

УДК 621.365.32

Д. С. ЯРЫМБАШ, канд. техн. наук

А. М. ОЛЕЙНИКОВ, д-р. техн. наук

Севастопольский национальный технический университет, г. Севастополь

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И ЭЛЕКТРОТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ОБЛАСТИ ТОРЦЕВЫХ ШИННЫХ ПАКЕТОВ ПЕЧЕЙ ГРАФИТАЦИИ

Рассмотрены сопряженные математические модели электромагнитного и температурных полей в области торцевых шинных пакетов печей графитации переменного тока. Идентифицированы активные, реактивные и полные электрические сопротивления торцевых шин, токоподводов и боковых шинных пакетов, исследовано распределение токов и электрических потерь в параллельных торцевых шинах и токоподводах. Предложена методика выбора эффективного сечения торцевых шин по критериям равной загруженности, обеспечивающая снижение массы и электрических потерь в торцевых шинных пакетах.

Розглянуто сполучені математичні моделі електромагнітного та температурного полів в області торцевих шинних пакетів печей графітації змінного струму. Ідентифіковано активні, реактивні та повні електричні опори торцевих шин, струмопідводів та бічних шинних пакетів, досліджено розподіл струмів та електричних втрат у паралельних торцевих шинах та струмовідводах. Запропоновано методику вибору ефективного перетину торцевих шин за критерієм рівної завантаженості, що забезпечує зниження маси та електричних втрат у торцевих шинних пакетах.

Введение

Устойчивая тенденция роста цен на энергоносители и острая конкуренция на внутреннем и мировом рынках обуславливают необходимость повышения качества и снижения себестоимости отечественной электродной продукции. В технологическом цикле электродного производства наиболее энергоемким является процесс графитации (до 3–6 МВт·ч на тонну продукции), продолжительность которого достигает 2–3 суток, а мощность электротехнических комплексов графитации (ЭТКГ) составляет 8–10 МВт [1, 2]. Поэтому производство ликвидной и конкурентоспособной продукции требует повышения энергоэффективности ЭТКГ.

Следует отметить, что распределение токов и электрических потерь в короткой сети (КС) ЭТКГ, в шинах токоподводов печей графитации (ПГ), боковых (БШП) и торцевых (ТШП) шинных пакетах обуславливаются их конструктивным исполнением. Согласно [1], потери активной мощности в КС достигают 47,6 % активной мощности графитации, в том числе, в БШП – 8,9 %, в токоподводах и ТШП – 38,7 %. Это определяет актуальность задачи конструирования сложных пространственно-геометрических систем шинных пакетов КС для новых или модернизируемых ЭТКГ, обеспечивающих повышение показателей их энергоэффективности.

В инженерной практике при проектировании шинных пакетов КС мощных ЭТКГ переменного тока применяются эмпирические соотношения, методы теории электрических цепей [3] и среднегеометрических расстояний [4]. В основе такого подхода лежит целый ряд допущений и упрощений, искажающих реальную картину электромагнитных процессов в сложных пространственно-геометрических системах шинных пакетов печной петли (ПП), токоподводов и керна ПГ. Это существенно увеличивает погрешности при расчетах электрических сопротивлений, токовых нагрузок, электрических потерь в токоведущих элементах, а также не позволяет адекватно оценить температурные режимы их работы.

Известная плоскопараллельная формулировка математических моделей электромагнитных процессов в ПП [5, 6] не удовлетворяет требованиям точности и

достоверности расчетных результатов для сложных пространственных систем шинных пакетов, соединяющих БШП с токоподводами ПГ. Поэтому совершенствование и развитие методик энергоэффективного проектирования сложных пространственно-геометрических конструкций шинных пакетов КС ЭТКГ переменного тока требует численного анализа пространственных электромагнитных полей в областях ПП, реализованного с использованием универсальных методов конечных элементов, обеспечивающего высокую точность идентификации токовых нагрузок и потерь в сложных пространственных системах тоководов ПГ, ТШП и БШП.

