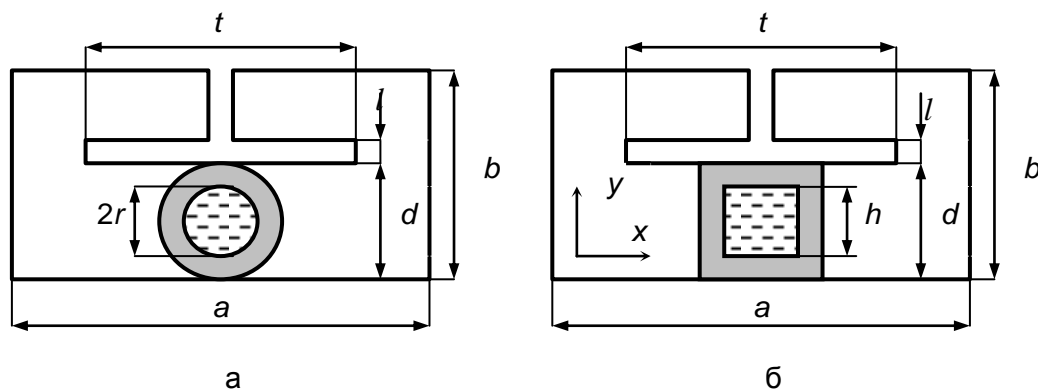


Рис. 1. СВЧ камера сложной конфигурации с цилиндрической (а) и квадратной (б) диэлектрической трубкой, заполненной диссипативной жидкостью

Результаты этих экспериментальных и теоретических исследований оказались несколько противоречивыми, так как в ходе численного анализа поля доминантной гибридной волны HE_1 был обнаружен эффект «выталкивания» поля из области взаимодействия при $\epsilon' > 55$. В то же время эксперимент показал, что ЭМ поле локализуется преимущественно в центре емкостного зазора, где размещается трубка с жидкостью. Аналогичные экспериментальные результаты были получены и при измерениях напряженности электрического поля на частоте 915 МГц, выполненные для технологической установки на ПВТР в [4].

Для более детального изучения электродинамических характеристик волноводного узла СВЧ камеры сложной конфигурации в данной работе была разработана конечно-элементная модель данной системы, позволяющая учитывать вариации комплексной диэлектрической проницаемости $\hat{\epsilon} = \epsilon' - j\epsilon''$, где ϵ'' – коэффициент потерь, в интервале рабочих температур $T^\circ C$ и анализировать одновременно все шесть компонент ЭМ поля. При этом были рассмотрены две конструкции камеры с диэлектрическими трубками круглой и квадратной формы (рис.1). Как правило, трубки, формирующие технологический канал, изготавливаются из фторопласта ($\epsilon' = 2,1$), но в ряде случаев могут применяться и другие материалы, например стекло. Диэлектрическая проницаемость стекла, как известно [7], зависит от процентного содержания $NaCl$ и SiO_2 и может составлять: $2,5 \leq \epsilon' \leq 8$; $0,0001 \leq \epsilon'' \leq 0,2$. С увеличением процентного содержания $NaCl$ ϵ' и ϵ'' возрастают. В данной работе примем $\epsilon' = 5,7$, $\epsilon'' = 0,0513$ ($NaCl$ – 9%; SiO_2 – 91%), что можно считать усредненными величинами. Геометрические размеры модели ПВТР были выбраны такими же, как в [6], но при этом размер широкой стенки волновода составил $a = 60$ мм, а все расчеты выполнялись для рабочей частоты 2,45 ГГц. Базовый размер диссипативного включения также был зафиксирован: $2r = h = 8$ мм (рис. 1). В качестве заполняющих сред рассматривались: вода, белково-молочный концентрат, раствор поливинилхлорида и некоторые другие жидкие вещества.

Дискретизация однородного дифференциального уравнения Гельмгольца, описывающего распределение ЭМ поля в поперечном сечении волновода сложной формы, частично заполненного диэлектриком, с потерями, осуществлялась треугольными конечными элементами векторного типа (*edge elements*), которые более точно, чем скалярные элементы Лагранжа, учитывают поведение нормальной и тангенциальной составляющих ЭМ поля на границе раздела сред [8]. Автоматизированная детализация сетки выполнялась на основе оценки локальной погрешности вычислительного процесса на отдельных участках области определения с привлечением адаптивной схемы Розенберга-Стренга расщепления треугольных элементов.

Одним из ключевых моментов повышения достоверности результатов численного моделирования является исследование сходимости алгоритма. Применительно к МКЭ данная процедура необходима, чтобы установить оптимальный порядок итогового матричного уравнения, для которого выполняется условие

$$|\gamma^* - \gamma_{u+1}| \leq \delta_m |\gamma^* - \gamma_u|^p, \quad \forall u \geq u_0, \quad \delta_m = 0, \dots, 1, \quad \lim_{u \rightarrow \infty} \gamma_u = \gamma^*, \quad (1)$$

где γ – исследуемый параметр (комплексная постоянная распространения); u_0 – начальное значение порядка матричного уравнения; p – порядок сходимости, $\delta_m = \text{const}$. Оценка сходимости конечно-элементного алгоритма проводилась отдельно для действительной и мнимой части нормированной постоянной распространения $\text{Re}(\gamma/k) = \beta/k$, $\text{Im}(\gamma/k) = \alpha/k$, где β – фазовая постоянная, α – постоянная затухания, k – волновое число свободного пространства. Анализ зависимостей $\beta/k = f(N_e)$, $\alpha/k = f(N_e)$, где N_e – число треугольных элементов сетки, показал, что

условие (1) для β/k выполняется при $N_e \geq 4000$, а для $\alpha/k - N_e \geq 5000$. Учитывая эти данные, для дальнейших расчетов была использована сетка с $N_e \approx 6000$.

На рис. 2 представлена трехмерная интерпретация двумерного распределения поперечного электрического поля $E_\tau = (E_x^2 + E_y^2)^{0.5}$ в ПВТР для двух вариантов заполнения емкостного зазора и $\epsilon = 73,39 - j 7,85$ для воды при $T = 40^\circ\text{C}$.

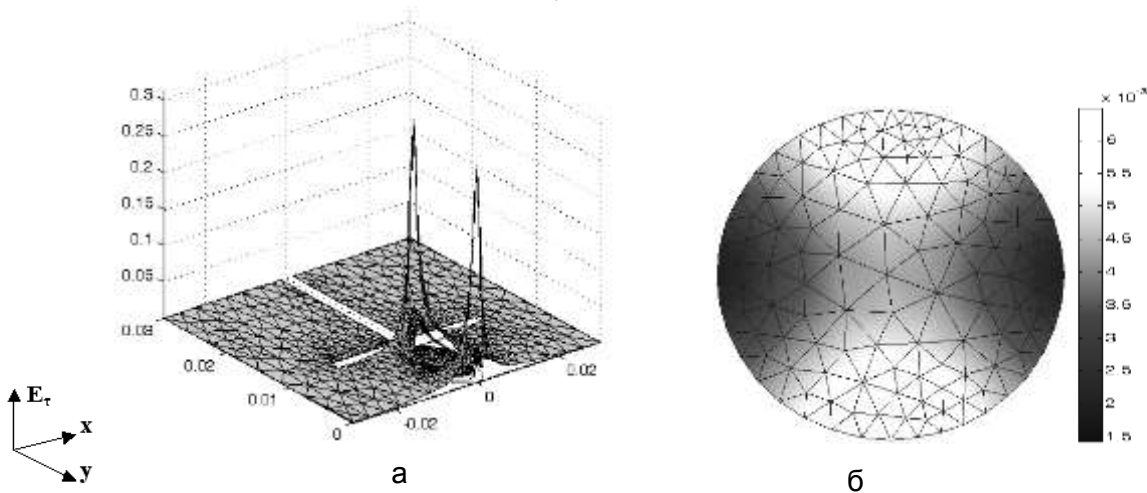
Исследования показали, что в обоих случаях максимум поля E_τ^{\max} наблюдается в стенках технологического канала в окрестности точек соприкосновения диэлектрической трубки с металлическим ребром и нижней стенки камеры на вертикальной оси симметрии волновода. В то же время минимум поля E_τ^{\min} имеет место на периферийных участках слева и справа от оси симметрии в центре емкостного зазора (по оси Y) на границе раздела сред. На рис. 2 также приведены структуры поля E_τ непосредственно в области взаимодействия, что позволяет более точно оценить функцию распределения:

$$\frac{E_\tau}{E_\tau^{\max}} = f(x, y) ; \quad -\frac{D}{2} \leq x \leq \frac{D}{2} ; \quad 0 \leq y \leq d , \quad (2)$$

где $D = 2r$ (рис. 1, а); $D = h$ (рис. 1, б).

МКЭ в данной работе были смоделированы собственные функции ЭМ поля ПВТР, в емкостном зазоре которого размещается диэлектрическая трубка с жидкой диссипативной средой и размерами волновода: $b/a = 0,5$; $l/a = 0,05$; $0,4 \leq t/a \leq 0,8$; $0,2 \leq t/a \leq 0,5$. Были рассмотрены три вещества, диэлектрические свойства которых изменяются в интервале температур: $20 \leq T^\circ\text{C} \leq 90$. Полученные результаты дали возможность установить, что при $50 \leq \epsilon' \leq 81$ в области взаимодействия формируется структура поля, описываемая гиперболической функцией

$$\frac{E_\tau}{E_\tau^{\max}} = \frac{x^2 - y^2}{D^2} . \quad (3)$$



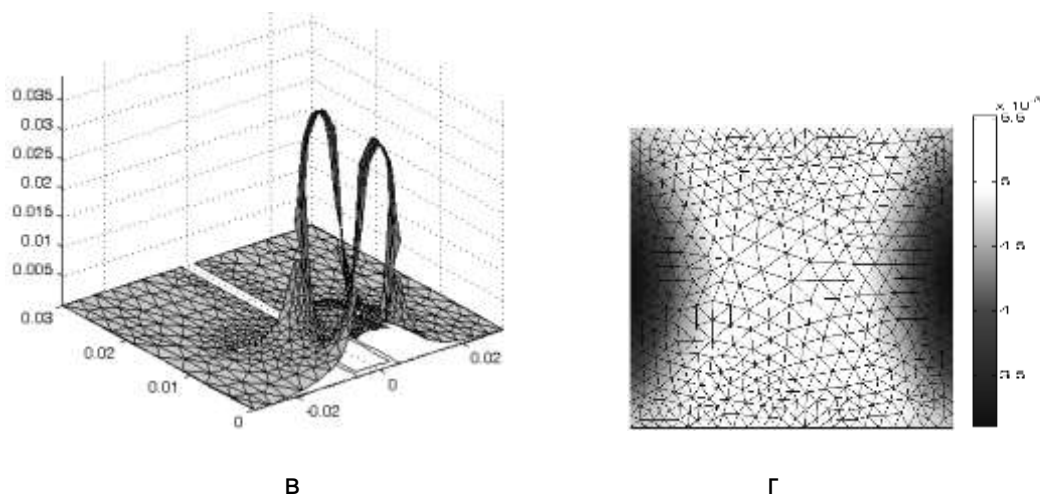


Рис. 2. Собственные функции электрического поля в поперечном сечении (а, в) и в области взаимодействия (б, г) для волны основного типа в неоднородном ПВТР

Ее обобщенная трехмерная интерпретация показана на рис. 3.

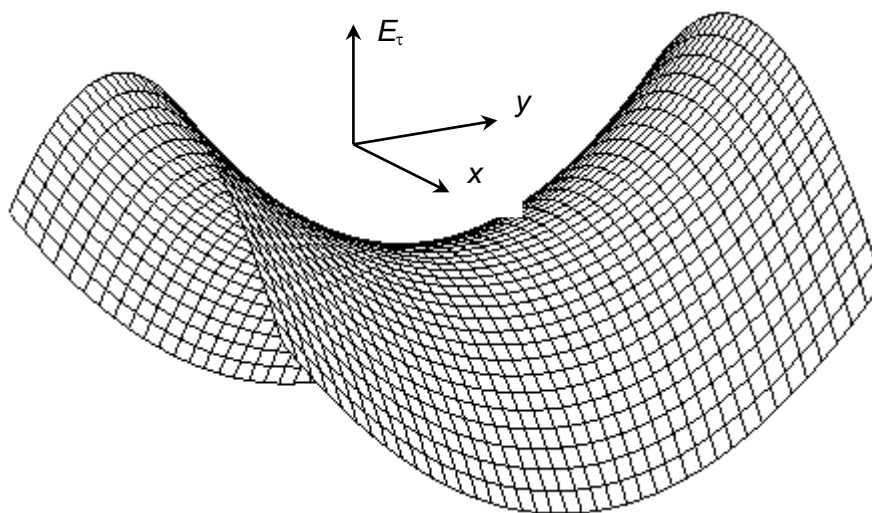


Рис. 3. Обобщенная двумерная функция распределения поперечного электрического поля в области взаимодействия

Анализ структуры поля волны основного типа ПВТР, частично заполненной средой, с потерями для рабочей частоты 2,45 ГГц, показал, что распределение функции плотности тепловых источников может оказаться неравномерным как в поперечном сечении, так и по длине поглотителя вследствие затухания ЭМ волн. Однако при вынужденной конвекции жидких сред, когда интенсивность теплоотдачи зависит от режима движения жидкости (ламинарный или турбулентный), ее теплофизических свойств, поперечных размеров канала и прочих параметров, происходит выравнивание температур вследствие появления тепловых потоков, направленных от более нагретых частей среды к менее нагретым [9]. Таким образом, не останавливаясь на деталях расчета теплоотдачи в режиме вынужденной конвекции жидкостей, примем допущение о выравнивании температур внутри жидких сред, нагреваемых СВЧ полем при неоднородном объемном тепловыделении ЭМ энергии в таких средах. Это допущение позволяет рассмотреть тепловую зависимость комплексной постоянной распространения $\gamma=f(\epsilon(T))$ или непосредственно $\gamma=f(T)$ без учета $\epsilon(x,y)$, где x и y – координаты.

На рис. 4 даны зависимости $\gamma/k(T)$ гибридных волн HE_1 и HE_2 , распространяющихся в СВЧ камере с круглой (черные и белые точки) и квадратной (сплошные линии) трубкой, заполненной водой. Геометрические размеры модели: $a=60$ мм, $b=30$ мм, $t=36$ мм, $d=10$ мм, $2r=h=8$ мм. Рабочая частота $f_0=2,45$ ГГц.

Эти данные показали, что с ростом температуры практически все зависимости $Re(\gamma/k)$ и $Im(\gamma/k)$ являются квазилинейными, за исключением трех из них для α/k . Первая кривая $\alpha/k(T)$ относится к доминантной волне модели, показанной на рис. 1, б, и характеризуется резким снижением затухания в конце температурного интервала. Две другие кривые характеризуют вариации α/k гибридной волны HE_2 с минимумом функции $\alpha/k(T)$ в центре температурного интервала для СВЧ камеры как с круглой, так и с квадратной трубкой (рис. 4).

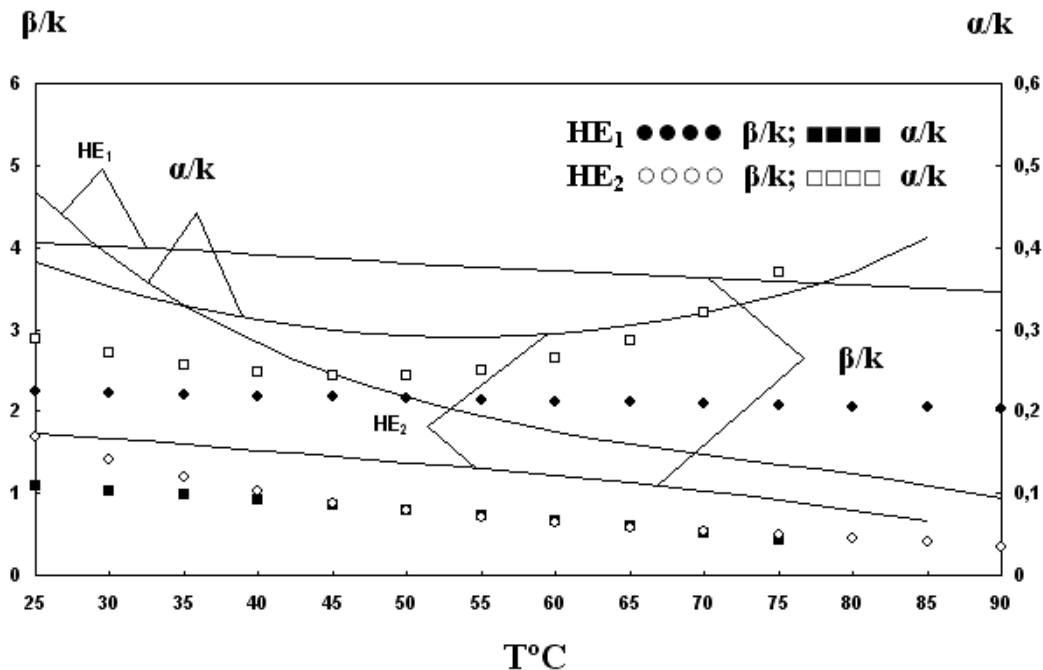


Рис. 4. Постоянная распространения двух низших типов волн неоднородного ПВТР

В ходе численного моделирования собственных значений было также установлено, что такой геометрический параметр, как толщина стенок технологического канала: $0,5(d-2r)$ (рис. 1, а) и $0,5(d-h)$ (рис. 1, б) оказывает существенное влияние на величину γ/k , что необходимо учитывать при построении двумерных и трехмерных численных моделей камер СВЧ нагрева подобного типа.

Таким образом, проведенные исследования подтвердили экспериментальные данные, полученные в работах [4, 6], и позволили уточнить двумерную функцию распределения поперечного электрического поля в емкостном зазоре камеры СВЧ нагрева жидких сред на ПВТР.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cresko J.W. A slotted waveguide applicator design for heating fluids / J.W. Cresko, V.V. Yakovlev // Proc. 9th Int. Conf. on Microwave and HF Heating. Loughborough. UK, 2003. P. 317-321.
2. Patent № 5834744 US. Tubular microwave applicator / P.O. Risman. 1998.
3. Пат. № 2101884 РФ. СВЧ нагреватель жидкости / В.Г. Букреев, А.Д. Еремин, И.М. Чекрыгина. Опубл. Б.И. 10.01.1998.

4. Koumare A. A ridged waveguide transmission type microwave applicator used in an extrusion process / A. Koumare, M. Giroux, P. Leclerc // Proc. 29th Int. Microwave Power Symposium. Chicago, USA, 1994. P. 60-63.

5. Коломейцев В.А. Микроволновые системы с равномерным объемным нагревом / В.А. Коломейцев, В.В. Комаров. Саратов: СГТУ, 1997. Ч. 1. 160 с.

6. Яковлев В.В. Особенности распространения электромагнитных волн в частично заполненных волноводах сложных сечений и устройства на их основе: дис. ... канд. техн. наук / В.В. Яковлев. М., 1992. 226 с.

7. Казарновский Д.М. Радиотехнические материалы / Д.М. Казарновский, С.А. Яманов. М.: Высшая школа, 1972. 312 с.

8. Коломейцев В.А. Метод векторных конечных элементов для расчета волноведущих структур с частичным диэлектрическим заполнением / В.А. Коломейцев, К.В. Шакин // Радиотехника и связь: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Саратов, 2004. С. 173-180.

9. Юдаев Б.Н. Техническая термодинамика. Теплопередача / Б.Н. Юдаев. М.: Высшая школа, 1988. 479 с.

Коломейцев Вячеслав Александрович –

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Радиотехника»
Саратовского государственного технического университета

Комаров Вячеслав Вячеславович –

кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры «Радиотехника»
Саратовского государственного технического университета

УДК 621.365.5

Е.В. Колесников

**ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ
НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

Рассмотрено влияние ценообразования и измерений на стадиях научных исследований, проектирования и эксплуатации электротермических установок на его эффективность.

E.V. Kolesnikov

**ENVIRONMENT INFLUENCE ON
ELECTROTHERMAL INSTALLATIONS EFFICIENCY**

Influence of pricing and measurements at stages of scientific researches, designing and operation of the electrothermal installations on his efficiency is considered in this article.

При проектировании и эксплуатации электротермических установок (ЭТУ) имеют место процедуры, выполнение которых само по себе не может обеспечить эффективность ЭТУ, но которые, безусловно, способствуют достижению максимальной эффективности этих установок. Будем называть эти процедуры внешней средой. Речь идет об измерениях в электротермии и ценообразовании.

Измерения в электротермии. Как показал опыт исследования, проектирования, изготовления и эксплуатации ЭТУ, роль измерений на стадиях экспериментальной проверки методов расчета элементов ЭТУ, обеспечения проектировщика информацией о параметрах обрабатываемых объектов, изготовления и эксплуатации ЭТУ весьма велика. Так, без знания электрических, магнитных и теплофизических параметров объекта нельзя решить задачи синтеза рабочей камеры установки диэлектрического нагрева (УДН), индуктора индукционной установки, провести математическое моделирование реализуемых в них технологических процессов. Без проведения разнообразных измерений на стадии изготовления нельзя получить установку с гарантированными рабочими параметрами, а без инструментального контроля технологического процесса нельзя обеспечить работу ЭТУ без ущерба (невосполнимого брака).

Классификация измерений в электротермии дает возможность подойти к этим измерениям с позиций системного подхода [1-3]. Традиционный вариант технической классификации с добавлением к нему измерений параметров объекта предусматривает классификацию измерений по измеряемой величине: измерение тока, напряжения, мощности, частоты, электрических и тепловых свойств материалов, параметров, характеризующих физико-механические, физико-химические и технологические свойства объекта. При этом не учитывается, что на разных стадиях создания и эксплуатации ЭТУ приходится проводить разные измерения.

На наш взгляд, более общую классификацию можно предложить, если вести речь об измерениях на этапах научных исследований, разработки, изготовления и наладки, эксплуатации ЭТУ. Для СВЧ УДН такая классификация приведена на рис. 1, где $T(\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, t)$, $U(\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, t)$, $p(\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, t)$ – температура, влагосодержание и давление в объеме объекта как функции координат $\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3$ и времени t ; E – напряженность электрического поля в объеме объекта; $K_{сми}$ – коэффициент стоячей волны по напряжению рабочей камеры; α – коэффициент затухания электромагнитной волны в линии передачи, частично заполненной обрабатываемым объектом; $\varepsilon'(T, U)$; $\operatorname{tg} \delta(T, U)$ – относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь объекта; h_n – коэффициент теплоотдачи испарением; $t_{об}$ – время обработки объекта в рабочей камере; $\kappa_{11}, \kappa_{12}, \dots, \kappa_{33}$ – теплообменные параметры, входящие в уравнения теплопереноса; $P_{пол}$ – СВЧ мощность, поглощаемая объектом; m – масса объекта; I, U, P, f – ток, напряжение на электродах, мощность и частота магнетрона; нагрузочные характеристики – $P(K_{\min}), f(K_{\min})$; η – КПД магнетрона; v – скорость транспортировки объекта в рабочей камере; $K_{сми \max}$ – максимально допустимый $K_{сми}$, при котором гарантирована нормальная работа магнетрона; c, ρ, λ – удельная теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности объекта; V_{\min} – минимально допустимый объем загружаемого в рабочую камеру объекта; $P_{изл}$ – величина излучаемой СВЧ УДН мощности в окружающее пространство; T_0 – температура окружающей УДН среды; Q – добротность камеры со стоячей волной СВЧ УДН.

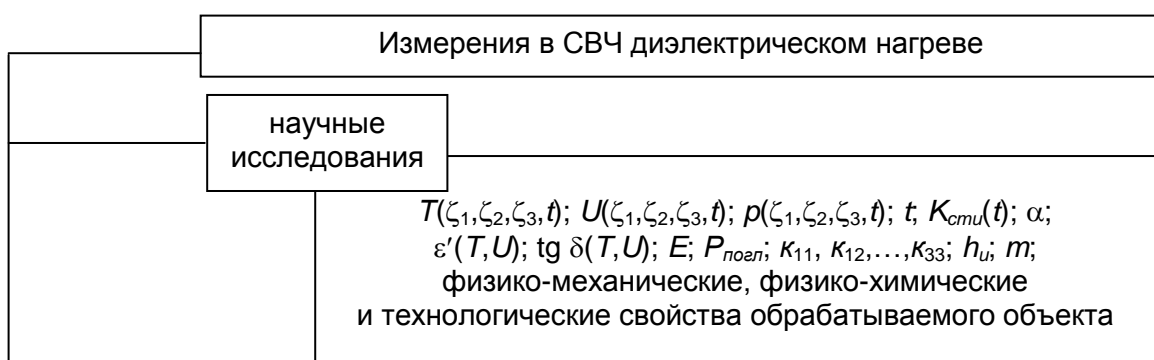


Рис. 1. Классификация измерений в СВЧ диэлектрическом нагреве

Измерения в электротермии имеют свои особенности. Применительно к СВЧ УДН их отличают:

- разнообразие (измерения электрических, тепловых параметров, в том числе с учетом тепломассопереноса, связанных с определением эксплуатационных свойств объекта, а также измерение параметров СВЧ УДН);
- короткое время измерений (в высокоинтенсивных процессах);
- непригодность в ряде случаев обычных измерительных средств (например, в СВЧ УДН термометров, термопар, термосопротивлений из-за их влияния на электромагнитное поле в зоне измерения);
- отсутствие аналогов в смежных областях (в технике СВЧ $K_{сми}$ не зависит от времени, а в СВЧ ЭТУ из-за $\varepsilon'[T(t)]; \operatorname{tg} \delta[T(t)]$ в процессе термообработки $K_{сми}(t)$);
- важное значение измерений зависимостей электрофизических, теплофизических и других параметров объекта (от температуры, влагосодержания и иных изменяющихся в процессе термообработки параметров объекта);
- меньшая точность некоторых изменений (например, при измерении электрофизических параметров как функции температуры);
- роль измерений на разных стадиях создания и применения ЭТУ в обеспечении максимальной эффективности ЭТУ различна.

На стадии научных исследований наиболее часто приходится измерять $T, U, \varepsilon', \operatorname{tg} \delta, c,$

$\lambda, h_u.$

Для измерения T используют приспособления, дающие доступ к объекту немедленно после выключения СВЧ генератора (быстрооткрываемые отверстия, через которые отпускают термопары, разъемная камера, позволяющая немедленно извлечь объект). Используется измерение T радиационным методом [2], однако дело здесь осложняется небольшим превышением температуры объекта над температурой окружающей среды.

Измерение влагосодержания объекта наиболее точно проводят взвешиванием. Этот метод обычно используется и для градуировки других средств измерения влагосодержания бесконтактным методом [3].

Измерения ϵ' и $\operatorname{tg} \delta$ необходимо проводить на той частоте, на которой должна работать ЭТУ, а поскольку эта частота в конечном счете определяется в результате технико-экономических оптимизационных расчетов, надо знать зависимости ϵ' и $\operatorname{tg} \delta$ от частоты, а это очень осложняет ситуации в ВЧ и СВЧ диапазонах, так как в этих диапазонах нужно иметь совершенно разную измерительную технику.

Для получения высокой точности измерений ϵ' и $\operatorname{tg} \delta$ надо обеспечить однородность образца объекта, постоянство его характеристик в процессе измерения, изготовление образца заданной формы с высокой точностью. Как правило, в отношении объекта, предлагаемого к термообработке в электромагнитном поле, удовлетворить этим требованиям невозможно. Однако при проектировании СВЧ УДН для достижения КПД по использованию СВЧ энергии в 99% достаточно знать ϵ' с точностью $\pm(8...10)\%$, а $\operatorname{tg} \delta$ с точностью $\pm 5\%$. Куда существеннее для достижения максимальной эффективности СВЧ УДН знать зависимость ϵ' и $\operatorname{tg} \delta$ от температуры и влагосодержания, и здесь хорошо себя зарекомендовал метод волноводного моста [4].

Измерения теплообменных параметров – наиболее сложные в диэлектрическом нагреве. Так, теплообменные параметры $\kappa_{11}, \kappa_{12}, \dots, \kappa_{33}$ в задачах о ВЧ и СВЧ сушке пока практически не измеряются, и если коэффициент теплоотдачи конвекций h_k хорошо изучен, то об экспериментальном определении h_u сведений крайне мало [2]. h_u может быть определен экспериментально на установке, представляющей собой по сути дела СВЧ сушилку. Измерив приходящую от генератора и отраженную от сушилки СВЧ мощность, прошедшую в балластную нагрузку, зная s , ρ находят h_u из уравнения теплового баланса (мягкий и жесткий режимы сушки).

Измерения на стадии научных исследований требуют значительных затрат и, способствуя созданию эффективной ЭТУ, увеличивают стоимость установки, в этом смысле снижают ее экономическую эффективность. По этой причине заказчик предпочитает иметь дело с фирмой, способной провести проектирование установки без дополнительных научных исследований.

Измерения на стадии разработки УДН проводятся в том или ином объеме в зависимости от того, какой стратегии придерживается разработчик. Их больше, если планируется создать новый тип установки, методы расчета которого еще не разработаны, или технологический процесс осуществляется впервые. В этом случае увеличиваются затраты на разработку, отчего экономическая эффективность ЭТУ уменьшается. То же самое имеет место тогда, когда разработчик не в полной мере владеет методами расчета таких установок и прибегает к экспериментальной отработке элементов ЭТУ.

Их существенно меньше, если разработка ведется на базе совместного решения задач технико-экономической оптимизации и синтеза установки. В этом случае разработчику нередко не хватает сведений об электрофизических и теплофизических параметрах объекта.

Измерения ϵ' и $\operatorname{tg} \delta$ на стадии разработки желательно проводить оперативно и без применения дорогостоящего специального оборудования. На частоте 2450 МГц это можно сделать с помощью широко распространенных СВЧ (микроволновых) печей методом сравнения с мерой [2]. Таким же образом можно измерить удельную теплоемкость s , а измере-

ние коэффициента теплопроводности в задачах СВЧ нагрева проводят методом стационарного теплового потока.

Кроме традиционных измерений геометрических размеров деталей, на стадии изготовления и наладки проводят измерения параметров всех узлов установки на их соответствие заданию, так что затраты на измерения должны быть учтены в стоимостных характеристиках установки.

Обычно измеряют ток и напряжение анода и накала катода магнетрона, а также ток электромагнита, если он имеется. Все эти измерения проводятся традиционными методами и средствами.

Частоту магнетрона на этой стадии не контролируют, так как магнетрон – покупное изделие, и не было случая, чтобы частота генерируемого им колебания отличалась от указанной в паспорте прибора. А вот мощность СВЧ измеряют всегда, контролируя работоспособность источника энергии. К тому же соответствие реально генерируемой СВЧ мощности, заложенной в проект установки, гарантирует получение продукции заданного качества.

Для измерения P обычно используются измерения поглощаемой мощности калориметрическим ваттметром (ваттметры большой мощности) или, если их нет, измеряют падающую на согласованную калориметрическую нагрузку мощность с помощью направленного ответвителя.

