

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТОРЦЕВЫХ ОШИНОВОК ПЕЧЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРЯМОГО ДЕЙСТВИЯ

Современный этап развития электродной промышленности определяется ростом конкуренции на рынках Украины, ближнего и дальнего зарубежья, что обуславливает повышенные требования к технологическому уровню производства и показателям качества электродной продукции. Увеличение конкурентоспособности должно обеспечиваться в условиях постоянного расширения номенклатуры электродных изделий, роста их технико-экономических показателей, снижения себестоимости и, преимущественно, той ее составляющей, которая обусловлена энергозатратами. Следует отметить, что при эксплуатации электротехнических комплексов графитации (ЭТКГ) с мощными печами сопротивления прямого действия затраты на электроэнергию становятся сопоставимыми или даже превышают затраты на сырье [1].

Система автоматического управления ЭТКГ должна обеспечивать реализацию сложных задач по ужесточению технологических режимов, снижению энергозатрат и уменьшению доли брака электродной продукции. Существующие методы и системы контроля позволяют получать информацию об энергетических параметрах работы ЭТКГ только по стороне высокого напряжения питающих и компенсирующих трансформаторов, что не достаточно для анализа и синтеза высокоточных систем управления. При этом возможности получения достоверной информации об электрических и температурных параметрах графитации со стороны низкого напряжения ограничиваются из-за неравномерности распределения мощности тепловыделения в объеме керны с заготовками электродов, сложности или неосуществимости прямых измерений из-за высоких температур в токоподводах и керне, которые могут достигать 3000 °С [1].

Необходимо также принимать во внимание взаимосвязанность процессов электромагнитного и электротеплового преобразования энергии переменного тока в керне и печной петле, в том числе, в токоподводах и шинных пакетах.

Как правило, ЭТКГ рассматриваются как системы с сосредоточенными параметрами, для анализа связей в которых применяются принципы суперпозиции, методы теории электрических цепей [2] и средних геометрических расстояний [3]. При этом вводится целый ряд приближений, допущений и упрощений, существенно снижающих достоверность отображения механизмов электромагнитного и электротеплового взаимодействия токоподводов, керны печи графитации с остальными элементами печной петли и, следовательно, точность идентификации сопротивлений, токов, электрических потерь и температурных режимов работы шинных пакетов. Следовательно, данные инструментального контроля электрических параметров графитации должны дополняться данными математического моделирования основных компонентов ЭТКГ как пространственных объектов с распределенными параметрами, в которых учитываются особенности электромагнитных и электротепловых процессов, температурные зависимости электрофизических и теплофизических свойств материалов, особенности конструкции сложной системы вторичных токопроводов. Это является актуальной научно-технической задачей, обеспечивающей разработку современных высокоэффективных и высокоточных систем автоматизированного управления сложными энергоемкими ЭТКГ переменного тока.

Известные работы [4,5], в которых реализуются математические модели электромагнитных и электротепловых процессов в плоскопараллельной постановке, не удовлетворяют требованиям численно-полевого анализа при исследованиях торцевых шинных пакетов и других компонентов печной петли со сложной пространственной структурой. Математическое моделирование сопряженных трехмерных полей в комплексном представлении ортогональных проекций векторных магнитных потенциалов, магнитных и электрических напряженностей, магнитных индукций, плотностей токов в токопроводах, токоподводах и керне, трехмерных полей комплексных электрических потенциалов в электропроводящих средах, трехмерных скалярных полей температур является сложной задачей.

Решение такого класса задач на этапе разработки новых или модернизации действующих систем управления ЭТКГ, как правило, предполагает применение универсальных пакетов прикладных программ (УППП), реализующих метод конечных элементов [4].

Это обуславливает необходимость разработки специальных подходов, обеспечивающих корректный учет особенностей физических полей на границах областей с различными физическими свойствами, точность численно-полевого анализа и идентификации параметров нагруженных торцевых шинных пакетов ПГ переменного тока.

Целью работы является разработка специальных подходов для реализации метода конечных элементов в структуре средств УППП для идентификации параметров торцевых шинных пакетов, обеспечивающих вычислительную эффективность и высокую точность численно-полевого анализа на основе сопряженных электромагнитных и электротепловых моделей, отображающих особенности конструкции и электромагнитных процессов на границах сопряжения областей с различными физическими свойствами.

