

## II. ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.315:621.3.025

Д. С. Ярымбаш<sup>1</sup>, С. Т. Ярымбаш<sup>2</sup>, И. М. Килимник<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Канд. тех. наук, доцент Запорожского национального технического университета

### ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ШИХТОВАННЫХ ШИННЫХ ПАКЕТОВ МОЩНЫХ КОРОТКИХ СЕТЕЙ

*Предложена новая методика идентификации электрических параметров однофазных шихтованных шинных пакетов короткой сети электротехнических комплексов графитации большой мощности. Применяются комбинации процедур нормализации и полиномиальной регрессии данных для полных сопротивлений и сдвигов по фазе, полученных методами численного моделирования процессов электромагнитного преобразования энергии, конвективного теплообмена и теплопроводности в области главных шинных пакетов секций печей графитации переменного тока с учетом геометрических размеров шин, их расположения и температурных режимов. Точность идентификации электрических параметров повышается в 2–2,5 раза по сравнению с традиционной методикой.*

**Ключевые слова:** печь графитации, короткая сеть, однофазные шихтованные пакеты, электрические параметры, численное моделирование, нормализация, полиномиальная регрессия.

Короткая сеть относится к одним из ключевых элементов электротехнических комплексов графитации (ЭТКГ). Она обеспечивает связь между низковольтными выводами печных и компенсирующих трансформаторов и печами графитации. Параметры короткой сети оказывают значительное влияние на электрические и технико-экономические показатели работы ЭТКГ.

К основным элементам короткой сети ЭТКГ относится главный шинный пакет (ГШП), который, как правило, выполняется шихтованным, однорядным или двухрядным. Он является наиболее нагруженным и протяженным элементом короткой сети, обеспечивая при этом работу всех графитировочных печей секции. ГШП обладает незначительным активным сопротивлением, но зато большим реактивным, что оказывает существенное влияние на КПД и электрические характеристики электропечного комплекса. Высокое реактивное сопротивление ГШП приводит к росту падения напряжения между питающими трансформаторами и печью, а также к перегрузке сети из-за необходимости компенсации большой реактивной мощности.

При модернизации ЭТКГ для увеличения их единичной мощности, возрастают токовые нагрузки во вторичных сетях, что в свою очередь требует увеличения массы активных материалов элементов короткой сети и повышения их энергоэффективности.

С учетом значительных капитальных затрат на разработку новых конструкций ГШП секции печей графитации или на его реконструкцию, в связи с увеличившимися токовыми нагрузками, возникает потребность в проведении исследований электрических и тепловых параметров, уточнений распределений токов и потерь активной мощности в шинах на основе математических и схем-

ных моделей. Это может существенно сократить затраты на технические мероприятия по энергосбережению и ускорить внедрение новых разработок в производство.

В ПУЭ предлагаются варианты однофазных токопроводов из шихтованных пакетов медных и алюминиевых прямоугольных шин в зависимости от допустимого длительного тока. Однако, существующие методики [1, 2] не обеспечивают требуемую точность идентификации добавочных потерь в проводниках таких пакетов шин, так как не позволяют однозначно оценить влияние поверхностных эффектов и эффектов близости, при определении электрических характеристик и тепловых режимов работы ГШП.

Целью работы является разработка методики, позволяющей повысить точность идентификации зависимостей электрических параметров схем замещения шихтованных однофазных ГШП переменного тока от числа шин, геометрических размеров и температурных режимов работы.

Для учета влияния поверхностного эффекта и эффекта близости на величину сопротивлений ГШП реализовывалась задача расчета распределения плотности тока и удельных электрических потерь по поперечному сечению шин на основе сопряженных пространственных стационарных математических моделей электромагнитного преобразования электрической энергии переменного тока [3], тепло и массопереноса в дифференциальной форме [3].

Система уравнений Максвелла формулируется для комплексных амплитуд векторного магнитного и электрического потенциалов в геометрических электропроводящих областях шин ГШП и окружающей их электроизоляционной среды (воздуха) [3]:

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

где  $\omega$  – угловая частота переменного напряжения, рад/с;  $\sigma$  – удельная 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; индекс  $i = 0$  – соответствует области электроизоляционной окружающей среды, индексы  $i = 1, \dots, N$  – областям токопроводящих шин ГПП.