На стадии эксплуатации проводятся лишь те измерения, которые предусмотрены техническими условиями эксплуатации установки. Для удешевления установки, то есть повышения ее экономической эффективности, проектировщику необходимо включать в состав установки минимум измерительных приборов, контролирующих допустимый минимум параметров. Разумеется, проводят контроль готовой продукции и ремонт вышедшего из строя оборудования. В СВЧ УДН, например, приходится использовать резерв с последующим ремонтом СВЧ генератора и его источника питания, а следовательно проводить измерения и, в первую очередь, мощности магнетрона.

Все эти измерения влияют на эффективность установки и проводятся описанными выше способами.

Цены на УДН, единицу выпускаемой продукции, тарифы на электроэнергию и холодную воду входят в выражение интегрального эффекта [5] в явном виде и решающим образом влияют на эффективность ЭТУ и их привлекательность для заказчика.

Нужно иметь в виду, что решение задачи технико-экономической оптимизации ЭТУ требует знания цен установки (самого дорогого ее элемента – источника энергии), электродвигателей транспортной системы и системы удаления паров как функции мощности СВЧ генератора.

В технико-экономических оптимизационных расчетах цены, входящие в выражение для интегрального эффекта \mathcal{E}_y , следует представлять в виде

$$C = aP^2 + bP + c \quad (1)$$

Экономическая эффективность тем меньше, чем больше цена установки (проекта), то есть чем больше банковский кредит, который приходится брать для реализации проекта.

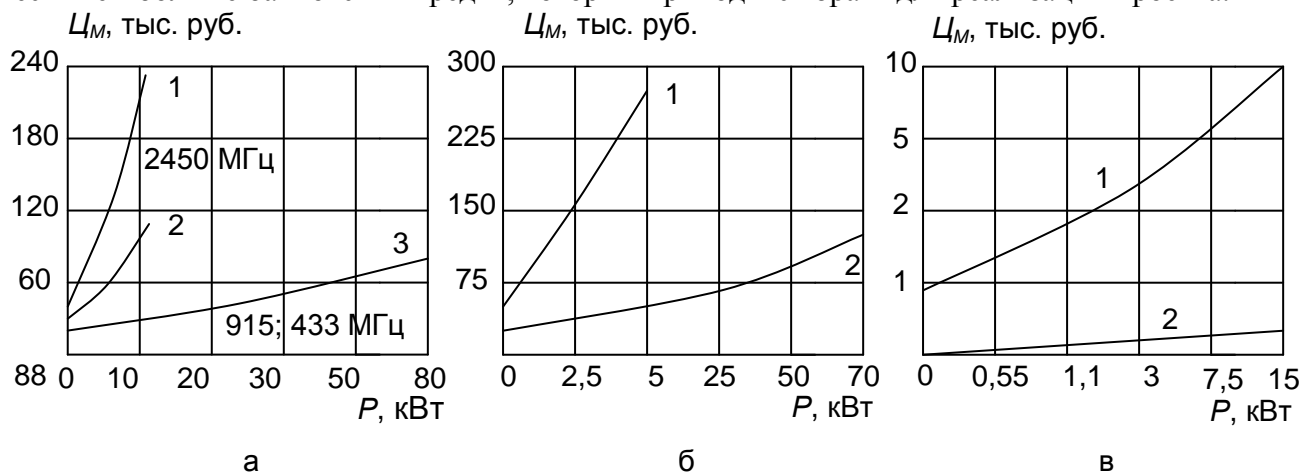


Рис. 2. Цены элементной базы: а – цены магнетронов (1, 3 – декабрь 2002 г., 2 – июль 2001 г.); б – цены источника питания СВЧ генератора (1 – июль 2001 г., 2 – 1990 г.); в – цены электродвигателей (1 – 2001 г., 2 – 1990 г.); г – цены рабочих камер; д – цены линий передачи; е – цены транспортных систем [5]

На стадии обоснования целесообразности проекта желательно знать величину капиталовложений K , при которой установка будет приносить прибыль (будет экономически эффективной).

Если установка выпускает один вид продукции, кредит берется краткосрочный (на один год) в начале реализации проекта, нет демонтажа установки через год, то интегральный эффект на интервале в год имеет вид

$$\mathcal{E}_\Sigma = \left[\Pi \left(\frac{C}{\mathcal{E}_\Phi} - \frac{C_{cm}}{\mathcal{E}_\Phi} \right) - C_\varepsilon - C_{zn} - C_{зч} \right] (1 - \gamma_n)(1 - \gamma_y) - C_{ни} - C_{бр} - K(1 + \kappa_a + i_{кр}), \quad (2)$$

где Π , C , C_{cm} – годовая производительность установки, цены выпускаемого изделия и сырья для его производства; C_ε , C_{zn} , $C_{зч}$ – затраты на электроэнергию и охлаждающую магнетроны воду, на заработную плату и запасные части; γ_n , γ_y – коэффициенты, учитывающие системы налогов и выплаты дивидендов; $C_{ни}$, $C_{бр}$ – затраты на научные исследования и неизбежный брак; K – капиталовложения в проект; κ_a – коэффициент амортизационных отчислений; $i_{кр}$ – банковский процент по кредитам.

Пусть

$$C_\varepsilon = Q_\varepsilon T_\varepsilon + Q_{xв} T_{xв}; \quad C_{зч} = \kappa_{зч} K, \quad (3)$$

где Q_ε , $Q_{xв}$ – расходы в год электроэнергии и холодной воды; T_ε , $T_{xв}$ – тарифы на электроэнергию и холодную воду; $\kappa_{зч}$ – коэффициент, учитывающий долю K , приходящуюся на запасные части (резервирование), тогда из (2) с учетом (3) соотношение для расчета максимальной величины капиталовложений, при которой в первый год прибыли будет достаточно, чтобы оплатить налоги, вернуть с процентом кредит и выплатить дивиденды, имеет вид

$$K_{\max} = \frac{\left[P \left(C - \frac{C_{cm}}{\Delta_{\phi}} \right) - Q_{\phi} T_{\phi} - Q_{x\phi} T_{x\phi} - C_{zn} \right] (1 - \gamma_n) (1 - \gamma_y) - C_{ni} - C_{br}}{1 + \kappa_a + i_{kr} + \kappa_{зч} (1 - \gamma_n) (1 - \gamma_y)}. \quad (4)$$

Если цена на сырье и тарифы на электроэнергию вырастут, то для выполнения своей инвестиционной политики инвестор должен будет увеличить цену выпускаемой ЭТУ продукции. Проект будет тем более экономически эффективен, чем лучше выполняется условие $K < K_{\max}$.

В последнее десятилетие из-за роста тарифов спрос на промышленные СВЧ УДН неуклонно падал, и положение в этой области электротермии сейчас можно считать критическим. Таким образом, ценообразование в электротермии превратилось в серьезную проблему.

Ее решение можно искать на базе коммерческого расчета [6], направленного на соизмерение затрат и результатов, обеспечивающее прибыльность производства. Политика ценообразования должна быть ориентирована на приспособление уровня цен к условиям рынка. Первостепенное значение приобретают снижение затрат за счет совершенствования технологии производства, внедрение новой продукции, отличающейся новыми потребительскими свойствами и повышенным качеством, совершенствование форм хозяйственных связей со смежниками, повышение производительности труда и т.п.

Коммерческий расчет как метод хозяйствования в условиях рыночной экономики реализуется в условиях монополизации в сфере производства. В этих условиях фирмы-изготовители ЭТУ для получения устойчивой прибыли должны координировать свою деятельность, стремясь обеспечить приемлемый для потенциальных заказчиков уровень цен (схема специализированных картелей, организация совместной предпринимательской деятельности, возрождение ОКБ, лизинговые сделки).

Выводы

1. Рассмотрено влияние внешней среды (измерений и ценообразования) на обеспечение экономической эффективности электротермического оборудования.
2. Приведена техническая классификация измерений в СВЧ диэлектрическом нагреве. Исследованы особенности этих измерений на разных стадиях проектирования и эксплуатации СВЧ электротермических установок.
3. Предложен способ расчета на стадии обоснования целесообразности применения СВЧ электротермической установки величины капиталовложений, при которых установка будет экономически эффективной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Архангельский Ю.С. К вопросу о классификации измерений в СВЧ электротехнологии / Ю.С. Архангельский, С.Г. Калганова, В.А. Воронкин // Электротехнология на рубеже веков: сб. науч. статей по материалам конференции. Саратов: СГТУ, 2001. С. 23-25.
2. Архангельский Ю.С. СВЧ электротермия / Ю.С. Архангельский. Саратов: СГТУ, 1998. 408 с.
3. Девяткин И.И. Определение влажности зерна по затуханию СВЧ мощности / И.И. Девяткин, В.Ф. Рулев // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. 1990. Вып. 3. С. 114-125.
4. Серебряков В.Н. Определение диэлектрических характеристик материалов с учетом изменения их температуры и влажности / В.Н. Серебряков, Е.В. Колесников // Линии передачи. Функциональные электродинамические системы и элементы. Саратов: СПИ, 1989. С. 82-85.

5. Архангельский Ю.С. Элементная база СВЧ электротермического оборудования / Ю.С. Архангельский, В.А. Воронкин. Саратов: СГТУ, 2001. 213 с.

6. Герчакова И.Н. Менеджмент / И.Н. Герчакова. М.: Банки и биржи, ЮНИТИ, 1995. 480 с.

Колесников Евгений Владимирович –

заместитель начальника «Ростехнадзора»,

доцент кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы»

Саратовского государственного технического университета

УДК 621.365.5

С.Г. Калганова

**ВЛИЯНИЕ СВЧ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ
НА КИНЕТИКУ ОТВЕРЖДЕНИЯ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ**

Рассмотрена кинетика отверждения эпоксидной смолы. Получены уравнения роста кристаллической фазы при полимеризации эпоксиолимера при воздействии СВЧ электромагнитного поля и коэффициента ускорения СВЧ электромагнитного поля. Приведены расчетные зависимости кинетики отверждения эпоксидной смолы в СВЧ электромагнитном поле.

S.G. Kalganova

**ELECTROMAGNETIC FIELD MICROWAVE INFLUENCE
ON KINETIC POLYMERIZATIONS EPOXIDE PITCHES**

The article describes epoxide pitches polymerizations kinetics. The equations of growth of a crystal phase are received at polymerization oxirane polymer at influence of the microwave of an electromagnetic field and factor of acceleration of the microwave of electromagnetic field. Settlement dependences kinetics is given polymerization epoxide pitches in the microwave an electromagnetic field.

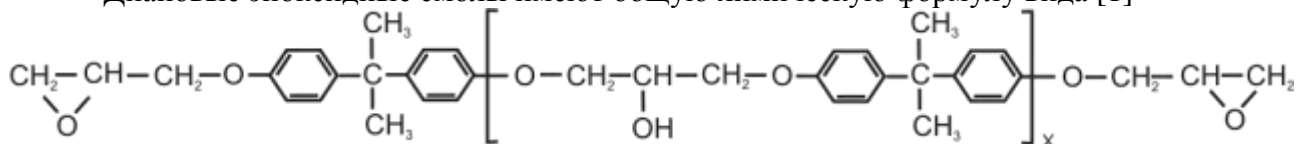
Фазовые переходы в полимерах при воздействии СВЧ электромагнитных колебаний (в СВЧ электромагнитных полях), на наш взгляд, изучены недостаточно.

Говоря о фазовых превращениях в отношении полимеров, следует, в первую очередь, иметь в виду фазовые переходы первого рода, при которых плотность вещества, термодинамические потенциалы, энтропия меняются скачком, выделяется или поглощается теплота фазового перехода.

Примерами фазовых переходов первого рода обычно приводят испарение, плавление и обратные им процессы – конденсацию, кристаллизацию, а также полиморфные превращения вещества. Сюда же можно отнести переход жидкости в твердые кристаллические и

аморфные состояния (отверждение). Отверждение – необратимый переход реакционноспособных олигомеров в нерастворимые и неплавкие (сшитые) полимеры.

Диановые эпоксидные смолы имеют общую химическую формулу вида [1]



При $x=0$ имеем диглицидиловый эфир бисфенола А (DGEBA) с молекулярной массой 340 г/моль.

Смола ЭД-20 имеет молекулярную массу $M=390-430$ г/моль, что соответствует содержанию DGEBA 85-92 мас.%, остальное – полимерные гомологи с $x=1$ (8-15 мас.%) и $x=2$ (2-3 мас.%). Энергия активации отверждения аминными реагентами составляет $A=48,5-58,9$ кДж/моль при теплоте полимеризации $Q_n=92-105$ кДж/моль [1].

Эпоксиполимеры отверждаются по аморфному и кристаллическому типу [1]. При этом, если γ – степень конверсии DGEBA, которую можно определить по результатам снятия инфракрасных спектров (ИКС), то степень полимеризации p можно определить как $p=1 / (1-\gamma)$. Согласно [2], доля полимеризованных молекул с числом полимеризованных звеньев, равных x , составляет

$$\Gamma_x = \frac{p^x}{x!} e^{-p} \frac{x}{p}, \quad (1)$$

где M_o – молекулярная масса мономера, $M_{и}$ – молекулярная масса инициатора полимеризации. Можно считать, что M_{ox} и $M_{op} \gg M_{и}$, поэтому

$$\Gamma_x = \frac{p^x}{x!} e^{-p} \frac{x}{p}. \quad (2)$$

Максимальное значение x_{\max} можно найти, взяв производную от $\ln \Gamma_x$ по x , что с использованием формулы Стирлинга $\ln x! = x \ln x - x$ [3], приводим к трансцендентному уравнению вида

$$\ln p - \ln x_{\max} + 1 / x_{\max} = 0. \quad (3)$$

Расчетная зависимость $x_{\max} - \gamma$ приведена на рис. 1, из данных которого следует, что при $\gamma \geq 0,7$ следует считать $x_{\max} \approx p$, а при $\gamma = 0,1-0,7$ величина $x_{\max} = 2-4$.

Из этих результатов можно заключить, что процесс полимеризации DGEBA реализуется по двум механизмам: медленному топокинетическому, в котором образуется кристаллическая фаза эпоксиполимера на зародышах кристаллизации, отвечающих ди- или тетрамерному полимеру, и быстрому формированию аморфной стеклофазы при степенях полимеризации порядка $p=6-100$.

Рассмотрим закономерности роста кристаллической фазы, которые подчиняются уравнению Ерофеева-Аврами-Колмогорова [4]:

$$\alpha = 1 - e^{-b\tau^n}, \quad (4)$$

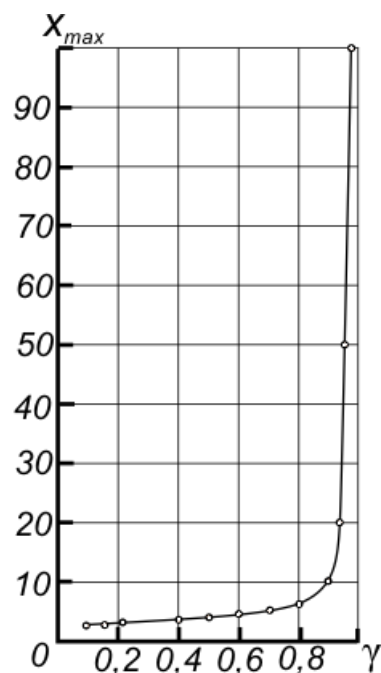


Рис. 1. Расчетная зависимость числа мономерных молекул DGEBA в максимуме распределения по молекулярным весам олигомеров в зависимости от степени полиаминной конверсии эпоксидной смолы

где $\alpha < 1$ – степень кристаллического отверждения DGEBA, которая отвечает рентгенографической степени кристалличности получаемого эпоксиполимера; $n > 0$ и $b = n K^n$, $K = B e^{\frac{A}{RT_0}}$ – константа скорости кристаллического отверждения; B – аррениусовская предэкспонента; A – энергия активации; $R = 8,314$ кДж/моль и $T_0 = 298$ К – температура окружающей среды (нагрев смеси смолы с полиаминным отвердителем при временах полимеризации 660-900 мин незначителен). После подстановки значений b и K уравнение (4) принимает вид

$$\alpha = 1 - e^{-n\tau^n} B^n e^{-\frac{nA}{RT_0}} \quad (5)$$

После двойного логарифмирования (5) получаем выражение

$$\ln[-\ln(1-\alpha)] = \ln n + n \ln B - \frac{nA}{RT_0} + n \ln \tau, \quad (6)$$

согласно которому по угловому коэффициенту прямой в координатах $\ln[-\ln(1-\alpha)] - \ln \tau$ можно определить величину

$$n = \frac{\partial \ln[-\ln(1-\alpha)]}{\partial \ln \tau},$$

а также, при известной энергии активации A , вычислить аррениусовскую предэкспоненту B .

Скорость кристаллического отверждения находится из соотношения

$$j = \frac{\partial \alpha}{\partial \tau} = n^2 \tau_{n-1} B^n e^{-\frac{nA}{RT_0}} e^{-nB^n e^{-\frac{nA}{RT_0} \tau^n}}. \quad (7)$$

Из уравнения (7) следует, что при малых τ величина j нарастает, а при больших τ – совпадает с временем отверждения, т.е. она проходит через максимум, определяемый из условия $\partial^2 \alpha / \partial \tau^2 = 0$ при $\tau = \tau_{\max}$.

Пусть $\beta < 1$ – степень аморфного отверждения эпоксиполимера и $\beta/\alpha = \xi$ – некоторая постоянная величина, определяемая по рентгенографическим данным после полного отверждения образца. Если $\gamma \leq 1$ – степень конверсии DGEBA, которую можно определить по результатам анализа ИКС, то можно записать

$$\alpha + \beta = \gamma = \alpha (1 + \xi) \quad (8)$$

или

$$\alpha = \frac{\gamma}{1 + \xi}. \quad (9)$$

Отсюда следует

$$\ln \left[-\ln \left(1 - \frac{\gamma}{1 + \xi} \right) \right] = \ln n + n \ln B - \frac{nA}{RT_0} + n \ln \tau. \quad (10)$$

Поэтому из данных ИКС построением в двойных логарифмических координатах $\ln \left[-\ln \left(1 - \frac{\gamma}{1 + \xi} \right) \right] - \ln \tau$ можно определить величину n – по угловому коэффициенту получаемых прямых и, при известной A , вычислить аррениусовскую предэкспоненту B .

Действительно, по данным рис. 2, а видно, что в диапазоне времен полиамидного отверждения $\tau \leq 3-4$ часов по результатам ИКС и вычисления эпоксидного числа [1] наблюдается спрямление экспериментальных данных в теоретических координатах

$\ln \left[-\ln \left(1 - \frac{\gamma}{1 + \xi} \right) \right] - \ln \tau$, причем величина $n=1,2$ свидетельствует в пользу расстояния между

кристаллитами эпоксиполимера, превышающего их размеры [4]. Величина B линейно уменьшается с увеличением отношения объема смолы к объему отвердителя, в то время как n и температура компаунда t не зависят от этого отношения (рис. 2, б).

Известно, что поглощенная объектом мощность СВЧ ЭМП может быть определена из соотношения [5]

$$P = \pi f \varepsilon \varepsilon_0 \operatorname{tg} \delta E_0^2 = 2,78 \cdot 10^{-13} f \varepsilon \operatorname{tg} \delta E_0^2, \quad (11)$$

где f – частота и E_0^2 – амплитуда напряженности электрического поля электромагнитной волны.

Поглощенная СВЧ энергия в расчете на 1 моль DGEBA составит

$$W = \frac{P \tau_{\text{СВЧ}} M}{\rho} = 2,78 \cdot 10^{-13} \frac{f \varepsilon \operatorname{tg} \delta E_0^2 M \tau_{\text{СВЧ}}}{\rho}, \quad (12)$$

где $\tau_{\text{СВЧ}}$ – время СВЧ обработки эпоксидного компаунда.

Уравнение (10) роста кристаллической фазы для случая СВЧ воздействия примет следующий вид:

$$\ln \left[-\ln \left(1 - \frac{\gamma}{1 + \xi} \right) \right] = \ln n + n \ln B - \frac{n(A - W)}{RT} + n \ln \tau, \quad (13)$$

где T – абсолютная температура реакционной смеси.

Здесь подразумевается, что СВЧ воздействие приводит к снижению энергетического барьера реакции отверждения кристаллической фазы, т.е. энергии активации A , на величину W , например, за счет крутильных колебаний дипольных молекул DGEBA и полиаминов электрическим вектором электромагнитного поля (ЭМП), создающих дополнительные возможности «сшивок» молекул мономера с участием инициатора при вязкости компаунда 0,8-2 Па·с [1].

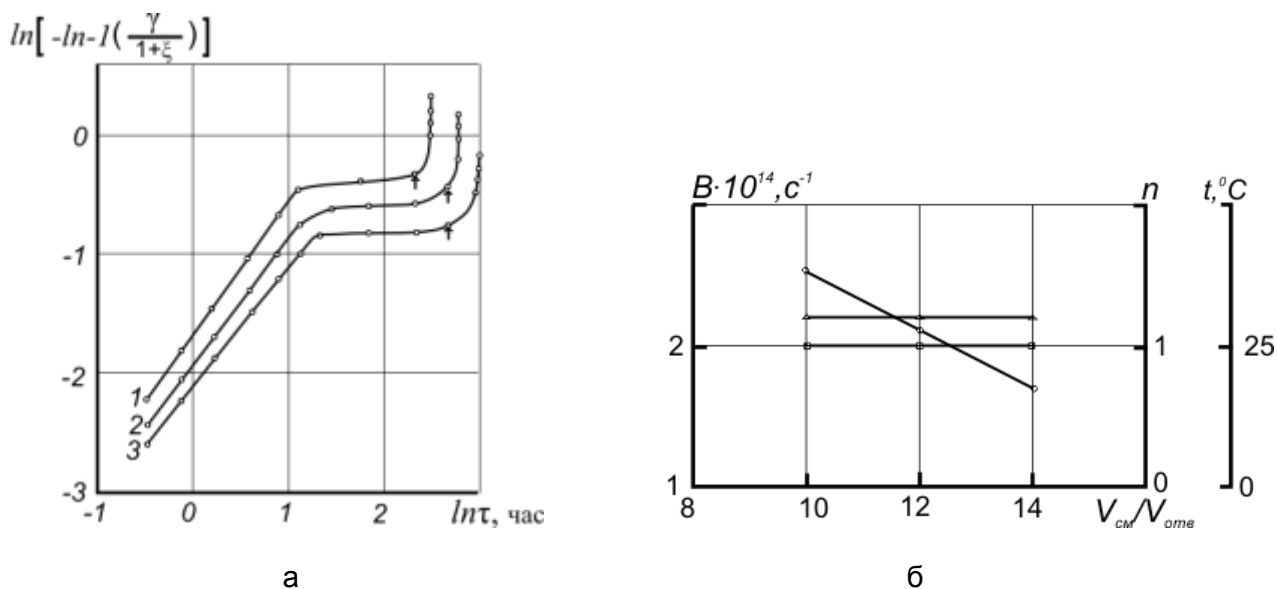


Рис. 2. Топохимическая кинетика полимеризации эпоксидной смолы ЭД-20 с полиаминным отвердителем (а) при отношениях $V_{\text{см}}:V_{\text{оме}}=10:1$ (кривая 1), $12:1$ (кривая 2), $14:1$ (кривая 3); стрелками на кривых показано влияние дополнительного подогрева полимеризующегося компаунда до 65, 100, 150 и 200°C, соответственно. Зависимости аррениусовской предэкспоненты B (кривая 1), постоянной n (кривая 2) и температуры t (кривая 3) эпоксиполимера от соотношения $V_{\text{см}}:V_{\text{оме}}$ (б)

После подстановки (12) в (13) получаем

$$\ln \left[-\ln \left(1 - \frac{\gamma}{1 + \xi} \right) \right] = \ln n + n \ln B - \frac{nA}{RT} + n \ln \tau + 2,78 \cdot 10^{-13} \frac{n f \varepsilon \operatorname{tg} \delta E_0^2 M}{\rho RT} \tau_{\text{СВЧ}} \quad (14)$$

выражение, согласно которому степень кристаллического отверждения должна линейно нарастать с увеличением времени СВЧ воздействия $\tau_{СВЧ}$ и квадратом амплитуды напряженности электрического поля E_0^2 электромагнитной волны.

Действительно, серия проведенных экспериментов с определением γ по уменьшению эпексидного числа смолы из данных ИКС [4], показала, что при всех исследованных объемных соотношениях смолы к отвердителю наблюдается однообразный ход топокинетических прямых $\ln\left[-\ln\left(1-\frac{\gamma}{1+\xi}\right)\right]-\ln \tau$ при сильном влиянии времени воздействия СВЧ ЭМП с частотой 2450 МГц и мощностью генерации 700 Вт (рис. 3, а). При этом очень существенное влияние оказывает объемное соотношение смолы к полиаминному отвердителю, рост которого приводит к ускорению отверждения эпоксиполимера. Так, при $V_{см}:V_{омб}=14:1$ и времени СВЧ обработки $\tau_{СВЧ}=50$ с эпоксиполимер отверждается за время $\tau_{омб}=21$ мин (рис. 3, а), при $V_{см}:V_{омб}=12:1$ и $\tau_{СВЧ}=50$ с эпоксиполимер отверждается за $\tau_{омб}=4$ мин, при $V_{см}:V_{омб}=10:1$ и $\tau_{СВЧ}=30$ с эпоксиполимер отверждается за время $\tau_{омб}=2$ мин. Во всех случаях процесс полиаминного отверждения DGEBA приводил к росту расчетных значений n и B с увеличением времени СВЧ воздействия $\tau_{СВЧ}$, а также экспериментально измеренной температуры t саморазогрева компаунда за счет теплоты раскрытия эпоксигрупп под действием аминов (рис. 3, б). Особо отчетливо эти эффекты наблюдались при $\tau_{СВЧ} \geq 30$ с для $V_{см}:V_{омб}=14:1$ и $V_{см}:V_{омб}=12:1$, а также при $\tau_{СВЧ} \geq 20$ с для $V_{см}:V_{омб}=10:1$.

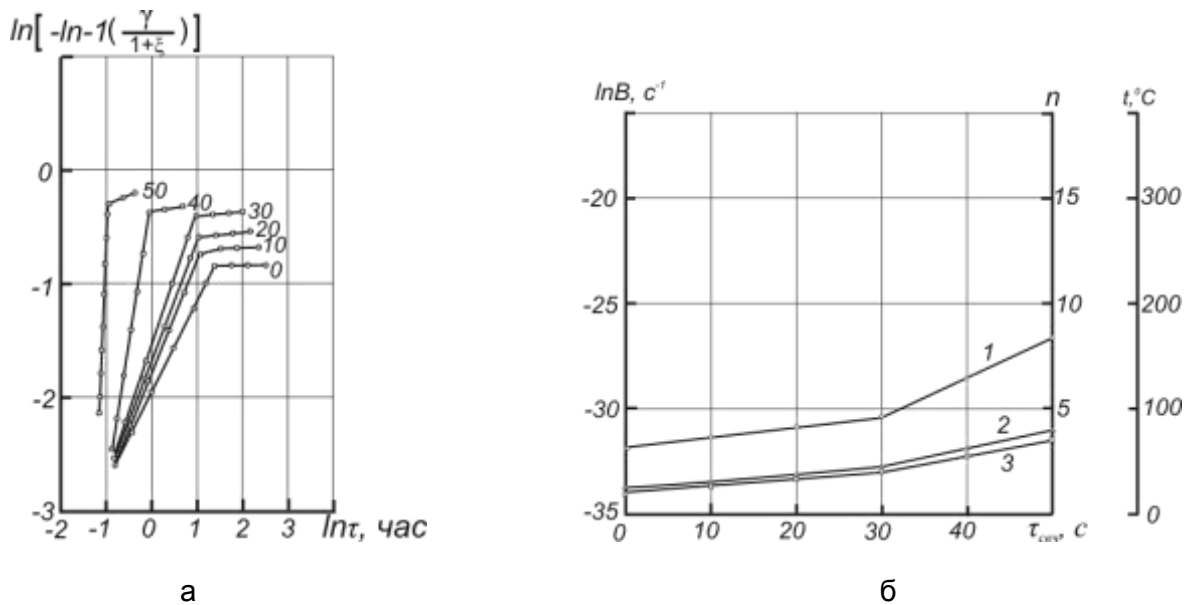


Рис. 3. Топохимическая кинетика полимеризации эпоксидной смолы ЭД-20 с полиаминным отвердителем при отношении $V_{см}:V_{омб}=14:1$ (а); цифрами на кривых обозначено время СВЧ обработки компаунда $\tau_{СВЧ}$ в секундах. Зависимости аррениусовской предэкспоненты B (кривая 1), постоянной n (кривая 2) и температуры t (кривая 3) эпоксиполимера от времени СВЧ обработки $\tau_{СВЧ}$ (б)

Пусть $\tau=\tau_0$ и $\gamma=\gamma_\infty$ – время отверждения и конечная степень конверсии компаунда без СВЧ воздействия, а $\tau=\tau_\infty$ – время отверждения при СВЧ воздействии. В этом случае на основании кинетического уравнения (14) и выражения для коэффициента ускорения СВЧ ЭМП в виде $K_\gamma=\tau=\tau_\infty$ мы можем записать

$$\ln K_\gamma = \frac{n A}{RT_0} - \frac{n A}{RT} + 2,78 \cdot 10^{-13} \frac{n f \varepsilon \text{tg} \delta E_0^2 M \tau_{СВЧ}}{\rho RT} \quad (15)$$

выражение, согласно которому $\ln K_y$ должен линейно нарастать с $\tau_{СВЧ}$.

Именно такой экспериментальный факт мы наблюдаем при всех составах эпоксиаминных компаундов для $\tau_{СВЧ} \leq 20-30$ с (рис. 4, кривые 1-3), когда отверждение кристаллической фазы эпоксиполимера идет по топокинетическому механизму, контролируемому диффузией полиаминов к зародышам эпоксиполимера, состоящим из 2-4 молекул DGEBA (рис. 1, при $\gamma \leq 0,7$).

При $\tau_{СВЧ} \geq 20-30$ с идет значительный рост γ и происходит смена механизма отверждения из-за появления полимолекулярных олигомеров с $x_{\max} = 6-100$ (рис. 1, при $\gamma > 0,7$), что в условиях саморазогрева компаунда с её перемешиванием за счет испарения легколетучих полиаминов приводит к бурному росту $\ln K_y$ с $\tau_{СВЧ}$ и образованию аморфной стеклофазы эпоксиполимера.

Поскольку основные ценные функциональные качества эпоксиполимера на основе DGEBA, например твердость и механические показатели прочности, обусловлены именно кристаллической фазой, то мы считаем необходимым проводить процесс СВЧ отверждения в топокинетическом режиме, который обеспечивает величины $K_y = 4-7$, вполне достаточные в практическом отношении (рис. 4, кривые 1-3 при $\tau_{СВЧ} \leq 20-30$ с).

