

УДК 621.365.32:621.3.024

Д.С. Ярымбаш, канд. техн. наук,

Севастопольский национальный технический университет

ул. Университетская 33, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: yarymbash@rambler.ru

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ГРАФИТАЦИИ ПРИ МОДЕРНИЗАЦИИ БОКОВЫХ ШИННЫХ ПАКЕТОВ МОЩНЫХ ПЕЧЕЙ ГРАФИТАЦИИ

Предложена методика идентификации активных потерь и параметров оптимизации электротехнического комплекса графитации на основе параметрических и пространственных электротепловых математических моделей. Установлена наилучшая допустимая область геометрических параметров боковых шинных пакетов, обеспечивающая существенное снижение активных потерь в режиме максимальной мощности графитации.

Ключевые слова: идентификация, математическая модель, электрические параметры, активные потери, мощность графитации.

На современном этапе развития электродной промышленности предъявляются жесткие требования к уровню качества и себестоимости продукции, которые обеспечат ее конкурентоспособность и ликвидность на украинском и внешних рынках сбыта. Наиболее энергоемким технологическим процессом электродного производства является графитация. Мощность печей графитации переменного тока составляет 8—10 МВт, удельный расход электроэнергии достигает 6—10 МВт·ч/т, а продолжительность кампании графитации — от 2 до 3 суток [1]. Устойчивая тенденция роста тарифов на электроэнергию требует повышения энергоэффективности электротехнических комплексов графитации как при создании нового, так и при модернизации действующего оборудования.

На рисунке 1 представлена структура электротехнического комплекса графитации (ЭТК) переменного тока, которая включает питающие и компенсационные печные однофазные трансформаторы и шинные пакеты их камер, печи графитации с токопроводящим керном, устройство поперечной компенсации (КУ). Короткая сеть секции состоит из главного шинного пакета (ГШП) секции и шинных пакетов печной петли (боковых шинных пакетов и шинных пакетов переднего и заднего торцов печей).

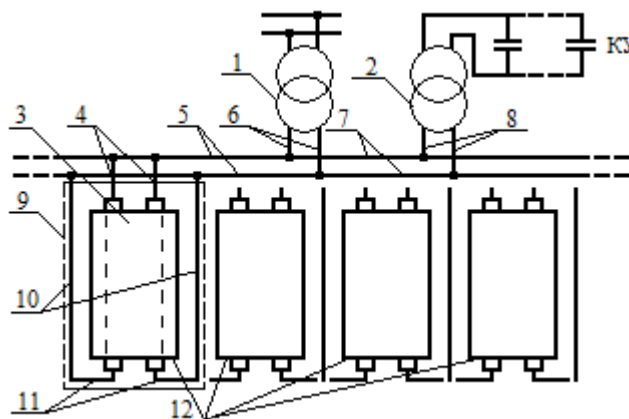


Рисунок 1 — Структура электротехнического комплекса графитации переменного тока:

- 1 – питающий трансформатор; 2 – компенсационный трансформатор; 3 – керн;
- 4 – ошиновка переднего торца; 5, 7 – главный шинный пакет; 6 – шинный пакет камеры печного трансформатора; 8 – шинный пакет камеры компенсационного трансформатора; 9 – печная петля; 10 – боковой шинный пакет; 11 – шинный пакет заднего торца; 12 – печь графитации; КУ – компенсирующее устройство

При модернизации, для повышения мощности действующих печей графитации, к.п.д. и производительности, увеличивают ширину печей. В этом случае пространство между печами сужается и вместо двух монтируется один стационарный боковой шинный пакет (БШП). Оптимизация его конструктивного исполнения, обеспечивающая снижение потерь в короткой сети секции, достигающих 17—18 % электрических потерь графитации [1, 2], снижение реактивной мощности графитации и активных потерь при ее компенсации, является актуальной и в практическом, и в научном плане.

Известные работы [3–5] по повышению энергоэффективности коротких сетей электротехнических комплексов графитации переменного тока реализуют математические модели электротепловых процессов для отдельных элементов печной петли, керна, ГШП и не могут быть обобщены для новых конструкций БШП и модернизированных печей графитации высокой мощности. Это требует разработки универсального подхода для оптимизации БШП по критерию минимума суммарных активных потерь графитации на основе сопряженных распределенных пространственных и параметрических моделей, учитывающих взаимные связи между компонентами электротехнического комплекса графитации.

