

Ярымбаш Д. С.¹, Килимник И. М.², Ярымбаш С. Т.³

¹Д.т.н., доцент, зав. каф. «Электрические машины»,
Запорожский национальный технический университет, Украина, E-mail: Yarymbash@gmail.com

²К.т.н., доцент, доцент кафедры «Высшая математика»,
Запорожский национальный технический университет, Украина

³К.т.н., доцент, доцент кафедры «Электрические машины»,
Запорожский национальный технический университет, Украина

ДИНАМИЧЕСКАЯ АДАПТАЦИЯ СХЕМНЫХ МОДЕЛЕЙ КОРОТКОЙ СЕТИ

Статья посвящена решению актуальных научных и прикладных задач развития научных и технических основ оптимизации и эффективного расчета систем питания мощных технологических комплексов электропечей переменного тока.

Целью работы являлась разработка методики динамической адаптации схемных моделей сильнотоковых токопроводов электропечей для повышения точности и вычислительной эффективности расчета, учитывающей влияние электромагнитного взаимодействия на электрические параметры и распределение токов в токопроводах.

Для моделирования процессов переменного тока, протекающих в сильнотоковых системах электропитания мощных электропечей, была сформирована система уравнений с известными условиями последовательного или параллельного соединения ветвей электрических контуров, уравнений магнитной энергии для этих контуров и уравнений их собственной и взаимной индуктивности.

Использование вспомогательной задачи минимизации относительной токовой погрешности для определения проекций вектора адаптации, реализуемой методом динамического программирования, позволило учесть влияние электромагнитных процессов на электрические параметры систем питания мощных технологических комплексов электропечей переменного тока.

Численная реализация метода динамической адаптации для схемных моделей сильнотоковых токопроводов мощных технологических комплексов электропечей показывает существенное снижение затрат на вычислительные ресурсы и времени.

Предложенная методика обеспечивает более высокую точность расчетов, по сравнению с известными инженерными методиками, и высокую вычислительную эффективность, по сравнению с численной реализацией полевых моделей.

Ключевые слова: динамическая адаптация, схемная модель, электрические параметры, печь сопротивления, короткая сеть

Мощные технологические электропечные комплексы являются одними из основных потребителей электрической электроэнергии. Повышение их энергоэффективности напрямую зависит от уровня электрических потерь в системах питания, которые могут достигать до 30...40% [1].

Для оценки электрических потерь в сильнотоковых токопроводах мощных технологических комплексов электропечей сопротивления широкое применение получило схемное моделирование [3, 4]. Применение полевого моделирования для определения параметров схемных моделей, для обеспечения высокой точности, требует значительных затрат вычислительных и временных ресурсов, а также дорогостоящего специализированного программного обеспечения. Альтернативой полемому моделированию является использование обобщенных аналитических выражений [5, 6]. Однако, вследствие лежащих в их основе допущений и приближений, они имеют ограниченную область использования и не обеспечивают точность и достоверность результатов в широком диапазоне варьирования параметров для различных конструктивных исполнений сильнотоковых токопроводов.

Поэтому для проектирования новых или модернизации действующих сильнотоковых энергоэффективных вторичных сетей технологических комплексов электропечей переменного тока актуальной следует считать разработку новой высокоэффективной методики определения параметров схемных моделей, которая обладает алгоритмической простотой, не требует значительных вычислительных ресурсов, удовлетворяет требованиям точности, быстродействия и может быть адаптирована к различным конструктивным исполнениям вторичных токопроводов.

Целью работы является разработка методики динамической адаптации схемных моделей сильнотоковых токопроводов электропечей для повышения точности и вычислительной эффективности расчета, учитывающей влияние электромагнитного взаимодействия на электрические параметры и распределение токов в токопроводах.

Для моделирования процессов переменного тока, протекающих в сильнотоковых системах электропитания мощных печей сопротивления, формируется система уравнений с известными условиями последовательного или параллельного соединения ветвей электрических контуров:

$$\begin{cases} \Delta \dot{U}_m = \dot{Z}_m \cdot \dot{I}_m - \dot{E}_m; \\ \sum \Delta \dot{U}_i = \dot{U}_{\text{пн}}; \dot{I}_i = \dot{I}_j = \dot{I}_{\text{пн}}; \Delta \dot{U}_k = \Delta \dot{U}_{\text{тп}}; I_i = \sum_k \dot{I}_{k,i} \end{cases} \quad (1)$$

где $\Delta \dot{U}_m = \{\Delta \dot{U}_{m,i}\}$, $\dot{I}_m = \{\dot{I}_{m,i}\}$, $i = \overline{1, K_m}$ – вектора падений напряжений и токов в ветвях.

