

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЕЧНОЙ ПЕТЛИ МОЩНЫХ ПЕЧЕЙ ГРАФИТАЦИИ

*Запропоновано методику визначення електричних параметрів пічного кола потужних печей графітації на основі тривимірної моделі електромагнітного перетворення енергії змінного струму в теплову. Розроблено рівняння регресії з високою точністю ідентифікації опорів пічного кола з базовими і модернізованими бічними пакетами шин.*

*Предложена методика определения электрических параметров печной петли мощных печей графитации на основе трехмерной модели электромагнитного преобразования энергии переменного тока в тепловую. Разработаны уравнения регрессии с высокой точностью идентификации сопротивлений печной петли с базовыми и модернизированными боковыми пакетами шин.*

Продукция графитового производства является весьма востребованной на внутреннем рынке Украины, рынках СНГ и дальнего зарубежья. На нынешнем этапе развития электродной промышленности должны обеспечиваться высокая технологичность, качество, энергоэффективность и, следовательно, наименьшая себестоимость по сравнению с зарубежными аналогами. Основной технологический процесс графитации является весьма энергоемким (до 3-6 МВт·ч на тонну продукции). Мощность печей графитации переменного тока составляет 8-10 МВт, а продолжительность их работы на кампанию графитации достигает 2-3 суток [1, 2]. Поэтому при модернизации электротехнических комплексов графитации основное внимание должно уделяться оптимальному энергоэффективному управлению этими энергоемкими объектами, обеспечивающему значительное снижение энергопотребления.

Сложность контроля электромагнитных и электротепловых процессов преобразования энергии переменного тока в тепловую в печной петле электротехнического комплекса графитации, состоящей из токоподводов и керна печи, боковых (БШП) и торцевых шинных пакетов (ТШП), обусловлена отсутствием возможности прямого измерения электроэнергетических и теплофизических параметров керна с заготовками электродов при температурах графитации до 3000 °С, а также взаимными электромагнитными связями между керном, токоподводами, БШП и ТШП [2].

При этих ограничениях задача идентификации модели печной петли, удовлетворяющая требованиям адекватности и высокой точности описания для всех этапов кампании графитации, алгоритмической эффективности и быстродействия реализации в режиме реального времени, синтеза оптимального энергосберегающего управления электротехническим комплексом графитации является актуальной как в научном, так и в производственном плане.

В работах [1, 2] предлагается идентифицировать электрические параметры графитации на основе схемных моделей и данных измерений со стороны ВН питающих и компенсирующих трансформаторов, что не удовлетворяет требованиям точности при управлении вводом мощности графитации, увеличивая расход электроэнергии на кампанию. Поэтому возникает настоятельная потребность дополнения известных экспериментальных исследований [3] комплексными ис-

следованиями на математических моделях в широкой области варьирования конструктивных параметров объекта управления и режимных параметров графитации при их оптимизации.

Цель работы – разработка высокоэффективных и высокоточных подходов для идентификации электрических характеристик печной петли на основе взаимосвязанных нелинейных электротепловых моделей для электромагнитного преобразования энергии при графитации заготовок электродов в печах переменного тока.

Для реализации сформулированной цели рассматривается пространственная модель электромагнитного преобразования электрической энергии переменного тока в тепловую энергию в печной петле как сопряженная система уравнений Максвелла для комплексных амплитуд векторного магнитного и электрического потенциалов в геометрических областях бокового шинного пакета, токоподводов, керна, теплоизоляции и окружающей среды [4]:

$$\begin{cases} -\nabla \left[ (j\omega\sigma_i - \omega^2 \epsilon_0 \epsilon_{r,i}) \cdot \mathbf{A}_i \right] + \\ + \nabla \left[ (\sigma_i + j\omega \epsilon_0 \epsilon_{r,i}) \nabla V_i - \mathbf{J}_i^e \right] = 0, \\ \left( j\omega\sigma_i - \omega^2 \epsilon_0 \epsilon_{r,i} \right) \mathbf{A}_i + \nabla \times \left( \mu_0^{-1} \mu_{r,i}^{-1} \nabla \times \mathbf{A}_i \right) + \\ + (\sigma_i + j\omega \epsilon_0 \epsilon_{r,i}) \nabla V_i = \mathbf{J}_i^e, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\omega$  – угловая частота, рад/с;  $\sigma$  – электрическая проводимость, См/м;  $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  – электрическая постоянная, Ф/м;  $\epsilon_r$  – диэлектрическая проницаемость;  $\mathbf{A}$  – векторный магнитный потенциал, Вб/м;  $V$  – комплексная амплитуда электрического потенциала, В;  $\mathbf{J}^e$  – комплексная плотность тока, А/м<sup>2</sup>;  $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$  – магнитная постоянная, Гн/м;  $\mu_r$  – магнитная проницаемость; индексы  $i = 1, 2, 3, 4, 5$  – соответствуют областям бокового шинного пакета, токоподводов, керна, теплоизоляции и окружающей среды.