Целью работы является разработка оптимальной по критерию суммарных активных потерь графитации конструкции бокового шинного пакета для модернизированных печей графитации увеличенной мощности на основе сопряженных пространственных математических моделей электромагнитного преобразования энергии переменного тока в тепловую энергию, теплопередачи и конвективного теплообмена, и параметрических моделей, учитывающих взаимные связи между компонентами электротехнического комплекса графитации.

Изображающий вектор электротехнического комплекса секции графитации переменного тока определяется электрической мощностью графитации, мощностью КУ и взаимосвязанными совокупностями электрических параметров питающих и компенсационных трансформаторов и параметров короткой сети.

Ограничения, определяющие связи между компонентами изображающего вектора для питающих и компенсационных трансформаторов устанавливаются известными уравнениями работы трансформатора под нагрузкой в комплексной форме для действующих значений напряжений, токов и ЭДС[6]:

$$\begin{cases} \dot{U}_{1,i} = -\dot{E}_{1,i} + \dot{I}_{1,i} \cdot (R_{1,i} + j \cdot X_{1,i})|_{n_i}, \\ \dot{E}_{2,i} - \dot{I}_{2,i} \cdot (R_{2,i} + j \cdot X_{2,i}) = \dot{U}_{2,i}|_{n_i}, \\ \dot{I}_{1,i} \cdot w_{1,i} + \dot{I}_{2,i} \cdot w_{2,i} = \dot{I}_{0,i} \cdot w_{1,i}|_{n_i}, \end{cases} \quad i = 1, 2, \quad (1)$$

где $\dot{U}_{j,i}, \dot{E}_{j,i}, \dot{I}_{j,i}$ — напряжения, ЭДС и токи печных трансформаторов, $R_{j,i}, X_{j,i}$ — электрические сопротивления трансформаторов, которые определяются из паспортных данных для соответствующих ступеней регулирования напряжения на стороне ВН — n_i , $\dot{I}_{0,i}, w_{j,i}$ — ток холостого хода и число витков в обмотках, индексы $i = 1, 2$ относятся к питающему и компенсационному трансформаторам, а $j = 1, 2$ — к первичной и вторичной обмоткам.

Для участков короткой сети, по которым протекает ток графитации I_3 (кern и печная петля с шинными пакетами переднего и заднего торцов, БШП, и участок ГШП), можно составить уравнения для активной $P_{\Sigma R_X}$, реактивной $Q_{\Sigma R_X}$ и полной мощности $S_{\Sigma R_X}$:

$$P_{\Sigma R_X} = I_3^2 \cdot \sum_i R_i, \quad Q_{\Sigma R_X} = I_3^2 \cdot \sum_i X_i, \quad S_{\Sigma R_X} = \sqrt{P_{\Sigma R_X}^2 + Q_{\Sigma R_X}^2}, \quad (2)$$

где R_i, X_i — активные и индуктивные сопротивления участков короткой сети $i = 3, 4, 5, 9, 10, 11$, приведенных на рисунке 1.

Для участков ЭТК, которые нагружены током компенсации $I_{2,2}$ (участок ГШП, компенсационный трансформатор и шинный пакет, подключенный к нему со стороны НН, устройство поперечной компенсации и высоковольтные кабели (ВК)), уравнения для активной $P_{\Sigma R_C}$, реактивной $Q_{\Sigma R_C}$ и полной мощности $S_{\Sigma R_C}$ будут иметь вид:

$$\begin{cases} P_{\Sigma R_C} = I_{2,2}^2 \cdot \left[\sum_i R_i + \left(w_{2,2} / w_{1,2} |_{n_2} \right)^2 \cdot \left(R_{k,2} |_{n_2} + R_{ку} + R_{вк} \right) \right] + P_{0,2} |_{n_2}, \\ Q_{\Sigma R_C} = I_{2,2}^2 \cdot \left[\sum_i X_i + \left(w_{2,2} / w_{1,2} |_{n_2} \right)^2 \cdot \left(X_{k,2} |_{n_2} + X_{вк} \right) \right] + Q_{0,2} |_{n_2} - Q_{ку} |_{n_2}, \quad i = 7, 8, \\ S_{\Sigma R_C} = \sqrt{P_{\Sigma R_C}^2 + Q_{\Sigma R_C}^2} = I_{2,2}^2 \cdot Z_{\Sigma R_C}, \end{cases} \quad (3)$$