Следует отметить, что обнаруженный эффект СВЧ ускорения полиаминного отверждения эпоксидной смолы вовсе не обусловлен только тепловым воздействием СВЧ электромагнитного поля, поскольку из соотношения (11) при $f = 2450$ МГц, $\epsilon = 3,5-5$, $\text{tg } \delta = 0,01-0,03$ и $E_0 \approx 25-30$ В/см величина поглощенной мощности не превышает нескольких Вт/см³, что явно недостаточно для СВЧ нагрева.

Наблюдаемое экспериментально повышение температуры реакционной смеси (рис. 3, б кривая 3) связано с саморазогревом за счет достаточно большой теплоты полиаминной эпоксиполимеризации $Q = 92-105$ кДж/моль.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ли Х. Справочное руководство по эпоксидным смолам: пер. с англ. / Х. Ли, К. Невилл; под ред. Н.В. Александрова. М.: Энергия, 1973. 415 с.
2. Эммануэль Н.М. Курс химической кинетики / Н.М. Эммануэль, Д.Г. Кнорре. М.: Высшая школа, 1974. 400 с.
3. Корн Г. Справочник по математике: пер. с англ. / Г. Корн, Т. Корн; под ред. И.Г. Арашановича. М.: Наука, 1978. 831 с.
4. Третьяков Ю.Д. Твердофазные реакции / Ю.Д. Третьяков. М.: Химия, 1978. 360 с.
5. Архангельский Ю.С. СВЧ электротермия / Ю.С. Архангельский. Саратов: СГТУ, 1998. 408 с.

Калганова Светлана Геннадьевна –

кандидат технических наук, доцент,

докторант кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы»

Саратовского государственного технического университета

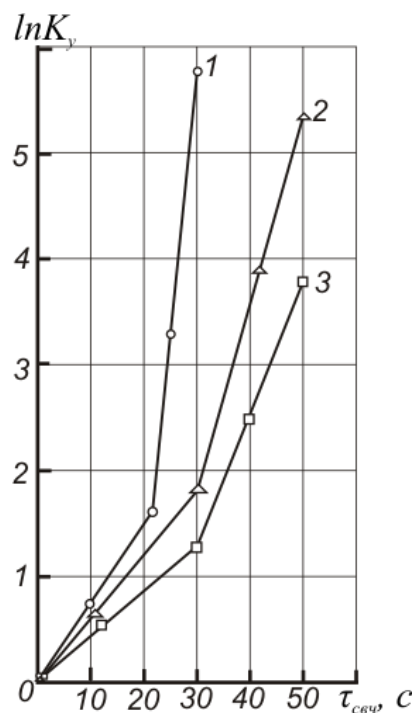


Рис. 4. Зависимости $\ln K_y - \tau_{СВЧ}$ для полимеризации эпоксидной смолы ЭД-20 с полиаминным отвердителем при объемных соотношениях $V_{см} : V_{отв} = 10:1$ (кривая 1), 12:1 (кривая 2), 14:1 (кривая 3)

Л.С. Зимин, М.Е. Федотов

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ИНДУКТОРОВ

Рассматривается актуальная проблема проектирования индукционных нагревательных установок промышленной частоты с использованием трехфазной системы электроснабжения.

L.S. Zimin, M.E. Fedotov

THE INDUCTORS PROJECTING SYSTEM CONCEPT

An actual problem of projecting of the induction heating installations of the commercial frequency is examined here.

Процесс оптимизации лежит в основе всей инженерной деятельности, которая направлена, с одной стороны, на проектирование новых, более эффективных и менее дорогостоящих технических систем и, с другой стороны, на разработку методов повышения качества функционирования существующих систем. Оптимизация даже при небольшом уменьшении затрат приводит к значительному суммарному экономическому эффекту. Она особенно ощутима для массового производства или для объектов с большими капиталовложениями, к которым относятся и технологические комплексы для обработки металлов давлением (ОМД). При этом экономия намного превышает затраты на оптимизацию, на которую целесообразно затрачивать до 15% стоимости проектирования.

Современное электротермическое производство, например участок индукционных нагревательных установок (ИНУ), предназначенное для нагрева широкой номенклатуры заготовок под деформацию, можно условно представить в виде двух транспортных потоков: 1 – металл, 2 – электроэнергия. В глобальной постановке задача оптимизации электротермического производства – это задача комплексной оптимизации потоков 1 и 2 с целью получения максимума дохода при условии выполнения заданной программы в срок и с заданным качеством. Указанная задача ставится в многокритериальной форме

$$I(X) = [I_1(X), \dots, I_n(X)] \rightarrow \max; \quad (1)$$

$$X \subset \Omega; \quad \Omega: h_i(X) \geq 0; \quad (i = 1, \dots, m).$$

Здесь $I_k(X)$ – критерии, определяющие величину дохода (капитальные и текущие затраты, надежность и гибкость энерготехнологического комплекса, стабильность экономических показателей и способность комплекса к развитию); $h_i(X)$ – ограничения (производительность и качество производства, финансовые и материальные ресурсы, экологические нормы и требования охраны труда, ограничения на площади, социальные факторы), которые определяют границы области Ω возможных проектных решений X , представляющих собой вектор параметров ИНУ, режимы их работы, а также характеристики системы электроснабжения электротермического участка – координаты трансформаторных подстанций (ТП) и узлов токопроводящей схемы, мощность и количество ТП, сечение проводов, количество и схему расстановки источников питания ИНУ.

Согласно ПУЭ, ИНУ отнесены к специальным электроустановкам, которые могут иметь отличные от общепромышленных ряды электротехнических параметров – шкалы напряжений, мощностей электропечных трансформаторов. С ростом мощности ИНУ при их однофазном исполнении возникает проблема электромагнитной совместимости ИНУ с

обычными потребителями, т.к. симметрирование группы ИНУ согласованием их одновременной работы затруднительно, а применение симметрирующих устройств становится неэкономичным. Поэтому целесообразными представляются два альтернативных решения: раздельное питание ИНУ и других потребителей или применение ИНУ в трёхфазном исполнении. Следовательно, параметр числа фаз, имеющий одно из двух значений, целесообразно определять путём, не зависящим от задачи оптимизации.

Основная трудность в формировании экономического критерия оптимизации обусловлена требованием иметь единственный обобщенный показатель, который отражал бы многочисленные частные аспекты. При учете различных аспектов экономической эффективности можно выделить четыре основных фактора, которые при заданных ценах и нормативных показателях однозначно определяют значения подавляющего большинства остальных показателей: количество и качество продукции, а также эксплуатационные и капитальные затраты на ее производство.

Учитывая сказанное, в качестве критерия оптимальности, обеспечивающего соизмерение всех четырех факторов экономической эффективности, целесообразно использовать приведенный доход

$$I_d = C \cdot P_2 - Z_3 - E \cdot Z_k, \quad (2)$$

где C – отпускная цена на продукт производства технологического комплекса, учитывающая его качество; P_2 – годовой объем выпуска продукта; Z_3 – суммарные эксплуатационные затраты, руб./год; E – нормативный коэффициент эффективности капиталовложений; Z_k – капитальные затраты.

Если некоторые из указанных четырех факторов фиксированы, то выражение (2) может быть упрощено на основании особенностей конкретной постановки задачи оптимизации. Так, в качестве основного показателя эффективности действующего производства рекомендуется использовать прибыль, условие максимума которой совпадает с максимумом выражения (2) при $E \cdot Z_k = \text{const}$:

$$I_n = C \cdot P_2 - Z_3. \quad (3)$$

При этом задача оптимизации комплекса сводится к оптимальному управлению, т.е. оптимизации режимных параметров. В выражение (3) входят лишь экономические показатели производства.

Время цикла или темп выдачи готовой продукции (полуфабриката) определяется в установленном режиме работы комплекса максимальным временем обработки металла в одном из активных его элементов (ИНУ или ОМД), что полностью соответствует концепции «узкого места» при системном подходе. Можно показать, что при обычно выполняющихся ограничениях условие $I_n \rightarrow \max$ полностью адекватно режиму максимальной производительности, т.е. критерию быстрейшего действия

$$T_y \rightarrow \min. \quad (4)$$

Если максимальная заданная производительность деформирующего оборудования меньше производительности ИНУ, то для оптимизации системы индукционного нагрева можно рассматривать условие минимума себестоимости единицы продукции комплекса в части затрат, обусловленных нагревом металла и влиянием его температуры на условия деформации.

Определяющая роль температурного фактора позволяет описать комплекс «ИНУ-ОМД» поведением температурного поля обрабатываемого металла на соответствующих стадиях технологического процесса. Отсюда вытекает возможность представления этого комплекса в виде ступенчатой системы, состоящей из трех объектов управления с последовательными во времени режимами их работы, где модель каждого из объектов представляется соответствующим уравнением нестационарной теплопроводности. В общем случае это уравнение вида Фурье-Кирхгофа, отражающее на первой стадии нагрев металла в индукторе, на второй – его охлаждение при транспортировании к деформирующему оборудованию, и на третьей – температурное поле в процессе ОМД.

Поставленная задача нестандартна, прежде всего, за счет действия разных управлений на разные объекты в различные интервалы времени при наличии единственной стыковки через граничные условия. Обычно при решении подобных задач на каждом интервале управление выбирают согласно принципу максимума для объекта, соответствующего этому интервалу. Но в данном случае имеется своеобразная ситуация: минимальное значение времени цикла работы комплекса определяется предельными возможностями одного из его элементов, который является «узким местом» комплекса, сдерживающим его производительность. По этой же причине здесь не может быть применён принцип погружения, который рекомендуется при оптимизации технологических процессов с последовательным включением агрегатов. Оригинальность рассматриваемой задачи заключается в том, что температурное поле нагреваемой заготовки и время её транспорта к деформирующему оборудованию заранее не фиксируются, а входят в параметры оптимизации.

Из всех затрат превалирующее значение имеют затраты на нагрев. Так, расход электроэнергии при индукционном нагреве стал в среднем равен 500 кВт·ч/т, алюминия – 280 кВт·ч/т. Расход энергии на деформацию, если взять два основных вида ОМД в металлургии – прокатку и прессование, составит для обжимных станов: для стали – 12-30 кВт·ч/т, для алюминия – до 80 кВт·ч/т, при прессовании соответственно – 12-20 и 30-50 кВт·ч/т.

Поэтому определяющее значение имеет выбор оптимальных параметров ИНУ. Перед параметрическим синтезом необходимо четко разделить параметры на входные (варьируемые) и выходные (рабочие показатели). Вектор варьируемых параметров значениями своих составляющих однозначно определяет вектор рабочих показателей, определяющий качество ИНУ и характеризующий вариант проекта. К рабочим показателям можно отнести следующие: производительность; температура нагрева по уровню и точности; КПД; коэффициент мощности; капитальные затраты; затраты энергии.

Варьируемые параметры, которые по сути дела и являются параметрами оптимизации, в свою очередь, можно разделить на внутренние и внешние. Внутренние: размеры индуктора; толщина и термическое сопротивление тепловой изоляции; число витков и секций индуктора; шаг витков; величина заглубления выходного торца заготовки в индукторе; форма. Внешние: мощность источника питания; напряжение на индукторе; частота тока; угол сдвига между напряжениями секций; емкость конденсаторной батареи; темп работы деформирующего оборудования и расстояние от него до индуктора; условия охлаждения заготовок вне индуктора; физические и геометрические параметры нагреваемых заготовок.

В современном производстве система «ИНУ-ОМД» представляет собой автоматизированный технологический комплекс (АТК) непрерывно-дискретного типа, который объединяет соответствующие системы с распределенными параметрами и работает на широкой номенклатуре (дискретном множестве) типосортразмеров обрабатываемых материалов. Специфической чертой таких комплексов являются сложность каждого варианта функционирования, их небольшое число и относительно небольшое число возможных альтернатив реализации каждого из них. Поэтому оптимизационные задачи для АТК обычно ставятся максимально широко, что полностью соответствует принципу генерации альтернатив, который используется в системном подходе. Применение системного подхода в данном случае вызвано тем, что он представляет собой методологию эффективного решения задач, возникающих в сложных системах, к которым может быть отнесен и АТК по следующим признакам: многоцелевое назначение системы (повышение производительности, улучшение качества, снижение производственных затрат); многостадийность протекающих в системе процессов (подготовка металла, нагрев, транспортировка, деформация); многокомпонентность структуры (нагревательные и транспортирующие устройства, машины ОМД); множественность протекающих в системе процессов (за счет широкой номенклатуры заготовок и изделий, возможных изменений темпа обработки); целостность системы, когда согласно концепциям «узкого места» и «главного звена», в качестве которых может оказаться любое звено комплекса, превосходство системы, подобно цепи, определяется не са-

мым крепким, а самым слабым ее звеном; множественность связей с внешней средой (с другими системами); действие в системе множества случайных, а также неопределенных факторов, предсказать наличие которых наперед невозможно.

Системный подход к оптимальному проектированию при индукционном нагреве позволяет по-новому увидеть объект проектирования, когда основной фактор, органически связывающий обе стадии обработки металла в единый технологический комплекс, – температурные кондиции металла – заранее не фиксируется, а находится, исходя из достижения экстремума совокупного экономического показателя работы комплекса. Это становится возможным при постановке проблемы целостности комплекса, вычисления системообразующих связей. Принцип целостности является одним из фундаментальных принципов системного подхода, при котором задача оптимизации рассматривается всесторонне с учетом всех внутренних взаимосвязей системы индукционного нагрева: тип и мощность источника питания, частота тока, размеры индуктора, число и характер распределения его витков и т.п.; всех взаимосвязей между нагревом и ОМД: температура и параметры обрабатываемых заготовок, время и условия их транспортировки; всех возможных путей к достижению поставленной цели: одновременное проектирование оптимальных технологических режимов нагрева и ОМД, конструктивных и энергетических параметров ИНУ, оптимальной системы управления процессом нагрева.

Использованием второго фундаментального принципа системного подхода – принципа декомпозиции – является осмысленное разделение комплекса «ИНУ-ОМД» на части без потери целостности, которое возможно на основе выделения параметров координации двух частей комплекса. Согласно третьему фундаментальному принципу системного подхода – принципу целевой ориентации – все исследования в работе целенаправленны, и их сложность не превышает сложности, необходимой для достижения поставленной цели, причем сама цель выбирается исходя не из возможности использования отработанных методов оптимизации, как, например, минимизация среднеквадратичного отклонения, а из производственного принципа: повысить производительность, увеличить прибыль, снизить затраты. Все математические модели и методы оптимизации при этом проблемно-ориентированы на конкретные конструкции, технологию и режимы, а их сложность и эффективность во многом определяются выбором критерия оптимальности.

Зимин Лев Сергеевич –

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий»
Самарского государственного технического университета

Федотов Михаил Евгеньевич –

аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий»
Самарского государственного технического университета

УДК 621.365:519.711.3

В.Ю. Кожевников

СПЕКАНИЕ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ

Рассмотрены особенности взаимодействия сверхвысокочастотной энергии с керамическими материалами. Показано, что для повышения экономической эффективности сверхвысокочастотного спекания керамик не-

обходим анализ механизмов взаимодействия электромагнитного поля с веществом. Получена математическая модель, описывающая процесс спекания керамик, в виде системы уравнений электродинамики, теплопереноса и термомеханики.

V.Y. Kozhevnikov

MICROWAVE ELECTROMAGNETIC SINTERING OF CERAMIC SOLIDS

Characteristics of microwave coupling with ceramics are observed here. Analysis of microwave coupling with material is shown to be necessary to make microwave ceramics sintering economically viable. Mathematical model of microwave ceramics sintering was developed as a system of electrodynamics, heat-mass exchange and thermomechanics equations.

Сверхвысокочастотная обработка материалов достигла высокого уровня. В производстве керамических материалов удаление растворителя или влаги является энергоемким процессом. Первоначальное использование сверхвысокочастотной энергии в этой области было ограничено эффективным удалением растворителей из твердых образцов. Оценки, проведенные для материалов, содержащих менее 5% воды, показали, что сушка с применением сверхвысокочастотной энергии более энергетически выгодна, чем традиционные методы сушки.

В последние годы наметилась устойчивая тенденция значительного расширения применения сверхвысокочастотной энергии благодаря многим преимуществам, которые она обеспечивает. Было доказано, что сверхвысокочастотный нагрев обеспечивает более равномерный нагрев, чем традиционные методы. Это увеличивает область их использования по сравнению с традиционными методами, которые приводят к неравномерному нагреву, и могут приводить к образованию материалов с неоднородными свойствами.

Сверхвысокочастотный нагрев также нашел применение в процессе спекания. Спекание как процесс объединения порошковых частиц вещества или смеси осуществляется нагревом до температур ниже точки плавления компонентов. Частицы прилипают друг к другу и образуют окалину. Первоначальные исследования спекания с помощью сверхвысокочастотной энергии производились с использованием мощности 400 Вт для спекания стержней из алюминия и кремния при температурах, превышающих 1700°C. С тех пор сверхвысокочастотной энергией обрабатывался достаточно широкий круг материалов на рабочих частотах 2,4; 28 ГГц. Спекание на частоте 28 ГГц обеспечивает получение более однородных продуктов спекания материалов. Однако сверхвысокочастотное спекание не стало экономически жизнеспособной заменой традиционным методам. В ближайшем будущем улучшенные материалы и упрощение процесса могут привести к появлению экономически выгодного механизма спекания.

Повышение эффективности спекания керамик сверхвысокочастотной энергией является актуальной задачей.

Твердофазные реакции образования кристаллических фаз из оксидов, составляющие основу процесса получения керамик, термодинамически возможны при комнатной температуре. Такие реакции экзотермичны, и их тепловой эффект значителен. В случае инициирования реакции образования кристаллических фаз из оксидов при низких температурах они сопровождаются большим выделением тепла, что способствует их развитию.

Электромагнитное поле ВЧ и СВЧ диапазона может быть использовано как источник создания теплового поля в диэлектрических материалах, так же как фактор, ускоряющий процессы массопереноса и твердофазных реакций [1, 2].

Существует несколько подходов, позволяющих выявить закономерности при сверхвысокочастотном увеличении скорости твердофазных реакций. Эти подходы базируются на результатах анализа разнообразных химических реакций, протекавших при сверхвысокочастотном облучении. В некоторых случаях делалась попытка объяснить этот феномен с помощью теории перегрева, связанной с сверхвысокочастотным воздействием. Среди известных попыток объяснить изменение скорости протекания химических реакций существуют следующие: атомарная активизация полупроводниковых реакций; реакции, для которых наблюдались сверхвысокочастотные эффекты, проводимые под действием катализатора в твердом состоянии.

На данный момент не существует объяснения для тепловых эффектов в полупроводниковых реакциях. Согласно выводам д. Gavin Whittaker'a факультета химии в университете Эдинбурга, Великобритания, единственно верным объяснением увеличения скоростей в полупроводниковых реакциях в настоящее время является утверждение о том, что сверхвысокочастотное излучение влияет на частицы на атомном уровне и вызывает переход частиц на более высокие энергетические уровни. Исследование нагрева твердых частиц сверхвысокочастотной энергией показало, что сверхвысокочастотное излучение приводит к выделению дефектов поверхности в твердых частицах. Такое выделение дефектов поверхности приводит к ускоренному движению ионов на более высокие энергетические уровни. Несмотря на то, что выдвинуто несколько теорий для объяснения атомной активизации, вызванной микроволнами, полное объяснение является предметом споров.

Проводились эксперименты для опровержения увеличения скорости при сверхвысокочастотном облучении. Такие эксперименты демонстрировали увеличение скорости в реакциях, проводимых при температурных условиях, эквивалентных традиционному нагреву. Тем не менее интересным наблюдением является то, что реакции, для которых наблюдались микроволновые эффекты, проводились под действием твердых катализаторов. Затем было отмечено, что при сверхвысокочастотном нагреве, несмотря на то, что среднemasсовая температура системы остается постоянной, температура поверхности в области катализатора сильно увеличивалась. Такое увеличение поверхностной температуры убыстряет действие катализатора на поверхности реагента, и следовательно, увеличивает скорость реакции.

Представляет интерес изменение в кинетике реакций, протекающих при воздействии сверхвысокочастотной энергии.

Одним из важных параметров сверхвысокочастотной энергии является скорость переноса энергии при взаимодействии с веществом. Микроволны передают энергию в течение 10^{-9} секунд каждого цикла электромагнитной энергии. Кинетическая молекулярная релаксация энергии составляет примерно 10^{-5} с. Это означает, что энергия переносится с большей скоростью, чем скорость релаксации молекул, что приводит к неравновесным условиям и высоким мгновенным температурам, которые влияют на кинетику системы. Это приводит к увеличению скорости реакции и количества ее продуктов.

В уравнении Аррениуса, характеризующем скорость реакции, последняя оценивается коэффициентом ($k=A e^{-Ea/RT}$). Константа скорости реакции зависит от двух факторов: частоты столкновений между молекулами, которые имеют правильную геометрию для протекания реакции (A), и доли молекул с минимумом энергии, требуемой для преодоления барьера активации энергии ($e^{-Ea/RT}$). Следует отметить, что сверхвысокочастотная энергия не влияет ни на ориентацию столкновений, ни на энергию активации – энергия активации остается постоянной для каждой реакции. Тем не менее сверхвысокочастотная энергия влияет на температурный параметр в данном уравнении. Увеличение температуры приводит к большей подвижности молекул, чем керамики в электромагнитном поле СВЧ: вследствие диэлектрических потерь увеличивается температура спека, появляются температурные деформации и напряжения, могут происходить фазовые и химические превращения. В общем случае эти процессы взаимосвязаны. В предположении, что сторонние токи и объемные заряды отсут-

ствуют, среда имеет однородную пористую структуру, в которой могут протекать твердофазные реакции. Система уравнений, описывающая данные процессы, приводит к большому количеству энергетических столкновений. В присутствии сверхвысокочастотной энергии это происходит намного быстрее из-за мгновенного нагрева вещества до температур, больших среднемаковой, и является главным фактором для наблюдаемого увеличения температуры. Сверхвысокочастотный нагрев чрезвычайно полезен в медленных реакциях, где требуется большая энергия активизации.

Формирование и разрушение микроструктуры керамик происходит в процессе спекания, способствующего возникновению внутренних напряжений. В ряде работ были изучены структурные фазовые превращения и механические свойства керамик в результате исследования градиентного спекания, реализуемого в печи сопротивления. Математическая модель градиентного спекания керамик различного состава построена в предположении, что температура в печи изменяется в зависимости от координаты по линейному закону. Области действия процессов спекания ограничены распространением в порошковом компакте теплового фронта и определения температурного поля, рекристаллизации образца в области спекания, усадки образца, вторичной рекристаллизации, представляющей собой аномальный рост зерен при действии механизмов торможения, определялись распределениями температур. При этом для квазилинейного уравнения теплопроводности при нулевых начальных и соответствующих граничных условиях для прямоугольного образца конечно-разностным методом решалась задача распределения температуры.

Как уже отмечалось выше, более продуктивным является процесс спекания, который состоит из уравнений Максвелла [3], теплопереноса [4] и термомеханики [5]:

$$\operatorname{rot} H = j + \frac{\partial D}{\partial t} ; \quad (1)$$

$$\operatorname{rot} E = -\frac{\partial B}{\partial t} ; \quad (2)$$

$$\operatorname{div} D = 0 ; \quad (3)$$

$$\operatorname{div} B = 0 ; \quad (4)$$

$$c_p \frac{\partial T}{\partial t} + v \nabla T = \operatorname{div} (k_{TT} \operatorname{grad} T) + \operatorname{div} (k_{T\beta} \operatorname{grad} \rho_\beta) + \operatorname{div} (k_{Tp} \operatorname{grad} p) + \varphi_\beta \frac{\partial \rho_\beta}{\partial t} + q_v - \Pi_\sigma ; \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho_\beta}{\partial t} + v \nabla \rho_\beta = \operatorname{div} (k_{\beta\gamma} \operatorname{grad} \rho_\gamma) + \operatorname{div} (k_{\beta T} \operatorname{grad} T) + \operatorname{div} (k_{\beta p} \operatorname{grad} p) + \Pi_\beta ; \quad (\beta, \gamma = 1, 2, \dots, B) ; \quad (6)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + v \nabla p = \operatorname{div} (k_{pp} \operatorname{grad} p) + \operatorname{div} (k_{pT} \operatorname{grad} T) + \operatorname{div} (k_{p\beta} \operatorname{grad} \rho_\beta) \quad (7)$$

$$m(1-w) \nabla^2 u + \left(l + m - \frac{1}{3} m w \right) \operatorname{grad} (\operatorname{div} u) + 2 \Phi_e \operatorname{grad} [m(1-w)] + \\ + \operatorname{grad} \left(l + \frac{2}{3} m w \right) \operatorname{div} u - \operatorname{grad} \left[\frac{V - V_0}{V_0} \left(l + \frac{2}{3} m \right) - \xi p \right] + X = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} ; \quad (8)$$

$$\sigma_{ij} = m(1-w) (u_{j,i} + u_{i,j}) + \left(l + \frac{2}{3} m w \right) u_{j,i} \delta_{i,j} - \frac{V - V_0}{V_0} \left(l + \frac{2}{3} m \right) \delta_{i,j} + \xi p \delta_{i,j} ; \quad (9)$$

$$e_{i,j} = e_{j,i} = 0,5 (u_{i,j} + u_{j,i}) ; \quad (10)$$

$$\delta = 0 \quad (i \neq j) , \quad \delta_{11} = \delta_{22} = \delta_{33} = 1 , \quad (11)$$

где D, B – векторы электрической и магнитной индукции; $D = \varepsilon E$; $B = \mu H$; $j = \sigma_e E$; E, H – векторы напряженности электрического и магнитного полей; ε, μ – абсолютная диэлектрическая и магнитная проницаемости среды; σ_e – электрическая проводимость; j – плотность тока проводимости; T – температура; ρ_β – концентрация компонентов спека с номером β ($\beta = 1, 2, \dots, B$); c, ρ – удельная теплоемкость при постоянном давлении и плотность диэлектрика $\left(\rho = \sum_{\beta=1}^B \rho_\beta \right)$; t – время; u – вектор перемещений; v – вектор скорости движения; φ_β – химический потенциал компонента β ; $\Pi_\beta = T \frac{\partial}{\partial \tau} \left\{ e_{kk} \frac{\partial}{\partial T} \left[\frac{V - V_0}{V_0} \left(l + \frac{2}{3} m \right) - \xi p \right] \right\}$ – учитывает воздействие деформации тела на процесс теплопроводности; Π_β – мощность источников массы компонентов спека β ; $e_{kk} = (V - V_0)/V_0$ – изменение относительного удельного объема (при равновесии системы, когда поверхностные и массовые силы отсутствуют, обусловлено изменением температуры и концентрации компонентов системы); V_0, V – удельный объем тела при начальной температуре T_0 и концентрации компонентов $\rho_\beta = \rho_{\beta 0}$ и после изменения температуры и концентрации его компонентов; $(V - V_0)/V_0 = 3 \left[\alpha_T (T - T_0) + \sum_{\beta=1}^B \alpha_\beta (\rho_\beta - \rho_{\beta 0}) \right]$; α_T, α_β – средние коэффициенты термического и концентрационного расширения в интервале температур $[T, T_0]$ и концентрации компонентов $[\rho_\beta, \rho_{\beta 0}]$; $l = \nu M / [(1 + \nu)(1 - 2\nu)]$ – коэффициент Ляме; M, ν – модуль упругости и коэффициент Пуассона; $m = M / [2(1 + \nu)]$ – модуль сдвига; $\xi = \frac{\Delta V_p}{3 p V_0} (2m + 3l)$;

ΔV_p – изменение удельного объема в области упругих деформаций при давлении p и постоянных величинах T, ρ_β ; w – функция относительного сдвига материала, отличающаяся от нуля только за пределами упругости; $\text{grad} [m(1-w)]$; X – вектор объемных сил; σ_{ij} – компоненты тензора механических напряжений ($i, j = 1, 2, 3$); e_{ij} – компоненты тензора деформаций; $u_{i,j} = \partial u_i / \partial x_j$ – производные по пространственным координатам; u_j – компоненты вектора перемещений в направлении координат x, y, z , которые обозначены как x_j ($i = 1, 2, 3$); δ_{ij} – символ Кронекера, имеющий значения $\delta = 0$ ($i \neq j$), $\delta_{11} = \delta_{22} = \delta_{33} = 1$.

Решение системы уравнений (1)-(11) при соответствующих краевых условиях позволяет найти напряженности электрического E и магнитного H полей, распределение температур T , концентрации компонентов ρ_β , давление p , вектор перемещений U , тензоры напряжений σ_{ij} и деформаций e_{ij} , изменение химического потенциала φ_β .

Воздействие СВЧ электромагнитного поля на спекаемый диэлектрический материал вызывает появление нестационарных полей температур и концентраций компонентов. Вследствие этого, а также из-за нестационарных внешних механических воздействий, в спеке появляются деформации и напряжения. Появление этих деформаций приводит к изменению температуры и концентрации компонентов, к возникновению твердофазных химических реакций.

Физические свойства многих диэлектриков зависят от температуры, что приводит к взаимосвязи рассматриваемых процессов.

Выводы

Таким образом, при исследовании СВЧ воздействия на процесс спекания керамик в общем случае необходимо решать самосогласованную задачу электродинамики, теплопереноса, термомеханики и химической кинетики.

Предлагаемая вычислительная модель развивает полученные ранее результаты исследования градиентного спекания и горячего прессования сегнетоэлектрических керамик [6-7] и позволяет установить: распространение в порошковом компакте теплового фронта и температурного поля; рекристаллизации образца в области спекания; усадки образца; вторичной

рекристаллизации, представляющей собой аномальный рост зерен при действии механизмов торможения вследствие существования примесных фаз.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рогов И.И. Термообработка керамических материалов и исходного сырья в высокочастотном электрическом поле / И.И. Рогов и др. // Электронная техника. 1979. Сер. 6. Вып. 3. С. 107-111.
2. Кожевников В.Ю. Спекание керамических материалов в сверхвысокочастотном электромагнитном поле с переизлучением / В.Ю. Кожевников // Электро- и теплотехнологические процессы и установки: межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ, 2003. С. 11-16.
3. Марков Г.Т. Математические методы прикладной электродинамики / Г.Т. Марков, Е.Н. Васильев. М.: Машиностроение, 1990. 264 с.
4. Лыков А.В. Теория тепло- и массопереноса / А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. 472 с.
5. Никитенко Н.И. Сопряженные и обратные задачи тепломассопереноса / Н.И. Никитенко. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1988. 240 с.
6. Karpinsky D.N., Parinov I.A., Parinova L.V. // Ferroelectrics. 1992. Vol. 133. P. 265.
7. Parinov I.A., Parinova L.V. // Abstr. 18-th Int. Congr. On Theor. And Appl. Mech., Haifa, Israel, 22-28 August, 1992. P. 116.