Система уравнений конвективного теплообмена в приближении Буссинеска при линеаризации зависимости плотности охлаждающего воздуха от температуры  $\rho(T) = \rho_0(1 - \beta T)$  [5] имеет вид:

$$\begin{cases} (\mathbf{v}_i \cdot \nabla) \mathbf{v}_i = -\rho_{0,i}^{-1} \nabla p_i + \nu_i \Delta \mathbf{v}_i - \beta_i T_i \mathbf{g}, \\ \mathbf{v}_i \nabla T_i = \chi_i \Delta T_i, \\ \operatorname{div} \mathbf{v}_i = 0, \quad i = 5. \end{cases} \quad (2)$$

где  $\rho_0$  – плотность газа при температуре  $T_0$ , кг/м<sup>3</sup>;  $T$  – отклонение температуры от значения  $T_0$ , °С;  $\mathbf{v}$  – век-

тор скорости свободной конвекции воздуха, м/с;  $p$  – давление, Па;  $\chi = \lambda/c \cdot \rho$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;  $c$  – теплоемкость, Дж/(кг·°C);  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\beta$  – коэффициент объемного расширения газа, 1/°C;  $\nu$  – кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/с.

Для областей ядра, токоподводов и ошинок применяются уравнения теплопроводности

$$\lambda_i \Delta T_i = \mathbf{j}_i \cdot (\mathbf{j}_i)^* / \sigma_i(T_i), \quad i = 1, 2, 3, \quad (3)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м<sup>2</sup>·°C).

Система уравнений (1) замыкается условиями калибровки Кулона, граничными условиями магнитной и электрической изоляции, сопряжения сред с различными электрическими и магнитными свойствами [4].

Для уравнений конвективной теплопередачи (2) и теплопроводности (3) граничные условия определяются известными механизмами кондуктивного, конвективного и лучистого теплообмена [6].

При известной проводимости ядра печи графитации уравнение (3) в его области можно рассматривать инвариантно относительно системы уравнений (1). Как показывают исследования [7], модуль скорости при свободной конвекции охлаждающего воздуха определяется, прежде всего, ее проекцией на ось  $Oy$  и находится в пределах 0,1–0,3 м/с. Задавая значения скорости воздушного потока вдоль оси  $Oy$  можно исключить из рассмотрения первое уравнение системы (2). Указанные допущения существенно упрощают реализацию систем сопряженных дифференциальных уравнений (1)–(3) в трехмерной области печной петли с использованием известных пакетов программ **COMSOL MultyPhysics** или **ANSYS**.

При численном моделировании проводились итерации по условию равенства комплексных амплитуд токов в ядре, токоподводах и боковых шинных пакетах с заданной точностью  $\varepsilon_l \leq [\varepsilon_{\text{пл}}]$ . Принимались данные моделирования, соответствующие требованиям ПУЭ и допустимым уровням нагрева вторичных токопроводов [8]. Выполнялась визуализация распределения индукции в поперечных сечениях расчетной области печной петли с двухрядным боковым шинным пакетом из алюминиевых труб. Было установлено, что электромагнитное поле соответствует плоскопараллельному распределению в характерных сечениях перпендикулярных оси  $Oz$  для  $z = [0,8; 8,1; 15,4]$  (рис. 1,а). Относительная погрешность результатов моделирования изменяется от 0,1 % до 2,5 % при сравнении расчетных данных объемной модели (рис. 1,а) и моделей плоскопараллельного поля для выделенных характерных сечений  $z = [0,8; 15,4]$  (рис. 1,б) и  $z = 8,1$  (рис. 1,в). Это полностью удовлетворяет требованиям точности численного эксперимента. Таким образом, обоснована возможность перехода от 3D к 2D моделированию при существенном сокращении вычислительных ресурсов и затрат времени.

Индуктивное сопротивление контура печной петли определяется соотношением

$$X = \omega L, \quad (4)$$

а его индуктивность, в соответствии с [9] равна  $L = \psi / I_\Sigma$ , где

$$\psi = \int \Phi di / I_\Sigma, \quad di = \mathbf{j} \cdot d\mathbf{s}, \quad \Phi = \iint_s \mathbf{B} d\mathbf{S},$$

$\psi$  – потокосцепление, Вб;  $I_\Sigma$  – ток печной петли, А;  $\Phi$  – магнитный поток, Вб;  $\mathbf{j}$  – плотность тока, А/м<sup>2</sup>;  $\mathbf{B}$  – вектор магнитной индукции, Тл;  $d\mathbf{s} = \mathbf{n}_s \cdot d\mathbf{s}$ ,  $d\mathbf{S} = \mathbf{n}_s \cdot d\mathbf{S}$  – элементарные поверхности (с учетом векторов нормалей  $\mathbf{n}_s, \mathbf{n}_S$ ) токопроводов, м<sup>2</sup>.

