

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ УДЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ КЕРНА В ПРОЦЕССЕ ГРАФИТАЦИИ

Запропоновано методику ідентифікації температурних залежностей питомих електричних опорів ядра печі графітації із застосуванням спеціального об'єктно-орієнтованого функціонального базису і температурних залежностей питомих електричних опорів його компонентів. Забезпечується висока точність обробки даних 3D моделювання електромагнітних полів у процесі графітації електродів.

Предложена методика идентификации температурных зависимостей удельных электрических сопротивлений ядра печи графитации с использованием специального объектно-ориентированного функционального базиса и температурных зависимостей удельных электрических сопротивлений его компонентов. Обеспечивается высокая точность обработки данных 3D моделирования электромагнитных полей в процессе графитации электродов.

Значительная энерговооруженность электротехнических комплексов графитации (ЭТКГ), большая энергоемкость технологических процессов графитации и устойчивая тенденция увеличения стоимости электроэнергии обуславливают рост себестоимости электродной продукции, так как затраты на электроэнергию могут быть сопоставимыми или даже превосходить затраты на сырье [1].

Решение сложных производственных задач по снижению энергозатрат при графитации заготовок электродов, обеспечению заданных технологических режимов и, как следствие, снижению брака и повышению качества электродной продукции реализуется путем создания новых или модернизации действующих систем автоматизированного управления ЭТКГ. Действующие системы обеспечивают контроль входных параметров по стороне высокого напряжения питающих и компенсирующих трансформаторов, что не достаточно для получения достоверной информации об электрических параметрах ядра печей графитации (ПГ), особенно при высоких температурах, которые могут достигать 3000 °С [2].

Внедрение новых перспективных сенсорных систем на стороне отводов главного шинопакета и токоподводах ПГ требует разработки соответствующего обеспечения для идентификации температурных зависимостей электрических параметров ядра и, прежде всего, его удельного электрического сопротивления (УЭС). Данные инструментального контроля электрических параметров ядра ПГ должны дополняться данными математического моделирования пространственной системы печной петли (ПП) и ядра ПГ, в которых учитываются механизмы электромагнитного и электротеплового преобразования энергии переменного тока, температурные зависимости электрофизических свойств материалов, особенности конструкции вторичных токопроводов и ядра ПГ. Эта задача является актуальной как в научном, так и в практическом плане.

Известные плоскопараллельные постановки при моделировании электромагнитных и электротепловых процессов [3, 4] не удовлетворяют требованиям высокой точности при идентификации электрических параметров ядра ПГ, который представляет собой сложную пространственную многокомпонентную систему, состоящую из цилиндрических заготовок электродов, электропроводящей пересыпки, заполняющей пространство

между графитируемыми заготовками, электропроводящей шихты шунтирующих слоев (рис. 1). Для обеспечения достоверности результатов 3D моделирования и точности идентификации УЭС ядра ПГ при различных температурных режимах графитации требуется разработка новых подходов для аппроксимации данных полевых расчетов на основе специального объектно-ориентированного функционального базиса для температурных зависимостей УЭС компонентов ядра.

Целью работы является идентификация температурных зависимостей УЭС ядра ПГ посредством применения специального объектно-ориентированного функционального базиса на основе температурных зависимостей УЭС его компонентов, обеспечивающего высокую точность аппроксимации данных 3D моделирования электромагнитных процессов при графитации заготовок электродов.

Преобразование электрической энергии переменного тока в ядре ПГ определяется взаимосвязанными электромагнитными процессами, которые описываются электромагнитной моделью в частотной формулировке для амплитуд векторного магнитного и электрического потенциалов (рис. 1):

$$\begin{cases} j\omega \frac{\mathbf{A}_i}{\rho(\theta)_i} + \nabla \times \left(\frac{1}{\mu_0 \mu_3} \mathbf{B}_i \right) = 0, & \mathbf{B}_i = \nabla \times \mathbf{A}_i, \\ \nabla \cdot \left(\frac{\nabla \cdot \mathbf{V}_i + j\omega \mathbf{A}_i}{\rho(\theta)_i} \right) = 0, & \forall i \in [1, \dots, 6] \end{cases} \quad (1)$$

где \mathbf{A} – векторный магнитный потенциал (ВМП); \mathbf{B} – магнитная индукция; V – электрический потенциал; $\rho(\theta)$ – УЭС компонентов ядра и вторичных токопроводов; θ – температура; ω – угловая частота; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; μ_3 – эквивалентная относительная магнитная проницаемость, индексы $i = 1, 2, 3$ соответствуют областям ядра (заготовки электродов, пересыпка, шунтирующий слой), $i = 4, 5, 6$ – токопроводам, графитовой плите, проводниковым материалам шинных пакетов печной петли.

