

theory of electrical machines. Thereby the link providing research of all types of electrical machines by a uniform technique on the basis of principles of system and continuity is created that is important at construction of educational process.

Keywords: *electrical machines, generators, engines, equivalent circuit, moment, mechanical and operating characteristics.*

REFERENCES

1. Kitaev A. V., Gluxova V. I. Analiz paboty' asinxponnogo dvigatelja po danny' kataloga, *Avtomatika, avtomatizacziya, E'lektrotexnicheskie komplekсы' u sistemy'*, No. 1 (11), pp. 40–49.
2. Vazhnov A. I. E'lektricheskie mashiny'. Leningrad, E'nergiya, 1968, 768 p.
3. Voldek A. I. E'lektricheskie mashiny'. Leningrad, E'nergiya, 1974, 840 p.
4. Kostenko M. P., Piotrovskij L. M. E'lektricheskie mashiny' Chast'1. Kostenko, Leningrad, E'nergiya, 1972, 544 p.
5. Kostenko M. P., Piotrovskij L. M. E'lektricheskie mashiny' Chast''2, Leningrad, E'nergiya, 1973, 648 p.
6. Petrov G. N. E'lektricheskie mashiny' Chast'1. Moscow-Leningrad, GE'I, 1956, 135 p.
7. Petrov G. N. E'lektricheskie mashiny' Chast'2. Moscow-Leningrad, GE'I. 1963, 416 p.
8. Petrov G.N. E'lektricheskie mashiny' Chast'3. Moscow-Leningrad, GE'I. 1968, 244 p.

УДК 621.365.32

Ярымбаш Д. С.¹, Олейников А. М.²

¹Канд. техн. наук, доцент, Запорожский национальный технический университет, Украина, E-mail: yarymbash@gmail.com
²Д-р техн. наук, профессор, Севастопольский национальный технический университет, Украина

АНАЛИЗ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ КОНСТРУКЦИИ ТОРЦЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ БОКОВЫХ ШИННЫХ ПАКЕТОВ И ТОКОПОДВОДОВ ПЕЧЕЙ ГРАФИТАЦИИ

Предлагается методика оценки электрических параметров шинных соединений токоподводов печи графитации с боковыми шинными пакетами на основе сопряженных пространственных математических моделей электромагнитных и электротепловых процессов. При численном моделировании обеспечивается высокая точность и вычислительная эффективность расчетов путем дифференциации плотности конечных элементов в расчетной области, которая повышается в зонах концентрации магнитного поля. Выполняется анализ энергоэффективности конструктивных исполнений торцевых шинных систем печей графитации переменного тока и предлагаются технические решения для снижения массы, активных потерь и реактивной мощности.

Ключевые слова: *печь графитации, токоподвод, шинные пакеты, идентификация, электрические параметры, электромагнитные и электротепловые процессы, вычислительная эффективность, критерии равной загруженности, снижение массы активных материалов.*

Ликвидность и конкурентоспособность отечественной электродной продукции на мировом и внутреннем рынках определяется ее качеством и себестоимостью. Наиболее продолжительным (2–3 суток) и энергоемким (до 4–8 МВт·ч на тонну продукции) в технологическом цикле электродного производства является процесс графитации. Широкое распространение получили электротехнические комплексы графитации большой мощности (ЭТКГ) с печами Ачесона, которые являются печами сопротивления прямого действия. Установленная мощность этих печей в секциях современных ЭТКГ переменного тока достигает 64–100 МВт [1]. Высокая энергоемкость электродной промышленности и установившаяся тенденция роста тарифов на энергоресурсы требует поиска новых путей повышения энергоэффективности, в том числе ЭТКГ.

На уровень энергоэффективности ЭТКГ существенное влияние оказывает конструктивное исполнение короткой сети (КС), электрические потери в которой могут достигать 50 % активной мощности графитации. Они определяются потерями в боковых шинных пакетах (БШП) – 8,9 %, торцевых шинных системах (ТШС) и токоподводах – 38,7 % [2]. Поэтому задача поиска энергоэффективных конструктивных решений для сложных взаимосвязанных пространственных многокомпонентных шинных систем КС является актуальной в научном и в практическом плане.

При проектировании шинных систем КС широкое применение получили эмпирические соотношения, методы теории электрических цепей [3] и среднегеометрических расстояний [4], которые обладают алгоритмической простотой, не требуют значительных вычислитель-

ных ресурсов и специальных пакетов прикладных программ. Однако такой подход не всегда обеспечивает разработку конструктивных решений достаточного уровня энергоэффективности, так как в его основе лежит целый ряд допущений и упрощений, которые не позволяют оценивать реальную картину электромагнитных и электротепловых процессов в сложных пространственно-геометрических системах шинных пакетов печной петли (ПП), токоподводов и керн печи графитации (ПГ). Все это приводит к росту погрешностей при расчетах электрических сопротивлений, токовых нагрузок, электрических потерь в токоведущих элементах и не позволяет адекватно оценить температурные режимы их работы. Для сложных пространственно-геометрических многокомпонентных ТШС использование известных плоскопараллельных формулировок математических моделей электромагнитных и электротепловых процессов [5, 6] также не обеспечивает требуемые по точности и достоверности расчетные результаты.

Развитие и совершенствование методического обеспечения систем автоматизированного проектирования сложных пространственно-геометрических многокомпонентных ТШС в структуре КС ЭТКГ должно базироваться на численном анализе пространственных электромагнитных и температурных полей в торцевых областях ПП. Это обеспечит высокую точность идентификации электрических сопротивлений, токовых нагрузок, потерь в ТШС, БШП, токоподводах ПГ в структуре КС ЭТКГ и достоверность оценки энергоэффективности компонентов ПП.