Если выделить и условно подключить i -ю ветвь к источнику с выходным напряжением $\Delta \dot{U}_i$, то ее можно рассматривать как электрический контур с соответствующими активными сопротивлениями $R_{m,i}$, собственными $L_{m,i}$ и взаимными индуктивностями $M_{m,i}$ для матрицы сопротивлений:

$$\dot{Z} = \text{diag} \left\{ R_{m,i} + \mathbf{j}\omega \cdot L_{m,i} \right\}_{i=1, K_m} \quad (2)$$

и вектора ЭДС взаимной индукции в системе алгебраических уравнений (1):

$$\begin{aligned} \dot{E} &= \{ \dot{E}_{m,i} \}, \{ \dot{E}_{m,i} \} = \\ &= \left\{ \mathbf{j}\omega \sum_{\substack{j=1, \\ i \neq j}}^{K_m} M_{m,j,i} \cdot I_{m,j} \pm \mathbf{j}\omega \sum_{\substack{i=1, \\ i \neq j, m \neq n}}^{K_n} M_{m,n,j,i} \cdot I_{n,i} \right\}, \quad (3) \\ &\quad \forall j \in (1, K_m), \forall i \in (1, K_n) \end{aligned}$$

Активные сопротивления шин в матрице сопротивлений (2) рассчитываются для допустимых значений температур соответствующих требованиям [6]. Влияние добавочных потерь на величину активного сопротивления, обусловленное поверхностным эффектом и эффектом близости, учитывается с помощью соответствующих коэффициентов добавочных потерь согласно [6, 8].

В соотношениях (2) – (3) начальные приближения собственных и взаимных индуктивностей контуров базируются на известных соотношениях [4, 5]:

$$\begin{cases} L_m = \Psi_m / I_m = \left(\int \Phi_m di_m \right) / I_m^2; \\ M_{n,m} = M_{m,n} = \Psi_{n,m} / I_m = \left(\int \Phi_m di_n \right) / (I_n \cdot I_m), \end{cases}_{n \neq m}$$

где $I_{m \vee n} = \iint_{F_{m \vee n}} (\mathbf{j}_{m \vee n} \cdot d\boldsymbol{\pi}), di_{m \vee n} = \mathbf{j}_{m \vee n} d\boldsymbol{\pi}$, $\mathbf{j}_{m \vee n}$ – токи

и плотности тока в токопроводах контуров $C_{m \vee n}$, с поперечными сечениями $F_{m \vee n}$; $\Psi_m, L_m, M_{n,m}$ – потокосцепление, собственные и взаимные индуктивности.

Для дальнейшего упрощения математических преобразований можно допустить, что односвязные поверхности $\Pi_{m \vee n}$ принадлежат конечным поверхностно-односвязным областям с замкнутыми регулярными кривыми $C_{m \vee n}$ и применить для описания магнитных пото-

ков $\Phi_{m \vee n}$ теорему Стокса [4]:

$$\begin{aligned} \Phi_{m \vee n} &= \iint_{\Pi_{m \vee n}} (\mathbf{B}_{m \vee n} \cdot d\boldsymbol{\pi}) = \iint_{\Pi_{m \vee n}} (\text{rot}(\mathbf{A}_{m \vee n}) \cdot d\boldsymbol{\pi}) = \\ &= \oint_{C_{m \vee n}} (\mathbf{A}_{m \vee n} \cdot d\mathbf{c}) \end{aligned}$$