Для описания электромагнитных полей принимается частотная формулировка сопряженной системы уравнений Максвелла для комплексных амплитуд векторного магнитного и электрического потенциалов [4]. Вместо электростатической модели электрического поля в среде охлаждающего воздуха принимается модель для электропроводящей среды, удельная проводимость которой не превышает 0,01% от электрической проводимости токоподводов печи графитации (ПГ)

$$\begin{cases} j\omega\sigma_j(\theta_j)(\mathbf{A}_j + \mathbf{grad}(V_j)) + \mathbf{rot}[(\mu_0\mu_j)^{-1}\mathbf{rot}(\mathbf{A}_j)] = 0, \\ \mathbf{div}(\sigma_j(t_j) \cdot (\mathbf{grad}(V_j) + j\omega\mathbf{A}_j)) = 0, \end{cases} \quad j=1\dots 4, \quad (1)$$

где \mathbf{A} – векторный магнитный потенциал (ВМП); V – электрический потенциал; μ_0 – магнитная постоянная; μ – относительная магнитная проницаемость; ω – угловая частота; $\sigma(t)$ – удельная электропроводность; t – температура; $j=1,2,3,4$ – индексы, соответствующие областям медных шин торцовых шинных пакетов (ТШП), алюминиевых шин боковых шинных пакетов (БШП), токоподводов ПГ и охлаждающего воздуха.

Уравнения стационарной теплопроводности в токопроводах и токоподводах имеют вид [4]:

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

где $\lambda_j(t_j)$ – коэффициент теплопроводности; $Q_j(t_j), j \neq 4$ – удельная мощность источников тепла; \mathbf{J}_j – амплитудное значение плотности тока в проводящей среде.

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

Для режима свободной конвекции и линейной температурной зависимости плотности охлаждающего воздуха $\rho(t) = \rho_0(1 - \beta(t - \theta_0))$ механизмы конвективного теплообмена описываются сопряженной системой уравнений, содержащей стационарное уравнение Навье – Стокса в естественных переменных и стационарное уравнение теплопроводности с конвективной составляющей переноса тепла в охлаждающей среде [4]:

$$\begin{cases} (\mathbf{v}_j \cdot \nabla)\mathbf{v}_j = -[\rho_0(1 - \beta(t_j - t_0))]^{-1}\nabla p_{,j} + \mathbf{v}_j(t_j)\Delta\mathbf{v}_j - \beta(t_j - t_0)\mathbf{g}, \\ \rho_0(1 - \beta(t_j - t_0))C_{p,j}(t_j)(\mathbf{v}_j \cdot \mathbf{grad}(t_j)) - \mathbf{div}(\lambda_j(t_j)\mathbf{grad}(t_j)) = 0, \\ \mathbf{div}[\rho_0(1 - \beta(t_j - t_0)) \cdot \mathbf{v}_j] = 0, \quad j=4, \end{cases} \quad (3)$$

где $C_{p,j}(t_j)$ – удельная теплоемкость воздуха; $\mathbf{v}_j(t_j)$ – кинематическая вязкость воздуха; β – коэффициент объемного расширения воздуха; ρ_0 – плотность воздуха при температуре t_0 ; \mathbf{v}_j – скорость охлаждающего воздуха; \mathbf{g} – ускорение свободного падения.

Если пренебречь значениями электрохимических потенциалов и переходными контактными сопротивлениями на границах сопряжения электропроводящих сред с различными электрофизическими свойствами, то можно описать условия сопряжения в виде:

$$\begin{cases} (\mathbf{H}_{\tau_i} - \mathbf{H}_{\tau_k}) = 0 \Big|_{\forall i,k \in (1,4), i \neq k}, \\ (\mathbf{J}_{n_i} - \mathbf{J}_{n_k}) = 0 \Big|_{\forall i,k \in (1,4), i \neq k}, \\ (\lambda_i(\theta_i)\mathbf{grad}_n(\theta_i) - \lambda_k(\theta_k)\mathbf{grad}_n(\theta_k)) = 0, \\ \theta_i - \theta_k = 0, \end{cases} \Big|_{\forall i,k \in (1,3), i \neq k}, \quad (4)$$

где \mathbf{H}_τ – тангенциальная составляющая напряженности магнитного поля; \mathbf{J}_n – нормальная составляющая плотности электрического тока.