и, соответственно, для участков ЭТК, которые нагружены током $I_{2,1}$ (питающий трансформатор и шинный пакет, подключенный к нему со стороны НН), можно определить активную $P_{\Sigma R}$, реактивную $Q_{\Sigma R}$ и полную мощности $S_{\Sigma R}$

$$\begin{cases} P_{\Sigma R} = I_{2,1}^2 \cdot \left[R_6 + \left(w_{2,1}/w_{1,1}|_{n_1} \right)^2 \cdot R_{k,1}|_{n_1} \right] + P_{0,1}|_{n_1}, \\ Q_{\Sigma R} = I_{2,1}^2 \cdot \left[X_6 + \left(w_{2,1}/w_{1,1}|_{n_1} \right)^2 \cdot X_{k,1}|_{n_1} \right] + Q_{0,1}|_{n_1}, \\ S_{\Sigma R} = \sqrt{P_{\Sigma R}^2 + Q_{\Sigma R}^2}, \end{cases} \quad (4)$$

где $P_{0,i}$, $Q_{0,i}$, $i=1,2$ — мощности XX трансформаторов, P_{ky} , Q_{ky} — активные потери и реактивная мощность КУ; $R_{k,i}$, $X_{k,i}$, $i=1,2$ — сопротивления КЗ трансформаторов, $R_{вк}$, $X_{вк}$ — сопротивления высоковольтных кабелей, R_i , X_i — сопротивления участков короткой сети $i=6,7,8$, приведенных на рисунке 1.

Рассматривая совместно системы уравнений (2) – (4) можно перейти к уравнениям баланса активной P_{Σ} , реактивной Q_{Σ} , полной мощности S_{Σ} ЭТК графитации

$$P_{\Sigma} = P_{\Sigma R} + P_{\Sigma R-C} + P_{\Sigma R-X}, \quad (5)$$

$$Q_{\Sigma} = Q_{\Sigma R} + Q_{\Sigma R-C} + Q_{\Sigma R-X}, \quad (6)$$

$$S_{\Sigma} = \sqrt{P_{\Sigma}^2 + Q_{\Sigma}^2},$$

и его токов

$$I_{2,1} = I_3 + I_{2,2}. \quad (7)$$

В соответствии с требованиями ПУЭ для коэффициента мощности ЭТК графитации печей переменного тока выполняется условие [7] $[\cos(\varphi) = P_{\Sigma}/S_{\Sigma}] \geq 0,98$. Рассматривая его совместно с системой уравнений (6), (7) можно, удовлетворяя условию $Q_{\Sigma R-C} = -Q_{\Sigma R-X}$, найти мощность устройства поперечной компенсации

$$Q_{ky} = I_{2,2}^2 \cdot \left[\sum_k X_k + \left(w_{2,2}/w_{1,2}|_{n_2} \right)^2 \cdot \left(X_{k,2}|_{n_2} + X_{вк} \right) \right] + Q_{0,2}|_{n_2} + I_3^2 \cdot \sum_i X_i, \quad (8)$$

и упростить соотношение (6):

$$Q_{\Sigma} = Q_{\Sigma R}. \quad (9)$$

Точность оптимизации электротехнического комплекса графитации переменного тока существенным образом зависит от точности идентификации электрических параметров короткой сети в системах ограничений (2) — (9), требующей учета особенностей электромагнитного взаимодействия токопроводов друг с другом, БШП с керном печи, температурных режимов, поверхностных эффектов, эффектов близости, внешних поверхностных эффектов, само- и взаимоиндукции проводников. Поэтому эти ограничения необходимо дополнить пространственными математическими моделями электромагнитного преобразования энергии переменного тока в тепловую энергию в короткой сети секции графитации, теплопередачи и конвективного теплообмена, механики сплошных сред [8,9].