Величина активного сопротивления рассчитывается как отношение активных потерь к квадрату действующего значения полного тока в печной петле

$$R = \sum_i \iiint_{V_i} \sigma_i^{-1} \mathbf{j} \cdot (\mathbf{j})^* dx dy dz / I_\Sigma^2, \quad (5)$$

и, соответственно, значения полного сопротивления и коэффициента мощности определяются как

$$Z = \sqrt{X^2 + R^2}, \quad (6)$$

$$\cos \varphi = R/Z. \quad (7)$$

Значения электрических параметров контура печной петли (4)–(7) рассчитывались по данным моделирования в среде **COMSOL MultyPhysics** и сравнивались с экспериментальными данными, полученными при регистрации напряжений и токов в токоподводах печей графитации [3]. Погрешность результатов не превысила 1,2 % для активного и 2,8 % для полного сопротивления печной петли, что подтверждает высокий уровень достоверности и точности математической модели (1)–(6) и позволяет расширить область приложения методики идентификации электрических параметров для модернизированных исполнений однорядных (рис. 2,а,б) и двухрядных (рис. 2,в,г) боковых шинных пакетов.

Выполнялась оптимизация конструктивных параметров модернизированных БШП (рис. 2) по критерию минимума активных потерь методом упорядоченного перебора путем дискретного варьирования геометрических размеров и взаимного расположения шин дифференцированных сечений. Варьирование ширины шин ограничивалось значением удвоенной глубины проникновения поля. Дифференциация сечений шин БШП определялась данными расчета распределения токов, экономической плотностью тока и допустимой температурой для шин реконструируемых токопроводов [8]. Применение шин трубчатого сечения позволило устранить перегревы крайних шин, которые превышали допустимые значения из-за локальной концентрации электромагнитного поля.

Увеличение числа шин модернизированных БШП, оптимизация их взаимного расположения и поперечного сечения, согласование конфигурации крайних шин с конфигурацией магнитного поля позволили взаимно компенсировать влияние эффекта вытеснения и внешнего поверхностного эффекта, снизить максимальные значения индукции на 9,6 % – 10,7 % и векторного магнитного потенциала на 8,1 % – 8,5 % для однорядного БШП (рис. 2,а,б), на 24,8 % – 25,1 % и на 42,6 % – 43,04 %, соответственно, для двухрядного БШП (рис. 2,в,г) по сравнению с базовой конструкцией бокового шинного пакета из алюминиевых труб (рис. 1). При этом уменьшаются токовые нагрузки шин, размеры их поперечного сечения, достигается равномерное рас-

пределение плотности тока в шинах, снижаются добавочные потери в БШП. Коэффициенты добавочных потерь составили: 8,54 – для БШП из 12 алюминиевых труб (рис. 1); 1,342 – для однорядного БШП (рис. 2,а,б); 1,352 – для двухрядного БШП (рис. 2,в,г). Применение двухрядного модернизированного пакета с 24

шинами (рис. 2,в,г) позволяет на 36 % снизить индуктивное сопротивление БШП, на 13 % – реактивную мощность печной петли и мощность КУ, на 15 % повысить коэффициент мощности печной петли на завершающем этапе кампании графитации.

