

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ МОЩНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ГРАФИТАЦИИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Предложена методика идентификации электрических параметров короткой сети электротехнического комплекса графитации переменного тока, учитывающая особенности конструктивного исполнения и температурные режимы. Выполнены расчеты и анализ ударных токов короткого замыкания электротехнического комплекса с учетом параметров системы электроснабжения, технологических режимов графитации и компенсации реактивной мощности.

Ключевые слова: ток короткого замыкания, система электроснабжения, режим графитации, компенсирующее устройство, шинный пакет.

В последние годы заострилась проблема обеспечения конкурентоспособности отечественной электродной продукции на мировых рынках, которую следует решать, снижая энергоемкость и материалоемкость производства. В технологическом цикле электродного производства самым энергоемким (6–10 МВт·ч/т) и определяющим качество продукции является процесс графитации. Широкое распространение получили электротехнические комплексы графитации (ЭТКГ) на базе печей переменного тока Ачесона [1].

Одним из основных направлений повышения энергоэффективности печей графитации является увеличение их единичной мощности, что приводит к увеличению электрической мощности ЭТКГ, токовых нагрузок коротких сетей и требует их модернизации. При этом новые конструктивные исполнения вторичных токопроводов, согласно [2], должны соответствовать условиям динамической и термической стойкости к ударным токам короткого замыкания (КЗ). Величины ударных токов КЗ определяются мощностью КЗ внешней сети [3], электрическими параметрами ЭТКГ, технологическими режимами графитации и компенсации реактивной мощности, хотя влияние последних факторов изучено недостаточно. Поэтому исследование влияния режимов работы ЭТКГ и компенсации реактивной мощности на величины ударных токов КЗ в короткой сети является весьма актуальной практической и научной задачей.

Цель работы заключается в разработке методики оценки ударных токов КЗ ЭТКГ с учетом особенностей системы его электроснабжения, электрических параметров короткой сети, режимов графитации и компенсации реактивной мощности.

Схема электроснабжения ЭТКГ переменного тока включает однотипные печные однофазные питающие (ПТ) и компенсационные трансформаторы (КТ), кабельные линии (КЛ), трансформаторы тока (ТТ), напряжения (ТН), устройство поперечной компенсации (КУ) с батареями высоковольтных конденсаторов, вторичные токопроводы со стороны НН трансформаторов и печи

графитации (ПГ), шихтованный главный шинный пакет секции (ГШП) (рис. 1).

В процессе графитации происходит существенное изменение электрических параметров комплекса, в первую очередь, активного сопротивления керна печи Ачесона, обусловленное технологическим режимом графитации (рис. 2.) [1, 4]. На начальном этапе кампании графитации, когда сопротивление печи достаточно большое, под нагрузкой работает один питающий трансформатор. Для обеспечения технологических режимов графитации и компенсации реактивной мощности применяется параллельная работа трансформаторов. Для ввода большей мощности на параллельную работу подключают второй питающий трансформатор, мощность графитации постепенно увеличивают до технологического максимума. Затем она понижается из-за уменьшения активного сопротивления керна печи и ограничения допустимых нагрузок питающих трансформаторов (рис. 2.). Во второй период кампании, когда температура керна превышает 2200–2400 °С, его активное сопротивление падает и снижается коэффициент мощности печи графитации, что обусловлено как уменьшением активного сопротивления керна, так и электрическими параметрами (активными и реактивными сопротивлениями) печной петли. Параллельно соединенные компенсационные трансформаторы подключаются на емкостную нагрузку устройства поперечной компенсации, мощность которого может составлять 17–19 МВАр. После достижения максимума мощности, суммарный ток питающих трансформаторов также достигает максимума, а затем снижается, хотя ток графитации растет. Это обусловлено, прежде всего, режимами компенсации и токовыми нагрузками компенсационных трансформаторов устройства поперечной компенсации ЭТКГ.

Для расчетов максимально возможных значений токов КЗ выбирается расчетная точка К, расположенная на главном шинном пакете ЭТКГ между подключениями шинных пакетов питающих и компенсационных трансформаторов (рис. 1).

