

УДК 621.315: 621.3.025

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ КОРОТКОЙ СЕТИ МОЩНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ГРАФИТАЦИИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**Д. С. Ярымбаш**

Запорожский национальный технический университет

ул. Жуковского, 64, г. Запорожье, 69063, Украина. E-mail: yarymbash@rambler.ru

Разработана высокоэффективная адаптированная методика для идентификации параметров электродинамической стойкости шихтованных шинных пакетов электротехнических комплексов графитации большой мощности при коротком замыкании, обеспечивающая высокую точность и удовлетворяющая требованиям оптимального управления электрическими режимами графитации и компенсации реактивной мощности.

Ключевые слова: короткое замыкание, электродинамическая стойкость, шинные пакеты, оптимальное управление, режимы графитации.

ИДЕНТИФІКАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНОЇ СТІЙКОСТІ КОРОТКОЇ МЕРЕЖІ ПОТУЖНИХ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ ГРАФІТАЦІЇ ЗМІННОГО СТРУМУ**Д. С. Ярымбаш**

Запорізький національний технічний університет

вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, 69063, Україна. E-mail: yarymbash@rambler.ru

Розроблено високоефективну адаптовану методіку для ідентифікації параметрів електродинамічної стійкості шихтованих шинних пакетів електротехнічних комплексів графітації великої потужності при короткому замиканні, що забезпечує високу точність і задовольняє вимогам оптимального керування електричними режимами графітації й компенсації реактивної потужності.

Ключові слова: коротке замикання, електродинамічна стійкість, шинні пакети, оптимальне керування, режими графітації.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. При разработке энергоэффективных систем автоматизированного управления (САУ) электротехническими комплексами графитации (ЭТКГ) большой мощности одной из основных задач является обеспечение динамической стойкости короткой сети и, прежде всего, главного шинного пакета (ГШП) при коротком замыкании (КЗ).

Электродинамическая стойкость ГШП секций печей графитации переменного тока определяется большим числом факторов: ударными токами КЗ, которые зависят от режимов графитации и компенсации реактивной мощности, механическими свойствами шин, геометрическими характеристиками их поперечных сечений, пролетов между изоляторами и стяжками, взаимным расположением шин, другими особенностями конструктивного исполнения.

Известные инженерные методики оценки электродинамической стойкости шинных пакетов при КЗ [1, 2], обладая вычислительной эффективностью, не учитывают в достаточной мере особенности конструктивного исполнения шихтованных ГШП и не всегда удовлетворяют требованиям точности при оптимизации электрических режимов графитации. С другой стороны, подходы, связанные с моделированием нестационарных электромагнитных полей во вторичных сетях ЭТКГ переменного тока [3], обладая общностью и высокой точностью, требуют значительных вычислительных ресурсов и не обеспечивают управление ЭТКГ в режиме реального времени.

Это обуславливает необходимость при разработке новых энергоэффективных и модернизации действующих САУ, обеспечивающих оптимальные режимы графитации, надежность работы оборудования и систем ЭТКГ большой мощности, адаптировать существующие методики оценки динамической стойкости шихтованных ГШП по точности и вычислительной эффективности, что является актуальной научно-технической задачей.

Целью работы является разработка адаптированной

методики для идентификации параметров электродинамической стойкости короткой сети мощных ЭТКГ переменного тока, обеспечивающей высокую точность, вычислительную эффективность и удовлетворяющей требованиям оптимального управления электрическими режимами графитации и компенсации реактивной мощности в режиме реального времени.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. При модернизации ЭТКГ переменного тока с секциями печей Ачесона большой мощности [4] могут применяться однорядные и двухрядные шихтованные ГШП с алюминиевыми и медными шинами прямоугольного сечения [3].