Основная часть

Цель работы заключается в численно-полевым анализе пространственных сопряженных электромагнитных и температурных полей для энергоэффективного выбора конструктивного исполнения и параметров систем ТШП, БШП и токоподводов.

Рассматривается геометрическая область систем ТШП, БШП и токоподводов со стороны заднего торца ПГ (рис. 1). Подключение БШП 4 к токоподводам 3 заднего торца ПГ осуществляется посредством медных и алюминиевых шин 1, сваренных друг с другом, пакетов медных лент 2 и нажимных плит, обеспечивающих надежный электрический контакт шин и токоподводов. Каждая плеть торцевых шин аргоновой сваркой соединяется с соответствующими трубами БШП. Для выравнивания электрических потенциалов выполняются дополнительные сварные электрические соединения 8 алюминиевых трубных шин со стороны торца БШП (рис. 1). С установленным шагом алюминиевые трубы свариваются с вертикальными алюминиевыми шинами 6, которые располагаются между рядами БШП. Эти шины выполняют функцию электрических уравнивателей для параллельных ветвей БШП. Токоподводы монтируются в торцевой стенке ПГ, а их электрический контакт с керном обеспечивается графитовой плитой 7. Керн ПГ, торцевая стенка и нажимные пластины на рис. 1 не приводятся.

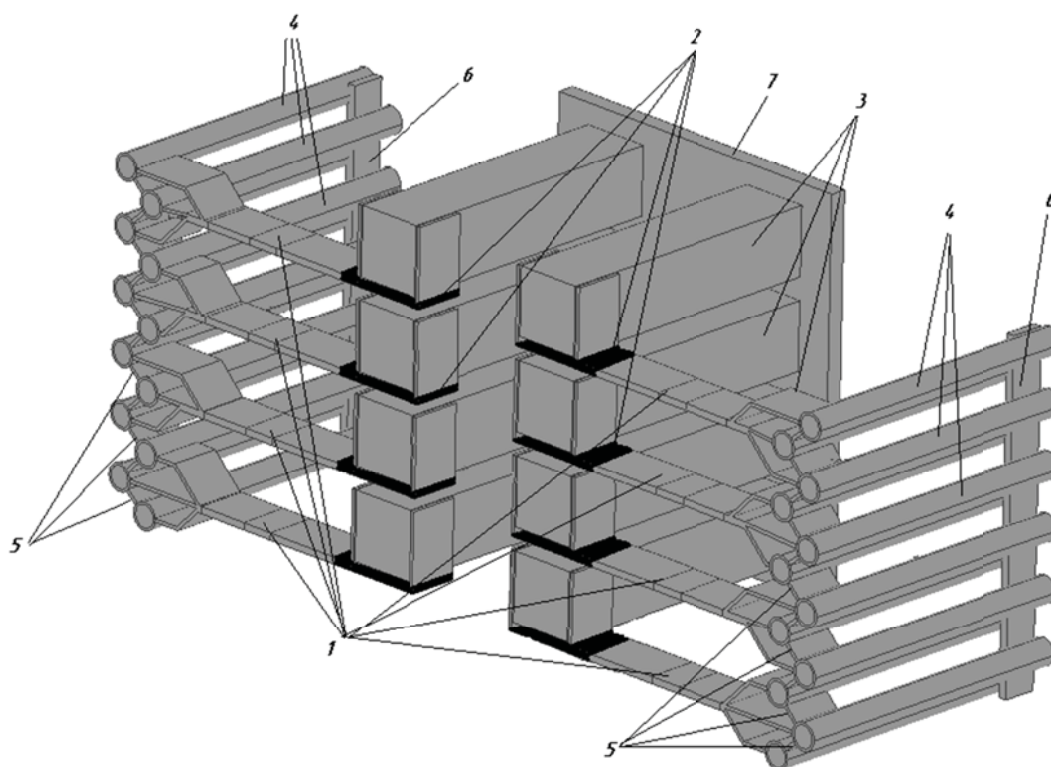


Рис. 1. Подключение БШП к токоподводам заднего торца ПГ

Исходя из особенностей взаимного расположения токоподводов, керна, ТШП и БШП, в расчетной области выделяется вертикальная плоскость симметрии. Это позволяет для

сокращения затрат времени и вычислительных ресурсов выделить в расчетной области (рис. 1) две подобласти и рассматривать только одну из них (рис. 2).