Цель работы заключается в разработке методики оценки энергоэффективности конструкции шинных соединений токоподводов печи графитации с боковыми шинными пакетами на основе сопряженных пространственных математических моделей электромагнитных и электротепловых процессов, и идентификации электрических параметров печной петли.

Для описания электромагнитных процессов применяется сопряженная система уравнений Максвелла в геометрических областях БШП, ТШС, токоподводов, теплоизоляции и окружающей среды, сформулированная для комплексных амплитуд векторного магнитного и электрического потенциалов [7]:

$$\begin{cases} -\nabla[(j\omega\sigma_i - \omega^2 \epsilon_0 \epsilon_{r,i}) \cdot \mathbf{A}_i] + \nabla[(\sigma_i + j\omega\epsilon_0 \epsilon_{r,i}) \nabla V_i - \mathbf{J}_i^e] = 0, \\ (j\omega\sigma_i - \omega^2 \epsilon_0 \epsilon_{r,i}) \mathbf{A}_i + \nabla \times (\mu_i^{-1} \nabla \times \mathbf{A}_i) + (\sigma_i + j\omega\epsilon_0 \epsilon_{r,i}) \nabla V_i = \mathbf{J}_i^e, \end{cases} \quad i = 1, 2, 3, 4, 5, \quad (1)$$

где ω – угловая частота, рад/с; σ – удельная электрическая проводимость, См/м; $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ – электрическая постоянная, Ф/м; ϵ_r – диэлектрическая проницаемость; \mathbf{A} – векторный магнитный потенциал, Вб/м; V – комплексная амплитуда электрического потенциала, В; \mathbf{J}^e – комплексная плотность тока, А/м²; μ_i – магнитная проницаемость, Гн/м; индексы $i = 1, 2, 3, 4, 5$ – соответствуют областям: торцевых шин, боковых шинных пакетов, токоподводов, графитовой плиты, теплоизоляции и окружающей среды.

Процессы конвективного теплообмена при линейной зависимости плотности охлаждающего воздуха от температуры $\rho(T) = \rho_0(1 - \beta T)$ описываются системой уравнений вида [7]:

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

где ρ_0 – плотность газа при температуре T_0 , кг/м³; T – отклонение температуры от значения T_0 , °С; \mathbf{v} – вектор скорости свободной конвекции воздуха, м/с; p – давление, Па; $\chi = \lambda/c \cdot \rho$ – коэффициент температуропроводности, м²/с; c – теплоемкость, Дж/(кг·°С); \mathbf{g} – ускорение свободного падения, м/с²; β – коэффициент объемного расширения газа, 1/°С; ν – кинематическая вязкость, м²/с.

Для областей токоподводов и шинных систем применяются уравнения стационарной теплопроводности [7]:

$$\begin{cases} \text{div}(\lambda_i(T_i) \cdot \mathbf{grad}(t_i)) - Q_i(T_i) = 0, \\ Q_i(t_i) = \frac{1}{2} \sigma_i(T_i)^{-1} \mathbf{J}_i \cdot \mathbf{J}_i^*, \quad i = 1, 2, 3, \\ \mathbf{J}_i = -\sigma_i(T_i) \cdot (\mathbf{grad}(V_i) + j\omega \mathbf{A}_i), \end{cases} \quad (3)$$

где $\lambda_i(T_i)$ – коэффициент теплопроводности; $Q_i(T_i)$ – удельная мощность источников тепла $i = 1, 2, 3$; \mathbf{J}_i – амплитудное значение плотности тока в проводящей среде.

В области теплоизоляции ПГ токами утечки можно пренебречь и положить $Q_4 = 0$, упростив уравнение (3) к виду

$$\text{div}(\lambda_4(T_4) \cdot \mathbf{grad}(t_4)) = 0. \quad (4)$$

Система уравнений (1) замыкается условиями калибровки Кулона,

$$\text{div}(\mathbf{A}) = 0, \quad (5)$$

граничными условиями магнитной и электрической изоляции на внешних границах

$$\left\{ \begin{aligned} \mathbf{A}_i = 0 \Big|_{\forall j \in (1,5)}, V_i = \Phi_i \Big|_{\forall j \in (1,3)}, \mathbf{n}_i \cdot (\mathbf{J}_i) = 0 \Big|_{j=4,5}, \end{aligned} \right. \quad (6)$$

условиями сопряжения сред [7],

$$\left\{ \begin{aligned} (\mathbf{H}_{\tau_i} - \mathbf{H}_{\tau_k}) = 0 \Big|_{\forall i,k \in (1,4), i \neq k}, \\ (\mathbf{J}_{ni} - \mathbf{J}_{nk}) = 0 \Big|_{\forall i,k \in (1,4), i \neq k} \end{aligned} \right. \quad (7)$$

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

Для уравнений конвективной теплопередачи (2) и теплопроводности (3), (4) граничные условия определяются известными механизмами конвективного и лучистого теплообмена, которые с достаточно высокой точностью могут быть описаны соотношением [8]

$$\lambda(t_i)_i \mathbf{grad}_n(t_i) = \alpha_{\kappa_i}(\theta_i) \cdot (\theta_i - \theta_{oc}) + \alpha_{u_i} \cdot (1 - \varphi) \cdot (\theta_i^4 - \theta_{oc}^4), \quad i = 1, 2, 3, \quad (8)$$

где α_{κ} , α_u – коэффициенты конвективного и лучистого теплообмена; φ – коэффициент лучистого экранирования шин.

