

УДК 621.365.32:621.3.024

Д.С. Ярымбаш, канд. техн. наук,

Севастопольский национальный технический университет

ул. Университетская 33, г. Севастополь, 99053

E-mail: yarymbash@rambler.ru

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ШИХТОВАННЫХ ШИННЫХ ПАКЕТОВ КОРОТКОЙ СЕТИ ПЕЧИ ГРАФИТАЦИИ

Предложена методика расчета динамических усилий в шихтованных шинных пакетах при коротком замыкании в короткой сети печи графитации, основанная на методах полевого моделирования и конечных элементов. Вводятся коэффициенты коррекции электродинамических сил в шинах и изоляторах, что обеспечивает высокую точность и вычислительную эффективность расчетов электродинамической стойкости при коротком замыкании.

Ключевые слова: короткое замыкание, электродинамическая стойкость, шихтованные шинные пакеты, короткая сеть, печь графитации.

При модернизации шинных пакетов короткой сети (КС) печи графитации (ПГ) или проектировании новых конструктивных решений возникает необходимость их проверки на соответствие требованиям электродинамической стойкости при коротком замыкании [1].

Электродинамическая стойкость шихтованных шинных пакетов (ШШП) КС 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 параметров электродинамической стойкости ШШП при КЗ [2, 3], обладая вычислительной эффективностью, не учитывают в достаточной мере особенности конструктивного исполнения ШШП КС и не всегда удовлетворяют требованиям точности. С другой стороны, подходы, связанные с моделированием нестационарных электромагнитных полей в элементах КС ПГ переменного тока [4], обладая общностью и высокой точностью, требуют значительных вычислительных ресурсов и затрат времени на численную реализацию.

Это обуславливает необходимость при разработке новых и модернизации действующих конструктивных решений элементов КС, обеспечивающих энергоэффективные режимы графитации, надежность работы оборудования и систем электротехнического комплекса графитации (ЭТКГ), адаптировать существующие методики оценки динамической стойкости ШШП КС по точности и вычислительной эффективности, что является актуальной научно-технической задачей.

Целью работы является разработка методики расчета параметров электродинамической стойкости по данным моделирования электромагнитных процессов в ШШП КС мощных ПГ переменного тока, обеспечивающей высокую точность и вычислительную эффективность.

Для уменьшения реактивности и потерь активной мощности в КС ПГ переменного тока большой мощности [5] применяются однорядные или двухрядные ШШП с алюминиевыми или медными шинами прямоугольного сечения [4].

Система уравнений Максвелла для изотропных сред ШШП КС ПГ для векторного магнитного потенциала имеет вид [4]:

$$\sigma_k \frac{\partial \mathbf{A}_k}{\partial t} + \nabla \times \mathbf{H}_k = \delta(t)_{e,k}, \quad k = 1, 2, 3, \dots, 2 \cdot n + 1, \quad (1)$$

где σ — удельная электрическая проводимость, \mathbf{A} — векторный магнитный потенциал, \mathbf{H} — напряженность магнитного поля, n — число шин ШШП, индексы $k = 1, 3, \dots, 2 \cdot n - 1$ соответствуют подобластям проводников ШШП фазы А, $k = 2, 4, \dots, 2 \cdot n$ — подобластям проводников шихтованных пакетов фазы Х, $k = 2 \cdot n + 1$ — подобластям окружающей среды.

Мгновенные значения $\delta(t)_{e,i}$ плотностей токов в t момент времени КЗ определяются с учетом поперечного сечения шин $S_{\text{ш}}$

$$\delta_{e,k}(t) = \mathbf{i}_k(t) / S_{\text{ш}}, \quad k = 1, 2, 3, \dots, 2 \cdot n, \quad \delta_{e,2 \cdot n + 1} = 0, \quad (2)$$

и условий для распределения токов в шинах ШШП КС при КЗ:

$$\sum_{k=1}^n \mathbf{i}_{2 \cdot k - 1}(t) = \mathbf{i}_{\text{КЗ}}(t), \quad \sum_{k=1}^n \mathbf{i}_{2 \cdot k}(t) = -\mathbf{i}_{\text{КЗ}}(t),$$

где $i_{КЗ}(t)$ — мгновенное значение тока КЗ КС.