и представить соотношения для $L_m, M_{n,m}$ в виде:

$$\begin{cases} L_{m \vee n} = \iint_{F_{m \vee n}} \oint_{C_{m \vee n}} (\mathbf{A}_{m \vee n} \cdot d\mathbf{c}_{m \vee n}) \cdot (\mathbf{j}_{m \vee n} \cdot d\boldsymbol{\pi}_{m \vee n}) / I_{m \vee n}^2; \\ M_{n,m} = \iint_{F_n} \oint_{C_n} (\mathbf{A}_m \cdot d\mathbf{c}_n) \cdot (\mathbf{j}_n \cdot d\boldsymbol{\pi}_n) / (I_n \cdot I_m) = \\ = M_{m,n} = \iint_{F_m} \oint_{C_m} (\mathbf{A}_n \cdot d\mathbf{c}_m) \cdot (\mathbf{j}_m \cdot d\boldsymbol{\pi}_m) / (I_m \cdot I_n) \end{cases}_{m \neq n} \quad (4)$$

При условиях коллинеарности векторов $(\mathbf{c}_{m \vee n} \uparrow \boldsymbol{\pi}_{m \vee n})$ интегральные выражения (4) будут преобразованы:

$$\begin{cases} L_{m \vee n} = \frac{1}{I_m} \frac{1}{2} \iiint_{V_m} (\mathbf{A}_{m \vee n} \cdot \mathbf{j}_{m \vee n}) \cdot dv_{m \vee n} \cdot dv_{m \vee n} = \\ = (d\mathbf{c}_{m \vee n} \cdot d\boldsymbol{\pi}_{m \vee n}); \\ M_{m,n} = M_{n,m} = \iiint_{V_m} (\mathbf{A}_n \cdot \mathbf{j}_m) \cdot dv_m / (I_m \cdot I_n) \end{cases}_{m \neq n}$$

и с учетом описания векторного магнитного потенциала [4, 5]

$$\mathbf{A}_{m \vee n} = \frac{\mu}{4\pi} \iiint_{V_{m \vee n}} \mathbf{j}_{m \vee n} / (\zeta_{m',m} \vee \zeta_{m,n}) dv_{m \vee n},$$

будут представлены в виде:

$$\begin{cases} L_{m \vee n} = \frac{\mu}{4\pi} \cdot \frac{1}{I_{m \vee n}^2} \times \\ \times \iiint_{V_{m \vee n}} \left(\left[\iiint_{V_{m \vee n}} \frac{\mathbf{j}_{m' \vee n} \cdot dv_{m' \vee n}}{\zeta_{m',m' \vee n}, n''} \right], \mathbf{j}_{m'', n''} \right) dv_{m'', n''}; \\ M_{m,n} = M_{n,m} = \frac{\mu}{4\pi} \cdot \frac{1}{I_m \cdot I_n} \times \\ \times \iiint_{V_m} \left(\left[\iiint_{V_n} \frac{\mathbf{j}_n \cdot dv_n}{\zeta_{n,m}} \right], \mathbf{j}_m \right) dv_m, \end{cases} \quad (5)$$

где $\zeta_{m,n}$ – расстояние между точкой m и бесконечно малым объемом dv_n .

В соответствии с [5] объемы $V_{m \vee n}$ контуров $C_{m \vee n}$ можно разбить на участки:

$$V_n = \sum_{i=1}^{K_n} V_{(n,i)} = \sum_{i=1}^{K_n} \left[\iiint_{V_{(n,i)}} dv_{(n,i)} \right];$$

$$V_m = \sum_{j=1}^{K_m} V_{(m,j)} = \sum_{j=1}^{K_m} \left[\iiint_{V_{(m,j)}} dv_{(m,j)} \right],$$

где $V_{(m,j)}, V_{(n,i)}$ объемы участков контуров C_m, C_n с длиной контура $\Delta C_{m,j}, \Delta C_{n,i}$.

Соотношения (3) можно преобразовать к виду:

$$\left\{ \begin{aligned} L_{m \vee n} &= \frac{\mu}{4\pi} \cdot \frac{1}{I_{m \vee n}^2} \times \\ &\times \iiint_{V_{m \vee n}} \left(\left[\iiint_{V_{m \vee n}} \frac{\mathbf{j}_{m' \vee n}}{\zeta_{m', m' \vee n', n''}} dv_{m' \vee n'} \right], \mathbf{j}_{m'', n''} \right) dv_{m'', n''}; \\ M_{m,n} &= M_{n,m} = \frac{\mu}{4\pi} \cdot \frac{1}{I_m \cdot I_n} \times \\ &\times \iiint_{V_m} \left(\left[\iiint_{V_n} \frac{\mathbf{j}_n dv_n}{\zeta_{n,m}} \right], \mathbf{j}_m \right) dv_m, \end{aligned} \right. \quad (6)$$