На границах сопряжения медных шин и графитовых токоподводов должны учитываться переходные контактные сопротивления [1,2], что приводит к разрывам первого рода при расчете поля электрических потенциалов и, как следствие, к потере устойчивости решения методом конечных элементов. Для исключения влияния этих факторов предлагается специальный подход. В окрестностях поверхностей сопряжения вводятся вспомогательные подобласти, толщина которых не превышает 20% толщины медной шины, их ширина соответствует ширине шины, а высота – высоте графитового токоподвода. Удельная проводимость вспомогательной подобласти определяется из условия равенства ее электрического сопротивления переходному контактному сопротивлению на границе «медь – графит». В этом случае граничные условия для вспомогательных подобластей описываются соотношениями (4), которые не вызывают разрывы первого рода, и обеспечивается устойчивость вычислительного процесса реализованного посредством УППП.

На плоскости uOz формулируются условия электромагнитной и температурной симметрии [4]

$$\left\{ \mathbf{H}_{\tau i} = 0 \Big|_{i=1,4}, \mathbf{J}_{ni} = 0 \Big|_{i=1,4}, \mathbf{grad}_n(\theta_i) = 0 \Big|_{i=1,4}, \right. \quad (5)$$

а на внешних границах – условия вида:

$$\left\{ \mathbf{A}_j = 0 \Big|_{\forall j \in (1,4)}, V_j = \varphi_j \Big|_{\forall j \in (1,3)}, \mathbf{n}_j \cdot (\mathbf{J}_j) = 0 \Big|_{j=4}. \right. \quad (6)$$

Теплообмен шинных пакетов в режиме свободной конвекции охлаждающего воздуха с достаточно высокой точностью можно описать известным эмпирическим соотношением [2], которое с учетом лучистой составляющей теплоотдачи преобразуется в граничное условие

$$\lambda(t_j) \mathbf{grad}_n(t_j) = 1,8 \cdot 10^{-4} \cdot \alpha_j \cdot (\theta_j - \theta_{oc}) + 5,7 \cdot \varepsilon \cdot (1 - \varphi) \cdot \left[\left(\frac{\theta_j}{1000} \right)^4 - \left(\frac{\theta_{oc}}{1000} \right)^4 \right], j = 1, 2, \quad (7)$$

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

Это позволяет рассматривать системы уравнений (1), (2) инвариантно к системе (3) и обеспечивает численную реализацию математической 3-D модели (1) – (3) с условиями (4) – (7) методом конечных элементов [4] в структуре средств ComsolMultiphysics.

Расчет электрических параметров вторичных токопроводов печной петли ПГ осуществляется на основе данных математического моделирования. Для анализа токовых нагрузок вторичных токопроводов и токоподводов ПГ определяется комплексная амплитуда тока, протекающего через произвольно ориентированную площадку $S(S_{yz}, S_{xz}, S_{xy})_i$

$$\left\{ I_{S_i} = \sqrt{\mathbf{I}_x \cdot \mathbf{I}_x^* + \mathbf{I}_y \cdot \mathbf{I}_y^* + \mathbf{I}_z \cdot \mathbf{I}_z^*} \Big|_i, I_{x_i} = \iint_{S_{yz}} \mathbf{J}_x dydz \Big|_i, I_{y_i} = \iint_{S_{xz}} \mathbf{J}_y dx dz \Big|_i, I_{z_i} = \iint_{S_{xy}} \mathbf{J}_z dx dy \Big|_i. \right. \quad (8)$$

Применяются интегральные соотношения для расчета активных потерь, их удельных значений

$$P_i = \iiint_{V_i} \sigma_i^{-1} \mathbf{J} \cdot (\mathbf{J})^* dx dy dz, \quad p_i = P_i / V_i, \quad (9)$$

и для определения энергии магнитного поля, ее объемной плотности на участках вторичных токопроводов и токоподводов ПГ

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

С учетом соотношений (8) – (10) могут быть определены полные, активные и реактивные сопротивления вторичных токопроводов печной петли ПГ

$$R_i = P_i / S_i, \quad W_i = \sum_k |I_k|^2 \cdot \frac{L_k}{2}, \quad X_k = \omega L_k, \quad Z_i = \sqrt{R^2 + X^2} \Big|_i. \quad (11)$$

Конструктивное исполнение шинных пакетов переднего торца определяется особенностями монтажа двухрядного главного шинного пакета (ГШП) секции печей ЭТКГ, отводы которого располагаются над уровнем кожуха печи. Для численно-полевого анализа электромагнитных и электротепловых процессов, идентификации токовых нагрузок, электрических потерь, температурных режимов работы, электрических сопротивлений системы вторичных токопроводов печной петли, включающей токоподводы ПГ, торцевые и боковые шинные пакеты, исследуют три варианта конструктивного исполнения ТШП (рис. 1).