Динамическая стойкость ГШП при КЗ определяется условиями [2]:

$$\left\{ \delta_{\max} \leq \delta_{\text{доп.}}, F_{\text{из.}} \leq F_{\text{доп. изг.}}, \sigma_{\max} \leq \sigma_{\text{доп.}}, \right. \quad (1)$$

где δ_{\max} , σ_{\max} – максимальные прогибы и максимальные механические напряжения в шинах, $F_{\text{из.}}$ – максимальные изгибающие усилия в изоляторах, $\delta_{\text{доп.}}$, $\sigma_{\text{доп.}}$, $F_{\text{доп. изг.}}$ – допустимые прогибы, допустимые напряжения в жестких шинах и допустимые нагрузки при изгибе изоляторов, которые соответствуют требованиям [2]:

$$\left\{ \sigma_{\text{доп.}} = 0, 7\sigma_p, F_{\text{доп. изг.}} = NF_{\text{разр. изг.}} \frac{h}{H}, \right. \quad (2)$$

где σ_p – временное сопротивление материала шины разрыву, $F_{\text{разр. изг.}}$ – заданная заводом-изготовителем минимальная разрушающая нагрузка при изгибе изолятора, $N = 0,5$ – коэффициент допустимой нагрузки, h и H – расстояния от опасного сечения изолятора до его вершины и центра тяжести поперечного сечения шины.

Ударные электродинамические усилия КЗ для i -й шины шихтованного ГШП

$$\dot{F}_i = \dot{F}_{iA} + \dot{F}_{iX} = \sum_{i \neq j} \dot{F}_{i,jA} + \sum_{i \neq j} \dot{F}_{i,jX} \quad (3)$$

обуславлюються електромагнітним взаємодієм з іншими шинами сторін А, Х [2], где

$$\dot{F}_{i,j} = 2 \cdot 10^{-7} \dot{I}_{m,i} \dot{I}_{m,j} \frac{l_{i,j}}{a_{i,j}} K_{f_{i-j}}, \quad \left(\begin{array}{l} i \neq j, \\ i, j \leq N_{sh}/2 \end{array} \right), \quad (4)$$

$\dot{I}_{m,i}, \dot{I}_{m,j}$ – ударные токи в шинах, $K_{f_{i-j}}$ – коэффициент формы, $a_{i,j}, l_{i,j} = l$ – расстояния между осями и длина расчетных участков шин, N_{sh} – число шин шихтованного пакета.

По данным моделирования электромагнитных полей в ГШП [3] установлено, что в зависимости от положения шины в пакете амплитуды результирующих усилий $|\dot{F}_i|$ могут составлять 0,1 %–20 % от

соответствующих значений амплитуд $|\dot{F}_{iA}|, |\dot{F}_{iX}|$.

Это предъявляет повышенные требования к точности расчетов на основе соотношений (3), (4) и, следовательно, к снижению токовых погрешностей и погрешности идентификации коэффициента формы K_F [2]. Высокая точность расчета токов методами схемного моделирования и средних геометрических расстояний [5] обеспечивалась процедурой адаптации сопротивлений взаимной индукции и самоиндукции параллельных шин по критерию минимума токовой погрешности на основании результатов моделирования электромагнитных полей в ГШП [3].

Обработка данных, представленных конечной совокупностью графических зависимостей $K_F(\beta_H)_j, [\beta_H = (a-b)/(h+b)] \in (b_{h0}, b_{hm})$ [2] для параметров $[\gamma_H = b/h]_j \in (g_{h0}, g_{hn}), 0 \leq j \leq n$ и сечений шин ГШП $(b \times h)_j$, реализовывалась программой Graph2DIGIT. Это позволило с высокой точностью сформировать множество значений коэффициентов $K_{F_{i,j}}, (0 \leq i \leq m, 0 \leq j \leq n)$, соответствующее векторам дискретных параметров $[b_{h0}, \dots, b_{hi}, \dots, b_{hm}], [g_{h0}, \dots, g_{hj}, \dots, g_{hn}]$.