Амплитуды напряженностей электрического и магнитного полей связаны с амплитудами электрического и векторного магнитного потенциалов выражениями:

$$\begin{cases} \mathbf{E}_i = -\nabla \cdot \mathbf{V}_i - j\omega \mathbf{A}_i, \\ \mathbf{H}_i = (\mu_0 \mu_i)^{-1} \nabla \times \mathbf{A}_i, \end{cases} \quad \forall i \in [1, \dots, 6] \quad (2)$$

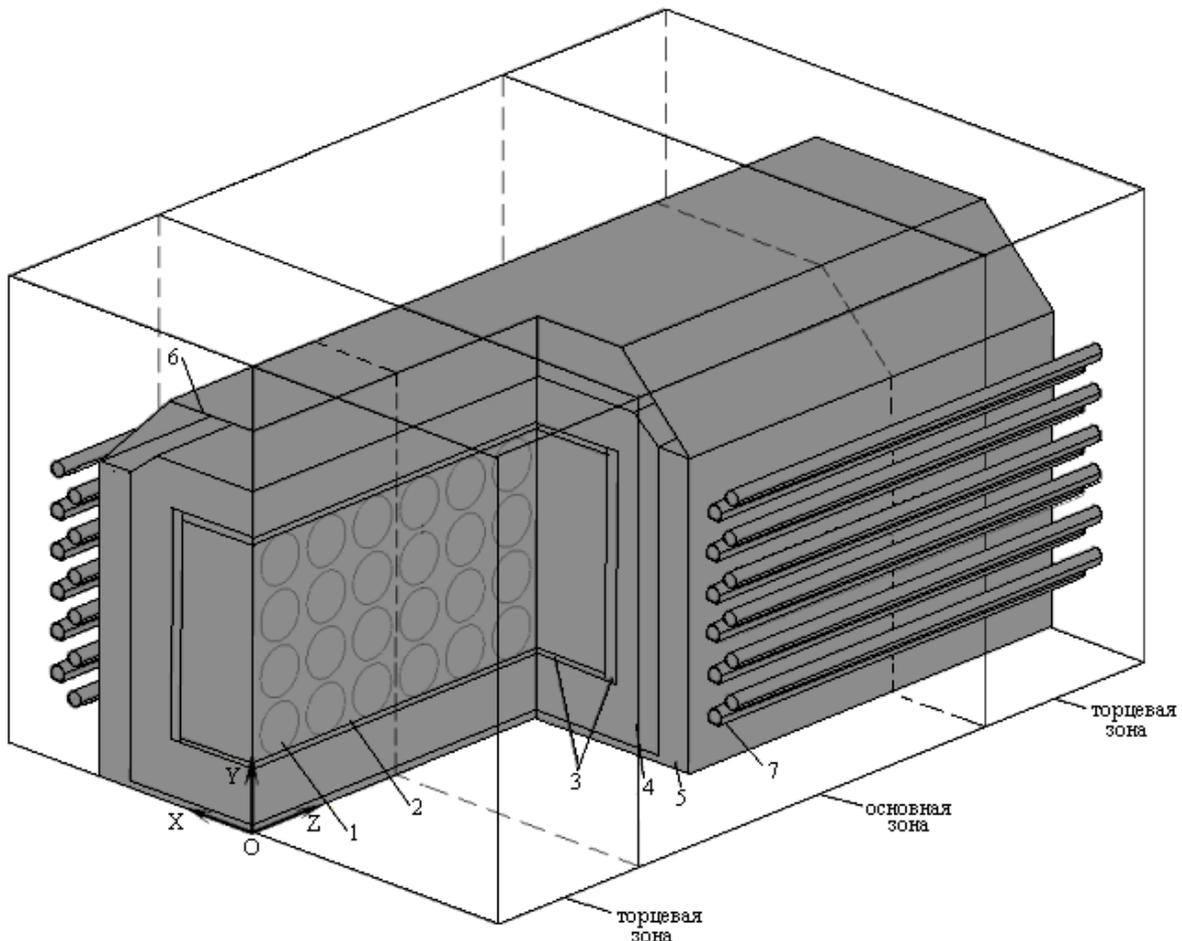


Рис. 1. Структура расчетной области ПГ: 1 – графитируемые заготовки электродов; 2 – пересыпка зерна; 3 – электропроводящая засыпка (шунт); 3 – теплоизоляционная шихта; 5 – шамотная футеровка; 6 – кожух; 7 – боковой шинный пакет