Условия сопряжения сред с различными теплофизическими свойствами формулируются в виде:

$$\begin{cases} (\lambda_i(\theta_i) \mathbf{grad}_n(\theta_i) - \lambda_k(\theta_k) \mathbf{grad}_n(\theta_k)) = 0, \\ \theta_i - \theta_k = 0, \end{cases} \Big|_{\forall i, k \in (1,3), i \neq k} \quad (9)$$

Для описания переходных контактных сопротивлений на границах сопряжения медных шин и графитовых токоподводов, в окрестностях этих границ вводятся вспомогательные подобласти, толщина которых не превышает 20 % толщины шины электрического соединения БШП с токоподводом ПГ. Ширина вспомогательной подобласти соответствует ширине шины, а высота – высоте токоподвода ПГ. Удельная проводимость вспомогательной подобласти определяется из условия равенства ее электрического сопротивления переходному контактному сопротивлению на границе «электропроводящая шина – графит». В этом случае граничные условия для вспомогательных подобластей описываются соотношениями (7), что обеспечивает неразрывность поля электрических потенциалов и, как следствие, устойчивость решения методом конечных элементов.

На плоскости симметрии расчетной области формулируются условия вида [7]

$$\left\{ \mathbf{H}_{\tau_i} = 0 \Big|_{i=1,5}, \mathbf{J}_{ni} = 0 \Big|_{i=1,5}, \mathbf{grad}_n(\theta_i) = 0 \Big|_{i=1,5} \right. \quad (10)$$

Граничное условие (9) позволяет разделить решение систем уравнений (1), (2), (4) электротепловой модели и системы уравнений конвективного теплообмена (3), обеспечивая высокую вычислительную эффективность при реализации 3-D модели (1)–(4) с условиями (5)–(10) методом конечных элементов [7] в структуре средств ComsolMultiphysics.

Для идентификации электрических параметров элементов торцевой области ПП выполняется расчет амплитуд токов, протекающих через ориентированные в пространстве сечения вторичных токопроводов $\Pi(\Pi_{yz}, \Pi_{xz}, \Pi_{xy})_{j,i}$

$$\begin{cases} I_{\Pi}|_{j,i} = \sqrt{\mathbf{I}_x \cdot \mathbf{I}_x^* + \mathbf{I}_y \cdot \mathbf{I}_y^* + \mathbf{I}_z \cdot \mathbf{I}_z^*} \Big|_{j,i}, \\ \mathbf{I}_x|_{j,i} = \iint_{\Pi_{yz}} \mathbf{J}_x dydz \Big|_{j,i}, \mathbf{I}_y|_{j,i} = \iint_{\Pi_{xz}} \mathbf{J}_y dx dz \Big|_{j,i}, \mathbf{I}_z|_{j,i} = \iint_{\Pi_{xy}} \mathbf{J}_z dx dy \Big|_{j,i}, \end{cases} \quad i = 1, 2, 3. \quad (11)$$

На j -х участках торцевых шинных систем, БШП и токоподводов определяются падения напряжения, полные мощности, активные потери и средние значения удельных потерь

$$\begin{cases} \Delta U_{j,i} = \varphi_j - \varphi_i, \quad \varphi = \frac{1}{\Pi} \iint \varphi d\Pi, \\ S|_{j,i} = \frac{1}{2} \sqrt{\Delta U_{j,i} \cdot \Delta U_{j,i}^* \times I_{\Pi}|_{j,i} \cdot I_{\Pi}|_{j,i}^*}, \\ P|_{j,i} = \frac{1}{2} \iiint_{V_{j,i}} \sigma_{j,i}^{-1} \mathbf{J} \cdot (\mathbf{J})^* dx dy dz, \\ p|_{j,i} = P|_{j,i} / V_{j,i}. \end{cases} \quad (12)$$

Формулируются соотношения для расчета полных, активных и реактивных мощностей в торцевой области ПП, включающей участки БШП, ТШС и токоподводов печи графитации

$$\begin{cases} S_{\Sigma} = \sum_i \left(\sum_j S|_{j,i} \right) = \sum_i \left(\sum_j \left(\frac{1}{2} \sqrt{\Delta U_{j,i} \cdot \Delta U_{j,i}^* \times I_{\Pi}|_{j,i} \cdot I_{\Pi}|_{j,i}^*} \right) \right) = \sum_i S_i = \frac{1}{2} |\Delta U_{\Pi\Pi}| \cdot |I_{\Sigma}|, \\ P_{\Sigma} = \sum_i \left(\sum_j P|_{j,i} \right) = \sum_i P_i = \frac{1}{2} |\Delta U_{\Pi\Pi}| \cdot |I_{\Sigma}| \cdot \cos(\varphi_{\Sigma}), \\ Q_{\Sigma} = \sum_i \left(\sum_j Q|_{j,i} \right) = \sum_i Q_i = \sqrt{S_{\Sigma}^2 - P_{\Sigma}^2} = \frac{1}{2} \mu_0 \iiint_V \mathbf{H} \cdot \mathbf{H}^* dx dy dz = \frac{1}{2} |\Delta U_{\Pi\Pi}| \cdot |I_{\Sigma}| \cdot \sin(\varphi_{\Sigma}). \end{cases} \quad (13)$$

С использованием выражений (11)–(13) определяются эквивалентные падения напряжения на ТШС, участках БШП и токоподводов ПГ, их активные, реактивные и полные сопротивления с учетом температурных режимов работы системы вторичных токопроводов и их соответствия требованиям ПУЭ по допустимым уровням нагрева

$$\begin{cases} \Delta U_{\text{экви}} = \frac{S_i}{|I_{\Sigma}|}, \\ Z_{\text{экви}} = \frac{\Delta U_{\text{экви}}}{|I_{\Sigma}|}, \\ R_{\text{экви}} = \frac{P_i}{|I_{\Sigma}|^2}, \\ X_{\text{экви}} = \sqrt{Z_{\text{экви}}^2 - R_{\text{экви}}^2}. \end{cases} \quad (14)$$

С учетом четвертого соотношения системы (12) вводится критерий равновеликой электротепловой нагрузки для шин ТШС

$$p|_{j,i} = p_{\text{доп } j}, j = 1, \dots, N_{\text{ТШС}} \quad (15)$$

и определяются их эффективные сечения

$$\Pi_{\text{ш},j}|_{p_{\text{доп}}} = \frac{P_{\text{ш},j}}{p_{\text{доп } j} \cdot l_{\text{ш},j}}, j = 1, \dots, N_{\text{ТШС}}, \quad (16)$$

где $\Pi_{\text{ш},j}|_{p_{\text{доп}}}$ – эффективное сечение, $p_{\text{доп } j}$ – предельно допустимые по условиям нагрева удельные потери, $l_{\text{ш},j}$ – длина j -й шины ТШС.