Кожевников Вячеслав Юрьевич –

кандидат технических наук,
доцент кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы»
Саратовского государственного технического университета

УДК 621.365.5

Е.В. Колесников

ФАКТОР РЫНОЧНОЙ ЭКОНОМИКИ В ПРОЕКТИРОВАНИИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Рассмотрено влияние фактора рыночной экономики в проектировании и эксплуатации электротехнологических установок. Обоснованы актуальность обеспечения максимальной экономической эффективности на стадии проектирования и энергоаудита на стадии эксплуатации электротехнологических установок.

E.V. Kolesnikov

MARKET ECONOMY FACTOR IN ELECTROTECHNOLOGICAL INSTALLATIONS DESIGNING AND OPERATION

The influence of the market economy factor in electrotechnological installations designing and operation is reviewed. Urgency of maximal economy effect maintenance at the stage of designing and energy-audit at the stage of electro technological installations operation is reasonable.

Одним из направлений создания современного технологического оборудования является широкое использование электрофизических методов обработки, с тем чтобы:

- исключить или существенно сократить применение в технологических процессах термообработки в качестве топлива угля, нефти и газа,
- обеспечить высокую скорость обработки за счет высокой концентрации выделяемой энергии в сравнительно малых объемах,
- получить широкий диапазон регулирования подводимой к обрабатываемому объекту энергии и автоматизировать процесс поддержания требуемого технологического режима,
- обеспечить компактность технологического оборудования, исключить продукты сгорания, уменьшить пожароопасность и улучшить социально-гигиенические условия труда.

В условиях рыночной экономики мало рассчитать установку, позволяющую получить заданную производительность с достижением заданного качества. В условиях конкуренции необходимо стремиться к наилучшему использованию всегда ограниченных ресурсов.

По этой причине при принятии решения на стадии проектирования о наилучшем варианте установки уже мало использовать соотношения

$$\mathcal{E}_1 = C + EK, \quad (1)$$

$$\mathcal{E}_2 = \sum_{i=1}^n (C_i P_i - Z_i) - EK, \quad (2)$$

где \mathcal{E}_1 – приведенные затраты; \mathcal{E}_2 – интегральный доход; C – эксплуатационные затраты; E – нормативный коэффициент эффективности капиталовложений; K – капитальные затраты; P_i – годовой доход продукции i -го вида; C_i – цена единицы продукции i -го вида; Z_i – суммарный объем эксплуатационных затрат на производство i -й продукции; n – число видов изделий в составе номенклатуры конечной продукции, так как (1) и (2) не учитывают многие факторы, характеризующие проект в условиях рыночных отношений.

Возможность учета существенно большего числа параметров, характеризующих установку, ее структуру, элементную базу, режим работы, технические параметры, свойства объекта, условия и порядок эксплуатации, стоимостные характеристики проекта, предоставляет интегральный за срок службы установки доход (чистый дисконтированный доход, интегральный или социально-экономический эффект) [1]

$$\mathcal{E}_\Sigma = \sum_{t=0}^T \left[\sum_{j=1}^n (P_j C_j)_t + H_{jt} + S_{jt} + M_{jt} - Z_{jt} \right] (1+E)^{-t} + \Phi_T (1+E)^{-T}, \quad (3)$$

где P_{jt} , C_{jt} – количество j -й продукции и цена единицы продукции, выпускаемой установкой на t -м шаге расчета; T – горизонт расчета ($T_{max} = t_{cl}$ – срок службы установки); n – число видов продукции на горизонте расчета T ; H_{jt} , S_{jt} – стоимостные оценки сопутствующего эффекта в производственной сфере и социального эффекта на t -м шаге расчета; M_t – остаточная стоимость основных фондов производственной инфраструктуры, получаемой из эксплуатации на t -м шаге расчета; Z_t – эксплуатационные издержки на работу установки, включая налоги и платежи на t -м шаге расчета; E – норма дисконта; Φ_T – остаточная на момент времени T стоимость основных фондов.

Частный случай применения соотношения (3) в качестве целевой функции и оптимизация ее с помощью структуры и параметров СВЧ электротехнологических установок приведены в [2].

Приходится, однако, констатировать, что несмотря на возросший в условиях рыночной экономики интерес к проблеме эффективности электротехнологического оборудования,

пока не получили должного развития расчеты, позволяющие с позиций системного подхода определить его эффективность, выбрать оптимальную структуру и элементную базу, обеспечивающие максимальную эффективность применения этого оборудования.

Особое место в вопросе проектирования электротехнологических установок с учетом фактора рыночной экономики занимает обоснование целесообразности применения конкретного электротехнологического процесса и реализующей его установки. Особо следует подчеркнуть важность системного подхода к решению этого вопроса, т.е. инвестиции в электротехнологию ведут к пересмотру объемов и организации производства, их последствия для производства могут быть многочисленными.

Учет различных факторов можно сделать с помощью соотношения (3), если на его основе построить выражение

$$\Delta \mathcal{E} = \mathcal{E}_{\Sigma 2} - \mathcal{E}_{\Sigma 1}, \quad (4)$$

где индексы 1 и 2 относятся к базовому и новому оборудованию. Электротехнологическое оборудование эффективнее базового, если $\Delta \mathcal{E} > 0$.

Если экономические расчеты не подтверждают целесообразности применения проектируемого оборудования, то всякие попытки его использования в промышленности приведут к дискредитации этого оборудования.

В то же время, бесспорно, всегда желательна экономия энергопотребления, и эта проблема выводит нас на задачи энергосбережения.

С переходом к рыночной экономике в нашей стране обострились проблемы в энергетике, которые сказались на приоритетах в эксплуатации энергоемкого оборудования. В рыночных условиях взаимосвязь экономики и энергопотребления особенно значительно проявляется в конкурентоспособности товаропроизводителей.

В последнее время доля энергозатрат в себестоимости продукции составляет в среднем в сельском хозяйстве 11%, на транспорте – 17%, в промышленности – 18%, а в ряде масштабных производств она достигает 40% и даже 60% [3].

В этих условиях энергоемкость производства оказывает существенное влияние на цену продукции и ее конкурентоспособность. Высокая энергоемкость производства приводит к высокому уровню цен на продукцию, делая ее неконкурентоспособной, а это ограничивает на нее спрос, тормозит развитие производства, снижая одновременно налогооблагаемую базу и уровень жизни населения.

В последние двадцать лет в развитых странах энергоэффективность давала 60-65% экономического роста. Энергоемкость национального дохода уменьшилась за этот период в мире в среднем на 18%, а в развитых странах – на 21-27%, тогда как в нашей стране она росла и после 2000 г. стабилизировалась на уровне, превышающем средние мировые показатели в 3 раза и развитые страны в 3,5-3,7 раза [4].

Одним из способов предотвращения энергетического кризиса является масштабное использование возобновленных источников энергии, но это требует огромных финансовых затрат. Другой способ – проведение в масштабах всей страны политики энергосбережения. Одно из принципиальных условий этого развития – ведение хозяйственной деятельности на основе масштабного внедрения энерго- и ресурсосберегающих технологий.

На стадии эксплуатации отправной точкой в энергосбережении является энергетическое обследование потребителя ТЭР. Оно проводится в целях оценки эффективности использования энергетических ресурсов и снижения затрат потребителей на топливо и электроснабжение. Обязательному энергетическому обследованию подлежат организации независимо от их организационно-правовых форм и форм собственности, если годовое потребление ими энергетических ресурсов составляет более шести тысяч тонн условного топлива или более одной тысячи тонн исходного топлива. Организации с меньшим годовым потреблением энергетических ресурсов проходят энергетическое обследование добровольно или по реше-

нию органов исполнительной власти РФ, отвечающих за координацию работ по эффективному использованию энергоресурсов.

Добровольное энергетическое обследование обычно называют энергоаудитом. На наш взгляд, правильнее было бы, как это делается на практике, отождествлять понятие «энергетическое обследование» и «энергоаудит», допуская для каждого из них как обязательную, так и добровольную форму.

Энергоаудит предполагает сбор документальной информации, инструментальное обследование, обработку и анализ полученной информации, разработку рекомендаций по энергосбережению. На этой стадии необходимо:

- определить техническую суть предлагаемого усовершенствования и принципа получения экономии;
- определить состав оборудования, необходимого для реализации рекомендаций, его возможную стоимость, включая доставку и ввод в эксплуатацию;
- рассмотреть все возможности снижения затрат на реализацию рекомендаций, например изготовление и монтаж оборудования силами самого предприятия;
- определить возможные побочные эффекты от внедрения рекомендаций, влияющих на реальную экономическую эффективность;
- оценить общий экономический эффект предлагаемых рекомендаций с учетом всех перечисленных пунктов.

Все рекомендации по величине требующихся для их реализации затрат можно разделить на три группы: беззатратные и низкзатратные, осуществимые в порядке текущей деятельности предприятия, среднезатратные, осуществляемые, как правило, за счет собственных средств предприятия (наиболее многочисленная группа), высокзатратные, требующие дополнительных инвестиций, осуществляемых, как правило, с привлечением затратных средств. Отметим, что реализация всех рекомендаций, полезных с точки зрения энергосбережения на стадии эксплуатации энергоемкого оборудования, может оказаться для предприятия непосильной в финансовом отношении.

В этой связи актуальным является внимание к проблеме энергосбережения уже на стадии проектирования. Такой подход к решению проблемы энергосбережения в период эксплуатации энергоемкого оборудования снимет многие вопросы, которые могут возникнуть на стадии эксплуатации при энергоаудите.

Выводы

1. Переход к рыночной экономике в нашей стране поставил вопрос о достижении на стадии проектирования и обеспечения на стадии эксплуатации максимальной эффективности электротехнологических установок.

2. Для достижения максимальной эффективности электротехнологических установок на стадии проектирования необходима оптимизация установки и технологического процесса с помощью целевой функции интегрального эффекта (чистого дисконтированного дохода).

3. Для обеспечения максимальной эффективности электротехнологических установок на стадии эксплуатации необходимо энергетическое обследование (энергоаудит), на базе которого разрабатываются обоснованные рекомендации по энергосбережению.

ЛИТЕРАТУРА

1. Архангельский Ю.С. СВЧ электротермия / Ю.С. Архангельский. Саратов: СГТУ, 1998. 408 с.
2. Толстов В.А. Эффективность электротехнологических установок / В.А. Толстов, Ю.С. Архангельский. Саратов: СГТУ, 2000. 146 с.

3. Данилов Н.И. Энергосбережение – от слов к делу / Н.И. Данилов. Екатеринбург: Энерго-Пресс, 2000. 232 с.

4. Энергетическое обследование – способ реального энергосбережения и получения дополнительной прибыли: метод. пособие / под ред. Т.Е. Троицкого-Маркова и др. М.: Спорт и культура, 2002. 209 с.

Колесников Евгений Владимирович –
заместитель начальника «Ростехнадзора»,
доцент кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы»
Саратовского государственного технического университета

УДК 621.365

А.Л. Головачев, А.И. Данилушкин, Е.А. Мишанин

СИСТЕМА ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ДЛЯ ТЕРМООБРАБОТКИ ЕЛОЧНОГО ПАЗА ДИСКОВ ТУРБОАГРЕГАТОВ

Рассматриваются вопросы создания автоматизированной установки для термопластического упрочнения рабочих поверхностей дисков газовых турбин. Предлагается конструкция установки с индукционными нагревателями. Анализируются различные варианты конструкций индукторов, их возможности по реализации технологических требований процесса упрочнения.

A.L. Golovachev, A.I. Danilushkin, E.A. Mishanin

THE INDUCTION HEATING SYSTEM OF THE TURBOSET DISC HERRING-BONE GROOVE THERMAL TREATMENT

Questions of creation of the automated installation for thermoplastic hardening of working surfaces of the discs of gas turbines are examined. The design of installation with induction heaters is offered. Various variants of inductors design and opportunities of the technology requirements realization of the strengthening process are analyzed.

Среди многообразия проблем, связанных с продлением срока службы газотурбинных двигателей, одной из основных является повышение надежности и эффективности функционирования наиболее нагруженных элементов конструкции.

К наиболее ответственным элементам газотурбинных двигателей, испытывающим в процессе работы циклически изменяющиеся нагрузки, относятся диски и колеса турбин и компрессоров, поэтому вопросы повышения их надежности и долговечности представляют значительный интерес. На предприятиях добычи, хранения и транспортировки газа, где эксплуатируется большое количество газоперекачивающих агрегатов, возникает необходимость

в капитальном ремонте газотурбинных двигателей, причем большая часть повреждений связана с возникновением и развитием усталостных трещин наиболее нагруженных деталей – лопаток и дисков турбин. Важной задачей при решении вопросов реконструкции и модернизации газотурбинных агрегатов нефтегазодобывающего комплекса является восстановление работоспособности дисков, проработавших свой ресурс. Замена выработавшего свой ресурс диска на новый является дорогостоящей операцией. В этой связи существенный интерес представляет проблема создания такой ремонтной технологии, которая позволяет существенно продлить срок службы диска. Для повышения надежности и долговечности отдельных узлов и деталей, работающих в условиях знакопеременных термических и вибрационных нагрузок, широкое применение нашел метод термопластического упрочнения (ТПУ) [1].

Для восстановления дисков методом термопластического упрочнения используется специальная технология, включающая заделку образовавшихся в процессе эксплуатации трещин с помощью сварки, слесарную доработку поверхности, нагрев до определенной температуры с заданной точностью (650 ± 20)°С и последующее интенсивное (спрейерное) охлаждение. Интенсивное охлаждение нагретого до определенной температуры поверхностного слоя изделия создает значительный перепад температур, который приводит к возникновению температурных напряжений, превышающих по величине предел текучести упрочняемого металла. В результате после полного охлаждения в поверхностном слое детали формируются остаточные сжимающие напряжения.

Для нагрева упрочняемых поверхностей деталей принципиально можно использовать различные устройства, использующие энергию газа (нагрев в газовой печи) или нагрев открытым газовым пламенем, электроэнергию (нагрев в печи сопротивления и индукционный нагрев).

Нагрев дисков в газовой печи имеет ряд существенных недостатков, ограничивающих ее применение для данной технологии.

Нагрев диска в печи сопротивления не создает вредных выбросов в атмосферу, позволяет полностью автоматизировать процесс, но в то же время обладает рядом недостатков, что и нагрев в газовой печи. Время выхода печи на рабочий режим сопоставимо с временем нагрева диска, что приводит к большим потерям электроэнергии при разогреве печи до рабочей температуры и снижению коэффициента полезного действия. Печь сопротивления, как и газовая печь, имеет большие габариты. При обработке дисков в газовой печи или печи сопротивления необходимо снять диск с вала ротора турбины, что приводит к дополнительным затратам на демонтаж диска и последующий монтаж после упрочнения.

В настоящей работе предлагается установка для термопластического упрочнения диска, которая позволяет с высокой эффективностью осуществить технологический процесс упрочнения диска без его демонтажа. Для нагрева диска или его части в предлагаемой установке используется индукционный нагреватель, который обладает рядом существенных преимуществ по сравнению с другими видами нагревателей. К ним относятся: возможность концентрации большого количества энергии в ограниченном объеме, высокая интенсивность нагрева, обеспечение заданного градиента температур, простота и плавность регулирования, компактность, экологическая чистота и удобство обслуживания. Применение их может дать существенные технологические преимущества: более высокую точность стабилизации температуры, высокую степень автоматизации и удобство регулирования, более высокую надежность и долговечность. Однако на пути реализации преимуществ индукционного нагрева возникает ряд специфических проблем. К их числу относится необходимость создания индивидуальной конструкции нагревательного устройства применительно к каждому объекту нагрева, а также проблема разработки математических моделей и реализации на их основе автоматизированных систем, обеспечивающих требуемое температурное распределение с заданным температурным градиентом.

На рис. 1 представлена схема установки с индукционным нагревателем для термопластического упрочнения диска. Ротор турбоагрегата устанавливается на роликах, обеспечи-

вающих непрерывное вращение или пошаговый поворот ротора с упрочняемым диском. Нагрев периферийной части диска с выступами осуществляется вихревыми токами, создаваемыми электромагнитным полем индуктора при непрерывном или дискретном вращении диска с помощью электропривода ЭП. Питание индуктора осуществляется от регулируемого источника питания ТПЧ. Управление нагревом, охлаждением и вращением диска, а также контроль за технологическим процессом производится с помощью системы управления, на вход которой поступают сигналы от датчика температуры ДТ, датчиков давления воды и воздуха ДД 1, ДД 2 в магистрали, датчика положения ротора Дφ, а также электрических параметров нагрева – напряжения, тока и коэффициента мощности. Для охлаждения диска используется спрейерное устройство Сп, в которое охлаждающая жидкость поступает из бака с водой, а воздух – из поршневого компрессора ПК. Подача включается автоматически с помощью управляемых вентилях В 1 и В 2. Компрессор приводится в движение электродвигателем М 2, питающимся от шкафа управления компрессора ШУПК.

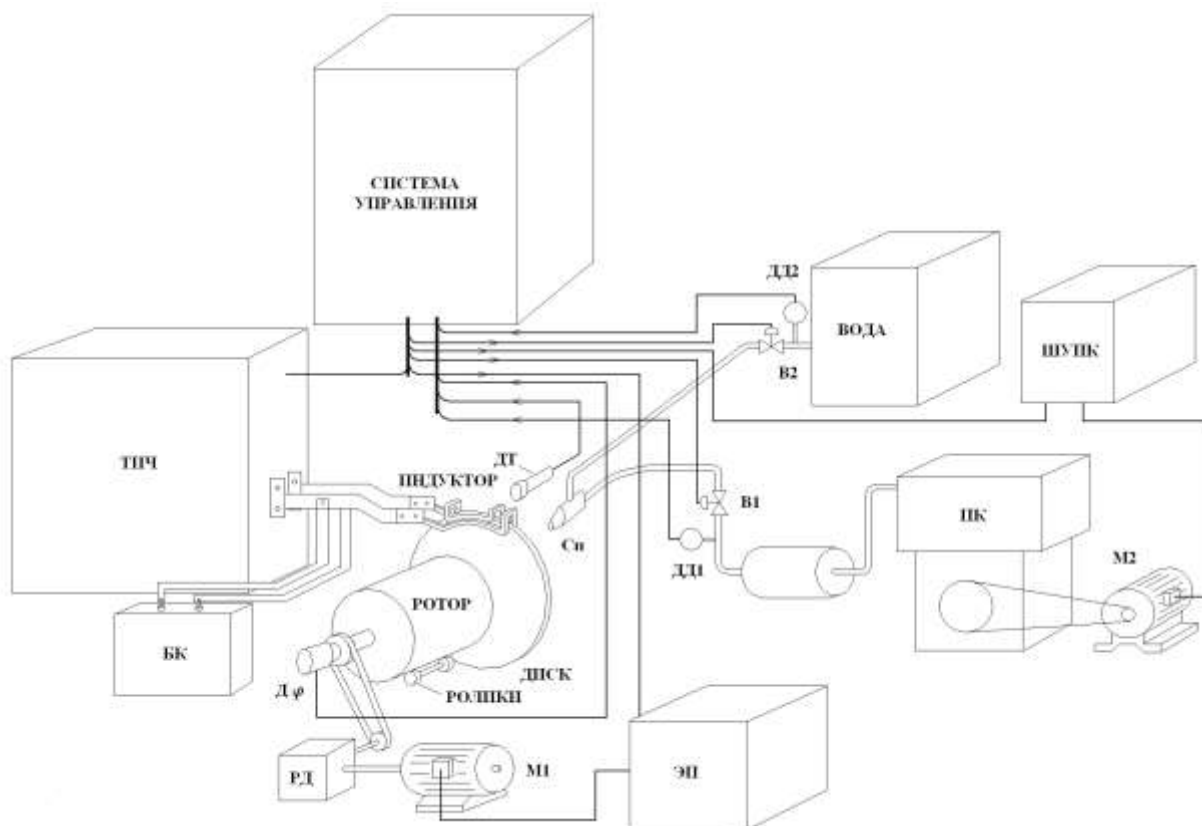


Рис. 1. Установка для термопластического упрочнения диска

В работе проводится анализ различных конструктивных решений систем индукционного нагрева диска или его части для термопластического упрочнения.

1. Нагрев части диска (сектора) в линейном индукторе с магнитопроводом (рис. 2). Индуктирующий провод располагается в пазу П-образного магнитопровода, который охватывает периферийную часть диска с выступами.

2. Нагрев части диска (сектора) в щелевом индукторе (рис. 3). Индуктирующий провод охватывает периферийную часть диска с торцов. Нагреваемый сектор диска располагается в зазоре между прямым и обратным индуктирующими проводами.

3. Нагрев диска в цилиндрическом индукторе (индуктор охватывает весь диск, нагрев одновременный) (рис. 4).

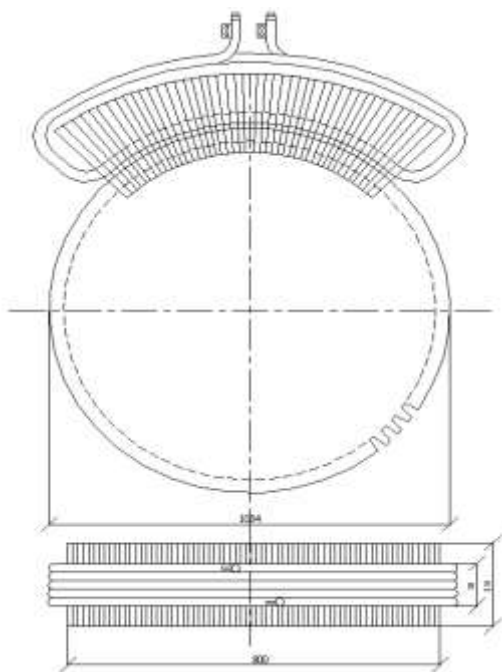


Рис. 2

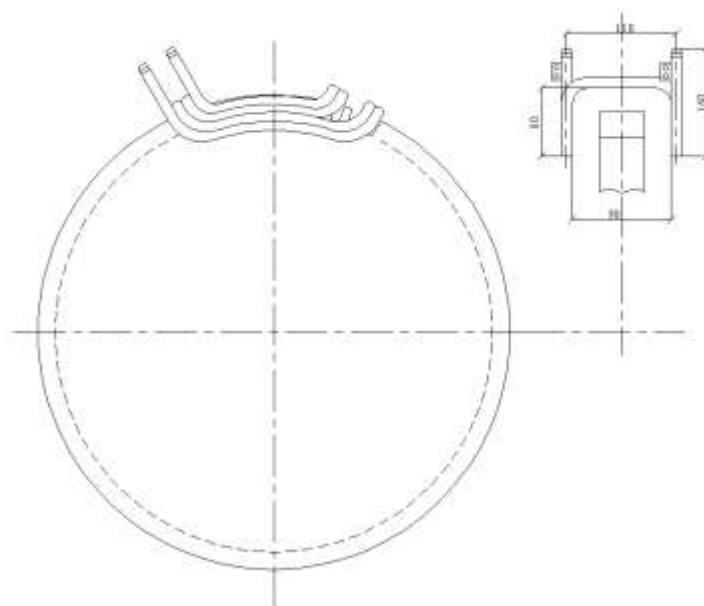


Рис. 3

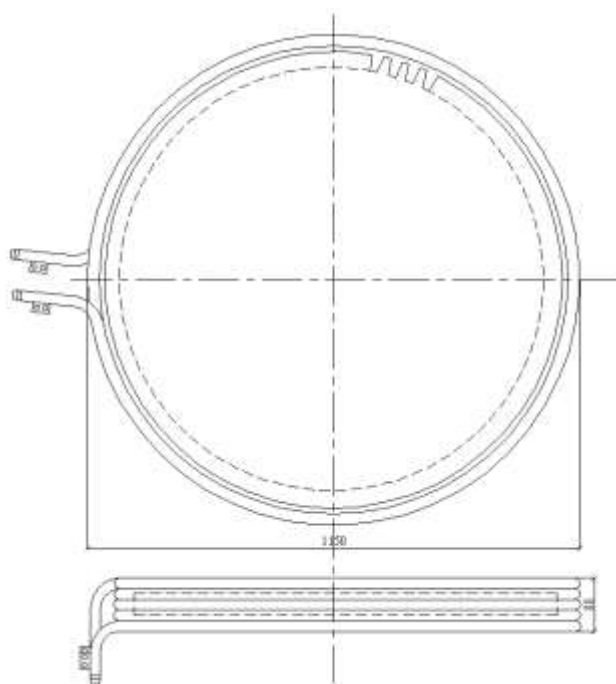


Рис. 4

Использование той или иной конструкции индуктора зависит от ряда критериев. Линейный и щелевой индукторы могут быть использованы для нагрева части (сектора) диска в двух режимах нагрева:

1. При периодическом нагреве сектора диска и последующем его одновременном охлаждении. Устройство охлаждения должно быть рассчитано на одновременную обработку всех выступов, находящихся в индукторе. Количество одновременно нагреваемых выступов

определяется возможностями системы охлаждения и условиями согласования параметров индуктора и источника питания.

2. При методическом нагреве с дискретным поворотом диска на один или несколько выступов и последующем охлаждении. При методическом нагреве диск поворачивается на определенный угол, соответствующий выходу из индуктора нагретых выступов. Темп выхода нагретых до определенной температуры выступов из индуктора определяется уровнем мощности индуктора и требованиями к равномерности нагрева. При выходе выступов из индуктора они охлаждаются с помощью спрейерного устройства.

Разработана конечно-элементная методика электромагнитного и теплового расчётов, реализованная программно. Реализуемая задача решалась в программном пакете Femlab 3.0.

Исследуемый процесс индукционного нагрева диска описывается нелинейной взаимосвязанной системой уравнений Максвелла [2] и Фурье соответственно для электромагнитного и теплового полей с соответствующими краевыми условиями:

$$\operatorname{rot}\{\bar{H}\} = \{J\} + = \{J_s\} + \{J_e\} ; \quad (1)$$

$$\operatorname{rot}\{\bar{E}\} = -\left\{\frac{\partial \bar{B}}{\partial t}\right\}, \quad \operatorname{div}\{\bar{B}\} = 0 ; \quad (2)$$

$$c_1(T_1)\gamma_1(T_1)\frac{\partial T_1}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda_1(T_1)\operatorname{grad} T_1) - \operatorname{div}[E H] . \quad (3)$$

Здесь $\{H\}$, $\{B\}$, $\{D\}$ – векторы напряженности магнитного поля, магнитной и электрической индукции; $\{J_s\}$ – вектор плотности приложенного тока; $\{J_e\}$ – вектор плотности индуцированного тока; ρ – плотность электрических зарядов; t – время; c_1 , γ_1 – удельные значения теплоемкости и плотности материала изделия; $T_1(r,x,t)$ – температурное поле диска. Объемная плотность внутренних источников тепла, индуцируемых в тепловыделяющем цилиндре, определяется дивергенцией вектора Пойнтинга $\Pi = \operatorname{div}[E H]$ [2].

Анализ полученных авторами результатов показал, что уровни мощности индукторов в первом и втором вариантах отличаются незначительно. В первом варианте более высокие КПД и коэффициент мощности, однако этот вариант предполагает использование магнитопровода нестандартной конструкции, что ведет к существенному усложнению при изготовлении, увеличению габаритов и веса индукционной системы и, следовательно, к увеличению стоимости. Второй вариант – щелевой индуктор без магнитопровода – имеет более простую и дешевую конструкцию, но имеет более низкие энергетические характеристики.

Цилиндрический индуктор обеспечивает одновременный и быстрый нагрев всех выступов с незначительным нагревом полотна диска, имеет наилучшие энергетические показатели, но требует установки трансформатора большой мощности. Использование этого варианта целесообразно лишь при массовом производстве, когда приоритетным является требование высокой производительности. Кроме того, при интенсивном нагреве периферии диска возможно возникновение термонапряжений, превышающих допустимые значения, что может привести к деформации диска и образованию микротрещин.

Существенным фактором, влияющим на окончательный выбор той или иной конструкции индуктора и схемы питания, является рабочая частота. Габариты источника питания и индуктора, их масса и стоимость в значительной степени зависят от частоты, причем с ростом частоты габариты и масса индуктора и источника питания уменьшаются.

Анализ различных вариантов систем индукционного нагрева показывает, что преимущество по простоте конструкции, согласованию параметров индуктора и источника питания имеет щелевой индуктор без магнитопровода с рабочей частотой 8000 Гц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кравченко Б.А. Термопластическое упрочнение – резерв повышения прочности и надежности деталей и машин / Б.А. Кравченко, В.Г. Круцило, Г.Н. Гутман. Самара: СамГТУ, 2000. 216 с.
2. Лыков А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. М., 1967. 592 с.
3. Немков В.С. Теория и расчет устройств индукционного нагрева / В.С. Немков, В.Б. Демидович. Л.: Энергоатомиздат, 1988. 280 с.

Головачев Александр Леонидович –

аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий»
Самарского государственного технического университета

Данилушкин Александр Иванович –

доктор технических наук,
профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий»
Самарского государственного технического университета

Мишанин Евгений Александрович –

студент Самарского государственного технического университета

УДК 621.365.5

Е.В. Колесников

**ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
РЕШЕНИЯ САМОСОГЛАСОВАННОЙ ЗАДАЧИ
ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ,
СИНТЕЗА ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ
И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА**

В статье приводятся сведения о программном обеспечении решения самосогласованной задачи, позволяющей на стадии проектирования обеспечить максимальную эффективность электротехнологической установки.

E.V. Kolesnikov

**SELF-COORDINATED PROBLEM DECISION SOFTWARE
OF TECHNICAL AND ECONOMIC OPTIMIZATION,
SYNTHESIS OF ELECTROTECHNOLOGICAL INSTALLATION
AND MATHEMATICAL MODELLING OF TECHNOLOGICAL PROCESS**

This article presents the items of software for self-coordinated problem decision, which has allowed to supply maximal effect of electro technological installation at the stage of designing.

Известны работы, посвященные проектированию современных электротехнологических установок [1-4], позволяющие получить установки с заданными техническими и технологическими параметрами.

Для обеспечения максимальной эффективности электротехнологических установок на стадии их проектирования требуется решение самосогласованной задачи технико-экономической оптимизации и синтеза установки с оптимальными техническими и технологическими параметрами, а также математическое моделирование реализуемого в ней процесса.

Предлагается проводить проектирование максимально эффективной электротехнологической установки на базе блочно-иерархического подхода [5], хорошо зарекомендовавшего себя при решении задач синтеза установок СВЧ диэлектрического нагрева (У СВЧ ДН) [6-8].

Речь идет о расчетах по этапам, которые отличаются степенью детализации технологического процесса и установки. При нисходящем проектировании результаты решения задачи на более высоком уровне используются в качестве исходных данных для следующего уровня.

На начальном этапе, когда выбираются основные элементы установки, оцениваются ее технико-экономические характеристики, используются средние значения величин, аппроксимирующие зависимости и т.п. Например, в случае У СВЧ ДН применяют средние по объему обрабатываемого объекта зависимости электрофизических и теплофизических параметров, среднюю температуру по его поперечному сечению, количество испаренной влаги в СВЧ сушилке без учетного градиента влагосодержания по толщине объекта, аппроксимацию зависимости цены источника энергии или СВЧ генератора от величины мощности СВЧ, уравнения теплового баланса и т.д., а для расчета электродинамических процессов (задача синтеза рабочей камеры) – метод эквивалентных схем.

