

## ЧИСЛЕННО-ПОЛЕВОЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И ЭЛЕКТРОТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ШИННЫХ ПАКЕТАХ ПЕЧЕЙ ГРАФИТАЦИИ

Д. С. Ярымбаш

*Предложена универсальная методика расчета шинных пакетов печей графитации переменного тока на базе численного анализа трехмерных электромагнитных и электротепловых моделей, учитывающих пространственное расположение элементов печной петли и особенности конструкции. Методика характеризуется вычислительной эффективностью и точностью. Реализация критериев равной загруженности шин по плотности тока и удельным электрическим потерям для выбора конструктивных параметров торцевых шинных пакетов позволяет уменьшить их массу, электрические потери и повысить энергоэффективность графитации заготовок электродов.*

*Ключевые слова: печи графитации, печная петля, торцевые шинные пакеты, численно-полевой анализ, сопряженные электромагнитные и электротепловые модели, критерии равной загруженности, конструктивные параметры, энергоэффективность.*

На современном этапе предъявляются жесткие требования к уровню качества и себестоимости электродной продукции, которые обеспечивают ее конкурентоспособность и ликвидность на рынках России, Украины, стран СНГ и дальнего зарубежья. Технологический процесс графитации заготовок электродов мощных электродуговых сталеплавильных печей характеризуется высокой энергоемкостью (до 3–6 МВт·ч на тонну продукции [1]). Большая мощность печей графитации переменного тока (ПГ), составляющая 8–10 МВт, и продолжительность технологической кампании, достигающая 2–3 суток [1, 2], обуславливают настоятельную потребность поиска новых путей повышения энергоэффективности.

Потери в шинных пакетах печной петли ПГ достигают 47,6 % активной мощности графитации, в том числе, в боковых шинных пакетах (БШП) – 8,9 % , в торцевых (ТШП) и токоподводах – 38,7 % [1]. Необходимо также учесть особенности пространственной конструкции ТШП и расположение его элементов относительно БШП, которые влияют на распределение токов, их плотности в шинах ТШП, токоподводах ПГ и, следовательно, потери активной мощности, а также сечение и массу шин, соответствие эксплуатационным температурным ограничениям [3]. Эти факторы обосновывают актуальность задачи рационального конструирования шинных пакетов новых или модернизируемых ПГ большой мощности, обеспечивающих повышение энергоэффективности графитации.

Как правило, при проектировании коротких сетей ПГ переменного тока применяются

методы теории электрических цепей [4] и средних геометрических расстояний [5], которые базируются на целом ряде допущений и упрощений, не отражающих реальную картину электромагнитных полей. Это не позволяет достоверно учитывать особенности электромагнитного взаимодействия токоведущих элементов печной петли, токоподводов и керна ПГ, приводит к увеличению погрешностей при расчете сопротивлений, распределения токов, электрических потерь в шинных пакетах, и, как следствие, температурных режимов их работы.

Совершенствование и развитие методик проектирования шинных пакетов сложных коротких сетей мощных ПГ переменного тока базируется на анализе пространственных взаимосвязанных электрических и магнитных полей в области печной петли на основе методов математического моделирования и универсальных пакетов программ расчета.

В работах [6, 7] реализуются математические модели электромагнитных и электротепловых процессов в печной петле в плоскопараллельной постановке. Это ограничивает возможность их применения для исследования ТШП со сложной пространственной структурой и обуславливает необходимость разработки универсального подхода, позволяющего с высокой точностью определять распределение токов, их плотности, удельные потери в шинах ТШП и токоподводах ПГ на основе пространственного численно-полевого анализа электромагнитных и электротепловых процессов в печной петле ПГ.

## ЧИСЛЕННО-ПОЛЕВОЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И ЭЛЕКТРОТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ШИННЫХ ПАКЕТАХ ПЕЧЕЙ ГРАФИТАЦИИ

Целью работы является разработка универсальной методики энергоэффективного выбора геометрических параметров шинных пакетов печей графитации переменного тока на основе численно-полевого анализа трехмерных электромагнитных и электротепловых моделей, учитывающих температурные зависимости электрофизических и теплофизических свойств шин и токоподводов, отображающих особенности конструкции и пространственного расположения элементов печной петли относительно друг друга.