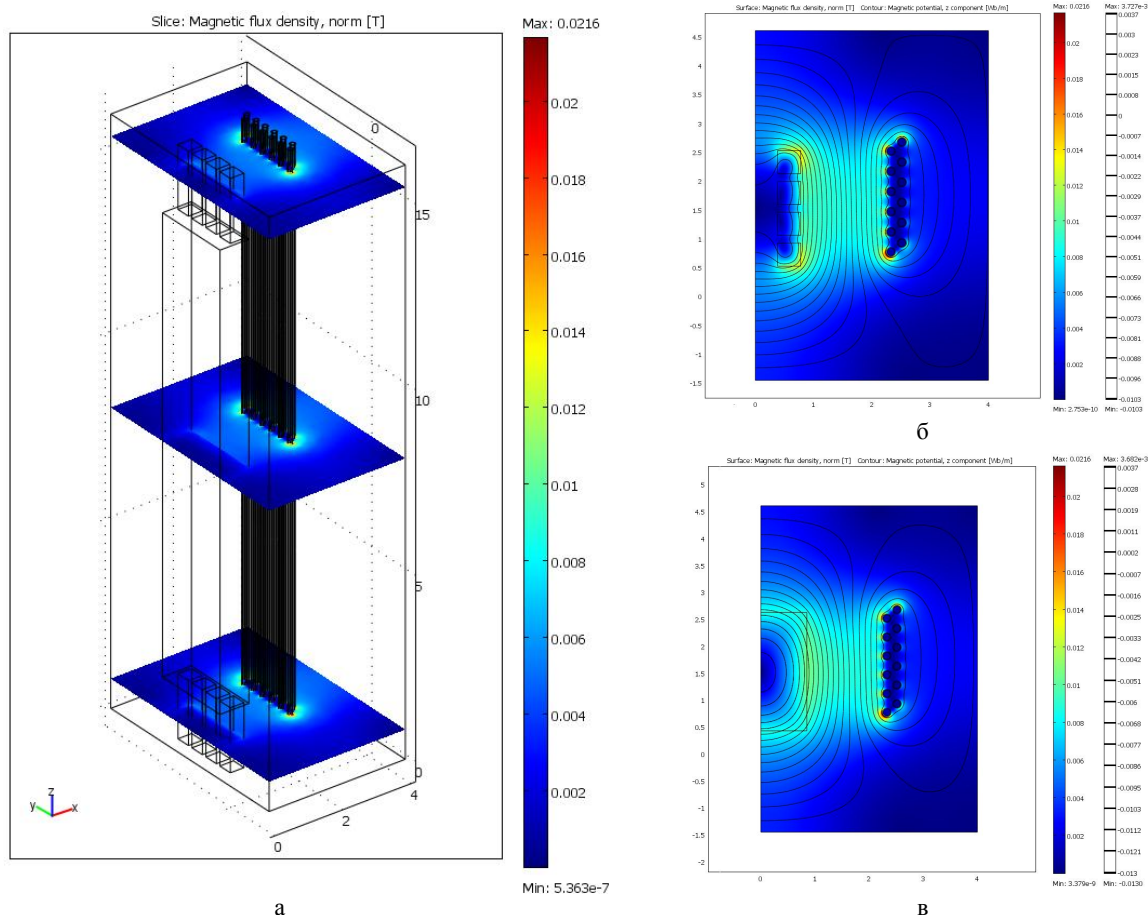


Рис. 1. Магнитное поле печной петли:

- а – пространственное распределение индукции магнитного поля в расчетной области печной петли  $z = [0,8; 8,1; 15,4]$  м;
- б – распределение индукции магнитного поля и векторного магнитного потенциала в плоскости  $xOy$  при  $z = [0,8; 15,4]$  м;
- в – распределение индукции магнитного поля и векторного магнитного потенциала в плоскости  $xOy$  при  $z = 8,1$  м

Для идентификации электрических параметров печной петли задавался интервал варьирования удельной проводимости ядра  $\bar{\sigma}_{\min} \leq \bar{\sigma} \leq \bar{\sigma}_{\max}$ , ограниченный значениями в начале  $\bar{\sigma}_{\min}$  и в конце  $\bar{\sigma}_{\max}$  кампании графитации, которые определялись по данным измерений токов, напряжений и активной мощности печи [3].

Дискретное варьирование удельной проводимости ядра печи ограничивается 6-9 значениями. Поэтому выполняется кубическая сплайн интерполяция данных моделирования и аппроксимация функций интерполяции по методу наименьших квадратов [10].

Функции кубической сплайн интерполяции, зависящие от удельной эффективной электрической проводимости ядра печи  $\bar{\sigma}$ ,

$$f_j(\bar{\sigma}) = Pf(\zeta(\bar{\sigma}), \gamma) = \varphi_0(\zeta)f(\bar{\sigma}_{i,j}) + \varphi_1(\zeta)f(\bar{\sigma}_{i+1,j}) + \varphi_2(\zeta)(\bar{\sigma}_{i+1,j} - \bar{\sigma}_{i,j})\gamma_{i,j} + \varphi_3(\zeta)(\bar{\sigma}_{i+1,j} - \bar{\sigma}_{i,j})\gamma_{i+1,j}, \quad (8)$$

могут быть представлены базисными полиномами Эрмита  $\varphi_0(\zeta) = (2\zeta+1) \cdot (1-\zeta^2)$ ,  $\varphi_1(\zeta) = (3-2\zeta) \cdot \zeta^2$ ,  $\varphi_2(\zeta) = \zeta \cdot (1-\zeta)^2$ ,  $\varphi_3(\zeta) = (\zeta-1) \cdot \zeta^2$  при  $\bar{\sigma}_{i,j} \leq \bar{\sigma} \leq \bar{\sigma}_{i+1,j}$  и

$$\zeta(\bar{\sigma}) = (\bar{\sigma} - \bar{\sigma}_{i,j}) / (\bar{\sigma}_{i+1,j} - \bar{\sigma}_{i,j}).$$

Для функций интерполяции (8) выполняется условие [10]:

$$\min J(\gamma^{(j)}) = \min \sum_{i=1}^m \int_{\tau_{i,j}}^{\tau_{i+1,j}} [f_j''(\zeta(\bar{\sigma}), \gamma^{(j)})]^2 d\bar{\sigma}, \quad (9)$$

где индексы  $j = 1, 2, 3$  соответствуют реактивному (4), активному (5) и полному сопротивлению печной петли (6).