Неравномерность распределения токов по параллельным ветвям ТШС оценивается с помощью коэффициента неравномерности токораспределения

$$k_I = \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^{N_{\text{ш}}} (I_{\Pi}|_{j,i} \times I_{\Pi}|_{j,i}^*)}}{\sqrt{\left(\sum_{j=1}^{N_{\text{ш}}} I_{\Pi}|_{j,i}\right) \times \left(\sum_{j=1}^{N_{\text{ш}}} I_{\Pi}|_{j,i}\right)^*}}.$$

При совместном решении систем уравнений (1)–(4) с условиями (5)–(10) для сокращения затрат вычислительных и временных ресурсов применяется варьирование размеров конечных элементов в расчетных подобластях. В шинах, пакетах медных лент, контактных плитах обеспечивается большая плотность конечных элементов. В токопроводах ПГ, у внешних границ расчетной области размеры конечных элементов увеличивают, что позволяет сократить затраты времени, требования к вычислительным ресурсам без снижения точности расчетов. Дифференциация плотности конечных элементов в про-

странстве расчетной области обеспечивает вычислительную эффективность и точность. Относительные невязки суммарных токов токопроводов ПГ и ТШП составляют 0,315 % для модулей амплитуд и 0,07 % для фаз.

При моделировании выполняются итерации по критерию равновеликой электротепловой нагрузки (15) с

заданной точностью $|p|_{j,i} - p_{\text{доп } j}| \leq \varepsilon_j$ и последовательно корректируются размеры шин $(a_{\text{ш } j}) \times (b_{\text{ш } j})$ с учетом их эффективного поперечного сечения (16) и глубины проникновения поля δ_H в соответствующий проводниковый материал [3]

$$\delta_H = \sqrt{2/(\omega \sigma \mu_j)}, a_{\text{ш } j} \approx (2 \div 3) \cdot \delta_H, b_{\text{ш } j} \approx \Pi_{\text{ш},j}|_{p_{\text{доп}}} / a_{\text{ш } j}.$$

При анализе энергоэффективности рассматривается ряд конструктивных исполнений ТШС (рис. 1).

В первом (базовом) варианте конструктивного исполнения ТШС функционирующей в производственных условиях ПГ переменного тока все параллельные плети шин прямоугольного сечения располагаются на одном уровне с нижними гранями токопроводов и имеют одинаковые сечения. С торцевой стороны алюминиевые трубы БШП соединяются по схеме «зигзаг» алюминиевыми уравнивателями.

Для второго варианта конструктивного исполнения пара верхних плетей ТШС располагается на уровне верхних граней соответствующих им токопроводов ПГ, а двух нижних плетей – на уровне нижних граней.

В третьем варианте ТШС плети попарно расщепляются по вертикали и каждый графитовый токоподвод заднего торца ПГ подключается к БШП посредством двух параллельных шин. Шины ТШС располагаются симметрично относительно горизонтальной оси ПГ. В четвертом варианте плети ТШС по отношению к третьему варианту дополнительно расщепляются по горизонтали и каждый графитовый токоподвод заднего торца ПГ подключается к БШП посредством двух параллельных шин. В третьем и четвертом вариантах конструктивного исполнения ТШС шины располагаются симметрично относительно горизонтальной оси ПГ.

Шины ТШС крепятся к боковым граням токопроводов нажимными плитами и стяжными шпильками. Это обуславливается ограниченностью пространства между токопроводами и требованиями надежности электрического соединения токопроводов с шинами. Монтаж токопроводов в торцевой стенке ПГ обеспечивает их электрический контакт с массивной графитовой плитой, которая выравнивает электрические потенциалы торцов токопроводов со стороны керна.

Погрешность результатов моделирования и расчетов для базового варианта конструктивного исполнения ТШС оценивается при сравнении с экспериментальными данными регистрации токов в токопроводах заднего торца ПГ [9] и не превышает 3,45 % по амплитуде токов и 2,04 % по их фазе на всем протяжении кампании графитации.