Таким образом, на начальном этапе методом последовательных приближений устанавливаются структура электротехнологической установки, оптимальные энергетические характеристики и режим работы с учетом нормативных параметров задачи, рассчитываются геометрические параметры конструкции.

На следующем этапе проводится математическое моделирование технологического процесса, наиболее полно учитывающее физические процессы, протекающие в обрабатываемом объекте, причем математические модели на этом этапе различаются и степенью детализации в зависимости от типа электротехнологической установки и характера технологического процесса обработки заданного объекта.

На рисунке показана схема процедуры такого проектирования. Каждому этапу проектирования предшествует формулировка исходных данных, в которые входят требования к технологическому процессу и установке.

Проектирование начинается с выбора исходного варианта электротехнологической установки. Выбираются ее тип, элементная база, режим работы, после чего сравниваются технико-экономические параметры (ТЭП) электротехнологической установки и альтернативной, в том числе с иным способом энергоподвода (например, У СВЧ ДН и печь сопротивления, У СВЧ ДН и теплотехнологическая установка). В качестве критерия сопоставления используется сравнительный интегральный эффект $\Delta \mathcal{E}$.

Опыт проектирования У СВЧ ДН свидетельствует, что если этим параметром пренебречь, можно получить установку, уступающую по экономической эффективности, а иногда и по техническим возможностям.

Наиболее сложным на этом этапе является сопоставление исходного варианта электротехнологической установки и альтернативной. Для расчета $\Delta \mathcal{E}$ требуются параметры исходного варианта, которые могут быть окончательно определены лишь на следующих стадиях проектирования. Параметров альтернативной установки у проектировщика может не быть вовсе. В таком случае используют экспертные оценки величин этих параметров.

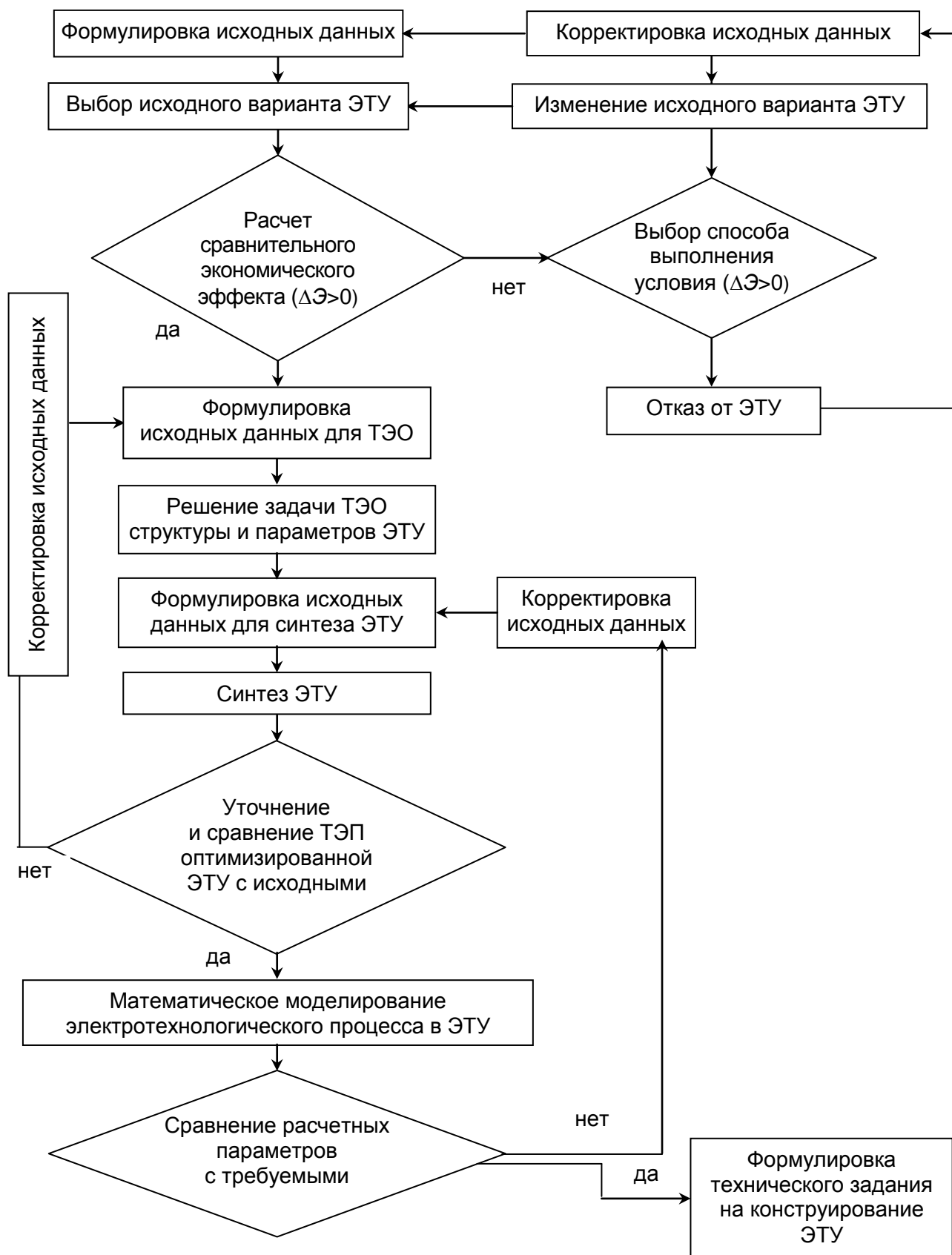


Схема процедур проектирования ЭТУ

Если $\Delta\mathcal{E} > 0$, то переходят ко второму этапу, на котором формулируют исходные данные и решают задачу технико-экономической оптимизации. Если $\Delta\mathcal{E} < 0$, то выбирают способ выполнения условия $\Delta\mathcal{E} > 0$:

- изменяют численные значения исходных параметров;
- изменяют исходный вариант электротехнологической установки.

Если добиться выполнения условия $\Delta\mathcal{E} > 0$ не удастся, то приходится отказываться от применения электротехнологического процесса и реализующей его установки.

На этапе решения задачи технико-экономической оптимизации определяют структуру и параметры электротехнологических установок, их количество, обеспечивающее при параллельной работе заданную производительность, энергетические характеристики (например, в У СВЧ ДН мощность, частота, количество установок и магнетронов, работающих на одну рабочую камеру).

Решение задачи синтеза начинается с формулировки исходных для синтеза данных и позволяет получить размеры рабочей камеры, других элементов, обеспечивающие техническую оптимизацию установки, дает возможность уточнить ТЭП технически оптимальной установки (например, затраты на ее изготовление) и принять решение о дальнейшем направлении проектирования:

– если уточненные технико-экономические параметры сильно отличаются от исходных, то нужно провести корректировку исходных данных для проведения технико-экономической оптимизации и повторить как ее, так и синтез установки;

– если эти параметры совпадают с приемлемой точностью, то проводят математическое моделирование электротехнологического процесса с заданными по условиям технологиями. Контролироваться могут, например, такие параметры, как темп нагрева, время плавления, скорость сушки и т.п.

Если расчетные параметры, полученные при математическом моделировании, удовлетворяют условиям технологии, то проектное решение принимается и на его базе формируется техническое задание на конструирование установки, в противном случае корректируются исходные данные для решения задачи синтеза, после чего повторяют решение задачи синтеза установки.

Программное обеспечение реализовано в системе MathCAD 2001 для целей проектирования У СВЧ ДН.

Выводы

1. Разработанное программное обеспечение позволяет на стадии проектирования провести решение самосогласованной задачи технико-экономической оптимизации, синтеза электротехнологической установки и математического моделирования реализуемого в ней технологического процесса, обеспечивающего достижение максимальной эффективности технологического процесса и установки.

2. На начальном этапе решения самосогласованной задачи проверяется целесообразность применения электротехнологического процесса и выбранного этапа установки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рапопорт Э.Я. Оптимизация процессов индукционного нагрева металла / Э.Я. Рапопорт. М.: Металлургия, 1993. 278 с.
2. Архангельский Ю.С. Элементная база СВЧ электротермического оборудования / Ю.С. Архангельский, В.А. Воронкин. Саратов: СГТУ, 2003. 212 с.
3. Немков В.С. Математическое моделирование на ЭВМ устройств высокочастотного нагрева / В.С. Немков. Л.: Машиностроение, 1980.
4. Батищев Д.И. Методы оптимального проектирования / Д.И. Батищев. М.: Радио и связь, 1984. 248 с.

5. Норенков И.П. САПР: Системы автоматизированного проектирования. Кн. 1. Принципы построения и структуры / И.П. Норенков. Минск: Виц. шк., 1987. 123 с.

6. Архангельский Ю.С. Численное исследование процессов теплообмена в объектах при нагреве в поле СВЧ / Ю.С. Архангельский, С.В. Тригорлый, Л.В. Грушина // Известия вузов СНГ. Энергетика. 1997. № 3/4. С. 66-71.

7. Архангельский Ю.С. Моделирование в системе MathCAD Plus 6.0 процессов сушки диэлектриков / Ю.С. Архангельский, С.В. Тригорлый, Д.В. Джема // Электротехнологические СВЧ установки, функциональные электродинамические устройства: межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ, 1999. С. 77-82.

8. Тригорлый С.В. Численное моделирование и оптимизация процессов сверхвысокочастотной термообработки диэлектриков / С.В. Тригорлый // Прикладная механика и техническая физика. 2000. Т. 41. № 3. С. 112-119.

Колесников Евгений Владимирович –

заместитель начальника «Ростехнадзора»,

доцент кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы»

Саратовского государственного технического университета

УДК 621.365

А.М. Батищев, Д.А. Зиннатуллин, А.Н. Крылов, А.И. Алымов

**ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ПРОЦЕССА
ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ПОЛИСТИРОЛА КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ
НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ**

Рассматривается математическая модель процесса косвенного индукционного нагрева полистирола в экструзионной линии в виде системы взаимосвязанных уравнений электромагнетизма и теплопроводности. На основании результатов численного моделирования, выполненного на базе этой модели, произведена аппроксимация исходной системы уравнений и разработана структурная схема объекта в виде параллельно-последовательного соединения элементарных сосредоточенных динамических звеньев.

A.M. Batishev, D.A. Zinnatullin, A.N. Krilov, A.U. Alimov

**PROCESS ANALYSIS OF A POLYSTYRENE INDUCTION
HEATING AS A CONTROL OBJECT BASED
ON NUMERICAL EXPERIMENTS**

The mathematical model of the process of induction heating of polystyrene in the extruder line in a view of the system of interconnected equations of electro-

magnetism and thermal conductivity is presented in this article. The approximation of the basic equation system and structural scheme of the object as a parallel-serial connection of elementary concentrated dynamic elements is made on the basis of the results of numerical modelling.

В работе исследуется динамика процесса нагрева полистирола в экструзионной линии по производству пенополистирольных плит из гранулированного сырья с индукционными нагревателями, распределенными по длине экструдера. Цилиндр экструдера разделен на несколько автономных зон автоматического контроля и регулирования температурного режима. Основной задачей индукционных нагревателей является стабилизация заданного температурного распределения по длине цилиндра, при котором обеспечивается требуемая по технологии температура полистирола на входе в экструзионную головку. В процессе работы экструдера имеют место изменения температуры исходного материала на входе, теплофизических характеристик и других параметров. Эти изменения приводят к отклонению температуры полистирола на выходе. Стабилизация температуры в условиях этих возмущений возможна только с помощью замкнутой системы автоматического регулирования.

Исследуемая в работе система «индуктор – металл – полистирол» как объект управления имеет сложную взаимосвязанную структуру, в которой в качестве управляемого параметра рассматривается температура полистирола на выходе каждой зоны. Распределенность параметров объекта приводит к существенному усложнению как в части синтеза системы управления, так и с точки зрения ее практической реализации. Анализ динамики таких объектов является сложной задачей, требующей привлечения методов теории управления систем с распределенными параметрами.

Для расчета параметров системы рассматривается математическая модель процесса нагрева полистирола в виде системы взаимосвязанных уравнений электромагнетизма и теплопроводности. Процесс косвенного индукционного нагрева неэлектропроводного материала описывается системой линейных дифференциальных уравнений в частных производных, решение которой аналитическими методами получить чрезвычайно сложно. В работах [1, 2] для объекта индукционного нагрева двухслойной структуры получено аналитическое решение в операторной форме. Однако анализ динамических свойств объекта с распределенными параметрами на основании полученного решения представляет значительные трудности и в ряде случаев практически невозможен. Точная передаточная функция имеет вид трансцендентной функции комплексного аргумента и содержит ряд несущественных подробностей, усложняющих анализ динамики объекта. Так как классическая теория управления базируется на дробно-рациональном представлении функции, возникает задача получения приближенного выражения для передаточной функции с максимальным сохранением информации о динамических особенностях исследуемого объекта.

Для определения передаточной функции звена с внутренними источниками тепла (индуктор – цилиндр) по каналу «мощность источников – температура цилиндра» в настоящей работе используется способ параметрической идентификации с использованием результатов эксперимента на численной модели.

Принимая обычные допущения относительно теплофизических констант s , γ , λ , представим исходную математическую формулировку задачи нагрева полистирола в экструдере в линейном представлении в виде системы линейных неоднородных уравнений теплопроводности Фурье для температурного поля с известной функцией распределения источников внутреннего тепловыделения [3]

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{\partial T_1(r, x, t)}{\partial t} &= a_1 \left[\frac{\partial^2 T_1(r, x, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_1(r, x, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_1(r, x, t)}{\partial x^2} \right] + w(r, x, t); \\
 r &\in [r_2, r_1]; \quad x \in [0, L]; \\
 \frac{\partial T_2(r, x, t)}{\partial t} &= a_2 \left[\frac{\partial^2 T_2(r, x, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_2(r, x, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_2(r, x, t)}{\partial x^2} \right] - V(x) \frac{\partial T_2(r, x, t)}{\partial x}; \\
 r &\in [r_3, r_2]; \quad x \in [0, L]; \\
 \frac{\partial T_3(r, x, t)}{\partial t} &= a_3 \left[\frac{\partial^2 T_3(r, x, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_3(r, x, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_3(r, x, t)}{\partial x^2} \right]; \\
 r &\in [r_4, r_3]; \quad x \in [0, L]; \\
 \frac{\partial T_4(x, t)}{\partial t} &= a_4 \left[\frac{\partial^2 T_4(x, t)}{\partial x^2} - V_1 \frac{\partial T_4(x, t)}{\partial x} \right].
 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Здесь $T_1(r, x, t)$, $T_2(r, x, t)$, $T_3(r, x, t)$, $T_4(r, x, t)$ – температура соответственно корпуса экструдера, полистирола, шнека и протекающей через тело шнека воды; r, x, t – радиальная и аксиальная координаты и время процесса; $w(r, x, t)$ – функция распределения мощности внутренних источников тепла, определяемая из решения электромагнитной задачи; $V(x)$ – скорость перемещения нагреваемого материала через экструдер; V_1 – скорость течения воды в полости шнека; a_1, a_2, a_3, a_4 – коэффициенты температуропроводности соответственно корпуса экструдера, полистирола, шнека и протекающей через тело шнека воды; L – длина нагревателя.

На основании результатов численного моделирования, выполненного на базе этой модели, произведена аппроксимация исходной системы уравнений и разработана структурная схема объекта в виде параллельно-последовательного соединения элементарных сосредоточенных динамических звеньев.

Исследование динамических свойств проводится относительно температуры цилиндра или полистирола в различных зонах экструдера.

В результате численного моделирования получены переходные функции для температуры цилиндра и температуры полистирола в контролируемых точках. Динамика процесса изменения температуры в указанных точках при переходе на новый установившийся режим для одной секции нагревателя представлена на рис. 1, 2.

Далее по графикам переходных функций определяются вид передаточной функции объекта управления и параметры динамических звеньев.

Методика определения передаточных функций объекта состоит из двух этапов:

- обработка переходной характеристики объекта, полученной с помощью численной модели, выбор аппроксимирующей передаточной функции в виде динамического звена первого или второго порядка;

- обработка данных и определение искомых параметров на модели.

Рассмотрим в качестве примера переходную функцию, полученную в результате численного эксперимента на выходе первой секции в слое полистирола (рис. 3). По виду графика переходной функции принимаем в первом приближении аппроксимирующую функцию в виде аperiodического звена первого порядка с запаздыванием

$$W(p) = \frac{K \cdot e^{-p\tau}}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}. \quad (2)$$

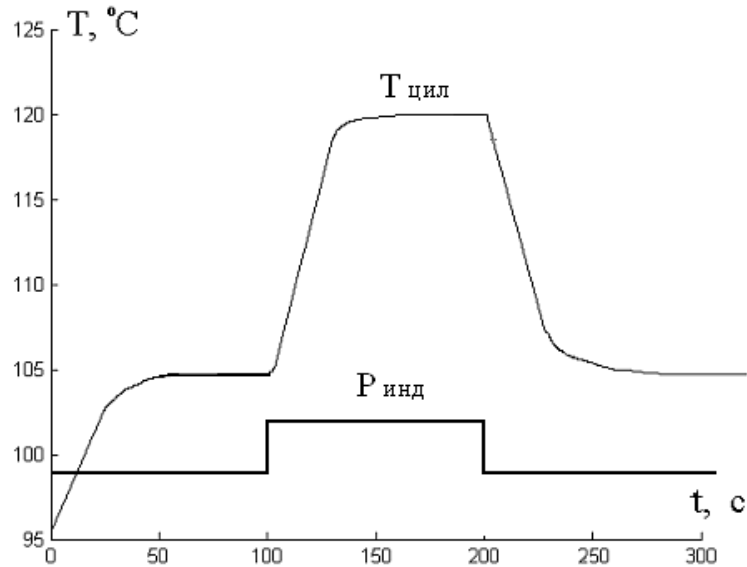


Рис. 1. Реакция температуры цилиндра при возмущении по мощности нагрева

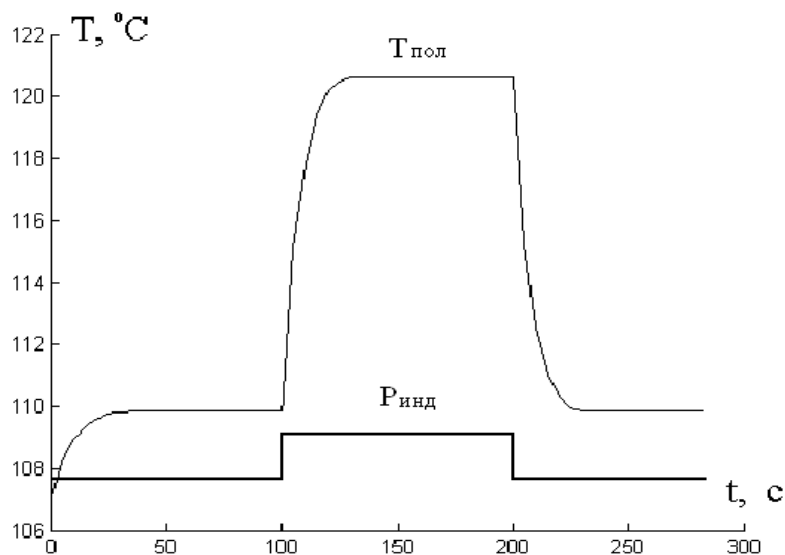


Рис. 2. Реакция температуры полистирола при возмущении по мощности нагрева

Соответствующее изображение переходной функции имеет вид

$$h(p) = \frac{W(p)}{p} = \frac{Ke^{-p\tau}}{p(T_1p+1)(T_2p+1)}. \quad (3)$$

Реакция $h(t)$ такого объекта на ступенчатое воздействие описывается уравнением

$$h(t) = K \cdot \left(1 + \frac{T_1 \cdot e^{-\frac{t-\tau}{T_1}} - T_2 \cdot e^{-\frac{t-\tau}{T_2}}}{T_2 - T_1} \right). \quad (4)$$

Таким образом, для определения динамических характеристик объекта необходимо найти значения параметров K , T_1 , T_2 , τ .

Фактически задачу можно сформулировать следующим образом: необходимо найти такие значения параметров K , T_1 , T_2 , τ , при которых график функции $h(t)$ имел бы минималь-

ное отклонение от всей совокупности экспериментальных точек, т.е. ставится задача нахождения минимума следующей функции

$$\Delta = \sum_i (y_i - h(t_i, K, T_1, T_2, \tau))^2 \rightarrow \min, \quad (5)$$

где y_i – значение функции в i -й точке.

Если функция с запаздыванием, то необходимо определить «пользовательскую» функцию таким образом, чтобы при времени, меньшем времени запаздывания, значение функции было равно нулю. Это можно сделать с помощью MathCAD-функции if:

$$h_{appr}(K, T_1, T_2, \tau, t) := \text{if} \left[t - \tau < 0, 0, K \cdot \left[1 + \frac{T_1 \cdot e^{-\frac{-(t-\tau)}{T_1}} - T_2 \cdot e^{-\frac{-(t-\tau)}{T_2}}}{T_2 - T_1} \right] \right]. \quad (6)$$

Качество аппроксимации можно оценить визуально, построив на одном графике экспериментальные данные и аппроксимирующую функцию.

На рис. 3 точками показаны результаты численного эксперимента, а сплошной линией – аппроксимирующая функция. После обработки данных эксперимента изложенным выше методом были получены параметры K, T_1, T_2, τ .

Из сравнительного анализа видно, что полученная в соответствии с вышеизложенной методикой переходная функция дает удовлетворительную точность. На рис. 4 представлена структурная схема автономной секции нагревателя.

Здесь $W_{\text{ц}}(p) = \frac{K_{\text{ц}}}{(T_{\text{ц}1}p + 1)(T_{\text{ц}2}p + 1)}$ – передаточная функция для температуры цилиндра

относительно мощности, подведенной к индуктору, $W_{\text{м}}(p) = \frac{K_{\text{м}} e^{-p\tau_1}}{(T_{\text{м}1}p + 1)(T_{\text{м}2}p + 1)} (1 - e^{-p\tau(v)})$, – передаточная функция для температуры полистирола соответственно в точке контроля, $(1 - e^{-p\tau(v)})$ – звено транспортного запаздывания, обусловленное временем перемещения полистирола через экструдер.

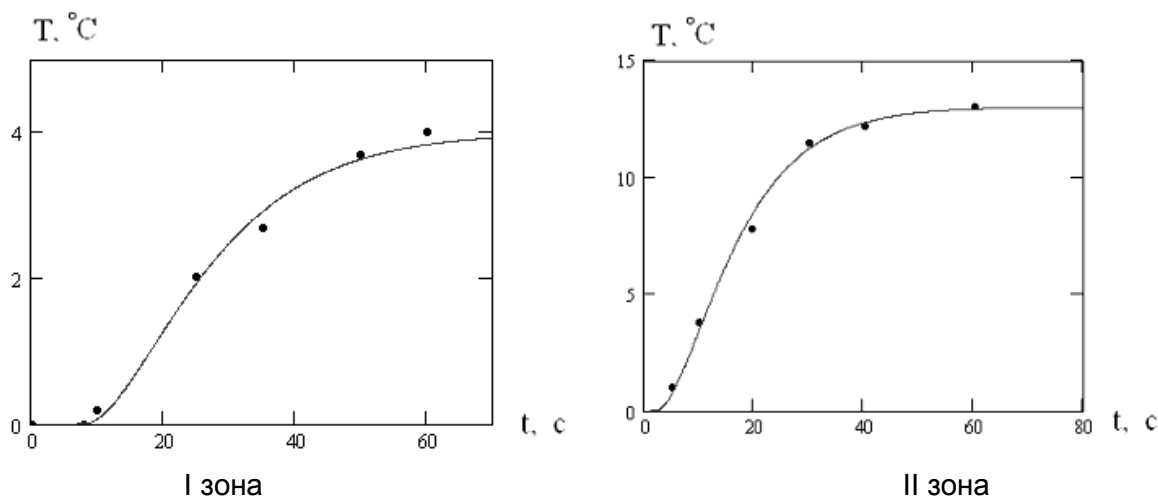


Рис. 3. Аппроксимация переходных характеристик температуры полистирола относительно мощности нагрева

Таким образом, упрощенная структурная схема объекта управления представляется в виде комбинации элементарных звеньев. Полученные приближенные передаточные функции позволяют провести качественный анализ свойств объекта и выполнить синтез автоматической системы управления.

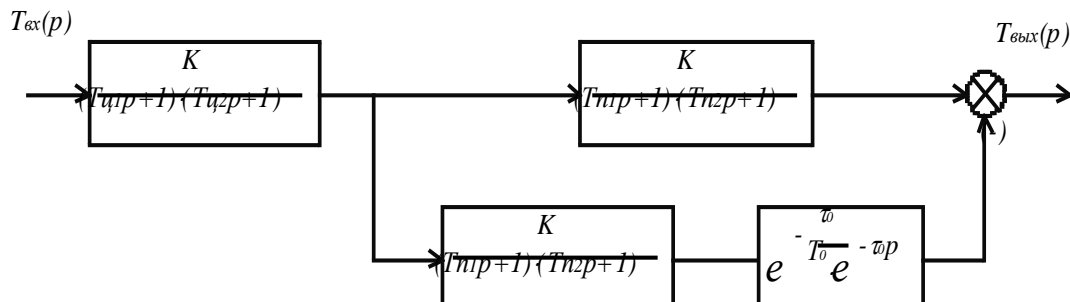


Рис. 4. Структурная схема автономной секции нагревателя

Системы регулирования с обратной связью по температуре полистирола на выходе каждой зоны, безусловно, являются наиболее точными, так как они напрямую определяют качество экструзии полистирола. Однако реализация такого рода замкнутой системы практически невозможна, так как требует установки датчиков температуры непосредственно в слое полистирола. На практике такой контроль осуществить не представляется возможным, так как датчики температуры можно установить лишь в теле цилиндра. Поэтому о характере температурного распределения в полистироле можно судить по показаниям тех датчиков, которые могут быть установлены в цилиндре с различным заглублением в стенку цилиндра. Ввиду этого реализация замкнутой системы возможна лишь с контролем косвенного параметра – температуры цилиндра, которая однозначно связана с температурой полистирола. Степень соответствия температурного поля полистирола изменению температуры цилиндра в различных зонах экструдера устанавливается расчетным путем на основании численной модели объекта.

Для оценки качественных показателей системы автоматического управления нагревом использовалась динамическая модель системы. Исследуемая система управления имеет четыре независимых канала регулирования по числу индукционных нагревателей в линии. Каждый канал регулирования имеет ПИ – регулятор, который отрабатывает возмущения, обусловленные изменением скорости потока полистирола, начальной температуры на входе в нагреватель, изменением физических характеристик полистирола (удельной теплоемкости, теплопроводности, плотности и др.). Для моделирования системы управления использовались возможности среды технологических расчетов – MATLAB, а также сопутствующей системы для моделирования динамических нелинейных систем – Simulink. Распределение температурного поля в течение времени в зависимости от распределения внутренних теплоисточников можно рассчитать, используя инструментальный MATLAB для решения дифференциальных уравнений в частных производных – PDE Toolbox (Partial Differential Equation Toolbox).

С помощью разработанной модели проведен ряд численных экспериментов по отработке ПИ – регулятором различных возмущений, которые могут возникнуть в системе. Как следует из анализа переходных функций, время переходного процесса при возмущении по управляющему воздействию составляет 75 с, а величина перерегулирования на выходе полистирола из экструдера составляет $\pm 3^\circ\text{C}$ или 2%, что полностью удовлетворяет требованиям технологического процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Данилушкин А.И. Идентификация процесса низкотемпературного индукционного нагрева при обработке полимерных материалов / А.И. Данилушкин, Л.С. Зимин // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. 1994. № 1. С. 171-177.

2. Данилушкин А.И. Структурное моделирование процессов и систем управления одного класса объектов индукционного нагрева / А.И. Данилушкин // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. Вып. 5. 1998. С. 120-129.

3. Лыков А.В. Теплообмен: справочник / А.В. Лыков. М.: Энергия, 1978. 480 с.

Батищев Арсений Михайлович –

аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий»
Самарского государственного технического университета

Зиннатуллин Дмитрий Анатольевич –

аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий»
Самарского государственного технического университета

Крылов Алексей Николаевич –

аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий»
Самарского государственного технического университета

Алымов Антон Игоревич –

студент Самарского государственного технического университета

УДК 621.365.5

Ю.С. Архангельский, С.В. Тригорлий

**РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА КОМПЬЮТЕРНЫХ ПРОГРАММ
ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СВЧ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
И УСТАНОВОК**

Разработан комплекс компьютерных программ для автоматизированного проектирования СВЧ электротехнологических процессов и установок. Программы применяются для расчета СВЧ камер с бегущей волной, лучевого типа, для моделирования процессов электродинамики, теплообмена и термомеханики.

Y.S. Arkhangel'skiy, S.V. Trigorliy

**COMPUTER PROGRAMS DEVELOPMENT FOR
MICROWAVE MODEL OPERATION PROCEDURE
AND INSTALLATIONS**

The complex of computer programs for automated design of microwave technological processes and installations are worked out. Programs are applied to account of microwave of apparatus with traveling wave, beam type, for model operation of processes of an electrodynamics, heat and mass transfer and thermo mechanics.

Разработка математических моделей (ММ), адекватных происходящим физическим процессам, является необходимой базой для решения задач автоматического управления

технологическими процессами и проектирования оптимальных СВЧ электротермических установок (ЭТУ). Моделирование и оптимизация режимов работы создаваемых установок являются важнейшими элементами автоматизированного проектирования.

Разработанные авторами компьютерные программы предназначены для автоматизированного исследования и проектирования СВЧ электротермических установок, поэтому математические модели, положенные в их основу, сориентированы на *блочный-иерархический подход*, который обычно используется для проектирования сложных систем [1].

В системах автоматизированного проектирования (САПР) применяется метод поэтапного моделирования, который заключается в последовательном использовании ряда ММ. Эти модели отличаются степенью детализации описания физических процессов, происходящих при термообработке диэлектрических материалов в СВЧ установках. Эти модели соответствуют различным иерархическим уровням проектирования. При нисходящем проектировании результаты моделирования на более высоком уровне входят в качестве исходных данных для последующего уровня.

На начальном этапе (макроуровне) проектирования, когда выбираются основные конструктивные элементы проектируемой установки и оцениваются ее энергетические показатели, используются упрощенные модели. Например, для анализа и синтеза СВЧ установок с бегущей волной для сушки тонких диэлектрических материалов применяются одномерные модели тепло- и массопереноса [2, 3], а для расчета электродинамических процессов – метод эквивалентных схем замещения. При этом модели представляются в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений, которые решаются аналитическими или численными методами.