Система уравнений электромагнитной модели (1) замыкается условиями Кулона [5] $\nabla \cdot \mathbf{A}_i = 0$, $\forall i \in [1, \dots, 6]$ и граничными условиями вида:

$$\begin{cases} \mathbf{n}_{i,j} \times (\mathbf{H}_i - \mathbf{H}_j) = 0 \Big|_{\forall i,k \in (1,6), i \neq k} \\ \mathbf{n}_{i,j} \cdot (\mathbf{J}_i - \mathbf{J}_j) = 0 \Big|_{\forall i,k \in (1,6), i \neq k}, \mathbf{J} = \frac{\mathbf{E}}{\rho(\theta)}, \end{cases} \quad (3)$$

– на границах сопряжения электропроводящих сред, $\mathbf{A} = 0$ – на границах магнитной изоляции и внешних границах,

$$\left\{ \mathbf{A}_j = 0 \Big|_{\forall j \in (1,6)}, V_j = \varphi_j \Big|_{\forall j \in (1,6)}, \mathbf{n}_j \cdot \mathbf{J}_j = 0 \Big|_{\forall j \in (4,6)}, \right. \quad (4)$$

– на внешних границах расчетной области.

Распределение температур в расчетной области зерна задавалось по данным [1, 6] в соответствии с принятым температурным режимом графитации.

Для идентификации температурных зависимостей УЭС для компонентов зерна ПГ (заготовки электродов, электропроводная пересыпка и шихта шунтирующего слоя) применялись нелинейные функции:

$$\begin{cases} \rho_i(\theta) = \rho_{0,i} + \sum_{k=1}^2 a_{k,i} \cdot \operatorname{erfc}[b_{k,i} \cdot (\theta - c_{k,i})] + \\ + \sum_{m=1}^2 d_{m,i} \cdot \exp[-g_{m,i} \cdot (\theta - \gamma_{m,i})^2] \end{cases} \quad \forall i \in 1,2,3. \quad (5)$$

Значения параметров регрессии в соотношениях (5) определяются на множествах экспериментальных данных $\{\tilde{\theta}_{\text{эксп}}\}_j, j \in (1,3)$ и $\{\tilde{\rho}_{\text{эксп}}\}_j, j \in (1,3)$ [7] в структуре средств MathCAD с использованием функции **genfit** и вектора частных производных:

$$\begin{pmatrix} \partial \rho_i / \partial \rho_{0,i} \\ \partial \rho_i / \partial a_{k,i} \\ \partial \rho_i / \partial b_{k,i} \\ \partial \rho_i / \partial c_{k,i} \\ \partial \rho_i / \partial d_{m,i} \\ \partial \rho_i / \partial g_{m,i} \\ \partial \rho_i / \partial \gamma_{m,i} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ \frac{\operatorname{erfc}(b_{k,i}(\theta - c_{k,i}))}{\sqrt{\pi}} \\ \frac{2 \cdot a_{k,i} \cdot e^{-b_{k,i}^2(\theta - c_{k,i})^2} \cdot (\theta - c_{k,i})}{\sqrt{\pi}} \\ \frac{2 \cdot a_{k,i} \cdot b_{k,i} \cdot e^{-b_{k,i}^2(\theta - c_{k,i})^2}}{\sqrt{\pi}} \\ e^{-g_{m,i}(\theta - \gamma_{m,i})^2} \\ -d_{m,i} \cdot e^{-g_{m,i}(\theta - \gamma_{m,i})^2} \cdot (\theta - \gamma_{m,i})^2 \\ d_{m,i} \cdot g_{m,i} \cdot e^{-g_{m,i}(\theta - \gamma_{m,i})^2} \cdot (2\theta - 2\gamma_{m,i}) \end{pmatrix}, \quad \forall i \in (1,3), k = (1,2), m = (1,2)$$

приводятся в табл. 1.