Электротепловая модель преобразования энергии переменного тока в тепловую энергию включает в себя:

— сопряженную систему уравнений Максвелла для комплексных амплитуд векторного магнитного и электрического потенциалов в геометрических областях шинных пакетов, токоподводов, керна, теплоизоляции и окружающей среды [8]:

$$\begin{cases} -\nabla \left[(j\omega\sigma_i(T_i) - \omega^2\epsilon_0\epsilon_{r,i}) \cdot \mathbf{A}_i + (\sigma_i(T_i) + j\omega\epsilon_0\epsilon_{r,i}) \nabla V_i - \mathbf{J}_i^e \right] = 0, \\ (j\omega\sigma_i(T_i) - \omega^2\epsilon_0\epsilon_{r,i}) \mathbf{A}_i + \nabla \times (\mu_0^{-1} \mu_{r,i}^{-1} \nabla \times \mathbf{A}_i) + (\sigma_i(T_i) + j\omega\epsilon_0\epsilon_{r,i}) \nabla V_i = \mathbf{J}_i^e, \end{cases} \quad (10)$$

где ω — угловая частота, рад/с; $\sigma_i(T_i)$ — температурная зависимость электрической проводимости, См/м; $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ — электрическая постоянная, Ф/м; $\epsilon_{r,i}$ — диэлектрическая проницаемость; $\mathbf{A}_i$ — векторный магнитный потенциал, Вб/м; V_i — комплексная амплитуда электрического потенциала, В; $\mathbf{J}_i^e$ — комплексная плотность тока, А/м²; $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ — магнитная постоянная, Гн/м; $\mu_{r,i}$ — магнитная проницаемость; индексы $i = 1, 2, 3, 4, 5$ — соответствуют областям шинных пакетов, токоподводов, керн, теплоизоляции и охлаждающей среды:

— уравнения теплопроводности, описывающие распределение температур в областях шинных пакетов, токоподводов, керн и теплоизоляции печи графитации [9]

$$\begin{cases} \operatorname{div}(\lambda_i(T_i) \cdot \mathbf{grad}(T_i)) = \mathbf{J}_i \cdot (\mathbf{J}_i)^* / \sigma_i(T_i), & i = 1, 2, 3, \\ \operatorname{div}(\lambda_i(T_i) \cdot \mathbf{grad}(T_i)) = 0, & i = 4. \end{cases} \quad (11)$$

где $\lambda_i(T_i)$ — температурные зависимости коэффициентов теплопроводности, Вт/(м·°C);

— систему уравнений конвективного теплообмена в приближении Буссинеска с линеаризацией температурной зависимости плотности охлаждающего воздуха $\rho(T) = \rho_0(1 - \beta(T - T_0))$ [9]:

$$\begin{cases} (\mathbf{w}_i \cdot \nabla) \mathbf{v}_i = -\rho_{0,i}^{-1} \nabla p_{,i} + \nu_i \Delta \mathbf{w}_i - \beta_i (T_i - T_0) \mathbf{g}, \\ \mathbf{w}_i \nabla T_i = \chi_i \Delta T_i, \\ \operatorname{div} \mathbf{v}_i = 0, & i = 5. \end{cases} \quad (12)$$

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

Система уравнений (10) замыкается условиями калибровки Кулона, граничными условиями магнитной и электрической изоляции, сопряжения сред с различными электрическими и магнитными свойствами [8]. Для уравнений теплопроводности (11) и конвективной теплопередачи (12) граничные условия определяются известными механизмами кондуктивного, конвективного и лучистого теплообмена [9].

Численная реализация электротепловой модели короткой сети и печи графитации, представленной сопряженными системами уравнений в частных производных (10) — (12) выполнялась с помощью метода конечных элементов, успешно апробированного автором для этого класса задач в работах [3,4].

Электрические параметры участков короткой сети определялись по данным расчетов полей температуры, электрического и магнитного потенциалов [4], распределение проекции A_z которого в поперечном сечении печной петли приведено на рисунке 2.

Рассчитывались токи и активные потери в участках короткой сети и керне печи графитации

$$I_i = \iint_S (\mathbf{J}_i d\mathbf{S}_i),$$

$$p_i = \sum_k \iiint_{V_k} \sigma_{i,k}(T_i)^{-1} \mathbf{J}_{i,k} \cdot (\mathbf{J}_{i,k})^* dx dy dz,$$

их активные

$$R_i = p_i / I_i^2 = \sum_k \iiint_{V_k} \sigma_{i,k}(T_i)^{-1} \mathbf{J}_{i,k} \cdot (\mathbf{J}_{i,k})^* dx dy dz / I_i^2, \quad (13)$$