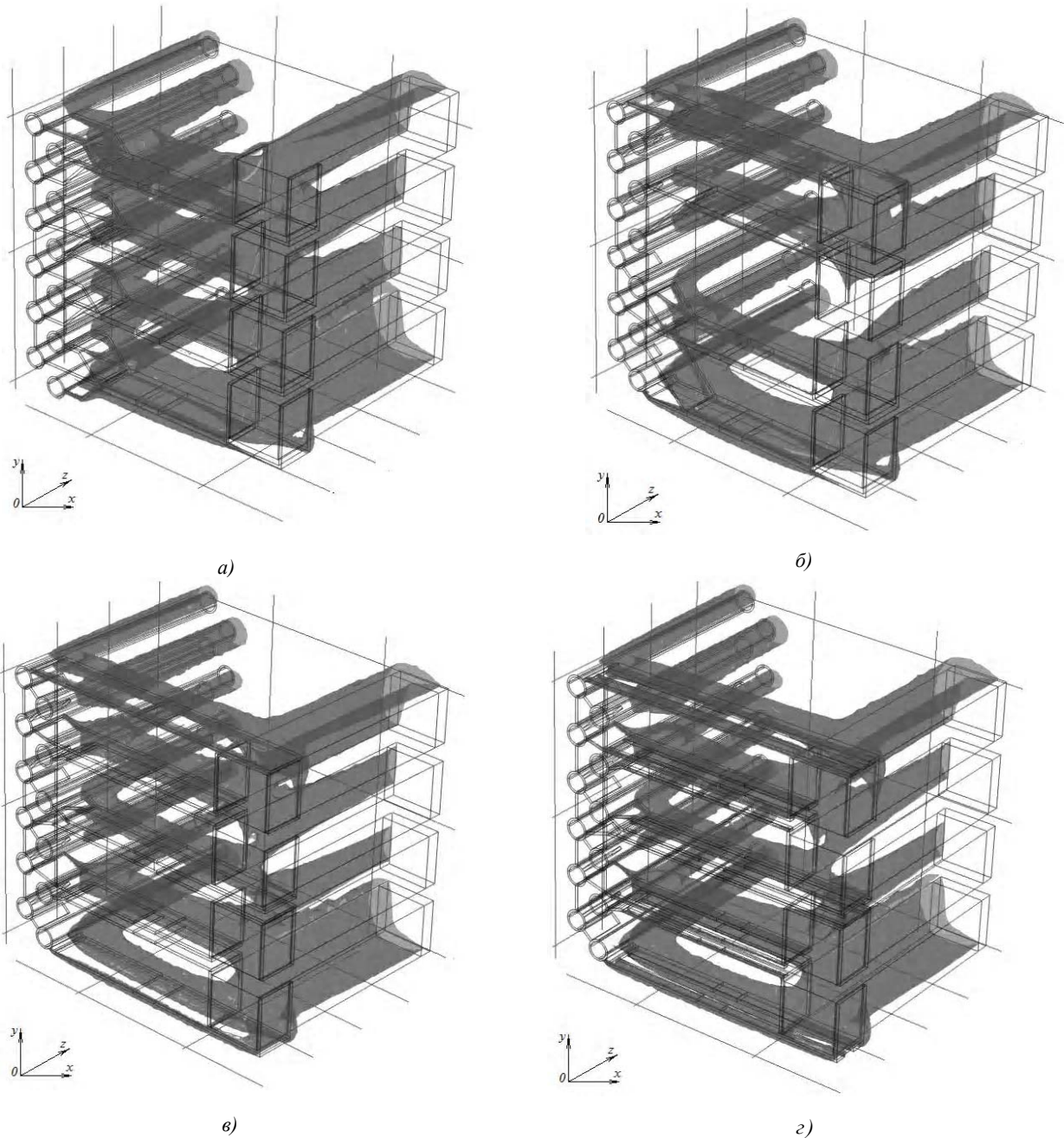


Рис. 1. Магнитное поле в расчетной области ПП ($|\mathbf{H}| = 15$ кА/м): а – вариант 1; б – вариант 2; в – вариант 3; г – вариант 4

При анализе магнитного поля в расчетной области выделяются зоны его локализации, которые в режиме максимума мощности графитации ограничиваются поверхностями модуля амплитуды напряженности магнитного поля равного 15 кА/м (рис. 1). Внешние поверхности, ограничивающие эти зоны локализации, находятся в токопроводах, в трубах внутреннего ряда и верхней трубе наружного ряда шин БШП, вокруг горизонтальных участков шин ТШС. Около уравнивателей со стороны задних торцов шин БШП и внешних граней токопроводов ПГ зоны локализации не наблюдаются. Для каждого варианта конструктивного исполнения в зонах соединения

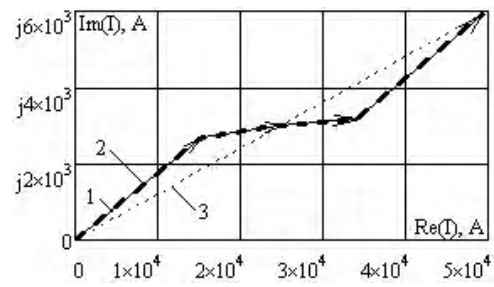
шин ТШС с трубами БШП и токопроводами ПГ отмечаются существенные отличия 3-D распределения напряженностей от распределения для плоскопараллельного магнитного поля (рис. 1).

Выбор варианта конструктивного исполнения ТШС обуславливает изменение характера распределения магнитного поля токопроводов ПГ. При последовательном рассмотрении базового варианта и далее второго, третьего и четвертого вариантов конструктивных исполнений (рис. 1, а, б, в, г) наблюдается усиление неравномерности при локализации магнитного поля в токопроводах ПГ и возле их внутренних граней. Объем зон локализа-

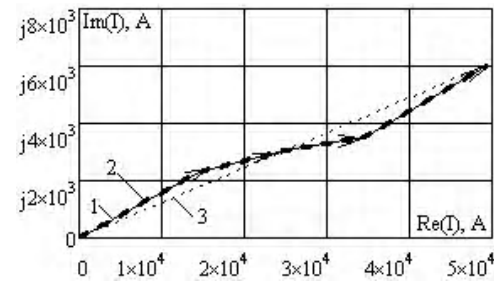
ции увеличивается для крайних токоподводов и уменьшается для внутренних токоподводов ПГ по мере увеличения числа параллельных плетей ТШС. Это также подтверждает сильное воздействие внешнего поверхностного эффекта в ТШС и токоподводах. Симметричному расположению шинных плетей ТШС соответствует симметричная локализация магнитного поля плетей ТШС и токоподводов ПГ (рис. 1, б, в, з). При этом для базового варианта конструктивного исполнения отмечается наибольший объем зон локализации магнитного поля вокруг шинных плетей ТШС (в 1,15, 1,35 и 1,67 раза больше чем у второго, третьего и четвертого вариантов конструктивного исполнений соответственно).