Для нестационарной системы уравнений (1) требуется задать условия Коши, описывающие начальное распределение векторного магнитного потенциала в начальный момент времени:

$$t = 0, \quad \mathbf{A}_k|_{t=0} = \mathbf{A}_{k0}(x, y, z), \quad k = 1, 2, 3, \dots, 2 \cdot n + 1, \quad (3)$$

которые определяются для установившегося режима работы КС до момента КЗ из решения системы уравнений Максвелла в частотной формулировке для амплитуд векторного магнитного потенциала при токе КС, соответствующего заданным режимам графитации (гр) и компенсации реактивной мощности (кpm):

$$\mathbf{i}_{КС}(t) = I_{m, гр-кpm} \cdot \sin(2\pi \cdot f + \varphi_{гр-кpm}).$$

Функция векторного магнитного потенциала $\{\bar{\mathbf{A}}\}$ должна удовлетворять условиям калибровки Кулона [4]

$$\operatorname{div}\{\bar{\mathbf{A}}\} = 0, \quad (4)$$

граничным условиям и условиям сопряжения сред с разными магнитными свойствами [4].

Реализация системы уравнений (1) с условиями Коши (3), условиями Кулона (4), соответствующими граничными условиями и условиями сопряжения выполнялась в структуре средств ПО Comsol Multiphysics методом конечных элементов.

По данным моделирования устанавливалось распределение токов КЗ и электродинамических усилий в проводниках ШПП КС.

$$\left\{ \begin{array}{l} i(t)|_k = \sqrt{i_x(t)^2 + i_y(t)^2 + i_z(t)^2} \Big|_k, \\ i_x(t)|_k = \iint_{S_{yz}} \delta_x dydz \Big|_k, \quad i_y(t)|_k = \iint_{S_{xz}} \delta_y dx dz \Big|_k, \quad i_z(t)|_j = \iint_{S_{xy}} \delta_z dx dy \Big|_k, \quad k = 1, 2, 3, \dots, 2 \cdot n. \\ F_k(t) = \iint_S (\delta \times \mathbf{B}) dS, \quad S = \mathbf{i} \cdot S_{yz} + \mathbf{j} \cdot S_{xz} + \mathbf{k} \cdot S_{xy}, \end{array} \right. \quad (5)$$

С другой стороны, согласно [3], электродинамические усилия КЗ для k -й шины ШПП КС

$$F_k(t) = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{2 \cdot n} F_{k,j}(t) \quad (6)$$

обуславливаются электромагнитным взаимодействием с другими шинами сторон А, Х [3], где

$$F_{k,j}(t) = 2 \cdot 10^{-7} i(t)|_k i(t)|_j \frac{l_{k,j}}{a_{k,j}} K_{\Phi_{k-j}}, \quad (k \neq j, j \leq 2 \cdot n), \quad (7)$$

$i(t)|_k, i(t)|_j$ — ударные токи в шинах ($k \neq j$), $K_{\Phi_{k-j}}$ — коэффициент формы, $a_{k,j}, l_{k,j} = l$ — расстояния между осями и длина расчетных участков шин.

Определяются максимальные усилия в шинах

$$F_m|_k = \max_{t \geq t_{КЗ}} [F_k(t)] \quad (8)$$

и в изоляторах

$$F_{из} = \max_{t \geq t_{КЗ}} \left[F_{kA}(t) + F_{kX}(t) = \sum_{k=1}^n F_{2 \cdot k-1}(t) + \sum_{k=1}^n F_{2 \cdot k}(t) \right]. \quad (9)$$

Динамическая стойкость элементов КС ПГ при КЗ определяется условиями [3]:

$$\delta_{\max} \leq \delta_{\text{доп}}, \quad F_{из} \leq F_{\text{доп.изг.}}, \quad \sigma_{\max} \leq \sigma_{\text{доп}}, \quad (10)$$

где $\delta_{\max}, \sigma_{\max}$ — максимальные прогибы и максимальные механические напряжения в шинах, $F_{из}$ — 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]:

$$\sigma_{\text{доп}} = 0,7 \cdot \sigma_p, F_{\text{доп.изг.}} = NF_{\text{разр.изг.}} \frac{h}{H}, \quad (11)$$

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.

По данным моделирования нестационарных электромагнитных полей в ШШП установлено, что в зависимости от положения шины в пакете максимумы результирующих усилий $\max[F_k(t)]$ могут составлять 0,4...49 % от соответствующих значений максимумов $\max_{t \geq t_{\text{КЗ}}} [F_{kA}(t)]$, $\max_{t \geq t_{\text{КЗ}}} [F_{kX}(t)]$.