Процессы преобразования электрической энергии переменного тока в энергию электромагнитного поля и тепловую в токоведущих элементах описываются сопряженными электромагнитными и электротепловыми моделями [7].

Для БШП, ТШП и токоподводов, теплоизоляции и окружающей среды формулируется математическая модель электромагнитного поля в частотной области в виде системы уравнений Максвелла для комплексных амплитуд векторного магнитного и электрического потенциалов [7]

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

где \mathbf{A} – векторный магнитный потенциал (ВМП); V – электрический потенциал; $\sigma(\theta)$ – удельная электропроводность;

μ – относительная магнитная проницаемость;

θ – температура;

ω – угловая частота.

Система уравнений (1) дополняется условиями калибровки Кулона $div(\mathbf{A}) = 0$.

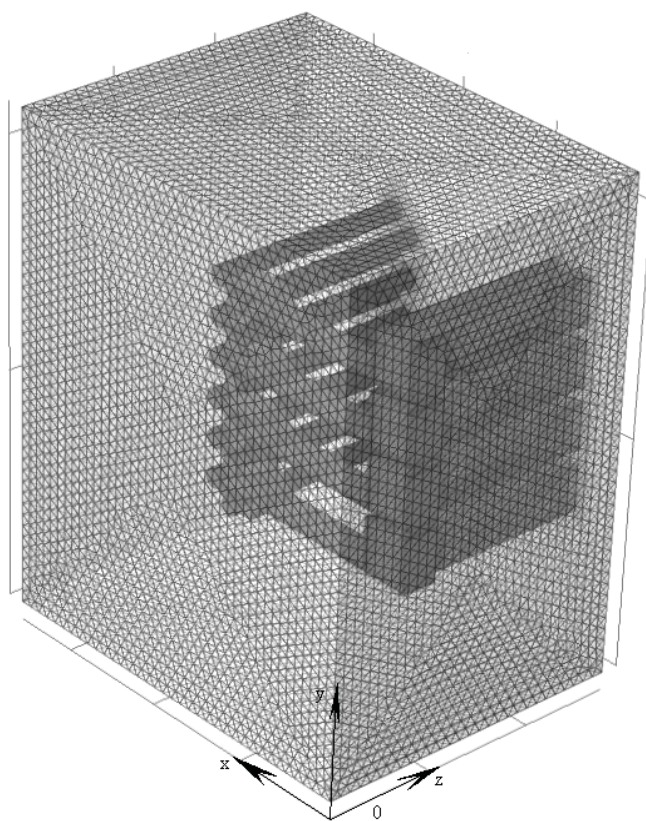


Рис. 2. Расчетная область заднего торца печи графитации переменного тока

Электротепловая модель токопроводов отображается сопряженной системой уравнений стационарной теплопроводности

$$\begin{cases} div(\lambda_j(t_j) \cdot \mathbf{grad}(t_j)) - Q_j(t_j) = 0, \\ Q_j(t_j) = \frac{1}{2} \sigma_j(t_j)^{-1} \mathbf{J}_j \cdot \mathbf{J}_j^*, \\ \mathbf{J}_j = -\sigma_j(t_j) \cdot (\mathbf{grad}(V_j) + j\omega\mathbf{A}_j), \end{cases} \quad j = 1, 2, 3, \quad (2)$$

где $\lambda_j(t_j)$ – коэффициент теплопроводности;
 $Q_j(t_j), j = 1, 2, 3$ – удельная мощность источников тепла;
 \mathbf{J}_j – амплитудное значение плотности тока в проводящей среде.