индуктивные

$$X_i = \omega L_i \quad (14)$$

и полные сопротивления

$$Z_i = \sqrt{R_i + X_i^2}, \quad (15)$$

где, в соответствии с [10],

$$L_i = \Psi_i / I_i, \quad \Psi_i = \int \Phi_i d\mathbf{i}_i / I_i, \quad d\mathbf{i}_i = \mathbf{J}_i \cdot d\mathbf{s}_i, \quad \Phi_i = \iint_S (\mathbf{B}_i d\mathbf{S}_i), \quad \mathbf{B}_i = \mathbf{rot}(\mathbf{A}_i),$$

Ψ_i — потокосцепление, Вб; I_i — ток в i -м участке короткой сети, А; Φ — магнитный поток, Вб; J_i — плотность тока, А/м²; $\mathbf{B}$ — вектор магнитной индукции, Тл; $d\mathbf{s} = \mathbf{n}_s \cdot d\mathbf{s}$, $d\mathbf{S} = \mathbf{n}_S \cdot d\mathbf{S}$ — элементарные поверхности (с учетом векторов нормалей $\mathbf{n}_s, \mathbf{n}_S$) участков короткой сети и керна, м².

Для заданных массивов геометрических размеров участков короткой сети ЭТК переменного тока по данным полевого моделирования (10) – (12) и соотношениям (13) – (15), рассчитывались соответствующие им массивы сопротивлений участков короткой сети. Это требовало значительных вычислительных ресурсов, времени и не удовлетворяло требованиям вычислительной эффективности для задач оптимизации.

Для уменьшения объемов расчетных данных и времени моделирования методами кубической сплайн-интерполяции и аппроксимации [2,4] выполнялась идентификация зависимостей электрических сопротивлений участков короткой сети $\forall i \in \{3...8,10,11\}$, от их геометрических параметров $(\delta_{li}, \delta_{hi})$ с учетом электрических нагрузок и температурных режимов вторичных токопроводов. Таким образом, система ограничений (2) – (9) дополнялась системой уравнений для электрических сопротивлений участков короткой сети:

$$\begin{cases} R_i = R_i(\delta_{hi}, \delta_{li}, T_i) = \sum_{\xi} \left(\sum_{\vartheta} C_{R\vartheta, \xi}(T_i) \cdot \delta_{hi}^{\vartheta} \right) \delta_{li}^{\xi}, \\ X_i = X_i(\delta_{hi}, \delta_{li}, T_i) = \sum_{\xi} \left(\sum_{\vartheta} C_{X\vartheta, \xi}(T_i) \cdot \delta_{hi}^{\vartheta} \right) \delta_{li}^{\xi}, \quad \forall i \in \{3...8,10,11\}. \\ Z_i = Z_i(\delta_{hi}, \delta_{li}, T_i) = \sqrt{R_i(\delta_{hi}, \delta_{li}, T_i)^2 + X_i(\delta_{hi}, \delta_{li}, T_i)^2}, \end{cases} \quad (16)$$

Рассмотренные выше системы ограничений (1) – (6), (8),(9), (16) устанавливают связи между параметрами оптимизации, которые должны удовлетворять условию оптимальности — минимуму активных потерь в электротехническом комплексе для заданных технологическим режимом значений электрической мощности графитации P_3 :

$$\min(\Delta P), \quad (17)$$

где

$$\Delta P = P_{\Sigma} - P_3, \quad (18)$$

На множестве параметров оптимизации, объединяющем подмножества параметров трансформаторов $O_{\text{пт-кт}}$ (1), короткой сети $O_{\text{кк}}$ (2) – (9), (16) и устройства поперечной компенсации $O_{\text{ку}}$ (5) – (7):

$$O = O_{\text{пт-кт}} \cup O_{\text{кк}} \cup O_{\text{ку}}, \quad (19)$$

выделялись подмножества инвариантно варьируемых и зависимых параметров оптимизации.

Рассматривалась работа короткой сети в режиме максимума технологической мощности графитации, что позволило анализировать работу печных трансформаторов при неизменных положениях РПН (n_1, n_2) .

При исследовании допустимых вариантов конструктивного исполнения модернизируемого БШП печей графитации увеличенной мощности геометрические параметры ГШП секции, шинных пакетов трансформаторных камер, шинных пакетов переднего и заднего торцов печей не варьировались, а их электрические параметры определялись для режима максимума технологической мощности.

Число шин БШП и размеры их поперечного сечения задавались в соответствии с требованиями ПУЭ [7] для максимально допустимого значения тока графитации, а геометрические параметры (расстояния между рядами шин δ_l и между шинами в ряду δ_h) модернизированного БШП, приведенного на рисунке 2, рассматривались как инвариантные, независимо варьируемые параметры оптимизации.