Таким образом, собственную индуктивность L_m контура C_m в соотношении (3) можно формально представить в виде суммы выражений для его участков:

$$\left\{ \begin{aligned} L_m &= \sum_{j=1}^{K_m} L(\Delta C_{m,j}, j); \\ L(\Delta C_{m,j}, j) &= L(m, j) + \sum_{i=1, i \neq j}^{K_m} M(m', m'', j, i). \end{aligned} \right. \quad (7)$$

С использованием соотношений (4)–(7) магнитную энергию контура C_m можно оценивать как сумму магнитных энергий его участков:

$$\left\{ \begin{aligned} W_m &= \sum_{j=1}^{K_m} W(\Delta C_{m,j}, j), W(\Delta C_{m,j}, j) = \\ &= W_{L(m,j)} + \sum_{i=1, i \neq j}^{K_m} W_{M(m,j,i)}; \\ W_{L(m,j)} &= L(m, j) \cdot (I_m)^2, W_{M(m,j,i)} =, \\ &= \left[\sum_{i=1, i \neq j}^{K_m} M(m, j, i) \right] \cdot (I_m)^2 \end{aligned} \right.$$

где

$$\left\{ \begin{aligned} L(m, j) &= \\ &= \frac{\mu}{4\pi} \frac{1}{I_m^2} \iiint_{V_{m,j}} \iiint_{V_{m,j}} \left(\mathbf{j}(m', j), \mathbf{j}(m'', j) \right) \frac{dv_{(m', j)} dv_{(m'', j)}}{\zeta_{(m', j), (m'', j)}}, \\ &j \in (1, \dots, K_m); \\ M(m, j, i) &= \\ &= \frac{\mu}{4\pi} \cdot \iiint_{V_{(m', j)}} \iiint_{V_{(m'', i)}} \left(\mathbf{j}(m', i), \mathbf{j}(m'', j) \right) \frac{dv_{(m', i)} dv_{(m'', j)}}{\zeta_{(m', i), (m'', j)}}, \end{aligned} \right. \quad (8)$$

Аналогичным образом можно определить формулировки для составляющих магнитной энергии, обусловленной взаимными индуктивностями участков $\Delta C_{m,j}, \Delta C_{n,i}$:

$$\left\{ \begin{aligned} W_{(m,n)} &= (I_m \cdot I_n) \cdot \sum_{j=1}^{K_m} \sum_{i=1}^{K_n} W_{(m,n,j,i)}; \\ W_{(m,n,j,i)} &= (I_m \cdot I_n) \cdot M(m, n, j, i), \end{aligned} \right.$$

где

$$M(m, n, j, i) = \frac{\mu}{4\pi} \frac{1}{I_m \cdot I_n} \iiint_{V_{m,j}} \iiint_{V_{n,i}} \left(\mathbf{j}(m, j), \mathbf{j}(n, i) \right) \frac{dv_{(m,j)} dv_{(n,i)}}{\zeta_{(n,i), (m,j)}}, \quad (9)$$

$m \neq n$.

Точность расчета интегральных соотношений (4)–(9) определяет точность расчета токов участков, падений напряжения и потерь активной мощности.

Однако при неравномерном распределении модуля и фаз плотности токов в объемах массивных токопроводов коротких сетей переменного тока, обусловленном поверхностным эффектом и внешним поверхностным эффектом, итерационные процессы из-за многократного интегрирования в соотношениях (4)–(9) требуют значительных вычислительных затрат и не всегда обеспечивают сходимость и точность расчетов искомых электрических параметров. Поэтому для начального приближения схемной модели (1)–(10) принимаются условия равномерного распределения плотности тока, однородности фаз и коллинеарности векторов $(\mathbf{j}_m \uparrow \uparrow \mathbf{c}_m \uparrow \uparrow \boldsymbol{\pi}_m)$, $(\mathbf{j}_n \uparrow \uparrow \mathbf{c}_n \uparrow \uparrow \boldsymbol{\pi}_n)$. Это позволяет существенно упростить выражения для собственной индуктивности (8) и взаимной индуктивности участков (9) и привести их к виду, аналогичному известным расчетным формулам [4]:

$$\left\{ \begin{aligned} L_{DC(m,i)} &= \frac{\mu_0 \cdot \Delta C_{m,i}}{2\pi} \left[\ln(2\Delta C_{m,i}/g_{i,i}) - 1 \right] \\ M_{DC(m,j,i)} &= \frac{\mu_0 \cdot \Delta C_{m,i}}{2\pi} \left[\ln(2\Delta C_{m,i}/g_{m,j,i}) - 1 \right] \\ i &= 1, \dots, K_m, j = 1, \dots, K_m, i \neq j; \\ M_{DC(m,n)} &= \frac{\mu_0 \cdot \Delta C_{m,n}}{2\pi} \left[\ln(2\Delta C_{m,n}/g_{m,n}) - 1 \right], \\ m &= 1, \dots, M_m, N = 1, \dots, N_n. \end{aligned} \right. \quad (11)$$

где μ_0 – магнитная проницаемость, $g_{m,j,i}, g_{m,n}$ – среднегеометрические расстояния, которые определяются с учетом взаимного расположения токопроводов.

Для схемной модели (1) – (10) вводится вектор адаптации с компонентами

$$K_{AC} = \{ \{k_{д,i}\}, \{k_{L,i}\}, \{k_{AC,i}\}, \{k_{m,n}\} \}, \quad (12)$$

параметры которого определяют методом динамического программирования [10] из условия минимума токовой погрешности

$$\min \left[\sum_j \left(\sum_i \mathbf{i}_i(\mathbf{D}) - \mathbf{i}_k \right)_j^2 \right]$$

и соотношений:

$$\begin{aligned} \{k_{д,i}\} &= \{R_{AC(m,i)}/R_{DC(m,i)}\}, \{k_{L,i}\} = \\ &= \{L_{AC(m,i)}/L_{DC(m,i)}\} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \{k_{AC,i}\} &= \left\{ \frac{\sum_{j=1, i \neq j}^{K_m} M_{AC(m,j,i)}}{\sum_{j=1, i \neq j}^{K_m} M_{DC(m,j,i)}} \right\}; \\ \{k_{m,n}\} &= \left\{ \frac{\sum_{i=1}^{K_n} M_{AC(m,n,j,i)}}{\sum_{i=1}^{K_n} M_{DC(m,n,j,i)}} \right\}. \end{aligned} \quad (14)$$

На эффективность вычислительного процесса оптимизации существенное влияние оказывает точность расчетов начального приближения (11) и, прежде всего, точность расчета средних геометрических расстояний для сложных конструкций шинных пакетов, для которых погрешности при использовании приближенных соотношений [5] могут достигать свыше 20%.

При использовании сложных символьных преобразований либо квадратурных формул интегрирования [11] требуются значительные затраты времени и вычислительных ресурсов. Поэтому для токопроводов с шинами прямоугольного сечения целесообразно использовать обобщенные соотношения для среднегеометрических расстояний, собственных и взаимных индуктивностей, предложенные в работе [7].

Для апробации новой методики адаптации схемной модели допустимая область проекций вектора адаптации:

$$1,27 \leq K_{AC,0} \leq 1,28; 0,955 \leq K_{AC,1} \leq 0,9625;$$

$$0,955 \leq K_{AC,2} \leq 0,9625; 1,05 \leq K_{AC,3} \leq 1,052$$

устанавливалась методом упорядоченного перебора с учетом влияния неравномерного распределения плотности тока и внешнего поверхностного эффекта. Была выполнена динамическая оптимизация параметров вектора (12) по данным 3D моделирования электромагнитных полей в зоне керна и бокового шинного пакета, что обеспечило существенное улучшение точности расчетов токов в боковом шинном пакете (рис. 1).

Установлено, что распределение токов в боковом шинном пакете определяется, прежде всего, величинами реактивного сопротивления их шин. Поэтому их активными сопротивлениями можно было пренебречь, что позволило линеаризовать систему (1) – (3) и существенно сократить затраты времени при решении систем линейных алгебраических уравнений. Такое упрощение системы (1) – (3) практически не влияет на точность определения токов в шинах бокового шинопакета, погрешность расчета которых не превышает 3,8% по сравнению с данными полевого моделирования.