Для реализации сформулированной цели выделяется расчетная область ТШП и БШП со стороны переднего торца ПГ переменного тока (рисунок 1). Медные шины пле-

тей ТШП 1 крепятся к графитовым токоподводам 4 посредством нажимных пластин, что обеспечивает электрический контакт шин и токоподводов. Пакеты медных лент 3, ширина и суммарная толщина которых соответствует ширине и толщине плети ТШП, соединяют токоподводы друг с другом в вертикальном направлении. Внутренние плети ТШП имеют специальные уравниватели из медных шин 2, которые располагаются на уровне нижних граней токоподводов второго и четвертого ряда. Монтаж токоподводов и торцевой стенки ПГ обеспечивает электрический контакт графитовой плиты 8 с токоподводами и выравнивание электрических потенциалов их торцов со стороны керна ПГ.

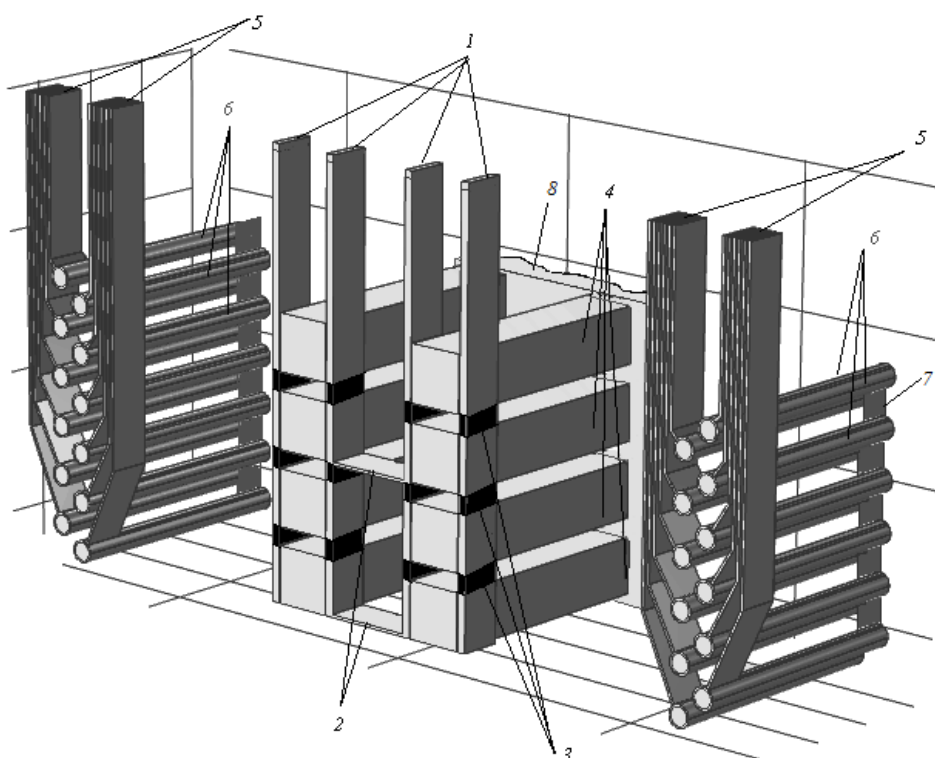


Рисунок 1 – Шинные пакеты переднего торца печи графитации переменного тока

слева и справа от ТШП монтируются вертикальные алюминиевые шины 5 БШП, которые свариваются с горизонтальными алюминиевыми трубами 6. Алюминиевые трубы БШП соединяются с вертикальными алюминиевыми шинами 7, расположенными вдоль ПГ с постоянным шагом. Они выполняют функцию электрических уравнивателей, выравнивающих распределение потенциалов в БШП. Торцевая стенка и керн на рисунке 1 не приводятся.

Для сокращения затрат вычислительных и временных ресурсов в расчетной области

выделяется плоскость симметрии, что позволяет уменьшить объем расчетной области в два раза (рисунок 2).