Медные шины плетей ТШП крепятся к токоподводам нажимными плитами, обеспечивающими надежный электрический контакт. Пакеты медных лент либо соединяют участки вертикальных шин друг с другом (вариант 1 – рис. 1,а), либо, огибая токоподводы, свариваются с медными пластинами на его противоположной грани (варианты 2,3 – рис. 1,б,в). Монтаж токоподводов в торцевой стенке ПГ обеспечивает их электрический контакт с массивной графитовой плитой и выравнивание электрических потенциалов торцов токоподводов со стороны керна.

Для первого варианта конструктивного исполнения (рис. 1,а) вертикальные плети ТШП размещаются слева и справа относительно вертикального ряда токоподводов. Внутренние плети ТШП соединяются горизонтальными медными уравнивателями, которые располагаются на уровне нижних граней токоподводов второго и четвертого горизонтальных рядов.

Для второго и третьего вариантов конструктивного исполнения ТШП (рис. 1,б,в) плети ТШП обеспечивают парное подключение верхних и нижних токоподводов вертикального ряда. Для второго варианта конструктивного исполнения (рис. 1,б) наружная плеть ТШП соединяется с верхней парой токоподводов, а внутренняя плеть – с нижней парой. В третьем варианте конструктивного исполнения эти плети зеркально меняют свое положение относительно вертикального ряда токоподводов (рис. 1,в).

Эти варианты конструктивного исполнения ТШП исследовались методами численно – полевого анализа и в условиях промышленной эксплуатации. Размеры конечных элементов в расчетных областях варьируются. В шинах ТШП и БШП, пакетах медных лент, медных контактных плитах и уравнивающих соединениях обеспечивается большая плотность пространственной решетки узлов конечных элементов. В токоподводах ПГ и возле внешних границ расчетной области размеры конечных элементов увеличивают, что позволяет сократить затраты времени, требования к вычислительным ресурсам и не ухудшает точность расчетов. При моделировании выполняются итерации по критериям точности комплексных амплитуд токов в ТШП и БШП как по модулю $\epsilon_{I_{ТШП}} \leq [\epsilon_{I_{ТП}}]$, так и углу $\epsilon_{\varphi_{ТШП}} \leq [\epsilon_{\varphi_{ТП}}]$. 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.

Представленные варианты конструктивного исполнения ТШП апробировались в условиях промышленной эксплуатации. Погрешность расчетных результатов по данным регистрации токов в токоподводах ПГ [6] не превышает 6,45%, падений напряжения на плетях ТШП и БШП – 3,15%.

Расчетами электромагнитного поля установлено существенное отличие объемного распределения напряженностей магнитного поля (рис. 1) от соответствующего распределения для плоскопараллельного поля. Область локализации магнитного поля определяется величинами напряженностей магнитного поля, которые равны или превышают 20 кА/м. Она охватывает шины вертикальных плетей ТШП и БШП, верхний токоподвод и верхние алюминиевые трубы БШП (рис. 1). Это обуславливается неравномерным распределением токов в шинах ТШП, БШП и токоподводах. Вокруг токопроводов с большей токовой нагрузкой эта область расширяется. Для третьего варианта конструктивного исполнения объем подобласти локализации магнитного поля вокруг наружных вертикальных плетей ТШП (рис. 1,в) в 1,4 раза больше чем для второго варианта исполнения (рис. 1,б) и 1,76 раза больше по сравнению с первым вариантом исполнения (рис. 1,а). Магнитное поле вытесняется из подобласти между внутренними плетями ТШП. Эти особенности магнитного поля обуславливают неравномерное распределение падений напряжения и токов на участках ТШП, БШП и в токоподводах, существенно увеличение удельных потерь в шинах наружных плетей ТШП и в токоподводах верхнего ряда.

Для исследуемых вариантов конструктивного исполнения ТШП падение напряжения на ТШП и токоподводах в 2,1 – 2,25 раза больше чем на торцевом участке БШП. Сопротивления системы «токоподводы ПГ – ТШП – торцевой участок БШП» для рассматриваемых вариантов конструктивного исполнения ТШП меняются незначительно. Интервал их изменения не превышает 4,5% и соответствует оценке относительной погрешности расчета, не превышающей 9,5%.