Эти особенности распределения магнитного поля обуславливают неравномерность распределения падений напряжения и токов на рассматриваемых участках ПП, которые вытесняются в крайние шины ТШС, БШП и шины внутреннего ряда БШП, а также существенное увеличение удельных потерь в крайних шинах БШП, ТШС и токоподводах ПГ. Для предлагаемых вариантов конструктивных исполнений ТШС (рис. 1, б, в, з) эквивалентные падения напряжения на ТШС незначительно отличаются от базового варианта (на 0,6 %, 3,2 %, 4,7 % соответственно).

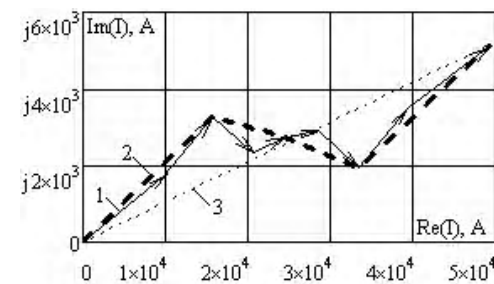
На рис. 2. приведены векторные диаграммы токов в шинах ТШС (сплошные линии) и графитовых токоподводах заднего торца ПГ (штриховые линии) для четырех вариантов конструктивного исполнения. Силы токов в наружных шинах ТШС у базового варианта конструктивного исполнения в 1,6–1,65 раза больше чем во внутренних шинах, фазовый сдвиг между этими токами составляет 8,12 эл. град. (рис. 2, а). Для второго варианта конструктивного исполнения и симметрично расположенных параллельных ветвей ТШС силы токов нижней и верхней плетей ТШС превышают силы токов во внутренних шинах в 1,4–1,43 раза, сдвиг по фазе между этими токами составляет 6,7 эл. град. (рис. 2, б). Для третьего варианта конструктивного исполнения, когда каждая плеть ТШС расщепляется по вертикали на две параллельные ветви, соотношение между наибольшим и наименьшим значениями токов в параллельных ветвях ТШС увеличивается до 2,6 раз, фазовый сдвиг между токами в шинах достигает 15,61 эл. град. (рис. 2, в). Для четвертого варианта конструктивного исполнения, когда подключение каждого графитового токоподвода заднего торца к БШП осуществляется четырьмя шинами, значение отношения токов в наружных и внутренних шинах достигает 6,986, сдвиг максимального и минимального тока по фазе составляет 34,197 эл. град. (рис. 2, з). Несимметричное расположение труб БШП по высоте керна ПГ также увеличивает неравномерность токовых нагрузок параллельных ветвей ТШС до 3 %, которая сильнее выражена для базового варианта ТШС из-за несимметричного расположения шин.



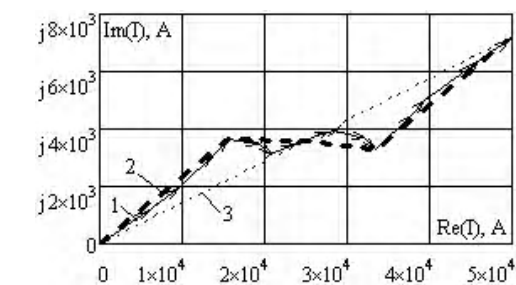
а)



б)



в)



з)

1 – токи в торцевых шинах, 2 – токи в токоподводах заднего торца ПГ; 3 – ток БШП

Рис. 2. Векторные диаграммы токов в шинах ТШС и токоподводах заднего торца ПГ для базового (а), второго (б), третьего (в) и четвертого (з) вариантов конструктивного исполнений ТШС

Неравномерность распределения токов в ТШС обуславливается также особенностями распределения токовых нагрузок токоподводов заднего торца ПГ (рис. 2). Для базового, второго, третьего и четвертого вариантов конструктивного исполнения ТШС силы токов крайних токоподводов превышают силы токов внутренних токоподводов в 1,704, 1,536, 1,829 и 1,849 раза (рис. 2, а–г). При этом фазовые сдвиги между токами в крайних и внутренних токоподводах для базового, второго, третьего и четвертого вариантов конструктивного исполнения ТШС составляют 8,944 эл. град., 6,697 эл. град., 11,524 эл. град. и 11,631 эл. град. соответственно. При втором варианте конструктивного исполнения ТШС обеспечивается более равномерное распределение токов в токоподводах заднего торца, снижаются токовые нагрузки крайних токоподводов и, соответственно, активные потери в них.

При выборе геометрических параметров шин по критерию (15) электрические потери и активные сопротивления ТШС для рассмотренных вариантов конструктивного исполнения меняются незначительно на 0,4–1,2 % (рис. 3, а), что обусловлено погрешностями расчетов. Индуктивные сопротивления ТШС в 17 и более раз превышают активные сопротивления ТШС. Увеличение числа параллельных ветвей у варьируемых вариантов конструктивного исполнения ТШС определяет изменения индуктивных сопротивлений ТШС. Для второго варианта

конструктивного исполнения ТШС индуктивное сопротивление меньше чем для первого на 0,6 %, для третьего – на 4,55 %, для четвертого – на 4,7 % (рис. 3, б).

Следует отметить, увеличение числа параллельных ветвей ТШС позволяет снизить массу активных материалов для второго, третьего и четвертого вариантов конструктивного исполнения ТШС на 9 %, 18,2 % и 35,8 % по сравнению с базовым вариантом.

Если массу шин новых ТШС принять равной массе шин базового варианта ТШС, то потери можно снизить на 8 %, 14 %, 26 % для второго, третьего и четвертого вариантов конструктивного исполнения.

При модернизации ТШС, соединяющих БШП с токоподводами заднего торца ПГ, четвертый вариант конструктивного исполнения можно считать предпочтительным. Он позволяет снизить величину полного сопротивления на 4,7 % и массу активных материалов на 36 % по сравнению с базовым вариантом. При этом активное сопротивление и активные потери соответствуют базовому варианту конструктивного исполнения. При одинаковой с базовым вариантом массе проводниковых материалов такая модернизация позволит снизить электрические потери на 26 %.