Таким образом, функцию цели (18) можно рассматривать как непрерывную дифференцируемую функцию двух переменных δ_l, δ_h

$$\Delta P = \Delta P(\delta_l, \delta_h), \quad (20)$$

интервалы варьирования которых ограничиваются снизу требованиями к электрической изоляции, сверху — условиями монтажа БШП в пространстве между печами графитации $\delta_l \in [20;1860]$ мм, $\delta_h \in [10;240]$ мм.

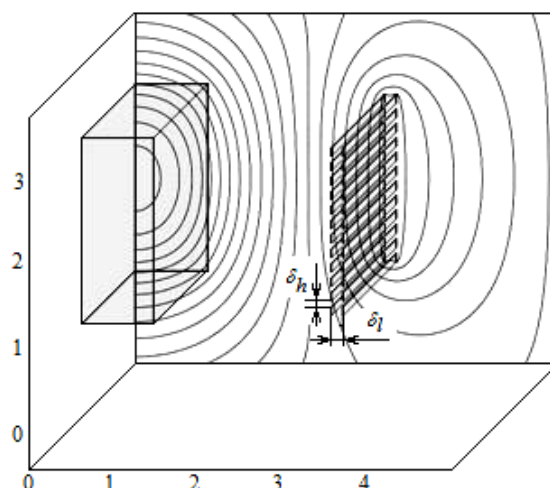


Рисунок 2 — Электромагнитное поле (распределение магнитного потенциала A_z) в поперечном сечении печной петли

Для поверхности нормированных значений активного сопротивления БШП, приведенной на рисунке 3, а, характерно выражены «овражность» и наличие гребня. При этом выпуклость поверхности переходит в вогнутость по кривой в окрестности значений расстояний между шинами в ряду БШП δ_l от 150 мм до 160 мм, вогнутость также появляется при расстояниях между рядами шин БШП более 670 мм. Отношение максимального значения активного сопротивления при ($\delta_h = 10$ мм; $\delta_l = 139$ мм) к минимальному при ($\delta_h = 240$ мм; $\delta_l = 81$ мм) составляет 2,236, что обуславливается изменением влияния внешнего поверхностного эффекта и эффекта близости БШП и керна. Аналогичный характер изменения имеют активные потери в БШП при заданном значении тока графитации.

Кратность изменения индуктивного сопротивления печной петли и керна достигает 1,616. В режиме максимальной мощности для поверхности суммарного индуктивного сопротивления БШП и керна печи графитации, приведенной на рисунке 3, б, характерно наличие пологой «овражности» на всем интервале изменения расстояния между рядами БШП при расстоянии между шинами в ряду 188 — 217 мм. С увеличением расстояния между рядами шин суммарное индуктивное сопротивление керна и печной петли монотонно снижается, что обусловлено само- и взаимной индукцией между шинами БШП и керном.

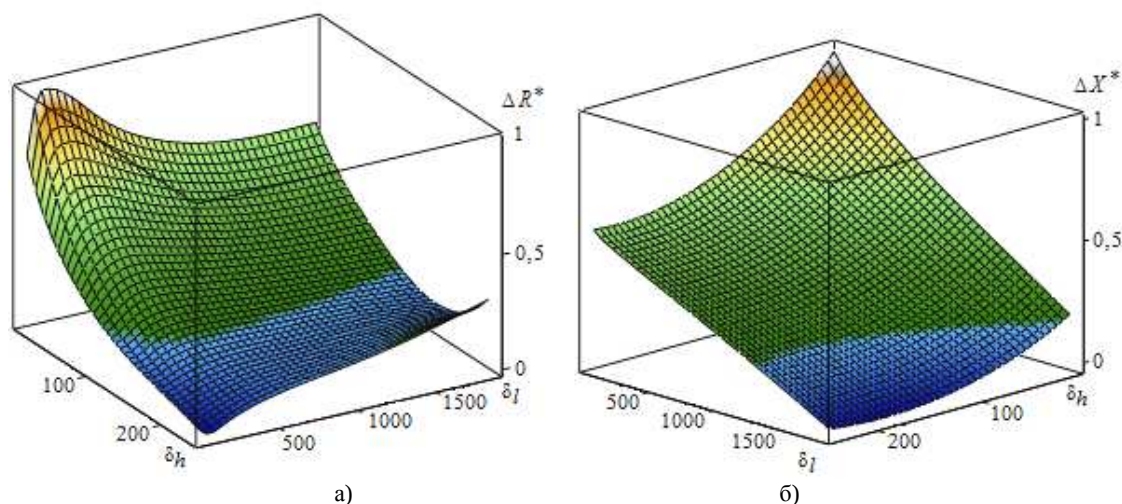


Рисунок 3 — Поверхность изменения нормированных сопротивлений:
а) активное сопротивление БШП; б) индуктивное сопротивление печной петли и керна печи графитации