Процессы преобразования электрической энергии переменного тока в энергию электромагнитного поля и тепловую в ТШП, БШП и токоподводах ПГ описываются сопряженными электромагнитными и электротепловыми моделями [8]. Рассматривается частотная формулировка пространственной модели электрического и магнитного полей как сопряженная система уравнений Максвелла для комплексных амплитуд векторного маг-

нитного и электрического потенциалов в геометрических областях торцевого и бокового шинного пакетов, токоподводов, керна, теплоизоляции и окружающей среды [8]

$$\begin{cases} j\omega\sigma_j(\theta_j)(A_j + \nabla V_j) + \nabla \times \left[ \frac{1}{\mu_0\mu_j} \nabla \times A_j \right] = 0, \\ \nabla \cdot (\sigma_j(\theta_j) \cdot (\nabla \cdot V_j + j\omega A_j)) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где  $A$  – векторный магнитный потенциал (ВМП);

$V$  – электрический потенциал;

$\sigma(\theta)$  – удельная электропроводность;

$\mu$  – относительная магнитная проницаемость;

$\theta$  – температура;

$\omega$  – угловая частота.

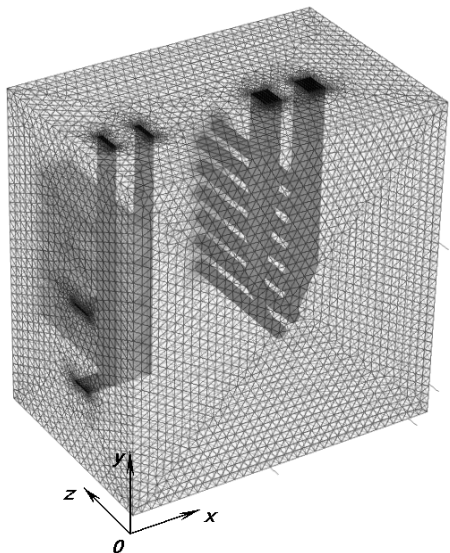


Рисунок 2 – Расчетная область переднего торца печи графитации переменного тока

Уравнения электротепловой модели в этих областях имеют вид [8]

$$\begin{cases} \nabla(\lambda(\theta)_j \nabla \theta_j) - Q(\theta)_j = 0, \\ Q(\theta)_j = \sigma_j(\theta_j)^{-1} \mathbf{J}_j \cdot \mathbf{J}_j^*, j = 1, 2, 3, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\lambda(\theta)$  – коэффициент теплопроводности;

$Q(\theta)_j, j \neq 4$  – удельная мощность источников тепла;

$\mathbf{J}_j$  – плотность тока.

На границе между медными шинами и графитовыми токоподводами вводятся вспомогательные подобласти толщиной 10 мм, ширина которых соответствует ширине шины, высота – высоте графитового токоподвода, а сопротивление в направлении перпендику-

лярном поверхности контакта – переходному контактному сопротивлению.

Для окружающей среды принимается система уравнений конвективного теплообмена и линейная температурная зависимость плотности охлаждающего воздуха

$$\begin{cases} \rho(\theta) = \rho_0(1 - \beta(\theta - \theta_0)) \quad [8] \\ (\mathbf{v}_j \cdot \nabla) \mathbf{v}_j = -\rho(\theta_j)_j^{-1} \nabla p_{j,j} + \nu(\theta_j)_j \Delta \mathbf{v}_j - \\ - \beta_j(\theta_j - \theta_0) \mathbf{g}, \\ \rho(\theta_j)_j C_p(\theta_j)_j (\mathbf{v}_{i,j}, \nabla \theta_j) - \\ - \nabla(\lambda(\theta_j)_j \nabla \theta_j) = 0_j, \\ \text{div} \mathbf{v}_j = 0, j = 4, \end{cases} \quad (3)$$

где  $\rho(\theta)$  – плотность воздуха;

$C_p(\theta)$  – удельная теплоемкость воздуха;

$\nu(\theta)$  – кинематическая вязкость воздуха;

$\beta$  – коэффициент объемного расширения воздуха;

$\rho_0$  – плотность воздуха при температуре  $\theta_0$ ;

$\mathbf{v}_j$  – скорость охлаждающего воздуха;

$\mathbf{g}$  – ускорение свободного падения.

Для системы уравнений (1) выполняются условия Кулона  $\nabla \cdot \mathbf{A}_j = 0$ .