Механизмы конвективного теплообмена для охлаждающего ГПП воздуха представляются системой уравнений в виде [3]

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

где зависимость плотности охлаждающего воздуха от температуры линеаризуется по уравнению  $\rho(T) = \rho_0(1 - \beta T)$ ,  $\rho_0$  – плотность газа при температуре  $T_0$ , кг/м<sup>3</sup>;  $T$  – отклонение температуры от значения  $T_0$ , °С;  $\mathbf{x}$  – вектор 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·°С);  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С);  $\mathbf{g}$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\beta$  – коэффициент объемного расширения газа, 1/°С;  $\nu$  – кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/с.

Стационарные процессы теплопередачи в алюминиевых или медных шинах ГПП описываются уравнениями теплопроводности

$$\lambda_i \Delta T_i = \mathbf{J}_i \cdot (\mathbf{J}_i)^* / \sigma_i(T_i), \quad i = 1, \dots, N_{\text{ш}}, \quad (3)$$

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

Система уравнений (1) замыкается условиями калибровки Кулона, граничными условиями магнитной и электрической изоляции, условиями 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 [5].

Модуль скорости  $|\mathbf{x}_i|$  охлаждающего воздуха обуславливается, прежде всего, проекцией  $x_y$ , значения которой для режима свободной конвекции составляют 0,1–0,3 м/с [1]. При этих условиях можно исключить из рассмотрения первое уравнение системы (2), что существенно упрощает

реализацию систем сопряженных дифференциальных уравнений (1)–(3) в трехмерной области печной петли с использованием известных пакетов программ COMSOL Multiphysics или ANSYS Multiphysics.

При численном моделировании проводились итерации по условию равенства действующих значений токов в ГПП рекомендованным ПУЭ [6] с заданной точностью  $\epsilon_I \leq [\epsilon_{Iд}]$  при числе шин в пакете  $N_{\text{ш}} = \{2, 4, 6, 8, 12, 16, 20, 24\}$ , их высотах  $b_{\text{ш}} = \{100, 120, 140, 160, 180, 200, 250, 300\}$  мм и рабочих температурах  $T = \{20, 50, 70, 90, 110, 140\}$  °С.

Установлено, что электромагнитные и тепловые поля определяются их плоскопараллельными распределениями в плоскости  $xOy$  (рис. 1). Относительная погрешность расчетов изменяется от 0,8 % до 1,4 % при сравнении объемной и плоскопараллельных моделей, что обуславливает достаточность 2D моделирования, обеспечивая существенное сокращение вычислительных ресурсов и затрат времени.

По данным реализации сопряженной полевой модели (1)–(3) рассчитывались линейные электрические параметры схемы замещения ГПП (на единицу его длины). Индуктивные сопротивления однофазных шихтованных ГПП определяются соотношениями:

$$X = \omega L, \quad L = 2 \cdot W_{\sigma} / I_{\Sigma}^2 \quad (4)$$

где  $W_{\sigma} = \frac{1}{2} \iiint_{V_{\sigma}} (\mathbf{B}, \mathbf{H}) dx dy dz$  – энергия магнитного поля,

$I_{\Sigma}$  – ток ГПП;  $\mathbf{B}, \mathbf{H}$  – векторы магнитной индукции и напряженности магнитного поля;  $V_{\sigma}$  – объем расчетной области на единицу длины ГПП.

Величина активного сопротивления обуславливается активными потерями в шинах ГПП

$$R = P_{\text{эл}} / I_{\Sigma}^2, \quad (5)$$

где  $P_{\text{эл}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{ш}}} P_{\text{эл}i} = \sum_{i=1}^{N_{\text{ш}}} \iiint_{V_i} \sigma_i(T_i)^{-1} \mathbf{J}_i \cdot (\mathbf{J}_i)^* dx dy dz$ .

Полное сопротивление ГПП

$$Z = |Z| \cdot e^{j\varphi} \quad (6)$$

может быть выражено через активную и реактивную составляющие

$$\begin{cases} |Z| = \sqrt{X^2 + R^2}, \varphi = \arccos(R/Z), \\ R = |Z| \cdot \cos(\varphi), X = |Z| \cdot \sin(\varphi). \end{cases} \quad (7)$$

Поверхность:  $(T - T_{\text{мин}})/(T_{\text{макс}} - T_{\text{мин}})$  Контур: Векторный магнитный потенциал  $A_z$