Для улучшения точности идентификации зависимости $K_F(\beta_H, \gamma_H)$ выполнялась модификация метода кубической сплайн-интерполяции на функциональном базисе полиномов Эрмита, представленных вектором функций вида [6]:

$$\begin{bmatrix} \phi_0(\tau) \\ \phi_1(\tau) \\ \phi_2(\tau) \\ \phi_3(\tau) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (2\tau+1)(1-\tau^2) \\ (3-2\tau)\tau^2 \\ \tau(1-\tau)^2 \\ (\tau-1)\tau^2 \end{bmatrix}, \quad 0 \leq \tau \leq 1. \quad (5)$$

При этом множеству кривых $K_F(\beta_H)_j, (\gamma_H = g_{hj}, 0 \leq j \leq n)$ ставился в соответствие вектор функций интерполяции с проекциями:

$$f_\lambda(\beta_H)_j = \phi_0(\tau_{\beta_i}) K_{F_{i,j}} + \phi_1(\tau_{\beta_i}) K_{F_{i+1,j}} + \phi_2(\tau_{\beta_i}) \Delta b_{hi} \lambda_{i,j} + \phi_3(\tau_{\beta_i}) \Delta b_{hi} \lambda_{i+1,j}, \quad (6)$$

$$j = 0, \dots, n, \quad i = 0, \dots, m-1,$$

для которого неизвестные коэффициенты $\lambda_{i,j}$ определялись из условий минимума функционалов [6]:

$$\min \left\{ J_m(\lambda^{(j)}) = \int_{b_{hi}}^{b_{hi+1}} [f_\lambda''(\beta_H)_j]^2 d\beta_H \right\}, \quad (7)$$

$$j = 0, \dots, n, \quad i = 0, \dots, m-1.$$

где

$$\tau_{\beta_i} = \frac{\beta_H - b_{hi}}{b_{hi+1} - b_{hi}}, \quad \Delta b_{hi} = b_{hi+1} - b_{hi}.$$

Для каждого заданного значения $\forall \beta_H \in (b_{h0}, b_{hm})$ вектором функций интерполяции (6) формировался соответствующий вектор значений $K_{F_j} = f_\lambda(\beta_H)_j, 0 \leq j \leq n$, что позволило применить базис полиномов Эрмита (5) для кубической сплайн-интерполяции по параметру γ_H и описать интерполирующее выражение для двух независимых параметров γ_H, β_H :

$$K_F(\gamma_H, \beta_H) = \phi_0(\tau_{\gamma_j}) f_\lambda(\beta_H)_j + \phi_1(\tau_{\gamma_j}) f_\lambda(\beta_H)_{j+1} + \phi_2(\tau_{\gamma_j}) \Delta g_{hj} \zeta_j + \phi_3(\tau_{\gamma_j}) \Delta g_{hj} \zeta_{j+1}, \quad (8)$$

$$j = 0, \dots, n-1$$

при векторе коэффициентов интерполяции ζ , соответствующих модифицированному условию вида:

$$\min \left(J_n(\zeta_j, \zeta_{j+1}) = \int_{g_{hj}}^{g_{hj+1}} [K_{F(\gamma_H, \beta_H)}]^2 d\gamma_H \right), \quad (9)$$

$$j = 0, \dots, n-1$$

где

$$\tau_{\gamma_j} = \frac{\gamma_H - g_{hj}}{g_{hj+1} - g_{hj}}, \quad \Delta g_{hj} = g_{hj+1} - g_{hj}.$$

Реализация модифицированного метода двухпараметрической сплайн-интерполяции (5)–(9) выполнялась в структуре средств MathCAD и визуализировалась поверхностью в трехмерной ортогональной системе координат (β_H, γ_H, K_F) (рис. 1).

Результаты расчетов значений ударных электродинамических усилий по методике (3)–(9) сравнивались с данными, полученными при моделировании плоскопараллельного поля в шихтованных ГШП [3], при этом погрешность составила 1,43 %–6,1 %, что подтвердило достаточный для управления ЭТКГ уровень точности модифицированной методики.

По данным расчетов (3)–(9) было установлено, что электродинамические усилия в шихтованных шинных пакетах распределяются неравномерно, а наибольшие их значения характерны для крайних шин пакета (рис. 2). С учетом указанных факторов выполнялось приведение ударных электродинамических усилий КЗ в ГШП к усилиям в эквивалентном шинопроводу, который имеет по одной шине на