Анализируя интерполяционные зависимости (8), (9) для сопротивления печной петли (рис. 3) можно допустить инвариантность реактивного сопротивления

$$X(\bar{\sigma}) = X \approx const. \quad (10)$$

Так как активное сопротивление (5) определяется коэффициентом  $k_d$ , учитывающим добавочные потери в ядре и потери в токопроводах печной петли

$$R(\bar{\sigma}) = (l_{\text{ядро}} / \bar{\sigma} S_{\text{ядро}}) \cdot k_d(\bar{\sigma}) = (l_{\text{ядро}} / \bar{\sigma} S_{\text{ядро}}) \cdot (1 + a \cdot \bar{\sigma}^b), \quad (11)$$

то выражение (6) можно преобразовать в уравнение нелинейной регрессии вида:

$$Z(\bar{\sigma}) = \sqrt{X^2 + \left[ l_{\text{кern}} \cdot (\bar{\sigma} \cdot S_{\text{кern}})^{-1} \cdot (1 + a \cdot \bar{\sigma}^b) \right]^2} \quad (12)$$

с частными производными по параметрам аппроксимации  $X, a, b$

$$\begin{bmatrix} Z_X(\sigma) \\ Z_a(\sigma) \\ Z_b(\sigma) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ \sqrt{X^2 + \left[ \frac{l_{\text{кern}} \cdot (1 + a \cdot \sigma^b)}{(\sigma \cdot S_{\text{кern}})} \right]^2} \\ k^2(1 + a\sigma^b)\sigma^{b-2} \\ \sqrt{X^2 + \left[ \frac{l_{\text{кern}} \cdot (1 + a \cdot \sigma^b)}{(\sigma \cdot S_{\text{кern}})} \right]^2} \\ ak^2(1 + a\sigma^b)\sigma^{b-2} \ln(\sigma) \\ \sqrt{X^2 + \left[ \frac{l_{\text{кern}} \cdot (1 + a \cdot \sigma^b)}{(\sigma \cdot S_{\text{кern}})} \right]^2} \end{bmatrix} \cdot (13)$$

Вектор параметров  $X, a, b$  (табл. 1) определялся с использованием встроенной функции **genfit** в структуре средств **MathCAD**, что существенно упростило процедуру численной реализации.

Идентификация электрических параметров печной петли по соотношениям (10)-(13) позволяет существенно снизить требования к КИП, так как для определения сопротивлений печной петли в текущий момент времени технологического процесса графитации  $t_{\text{гр}}$  достаточно измерять только действующие значения напряжения на отводах главного шинного пакета  $U_{\text{д}}$  и тока на ножах подключения БШП  $I_{\text{д}}$ .

Рассчитывают полное сопротивление  $Z_{\text{д}}(t_{\text{гр}}) = U_{\text{д}}(t_{\text{гр}}) / I_{\text{д}}(t_{\text{гр}})$ .

Из условия

$$Z(\bar{\sigma}|_{t=t_{\text{гр}}}) = \sqrt{X^2 + \left[ \frac{l_{\text{кern}} \cdot \left( 1 + a \cdot \bar{\sigma}|_{t=t_{\text{гр}}}^b \right)}{\left( \bar{\sigma}|_{t=t_{\text{гр}}} \cdot S_{\text{кern}} \right)} \right]^2} = Z_{\text{д}}(t_{\text{гр}})$$