Механизмы конвективного теплообмена в режиме свободной конвекции описываются системой уравнений [7]

$$\begin{cases} (\mathbf{x}_j \cdot \nabla) \mathbf{x}_j = -\rho(\theta_j)_j^{-1} \nabla p_{,j} + \nu(\theta_j)_j \Delta \mathbf{x}_j - \beta_j (\theta_j - \theta_0) \mathbf{g}, \\ \rho(\theta_j)_j C_p(\theta_j)_j (\mathbf{x}_{i,j}, \nabla \theta_j) - \nabla (\lambda(\theta_j)_j \nabla \theta_j) = 0_j, \\ \operatorname{div} \mathbf{x}_j = 0, \quad j = 4, \end{cases} \quad (3)$$

где $\rho(\theta)$ – плотность воздуха;
 $C_p(\theta)$ – удельная теплоемкость воздуха;
 $\nu(\theta)$ – кинематическая вязкость воздуха;
 β – коэффициент объемного расширения воздуха;
 ρ_0 – плотность воздуха при температуре θ_0 ;
 \mathbf{x}_j – скорость охлаждающего воздуха;
 \mathbf{g} – ускорение свободного падения.

Значениями электрохимических потенциалов на границах соединения проводников с различными электрофизическими свойствами можно пренебречь и сформулировать условия сопряжения в виде:

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

где \mathbf{H} – напряженность магнитного поля; \mathbf{E} – напряженность электрического поля.
 На границах расчетной области задаются граничные условия

$$\begin{cases} \mathbf{A}_j = 0 \Big|_{\forall j \in (1,4)}, \\ V_j = \varphi_j \Big|_{\forall j \in (1,3)}, \\ \mathbf{n}_j \cdot (\mathbf{J}_j) = 0 \Big|_{j=4}. \end{cases} \quad (5)$$

и условия симметрии [7]

$$\begin{cases} \mathbf{n}_i \times \mathbf{H}_i = 0 \Big|_{i=1,4}, \\ \mathbf{n}_i \cdot \mathbf{J}_i = 0 \Big|_{i=1,4}, \\ \mathbf{n}_i \cdot (\lambda(\theta_i)_i \nabla \theta_i) = 0, \theta_{i+} - \theta_{i-} = 0 \Big|_{i=1,4}, \end{cases} \quad (6)$$

При описании процессов теплообмена в шинах БШП и ТШП с окружающей средой с учетом свободной конвекции и радиационной теплоотдачи применяется эмпирическое соотношение [3], которое преобразуется в граничное условие

$$\begin{aligned} \mathbf{n}_j \cdot \left(\lambda(\theta_j)_j \nabla \theta_j \right) &= 1,8 \cdot 10^{-4} \cdot \alpha_j \cdot (\theta_j - \theta_{oc}) + \\ &+ 5,7 \cdot \varepsilon \cdot (1 - \varphi) \cdot \left[\left(\frac{\theta_j}{1000} \right)^4 - \left(\frac{\theta_{oc}}{1000} \right)^4 \right], j = 1, 2, \end{aligned} \quad (7)$$

где α_k – коэффициент, зависящий от высоты (длины) шин; φ – коэффициент лучистого экранирования шин.

Условие (7) позволяет численно реализовывать решение системы уравнений (1), (2) инвариантно по отношению к решению системы уравнений (3).

Для численного полевого анализа электромагнитных и электротепловых процессов в зоне подключения БШП к токоподводам ПГ, трехмерная модель (1) – (3) с условием калибровки Кулона и граничными условиями (4) – (7) реализуется методом конечных элементов [7] в структуре средств ComsolMultiphysics.

Для исключения влияния переходных контактных сопротивлений на границах соединений медных шин и графитовых токоподводов на точность и устойчивость вычислительного процесса, вводятся вспомогательные подобласти, толщина которых составляет 20% от толщины шины ТШП. Удельная проводимость этих подобластей соответствует переходной проводимости на границе контакта «медь – графит». Граничные условия для вспомогательных подобластей описываются соотношениями (4).