Динамическая адаптация схемной модели (1) – (3) позволяет снизить погрешность расчета токов с 20,12% до 3,62% (рис. 1) [1]. Достоверность и точность результатов моделирования подтверждалась сравнением расчет-

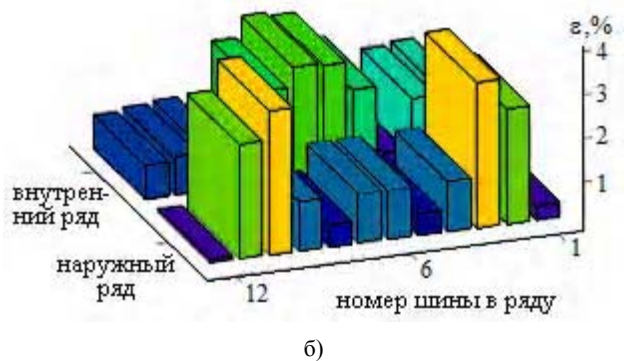
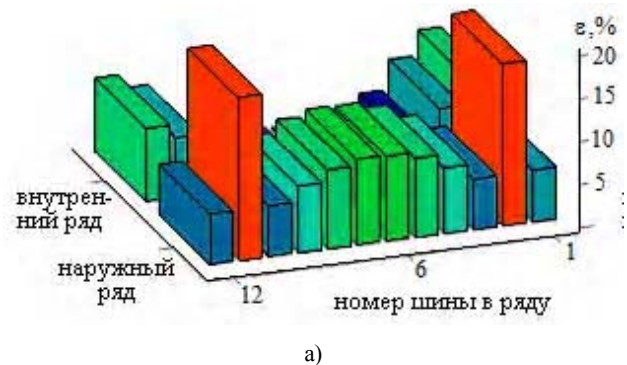


Рисунок 1 – Точность расчета распределения токов в боковом шинном пакете:
а – без адаптации параметров схемной модели,
б – при динамической адаптации схемной модели

ных данных с данными измерения падений напряжений на элементах печной петли в производственных условиях при графитации заготовок электродов. Погрешность для действующих значений падений напряжения на токоподводах переднего и заднего торца составляла 7,5...8,2 % и на боковом шинопакете – 6,8...7,92%. Измерения проводились на ПАО «Украинский графит» специализированным многоканальным мобильным автоматическим измерительным комплексом (класс точности 0,2) [1].

Следует отметить, что при использовании этой методики расчета для шинных пакетов мощных печей графитации переменного тока нет необходимости уточнения вектора адаптации для различных токовых режимов. Это существенно снижает трудоемкость расчетов и соответствует требованиям оптимизации конструктивных параметров коротких сетей.