Значениями электрохимических потенциалов на границах соединения проводников из разных материалов можно пренебречь и описать условия сопряжения в виде

$$\begin{cases} \mathbf{n}_{i,k} \times (\mathbf{H}_i - \mathbf{H}_k) = 0 \Big|_{\forall i,k \in (1,4), i \neq k}, \\ \mathbf{H} = (\mu_0\mu)^{-1} \nabla \times \mathbf{A}, \\ \mathbf{n}_{i,k} \cdot (\mathbf{J}_i - \mathbf{J}_k) = 0 \Big|_{\forall i,k \in (1,4), i \neq k}, \\ \mathbf{J} = \sigma(\theta) \cdot \mathbf{E}, \mathbf{E} = -\nabla V - j\omega \mathbf{A}, \\ \mathbf{n}_{i,k} \cdot (\lambda(\theta)_i \nabla \theta_i - \lambda(\theta)_k \nabla \theta_k) = 0 \Big|_{\forall i,k \in (1,3), i \neq k}, \\ \theta_i - \theta_k = 0, \end{cases} \quad (4)$$

где  $\mathbf{H}$  – напряженность магнитного поля;

$\mathbf{E}$  – напряженность электрического поля.

На плоскости  $uOz$  формулируются условия электромагнитной и температурной симметрии [8]

$$\begin{cases} \mathbf{n}_i \times \mathbf{H}_i = 0 \Big|_{i=1,4}, \\ \mathbf{n}_i \cdot \mathbf{J}_i = 0 \Big|_{i=1,4}, \\ \mathbf{n}_i \cdot (\lambda(\theta)_i \nabla \theta_i) = 0, \theta_{i+} - \theta_{i-} = 0 \Big|_{i=1,4}, \end{cases} \quad (5)$$

## ЧИСЛЕННО-ПОЛЕВОЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И ЭЛЕКТРОТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ШИННЫХ ПАКЕТАХ ПЕЧЕЙ ГРАФИТАЦИИ

а на внешних границах – условия вида

$$\begin{cases} A_j = 0 \Big|_{\forall j \in (1,4)}, \\ V_j = \varphi_j \Big|_{\forall j \in (1,3)}, \\ n_j \cdot (J_j) = 0 \Big|_{j=4}. \end{cases} \quad (6)$$

Теплообмен ТШП и БШП с воздухом в режиме свободной конвекции с высокой точностью описывается известным эмпирическим соотношением [4], которое с учетом лучистой составляющей теплоотдачи преобразуется в граничное условие

$$n_j \cdot \left( \lambda(\theta_j)_j \nabla \theta_j \right) = 1,8 \cdot 10^{-4} \cdot \alpha_j \cdot (\theta_j - \theta_{oc}) + 5,7 \cdot \varepsilon \cdot (1 - \varphi) \cdot \left( \left( \frac{\theta_j}{1000} \right)^4 - \left( \frac{\theta_{oc}}{1000} \right)^4 \right), j = 1, 2, \quad (7)$$

где  $\alpha_k$  – коэффициент, зависящий от высоты (длины) шин;

$\varphi$  – коэффициент лучистого экранирования шин.

При исследовании электромагнитных и электротепловых полей (1)–(3) в областях ТШП и БШП переднего торца ПГ условие (7) позволяет рассматривать системы уравнений (1), (2) инвариантно к системе (3).

Сформулированные выше допущения существенно упрощают численную реализацию систем сопряженных дифференциальных уравнений (1)–(3) в трехмерной области печной петли методом конечных элементов [8]. Размеры конечных элементов в расчетной области варьируются (рисунок 2). В шинах ТШП и БШП, уравнительных соединениях обеспечивается большая плотность пространственной решетки узлов конечных элементов. В областях токоподводов и возле внешних границ размеры конечных элементов увеличивают, что позволяет сократить затраты вычислительных и временных ресурсов и не ухудшает точность расчетов.

При численно-полевым моделированием выполняются итерации по критериям точности комплексных амплитуд полного тока в ТШП и БШП как по модулю  $\varepsilon_{I_{ТШП}} \leq [\varepsilon_{I_{ТШП}}]$ , так и углу  $\varepsilon_{\varphi_{ТШП}} \leq [\varepsilon_{\varphi_{ТШП}}]$

Принимаются во внимание данные моделирования, соответствующие требованиям ПУЭ и допустимым уровням нагрева вторичных токопроводов [3].