сторонах А и Х. Для этого формировался вектор коэффициентов приведения ($K_\delta, K_{iz}, K_\sigma$)

$$\begin{bmatrix} K_\delta \\ K_{iz} \\ K_\sigma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\left| \dot{F}_{sh.(i)} \right| + \left| \dot{F}_{sh.(i+1)} \right| \right)_{max} \\ \left| \sum_{i=1}^{N_{sh}/2} \dot{F}_{2i} \right| \\ \left| \dot{F}_{sh.(i)} \right|_{max} \end{bmatrix} \frac{l}{F_{ud}^{(A-X)}}, \quad (10)$$

где

$$F_{ud}^{(A-X)} = \left(2 \cdot 10^{-7} / a \right) l \left(I_{ud}^{(A-X)} \right)^2 \quad (11)$$

– максимальная эквивалентная сила, обусловленная равномерно распределенной по длине пролета l нагрузкой, $I_{ud}^{(A-X)}$ – ударный ток короткого замыкания.

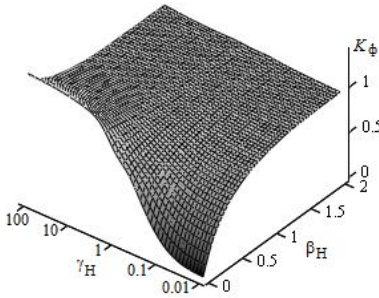


Рисунок 1 – Поверхность сплайн-интерполяции для коэффициента формы K_Φ

С учетом (10), (11) известные соотношения для максимальных прогибов δ_{max} [2], максимальных изгибающих усилий в изоляторах F_{iz} и максимальных механических напряжений в шинах σ_{max} [2] примут вид:

$$\begin{cases} \delta_{max} = \frac{5}{384} \frac{\left(K_\delta F_{ud}^{(A-X)} / l \right) l_s^4}{EJ}, \\ F_{iz} = \beta \left(K_{iz} F_{ud}^{(A-X)} \right) \eta, \\ \sigma_{max} = \frac{\left(K_\sigma F_{ud}^{(A-X)} \right) l}{\lambda W} \eta \end{cases} \quad (12)$$

при коэффициентах $\lambda = 10, \beta = 1,13$ – для крайних пролетов, $\lambda = 12, \beta = 1$ – для средних пролетов между изоляторами и η – динамическом коэффициенте, учитывающем кратность ударного тока КЗ K_{ud} и собственную частоту механических колебаний шин f_1 [2]:

$$f_1 = \frac{r_1^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m}}, \quad f_1^* = f_1 / 50, \quad (13)$$

где l_s – расстояние между стяжками, E, J, m – модуль упругости, момент инерции поперечного сечения и масса шины единичной длины, $r_1 = 4,13$ – параметр основной собственной частоты шины многопролетного ГПП [2].

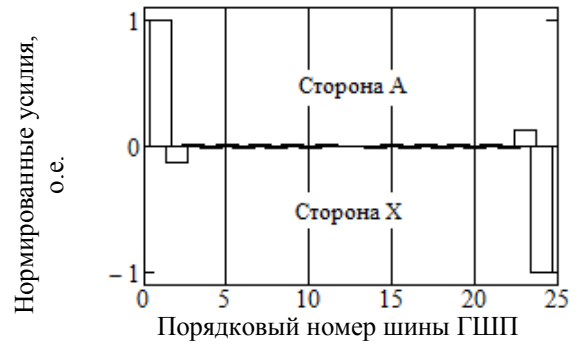


Рисунок 2 – Распределение нормированных значений электродинамических усилий $\left| \dot{F}_i \right| / \left| \dot{F}_i \right|_{max}$ в шихтованном пакете из 24 шин

Функциональное описание поверхности динамического коэффициента $\eta \left(K_{ud}, f_1^* \right)$ строилось на множестве дискретных значений $\left\{ \eta_{i,j}, K_{ud.i}, \left(f_1^* \right)_j \right\}$, которое формировалось программой Graph2DIGIT для совокупности графических зависимостей $\eta \left(f_1^* \right)_i$, соответствующих значениям $K_{ud.i}$ [2]. Для этого множества применялись методы полиномиальной и логарифмической регрессии [6] на выделенных подобластях изменения параметров $K_{ud.m} \leq K_{ud} \leq K_{ud.m+1}, \left(f_1^* \right)_n \leq \left(f_1^* \right) \leq \left(f_1^* \right)_{n+1}$ и формировалась условная функция вида:

$$\eta \left(K_{ud}, f_1^* \right) = \begin{cases} 3,564 - 3,68K_{ud} + 1,124K_{ud}^2 + \\ + 5,445 \cdot 10^{-2} \ln \left(f_1^* \right), & 0,02 \leq f_1^* < 0,04; \\ 4,199 - 3,68K_{ud} + 1,1237K_{ud}^2 + \\ + 0,2515 \ln \left(f_1^* \right), & 0,04 \leq f_1^* < 2,19 \times \\ \times e^{-1,58K_{ud} + 0,48K_{ud}^2}; \\ 2,375 + 5,93 \ln \left(f_1^* \right), & 2,19 \times \\ \times e^{-1,58K_{ud} + 0,48K_{ud}^2} \leq f_1^* < 0,80; \\ 1,80, & 0,80 \leq f_1^* < 2,746; \\ 8,64 - 15,59 \ln \left(f_1^* \right), & 2,746 \leq f_1^* < 3,00; \\ 1,517 - 0,664 \ln \left(f_1^* \right), & 3,00 \leq f_1^* < 6,00; \\ 1,00, & f_1^* \geq 6,00 \end{cases} \quad (14)$$

с отображающей поверхностью в системе ортогональных координат $\left(K_{ud}, f_1^*, \eta \right)$ (рис. 3).

Относительная погрешность расчета значений динамического коэффициента с использованием условной функции (14) не превысила 1,45 % относительно данных [2].

По сравнению с результатами полевого моделирования методом конечных элементов [3] адаптированная методика идентификации электродинамических воздействий КЗ (3)–(14) обеспечивает относительную погрешность нахождения σ_{max} и $F_{iz.}$ (12) менее 7,55 %, существенно снижая требования к вычислительным ресурсам и затратам времени.

Из условий (1) следует, что допустимые области безразмерных параметров динамической стойкости ГШП располагаются ниже плоскости перпендикулярной оси соответствующего параметра и пересекающей ее на единичной высоте (рис. 4):

$$\left(\sigma_{max}^* = \sigma_{max} / \sigma_{dop.}\right) \leq 1, \quad \left(F_{iz.}^* = F_{iz.} / F_{dop. izg.}\right) \leq 1, \\ \left(\delta_{max}^* = \delta_{max} / \delta_{dop.}\right) \leq 1.$$

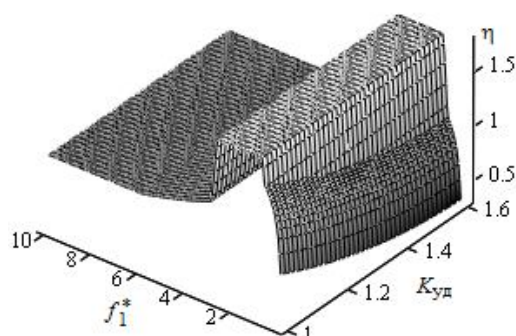


Рисунок 3 – Поверхность условной регрессии для динамического коэффициента η

Это позволяет при управлении ЭТКГ с учетом возможных электрических режимов графитации и компенсации реактивной мощности при соответствующих им значениях приведенного коэффициента ударного тока КЗ

$$K_T = K_{ud.} \frac{I_{k.u.}}{I_{k.u. Dg. max}},$$

где $I_{k.u.}$ – установившийся ток КЗ для заданных режимов графитации и компенсации реактивной мощности, $I_{k.u. Dg. max}$ – установившийся ток КЗ для режима максимума мощности графитации $P_{g. max}$, идентифицировать параметры динамической стойкости шихтованных ГШП секций сверхмощных печей графитации переменного тока для безразмерных механических напряжений и изгибающих усилий с учетом длины пролета между изоляторами l $\sigma_{max}^*(K_T, l)$, $F_{iz.}^*(K_T, l)$ (рис. 4,а,б) и относительного прогиба шины $\delta_{max}^*(K_T, l_s)$ – от длины пролета между прокладками l_s (рис. 4,в).