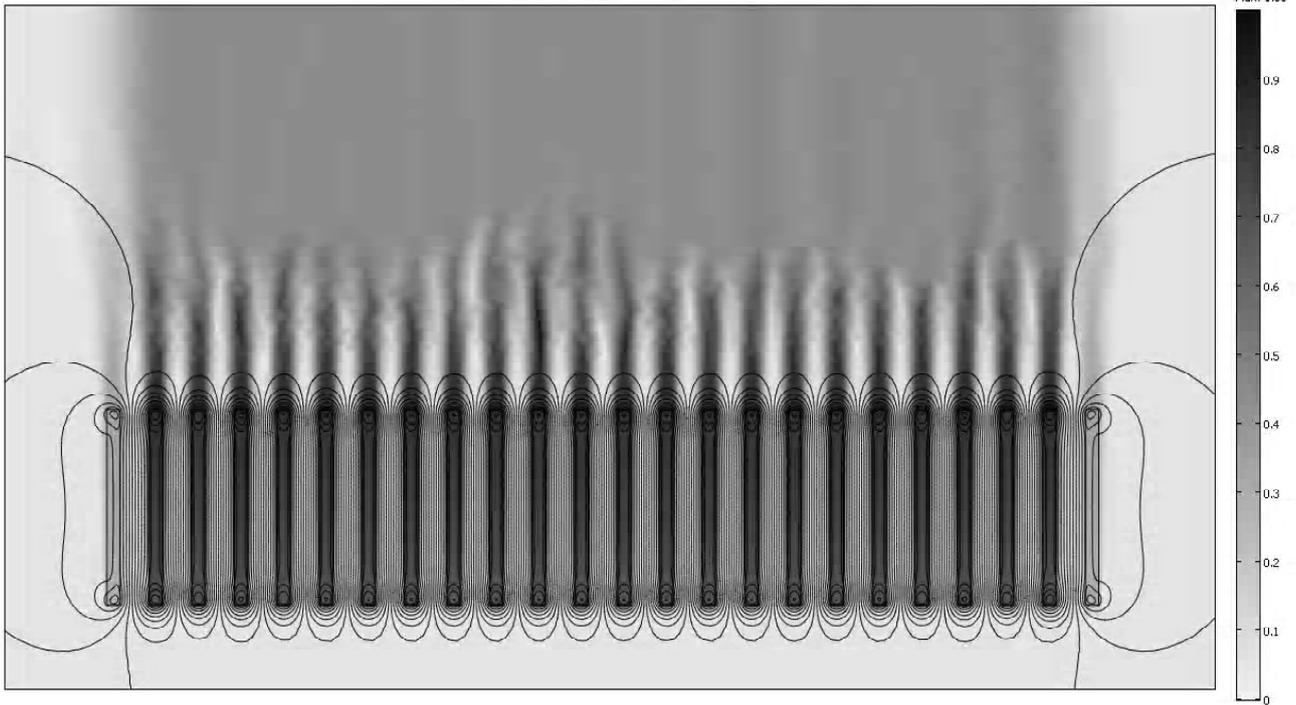


Рис. 1. Поле температур и линии векторного магнитного потенциала  $A_z$  в однофазном шинном пакете ( $N_{\text{ш}} = 24$ )

Значения электрических параметров контура печной петли (5)–(8) рассчитывались по данным моделирования (1)–(5) методом конечных элементов. Реализация метода многопараметрической полиномиальной регрессии [2] на множествах электрических параметров ГШП  $\{Z_{i,j,k}\}$ ,  $\{\varphi_{i,j,k}\}$ , соответствующих векторам данных с проекциями  $(\mathbf{T})_i$ ,  $(\mathbf{N}_{\text{ш}})_j$ ,  $(\mathbf{b}_{\text{ш}})_k$  (рис. 2), показала, что даже для двухпараметрических зависимостей относительная погрешность модуля полного сопротивления достигает 49,5 % (рис. 2, а), а сдвига по фазе – 7,4 % (рис. 2, б). Кроме того поверхности функции регрессии немонотонные, что увеличивает погрешность дифференцирования до 120–250 %, не допуская реализацию задач оптимизации градиентными методами.