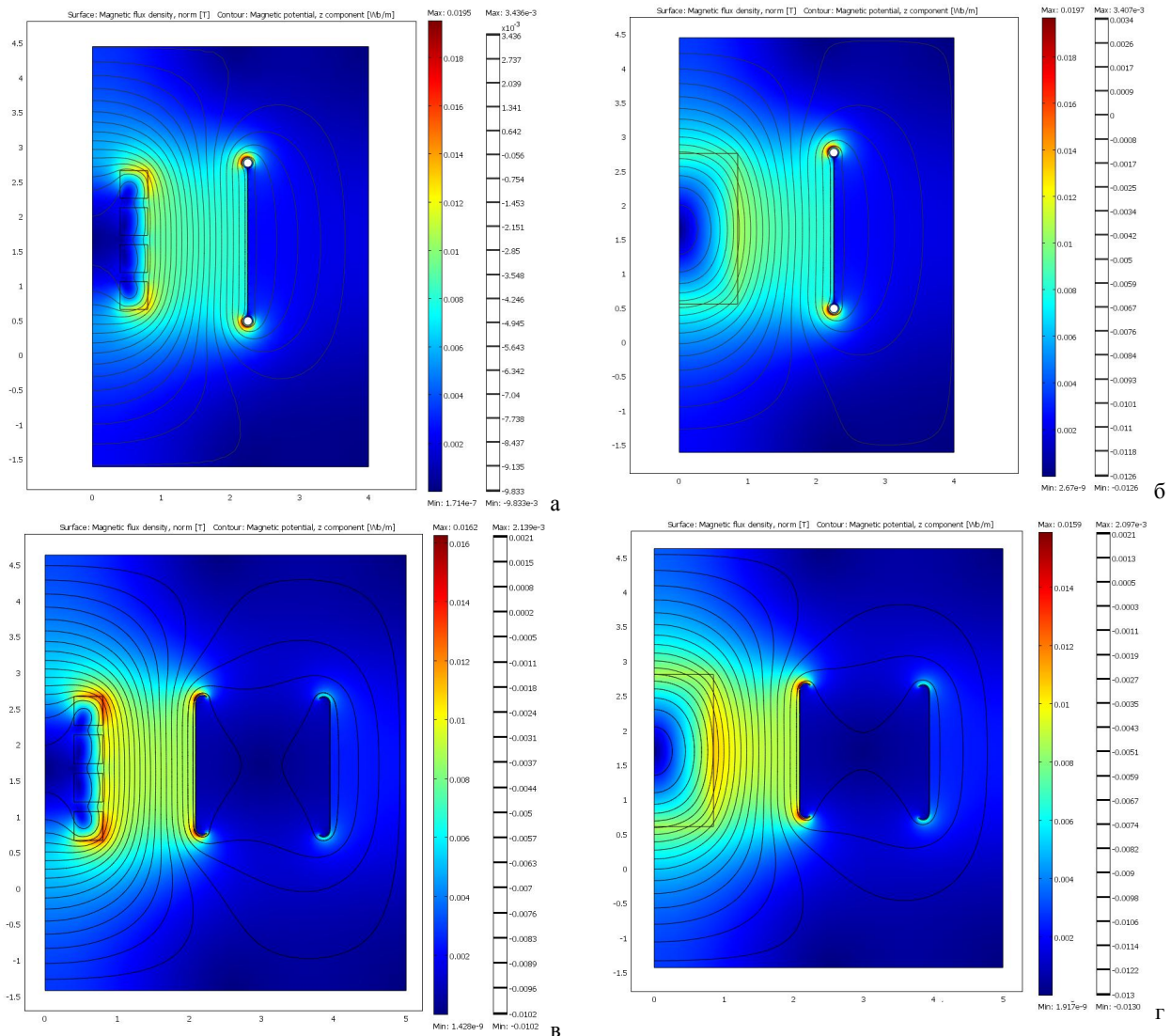


Рис. 2. Магнитное поле печной петли с однорядным (а,б) и двухрядным (в,г) БШП:

а, в – распределение индукции магнитного поля и векторного магнитного потенциала в плоскости xOy при  $z = [0,8; 15,4]$  м;  
 б, г – распределение индукции магнитного поля и векторного магнитного потенциала в плоскости xOy при  $z = 8,1$  м