Результаты расчетов значений ударных электродинамических усилий по методике (1)–(5) сравнивались с данными, полученными при моделировании в частотной области плоскопараллельного поля ШШП КС [5]. При этом погрешность составляет 14,2 % и может быть устранена с помощью вектора коррекции усилий:

$$\mathbf{k}_{\text{кор}} = \left[\frac{F_1|_k}{F_1|_{\text{уд}}}, \dots, \frac{F_m|_k}{F_m|_{\text{уд}}}, \dots, \frac{F_{2-n}|_k}{F_{2-n}|_{\text{уд}}}, \frac{F_{\text{из}}}{F_{\text{из}}|_{\text{уд}}} \right]. \quad (11)$$

По данным расчетов было установлено, что электродинамические усилия в ШШП распределяются неравномерно, а наибольшие их значения характерны для крайних шин пакета (рисунок 1).

С учетом указанных факторов выполнялось приведение ударных электродинамических усилий КЗ в ШШП к усилиям в эквивалентном токопроводе, который имеет по одной шине на сторонах А и X. Для этого формировался вектор коэффициентов приведения ($K_\delta, K_{\text{из}}, K_\sigma$)

$$\begin{bmatrix} K_\delta \\ K_{\text{из}} \\ K_\sigma \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{c} (F_{u(i)} \cdot k_{\text{кор}i} + |F_{u(i+1)}| \cdot k_{\text{кор}i+1})_{\text{max}} \\ 0,5 \cdot \left(\max_{t \geq t_{\text{КЗ}}} [F_{kA}(t)] + \max_{t \geq t_{\text{КЗ}}} [F_{kX}(t)] \right) \\ \max_{k \in (1, \dots, 2-n)} (F_m|_k) \end{array} \right] \cdot \frac{1}{F_{\text{уд}}^{(A-X)}}, \quad (12)$$

где

$$F_{\text{уд}}^{(A-X)} = (2 \cdot 10^{-7} / a) \cdot l \cdot (I_{\text{уд}}^{(A-X)})^2 \quad (13)$$

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

С учетом (10), (11) известные соотношения для максимальных прогибов δ_{max} [3], максимальных изгибающих усилий в изоляторах $F_{\text{из}}$ и максимальных механических напряжений в шинах σ_{max} [3] принимают вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta_{\text{max}} = \frac{5}{384} \cdot \frac{(K_\delta \cdot F_{\text{уд}}^{(A-X)} / l) \cdot l_c^4}{E \cdot J}, \\ F_{\text{из}} = \beta \cdot (K_{\text{из}} \cdot F_{\text{уд}}^{(A-X)}) \cdot \eta, \\ \sigma_{\text{max}} = \frac{(K_\sigma \cdot F_{\text{уд}}^{(A-X)}) \cdot l}{\lambda \cdot W} \cdot \eta. \end{array} \right. \quad (14)$$

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 $K_{\text{уд}}$ и собственную частоту механических колебаний шин f_1 [3]

$$f_1 = \frac{r_1^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m}}, f_1^* = f_1 / 50, \quad (15)$$

где l_c — 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 ШШП [3].