Указанные недостатки можно устранить комбинацией метода нормализации электрических параметров ГШП на подмножестве  $\{(\mathbf{T})_i, (\mathbf{N}_{\text{ш}})_j\}$ , и одно или двухкомпонентной регрессии методом наименьших квадратов [2]. Для этого рассчитывались нормализованные электрические параметры ГШП

$$(Z_{\text{norm}})_{i,j,k} = \frac{|Z|_{i,j,k} - \min(|Z|_{i,j})_k}{\max(|Z|_{i,j})_k - \min(|Z|_{i,j})_k} \quad (8)$$

– для модулей полных сопротивлений (рис. 2, а) и

$$(\varphi_{\text{norm}})_{i,j,k} = \frac{|\varphi|_{i,j,k} - \min(|\varphi|_{i,j})_k}{\max(|\varphi|_{i,j})_k - \min(|\varphi|_{i,j})_k} \quad (9)$$

– для сдвига по фазе между током и падением напряжения на единицу длины ГШП (рис. 2, б).

Анализ данных расчета (8)–(9) нормализованных электрических параметров ГШП позволяет принять, что влиянием высоты ( $\forall b \in \mathbf{b}_{\text{ш}} = \{100, 120, 140, 160, 180, 200, 250\}$ ) и числом шин ( $\forall n \in \mathbf{N}_{\text{ш}} = \{4, 6, 8, 12, 16, 20, 24\}$ ) можно пренебречь, т.е.  $Z_{\text{norm}}(t, n, b) = Z_{\text{norm}(2)}(t)$ ,  $\varphi_{\text{norm}}(t, n, b) = \varphi_{\text{norm}(2)}(t)$  ( $n = 2$ );  $Z_{\text{norm}}(t, n, b) = Z_{\text{norm}(4-24)}(t)$ ,  $\varphi_{\text{norm}}(t, n, b) = \varphi_{\text{norm}(4-24)}(t)$  ( $n > 2$ ), и получить по методу наименьших квадратов полиномиальные зависимости от температуры  $t$

$$Z_{\text{norm}}(t, n) = \begin{cases} Z_{\text{norm}(2)}(t) = (-0,178 \quad 8,697 \cdot 10^{-3} \quad 9,328 \cdot 10^{-6}) \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ t \\ t^2 \end{pmatrix}, (n = 2), \\ Z_{\text{norm}(4-24)}(t) = (-0,187 \quad 9,246 \cdot 10^{-3} \quad 5,415 \cdot 10^{-6}) \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ t \\ t^2 \end{pmatrix}, (n > 2), \end{cases} \quad (10)$$

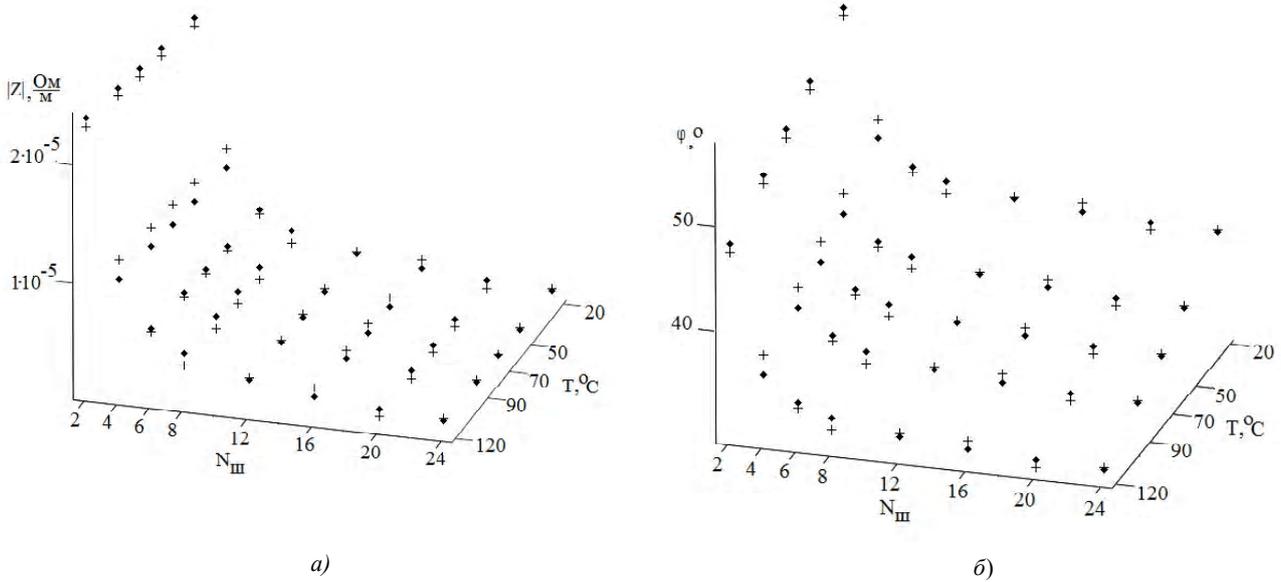


Рис. 2. Электрические параметры ГШП ( $b_{III} = 250$  мм): а – модули полных сопротивлений, б – сдвиги по фазе  
 + – расчетные данные регрессии, • – данные полевого моделирования