На следующем этапе (микроуровне) проектирования ММ должны более точно отражать физические процессы, протекающие в объектах СВЧ термообработки, учитывать их взаимосвязь, следовательно, должны решаться самосогласованные задачи электродинамики, теплообмена и термомеханики [4].

Эти модели описываются дифференциальными уравнениями в частных производных. В зависимости от типа СВЧ установки, характера технологического процесса, физических свойств обрабатываемого материала модели могут различаться по степени детализации (двумерные или трехмерные), а также степенью связанности между дифференциальными уравнениями, отражающими взаимное влияние происходящих физических процессов.

Ниже рассмотрим основные этапы процесса проектирования СВЧ ЭТУ.

Для разработки новых СВЧ ЭТУ используем нисходящее проектирование [5]. На рисунке показана схема процесса проектирования для одного из его уровней. Каждому этапу проектирования предшествует формулировка исходных данных, в которые входят требования к технологическому процессу и установке. Проектирование начинается с *синтеза исходного варианта структуры установки*. При этом решаются следующие основные вопросы:

- какого типа использовать СВЧ установку (периодического или непрерывного действия);
- какие применять СВЧ камеры (лучевого типа, с бегущей волной или резонаторного типа);
- какое количество излучателей будет установлено, и как они будут располагаться;
- нужно ли использовать дополнительный поверхностный нагрев.

На следующем этапе проектирования *создаются математические модели* технологических процессов и модели анализа и синтеза СВЧ рабочих камер. Эти модели на разных итерациях синтеза имеют различную точность. Для большинства вариантов структуры СВЧ ЭТУ используются упрощенные модели и алгоритмы расчета.

Например, для расчета СВЧ камер применяются инженерные методы с использованием эквивалентных схем замещения, а для расчета процессов нагрева и сушки – одномерные модели [1]. На завершающих итерациях используются более точные и сложные модели, основанные на методах конечных элементов и конечных разностей [6-8].

Затем выбираются исходные данные (мощность СВЧ ЭТУ или ее производительность, физические характеристики объекта термообработки, граничные и начальные условия и др.) и выполняется *первый вариант анализа*.

Далее проводится сравнение расчетных параметров с заданными по условиям технологии. В зависимости от вида и назначения СВЧ установки могут задаваться, например, следующие параметры:

- скорость нагрева до требуемой температуры с ограничениями на максимально допустимую разность температур в объеме диэлектрика или максимально допустимые температурные напряжения;

- скорость сушки до требуемой влажности диэлектрика с ограничением на максимально допустимую температуру и допустимую разность влагосодержания в объеме тела;

- время плавления диэлектрика с ограничением на максимальную температуру нагрева;

- время появления в диэлектрике разрушающих температурных напряжений при ограничении на максимальную мощность СВЧ установки и др.

В случае, если расчетные параметры удовлетворяют исходным требованиям, полученное проектное решение по структуре установке принимается и *формулируется техническое задание* на проектирование элементов СВЧ ЭТУ данного уровня.

В противном случае выбираются следующие пути улучшения проекта установки:

1) Изменяются числовые значения исходных параметров.

2) Если с помощью параметрического синтеза не удается добиться выполнения исходных технологических требований, то используют другой путь, связанный с изменением структуры СВЧ установки. Так, например, если при СВЧ термообработке диэлектрика не удается добиться равномерного нагрева, то вводят дополнительный источник поверхностного нагрева (нагрев с помощью электрокалорифера или инфракрасного излучателя).

Для нового варианта структуры вновь выбирается математическая модель и проводится параметрический синтез.

3) Если и при новом варианте структуры СВЧ установки необходимые технологические требования не выполняются, то необходимо корректировать исходные данные на проектирование установки.

Разработанные авторами методики проектирования СВЧ электротермических установок и расчета процессов тепло- и массопереноса, происходящих в диэлектриках при воздействии СВЧ энергии, первоначально были реализованы в виде программ для ЭВМ на различных алгоритмических языках (Фортран, Паскаль, Бейсик). В настоящее время данные программы переработаны с использованием имеющихся современных компьютерных математических пакетов с учетом требований удобства ввода данных и наглядности представления результатов расчетов.

В частности, программы компьютерного моделирования электротехнологических установок с СВЧ камерами бегущей волны и лучевого типа, которые используются на начальном этапе (макроуровне) проектирования, реализованы в системе MathCAD 2001.

Выбор данного математического редактора обусловлен тем, что он достаточно прост для применения, позволяет проводить разнообразные научные и инженерные расчеты благодаря обширной библиотеке встроенных функций и численных методов, имеет разнообразный аппарат представления результатов (графики самых разных типов, мощные средства подготовки печатных документов).

Использование системы MathCAD позволяет ускорить освоение методик расчета и получения необходимых навыков самостоятельного моделирования СВЧ электротермических процессов и установок.

Для компьютерного моделирования технологических процессов на основе решения самосогласованных задач электродинамики, тепломассообмена и термомеханики на микроуровне проектирования СВЧ электротермических установок используется алгоритмический язык Тур-

бо-Паскаль. Разработанные на языке Турбо-Паскаль программы позволяют более гибко использовать возможности компьютера, размещая в оперативной памяти лишь минимальное количество информации, при этом основной объем информации хранится на жестком диске.

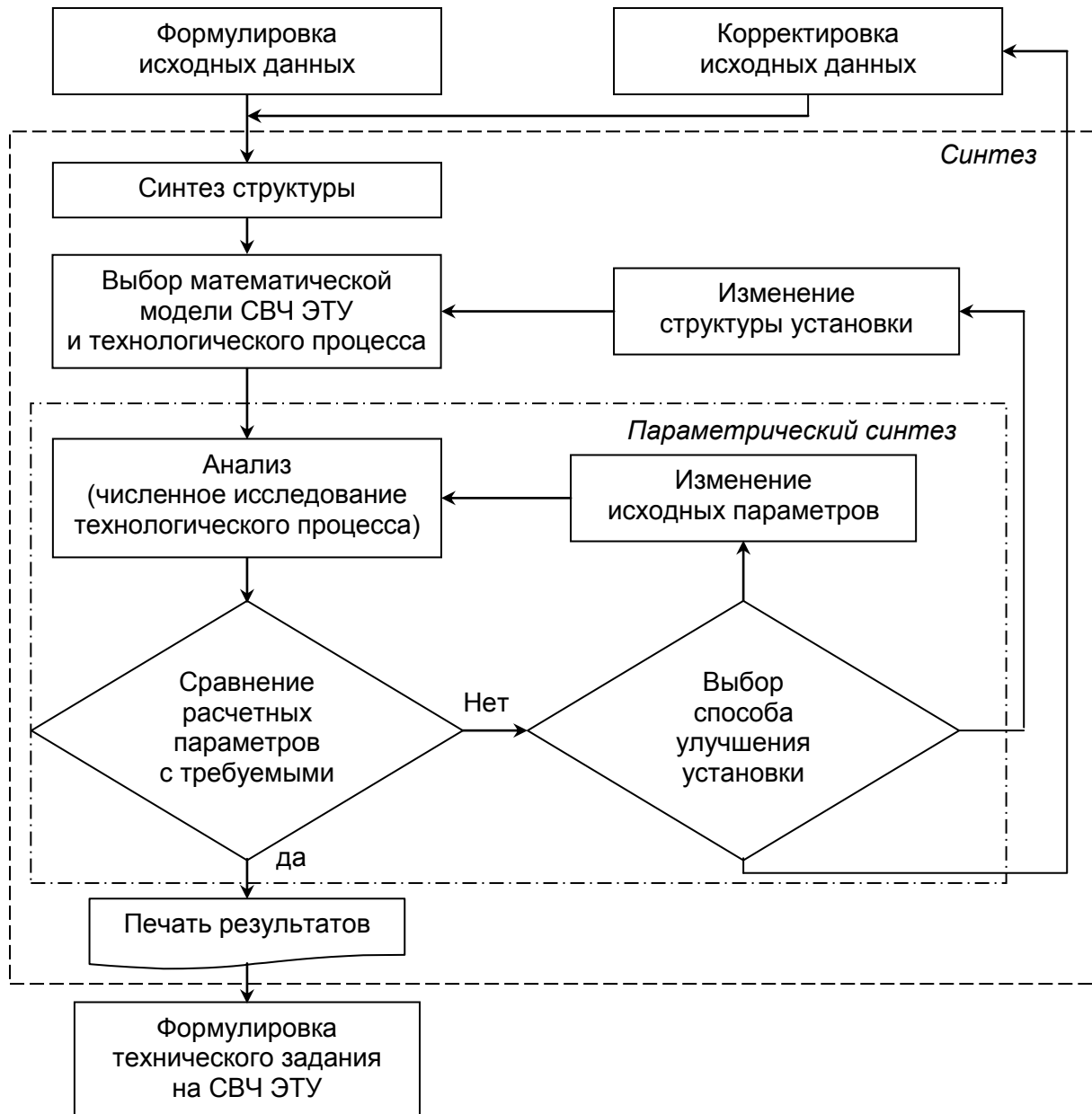


Схема одного из этапов нисходящего проектирования СВЧ ЭТУ

Выводы

1. Разработанные авторами компьютерные программы являются основой для решения задач автоматизированного проектирования СВЧ электротехнологических установок и процессов.
2. Для решения инженерных задач на начальном этапе проектирования предложены упрощенные модели, реализованные в системе MathCAD, на макроуровне проектирования самосогласованные задачи электродинамики, тепломассопереноса и термомеханики решаются с помощью метода конечных элементов, реализованного в системе Турбо-Паскаль.

ЛИТЕРАТУРА

1. Норенков И.П. САПР: Системы автоматизированного проектирования: Кн. 1. Принципы построения и структура / И.П. Норенков. Минск: Выш. шк., 1987. 123 с.
2. Архангельский Ю.С. Сверхвысокочастотные нагревательные установки для интенсификации технологических процессов / Ю.С. Архангельский, И.И. Девяткин. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1983. 140 с.
3. Архангельский Ю.С. Моделирование в системе MathCAD Plus 6.0 процессов СВЧ сушки диэлектриков / Ю.С. Архангельский, С.В. Тригорлый, Д.В. Дজেма // Электротехнологические СВЧ установки, функциональные электродинамические устройства: межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ, 1999. С. 77-82.
4. Архангельский Ю.С. СВЧ электротермические установки лучевого типа / Ю.С. Архангельский, С.В. Тригорлый. Саратов: СГТУ, 2000. 122 с.
5. Тригорлый С.В. Разработка подсистемы моделирования процессов тепломассообмена в САПР СВЧ электротехнологических установок / С.В. Тригорлый, Д.В. Дজেма // Электротехнологические СВЧ установки, функциональные электродинамические устройства: межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ, 1999. С. 72-76.
6. Архангельский Ю.С. Численное исследование процессов тепломассообмена в объектах при нагреве в поле СВЧ / Ю.С. Архангельский, С.В. Тригорлый, Л.В. Грушина // Известия вузов СНГ. Энергетика. 1997. № 3-4. С. 66-71.
7. Тригорлый С.В. Задача термоупругости бетонной плиты при сверхвысокочастотном нагреве / С.В. Тригорлый // Известия вузов. Строительство. 1998. № 1. С. 30-35.
8. Тригорлый С.В. Численное моделирование и оптимизация процессов сверхвысокочастотной термообработки диэлектриков / С.В. Тригорлый // Прикладная механика и техническая физика. 2000. Т. 41. № 3. С. 112-119.

Архангельский Юрий Сергеевич –

доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, заведующий кафедрой «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета

Тригорлый Сергей Викторович –

кандидат технических наук, доцент, заместитель директора НИЦ «Энергоком» Саратовского государственного технического университета

УДК 621.365.5

Е.В. Фоминых

ОПТИМИЗАЦИЯ СХЕМЫ И ПАРАМЕТРОВ ИК ПАСТЕРИЗАТОРА

Рассмотрены источники ИК излучения, тепловой режим ИК нагревателя пастеризатора, оптимизация схемы и параметров ИК нагревателя.

E.V. Fominyh

OPTIMIZATION OF IR-PASTEURIZER SCHEME AND PARAMETERS

The IR-radiation, thermal mode of pasteurizer IR-heater, optimization of IR-pasteurizer scheme and parameters are reviewed.

Известно, что при выборе излучателя для ИК пастеризатора необходимо учитывать множество различных факторов: особенности технологического процесса, свойства пастеризуемой жидкости, санитарно-гигиенические требования, а также экономические показатели [1].

Наибольшее распространение получили электрические ИК нагреватели, в которых источником ИК излучения является нагретая электрическим током металлическая (нихромовая, хромоникелевая или вольфрамовая) проволока, изготавливаемая, например, в виде спирали и помещаемая в стеклянную трубку [2].

В ИК пастеризаторах молока А1-ОП7.1000 и ИНПАС-3 использованы кварцевые трубки диаметром 10; 18; и 25 мм с толщиной стенок 2-3 мм с нихромовой спиралью диаметром 0,5; 0,63; 0,8 мм, помещенной на внешней стороне трубки с коэффициентом навивки 2-8 (рис. 1). С применением теплоизоляции и теплового экрана, по данным ГНПП «Контакт», удастся получить ИК излучение с КПД $\approx 70-85\%$. Максимум ИК излучения приходится на диапазон длин волн 2,8-3,2 мкм. В таких пастеризаторах можно подавить возбудителей туберкулеза бычьего вида с концентрацией 1 млн. микробных тел в 1 л молока.

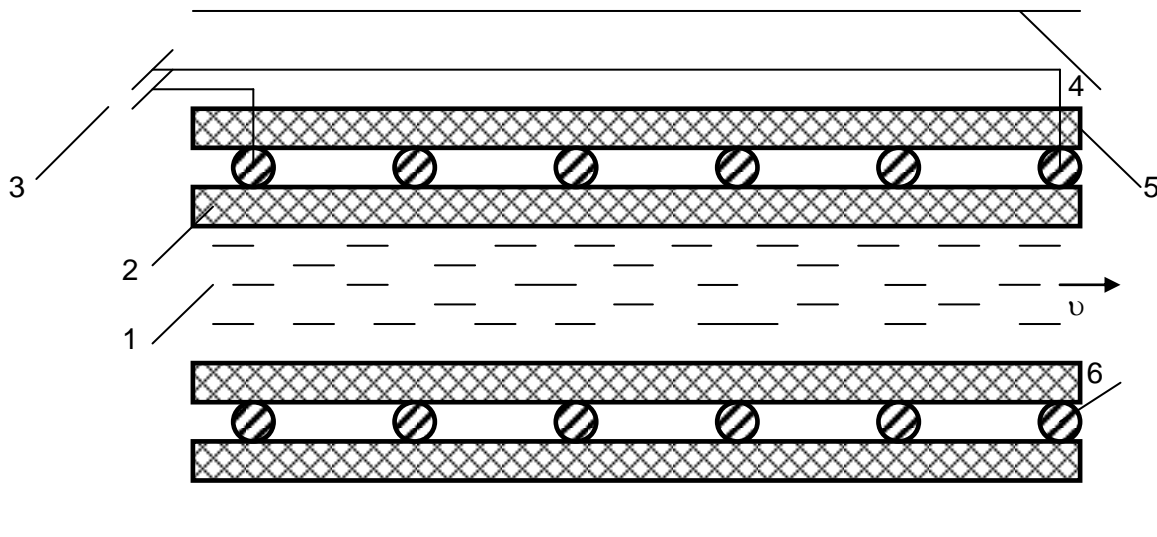


Рис. 1. ИК нагреватель пастеризатора ИНПАС-3:

1 – поток молока; 2 – кварцевая трубка; 3 – выводы спирали; 4 – тепловой экран;
5 – теплоизоляция; 6 – спираль нагревателя

Тепловой режим ИК нагревателя пастеризатора определяется энергией инфракрасного излучения, идущей на нагрев потока молока, геометрией канала, по которому транспортируется поток, и режимом движения молока [3]. На него влияет также величина тепловых потерь в окружающих спираль элементах конструкции и отражательная способность (коэффициент отражения) молока. Температурный напор молока в потоке с учетом осевой симметрии ИК излучения описывает уравнение

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} + v \nabla_{r,z} \Theta = a \nabla_{r,z}^2 \Theta + \frac{P_{y0}(r,z)}{c\rho}, \quad (1)$$

где $\Theta(r,z)=T(r,z)-T_0$; $T(r,z)$, T_0 – температура молока и окружающей среды; a – коэффициент температуропроводности; c , ρ – удельная теплоемкость и плотность молока; P_{y0} – энергия излучения, поглощаемая единицей объема молока, причем

$$P_{y0}(r,z) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} q_V(r,z,\lambda,\Theta) d\lambda. \quad (2)$$

Здесь $q_V(r, z, \lambda, \Theta)$ – энергия монохроматического излучения, проникающего в глубь молока и поглощаемого в единицу времени в единице объема, рассчитанная на единицу интервала излучаемых спиралью волн ($\text{Вт}/\text{м}^3 \cdot \text{мкм}$).

Для надежной пастеризации требуется равномерная термообработка, чему способствует турбулентное движение потока по трубе ИК нагревателя. По координате r температурный напор можно считать постоянным, а при однородной спирали q_V не зависит и от z .

В условиях установившегося режима в (1) $\frac{\partial}{\partial t} = 0$, $\frac{\partial^2}{\partial z^2} = 0$, $\frac{\partial}{\partial r} = 0$, и тогда (1) примет вид

$$cG \frac{\partial \Theta}{\partial z} = \frac{P_0}{l}, \quad (3)$$

где G – производительность пастеризатора ($\text{кг}/\text{с}$); P_0 – мощность излучения, поглощенного потоком; l – длина трубы со спиралью ИК нагревателя. Тогда из (3)

$$\Theta = \frac{P_0 z}{cGl}. \quad (4)$$

Такой подход к определению температурного режима позволяет сосредоточить внимание на температуре потока молока, избежать усложнения задачи учетом температурных полей в других элементах конструкции нагревателя. Но при этом следует учесть КПД ИК нагревателя, а именно

$$P_0 = KP, \quad (5)$$

где P – мощность, рассеиваемая спиралью; $K \approx 0,7$ – КПД ИК нагревателя; тогда (4) можно переписать в виде

$$\Theta = \frac{KPz}{cGl}. \quad (6)$$

Для того чтобы оптимизировать схему и параметры ИК нагревателя, необходимо определить количество и размеры кварцевых трубок, схему их включений в гидравлический тракт пастеризатора, параметры и режим работы спиральных нагревателей на их внешних поверхностях, обеспечивающих надежную пастеризацию в потоке заданной производительности.

Главное требование, предъявляемое к ИК нагревателю, – надежная пастеризация молока, а ее можно установить только опытным путем. Поэтому имеет смысл рекомендовать к применению в ИК пастеризаторе параметры и режимы работы элемента ИК нагревателя, экспериментально отработанного и испытанного в эксплуатации ИК пастеризатора, разработанного ГНПП «Контакт»:

- диаметр кварцевой трубки 25 мм;
- длина кварцевой трубки 1000 мм,
- диаметр нихромового провода спирали 0,5 мм;
- длина навивки спирали 940 мм;
- мощность, подаваемая на нагреватель, 2,2 кВт;
- коэффициент навивки спирали, соответствующий максимальному коэффициенту поглощения энергии (максимальному КПД), 5;
- оптимальный ток спирали 4,65 мА;
- $\text{КПД}_{\text{max}} = 86,7\%$.

Таким образом, с учетом КПД собственно на нагрев молока на одном ИК нагревателе идет 1900 Вт.

Для регулировки производительности ИК пастеризатора нагреватели должны быть включены последовательно по потоку молока, на каждом нагревателе спираль должна быть

выполнена из двух половин с автономным включением в сеть каждой из них (шаг регулировки 900 Вт) (рис. 2).

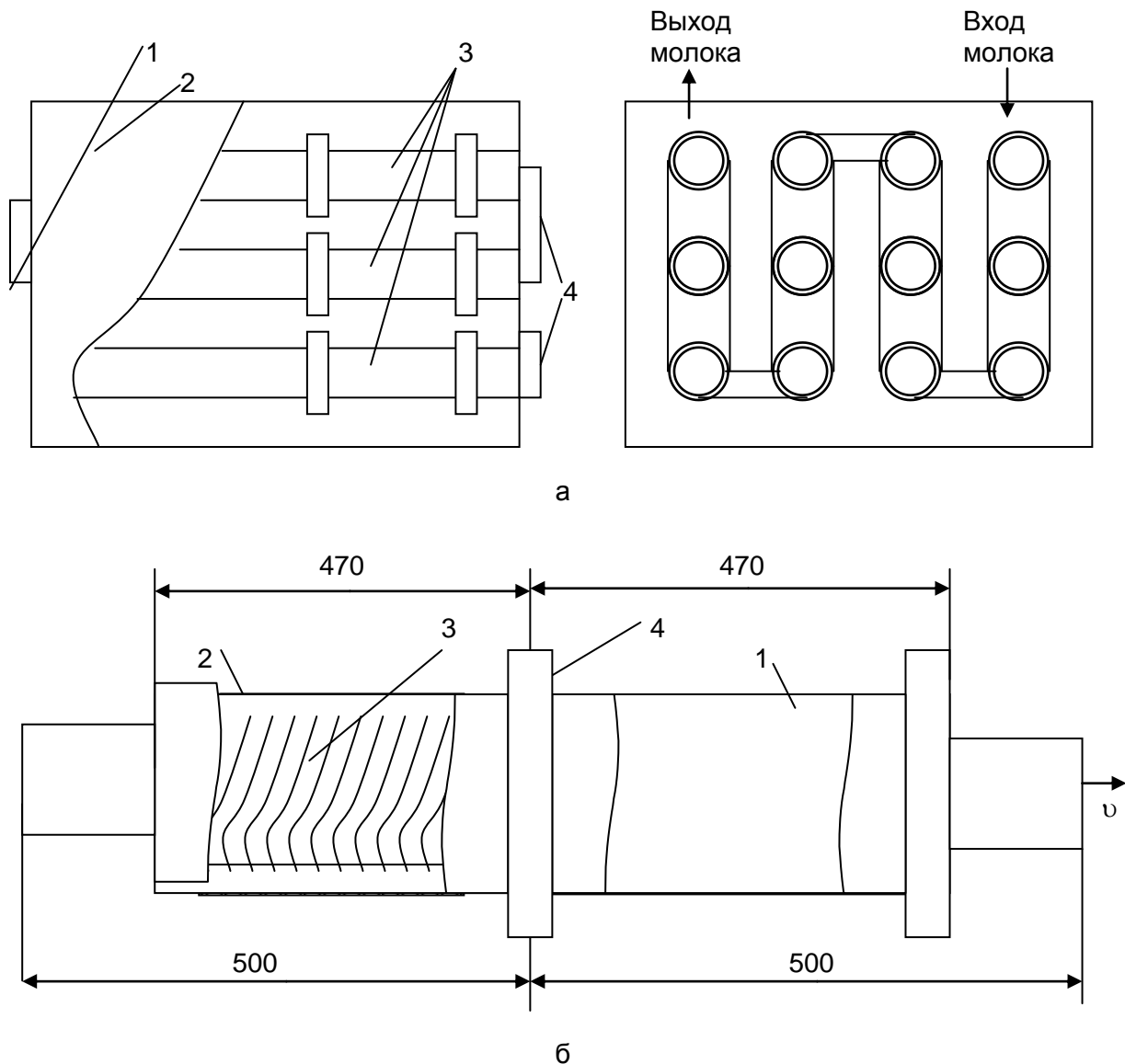


Рис. 2. ИК нагреватель пастеризатора молока в потоке: а – ИК нагреватель (1 – входной патрубок, 2 – теплоотражающий кожух, 3 – элементы ИК нагревателя, 4 – каналы для соединения кварцевых трубок); б – элемент ИК нагревателя (1 – кварцевая трубка, 2 – теплоизоляция, 3 – спираль, 4 – крепящий хомут)

Если у производителя 10-50 голов дойных коров, то производительность пастеризатора должна регулироваться в пределах 10-100 кг/ч, причем для пастеризации молока в потоке требуется полезная мощность 800-22800 Вт. Следовательно, для реализации пастеризации с помощью ИК нагревателя с приведенными выше параметрами требуется от 0,5 до 12 штук таких элементов.

Выводы

В трубке ИК нагревателя имеет место турбулентное движение за исключением предельно низкой производительности пастеризатора. Для обеспечения турбулентного движе-

ния на входе и выходе элементов ИК нагревателя следует разместить местные или распределенные неоднородности, возмущающие поток молока.

Все вышеизложенное позволяет говорить о целесообразности применения ИК нагревателей для пастеризации молока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фоминых Е.В. Пастеризаторы молока, использующие инфракрасное излучение / Е.В. Фоминых, Ю.С. Архангельский // Электро- и теплотехнологические процессы и установки – 2: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2005. С. 37-40.
2. Рогов И.А. Электрофизические методы обработки пищевых продуктов / И.А. Рогов. М.: Агропромиздат, 1988.
3. Островский Л.В. Инфракрасный нагрев в общественном питании / Л.В. Островский. М.: Экономика, 1978.

Фоминых Елена Вячеславовна –

ассистент кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета

УДК 621.365.5

А.В. Доценко

ОПТИМИЗАЦИЯ УЩЕРБА И РЕЗЕРВИРОВАНИЯ ПРИ СВЧ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОМ НАГРЕВЕ

Приводятся соотношения для расчета величины ущерба, наносимого производству, в случае выхода из строя оборудования, для различных режимов работы установки СВЧ диэлектрического нагрева. Рассматриваются четыре варианта резерва и предложены соотношения для определения капиталовложения, необходимого для реализации резервирования.

A.V. Dotsenko

DAMAGE AND RESERVATION OPTIMIZATION AT THE MICROWAVE DIELECTRIC HEATING

The parities for calculation of size of damage which is put to manufacture, in case of failure of the equipment for various operating modes of installation of the microwave of dielectric heating are given here. The article considers 4 variants of a reserve and parities for definition of the capital investment which are necessary for realization of reservation.

Проблема эффективности установок СВЧ диэлектрического нагрева (У СВЧ ДН) обострилась в связи с переходом к рыночной экономике. Решающим фактором при принятии решения о целесообразности разработки новой технологической установки является ее эко-

номическая эффективность, зависящая от многочисленных параметров, учесть которые при решении оптимизационных задач можно только на базе системного подхода. Среди таких задач совершенно не исследованной пока остается задача оптимизации ущерба, возникающего при остановке установки, и купирующего его резервирования в У СВЧ ДН. В этой связи принципиальным является вопрос о целевой функции задачи оптимизации.

При любой форме организации резерва У СВЧ ДН в процессе эксплуатации установки возможны перерывы в выпуске продукции по техническим причинам на время t_0 , от чего прибыль владельца установки [1] уменьшится на величину $У$, т.е.

$$B_1 = \sum_{t=0}^{t_{cl}} \left\{ \sum_{i=0}^n (P_i C_i - V_i)_t + H_t + S_t + M_t - Z_t \right\} (1+E)^{-t} + \Phi_t (1+E)^{-t_{cl}} , \quad (1)$$

где P_i, C_i – количество и цена единицы i -й продукции, выпускаемой проектируемой установкой в t -й год его эксплуатации; n – число видов выпускаемой за время t_{cl} продукции; t_{cl} – срок эксплуатации (службы) установки; V_i – величина ущерба в t -й год эксплуатации; H_t – стоимостная оценка сопутствующего эффекта в производственной сфере в t -й год эксплуатации; S_t – стоимостная оценка социального эффекта в t -й год эксплуатации; M_t – остаточная стоимость основных фондов производственной инфраструктуры, исключаемых из эксплуатации в t -й год; Z_t – эксплуатационные издержки на работу объекта, включая налоги, сборы и платежи, в t -й год эксплуатации; E – норма дисконта (определяется финансовой политикой государства и меняется в пределах 0,08-0,12); $\Phi_{t_{cl}}$ – остаточная на момент времени t_{cl} стоимость основных фондов.

Соотношение (1) может быть целевой функцией при решении задачи оптимизации ущерба и резервирования в У СВЧ ДН. Входящие в (1) величины рассмотрены в [2], так что определению подлежат ущерб $У$ и затраты на резервирование.

Выражения для $У$ зависят от режима работы установок СВЧ диэлектрического нагрева и характера технологического процесса. Величину ущерба в общем случае можно рассчитать как

$$У = G t_0 C N , \quad (2)$$

где C – цена продукции; t_0 – время остановки одной установки в год; G – производительность процесса (меняется в зависимости от технологического процесса); N – количество У СВЧ ДН.

Цена продукции определяется рыночными механизмами, t_0 – типом используемого резерва, количество установок N определяется на стадии оптимизации.

У СВЧ ДН могут работать автономно, в технологических линиях или могут быть собраны в самостоятельную технологическую линию, в периодическом и методическом режимах, в них могут производиться технологические процессы без фазовых переходов или при их наличии [1].

1. Если установка работает автономно в периодическом режиме без фазового перехода, то G определяется по соотношению

$$G = \frac{V}{t_{об} + t_{зв}} , \quad (3)$$

где V – объем обрабатываемого объекта в рабочей камере; $t_{об}$ – время нагрева до заданной температуры; $t_{зв}$ – время загрузки-выгрузки одной порции продукции.

Время обработки одной порции можно найти, решив уравнение теплового баланса

$$c_{\partial} \rho_{\partial} V \frac{d\Theta}{dt} = (1 - |\Gamma|^2) M P - h S \Theta , \quad (4)$$

где $c_{\partial}, \rho_{\partial}$ – удельная теплоемкость и плотность обрабатываемого объекта; $\Theta = T - T_0$ – температурный напор обрабатываемого объекта; T, T_0 – температуры объекта и окружающего пространства; Γ – коэффициент отражения от рабочей камеры; P – мощность СВЧ одного магне-

трона; h – коэффициент тепловых потерь с поверхности S обрабатываемого объекта; M – количество магнетронов, работающих в одной установке, т.е.

$$t_{об} = \frac{c_{\partial} \rho_{\partial} V}{h S} \ln \frac{1}{1 - \frac{h S \Theta_{зад}}{(1-|\Gamma|^2) M P}}, \quad (5)$$

где $\Theta_{зад} = T_{зад} - T_0$ – температурный напор, до которого надо нагреть объект обработки; $T_{зад}$ – заданная температура обработки.

Если, как обычно,

$$\frac{h S \Theta_{зад}}{(1-|\Gamma|^2) M P} < 1, \quad (6)$$

то

$$t_{об} = \frac{c_{\partial} \rho_{\partial} V \Theta_{зад}}{(1-|\Gamma|^2) M P}, \quad (7)$$

а потому величина ущерба U определяется по соотношению (2), где G находится по (3), $t_{об}$ – по (7), при V заданном (определяется на стадии решения синтеза рабочей камеры), $t_{зе}$ – величина нормативная.