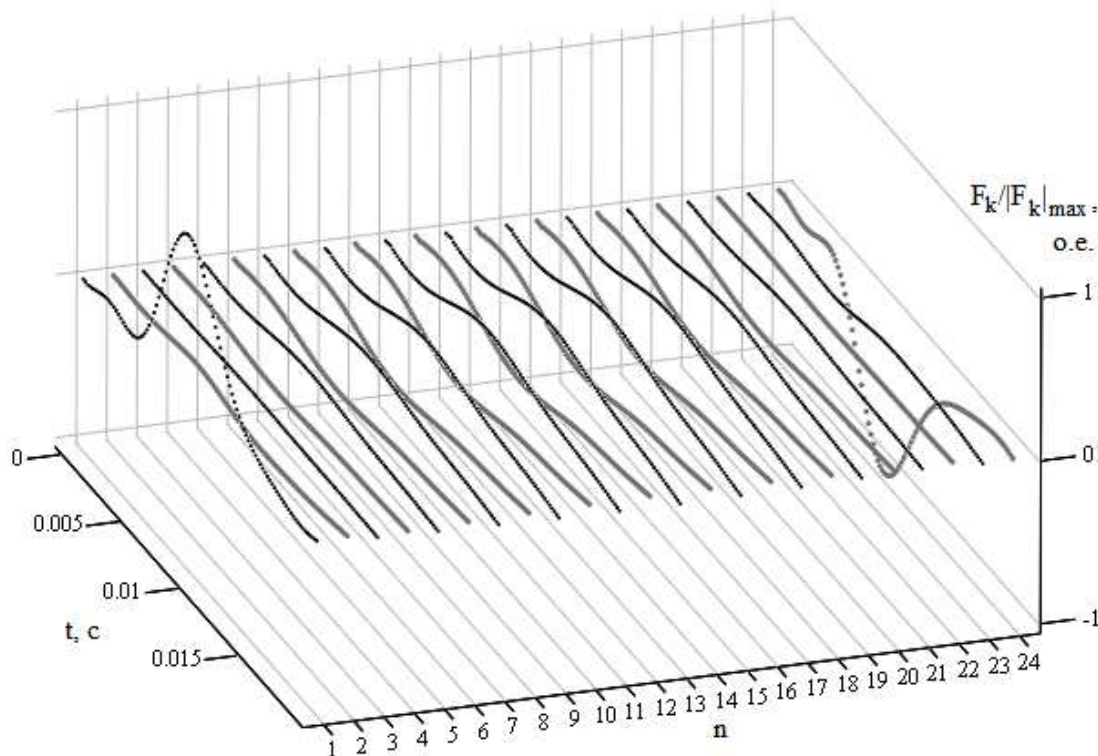


Рисунок 1 — Изменение электродинамических усилий в шинах ШШП во времени

По сравнению с результатами полевого моделирования методом конечных элементов (1)–(5) адаптированная методика идентификации электродинамических воздействий КЗ (13)–(15) с использованием векторов коэффициентов коррекции (11) и приведения (12) обеспечивает относительную погрешность нахождения σ_{\max} и $F_{\text{из}}$ менее 1,5 %, существенно снижая требования к вычислительным ресурсам и затратам времени.

Из условий (10) следует, что допустимые области безразмерных параметров динамической стойкости ШШП располагаются ниже плоскости перпендикулярной оси соответствующего параметра и пересекающей ее на единичной высоте (рисунок 2):

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

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

$$K_T = K_{\text{уд}} \cdot \frac{I_{\text{к.у.}}}{I_{\text{к.у.Рг.мак}}},$$

где $I_{\text{к.у.}}$ — установившийся ток КЗ для заданных режимов графитации и компенсации реактивной мощности, $I_{\text{к.у.Рг.мак}}$ — установившийся ток КЗ для режима максимума мощности графитации $P_{\text{г.мак}}$, идентифицировать параметры динамической стойкости шихтованных пакетов секций сверхмощных печей графитации переменного тока для безразмерных механических напряжений и изгибающих усилий с учетом длины пролета между изоляторами $\sigma_{\max}^*(K_T, l)$, $F_{\text{из}}^*(K_T, l)$ (рисунок 2, а, б) и относительного прогиба шины $\delta_{\max}^*(K_T, l_c)$ — от длины пролета между прокладками l_c (рисунок 2, в).

Следует отметить, что область допустимых максимумов механических напряжений в шинах ШШП при КЗ (рисунок 2, а) включает в себя область допустимых максимумов изгибающих усилий в изоляторах (рисунок 2, б). Поэтому в ЭТКГ большой мощности электродинамическая стойкость шихтованного ШШП при КЗ определяется, прежде всего, максимальными изгибающими усилиями,

действующими на изоляторы (рисунок 2, б), а также прогибом шин в пролете между стержнями (рисунок 2, в).