Точность численного моделирования оценивается путем сопоставления расчетных данных для токов в токоподводах ПГ и токов

в ТШП друг с другом, а также с экспериментальными данными регистрации токов в токоподводах ПГ для различных кампаний графитации (класс точности регистратора – 0,2) [9]. Относительная невязка суммарных токов токоподводов ПГ и ТШП составляет 0,15 % для модулей амплитуд и 0,4 % по фазе. При сравнении с данными регистрации токов в токоподводах ПГ относительная токовая погрешность расчета не превышает 6,45 %. Поэтому составляющей погрешности, обусловленной численной реализацией (1)–(3), можно пренебречь.

Высокая точность численного моделирования обеспечивает достоверную оценку комплексной амплитуды тока, протекающего через произвольно ориентированную площадку  $S(S_{yz}, S_{xz}, S_{xy})_i$

$$\begin{cases} I_S|_i = \sqrt{I_x \cdot I_x^* + I_y \cdot I_y^* + I_z \cdot I_z^*} \Big|_i, \\ I_x|_i = \iint_{S_{yz}} \dot{J}_x dydz \Big|_i, I_y|_i = \iint_{S_{xz}} \dot{J}_y dx dz \Big|_i, \\ I_z|_i = \iint_{S_{xy}} \dot{J}_z dx dy \Big|_i, \end{cases} \quad (8)$$

активных потерь и удельных активных потерь в участках ТШП, БШП и токоподводах

$$P|_i = \iiint_{V_i} \sigma_i^{-1} \dot{\mathbf{J}} \cdot (\dot{\mathbf{J}})^* dx dy dz, \quad p|_i = \frac{P|_i}{V_i}, \quad (9)$$

энергии магнитного поля и удельной энергии магнитного поля в расчетной области

$$W|_i = \frac{1}{2} \iiint_{V_i} (\mathbf{B} \cdot \mathbf{H}) dx dy dz, \quad w|_i = W|_i / V_i. \quad (10)$$

С учетом соотношений (8)–(10) могут быть определены электрические параметры ТШП, БШП и токоподводов ПГ

$$\begin{aligned} R|_i &= \frac{P|_i}{S|_i}, \quad W|_i = \sum_k |I_k|^2 \cdot \frac{L_k}{2}, \quad X_k = \omega L_k, \\ Z|_i &= \sqrt{R^2 + X^2} \Big|_i. \end{aligned} \quad (11)$$

Расчетом поля векторных магнитных потенциалов (рисунок 3) установлено, что преобладающей проекцией ВМП является  $A_y$ .

Максимальное значение амплитуды  $A_y$  достигается в горизонтальном сечении вертикальных шин ТШП и БШП (рисунок 3, а). Также существенным оказывается влияние

ЯРЫМБАШ Д. С.

продольной составляющей ВМП  $A_z$  в вертикальном сечении ТШП, БШП и токоподводов (рисунок 3, б). В объеме расчетной области максимальное значение модуля проекции  $A_z$  в 2,25 раза меньше максимума модуля проекции  $A_y$ . Это подтверждает, что характер объемного распределения векторного магнитного потенциала (рисунок 3, а) имеет существенные отличия от плоскопараллельного поля.

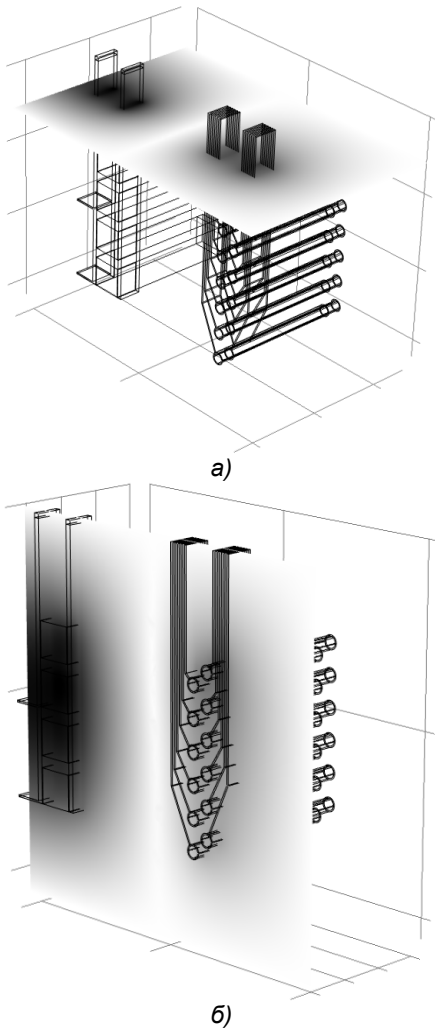


Рисунок 3 – Распределение проекций амплитуды векторного магнитного потенциала  $A_y$  в горизонтальном сечении шинных пакетов (а),  $A_z$  в вертикальном сечении шинных пакетов и токоподводов (б) в области переднего торца ПГ