2. Если установка работает автономно в методическом режиме без фазового перехода, G находится из уравнения теплового баланса

$$c_{\partial} \rho_{\partial} G \Theta + h S \Theta = (1-|\Gamma|^2) M P, \quad (8)$$

откуда

$$G = \frac{(1-|\Gamma|^2) M P}{c_{\partial} \rho_{\partial} \Theta_{зад}} \left[1 - \frac{h S \Theta_{зад}}{(1-|\Gamma|^2) M P} \right]. \quad (9)$$

С учетом (6)

$$G = \frac{(1-|\Gamma|^2) M P}{c_{\partial} \rho_{\partial} \Theta_{зад}}. \quad (10)$$

В этом случае U определяется по (2), где G – по (10).

3. Пусть установка работает автономно в периодическом режиме с фазовым переходом (массоперенос). Для определения $t_{об}$ необходима система уравнений, описывающая процесс сушки

$$(h_k S_k + h_u S_u) \Theta + c_{\partial} \rho_{\partial} V \frac{d\Theta}{dt} = (1-|\Gamma|^2) M P, \quad (11)$$

$$\frac{dm}{dt} = \frac{h_u S_u}{r} \Theta,$$

где h_k , h_u – коэффициенты теплоотдачи конвекцией и испарением; S_k , S_u – площади поверхностей объекта, с которых идет теплоотдача конвекцией и испарением; r – коэффициент парообразования, учитывающий затраты энергии на реализацию фазового перехода; m – масса испаряемой жидкости (воды).

Обычно $h_k \ll h_u$, $S_k \approx S_u$, и тогда при мягком режиме сушки

$$t_{об} = \frac{m r + c_{\partial} \rho_{\partial} V \Theta_{зад}}{(1-|\Gamma|^2) M P}, \quad (12)$$

в случае жесткого режима сушки

$$t_{об} = t_{нагр} + t_{вып} = \frac{c_{\partial} \rho_{\partial} V \Theta_{кин}}{(1-|\Gamma|^2) M P} + \frac{m r}{h_u S_u \Theta_{кин}}, \quad (13)$$

где $t_{нагр}$ – время нагрева объекта до температуры кипения; $t_{вып}$ – время выпаривания заданного количества жидкости.

Ущерб $У$ определяется по соотношению (2) с учетом (12), (13) и (3).

4. Пусть установка работает автономно в методическом режиме с фазовым переходом (массоперенос). В этом случае справедливы все соотношения для установки, работающей в методическом режиме без фазового перехода, если вместо hS поставить $h_k S_k + h_u S_u$.

5. Рассмотрим установку, работающую автономно в периодическом режиме с фазовым переходом без выраженного массопереноса. В этом случае

$$t_{об} = t_{нагр} + t_{\phi}, \quad (14)$$

где t_{ϕ} – время реализации фазового перехода, $t_{нагр}$ определяется по соотношению (7) при замене $\Theta_{зад}$ на Θ_{ϕ} ,

$$\Theta_{\phi} = T_{\phi} - T_0,$$

где Θ_{ϕ} – температурный напор при фазовом переходе; T_{ϕ} – температура фазового перехода, причем t_{ϕ} определяется из соотношения

$$t_{\phi} = \frac{m}{v_{\phi}}, \quad (15)$$

где v_{ϕ} – скорость фазового перехода.

В таком случае $У$ определяется по (2), G – по (3), $t_{об}$ – по (14).

6. Наконец, процесс с фазовым переходом без выраженного массопереноса в установке, работающей в методическом режиме автономно, обеспечить не удастся, т.к. на стадии нагрева и фазового перехода, т.е. в разных частях одной рабочей камеры, требуется разная мощность СВЧ [3].

7. Рассмотрим теперь $У$ СВЧ ДН, работающую в технологической линии.

Если в этой линии можно включить параллельно любое количество $У$ СВЧ ДН, то все соотношения для расчета ущерба те же, как и для установок, работающих в периодическом режиме.

Если в технологической линии может быть лишь заданное количество установок N , в каждой из которых могут быть по M магнетронов, работающих на одну рабочую камеру, то, как показано в [3], мощность СВЧ $P=P(M)$ при любых режимах работы с фазовым и без фазового переходов, а это значит, что варьировать P в оптимизационных задачах можно только лишь в том случае, если в установке допускается менять количество магнетронов.

8. Если $У$ СВЧ ДН собраны в самостоятельную технологическую линию, то такая схема позволяет реализовать в методическом режиме технологический процесс с фазовым переходом без выраженного массопереноса. Для этого нужно иметь две последовательные зоны нагрева, когда в первой идет нагрев при мощности P до температуры фазового перехода t_{ϕ} , а во второй – фазовый переход при мощности P_{ϕ} .

В методическом режиме должно выполняться условие

$$G_n = G_{\phi} = G, \quad (16)$$

где G_n , G_{ϕ} – производительность в зонах нагрева и фазового перехода; G_n определяется по (9) при $G=G_n$ и $\Theta_{зад}=\Theta_{\phi}$. Тогда

$$G_{\phi} = \frac{V}{t_{\phi}} = \frac{v_{\phi}}{\rho_{\partial}}. \quad (17)$$

Что касается резервирования, то в соотношении (1) для B_1 оно учитывается в величине капиталовложения K . В У СВЧ ДН могут быть использованы следующие варианты резервирования:

1. В комплект установки в качестве резерва входят магнетроны, достаточные для замены вышедших из строя в течение года. Тогда для замены этих магнетронов в течение года потребуется резерв

$$R = k_3 \frac{D t_c M N}{\ell}, \quad (18)$$

где k_3 – коэффициент запаса ($\sim 1,2$), учитывающий возможность выхода магнетрона из строя до истечения срока его службы; ℓ – срок службы магнетрона; t_c – время работы установки в сутки; D – количество дней работы установки в год.

Затраты на создание резерва при цене одного магнетрона X составят

$$R_1 = R X.$$

Капиталовложение в этом случае равно

$$K_1 = N K_y + R_1 + C_{пер} + C_{мон}, \quad (19)$$

где K_y – цена одной установки; $C_{пер}$, $C_{мон}$ – затраты на перевозку и монтаж установки.

При таком резерве время перерыва в работе установки t_0 определяется временем в течение года, которое потребуется для замены вышедших из строя магнетронов (на отключение СВЧ генератора от линии передачи и рабочей камеры, демонтаж кожуха СВЧ генератора, удаление с посадочных гнезд СВЧ магнетрона, установку нового магнетрона, измерения мощности СВЧ, генерируемой источником СВЧ энергии с новым магнетроном на согласованную калориметрическую нагрузку, подключение СВЧ генератора к линии передачи).

Экспертная оценка продолжительности фактической замены магнетрона составляет минимум $\tau=1$ ч, причем общее время нанесения ущерба при таком резерве составит

$$t_0 = k_3 \tau M N. \quad (20)$$

2. В комплект установки входит резервный СВЧ генератор, а также необходимое количество резервных магнетронов. Капиталовложение в этом случае равно

$$K_2 = N K_y + R_2 + C_{пер} + C_{мон}, \quad (21)$$

где $R_2=R_1+Z_1$, Z_1 – цена одного СВЧ генератора.

Время простоя установки в течение года при таком виде резервирования определяется по соотношению (20), где τ по экспертной оценке составит 20 мин (отсоединение СВЧ генератора от линии передачи и от источника питания, установка резервного СВЧ генератора). В τ не входит время на замену магнетрона и проверку его работоспособности, т.к. ремонт проводится уже во время работы У СВЧ ДН.

3. В комплект установки входит источник энергии. Капиталовложение в таком случае определяется соотношением

$$K_3 = N K_y + R_3 + C_{пер} + C_{мон}, \quad (22)$$

где $R_3=R_1+Z_2$, Z_2 – цена одного источника энергии (источник питания и СВЧ генератор).

Время простоя установки в течение года при таком виде резервирования определяется соотношением (20), где по экспертной оценке $\tau=6$ мин (отсоединение СВЧ генератора от линии передачи, замена источника энергии на резервный и присоединение СВЧ генератора к линии передачи).

4. В комплект технологического оборудования входит резервная установка в полном комплекте. Время простоя установки складывается из времени включения в работу резервной установки и определяется соотношением (20), где τ по экспертной оценке равно $\tau=3$ мин.

Капиталовложение в этом случае составит

$$K_4 = NK_y + R_4 + C_{пер} + C_{мон} , \quad (23)$$

где $R_4 = R_1 + K_y$ – цена одной установки.

Нужно подчеркнуть, что надежность установки во втором варианте резервирования выше, чем в первом, т.к., кроме магнетрона, резервируется трансформатор накала, входящий в состав СВЧ генератора. Надежность в третьем варианте резервирования выше, чем во втором, т.к., кроме СВЧ генератора, резервируется источник питания. Наконец, четвертый вариант резервирования надежнее третьего, т.к. резервируется еще линия передачи, рабочая камера и вспомогательное оборудование.

Таким образом, стремясь уменьшить время простоя, т.е. сократить ущерб, проектировщик вынужден использовать более затратный вариант резервирования.

Решение задачи оптимизации ущерба и резервирования сводится к нахождению условий, при которых

$$B_1 = B_{1\max} . \quad (24)$$

Общее решение задачи оптимизации ущерба и резервирования, принимая во внимание, что количество вариантов резервирования ограничено, можно провести следующим образом.

Решение задачи о нахождении оптимальных значений независимых параметров x_1, x_2, \dots, x_n сводится к нахождению значений этих параметров из системы уравнений

$$\begin{aligned} \frac{\partial |B_{1\max}|}{\partial x_1} &= 0 , \\ \frac{\partial |B_{1\max}|}{\partial x_2} &= 0 , \\ &\dots \\ \frac{\partial |B_{1\max}|}{\partial x_n} &= 0 . \end{aligned} \quad (25)$$

Обычно можно ограничиться варьированием мощности P , т.к. $M = M(P)$. Что касается оптимизации числа установок N_{opt} , то оно определяется с учетом заданной производительности Π и P_{opt}, M_{opt} .

На втором этапе решения задачи оптимизации ущерба и резервирования следует выбрать оптимальную структуру, параметры и режимы при которых

$$B_{1\max} = B_{1\max \max} .$$

Если построить выражение для сравнительного интегрального эффекта

$$\Delta B_1 = B_{1i} - B_{1j} , \quad (26)$$

где i и j – номера сравниваемых вариантов резервирования, то знак величины ΔB_1 определит предпочтительность того или иного варианта. Если $\Delta B_1 > 0$, то предпочтительнее i -й вариант резервирования, а если $\Delta B_1 < 0$, то j -й вариант. Сопоставляя между собой рассмотренные варианты резервирования, можно выбрать тот, который дает наибольший интегральный эффект B_1 .

Выводы

1. В качестве целевой функции задачи оптимизации ущерба и резерва У СВЧ ДН целесообразно использовать интегральный эффект за срок службы установки с учетом ущерба и затрат на резервирование.

2. Предложены соотношения для расчета ущерба и капиталовложений при четырех вариантах резервирования У СВЧ ДН, работающих автономно, в технологической линии или собранных в самостоятельную технологическую линию, в периодическом или методическом режимах при наличии фазовых переходов или при их отсутствии.

3. Предложена схема оптимизации У СВЧ ДН с учетом ущерба и резервирования, сводящаяся к определению оптимального количества У СВЧ ДН, мощности магнетрона, количества магнетронов, работающих на одну рабочую камеру, при которой интегральный эффект (дисконтированный доход) достигает максимальной величины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Доценко А.В. Ущерб при СВЧ диэлектрическом нагреве / А.В. Доценко // Электро- и теплотехнологические процессы и установки – 2: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2005. С. 45-51.

2. Архангельский Ю.С. СВЧ электротермия / Ю.С. Архангельский. Саратов: СГТУ, 1998. 407 с.

3. Архангельский Ю.С. Элементная база СВЧ электротермического оборудования / Ю.С. Архангельский, В.А. Воронкин. Саратов: СГТУ, 2003. 212 с.

Доценко Анастасия Владимировна –

аспирант кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета

УДК 621.365

Т.Ю. Дунаева

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ СУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК СВЧ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАГРЕВА

Рассматривается проблема применения методов математического моделирования при проектировании и оптимизации установок СВЧ диэлектрического нагрева, в частности, СВЧ сушилок.

T.Y. Dunaeva

MATHEMATICAL MODELLING METHOD APPLICATION FOR OPTIMIZATION OF MICROWAVE-DRYING PLANTS

This article describes the problem of widespread application of mathematical modeling method at projecting and optimization of microwave plants, microwave-drying plants in particular.

На современном этапе развития электротехнологии особое значение приобретает оптимизация процессов электротермической обработки и работы электротехнологических аппаратов.

Процессы электротехнологии протекают в системе со сложными внутренними и обратными связями, состоящей из взаимосвязанных элементов: объект обработки (например, пищевые продукты, древесина и др.) – источник энергоподвода (электромагнитное поле) –

электротехнологический аппарат. Физической основой протекания процессов электротехнологии является взаимодействие внешних и внутренних полей. При этом поле понимается не только как характеристика распределения параметров в пространстве, но и как самостоятельная субстанция – форма состояния материи. Единство этих понятий достаточно наглядно проявляется в процессах электротехнологии.

Задача оптимизации – обеспечение конечной цели процесса – получение продукта высокого качества с заранее заданными свойствами (прогнозирование этих свойств) при высоких технико-экономических показателях работы аппарата.

Мощным средством решения указанной задачи может служить применение к исследованию процессов электротехнологии системного анализа. В этом случае методом исследования можно считать математическое моделирование, стратегией исследования – системный анализ, средством исследования – вычислительные машины.

При системном анализе указанные задачи можно решить с помощью широкого использования математического моделирования, что дает возможность обосновать не только параметры оптимального режима процесса, но и выбрать наиболее целесообразный способ управления процессом в реальных производственных условиях.

Системный анализ процессов электротехнологии проводится на пяти уровнях иерархии: исследование свойств объектов обработки на атомарно-молекулярном уровне и, в частности, их электрофизических характеристик; анализ распределения энергии внутри материала и внутреннего тепломассопереноса; анализ гидродинамики процесса; исследование внешнего энергоподвода (тепломассообмена); увязка с конструктивными особенностями аппарата [1, 2, 3].

Общую блок-схему математического моделирования тепломассопереноса в процессе обработки влажного материала в электромагнитном поле СВЧ диапазона можно представить в следующем виде (рисунок).

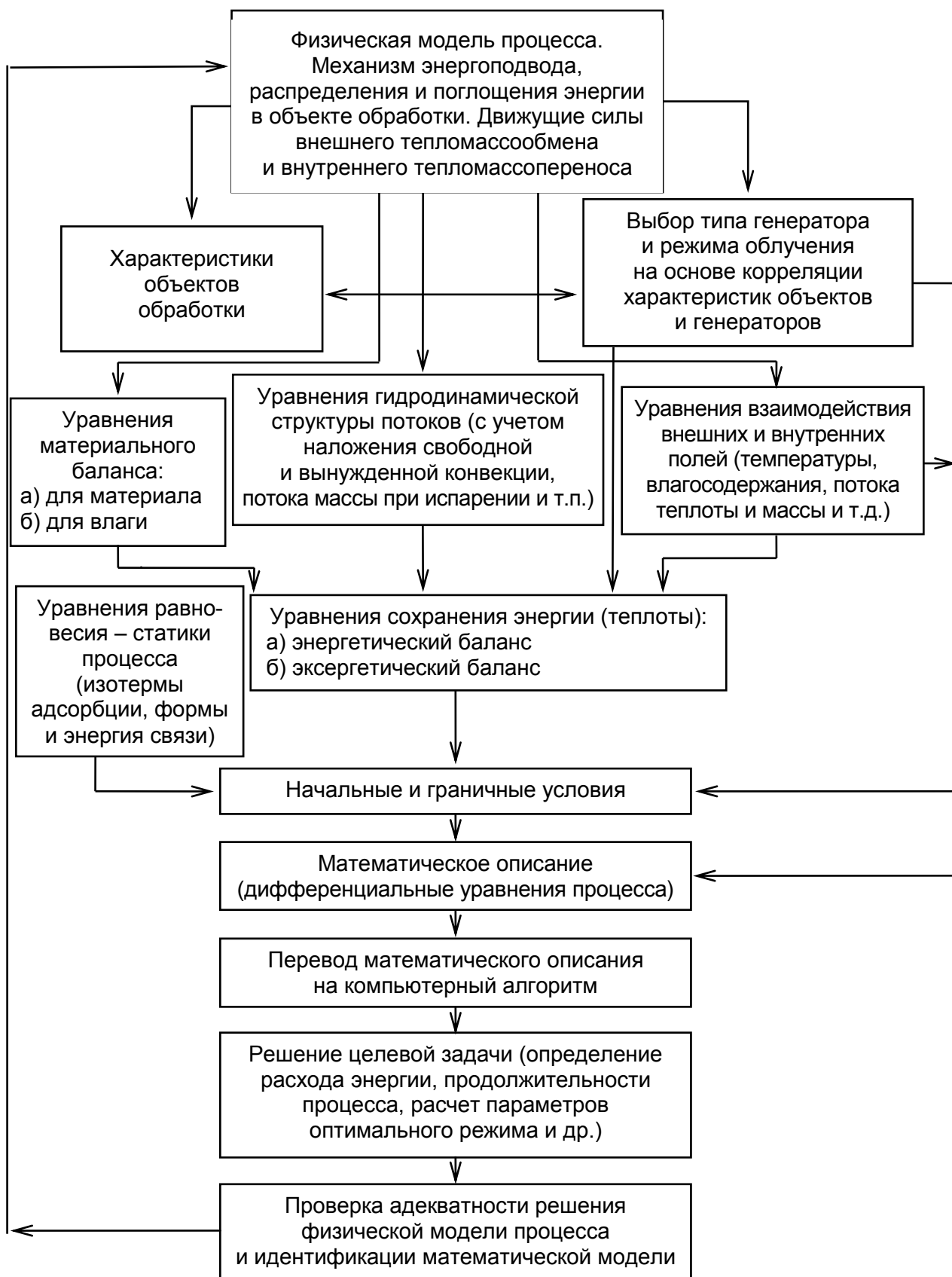
В проблеме разработки методов оптимизации и управления процессами электротехнологии можно выделить следующие основные аспекты:

- 1) управление свойствами объектов обработки и, в частности, состоянием воды во влажных материалах;
- 2) управление механизмом внутреннего влагопереноса в процессе сушки (жидкость-пар);
- 3) управление воздействием внешних физических и энергетических полей на влажные материалы с целью интенсификации процесса;
- 4) управление работой установки в целом;
- 5) оптимизация проектирования аппаратов и, в частности, разработка экспертной системы по выбору способа обработки для конкретных объектов – влажных материалов и создание соответствующей САПР;
- б) применение методов и средств оптимизации при экспериментальном исследовании процессов электротехнологии.

Управление свойствами объекта обработки играет важную роль в управлении процессом в электротехнологии. Изменение этих свойств и, в частности, электрофизических характеристик в процессе обработки обуславливает необходимость создания переменного режима в аппарате и по существу является основой обратной связи во взаимодействии источника энергоподвода, среды и влажного материала.

На кинетику и механизм влагопереноса и энергетические затраты в процессах электротехнологии оказывает влияние состояние влаги в объектах обработки – ее молекулярная структура и связь с сухим скелетом тела [1]. Необходимо более подробно учитывать формы и энергию связи влаги на основе данных исследований по анализу физических свойств воды, обусловленных электронным строением ее молекулы, а также работ по изучению взаимодействия между молекулами воды и поверхностью адсорбента – твердого скелета материала.

При этом надо также учитывать изменение не только свойств связанной влаги, но и природы самого твердого скелета, что, в свою очередь, влияет на характер и энергию связи.



На современном этапе развития проектирование СВЧ установок диэлектрического нагрева проводится путем решения самосогласованной краевой задачи электродинамики и тепломассопереноса [4]:

$$\begin{aligned}
 \operatorname{rot} H &= j + \frac{\partial D}{\partial t}, \\
 \operatorname{rot} E &= -\frac{\partial B}{\partial t}, \\
 \operatorname{div} D &= 0, \\
 \operatorname{div} B &= 0, \\
 \frac{\partial \theta}{\partial t} + v \nabla \theta &= k_{11} \nabla^2 \theta + k_{12} \nabla^2 U + k_{13} \nabla^2 p + \frac{P_{y\theta}}{c\rho}, \\
 \frac{\partial U}{\partial t} + v \nabla U &= k_{21} \nabla^2 \theta + k_{22} \nabla^2 U + k_{23} \nabla^2 p, \\
 \frac{\partial p}{\partial t} + v \nabla p &= k_{31} \nabla^2 \theta + k_{32} \nabla^2 U + k_{33} \nabla^2 p,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где E и H – векторы напряженностей электрического и магнитного полей; $D = \varepsilon E$ – вектор электрической индукции; $B = \mu H$ – вектор магнитной индукции; ε , μ – абсолютные диэлектрическая и магнитная проницаемости обрабатываемого объекта; $j = \sigma E$ – плотность тока проводимости; σ – удельная проводимость обрабатываемого объекта; $\theta = T - T_0$ – температурный напор в обрабатываемом объекте; U – влагосодержание в обрабатываемом объекте; p – давление водяных паров в обрабатываемом объекте; v – скорость транспортировки обрабатываемого объекта; ρ – плотность обрабатываемого объекта; k_{11} , k_{12} , k_{33} – тепломассообменные параметры с соответствующими граничными и начальными условиями.

Решение задачи (1) позволяет решить проблему синтеза оптимальных рабочих камер и математического моделирования технологических процессов нагрева и сушки в электромагнитном поле СВЧ с учетом изменения электро- и теплофизических параметров объекта в процессе теплообработки [5]. Практика применения математических методов при проектировании установок показала, что результаты расчета рабочих камер и математического моделирования технологических процессов в большей степени зависят от того, учитывается или нет изменение электро- и теплофизических параметров обрабатываемого объекта в процессе обработки. В измерении ε' и $\operatorname{tg} \delta$, кроме точности, важно выявить характер зависимости этих параметров от температуры и влажности. К сожалению, пока не налажены исследования теплофизических параметров обрабатываемых объектов и их измерения в зависимости от температуры, влажности и давления, тогда как влияние этих параметров на результаты синтеза рабочих камер и математического моделирования ничуть не меньше, чем электрофизических параметров.

Следует отметить, что применение термодинамического метода, который дает возможность оценить конечные результаты процесса, необходимо сочетать с использованием молекулярно-кинетического метода, который дает возможность вскрыть физический механизм процесса и его закономерности, что, как было сказано, является основой математического моделирования процесса.

Нельзя также забывать, что понятие математического моделирования неадекватно математическому описанию процесса, которое является только одним из этапов математического моделирования. Как известно, математическое моделирование любого процесса и, в частности, процесса электротехнологии, включает следующие этапы: формулировка физической модели процесса с учетом взаимодействия внешних и внутренних полей, математическое описание, перевод математического описания на алгоритм ЭВМ, решение целевой задачи в какой-либо среде ЭВМ и проверка адекватности полученного решения физической модели процесса. Внешние поля различной физической природы (в частности, электромагнит-

ные поля, когда появляются новые движущие силы массопереноса), вызывают развитие внутренних полей в объектах сушки, которые характеризуются различными градиентами (температуры, влагосодержания, давления, напряженности поля) и представляются векторными; анизотропные тела характеризуются тензорными полями. Указанные градиенты являются движущими силами внутреннего массопереноса.

Применение методов математического моделирования, в частности, для изучения процессов сушки различных объектов в электротехнологических установках позволяет не только быстро и эффективно выбрать тип и параметры СВЧ источника энергии установки СВЧ диэлектрического нагрева, но и рассматривать установку как единую многопараметровую систему с разными компоновками источника энергии и технологического блока, разными элементными базами и т.п. Это позволяет правильно выбрать критерии технико-экономической оптимизации установок СВЧ диэлектрического нагрева и дать полную оценку технико-экономической эффективности сушильных установок СВЧ диэлектрического нагрева.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гинзбург А.С. Расчет и проектирование сушильных установок пищевой промышленности / А.С. Гинзбург. М.: Агропромиздат, 1985. 336 с.
2. Толстов В.А. Эффективность электротехнологических установок / В.А. Толстов, Ю.С. Архангельский. Саратов: СГТУ, 2000. 146 с.
3. Андриященко А.И. Основы технической термодинамики реальных процессов: учеб. пособие / А.И. Андриященко. М.: Высш. шк., 1975. 264 с.
4. Архангельский Ю.С. СВЧ электротермия / Ю.С. Архангельский. Саратов: СГТУ, 1998. 408 с.
5. Архангельский Ю.С. Проблемы проектирования электротехнологических установок / Ю.С. Архангельский, Е.В. Колесников // Электро- и теплотехнологические процессы и установки – 2: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2005. С. 99-103.

Дунаева Татьяна Юрьевна –
ассистент кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы»
Саратовского государственного технического университета

УДК 621.365.5

Е.В. Фоминых

СВЧ ПАСТЕРИЗАТОР МОЛОКА

Приведено обоснование выбора магнетронов СВЧ пастеризатора молока. Предложено соотношение для сопоставления вариантов по чистому дисконтированному доходу.

E.V. Fominyh

MICROWAVE MILK PASTEURIZER

The substantiation of microwave milk pasteurizer magnetron choice is given in this article. The parity for comparison of pure discount profit variants is offered here as well.

В электротехнологическом пастеризаторе могут быть использованы переменный ток, ВЧ или СВЧ электромагнитное поле, инфракрасное излучение. При электроконтактном методе пастеризации на электродах с увеличением температуры молока постепенно образуется осадок денатурированного белка, что существенно ухудшает работу пастеризатора. Такого осадка нет при использовании для пастеризации энергии электромагнитного поля. Будем рассматривать лишь СВЧ нагрев, так как габариты обрабатываемого в электромагнитном поле потока молока с учетом надоев соизмеримы с длиной волны именно дециметрового диапазона.

Мощность СВЧ генератора должна регулироваться в зависимости от требуемой производительности пастеризатора, которая, в свою очередь, зависит от числа дойных коров и их продуктивности

$$P = \frac{c\Theta_n}{3600}(2,5n \div 6n) , \quad (1)$$

где P – мощность СВЧ пастеризатора, Вт; c – удельная теплоемкость молока, $c=3870$ Дж/кг·град; $G=2,5n \div 6n$ – производительность пастеризатора, кг/ч (n – наименьший удой, $6n$ – наибольший удой, если n – число дойных коров); Θ_n – температурный напор пастеризатора ($\Theta_n=70^\circ\text{C}$).

В табл. 1 показана зависимость P от производительности G .

Таблица 1

Зависимость мощности СВЧ блока от производительности пастеризатора

n , голов	1	2	3	4	5	6	10	20	30	40	50	75	100
G_{\min} , кг/ч	2,5	5	7,5	10	12,5	15	25	50	75	100	125	187,5	250
G_{\max} , кг/ч	6	12	18	24	30	36	60	120	180	240	300	450	600
P_{\min} , Вт	188	378	565	753	940	1130	1883	3763	5645	7525	9408	14110	18813
P_{\max} , Вт	452	903	1355	1806	2258	2709	4515	9030	13545	18060	22575	33863	45150

В табл. 2 приведены варианты компоновки СВЧ блока пастеризатора (рабочие камеры включены последовательно по потоку молока).

Все упомянутые в табл. 2 СВЧ генераторы работают на частоте 2450 МГц, что позволяет получить требуемую равномерность термообработки молока [1].

Таблица 2

Варианты компоновки СВЧ блока пастеризатора

Вариант	Мощность магнетрона, Вт	Число СВЧ генераторов, шт.	Мощность СВЧ блока, кВт	Тип магнетрона
1	600	5	17	M93
2	1000	3	10	M146
3	1500	2	7	M137
4	3500	1	3	M141
5	5000	1	2	M141-1

Сравнить эффективности, а соответственно, и доходности различных вариантов пастеризаторов можно с помощью соотношения

$$\Delta \mathcal{E}_{\Sigma} = \mathcal{E}_{\Sigma 2 \max} - \mathcal{E}_{\Sigma 1 \max} \geq 0 ,$$

где $\Delta \mathcal{E}_{\Sigma}$ – интегральный за срок службы установки эффект (чистый дисконтированный доход); $\mathcal{E}_{\Sigma 1, 2 \max}$ – максимальный интегральный за срок службы установки доход [2], т.е.

$$P(C_2 - C_1)(1 - \gamma_n)(1 - \gamma_y) - [\mathcal{E}_{\Sigma 2 \text{ var}}|_{\min} - |\mathcal{E}_{\Sigma 1 \text{ var}}|_{\min}] \geq 0 , \quad (2)$$

где P – годовой объем производства; $C_{1,2}$ – цена единицы продукции; γ_n – функция, учитывающая систему налогов; γ_y – функция, учитывающая условия участия учредителей предприятия в распределении прибыли; $\mathcal{E}_{\Sigma 1, 2 \text{ var}}$ – переменные части $\Delta \mathcal{E}_{\Sigma}$.

При небольшом количестве коров, то есть при небольшой производительности пастеризатора, он может быть выполнен с комбинированным энергоподводом, когда вначале молоко нагревается с помощью электронагревателя НЧ, а затем доводится до температуры пастеризации с помощью СВЧ блока [3].

Сопоставление с помощью (2) доходности СВЧ пастеризатора с одним СВЧ генератором в 3 кВт и пастеризатора с комбинированным энергоподводом, у которого в источнике СВЧ энергии использованы генераторы по 600 Вт и 1000 Вт, показало, что наибольшее преимущество имеет СВЧ пастеризатор. В то же время экономическая эффективность пастеризатора с комбинированным энергоподводом, особенно если в нем использованы три генератора по 600 Вт, выше, так как авария единственного в пастеризаторе СВЧ генератора в 3 кВт потребует замены дорогостоящего магнетрона, тогда как при комбинированном энергоподводе одновременный выход из строя всех трех СВЧ генераторов по 600 Вт маловероятен, к тому же подобные генераторы – наиболее распространенный тип магнетрона.

Что касается ИК пастеризатора, то его особенности рассмотрены в [4].

ЛИТЕРАТУРА

1. Архангельский Ю.С. Элементная база СВЧ электротермического оборудования / Ю.С. Архангельский, В.А. Воронкин. Саратов: СГТУ, 2003. 212 с.
2. Фоминых Е.В. Расчет режима пастеризации проточной среды в СВЧ электротехнологической установке с предварительным подогревом / Е.В. Фоминых // Системы и функциональные устройства низких и сверхвысоких частот: сб. науч. ст. Саратов: СГТУ, 2005. С. 88-89.
3. Фоминых Е.В. Подход к оптимальному проектированию электротехнологической установки с комбинированным энергоподводом / Е.В. Фоминых // Автоматизированная подготовка машиностроительного производства, технология и надежность машин, приборов и оборудования: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Вологда, 2005. Т 1. С. 59-62.
4. Фоминых Е.В. Пастеризаторы молока, использующие инфракрасное излучение / Е.В. Фоминых, Ю.С. Архангельский // Электро- и теплотехнологические процессы и установки – 2: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2005. С. 37-40.