ВЫВОДЫ

Разработанная методика динамической адаптации схемных моделей сильнотоковых токопроводов мощных технологических комплексов электропечей с использованием вспомогательной задачи минимизации относительной токовой погрешности для определения проекций вектора адаптации, реализуемой методом динамического программирования, позволяет учитывать влияние электромагнитных процессов на электрические параметры. При этом, обеспечивается более высокая, по сравнению с известными инженерными методиками, точность расчетов (относительная погрешность менее 4%), а также эффективность численной реализации, что подтверждается сравнением полученных результатов с данными экспериментальных измерений в промышленных условиях. При использовании предложенной методики расчета нет необходимости уточнения вектора адаптации для различных токовых режимов. Это существенно снижает трудоемкость расчетов и соответствует требованиям оптимизации конструктивных параметров коротких сетей. Численная реализация данной методики, в отличие от полевого моделирования, не требует существенных затрат вычислительных и временных ресурсов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ярымбаш Д. С. Особенности контроля электрических параметров, мощности и энергопотребления во время кампании графитации в печи переменного тока / Ярымбаш Д. С., Ярымбаш С. Т., Тютюнник О. В. // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ, 2006, – Вип. 3/2006(38), – С. 53 – 55.
2. Ярымбаш Д. С. Особенности определения параметров электрической схемы замещения печной петли печи графитации переменного тока / Д. С. Ярымбаш, И. М. Килимник, С. Т. Ярымбаш // Електротехніка та електроенергетика. – 2010. №2. – С. 36 – 43.
3. Канов Л. Н. Применения схемного моделирования для расчетов режимов электрических систем переменного тока / Л. Н. Канов // Електротехніка та електроенергетика. – 2009. №2. – С. 72 – 76.
4. Калантаров П. Л. Расчет индуктивности: [справочная книга] / П. Л. Калантаров, Л. А. Цейтлин. – [3-е изд.] – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.
5. Данцис Я. Б. Короткие сети и электрические параметры дуговых электропечей / Я. Б. Данцис, Г. М. Жиров. – М.: Металлургия, 1987. – 320 с.
7. Ярымбаш Д. С. Повышение энергоэффективности электротехнического комплекса графитации при модернизации боковых шинных пакетов мощных печей графитации / Д. С. Ярымбаш, С. Т. Ярымбаш // Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. Вип. 132/2012. Серія: Механіка, енергетика, екологія. — Севастополь, 2012. С. 93 – 100.
8. Ярымбаш Д. С. Применение адаптированных схемных моделей для расчета токов короткой сети мощных электротехнических комплексов / Д. С. Ярымбаш // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2012. №2. – С. 72 – 76.
9. Арнольд В. И. Математические методы классической механики / В. И. Арнольд. – М.: Наука, 1989. – 472 с.
10. Аветисян, Д. А. Оптимальное проектирование электрических машин на ЭВМ / Аветисян Д. А., Соколов В. С., Хан В. С. — М.: Энергия, 1976. — 208с.
11. Бахвалов Н. С. Численные методы / Н. С. Бахвалов, Н. П. Жидков, Г. М. Кобельков. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2003. – 632 с.

Статья поступила в редакцию 10.12.2015

Ярымбаш Д. С.¹, Килимник И. М.², Ярымбаш С. Т.³

¹Д.т.н., доцент, зав. каф. «Електричні машини», Запорізькій національний технічний університет, Україна

²К.т.н., доцент, доцент кафедри «Вища математика», Запорізькій національний технічний університет, Україна

³К.т.н., доцент, доцент кафедри «Електропостачання промислових підприємств», Запорізькій національний технічний університет, Україна

ДИНАМІЧНА АДАПТАЦІЯ СХЕМНИХ МОДЕЛЕЙ КОРОТКОЇ МЕРЕЖІ

Стаття присвячена вирішенню актуальних наукових і прикладних задач розвитку наукових і технічних основ оптимізації та ефективного розрахунку систем живлення потужних технологічних комплексів електропечей змінного струму.

Метою роботи була розробка методики динамічної адаптації схемних моделей потужнострумових токопроводов електропечей для підвищення точності і обчислювальної ефективності розрахунку, що враховує вплив електромагнітні взаємодії на електричні параметри і розподіл струмів у струмопроводах.

Для моделювання процесів змінного струму, що протікають в потужнострумових системах електроживлення

потужних електропечей, була сформована система рівнянь з відомими умовами послідовного або паралельного з'єднання гілок електричних контурів, рівнянь магнітної енергії для цих контурів і рівнянь їх власної та взаємної індуктивності.

Використання допоміжної умови мінімізації відносної струмової похибки для визначення проєкції вектора адаптації, яка реалізується методом динамічного програмування, дозволило врахувати вплив електромагнітних процесів на електричні параметри систем живлення потужних технологічних комплексів електропечей змінного струму.

Чисельна реалізація методу динамічної адаптації для схемних моделей потужнострумових струмопроводів потужних технологічних комплексів електропечей показує суттєве зниження витрат на обчислювальні ресурси і часу.

Запропонована методика забезпечує більш високу точність розрахунків, у порівнянні з відомими інженерними методиками, і високу обчислювальну ефективність, у порівнянні з чисельною реалізацією польових моделей.