$$\varphi_{\text{norm}}(t, n) = \begin{cases} \varphi_{\text{norm}(2)}(t) = (1,23 \quad -0,012 \quad 1,264 \cdot 10^{-5}) \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ t \\ t^2 \end{pmatrix}, (n=2), \\ \varphi_{\text{norm}(4-24)}(t) = (1,254 \quad -0,013 \quad 2,303 \cdot 10^{-5}) \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ t \\ t^2 \end{pmatrix}, (n > 2). \end{cases} \quad (11)$$

Относительные погрешности результатов расчетов нормализованных электрических параметров ГШП с использованием уравнений регрессии (10), (11)

$$\delta Z = \max \left| \frac{Z_{\text{norm}}(T_i) - (Z_{\text{norm}})_{i,j,k}}{(Z_{\text{norm}})_{i,j,k}} \right| \cdot 100 \%,$$

$$\delta \varphi = \max \left| \frac{\varphi_{\text{norm}}(T_i) - (\varphi_{\text{norm}})_{i,j,k}}{(\varphi_{\text{norm}})_{i,j,k}} \right| \cdot 100 \%$$

составили 0,833% – для модулей полных сопротивлений и 1,725% – для сдвига по фазе.

Для перехода от уравнений (10), (11) к размерным зависимостям

$$\begin{cases} Z(t, n, b) = Z_{\text{norm}}(t) \cdot \Delta Z(n, b) + Z_{\text{min}}(n, b), \\ \varphi(t, n, b) = \varphi_{\text{norm}}(t) \cdot \Delta \varphi(n, b) + \varphi_{\text{min}}(n, b) \end{cases} \quad (12)$$

определяются соотношения регрессии для интервалов изменения электрических параметров ГШП  $\Delta|Z| = \Delta Z(n, b)$ ,  $\Delta\varphi = \Delta\varphi(n, b)$  на множествах значений

$$\left\{ \max(|Z|_{i,j,k}) - \min(|Z|_{i,j,k}) \right\}, \left\{ \max(\varphi)_{i,j,k} - \min(\varphi)_{i,j,k} \right\}$$

$$\Delta Z(n, b) = \begin{cases} \Delta Z_{(2)}(b) = (3,14 \cdot 10^{-5} \quad -2,023 \cdot 10^{-7} \quad 3,992 \cdot 10^{-10}) \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ b \\ b^2 \end{pmatrix}, (n=2), \\ \Delta Z_{(4-24)}(n, b) = 4,174 \cdot 10^{-3} \cdot n^{-1,004} \cdot b^{-1,012}, (n > 2), \end{cases} \quad (13)$$

$$\Delta\varphi(n,b)=\begin{cases} \Delta\varphi_{(2)}(b)=\begin{pmatrix} 9,998 & -6,249\cdot 10^{-3} & 1,098\cdot 10^{-5} \end{pmatrix}\cdot\begin{pmatrix} 1 \\ b \\ b^2 \end{pmatrix},(n=2), \\ \Delta\varphi_{(4-24)}(b)=\begin{pmatrix} 8,643 & 4,834\cdot 10^{-3} & -8,998\cdot 10^{-6} \end{pmatrix}\cdot\begin{pmatrix} 1 \\ b \\ b^2 \end{pmatrix},(n>2). \end{cases} \quad (14)$$