Локализация энергии магнитного поля проходит вокруг вертикальных шин ТШП и БШП, верхних токоподводов и крайних труб БШП (рисунок 4, а) и определяет локализацию

удельных электрических потерь (рисунок 4, б) на участках ТШП, БШП и токоподводов.

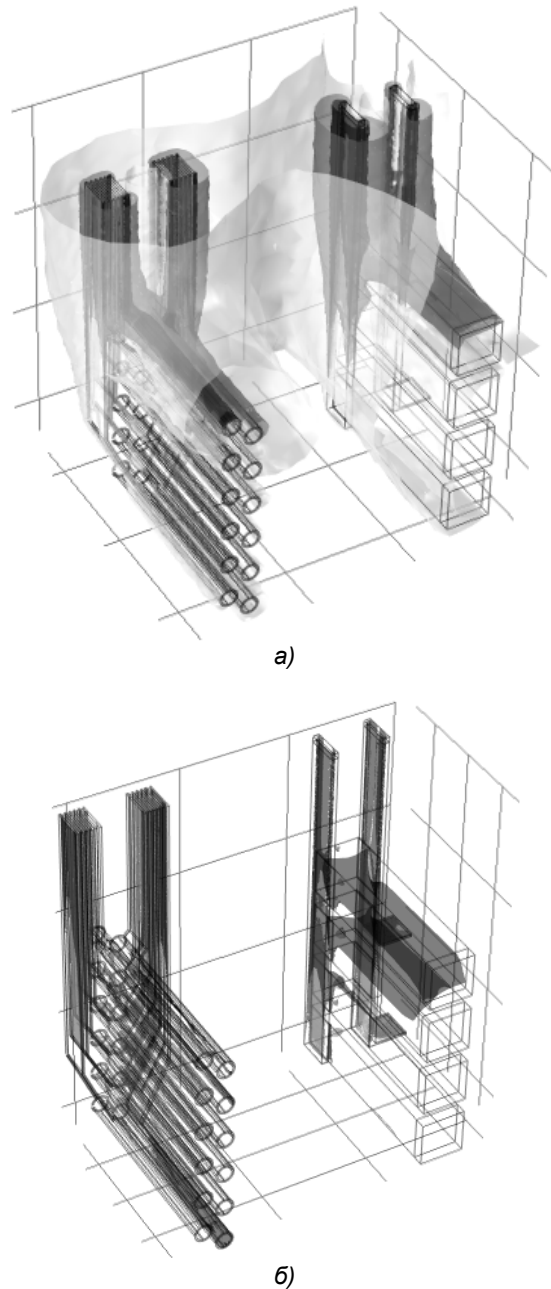


Рисунок 4 – Распределение энергии магнитного поля (а) и удельных электрических потерь (б) в области переднего торца ПГ

Эти особенности магнитного поля обуславливают неравномерное распределение электрических потенциалов (рисунок 5) и перераспределение токов в шинах ТШП и БШП, которые вытесняются из внутренних шин и локализуются в шинах между БШП и ТШП (наружные плети ТШП), в токоподводах верхнего ряда. Они приводят к неравномерному

*ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 4-2 2013*

## ЧИСЛЕННО-ПОЛЕВОЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И ЭЛЕКТРОТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ШИННЫХ ПАКЕТАХ ПЕЧЕЙ ГРАФИТАЦИИ

распределению плотности тока и удельных электрических потерь в шинах, гибких пакетах медных лент и токоподводах ПГ. Поэтому падение напряжения на вертикальных участках шин ТШП в 2,25 раза больше, чем на соответствующих участках шин БШП.