Для сокращения затрат времени и вычислительных ресурсов размеры конечных элементов в расчетной области (рис. 2) варьируются. В шинах БШП, ТШП и уравнильных соединениях плотность конечных элементов увеличивается, а в областях токоподводов и по мере приближения к внешним границам области она снижается.

Итерационный вычислительный процесс отвечает заданным критериям точности для комплексных амплитуд полного тока в шинах БШП, ТШП и графитовых токоподводах как по модулю $\varepsilon_{I_{ТШП}} \leq [\varepsilon_{I_{ТП}}]$, так и фазовому углу $\varepsilon_{\varphi_{ТШП}} \leq [\varepsilon_{\varphi_{ТП}}]$. Данные моделирования температурных полей соответствуют требованиям ПУЭ по допустимым уровням нагрева вторичных токопроводов [8].

По данным численного моделирования выполняется оценка комплексной амплитуды тока, протекающего через произвольно ориентированную площадку $S(S_{yz}, S_{xz}, S_{xy})_i$

$$\begin{cases} I_S|_i = \sqrt{\mathbf{I}_x \cdot \mathbf{I}_x^* + \mathbf{I}_y \cdot \mathbf{I}_y^* + \mathbf{I}_z \cdot \mathbf{I}_z^*}|_i, \\ \mathbf{I}_x|_i = \iint_{S_{yz}} \mathbf{j}_x dydz|_i, \mathbf{I}_y|_i = \iint_{S_{xz}} \mathbf{j}_y dx dz|_i, \mathbf{I}_z|_i = \iint_{S_{xy}} \mathbf{j}_z dx dy|_i, \end{cases} \quad (8)$$

энергии магнитного поля и удельной энергии магнитного поля в расчетной области –

$$W|_i = \frac{1}{2} \iint_{V_i} (\mathbf{B} \cdot \mathbf{H}) dx dy dz, \quad w|_i = W|_i / V_i, \quad (9)$$

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

$$P|_i = \iiint_{V_i} \sigma_i^{-1} \mathbf{j} \cdot (\mathbf{j})^* dx dy dz, \quad p|_i = P|_i / V_i. \quad (10)$$

С использованием соотношений (8) – (10) определяются активные, реактивные и полные электрические сопротивления БШП, ТШП и токоподводов ПГ

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

Точность результатов численного моделирования оценивается путем сравнения расчетных токов в токоподводах, шинах ТШП и БШП, а также с экспериментальными

данными регистрации токовых нагрузок в токоподводах ПГ для различных кампаний графитации (класс точности регистратора – 0,2 [9]). Для суммарных токов БШП, торцевых шин и графитовых токоподводов относительная невязка для модулей амплитуд составляет 0,24 % и для фаз токов – 0,07 %. Относительная погрешность расчета распределения токов в токоподводах ПГ при сравнении с данными регистрации токов не превышает 3,73 %.

Расчетами электромагнитного поля выявлено существенное отличие объемного распределения векторного магнитного потенциала от плоскопараллельного поля. Область локализации магнитного поля определяется величинами модуля векторного магнитного потенциала, которые равны или превышают 0,35 Вб/м (рис. 3а). Поверхности, ограничивающие эту область, охватывают графитовые токоподводы и БШП. Вокруг соединений торцевых шин с БШП область локализации магнитного поля расширяется (рис. 3 а). Поверхность равной энергии магнитного поля охватывает пространство между шинами внутреннего ряда БШП, торцевыми шинами и внешними участками токоподводов ПГ (рис. 3, б).