и для локальных минимумов  $\min|Z|=Z_{\min}(n,b)$ ,  $\min\varphi=\varphi_{\min}(n,b)$  – на множествах значений  $\left\{\min\left(|Z|_{i,j}\right)_k\right\}$  и  $\left\{\min\left(\varphi\right)_{i,j}\right\}_k$

$$Z_{\min}(n,b)=\begin{cases} Z_{\min(2)}(b)=\begin{pmatrix} 2,183\cdot 10^{-4} & -1,88\cdot 10^{-6} & 7,342\cdot 10^{-9} & -1,059\cdot 10^{-11} \end{pmatrix}\cdot\begin{pmatrix} 1 \\ b \\ b^2 \\ b^3 \end{pmatrix},(n=2), \\ Z_{\min(4-24)}(b)=1,49472\cdot 10^{-2}\cdot n^{-1,078}\cdot b^{-0,963},(n>2), \end{cases} \quad (15)$$

$$\varphi_{\min}(n,b)=\begin{cases} \varphi_{\min(2)}(b)=\begin{pmatrix} 32,702 & 0,159 & -6,082\cdot 10^{-4} & 8,682\cdot 10^{-7} \end{pmatrix}\cdot\begin{pmatrix} 1 \\ b \\ b^2 \\ b^3 \end{pmatrix},(n=2), \\ \varphi_{\min(4-24)}(n,b)=\begin{pmatrix} 4,24 & -3,627 & 1,091 & -0,116 \end{pmatrix}\cdot\begin{pmatrix} 1 \\ \ln(n) \\ [\ln(n)]^2 \\ [\ln(n)]^3 \end{pmatrix}\times \\ \times\begin{pmatrix} 4,132 & 0,012 & -4,083\cdot 10^{-5} & 5,211\cdot 10^{-8} \end{pmatrix}\cdot\begin{pmatrix} 1 \\ b \\ b^2 \\ b^3 \end{pmatrix}+ \\ +\begin{pmatrix} 24,735 & 0,067 & -2,736\cdot 10^{-4} & 4,066\cdot 10^{-7} \end{pmatrix}\cdot\begin{pmatrix} 1 \\ b \\ b^2 \\ b^3 \end{pmatrix},(n>2). \end{cases} \quad (16)$$

Реализация соотношений (12) для идентификации электрических параметров однофазных шихтованных ГШП показала, что при комбинированном применении процедур нормализации, одно и двух параметрической полиномиальной регрессии (10), (11), (13)–(16), относительная погрешность расчета модулей полного сопротивления ГШП снижается до 2,67 % по (рис. 3, а), а сдвига по фазе – до 0,16 % (рис. 3, б).

Высокая точность соотношений (11), (12) позволила идентифицировать зависимость значения коэффициента добавочных потерь от размеров поперечного сечения шин, количества шин в пакете и их температур (рис. 4). По данным моделирования, идентификации электрических параметров и расчетов активных сопротивлений (7) было установлено, что наибольшее значение коэффициента добавочных потерь для ГШП из медных шин при темпе-

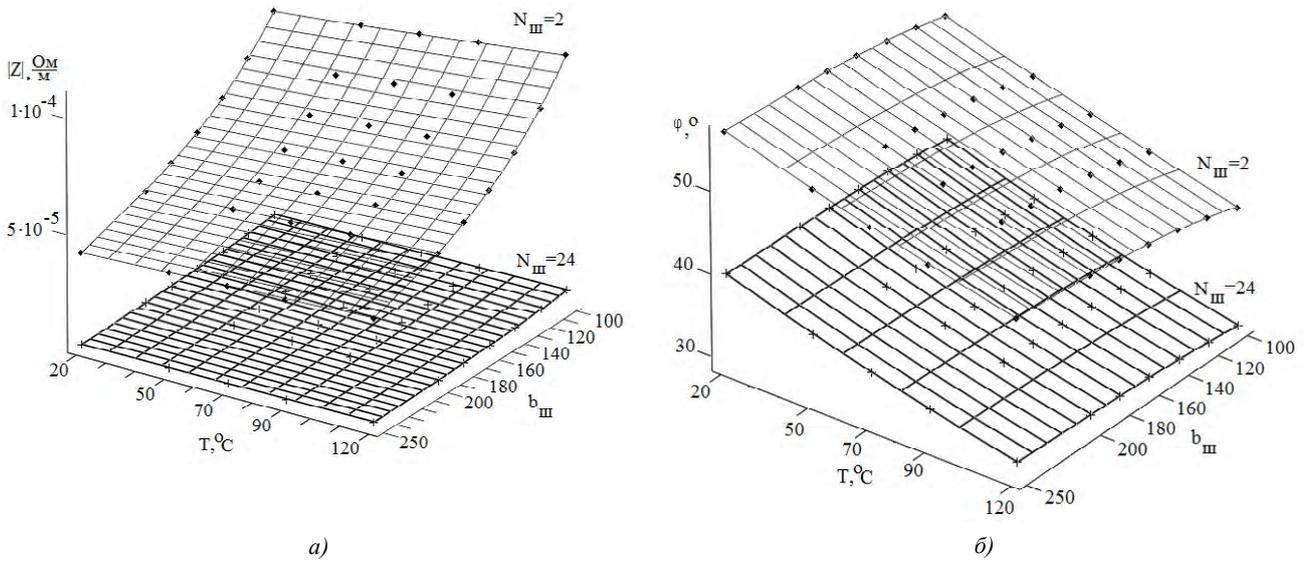


Рис. 3. Идентификация электрических параметров ГШП: а – модуль полного сопротивления ГШП, б – сдвиг по фазе