Сравнение УЭС, рассчитанных по уравнениям регрессии (5), с экспериментальными данными [7, 8] показало, что адекватный выбор функционального вида уравнений регрессии (5) при идентификации

температурных зависимостей УЭС компонентов керна ПГ, метода и программного обеспечения для определения коэффициентов нелинейной регрессии обеспечивает высокую точность (рис. 2). Погрешность идентификации не превышает 1,43% – для заготовок электродов, 0,95% – для пересыпки керна и 0,9% –

для шихты шунтирующих слоев керна (рис. 2). Это также обеспечивает точность реализации математической модели электромагнитных процессов в печной петле и керна (1) с условиями (2) – (5) в структуре средств Comsol Multiphysics.

Таблица 1

Коэффициенты нелинейной регрессии для идентификации температурных зависимостей УЭС электродов ($i = 1$), пересыпки ($i = 2$) и шунтирующих слоев керна ($i = 3$)

Номер компонент керна	$\rho_{0,i}$	$a_{1,i}$	$b_{1,i}$	$c_{1,i}$	$d_{1,i}$	$g_{1,i}$	$\gamma_{1,i}$
		$a_{2,i}$	$b_{2,i}$	$c_{2,i}$	$d_{2,i}$	$g_{2,i}$	$\gamma_{2,i}$
$(i = 1)$	16,5028	21,488	4,016	$1,037 \cdot 10^3$	20,9106	$1,7853 \cdot 10^{-6}$	–
		8,4323	5,6387	$2,0797 \cdot 10^3$	–9,9033	$2,1678 \cdot 10^{-6}$	$2,9423 \cdot 10^3$
$(i = 2)$	695,3645	$1,105 \cdot 10^3$	$3,683 \cdot 10^{-3}$	164,5072	203,0551	$2,8354 \cdot 10^{-5}$	$2,8823 \cdot 10^3$
		$2,9027 \cdot 10^3$	$1,3736 \cdot 10^{-3}$	1562,05	–	–	–
$(i = 3)$	860,475	$1,62 \cdot 10^3$	$3,838 \cdot 10^{-3}$	169,394	497,707	$6,399 \cdot 10^{-6}$	413,488
		–	–	–	–	–	–

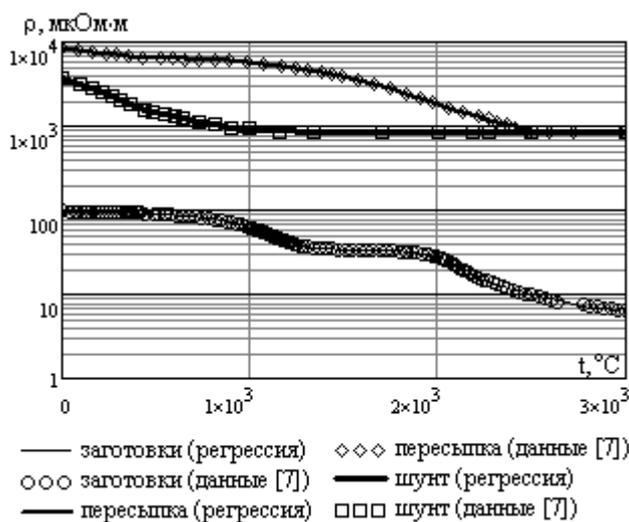


Рис. 2. Температурные зависимости УЭС заготовок электродов ($i = 1$), пересыпки ($i = 2$) и шунтирующих слоев керна ($i = 3$)

Численный эксперимент проводился для заданного массива температурных режимов графитации [20 °C, 500 °C, 1000 °C, 1500 °C, 2000 °C, 2500 °C, 3000 °C]. Для каждого значения температуры керна итерационный вычислительный процесс соответствовал принятым значениям токовой и угловой погрешностей для токов керна и шинных пакетов $\epsilon_{r_{\text{min}}} \leq [\epsilon_{r_{\text{min}}}]$, $\epsilon_{\theta_{\text{min}}} \leq [\epsilon_{\theta_{\text{min}}}]$.

Сравнение расчетных токов в керна с экспериментальными данными регистрации токовых нагрузок в токоподводах ПГ (класс точности регистратора – 0,2 [8]) позволило оценить токовую погрешность, значения которой не превышают 3,8%.