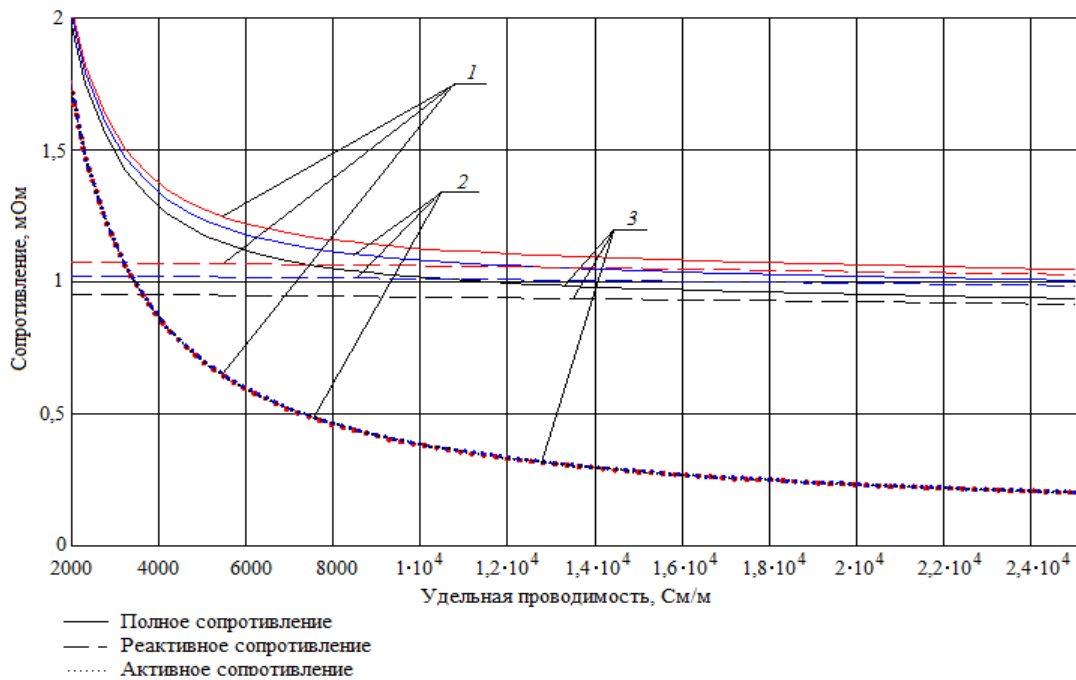


Рис. 3. Зависимость сопротивлений печной петли от удельной эффективной проводимости зерна:

1 – действующая конструкция БШП (рис. 1,б,в); 2 – однорядный БШП (рис. 2,а,б); 3 – двухрядный БШП (рис. 2,в,г)

с помощью встроенной функцией **root** в среде **MathCAD** находят значение удельной эффективной электрической проводимости зерна печи и определяют активное сопротивление печной петли

$$R(t_{гр}) = R(\bar{\sigma}|_{t=t_{гр}}) = \frac{l_{\text{кern}} \cdot \left(1 + a \cdot \bar{\sigma}|_{t=t_{гр}}^b\right)}{\left(\bar{\sigma}|_{t=t_{гр}} \cdot S_{\text{кern}}\right)},$$

и активную мощность в момент времени  $t_{гр}$

$$P(t_{гр}) = [I_d(t_{гр})]^2 \cdot R(t_{гр}).$$

Точность идентификации электрических параметров печной петли (10)-(12) оценивалась относительными погрешностями расчета реактивных, активных и полных сопротивлений (табл. 1):

$$\varepsilon_X = \max \left( \left| f_1(\bar{\sigma}) - X \right| / \max(f_1(\bar{\sigma})) \right)_{\bar{\sigma}_{\min} \leq \bar{\sigma} \leq \bar{\sigma}_{\max}},$$

$$\varepsilon_R = \max \left( \left| f_2(\bar{\sigma}) - R(\bar{\sigma}) \right| / \max(f_2(\bar{\sigma})) \right)_{\bar{\sigma}_{\min} \leq \bar{\sigma} \leq \bar{\sigma}_{\max}},$$

$$\varepsilon_Z = \max \left( \left| f_1(\bar{\sigma}) - Z(\bar{\sigma}) \right| / \max(f_1(\bar{\sigma})) \right)_{\bar{\sigma}_{\min} \leq \bar{\sigma} \leq \bar{\sigma}_{\max}}.$$

Таблица 1

Параметры и погрешности аппроксимации сопротивлений печной петли

Исполнения БШП	Параметры аппроксимации			Относительная погрешность		
	X, мОм	$a \cdot 10^{-6}$	b	$\varepsilon_X, \%$	$\varepsilon_R, \%$	$\varepsilon_Z, \%$
Рис. 1	1,044	8,595	1,07	2,64	0,79	2,06
Рис. 2,а,б	0,998	5,932	1,11	2,30	0,64	1,66
Рис. 2,в, г	0,928	5,212	1,12	2,62	0,82	1,65

Относительная погрешность аппроксимации реактивных сопротивлений печной петли не превышает 2,64 %, активных сопротивлений – 0,82 %, полных сопротивлений – 2,06 %. Достаточно высокая точность идентификации активного сопротивления печной петли соответствует классу точности измерений активной мощности и полностью удовлетворяет требованиям управления технологическим процессом графитации.

#### ВЫВОДЫ

Разработана обобщенная модель сопряженных электромагнитных, тепловых процессов и процессов тепломассообмена в расчетной области печной петли, учитывающая зависимость электромагнитных свойств

керна и проводниковых материалов от температуры, эффекты вытеснения и внешний поверхностный эффект, зависимость удельной мощности тепловыделения от токов проводимости и вихревых токов. Установлена возможность перехода от 3D формулировки к модели плоскопараллельного поля и ее реализации методом конечных элементов в характерных сечениях печной петли.

Методами математического моделирования подтверждена энергоэффективность конструкций модернизированных боковых шинных пакетов, обеспечивающих снижение мощности КУ на 2 МВ·Ар и увеличение коэффициента мощности печной петли на 15 % на завершающем этапе кампании графитации.