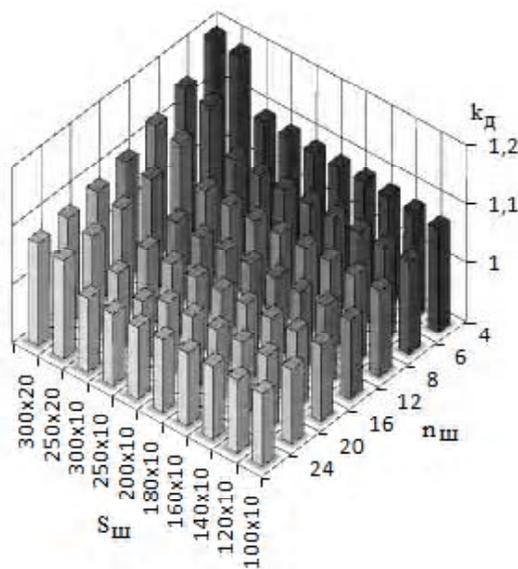


Рис. 4. Значения коэффициента добавочных потерь ГШП

ратуре 90°C наблюдается при  $n = 4$  в пакете с высотой шин  $b = 300$  мм и составляет 1,254, наименьшее – 1,17 при  $n = 24$  шинах в пакете высотой  $b = 100$  мм. Увеличение сечения проводников ГШП за счет увеличения высоты шин в пакете от 100 мм до 300 мм оказывает менее существенное влияния на величину коэффициента добавочных потерь (не более 2,8 %) по сравнению с изменением числа шин в пакете. Рост числа шин от 4 до 24 обеспечивает снижение величины коэффициента добавочных потерь до 7,5 %. Рост рабочей температуры ГШП от 20°C до 140°C, незначительно (в пределах 0,8 %) снижает величину коэффициента добавочных потерь.

Шинные пакеты с большим числом шин обладают существенно меньшим (в 5–12 раз) полным сопротивлением (рис. 3, а). Наименьшие значения полного сопро-

тивления характерны для пакетов с  $N_{ш} = 24$ , а наибольшие для пакетов с двумя шинами. (рис. 3, а). Зависимость полного сопротивления от высоты шин выражена в меньшей степени. Пакеты с шинами меньшей высоты имеют большие значения сопротивления, кроме того, при большем числе шин шихтованного пакета увеличивается сдвиг по фазе. Это обусловлено как изменением их поперечного сечения, т.е. активного сопротивления, так и периметра шин, т.е. их само и взаимоиндуктивности. Температурные режимы работы ГШП оказывают основное влияние на сдвиг по фазе между током и падением напряжения на единицу длины ГШП, который уменьшается на 8°–12° в интервале рабочих температур (20÷120)°C (рис. 3, б).

Таким образом, предложенная методика идентификации электрических параметров ГШП (10)–(16), позволяет существенно повысить точность расчетов при определении электрических характеристик однофазных шихтованных ГШП в сравнении с известными инженерными методиками [1, 2].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данцис, Я. Б. Короткие сети и электрические параметры дуговых электропечей / Я. Б. Данцис, Г. М. Жиров. – М. : Металлургия, 1987. – 320 с.
2. Сарапулов, Ф. Н. Расчет параметров цепей электро-технологических установок / Ф. Н. Сарапулов. – Екатеринбург : УГТУ, 1999. – 87 с.
3. Ярымбаш, Д. С. Идентификация электрических параметров печной петли мощных печей графитации / Ярымбаш Д. С. // Электротехника и электромеханика. – 2012. – № 1. – С. 49–54.
4. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле / Бессонов Л. А. – М. : Высшая школа, 2003. – 317 с.

5. *Михеев, М. А.* Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – М. : Энергия, 1977. – 344 с.
6. Правила устройства электроустановок. ПУЭ-2009. Харьков : ООО Форт, 2010. – 704 с.