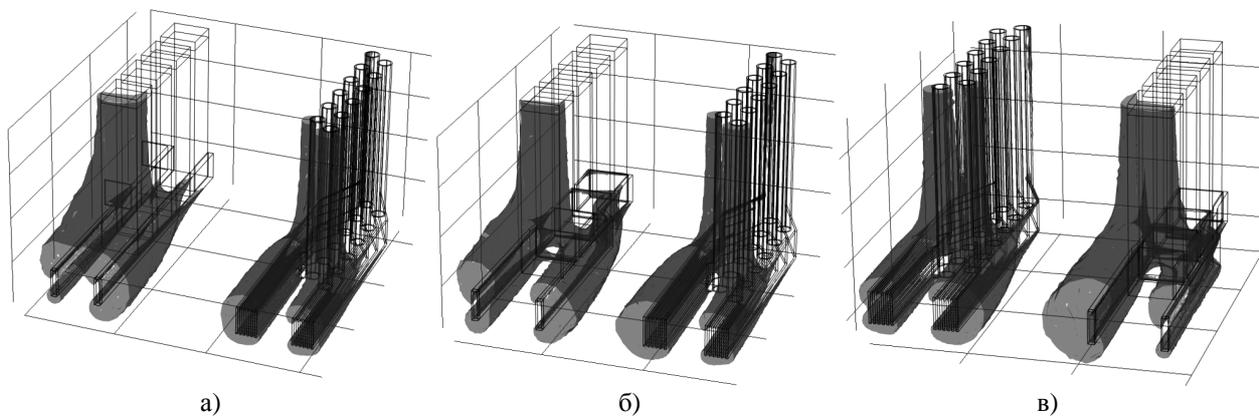


Рис. 1 Распределение амплитуд напряженности магнитного поля $|\mathbf{H}|$ в расчетной области ТШП (вид со стороны отводов ГШП): а – вариант 1; б – вариант 2; в – вариант 3

Сила тока в шинах наружных плетей ТШП превышает силу тока во внутренних плетях в 1,46 раза для первого варианта конструктивного исполнения, в 1,93 раза – для второго варианта исполнения и в 1,2 раза – для третьего варианта исполнения (рис. 2,а). Сдвиг токов по фазе в плетях ТШП составляет 4,5 эл. град., 22,5 эл. град. и 5,5 эл. град. для первого, второго и третьего вариантов конструктивного исполнения ТШП соответственно (рис. 2,а). Электрические потери в шинах внутренних плетей ТШП в 2,02 – 2,05 раза больше чем во внутренних плетях для первого и второго вариантов и в 1,18 раза – для третьего варианта конструктивного исполнения ТШП.

Неравномерность распределения токов в токоподводах ПГ выражена сильнее (рис. 2,б). Сила тока в токоподводах верхнего ряда превышает силу тока в токоподводах нижнего ряда – в 1,656, 2,219, 1,355 раза для первого, второго и третьего вариантов конструктивного исполнения ТШП соответственно. Сдвиги по фазе токов в токоподводах верхнего и нижнего рядов составляют 32 эл. град., 27 эл. град., 17 эл. град. для тех же вариантов конструктивного исполнения. Эти факторы обуславливают явно выраженную неравномерность распределения потерь в токоподводах ПГ. Электрические потери в токоподводах верхнего ряда в 1,87, 1,62, 1,59 раза превы-

шают соответствующие потери в токопроводах второго ряда, в 2,63, 4,49, 1,95 раза и в 2,84, 4,95, 1,94 раза – в токопроводах третьего и нижнего рядов для соответствующих вариантов конструктивного исполнения ТШП.