Анализ данных моделирования полей векторного магнитного и электрического потенциалов в керна ПГ позволил выделить в нем торцевые ($m = 1$) и основные зоны ($m = 2$). Длина торцевых зон соответствовала длине укладки трех вертикальных рядов заготовок электродов. Для каждой зоны керна рассчитывались комплексные амплитуды токов

$$\left\{ \begin{aligned} I_{\text{керна}}|_m &= \sqrt{\dot{I}_x \cdot \dot{I}_x^* + \dot{I}_y \cdot \dot{I}_y^* + \dot{I}_z \cdot \dot{I}_z^*}|_m, \\ \dot{I}_x|_m &= \iint_{\text{Скерна}_{yz}} \dot{J}_x dydz|_m, \quad \dot{I}_y|_m = \iint_{\text{Скерна}_{xz}} \dot{J}_y dx dz|_m, \\ \dot{I}_z|_m &= \iint_{\text{Скерна}_{xy}} \dot{J}_z dx dy|_m, \end{aligned} \right. \quad (7)$$

значения энергии магнитного поля

$$W|_m = \frac{1}{2} \iiint_{V_m} (\mathbf{B} \cdot \mathbf{H}) dx dy dz, \quad (8)$$

активные потери

$$P|_m = \iiint_{V_m} \sigma_m^{-1} \dot{J} \cdot (\dot{J})^* dx dy dz, \quad m = 1, 2. \quad (9)$$

С использованием соотношений (7) – (9) определялись активные, реактивные и полные электрические сопротивления для торцевых и основных зон керна

$$R|_m = \frac{P|_m}{\dot{I} \cdot \dot{I}^*|_m}, \quad X_m = \omega L_m, \quad L_m = \frac{2 \cdot W|_m}{\dot{I} \cdot \dot{I}^*|_m},$$

$$Z|_m = \sqrt{R^2 + X^2}|_m, \quad m = 1, 2.$$

и средние значения УЭС для этих зон

$$\rho|_m = \frac{R|_m \cdot (S|_m)^2}{V|_m}, \quad m = 1, 2. \quad (10)$$

Температурные зависимости УЭС торцевых и основных зон керна идентифицировались на функциональном базисе

$$\rho_{\text{керна}}(\theta)|_m = \rho_{\text{керна},0} + \sum_{i=1}^3 \alpha_{m,i} \cdot \rho_i(\theta), \quad m = 1, 2, \quad (11)$$

что позволило определить коэффициенты линейной регрессии (табл. 2) с помощью функцию **linfit** математического пакета MathCAD.

Нормирование температурных зависимостей УЭС основных и торцевых зон керна показало, что они практически идентичны друг другу (рис. 3). Это позволило применить при расчетах УЭС торцевых зон

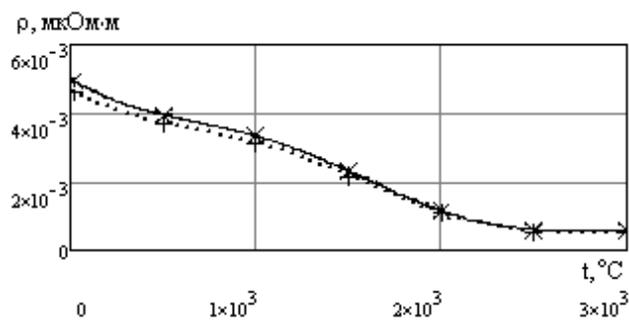
$$\rho_{\text{кern}}(\theta)_1 = k_T \cdot \rho_{\text{кern}}(\theta)_2$$

коэффициент добавочных потерь в этих зонах k_T , который для заготовок электродов диаметром 500 мм достигает значения равного 1,068.

Таблица 2

Коэффициенты линейной регрессии для идентификации температурных зависимостей УЭС зон керна.

Зоны керна	$\rho_{\text{кern},m,0}$	$\alpha_{1,i}$	$\alpha_{2,i}$	$\alpha_{3,i}$
торцевые	$4,534 \cdot 10^{-5}$	$2,526 \cdot 10^{-6}$	$5,521 \cdot 10^{-7}$	$3,175 \cdot 10^{-8}$
основные	$3,773 \cdot 10^{-5}$	$2,587 \cdot 10^{-6}$	$5,534 \cdot 10^{-7}$	$3,73 \cdot 10^{-8}$



×× Данные численного эксперимента для торцевых зон керна
— Аппроксимация для торцевых зон керна
++ Данные численного эксперимента для основной зоны керна
.... Аппроксимация для основной зоны керна

Рис. 3. Температурные зависимости УЭС торцевых и основных зон керна ПГ

При изменении температуры керна его индуктивное сопротивление остается практически постоянным, поэтому изменение полного сопротивления керна определяется только изменением его активного сопротивления и, следовательно, УЭС его основной зоны.