Следует отметить, что область допустимых максимумов механических напряжений в шинах ГШП при КЗ (рис. 4,а) включает в себя область допустимых максимумов изгибающих усилий в изоляторах (рис. 4,б). Поэтому в ЭТКГ большой мощности электродинамическая стойкость шихтованного ГШП при КЗ определяется, прежде всего, максимальными изгибающими усилиями, действующими на изоляторы (рис. 4,б), а также прогибом шин в пролете между стяжками (рис. 4,в).

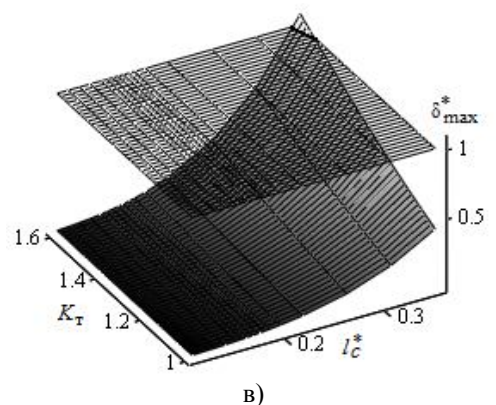
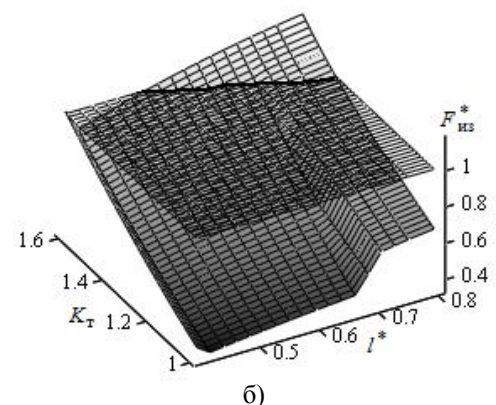
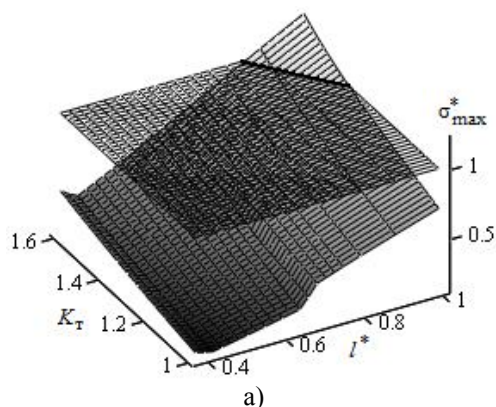


Рисунок 4 – Параметры электродинамической стойкости при КЗ

а) – σ_{max}^* , б) – $F_{iz.}^*$, в) – δ_{max}^*

При управлении режимами компенсации реактивной мощности на завершающем этапе кампании графитации подпитка от мощных емкостных устройств системы поперечной компенсации (15 МВАр и более) вызывает увеличение ударных токов КЗ на 10–15 % и, соответственно, ударных электродинамических воздействий на элементы конструкции ГШП на 20–32 %.

Анализ поверхностей безразмерных параметров электродинамической стойкости (рис. 4,а–в) показывает, что опасность разрушения ГШП может возникнуть при КЗ в короткой сети, если ЭТКГ работает в режиме максимальной мощности графитации и питающих трансформаторов или на этапе снижения активной мощности печи и подъема мощности поперечной компенсации.

Это обуславливает необходимость при увеличении единичной мощности печей в секции ЭТКГ ли-

бо ограничивать мощность компенсации, либо при модернизации ГПП уменьшать длину пролетов между изоляторами (рис. 4,а,б) на 16–20 % и между стержнями на 12–14 % (рис. 4,в).

ВЫВОДЫ. Модифицированы соотношения двухпараметрической кубической сплайн-интерполяции коэффициента формы K_f , полиномиальной и логарифмической регрессии динамического коэффициента η , что обеспечивает высокую точность определения максимальных механических напряжений и прогибов шин, а также максимальных изгибающих усилий в изоляторах (относительная погрешность не более 7,6 %).