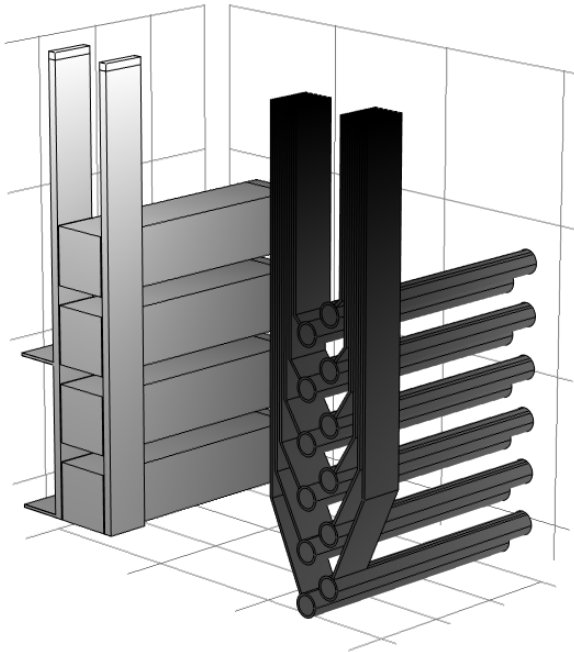
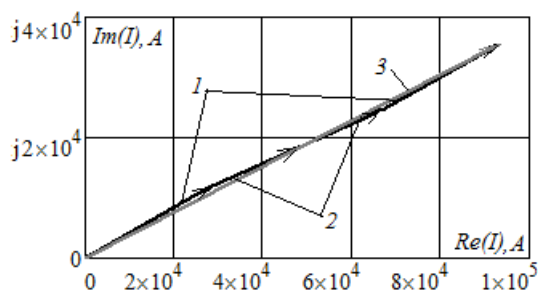


Рисунок 5 – Распределение электрических потенциалов в ТШП, БШП и токоподводах

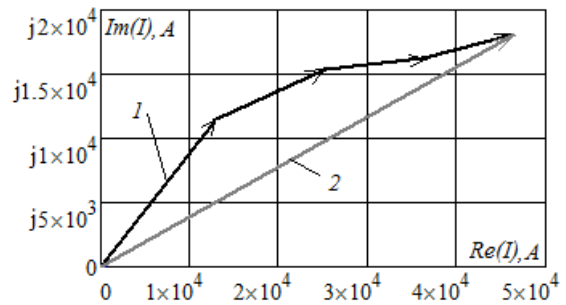
Сила тока в шинах наружных плетей ТШП в 1,4 раза больше чем в шинах внутренних, хотя сдвиг их по фазе не превышает 4,5 эл. град (рисунок 6). Электрические потери в шинах внутренних плетей ТШП более чем в 2 раза превышают соответствующие потери в шинах наружных плетей.



1 – токи в наружных плетях; 2 – токи во внутренних плетях; 3 – полный ток

Рисунок 6 – Векторная диаграмма токов в шинах ТШП

Еще сильнее эти эффекты проявляются при распределении токов в токоподводах ПГ (рисунок 7). Сила тока в токоподводах верхнего ряда превышает силы тока в токоподводах второго ряда в 1,35 раза, третьего ряда – в 1,59 раза, нижнего ряда – в 1,65 раза.



1 – токи в токоподводах вертикального ряда; 2 – ток вертикального ряда

Рисунок 7 – Векторная диаграмма токов в токоподводах переднего торца

Сдвиги по фазе относительно токов в токоподводах верхнего ряда составляют 24 эл. град. для токоподводов второго ряда, 37 эл. град. – для токоподводов третьего ряда и 32 эл. град. – для токоподводов нижнего ряда. Это обуславливает явно выраженную неравномерность распределения потерь в токоподводах ПГ. Электрические потери в токоподводах верхнего ряда более чем в 1,87 раза превышают соответствующие потери в токоподводах второго ряда, в 2,63 раза и в 2,84 раза – в токоподводах третьего и нижнего рядов.

Эти факторы должны учитываться при выборе энергоэффективного конструктивного исполнения ТШП и размеров его шин. Рассматриваются равно нагруженные варианты, которые соответствуют критериям равенства плотности тока и удельной мощности тепловыделения в шинах ТШП:

$$\begin{cases} J_{ш,i} = J_{эк}, \\ P_{ш,i} = P_{доп}, \end{cases} \quad (12)$$

где  $J_{эк}$  – экономическая плотность тока,  $P_{доп}$  – предельно допустимые по условиям нагрева удельные потери, которые определяются с учетом соотношения (7).