Для оценки значений добавочных потерь в керне определялись температурные зависимости УЭС керна на постоянном токе. Расчеты выполнялись по данным моделирования электромагнитных полей в формулировках скалярных магнитных и электрических потенциалов и соотношениям (7) – (11). Коэффициент добавочных потерь определялся отношением УЭС керна на переменном токе промышленной частоты к УЭС керна на постоянном токе, что позволило идентифицировать его температурные зависимости для заданного вида уравнения нелинейной регрессии:

$$k_D(\theta)_i = \eta_i + \beta_i \cdot \exp(-\zeta_i \cdot (\theta_{\text{max}} - \theta)^9), i = 1, 2. \quad (12)$$

Определение коэффициентов регрессии в уравнении (12) выполнялось аналогично как для (11). Значения коэффициентов регрессии составили $\eta = 0,159$, $\beta = 0,808$, $\zeta = 0,66 \cdot 10^{-12}$ для торцевых зон ($i = 1$) и $\eta = 0,163$, $\beta = 0,874$, $\zeta = 0,657 \cdot 10^{-11}$ – для основных зон ($i = 2$) при $\nu = 3,80$, $\theta_{\text{max}} = 3000$ °C. Относительная погрешность уравнений (12) по данным моделирования не превышает 0,8 %.

Так как при температурах керна превышающих 2000 °C его УЭС существенно уменьшается (рис. 3),

то влияние поверхностного и внешнего поверхностного эффектов будет выражено сильнее. Это обуславливает увеличение добавочных потерь и, следовательно, коэффициента добавочных потерь, который возрастает от значений 1,0159 – 1,0163 при температурах ниже 2000 °C до значений 1,088 – 1,093 при температуре 2500 °C и 1,097 – 1,104 – при температуре 3000 °C (рис. 4). Причем при высоких температурах графитации воздействие этих эффектов более интенсивное, хотя разброс значений коэффициентов добавочных потерь не превышает 1%.

Таким образом, обладающие высокой точностью идентификации температурных зависимостей УЭС керна соотношения (11), (12), позволяют обеспечить технологический контроль температуры графитации. Для этого на токоподводах печи графитации с помощью регистратора [8] получают осциллограммы напряжения и тока, определяют их амплитуды и сдвиги по фазе, рассчитывают активную и полную мощность графитации, УЭС керна и УЭС его торцевой и основных зон, а далее из соотношения (11) определяют их температуры. При измерениях на постоянном токе (при технологических отключениях ПГ) данные УЭС для керна, его торцевых и основных зон корректируют с использованием температурных зависимостей для коэффициентов добавочных потерь (12) и из соотношения (11) определяют соответствующие температурные режимы.

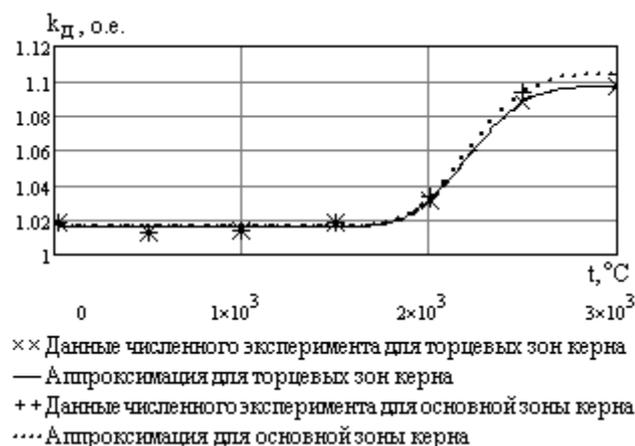


Рис. 4. Температурные зависимости коэффициента добавочных потерь для торцевых и основных зон керна ПГ

ВЫВОДЫ

Высокие температуры графитации заготовок электродов, низкая точность прямых методов их измерения, большие затраты при проведении экспериментальных исследований на действующем оборудовании обосновали необходимость численного эксперимента на базе 3-D моделей электромагнитных полей.

Высокая точность идентификации температурных зависимостей УЭС керна обеспечивается выбором объектно-ориентированного базиса функций, который образуется путем высокоточной аппроксимации температурных зависимостей УЭС заготовок электродов, пересыпки и шихты шунтирующих слоев.