Разработана методика идентификации безразмерных параметров электродинамической стойкости шихтованных ГПП при КЗ в короткой сети ЭТКГ большой мощности, основанная на адаптированных выражениях для эквивалентного по механическим нагрузкам одноштного токопровода, которая удовлетворяет требованиям вычислительной эффективности и точности для энергоэффективных алгоритмов управления технологическим процессом графитации в режиме реального времени.

По условиям динамической стойкости ГПП при КЗ опасными являются режимы работы ЭТКГ на максимальной мощности графитации, а также при снижении активной мощности печи и максимальной мощности поперечной компенсации. Поэтому при разработке новых энергоэффективных алгоритмов автоматизированного управления ЭТКГ большой мощности необходимо дополнительно учитывать

ограничения по максимально допустимой нагрузке трансформаторов компенсирующего устройства на завершающем этапе кампании.

ЛИТЕРАТУРА

1. Короткие сети и электрические параметры дуговых электропечей: справ. изд. / Я.Ю. Данцис, Л.С. Кацевич, Г.М. Жилов и др. – М.: Metallurgiya, 1987. – 320 с.
2. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета электродинамического и термического действия тока короткого замыкания: ГОСТ Р 52736-2007 [Действующий от 12-07-2007]. – М.: ФГУП «Стандартинформ». – 2007. – 44 с.
3. Особенности электротепловых режимов главных шинных пакетов секций печей графитации переменного тока / Д.С. Ярымбаш, С.Т. Ярымбаш, И.М. Килимник // *Электротехника и электроэнергетика*. – 2011. – № 1. – С. 64–69.
4. Чалых Е.Ф. Оборудование электродных заводов: учебное пособие для вузов. – М.: Metallurgiya, 1990. – 238 с.
5. Ярымбаш Д.С. Применение адаптированных схемных моделей для расчета токов короткой сети мощных электротехнических комплексов // *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*. – 2012. – № 2. – С. 72–76.
6. Математика и САПР. Кн. 2. «Вычислительные методы. Геометрические методы» / Под ред. Н.Г. Волкова. – М.: Мир, 1989. – 260 с.

IDENTIFICATION OF THE ELECTRODYNAMIC STABILITY PARAMETERS OF SHORT CIRCUIT OF POWERFUL ELECTRICAL SYSTEMS GRAPHITIZATION AC

D. Yarymbash

Zaporizhzhya National Technical University
ul. Zhukovskogo, 64, Zaporozhye, 69063, Ukraine. E-mail: yarymbash@rambler.ru

The high efficiency adapted identification method of short-circuit electrodynamic stability parameters of the laminated bus packages of the high power graphitization electrical complexes are developed. The high accuracy and optimal control conditions of electrical regimes of graphitization and reactive power compensations are provided.

Key words: short-circuit, electrodynamic stability, bus packages, optimal control, graphitization regimes.

REFERENCES

1. *Short network and electrical parameters of electric arc furnaces. Reference edition* / Y.B. Dancis, L.S. Kacevich, G.M. Gilov and oth. – M.: Metallurgiya, 1987. – 320 p. [in Russian]
2. *Short-circuits in electrical installations. Calculation methods of electrodynamic and thermal effects of short-circuit current*: GOST R 52736-2007 [Valid from 12-07-2007]. – M.: FGUP «Standartinform». – 2007. – 44 p. [in Russian]
3. Features of electrothermal conditions of main bus packets of AC graphitizing furnace sections / D.S. Yarymbash, S.T. Yarymbash, I.M. Kylymnyk // *Electrotechnics and Electroenergetics*. – 2011. – № 1. – PP. 64–69. [in Russian]
4. Chalyh E.F. *Electrode plant equipment: textbook for higher education*. – M.: Metallurgiya, 1990. – 238 p. [in Russian]
5. Yarymbash D.S. Application of adapted circuit models to current calculation of short circuit of power electrical complexes // *Energy saving. Power engineering. Energy audit*. – 2012. – № 2. – PP. 72–76. [in Russian]
6. *Mathematics and CAD. Book 2. «Computational methods. Geometric methods»* / Ed. by N.G. Volkov. – M.: Mir, 1989. – 260 p. [in Russian]

Стаття надійшла 1.06.2012.
Рекомендовано до друку
к.т.н., доц. Старостінім С.С.