Окончательное решение о целесообразности выбора того или иного варианта конструктивного исполнения для модернизации ТШС должно приниматься с учетом затрат на его изготовление и монтаж. Следует отметить, что эти затраты у базового и второго вариантов конструктивного исполнений одинаковы, а электрические потери в ТШС можно снизить на 9 %.

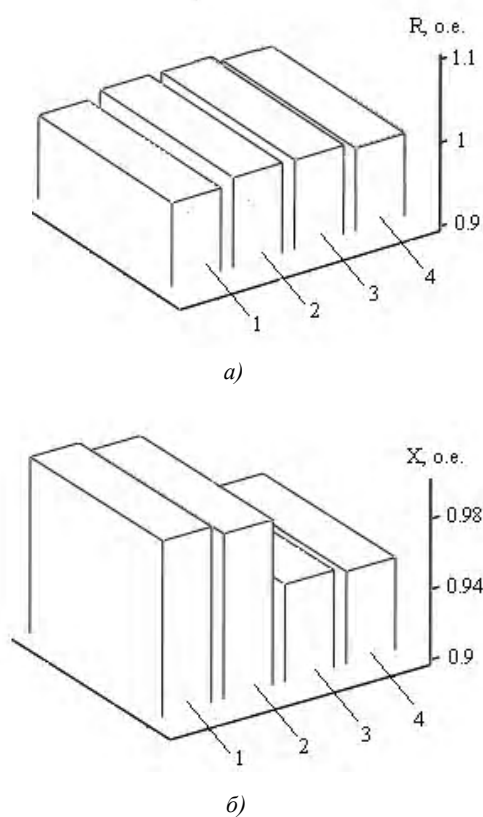
ВЫВОДЫ

Обоснована необходимость 3-D моделирования электромагнитных и электротепловых процессов в области торцевых соединений боковых шинных пакетов и токоподводов печей графитации для повышения точности идентификации электрических параметров ТШС, расчета токовых нагрузок, активных потерь и температурных режимов работы.

По экспериментальным данным регистрации токов в токоподводах заднего торца ПГ дифференциация плотности конечных элементов в пространстве расчетной области обеспечивает заданную точность 3-D моделирования и идентификации электрических параметров. Токовая погрешность расчетов не превышает 3,45 %, угловая – 6,45 %.

Симметричное конструктивное исполнение с четырьмя параллельными плетями ТШС может обеспечить уменьшение массы проводниковых материалов ТШС на 8 % снизить неравномерность распределения токов в токоподводах ПГ.

Увеличение числа параллельных ветвей и реализация критерия равной загруженности шин по допустимым удельным электрическим потерям для выбора поперечного сечения позволяет снизить массу проводниковых материалов на 18,2 %–35,8 % или уменьшить активные потери в ТШС при той же массе на 14 %–26 %.



1, 2, 3, 4 – варианты конструктивного исполнения ТШС

Рис. 3. Активные (а) и индуктивные (б) сопротивления ТШС

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

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. Жиров. – М. : Металлургия, 1987. – 320 с.
4. Калантаров П. Л. Расчет индуктивностей [Текст] : справочная книга / П. Л. Калантаров, Л. А. Цейглин. – [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. Си-
лова електроніка і енергоефективність. Ч. 1 – 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 // Электротехника та електроенергетика. – 2010. – № 2. – С. 36–43.
7. Ярымбаш Д. С. Идентификация электрических параметров печной петли мощных печей графитации [Текст] / Д. С. Ярымбаш // Электротехника и электромеханика. – 2012. – № 1. – С. 49–54.
8. Михеев М. А. Основы теплопередачи [Текст] / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – М. : Энергия, 1977. – 344 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.

Стаття надійшла до редакції 27.08.2013.

Ярымбаш Д. С.¹, Олейников О. М.²

¹Канд. техн. наук, доцент, Запорізький національний технічний університет, Україна

²Д-р техн. наук, професор, Севастопольський національний технічний університет, Україна

АНАЛІЗ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ КОНСТРУКЦІЇ ТОРЦЕВИХ З'ЄДНАНЬ БІЧНИХ ШИННИХ ПАКЕТІВ ТА СТРУМОПІДВОДІВ ПЕЧЕЙ ГРАФІТАЦІЇ

Запропоновано методику оцінки електричних параметрів шинних з'єднань струмопідводів печі графітації з бічними шинними пакетами на основі сполучених просторових математичних моделей електромагнітних та електротеплових процесів. При чисельному моделюванні забезпечується висока точність та обчислювальна ефективність розрахунків шляхом диференціації густини кінцевих елементів в розрахунковій області, котра підвищується у зонах концентрації магнітного поля. Виконано аналіз енергоефективності конструктивних виконань торцевих шинних систем печей графітації змінного струму та запропоновано технічні рішення для зниження маси, активних втрат та реактивної потужності.

Ключові слова: *під графітації, струмовідвід, шинні пакети, ідентифікація, електричні параметри, електромагнітні та електротеплові процеси, обчислювальна ефективність, критерій рівного завантаження, зниження маси активних матеріалів.*

Yarymbash D. S.¹, Olejnikov O. M.²

¹Ph.D. Tech., Associate Professor, Zaporizhzhya National Technical University, Ukraine

²D.Sc.Tech., Professor, Sevastopol National Technical University, Ukraine

ANALYSIS OF ENERGY EFFICIENCY OF BUTT END CONNECTIONS CONSTRUCTION OF SIDE BUS PACKAGES AND CURRENT FEEDERS OF GRAPHITIZATION FURNACE

The methods of the electrical parameter identification of the butt end bus connections of graphitization furnace current feeders with side bus packets basing on the conjugate three-dimensional mathematical models of electromagnetic and electro-thermal processes are presented. The finite element methods of solving partial derivatives vector equations systems in three-dimensional domain are used. The temperature dependences of the electro-physical properties and thermo-physical properties of the active materials and the external bus surface conditions of natural convection and radiation heat transfer are taken into account. The high accuracy and computational efficiency numerical calculations by using variations of the finite elements densities in the computational domain are produced. The finite elements densities in the domains of the magnetic field concentration are increased. The basic and new designs of butt end bus systems of AC graphitization furnace are considered. The calculations of geometric parameters of the bus conductors by using the equality criterion of active loss densities are presented. The currents, voltage drops, current density, electrical losses densities, active and inductive resistance of bus of side bus packages, butt end bus connections and graphite feeders are identified. The energy efficiency of butt end graphitization furnace electrical connections of different numbers of parallel buses is analyzed. The technical decisions to reduce weight, active and reactive power losses of bus butt end connections are substantiated.