Условия (12) реализуются по данным математического моделирования с помощью соответствующих им выражений:

$$\begin{cases} S_{ш,i} |_{J_{эк}} = \frac{I_{ш,i}}{J_{эк}}, i = 1, \dots, N_{тшп}, \\ S_{ш,i} |_{p_{доп}} = \frac{P_{ш,i}}{p_{доп} \cdot l_{ш,i}}, i = 1, \dots, N_{тшп}, \end{cases}$$

где  $l_{ш,i}$  – длина  $i$ -й шины ТШП.

Определенные по этим соотношениям сечения шин могут рассматриваться как начальные приближения для вектора геометрических конструктивных параметров ТШП.

Дифференциация размеров шин ТШП осуществляется при допустимой точности итераций ( $\varepsilon \leq 2\%$ ).

Результаты моделирования и данные итерационных расчетов подтверждают возможность снижения массы проводниковых материалов на 9–12 % и потерь в ТШП на 7–15 % в сравнении с базовым вариантом.

## ВЫВОДЫ

Сформулированы сопряженные пространственные модели, отображающие особенности электромагнитных и электротепловых процессов в торцах печей графитации переменного тока, конструктивного исполнения ТШП и БШП, учитывающих температурные зависимости электрофизических и теплофизических свойств шин и токоподводов.

Разработана методика идентификации электрических параметров ТШП и токоподводов ПГ переменного тока на основе данных численно-полевого анализа, реализованного методом конечных элементов в трехмерной области торца ПГ.

Дифференциация плотности конечных элементов в пространстве расчетной области обеспечивает вычислительную эффективность и точность. Относительные невязки суммарных токов токоподводов ПГ и ТШП составляют 0,15 % для модулей амплитуд и 0,4 % для фаз. Погрешность расчетных результатов по данным регистрации токов в токоподводах ПГ не превышает 6,45 %.

Реализация критериев равной загруженности шин по плотности тока и удельным электрическим потерям для выбора конструктивных

параметров ТШП позволяет снизить его массу на 9–12 %, активные потери на 7–15 % относительно базового конструктивного исполнения, улучшить показатели энергоэффективности кампании графитации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чалых, Е. Ф. Оборудование электродных заводов [Текст]: учебное пособие для вузов / Е. Ф. Чалых. – М.: Metallurgia, 1990. – 238 с.
2. Соседов, В. П. Графитация углеродистых материалов [Текст] / В. П. Соседов, Е. Ф. Чалых. – М.: Metallurgia, 1987. – 176 с.
3. Правила устройства электроустановок. ПУЭ-2009. [Текст] Харьков: Форт, 2010. – 708 с.
4. Данцис, Я. Б. Короткие сети и электрические параметры дуговых электропечей [Текст] / Я. Б. Данцис, Г. М. Жилов. – М.: Metallurgia, 1987. – 320 с.
5. Калантаров, П. Л. Расчет индуктивностей [Текст]: справочная книга / П. Л. Калантаров, Л. А. Цейтлин. – [3-е изд.] – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.
6. Ярымбаш, Д. С. Повышение энергоэффективности бокового шинопакета печей графитации переменного тока [Текст] / Д. С. Ярымбаш, С. Т. Ярымбаш // Технічна електродинаміка. Тематичний вип. Силова електроніка і енергоефективність. – 2011, С. 229–233.
7. Ярымбаш Д. С. Особенности определения параметров электрической схемы замещения печной петли печи графитации переменного тока [Текст] / Д. С. Ярымбаш, И. М. Килимник, С. Т. Ярымбаш // Електротехніка та електроенергетика. – 2010. – № 2. – С. 36–43.
8. Ярымбаш, Д. С. Идентификация электрических параметров печной петли мощных печей графитации [Текст] / Д. С. Ярымбаш // «Электротехника и электромеханика». – 2012. – № 1. – С. 49–54.
9. Ярымбаш, Д. С. Особенности измерения переменного тока в токоподводах печей графитации [Текст] / Д. С. Ярымбаш // Електротехніка та електроенергетика. – 2005. – № 1. – С. 74–76.

**Ярымбаш Д. С.**, к.т.н., доцент, E-mail: [yarymbash@rambler.ru](mailto:yarymbash@rambler.ru), тел.: +3(8066)965-86-7, Украина, г. Запорожье, Запорожский национальный технический университет, кафедра «Электроснабжение промышленных предприятий»