Фоминых Елена Вячеславовна –

ассистент кафедры

«Автоматизированные электротехнологические установки и системы»

Саратовского государственного технического университета

А.А. Скворцов

СВЧ УСТРОЙСТВО НА СВЯЗАННЫХ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ И ШЕСТИГРАННОМ ВОЛНОВОДАХ ДЛЯ ТЕРМООБРАБОТКИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Рассматривается СВЧ устройство на связанных посредством шлейфовых разветвлений прямоугольных и шестигранном волноводах, позволяющее использовать менее мощные СВЧ источники при более эффективном воздействии на термообрабатываемый материал.

А.А. Skvortsov

A MICROWAVE DEVICE ON COUPLED RECTANGULAR AND HEXAGONAL WAVEGUIDES FOR THERMAL PROCESSING OF DIELECTRIC MATERIALS

A microwave device on coupled by means of stub bifurcations rectangular and hexagonal waveguides is considered in this article. Proposed design allows increasing efficiency of thermal processing using less powerful microwave sources.

В последнее время бурное развитие технологий СВЧ нагрева, требующих повышения интенсивности и равномерности воздействия электромагнитного поля на обрабатываемый материал, заставило обратиться к суммированию мощностей нескольких СВЧ генераторов [1-5].

Решение этих двух задач одновременно может быть достигнуто в СВЧ устройстве на связанных прямоугольных и шестигранном волноводах, во вторичном канале которого возбуждаются три волны доминантного типа, отличающиеся плоскостями поляризации (рис. 1). Возбуждение таких волн осуществляется с помощью совокупности шлейфовых разветвлений (изображены схематично), расположенных на соответствующих гранях шестигранного волновода (ШГВ) и связывающих его с прямоугольными волноводами (ПрВ), к которым подключаются СВЧ генераторы, различающиеся по частоте и мощности [3]. Обрабатываемый материал предпочтительнее располагать в центральной части ШГВ, где напряженность электромагнитного поля максимальна.

При выборе формы поперечного сечения волноводов связи (шлейфов) необходимо учитывать, что их геометрические размеры ограничены размерами стенок связываемых волноводов, минимальным расстоянием между центрами соседних шлейфов и толщиной разделяющей их стенки. Кроме того, для получения малого перепада характеристики переходного ослабления критическая длина основной волны используемых в качестве шлейфов волноводов λ_{c1u} должна быть больше критических длин основных волн связываемых волноводов λ_{c11} (первичные каналы выполнены на идентичных ПрВ) и λ_{c12} [5, 6]:

$$\begin{cases} \lambda_{c1u} > \lambda_{c11}; \\ \lambda_{c1u} > \lambda_{c12}. \end{cases} \quad (1)$$

Применение в качестве шлейфов ПрВ с размерами широких стенок $a_u = a_1 = a_2$ не позволяет получить удовлетворительные диапазонные характеристики, поскольку критическая длина основной волны образующих шлейфы волноводов меньше критической длины основной волны вторичного волновода (полого равностороннего ШГВ), определяемой по формуле [5, 7]

$$\lambda_{c12} = \frac{4\pi a_2}{\chi_{11}} \frac{\sqrt{3}}{2 + \sqrt{3}}, \quad (2)$$

где $\chi_{11}=1,841$ – 1-й корень производной функции Бесселя первого рода 1-го порядка.

Наиболее полно предъявляемым к шлейфам требованиям отвечают волноводы связи сложных поперечных сечений, которые по сравнению со связываемыми волноводами имеют не только большую критическую длину волны, но и больший диапазон работы на доминантной волне [5, 6].

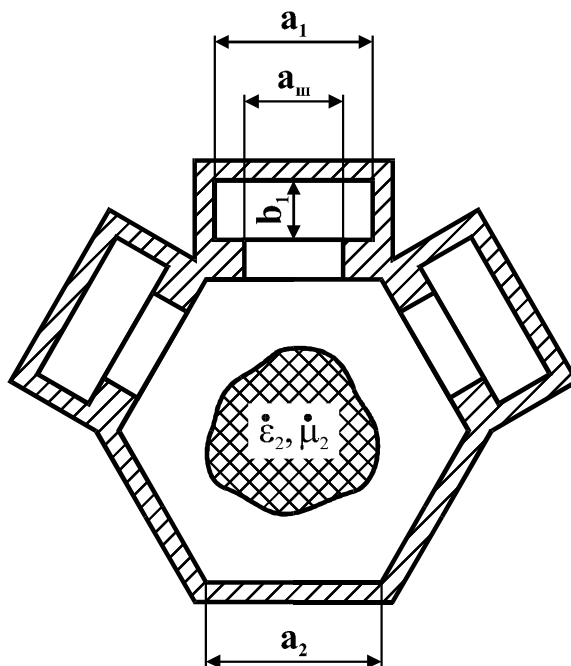


Рис. 1. Поперечное сечение СВЧ устройства на связанных ПрВ и ШГВ для термообработки диэлектрических материалов

Коэффициент передачи шлейфового разветвления СВЧ устройства, в котором первичные каналы выполнены на ПрВ, а вторичный – на ШГВ, со связью через волновод сложного поперечного сечения определяется выражением [5, 6]

$$|K_{ш}| = \frac{d_{ш} T_{ш} \lambda_{\epsilon_{11}} Z_{0ш}}{2\sqrt{k^*} (a_1 b_1 \Phi_2 \lambda_{\epsilon_{11}} \lambda_{\epsilon_{22}} Z_{01} Z_{02})^{1/2}} \left[\left(\cos\left(\frac{\pi h_1}{a_1}\right) \sin \gamma_1 \right)^2 + \frac{\lambda_{\epsilon_{11}}}{2a_1} \sin\left(\frac{\pi h_1}{a_1}\right) \cos \gamma_1 \right]^2 \times \quad (3)$$

$$\times \left[\left(\cos(\chi_{c12} h_2) \sin \gamma_2 \right)^2 + \left(\frac{\lambda_{\epsilon_{22}}}{\lambda_{c12}} \sin(\chi_{c12} h_2) \cos \gamma_2 \right)^2 \right]^{1/2},$$

где $\sqrt{k^*} \approx 1$; a_1, b_1 – размеры первичного волновода; $d_{ш}$ – зазоры между выступами волновода связи; $T_{ш}$ и Φ_2 – параметры, зависящие от формы поперечного сечения волновода связи и вторичного волновода; h_1, h_2 – смещение центра волновода связи относительно средней линии соответственно первичного и вторичного волноводов; γ_1, γ_2 – углы поворота волновода связи относительно средних линий тех же волноводов; $\lambda_{\epsilon_{11}}, \lambda_{\epsilon_{11}}$ и $\lambda_{\epsilon_{22}}$ – длины основной волны в шлейфе, основном и вспомогательном волноводах; $\chi_{c12} = 2\pi/\lambda_{c12}$; λ_{c12} – критическая длина основной волны вспомогательного волновода; $Z_{01} = \sqrt{\mu_0 \mu_1 / \epsilon_0 \epsilon_1}$, $Z_{02} = \sqrt{\mu_0 \mu_2 / \epsilon_0 \epsilon_2}$ и $Z_{0ш} = \sqrt{\mu_0 \mu_{ш} / \epsilon_0 \epsilon_{ш}}$ – волновые сопротивления материалов, заполняющих основной, вспомо-

гательный волноводы и шлейф; $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_{ш}, \mu_1, \mu_2, \mu_{ш}$ – относительные диэлектрические и магнитные проницаемости материалов, заполняющих основной, вспомогательный волноводы и шлейф; ε_0 и μ_0 – электрическая и магнитная постоянные.

Уменьшение неравномерности переходного ослабления СВЧ устройства на связанных ПрВ и ШГВ в диапазоне длин волн может быть достигнуто применением шлейфов на Н-волноводах (НВ) (рис. 2, а), параметр $T_{ш}$ которых рассчитывается по формуле [6]

$$T_{ш} = t_{ш} + \frac{\sin(\chi_{с1ш} t_{ш})}{\chi_{с1ш}} + \left[a_{ш} - t_{ш} - \frac{\sin(\chi_{с1ш} (a_{ш} - t_{ш}))}{\chi_{с1ш}} \right] \times \frac{[b_{ш} - (b_{ш} - d_{ш}) \cos(\chi_{с1ш} t_{ш}/2)]^2}{d_{ш} b_{ш} \sin^2(\chi_{с1ш} (a_{ш} - t_{ш})/2)}, \quad (4)$$

где $\chi_{с1ш} = 2\pi/\lambda_{с1ш}$; $\lambda_{с1ш}$ – критическая длина основной волны волновода связи.

Для дальнейшего выравнивания диапазонной характеристики переходного ослабления СВЧ устройства на связанных ПрВ и ШГВ, обусловленной изменением диэлектрической проницаемости в процессе термообработки, можно использовать шлейфы на основе прямоугольных волноводов с двумя Т-ребрами (ПВДТР) (рис. 2, б), параметр $T_{ш}$ которых определяется выражением [6]

$$T_{ш} = t_{ш} + \frac{\sin(\chi_{с1ш} t_{ш})}{\chi_{с1ш}} + \left[a_{ш} - t_{ш} - \frac{\sin(\chi_{с1ш} (a_{ш} - t_{ш}))}{\chi_{с1ш}} \right] \times \frac{[b_{ш} - g'_{ш} + (b_{ш} - d_{ш})(1/2 - \cos(\chi_{с1ш} t_{ш}/2))]^2}{d_{ш} b_{ш} \sin^2(\chi_{с1ш} (a_{ш} - t_{ш})/2)} + \frac{b_{ш}}{d_{ш}} \left[t_{ш} - g_{ш} - \frac{\sin(\chi_{с1ш} (a_{ш} - t_{ш}))}{\chi_{с1ш}} \right] \frac{\cos^2(\chi_{с1ш} g_{ш}/2)}{\sin^2(\chi_{с1ш} (t_{ш} - g_{ш})/2)}. \quad (5)$$

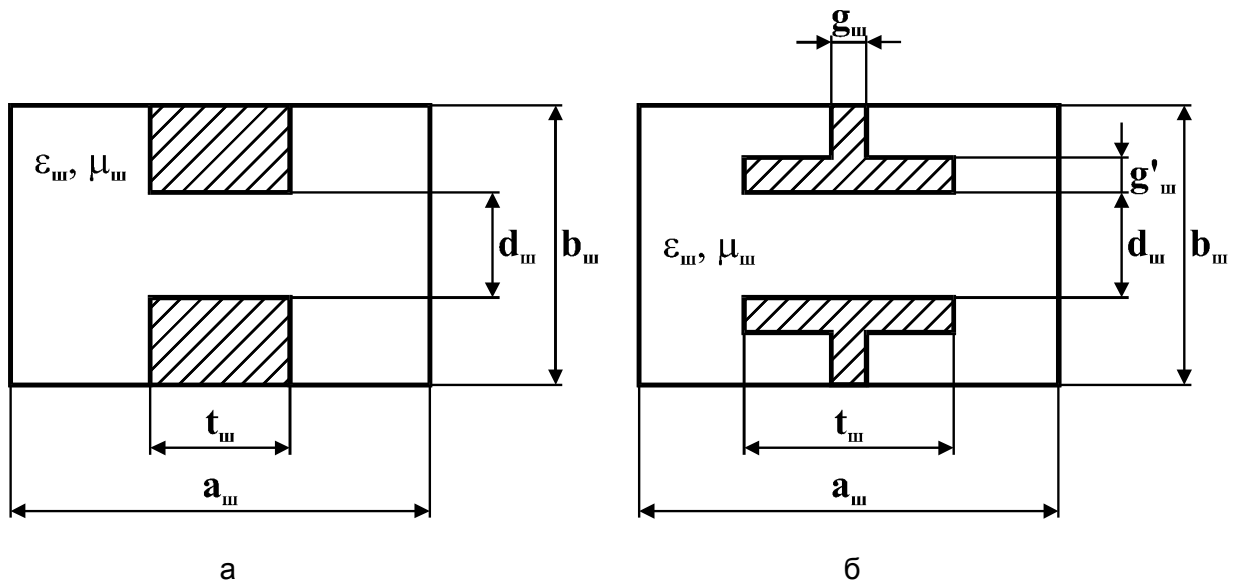


Рис. 2. Поперечные сечения шлейфов на НВ (а) и ПВДТР (б)

Приближенно-аналитический расчет критической длины основной волны шлейфов ($\lambda_{с1ш}$) на основе НВ и ПВДТР не вызывает особых трудностей и подробно изложен в работе [5].

Влияние диэлектрического материала во вспомогательном волноводе на коэффициент передачи одиночного шлейфового разветвления СВЧ-устройства можно в первом приближении оценить по формуле [5, 8]

$$|\dot{K}_{ш\kappa}| = |\dot{K}_{ш}| (\lambda_{\varepsilon 2\varepsilon} / \lambda_{\varepsilon 2})^{1/2} (\cos \varphi)^{-1}, \quad (6)$$

где $\lambda_{e1\varepsilon}$ – длина основной волны во вспомогательном волноводе при наличии в нем материала с потерями; $\varphi = \arctg(\Gamma''_{c12}/\Gamma'_{c12})$; Γ'_{c12} и Γ''_{c12} – действительная и мнимая части комплексной постоянной распространения основной волны во вспомогательном волноводе.

Для уменьшения зависимости переходного ослабления СВЧ устройства от диэлектрической проницаемости обрабатываемого материала, расположенного в его вторичном волноводе, необходимо, чтобы волноводы связи не перекрывались диэлектриком [5, 9].

Равномерное тепловыделение в продольном направлении обрабатываемого материала (считая затухание волн достаточно интенсивным) может быть достигнуто, если коэффициенты передачи шлейфовых разветвлений связаны между собой соотношением [5, 10]

$$K_n = K_{n-1}[1 - K_{n-1}]^{-1}. \quad (7)$$

Как показывает анализ выражения (3), необходимый закон распределения энергии возбуждаемой волны по длине обрабатываемого материала может быть достигнут несколькими способами: за счет выбора размеров волноводов связи, за счет расположения шлейфов на широких стенках основных волноводов, за счет изменения высоты основных волноводов по заранее заданному закону [5, 10]. Возможно также сочетание перечисленных выше способов. С технологической точки зрения предпочтение следует отдать последнему способу, когда размеры шлейфов остаются постоянными.

Из сказанного выше следует, что рассмотренное СВЧ устройство на связанных посредством шлейфовых разветвлений прямоугольных и шестигранном волноводах позволяет использовать менее мощные СВЧ источники при более эффективном воздействии на термообрабатываемый материал.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кожевников В.Ю. Спекание пьезокерамических материалов в сверхвысокочастотной камере на шлейфовых волноводных разветвлениях / В.Ю. Кожевников // Технологические СВЧ установки, функциональные электродинамические устройства: межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ, 1998. С. 66-70.
2. Ильин В.С. Распространение электромагнитных волн и транспорт энергии в сложных волноведущих структурах: дис. ... д-ра физ.-мат. наук / В.С. Ильин. Саратов, 1999.
3. Сосунов В.А. Камера бегущей волны на шестигранном волноводе / В.А. Сосунов, В.И. Беляев // Электротехнология на рубеже веков: материалы Поволжской науч.-техн. конф. Саратов, 24-26 апр. 2001 г. Саратов, 2001. С. 33.
4. Скворцов А.А. СВЧ-устройство на квадратном волноводе / А. А. Скворцов // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП – 2002): материалы Междунар. науч.-техн. конф. Саратов, 18-20 сент. 2002 г. Саратов, 2002. С. 203-205.
5. Скворцов А.А. СВЧ-устройства на связанных волноводах для термообработки диэлектрических материалов: дис. ... канд. техн. наук / А.А. Скворцов. Саратов, 2003. 167 с.
6. Сосунов В.А. Шлейфовые волноводные разветвления и устройства на их основе / В.А. Сосунов. Саратов: СГТУ, 1995. 104 с.
7. Сосунов В.А. Расчет критической длины волны доминантного типа колебаний шестигранного волновода / В.А. Сосунов, А.А. Скворцов // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП – 2002): материалы Междунар. науч.-техн. конф. Саратов, 18-20 сент. 2002 г. Саратов, 2002. С. 201-202.
8. Sosunov V.A. Waveguide cell for thermal processing of lossy material / V.A. Sosunov, A.A. Skvortsov // Proceedings of the 2nd International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT – 2000). September 14-16, 2000. Beijing, China. Beijing, 2000. P. 565-567.
9. Сосунов В.А. Ответитель с изменяющейся критической длиной волны вторичного волновода / В.А. Сосунов, А.А. Скворцов // Функциональные электродинамические системы

и устройства, линии передачи СВЧ: межвуз. науч. сб. / Саратов. гос. техн. ун-т. Саратов, 1999. С. 45-48.

10. Сосунов В.А. Использование волноводного делителя мощности для термообработки диэлектрических материалов с потерями / В.А. Сосунов, А.А. Скворцов // Электродинамические устройства и линии передачи СВЧ: межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ, 2000. С. 41-43.

Скворцов Алексей Анатольевич –

кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиотехника»
Саратовского государственного технического университета

УДК 621.365.2

Л.П. Горева, А.О. Кривова

ИНФРАЗВУКОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ПЕРСОНАЛ, ОБСЛУЖИВАЮЩИЙ ДУГОВЫЕ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫЕ ПЕЧИ

Сделана попытка определения уровня инфразвуковых колебаний в районе рабочей площадки дуговой сталеплавильной электропечи (ДСП). Решение задачи основано на математическом моделировании электродинамических взаимодействий в электромеханической системе ДСП. Математическая модель основана на методе конечных элементов. Результаты моделирования показали, что инфразвуковые воздействия на персонал, обслуживающий ДСП, достигают максимально допустимых значений.

L.P. Goreva, A.O. Krivova

INFRASONIC INFLUENCE ON THE PERSONNEL SERVING ARC STEEL FURNACE

Attempt of definition of an infrasonic fluctuations level on the working platform of the arc steel furnace is made. The decision of a problem is based on mathematical modeling of electrodynamic interactions in electromechanical system of furnace. The model is based on the finite-element method. Results of modelling have shown, that infrasonic influences on the personnel of the furnace can reach admissible values.

Согласно ранее проведенным на кафедре «Автоматизированные электротехнологические установки» (АЭТУ) НГТУ исследованиям, дуговая сталеплавильная электропечь (ДСП) при своей работе способна генерировать электродинамические автоколебания электрического режима и механической системы перемещения электродов. Амплитуда колебаний зависит от комплекса параметров: электрического режима, сопротивления вторичного токоподвода, жесткости механической системы перемещения электродов. Частота автоколебаний близка к ведущей собственной частоте рассматриваемой механической системы. Ранее это явление

рассматривалось с точки зрения отрицательного влияния на работу печи и питающую сеть. В настоящей работе это явление исследовано с точки зрения генерации инфразвуковых колебаний давления в столбе электрической дуги и влияния их на персонал, обслуживающий печь, тем более что индивидуальные средства защиты обслуживающего печь персонала не спасают от действия инфразвука, тогда как именно такие воздействия крайне опасны для человеческого организма.

Решение задачи основано на моделировании электродинамических взаимодействий в электромеханической системе ДСП. На рис. 1 представлена обобщенная схема ДСП как электромеханической системы. Согласно этой схеме, трансформатор является независимым источником питания, обеспечивающим необходимые электрические режимы работы ДСП. Параметры электрической дуги при заданных напряжениях и сопротивлениях вторичных токоподводов фаз определяют токи в дугах I_d . Между элементами вторичного токоподвода действуют электродинамические силы, которые определяются величинами фазных токов. Так как элементы вторичного токоподвода жёстко установлены на электрододержателе, являющемся частью механической системы ДСП, электродинамические силы приводят к деформации всей механической системы, а следовательно, к изменению координат конца электрода $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$, а это приводит к изменению длины дуги Δl_d . Таким образом, в электромеханической системе ДСП присутствует обратная связь, соединяющая выход системы с её входом, которая состоит в том, что перемещение нижнего конца электрода оказывает влияние на силу тока дуги и на электродинамические усилия. Такая система при определенных условиях способна генерировать колебания, т.е. является автоколебательной, причем изменения длины дуги имеют горизонтальную составляющую, а значит, соответствующие изменения электрического режима не могут обрабатываться системой автоматического регулирования установки.

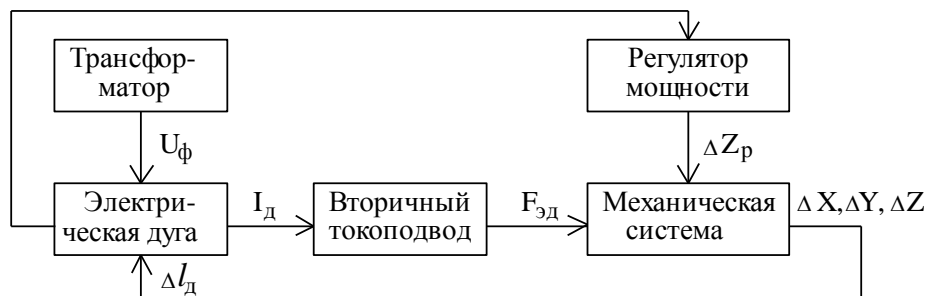


Рис. 1. Обобщенная схема ДСП как электромеханической системы

Разработанная на кафедре АЭТУ математическая модель такой системы [1] основана на методе конечных элементов (МКЭ), позволяющем свести систему дифференциальных уравнений статического напряженно-деформированного состояния механической системы с бесконечным числом степеней свободы к системе линейных уравнений, отражающих напряженно-деформированное состояние отдельных точек непрерывной конструкции, а значит системы с конечным числом степеней свободы. Для описания динамического поведения такой механической системы использовано уравнение

$$M \cdot d^2 X / dt^2 + D \cdot dX / dt + K \cdot X = F(t, X), \quad (1)$$

где M – матрица инерционных свойств; D – матрица коэффициентов демпфирования; K – матрица жесткости механической системы; X – вектор перемещений узлов расчетной схемы по степеням свободы; $F(t, X)$ – вектор электродинамических сил.

В данной работе при расчете трехфазного несимметричного электропечного контура с дугами токи в фазах определялись без учета нелинейности дуги и переходных процессов в це-

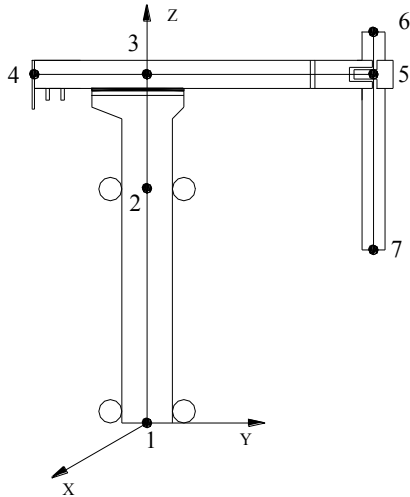


Рис. 2. Расчетная схема системы перемещения электрода ДСП-100ИБ с токоведущим рукавом

пи тока [2]. При этом использована простейшая модель дуги, в которой напряжение на дуге не зависит от тока и является линейной функцией от ее длины.

Определяющим параметром такой модели является градиент потенциала дугового промежутка β . Исследованиям этого параметра посвящены многие работы. Для периода расплавления разброс максимальных значений β , по разным источникам, составляет от 9 до 12 кВ/м.

Исследование проведено для системы перемещения электрода реконструированной электропечи ДСП-100ИБ, оснащенной токоведущими рукавами фирмы «Фукс» (рис. 2).

Если в уравнении (1) приравнять к нулю правую часть, то получаем математическое описание свободных колебаний механической системы.

Его решение позволяет получать ряд значений собственных частот системы и соответствующих им векторов собственных форм. В результате расчетов

мы получили значения первых трех собственных частот системы перемещения электродов:

	Для крайней фазы	Для средней фазы
1-я собственная частота	$f_{c1} = 3,02$ Гц,	$f_{c1} = 3,58$ Гц
2-я собственная частота	$f_{c2} = 3,98$ Гц,	$f_{c2} = 4,69$ Гц,
3-я собственная частота	$f_{c3} = 4,91$ Гц,	$f_{c3} = 5,40$ Гц

Таким образом, полученные собственные частоты находятся в инфразвуковом диапазоне ($f < 16$ Гц).

Электродинамические колебания при моделировании характеризуются глубиной модуляции тока ΔI . В ходе численных экспериментов была получена зависимость глубины модуляции тока от электрического режима при градиенте потенциала $\beta = 10$ кВ/м.

Для определения уровня интенсивности инфразвука использованы формулы для нахождения максимального давления сжатия в столбе электрической дуги (2) [3], интенсивности и уровня звука (3) [4]:

$$f_{\max} = \mu_0 \cdot \frac{\Delta^2}{4 \pi^2 R^2}, \quad (2)$$

где μ_0 – магнитная проницаемость, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; R – радиус столба дуги при токе дуги 50 кА и плотности тока в катодном пятне 500 А/см^2 , $R \approx 6$ см.

$$I_{36} = \frac{p^2}{\rho \cdot c}, \quad L = 10 \cdot \lg \left(\frac{I_{36}}{I_{360}} \right), \quad (3)$$

где $p = f_{\max}$ – эффективное значение звукового давления, Па; $c = 344$ м/с – скорость звука в воздухе; ρ – плотность воздуха, кг/м^3 ($\rho = 0,293 \text{ кг/м}^3$ при $T = 1200^\circ\text{C}$); I_{360} – пороговое значение интенсивности звука, которое стандартизировано, Вт/м^2 ($I_{360} = 10^{-12} \text{ Вт/м}^2$).

Полученная зависимость уровня звука от электрического режима приведена на рис. 3. Из рис. 3 видно, что амплитуды инфразвуковых воздействий в рабочем пространстве печи достигают 150 дБ. Кожух печи выполняет звукоизоляционную функцию, снижая уровень инфра- и звуковых воздействий на 30% [4]. Таким образом, на обслуживающий печь персонал действует инфразвук интенсивностью 100-110 дБ.

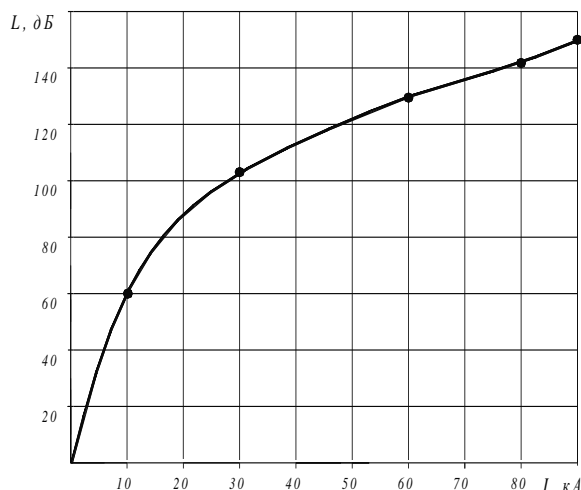


Рис. 3. Зависимость уровня инфразвука от электрического режима

Полученные результаты говорят о необходимости защиты персонала от инфразвуковых воздействий, так как индивидуальные средства защиты обслуживающего печь персонала не спасают от действия инфразвука. Более эффективными являются решения, направленные не на снижение уровня электромеханических колебаний. Этого можно достичь путем регулирования тока в реальном времени [5]. Основная идея состоит в том, что для управления электрическим режимом ДСП применяются два независимых, но взаимосвязанных контура автоматического управления: управление реактивным сопротивлением, которое обычно подключается последовательно к электропечному трансформатору на первичной стороне, для того чтобы при изменении длины дуги ток дуги оставался постоянным; управление активным сопротивлением дуг путем вертикального перемещения электродов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чередниченко В.С. Электродинамика трехфазных систем дуговых сталеплавильных электропечей / В.С. Чередниченко, Л.П. Елманова // Электротехнологические процессы и установки: сб. науч. тр. Новосибирск: ИТ СО РАН, 1995. С. 3-19.
2. Марков Н.А. Электрические цепи и режимы дуговых электропечных установок / Н.А. Марков. М.: Энергия, 1975. 204 с.
3. Электрические промышленные печи. Дуговые печи и установки специального нагрева: учебник для вузов / А.Д. Свенчанский, И.Т. Жердев, А.М. Кручинин и др.; под ред. А.Д. Свенчанского. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоиздат, 1981. 296 с.
4. Защита от шума и вибраций в черной металлургии / под ред. В.И. Заборова. М.: Металлургия, 1976. 248 с.
5. Бикеев Р.А. Динамические режимы в электромеханических системах дуговых сталеплавильных печей и их воздействие на вводимую активную мощность: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Р.А. Бикеев. Новосибирск, 2004. 19 с.

Горева Людмила Павловна –

кандидат технических наук,
доцент кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки»
Новосибирского государственного технического университета

Кривова Анастасия Олеговна –

студентка Новосибирского государственного технического университета

**ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ,
ПРЕДСТАВЛЯЕМЫХ В РЕДАКЦИЮ ЖУРНАЛА
«ВЕСТНИК СГТУ»**

1. Статья должна быть тщательно отредактирована и представлена в одном экземпляре, распечатанном через 1 интервал на белой бумаге форматом А4, поля: верхнее, нижнее, левое, правое – 2,0 см; ориентация книжная; шрифт Times New Roman, высота 12. Одновременно текст статьи представляется на дискете (1,44 Мбайт) в формате текстового редактора «MS Word 97» или по электронной почте vestnik@sstu.ru.

2. Статья должна обосновывать актуальность темы, отражать теоретические и (или) экспериментальные результаты и содержать четкие выводы.

3. В начале статьи в левом верхнем углу ставится индекс УДК. Далее на первой странице данные идут в такой последовательности:

- инициалы и фамилии авторов;
- полное название статьи (шрифт жирный, буквы прописные);
- краткая (5-7 строк) аннотация (курсив).

Далее авторы, название статьи и аннотация повторяются на английском языке.

Затем идет текст самой статьи и литература.

Статья завершается сведениями об авторах: ф.и.о. (полностью), ученая степень, ученое звание, место работы (полностью), должность, контактные телефоны.

4. Объем статьи не должен превышать 10 страниц текста, содержать не более 5 рисунков или фотографий; объем обзора – 25 страниц, 10 рисунков; объем краткого сообщения – не более 3 страниц, 2 рисунков.

Иллюстрации (рисунки, графики) должны быть расположены в тексте статьи и выполнены в одном из графических редакторов (формат tif, psc, jpg, pcd, msp, dib, cdr, cgm, eps, wmf). Допускается также создание и представление графиков при помощи табличных процессоров «Excel», «Quattro Pro», «MS Graph». Каждый рисунок должен иметь номер и подпись. Рисунки и фотографии должны иметь контрастное изображение.

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

5. Формулы и буквенные обозначения величин должны быть набраны в редакторе формул MS Word Microsoft Equation. Каждая формула должна иметь номер.

6. 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.

7. Список литературы должен быть оформлен по ГОСТ 7.1-2003 и включать: 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.

8. К статье прилагается экспертное заключение.

9. Рукописи статей представляются в редакцию с рецензией ведущего ученого в данной области, как правило, доктора наук.

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

11. Статьи, не отвечающие перечисленным требованиям, к рассмотрению не принимаются, рукописи и дискеты авторам не возвращаются. Датой поступления рукописи считается день получения редакцией окончательного текста.