Keywords: *graphitization furnaces, current feeder, bus packages, electrical parameters identification, electromagnetic and electro-thermal processes, finite element density, energy efficiency, active and reactive power losses.*

REFERENCES

1. Chalyh E. F. Oborudovanie jelektrodnyh zavodov [Tekst]: uchebnoe posobie dlja vuzov. Moscow, Metallurgija, 1990, 238 p.
2. Sosedov V. P., Chalyh E. F. Grafіtacija uglerodistyh materialov [Tekst]. Moscow, Metallurgija, 1987, 176 p.
3. Dancis Ja. B., Zhilov G. M. Korotkie seti i jelektricheskie parametry dugovyh jelektropechej [Tekst]. Moscow, Metallurgija, 1987, 320 p.
4. Kalantarov P. L., Cejtin L. A. Raschet induktivnostej [Tekst]: spravocnaja kniga [3-e izd.], Leningrad, Jenergoatomizdat, 1986, 488 p.
5. Jarymbash D. S., Jarymbash S. T. Povyshenie jenergojeffektivnosti bokovogo shinopaketa pechej grafіtaciji peremennogo toka [Tekst]. *Tehnichna elektrodinamika. Tematichnij vip. Silova elektronika i energoefektivnist'*, 2011, pp. 229–233.
6. Jarymbash D. S., Kilimnik I. M., Jarymbash S. T. Osobnosti opredelenija parametrov jelektricheskoj shemy zameshhenija pechnoj petli pechi grafіtaciji peremennogo toka [Tekst], *Elektrotehnika ta elektroenergetika*, 2010, No. 2, pp. 36–43.
7. Jarymbash D. S. Identifikacija jelektricheskih parametrov pechnoj petli moshhnyh pechej grafіtaciji [Tekst], *Jelektrotehnika i jelektromehanika*, 2012, No. 1, pp. 49–54.
8. Miheev M. A., Miheeva I. M. Osnovy teploperedachi [Tekst]. Moscow, Jenergija, 1977, 344 p.
9. Jarymbash D. S. Osobnosti izmerenija peremennogo toka v tokopodvodah pechej gra-fіtaciji [Tekst], *Jelektrotehnika i jelektrojenergetika*, 2005, No. 1, pp. 74–76.

УДК 621.314+ 621.316

Сінолиций А. П.¹, Кольсун В. А.², Козлов В. С.³¹Д-р. техн. наук, професор, ДВНЗ «Криворізький національний університет», Україна²Канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Криворізький національний університет», Україна³Аспірант, ДВНЗ «Криворізький національний університет», Україна, E-mail: vskpost@yandex.ru

P-Q ТЕОРІЯ МИТТЄВОЇ ПОТУЖНОСТІ ДЛЯ ПРИСТРОЇВ АКТИВНОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ. ОБМЕЖЕННЯ ЗАСТОСУВАННЯ

Проведено аналіз однієї з сучасних теорій миттєвої потужності. Враховуючи критику теорії, встановлено межі застосування останньої. Приведено приклад застосування p-q теорії для активного фільтра гармонік, що працює в умовах несиметричної мережі живлення. Визначено критерії оптимальності, за якими може працювати пристрій активної фільтрації, що засновано на p-q теорії миттєвої потужності.

Ключові слова: енергозбереження, p-q теорія, активний фільтр, несиметрія фазної напруги.

ПРОБЛЕМА ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК З НАУКОВИМИ ТА ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Сучасні виробники активних фільтрів використовують доволі різноманітний математичний апарат для керування силовою частиною фільтра. Однією з найпопулярніших теорій для визначення складових потужності мережі живлення є p-q теорія миттєвої потужності, запропонована Акагі та ін. в [1]. Зазначена теорія зазнала критики від опонентів [2, 3], які вказують на некоректність останньої за нестандартних умов (несиметрія або несинусоїдність фазних напруг, тощо).

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Більшість робіт, присвячених p-q теорії, описують роботу приладів на основі останньої в умовах синусоїдної симетричної системи напруг. До критики такої теорії належать праці [2, 3, 4], які вказують на окремі факти помилкового визначення складових потужності мережі p-q теорією.

ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Проаналізувати існуючі факти критики p-q теорії та на їх основі визначити межі застосування такої теорії миттєвої потужності для пристроїв активної фільтрації гармонік мережі.

ВИКЛАДЕННЯ МАТЕРІАЛУ ТА РЕЗУЛЬТАТИ

P-q теорія визначає сукупність миттєвих потужностей трипровідних та чотирипровідних з нульовим проводом мереж у часовому просторі. Автори теорії зазначають, що на форми вихідних сигналів струму та напруги не накладається жодних обмежень. Важливим є той факт, що p-q теорія розглядає багатофазну мережу як єдине ціле, та оперує з трьома фазами системи живлення одночасно.

Основою p-q теорії є так зване перетворення Кларка, яке дозволяє перейти від системи координат a, b, c до ортогональної нерухомої системи координат α, β . Після переходу до нової системи координат розраховуються