Разработанная методика идентификации электрических параметров печной петли, основанная на комбинации полевых расчетов, методов кубической сплайн интерполяции и нелинейной регрессии, обеспечивает высокую точность определения сопротивлений печной петли и позволяет управлять вводом активной мощности графитации по данным измерений действующих значений напряжения на отводах главного шинного пакета и тока на ножах подключения БШП.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соседов В.П. Графитация углеродистых материалов / В.П. Соседов, Е.Ф. Чалых. – М.: Metallurgiya, 1987. – 176 с.
2. Чалых Е.Ф. Оборудование электродных заводов: [учебное пособие для вузов] / Е.Ф. Чалых. – М.: Metallurgiya, 1990. – 238 с.
3. Ярымбаш Д.С. Особенности контроля электрических параметров, мощности и энергопотребления во время кампании графитации в печи переменного тока / Ярымбаш Д.С., Ярымбаш С.Т., Тютюнник О.В. // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ, 2006, – Вип. 3/2006(38). – С. 53-55.
4. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле / Бессонов Л.А. – М.: Высш. шк., 2003. – 317 с.
5. Джалурия Й. Естественная конвекция. Тепло- и массообмен / Й. Джалурия. – М.: Мир, 1983. – 399 с.
6. Исаченко В.П. Теплопередача: [учебник для вузов] / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сухомел. – [3-е изд.] – М.: Энергия, 1975. – 488 с.
7. Данцис Я.Б. Короткие сети и электрические параметры дуговых электропечей / Я.Б. Данцис, Г.М.Жилов. – М.: Metallurgiya, 1987. – 320 с.
8. Правила устройства электроустановок. ПУЭ-2009. Харьков: Форт, 2010. – 708 с.
9. Калантаров П.Л. Расчет индуктивностей: [справочная книга] / П.Л. Калантаров, Л.А. Цейтлин. – [3-е изд.] – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.
10. Математика и САПР: В 2-х кн. Кн. 1. Пер. с франц. / П. Шенен [и др.] – М.: Мир, 1988. – 204 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Sosedov V.P. Grafitaciya uglerodistykh materialov / V.P. Sosedov, E.F. Chalyh. - M.: Metallurgiya, 1987. - 176 s. 2. Chalyh E.F. Oborudovanie `elektrodnykh zavodov: [uchebnoe posobie dlya vuzov] / E.F. Chalyh. - M.: Metallurgiya, 1990. - 238 s. 3. Yarymbash D.S. Osobennosti kontrolya `elektricheskikh parametrov, moschnosti i `energopotrebleniya vo vremya kampanii grafitacii v pechi peremennogo toka / Yarymbash D.S., Yarymbash S.T., Tyutyunnik O.V. // Visnik Kremenchuc'kogo derzhavnogo politehnichnogo universitetu. - Kremenchuk: KDPU, 2006, - Vip. 3/2006(38). - S. 53-55. 4. Bessonov L.A. Teoreticheskie osnovy `elektrotehniki. `Elektromagnitnoe pole / Bessonov L.A. - M.: Vyssh. shk., 2003. - 317 s. 5. Dzhaluruya J. Estestvennaya konvekciya. Teplo- i massoobmen / J. Dzhaluruya. - M.: Mir, 1983. - 399 s. 6. Isachenko V.P. Teplotperedacha: [uchebnik dlya vuzov] / V.P. Isachenko, V.A. Osipova, A.S. Suhomel. - [3-e izd.] - M.: `Energiya, 1975. - 488 s. 7. Dancis Ya.B. Korotkie seti i `elektricheskie parametry dugovykh `elektropechej / Ya.B. Dancis, G.M.Zhilov. - M.: Metallurgiya, 1987. - 320 s. 8. Pravila ustrojstva `elektrostanovok. PU`E-2009. Har'kov: Fort, 2010. - 708 s. 9. Kalantarov P.L. Raschet induktivnostej: [spravochnaya kniga] / P.L. Kalantarov, L.A. Cejtlin. - [3-e izd.] - L.: `Energoatomizdat, 1986. - 488 s. 10. Matematika i SAPR: V 2-h kn. Kn. 1. Per. s franc. / P. Shenen [i dr. ] - M.: Mir, 1988. - 204 s.

Поступила 29.09.2011

*Ярымбаш Дмитрий Сергеевич, к.т.н.*

Севастопольский национальный технический университет  
кафедра судовых и промышленных электромеханических систем  
99053, Севастополь, ул. Университетская, 33  
тел. (066) 9658673, e-mail: yarymbash@rambler.ru

*Yarymbash D.S.*

#### **Identification of furnace loop electrical parameters of power graphitization furnaces.**

A method of furnace loop electrical parameters identification for powerful graphitization furnaces using a three-dimensional model of AC electromagnetic-to-thermal energy conversion is introduced. Regression equations for high-accuracy calculation of furnace loop resistance with the basic and rebuilt side bus packs are developed.

**Key words – identification, mathematical model, electrical parameters, graphitization, furnace loop.**