Разработаны базовые подходы для технологического контроля температурного уровня графитации по данным измерений токов, напряжений и расчетов

УЭС для торцевых и основных зон керна (11) с учетом коэффициента добавочных потерь (12) для ПП переменного тока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов Д.М. Графитация крупногабаритных электродов. Процесс Ачесона. – Ростов н/Д: РГАСХМ ГОУ. – 2003. – 168 с.
2. Чалых Е.Ф. Оборудование электродных заводов. – М.: Металлургия, 1990. – 238 с.
3. Ярымбаш Д.С., Ярымбаш С.Т. Повышение энергоэффективности бокового шинопакета печей графитации переменного тока // Технічна електродинаміка. Тематичний вип. "Силова електроніка і енергоефективність". – 2011. – С. 229-233.
4. Ярымбаш Д.С., Килимник И.М., Ярымбаш С.Т. Особенности определения параметров электрической схемы замещения печной петли печи графитации переменного тока // Электротехніка та електроенергетика. – 2010. – №2. – С. 36-43.
5. Ярымбаш Д.С. Идентификация электрических параметров печной петли мощных печей графитации // Электротехніка та електромеханіка. – 2012. – №1. – С. 49-54.
6. Панов Е.Н., Лелека С.В., Коржик М.В. Комплекс сбора данных для высокотемпературных промышленных агрегатов // ПИКАД. – 2005. – №2. – С. 28-30.
7. Кузнецов Д.М., Фокин В.П. Процесс графитации углеродных материалов. Современные методы исследования. – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2001. – 132 с.
8. Ярымбаш Д.С., Ярымбаш С.Т., Тютюнник А.В. Особенности контроля электрических параметров, мощности и энергопотребления во время кампании графитации в печи переменного тока // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2006. – Вип. 3/2006(38). С. 91-95.

Bibliography (transliterated): 1. Kuznecov D.M. *Graphitization of the large electrodes. Acheson process.* Rostov-on-Don: RGASHM GOU, 2003. 168 p. 2. Chalyh E.F. *Equipment of the Electrode Plants.* Moscow, Metallurgija Publ., 1990. 238 p. 3. Yarymbash D.S., Yarymbash S.T. Increasing energy efficiency of side bus package of graphitization furnaces AC. *Technical electrodynamics. Special Issue "Power electronics & energy efficiency"*, 2011, pp. 229-233. 4. Yarymbash D.S.,

Kilimnik I.M., Yarymbash S.T. The features of determining the electrical equivalent circuit furnace hinges parameters of the AC graphitization furnace. *Electrical engineering and power industry*, 2010, no.2, pp. 36-43. 5. Yarymbash D.S. The identification of the circuit furnace electrical parameters of the power graphitization furnaces. *Electrical engineering & electromechanics*, 2012, no.1, pp. 49-54. 6. Panov E.N., Leleka S.V., Korzhik M.V. The complex data collection for high-temperature industrial aggregates. *PiKAD*, 2005, no.2, pp. 28-30. 7. Kuznecov D.M., Fokin V.P. *The process of graphitization of carbon materials. Modern methods of investigation.* Novocheerkassk, JuRGTU Publ., 2001. 132 p. 8. Yarymbash D.S., Yarymbash S.T., Tjutjunnik A.V. The features of the control of electrical parameters, power and energy consumption during the campaign graphitization furnaces AC. *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University*, 2006, no.3(38), pp. 91-95.

Поступила (received) 20.02.2014

Ярымбаш Дмитрий Сергеевич, к.т.н., доц.,
Запорожский национальный технический университет,
69063, Запорожье, ул. Жуковского, 64,
тел./phone +38 066 965 86 73, e-mail: yarymbash@gmail.com

D.S. Yarymbash
Zaporizhzhya National Technical University
64, Zhukovsky Str., Zaporizhzhya, 69063, Ukraine

Identification of temperature dependences of center-punch specific electrical resistance during graphitization.

A temperature dependence identification technique is worked out for graphitization furnace center-punch specific electrical resistance through applying a special object-oriented functional basis and temperature dependences of its components specific electric resistance. High accuracy of 3D electromagnetic field simulation data processing during electrode graphitization is maintained.

Key words – identification, temperature dependence, center-punch specific electrical resistance, object-oriented functional basis, electrode graphitization, 3D electromagnetic fields.