*Стаття надійшла до редакції 03.10.2012.  
Після доробки 30.10.2012.*

**Д. С. Ярымбаш, С. Т. Ярымбаш, І. М. Килимник**

**Ідентифікація електричних параметрів шихтованих шинних пакетів потужних коротких мереж**

*Запропоновано методику ідентифікації електричних параметрів однофазних шихтованих шинних пакетів короткої мережі короткої мережі електротехнічних комплексів графітації великої потужності. Застосовано комбінації процедур нормалізації та поліноміальної регресії даних для повних опорів та зсувів за фазою, отриманих методами чисельного моделювання процесів електромагнітного перетворення енергії, конвективного теплообміну та теплопровідності в області головних шинних пакетів печей графітації змінного струму із врахуванням геометричних розмірів, розташування шин та температурних режимів. Точність ідентифікації електричних параметрів підвищується у 2–2,5 рази у порівнянні з традиційною методикою.*

**Ключові слова:** *піч графітації, коротка мережа, однофазні шихтовані пакети, електричні параметри, чисельне моделювання, нормалізація, поліноміальна регресія.*

**D. S. Yarymbash, S. T. Yarymbash, I. M. Kylymnyk**

**Identification of electrical parameters of powerful short-circuit laminated packs**

*New identification techniques of the electrical parameters of short-circuit single-phase laminated bus packs of high power graphitization complex are proposed. The combination of the procedures of normalization and polynomial regression data of the impedance and phase, obtained by numerical modelling of electromagnetic energy conversion, convective heat transfer and thermal conductivity of the main sections of bus packets graphitization furnace AC with the geometrical sizes of buses, their location and temperature conditions, are applied. Compared with the traditional method the accuracy of electrical parameters identification by 2–2,5 times are increased.*

**Key words:** *graphitization furnace, short network, one phase laminated packs, electrical parameters, numerical modelling, normalization, polynomial regression.*

УДК 621.316.11

А. П. Заболотний<sup>1</sup>, Д. В. Федоша<sup>2</sup>, В. С. Мамбаєва<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Канд. техн. наук, доцент Запорізького національного технічного університету

<sup>2,3</sup>Аспірант Запорізького національного технічного університету

## МОДЕЛЬ ВИЗНАЧЕННЯ ТОПОЛОГІЇ МЕРЕЖІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

*Запропоновано модель визначення топології мережі на основі використання оцінки поліпшення варіанту схеми при зміні топології в окремих зонах, а також алгоритм визначення шляху прокладання магістралі.*

**Ключові слова:** *мережа, система електропостачання, магістраль, модель, топологія.*

На практиці для систем електропостачання використовують радіальні, магістральні і змішані топології мережі.

Враховуючи переваги та недоліки різних топологій, а також рекомендації та методики щодо використання магістральної та радіальної схем [1], неможливо однозначно визначити топологію всієї мережі. Але використовуючи той фактор, що магістральна мережа має меншу вартість, можливо за допомогою оціночного методу визначити топологію мережі шляхом порівняння вартості капітальних та експлуатаційних витрат радіальної та магістральної схем.

Такий підхід дає можливість визначити зони застосування різних топологій, тобто в залежності від вихідних умов з'являється можливість отримати повністю радіальну, магістральну або змішану схему.

Рішення задачі визначення топології мережі умовно можливо розділити на два етапи.

На першому етапі необхідно побудувати радіальну мережу методом потенційної поверхні, який застосо-

вується для рішення задач побудови мереж та в процесі своєї роботи визначає окремі зони, до яких можливо використати оціночний метод [2].

Для уточнення зон, за фактором «заборони» розташування джерел живлення, слід скористатися методами розпізнавання, у відповідності до яких передбачається розбиття простору об'єкту на області, що не перехрещуються, кожна з яких відповідає зображенню одного й того ж класу, до якого допускається елементарне аналітичне описання [3].

На другому етапі будується магістральна мережа за відомими результатами побудови радіальної схеми, при цьому застосовується алгоритм, метою якого є покращення варіанту радіальної мережі за зведеними витратами.

Основною задачею при побудові магістральної мережі є визначення шляху прокладання магістралі та кількості приймачів, які до неї приєднуються.

Для вирішення цієї задачі застосовується теорія графів. При цьому мережа асоціюється з її лінійним графом, де за вершини приймаються джерело живлення та