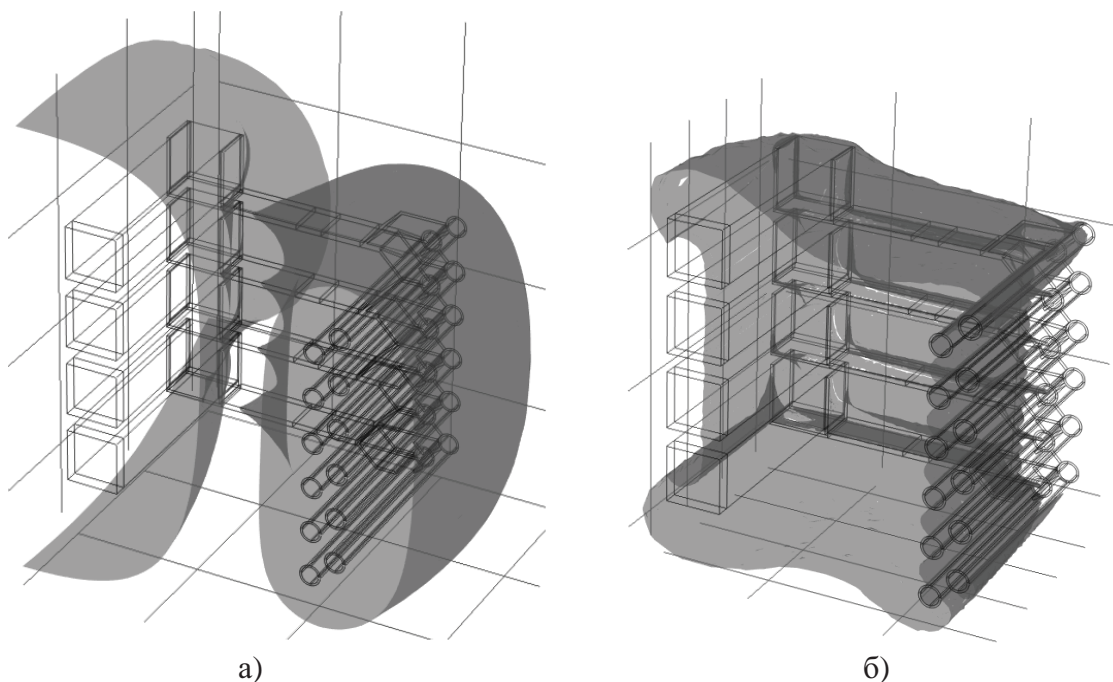


Рис. 3. Эквипотенциальная поверхность модуля амплитуды векторного магнитного потенциала $|A|$ (а), поверхность равной энергии магнитного поля (б) в области заднего торца ПГ

Указанные выше особенности локализации магнитного поля обуславливают неравномерное распределение электрических потенциалов (рис. 4 а), токов в шинах БШП и ТШП, которые вытесняются в крайние шины ТШП, БШП и шины внутреннего ряда БШП. Падение напряжения на шинах ТШП, соединяющих БШП и токоподводы заднего торца ПГ, в 2,11 раза больше чем на рассматриваемом участке шин БШП (рис. 4 а).

Вследствие внешнего поверхностного эффекта силы токов в наружных торцевых шинах в 1,35–1,4 раза больше чем во внутренних шинах. Сдвиги токов по фазе составляют порядка 4,5 эл. град (рис. 5). В токоподводах, присоединенных к соответствующим торцевым шинам, наблюдаются аналогичные силы токов и фазовые сдвиги их относительно друг друга. Из-за несимметричного расположения шин ТШП относительно оси керна ПГ токовые нагрузки крайних шин ТШП и токоподводов различаются на 5,6 – 7,2 %.

Нумерация токов в шинах и токоподводах заднего торца ПГ на векторной диаграмме (рис. 5) выполняется в порядке возрастания сверху вниз.