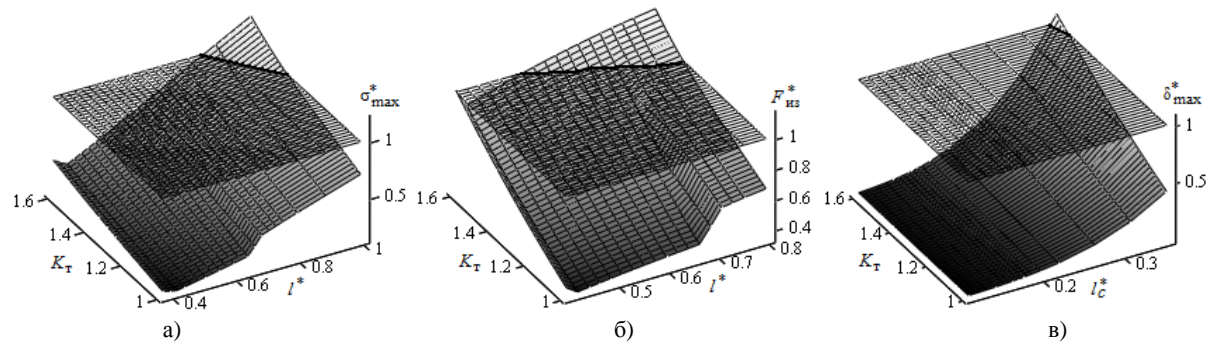


Рисунок 2 – Параметры электродинамической стойкости при КЗ: а) σ_{\max}^* , б) $F_{\text{из}}^*$, в) δ_{\max}^*

Анализ поверхностей безразмерных параметров электродинамической стойкости (рисунок 2, а – в) показывает, что опасность разрушения ШШП 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 либо ограничивать мощность компенсации, либо при модернизации ШШП уменьшать длину пролетов между изоляторами (рисунок 2, а, б) на 16...20 % и между стержнями на 12...14 % (рисунок 2, в).

Выводы

Разработана обобщенная динамическая модель ШШП КС ПГ.

С использованием вектора коэффициентов коррекции усилий и данных расчетов статической электромагнитной модели в частотной формулировке обобщена методика расчета ударных электродинамических усилий в шинах и опорных изоляторах, обеспечивающая высокую точность и вычислительную эффективность.

Вводятся безразмерные параметры электродинамической стойкости ШШП при КЗ в КС, что позволяет применить адаптированные выражения для эквивалентного по механическим нагрузкам одноштного токопровода, которые удовлетворяют требованиям вычислительной эффективности и точности для энергоэффективных алгоритмов управления технологическим процессом графитации в режиме реального времени.

По условиям динамической стойкости ШШП 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.

Библиографический список использованной литературы

1. Правила устройства электроустановок. ПУЭ-2009. — Харьков: Форт, 2010. — 708 с.
2. Короткие сети и электрические параметры дуговых электропечей. Справ. изд. / Я.Ю. Данцис, Л.С. Кацевич, Г.М. Жиров [и др.]. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Металлургия, 1987. — 320 с.
3. ГОСТ Р 52736-2007. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета электродинамического и термического действия тока короткого замыкания. [Действующий от 12-07-2007]. — М.: ФГУП «Стандартинформ», 2007. — 44 с.
4. Килимник И.М. Особенности моделирования электромагнитных процессов в индукторе калибра мундштука прессы / И.М. Килимник, Д.С. Ярымбаш // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. — Кременчук: КДПУ, 2007. — № 4 (45). — Ч. 1. — С. 53–55.
5. 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.

Поступила в редакцию 15.01.2014 г.

Яримбаш Д.С. Особливості розрахунку електродинамічної стійкості шихтованих шинних пакетів короткої мережі печі графітації

Запропоновано методику розрахунку динамічних зусиль у шихтованих шинних пакетах при короткому замиканні у короткій мережі печі графітації, яка заснована на методах польового моделювання та скінчених елементів. Вводяться коефіцієнти корекції електродинамічних сил в шинах та ізоляторах, що забезпечує високу точність і обчислювальну ефективність розрахунків електродинамічної стійкості при короткому замиканні.

Ключові слова: коротке замикання, електродинамічна стійкість, шихтовані шинні пакети, коротка мережа, піч графітації.

Yarymbash D.S. The features of the calculation of electrodynamic stability of laminated bus packages of low-voltage circuit of graphitization furnace

The method of calculating the dynamic efforts in the laminated busbar packages at short-circuit in the low-voltage circuit of graphitization furnace, which based on field simulation method and finite element method. The correction coefficients of electrodynamic efforts in the busbar and insulator are introduced. The high accuracy and computational efficiency calculations of electrodynamic stability at short-circuit are ensured.

Keywords: short-circuit, electrodynamic stability, laminated busbar packages, low-voltage circuit, graphitization furnace.