Ключові слова: динамічна адаптація, схемна модель, електричні параметри, піч опору, коротка мережа

Yarymbash D. S.¹, Kilimnik I. M.², Yarymbash S. T.³

¹Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor Head of Department «Electrical machines», Zaporizhzhya national technical university, Ukraine

²Ph.D., Associate Professor, Senior Lecturer of Department «High mathematics», Zaporizhzhya national technical university, Ukraine

³Ph.D., Associate Professor, Senior Lecturer of Department «Electrical machines», Zaporizhzhya national technical university, Ukraine

THE DYNAMIC ADAPTATION OF CIRCUIT MODELS OF SHORT-CIRCUIT

The paper is devoted to the solution of actual scientific and applied problems of development of scientific and technical basis of optimization and efficient calculation of electrical supply systems of high-power industrial complexes of AC electric furnaces.

The aim of research was to develop the dynamic adaptation method of circuit models of high-current conductors system of AC furnaces and to improve the accuracy and computational efficiency of calculations and correlation of the electromagnetic interaction effects with the electrical parameters of the current distribution in the bus systems.

The system of equations with the conditions of serial and parallel connections of electric circuits, the system of equations for the magnetic energy of these contours, the system of equations of self and mutual inductance contours were proposed for modeling processes in the AC high-current power supply systems of high-power furnaces.

The problem of the relative current error minimization is added, and determination of the adaptation vector projections is realized by the dynamic programming method. It allows to take into account the influence of the electromagnetic processes on the electrical parameters of the power systems of powerful electro-technological complexes of AC electric furnaces.

The experience of numerical realization of the method of circuit model dynamic adaptation of powerful high-current conductors of electric technological systems of AC furnaces shows the significant reduction in the cost of computing resources and time.

This method provides the higher accuracy of calculations as compared with known engineering techniques, and high effectiveness computation as compared with numerical realization of field models.

Keywords: dynamic adaptation, circuit model, electrical parameters, electric resistance furnace, short-circuits

REFERENCES

1. Yarymbash D. S., Yarymbash S. T., Tyutyunnik O. V., Osobnosti kontrolya elektricheskikh parametrov, moschnosti i energopotrebleniya vo vremya kampanii grafitatsii v pechi peremennogo toka, *Visnik Kremenchutskogo derzhavnogo politehnichnogo uniuersitetu*, KDPU, Kremenchuk, 2006, No. 3(38), pp. 53–55.
2. Yarymbash D. S., Kilimnik I. M., Yarymbash S. T., Osobnosti opredeleniya parametrov elektricheskoy shemy zamescheniya pechnoy petli pechi grafitatsii peremennogo toka, *Elektrotehnika ta elektroenergetika*, 2010, No. 2, pp. 36–43.
3. Kanov L. N., Primeneniya shemnogo modelirovaniya dlya raschetov rezhimov elektricheskikh sistem peremennogo toka, *Elektrotehnika ta elektroenergetika*, 2009, No. 2, pp. 72–76.
4. Kalantarov P. L., Tseytin L. A., Raschet induktivnostey, Leningrad, Energoatomizdat, 1986, 488 p.
5. Dantsis Ya. B., Zhilov G. M., Korotkie seti i elektricheskie parametryi dugovyih elektropechey, Moscow, Metallurgiya, 1987, 320 p.
7. Yarymbash D. S., Yarymbash S. T., Povyshenie energoeffektivnosti elektrotehnicheskogo kompleksa grafitatsii pri modernizatsii bokovyih shinnyh paketov moschnykh pechey grafitatsii, *Visnyk SevNTU, Seriya: Mehanika, energetika, ekologiya*, Sevastopol, 2012, No. 132, pp. 93–100.
8. Yarymbash D. S., Primeneniya adaptirovannykh shemnykh modeley dlya rascheta tokov korotkoy seti moschnykh elektrotehnicheskikh kompleksov, *Energoberezhenie. Energetika. Energoaudit*, 2012, No. 2, pp. 72–76.
9. Arnold V. I., Matematicheskie metodyi klassicheskoy mehaniki, Moscow, Nauka, 1989, 472 p.
10. Avetisyan D. A., Sokolov V. S., Han V. S., Optimalnoe proektirovaniye elektricheskikh mashin na EVM, Moscow, Energiya, 1976, 208 p.
11. Bahvalov N. S., Zhidkov N. P., Kobelkov G. M., Chislennyye metody, Moscow, Laboratoriya Bazovyih Znaniy, 2003, 632 p.