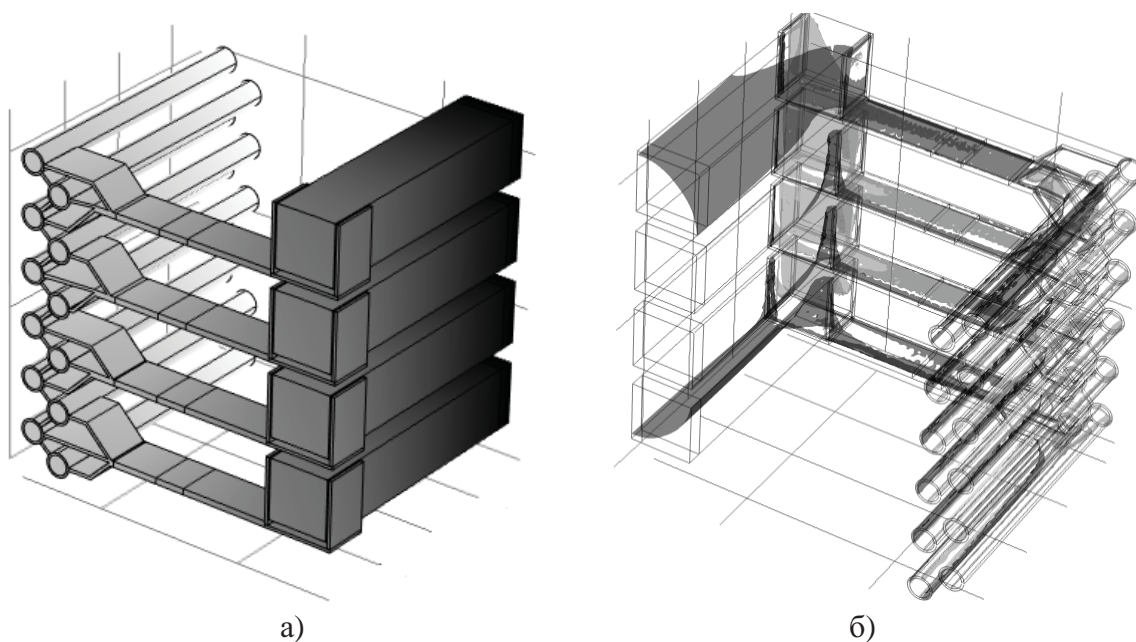


Рис. 4. Распределение электрических потенциалов (а) и удельных электрических потерь (б) в области токопроводов заднего торца ПГ

Неравномерное распределение токов в параллельных шинах ТШП и токоподводах ПГ приводит к неравномерному распределению плотности тока и, следовательно, удельных электрических потерь в торцевых шинах, гибких пакетах медных лент и токоподводах ПГ (Рис. 4 б). Электрические потери в наружных торцевых шинах и токоподводах в 1,96 раза превышают потери во внутренних шинах, при этом удельные потери на внутренних участках шин ТШП со стороны керна ПГ, более чем в 2,7 – 3,2 раза превышают потери на их наружных участках.

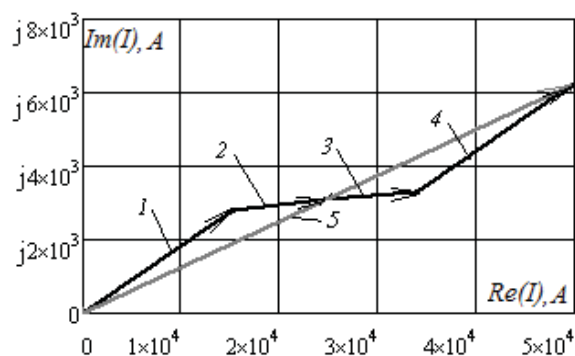


Рис. 5. Векторная диаграмма токов в торцевых шинах и токоподводах заднего торца ПГ: 1,2,3,4 – токи в торцевых шинах и токоподводах ПГ; 5 – ток графитации на половину керна

Указанные выше факторы должны учитываться при выборе энергоэффективного конструктивного исполнения торцевых шинных пакетов и размеров их шин. Для выбора эффективного сечения шин, соединяющих БШП и графитовые токоподводы

$$\begin{cases} S_{ш,i} |_{J_{ЭК}} = |I_{ш,i}| / J_{ЭК}, i = 1, \dots, N_{ТШП}, \\ S_{ш,i} |_{p_{доп}} = P_{ш,i} / (p_{доп,i} \cdot l_{ш,i}), i = 1, \dots, N_{ТШП}, \end{cases}$$

применялись критерии равной загруженности по плотности тока и удельной мощности тепловыделения:

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

где $J_{эк}$ – экономическая плотность тока;

$p_{доп}$ – предельно допустимые по условиям нагрева удельные потери;

$l_{ш,i}$ – длина i -й шины ТШП.