Максимальное значение индуктивного сопротивления печной петли и керна почти на два порядка превышает соответствующее значение активного сопротивления БШП. Это оказывает существенное влияние на показатели энергоэффективности, определяя мощность устройства поперечной компенсации (9), потери активной мощности, обусловленные перетоками реактивной мощности между компонентами ЭТК графитации.

Как правило, для определения экстремума функции цели требуют, чтобы выполнялись необходимые условия его существования, которые для соотношения (20) имеют вид:

$$\begin{cases} \partial \Delta P(\delta_l, \delta_h) / \partial \delta_l = 0, \\ \partial \Delta P(\delta_l, \delta_h) / \partial \delta_h = 0 \end{cases} \quad (21)$$

Численный анализ нелинейной системы уравнений (21) показал, что она не имеет решения в заданном интервале изменения конструктивных параметров. В исследуемом интервале варьирования параметров БШП δ_h, δ_l отношение максимального значения потерь активной мощности к ее минимальному значению достигает 2,32. Поэтому для определения допустимых энергоэффективных соотношений геометрических размеров БШП выделялась область, ограниченная кривой пересечения поверхности нормированных значений активных потерь, приведенной на рисунке 4, с плоскостью $\Delta P^*(\delta_l, \delta_h) = 0.1$, где

$$\Delta P^*(\delta_l, \delta_h) = \frac{\Delta P(\delta_l, \delta_h) - \Delta P_{\min}}{\Delta P_{\max} - \Delta P_{\min}}, \quad 20 < \delta_l < 1860, 10 < \delta_h < 240.$$

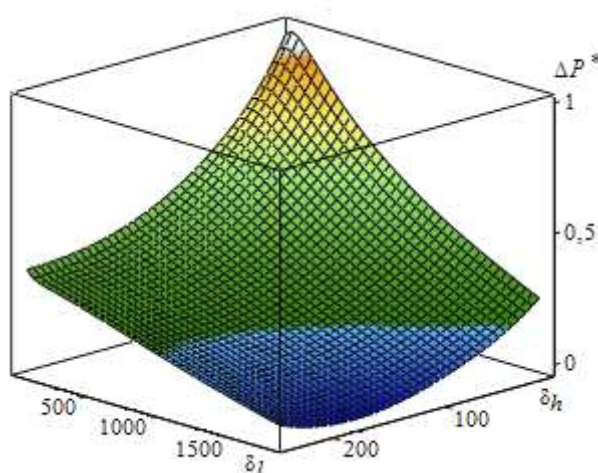


Рисунок 4 — Поверхность изменения нормированных активных потерь в электротехническом комплексе графитации

Тогда, в соответствии с условием $\Delta P^*(\delta_l, \delta_h) \leq 0.1$, используя полиномиальную аппроксимацию, можно описать область энергоэффективных параметров конструкции модернизированного БШП:

$$\begin{cases} (2451 - 7,962 \cdot \delta_h - 7,237 \cdot 10^{-3} \cdot \delta_h^2 - 1,021 \cdot 10^{-3} \cdot \delta_h^3) \leq \delta_l \leq 1860, \\ 75 \leq \delta_h \leq 240. \end{cases} \quad (22)$$

Следует отметить, что эта область не совпадает с областью минимальных электрических потерь в БШП, так как для локального минимума потерь в БШП активные потери в ЭТК графитации могут увеличиться на 40 — 60 %.

Выполнение условий (22) для модернизированных БШП мощных печей переменного тока обеспечивает снижение электрических потерь ЭТК более чем в 2 — 2,3 раза при работе в режиме максимальной мощности графитации.

Выводы

Разработана обобщенная статическая модель электротехнического комплекса графитации, учитывающая параметры питающих и компенсационных трансформаторов, компенсирующего устройства и параметры короткой сети.