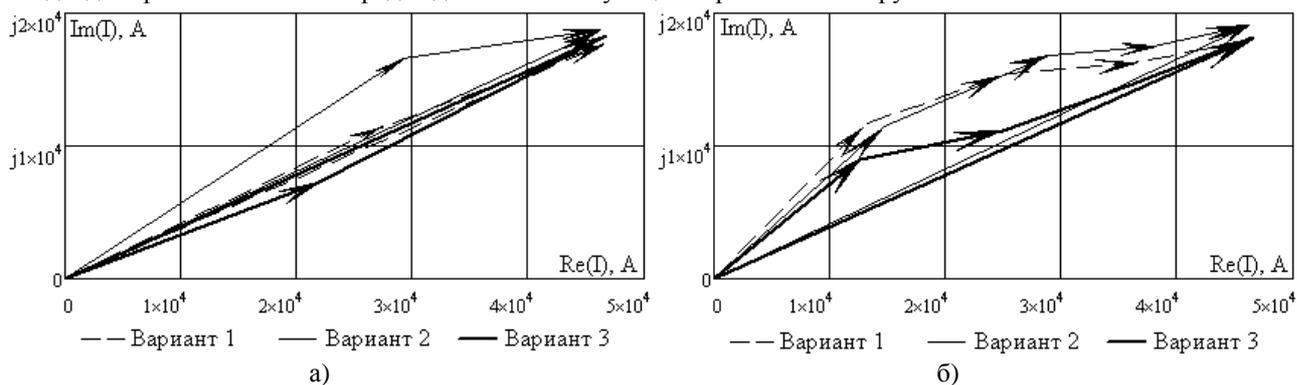


Рис. 2 Векторные диаграммы токов: а – в шинах ТШП; б – в токопроводах вертикального ряда

Конструктивные особенности ТШП, которые приводят к неравномерному распределению токов в шинах и токопроводах переднего торца ПГ, к значительному увеличению потерь в токопроводах печной петли, обуславливаются, прежде всего, расположением отводов главного шинного пакета выше уровня кожуха ПГ. Поэтому при проектировании новых или модернизации действующих секций ПГ целесообразно осуществлять монтаж главного шинного пакета секции на уровне токопроводов переднего торца печей. Это позволит отказаться от вертикальных плетей ТШП, обеспечить более равномерное симметричное распределение токов в токопроводах переднего торца ПГ, снизить падение напряжения и потери в ТШП в 2,1 – 2,35 раза.

При модернизации только шинных пакетов переднего торца ПГ третий вариант конструктивного исполнения ТШП является предпочтительным. Он характеризуется более равномерным распределением токов и потерь в параллельных ветвях ТШП и токопроводах ПГ, обеспечивая снижение электрических потерь на 12% по сравнению с первым вариантом конструктивного исполнения, и на 13,2% – относительно второго варианта. При этом масса медных шин ТШП второго и третьего вариантов конструктивного исполнения ТШП может быть уменьшена на 8 – 11 % соответственно.

Выводы.

Разработан новый подход для численно-полевого анализа электромагнитных и электротепловых процессов в области вторичных токопроводов торца ПГ со сложной пространственной конфигурацией методом конечных элементов. Он базируется на замене электростатической модели для охлаждающей воздушной среды моделью электропроводящей среды с относительно малой удельной проводимостью, применении вспомогательных под областей на границах с переходным контактным сопротивлением. Дифференциация плотности пространственной сетки конечных элементов, которая увеличивается в медных шинах ТШП, алюминиевых шинах БШП и снижается в токопроводах ПГ и на периферии расчетной области, обеспечивает устойчивость и эффективность вычислительного процесса в структуре средств УППП.

Сравнение данных математического моделирования и регистрации токов в токопроводах ПГ, падений напряжения на участках вторичных токопроводов печной петли подтверждает высокую точность численно-полевого анализа. Относительная погрешность определения токов в токопроводах не превышает 6,45%, падений напряжения на плетях ТШП и БШП – 3,15%, оценка погрешности расчета сопротивлений составляет 9,6%.

По данным идентификации электрических параметров системы «токопроводы ПГ – ТШП – торцевой участок БШП» модернизирована конструкция шинного пакета торца ПГ, что позволило снизить электрические потери на 12% и уменьшить массу медных шин на 11%.

Литература.

1. Соседов В.П. Графитация углеродистых материалов [Текст] / В.П. Соседов, Е.Ф. Чалых. – М.: Metallurgy, 1987. – 176 с.
2. Данцис Я.Б. Короткие сети и электрические параметры дуговых электропечей [Текст] / Я.Б. Данцис, Г.М. Жилов. – М.: Metallurgy, 1987. – 320 с.
3. Калантаров П.Л. Расчет индуктивностей [Текст]: справочная книга / П.Л. Калантаров, Л.А. Цейтлин. – [3-е изд.] – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.
4. 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.
5. 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.
6. Ярымбаш Д.С. Особенности измерения переменного тока в токопроводах печей графитации [Текст] / Д.С. Ярымбаш // Електротехніка та електроенергетика. – 2005. - №1. – с. 74 – 76.