Рассчитанные по критериям (12) сечения шин могут рассматриваться как начальные приближения для соответствующих проекций вектора геометрических конструктивных параметров ТШП. Дифференциация поперечных размеров торцевых шин осуществляется при допустимой точности итераций ($\varepsilon \leq 2\%$).

По результатам моделирования и данным итерационных расчетов эффективных сечений торцевых шин установлена возможность снижения массы проводниковых материалов на 11–12 % и потерь в ТШП на 7–15 % по сравнению с базовым вариантом.

Выводы

Предложены сопряженные пространственные модели, отображающие особенности электромагнитных и электротепловых процессов в зоне подключения боковых шинных пакетов к токоподводам ПГ, учитывающих температурные зависимости электрофизических и теплофизических свойств шин и токоподводов.

Разработана методика идентификации электрических параметров торцевых шин, токоподводов ПГ, участков БШП со стороны заднего торца ПГ переменного тока на основе данных численно-полевого анализа, реализованного методом конечных элементов в трехмерной области БШП, токоподводов заднего торца ПГ и соединяющих их торцевых шин.

Предложена дифференциация плотности конечных элементов в пространстве расчетной области, обеспечивающая вычислительную эффективность и точность. Относительные невязки суммарных токов токоподводов ПГ и БШП составляют 0,24 % для модулей амплитуд и 0,07 % для фаз. Погрешность расчетных результатов по данным регистрации токов в токоподводах ПГ не превышает 3,73 %.

Реализация критериев равной загруженности шин по плотности тока и удельным электрическим потерям при выборе эффективных сечений торцевых шин позволяет снизить их массу на 11–12 %, активные потери на 7 % – 15 % относительно базового конструктивного исполнения и, следовательно, улучшить показатели энергоэффективности графитации.

Список литературы

1. Чалых Е.Ф. Оборудование электродных заводов [Текст]: учебное пособие для вузов / Е. Ф. Чалых. – М.: Металлургия, 1990. – 238 с.
2. Соседов В. П. Графитация углеродистых материалов [Текст] / В. П. Соседов, Е. Ф. Чалых. – М.: Металлургия, 1987. – 176 с.
3. Данцис Я. Б. Короткие сети и электрические параметры дуговых электропечей [Текст] / Я. Б. Данцис, Г. М. Жилов. – М.: Металлургия, 1987. – 320 с.
4. Калантаров П. Л. Расчет индуктивностей [Текст]: справочная книга / П. Л. Калантаров, Л. А. Цейтлин. – [3-е изд.] – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.
5. 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.
6. 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.
7. Ярымбаш Д. С. Идентификация электрических параметров печной петли мощных печей графитации [Текст] / Д. С. Ярымбаш // «Електротехніка і електромеханіка». – 2012. № 1. – С. 49–54.

8. Правила устройства электроустановок.ПУЭ-2009. [Текст] Харьков:Форт, 2010.– 708 с.

9. Ярымбаш Д. С. Особенности измерения переменного тока в токоподводах печей графитации [Текст] / Д. С. Ярымбаш // Электротехника и электроэнергетика. – 2005. – № 1. – С. 74–76.

STUDY OF ELECTROMAGNETIC AND ELECTROTHERMAL PROCESSES IN THE FIELD OF END-FACE BUS PACKAGES OF GRAPHITIZATION FURNACES

D. S. YARYMBASH, Candidate of Engineering,
A. M. OLEJNIKOV, Candidate of Engineering

The paper considers mathematical models of electromagnetic and temperature fields in the area of end-face bus packages of alternating current graphitization furnaces. It identifies active, reactive and complete electrical impedances of end-face buses, current leads and side bus packages, investigates distribution of currents and electric losses in parallel end-face buses and current leads. It offers a method for selection of effective cross-section of end-face buses based on the criteria of equal load, which ensures reduction of weight and electric losses in the end-face electric buses.

Поступила в редакцию 18.07 2013 г.