Обобщена методика, основанная на комбинации полевых расчетов, методов кубической сплайн интерполяции и аппроксимации, обеспечивающая высокую точность идентификации электрических параметров печной петли и керна мощных печей графитации переменного тока.

Сформулировано условие оптимальности для модернизации конструкции БШП печей графитации увеличенной мощности, как условие минимума функции цели, описывающей зависимость активных потерь в ЭТК графитации переменного тока от конструктивных параметров для заданного технологическим режимом значения максимальной электрической мощности графитации.

Установлено, что конструктивные параметры БШП оказывают существенное влияние на активные потери в БШП, реактивную мощность печной петли и керна и, соответственно, на потери активной мощности для ее компенсации.

На основе анализа функции цели и ограничений для сопротивлений короткой сети и керна печи графитации определена область энергоэффективных параметров конструкции модернизированных БШП, позволяющих снизить потери активной мощности ЭТК графитации переменного тока в 2 — 2,3 раза.

Библиографический список использованной литературы

1. Чалых Е.Ф. Оборудование электродных заводов: [учебное пособие для вузов] / Е.Ф. Чалых. — М.: Металлургия, 1990. — 238 с.
2. Ярымбаш Д.С. Особенности контроля электрических параметров, мощности и энергопотребления во время кампании графитации в печи переменного тока / Д.С. Ярымбаш, С.Т. Ярымбаш, О.В. Тютюнник // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. — Кременчук: КДПУ, 2006. — Вип. 3/2006 (38). — С. 53–55.
3. Ярымбаш Д.С. Особенности электротепловых режимов главных шинных пакетов секций печей графитации переменного тока / Д.С. Ярымбаш, С.Т. Ярымбаш, И.М. Килимник // Електротехніка і електроенергетика. — 2011. — № 1. — С. 64–69.
4. Ярымбаш Д.С. Повышение энергоэффективности бокового шинопакета печей графитации переменного тока / Д.С. Ярымбаш, С.Т. Ярымбаш // Технічна електродинаміка. Тематичний вип. Силова електроніка і енергоефективність. — 2011. — С. 229–233.
5. Применение численного моделирования для совершенствования процесса графитации электродной продукции в печах Ачесона / Е.Н. Панов [и др.] // Алюминий Сибири — 2006: сб. докл. XII междунар конф., Красноярск, 5-7 сент. 2006 г. — Красноярск, 2006. — С. 373–380.
6. Костенко М.П. Электрические машины. Ч. 1. Машины постоянного тока. Трансформаторы / М.П. Костенко, Л.М. Пиотровский. — [3-е изд.] — Л.: Энергия, 1972. — 544 с.
7. Правила устройства электроустановок. ПУЭ-2009. — Харьков: Изд-во «Форт», 2010. — 708 с.
8. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле / Л.А. Бессонов. — М.: Высш. шк., 2003. — 317 с.
9. Джалурия Й. Естественная конвекция. Тепло- и массообмен / Й. Джалурия. — М.: Мир, 1983. — 399 с.
10. Калантаров П.Л. Расчет индуктивностей: [справочная книга] / П.Л. Калантаров, Л.А. Цейтлин. — [3-е изд.] — Л.: Энергоатомиздат, 1986. — 488 с.

Поступила в редакцию 20.12.2011 г.

Ярымбаш Д.С. Підвищення енергоефективності електротехнічного комплексу графітації під час модернізації бічних шинних пакетів потужних печей графітації

Запропоновано методику ідентифікації активних втрат і параметрів оптимізації електротехнічного комплексу графітації на основі параметричних і просторових електротеплових математичних моделей. Визначено найкращу допустиму зону геометричних параметрів бічних шинних пакетів, що забезпечує істотне зниження активних втрат у режимі максимальної потужності графітації.

Ключові слова: ідентифікація, математична модель, електричні параметри, активні втрати, потужність графітації.

Yarymbash D.S. Increasing electrical graphitization complex energy efficiency by the bus packages modernization of the power graphitization furnaces

The method of identification depending on the active losses and optimization parameters of the electrical graphitization complex based on the parametric and tree-dimensional electro-thermal mathematical models are proposed. The best admissible domain of geometrical parameters of side bus packages are determined, the significant decrease of active losses in maximum graphitization power are provided

Keywords: identification, mathematical model, electrical parameters, active losses, graphitization power.