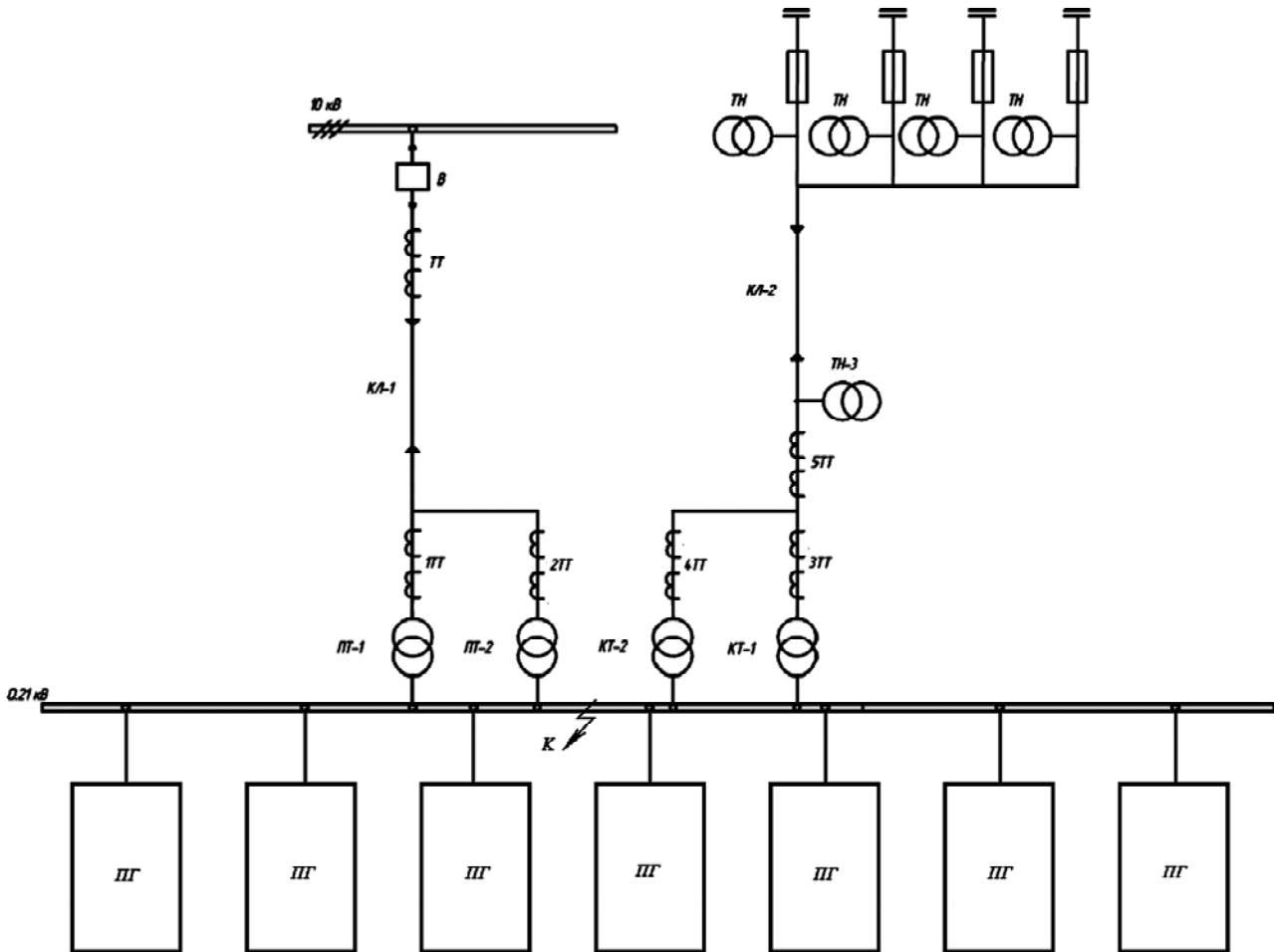


Рис. 1. Схема електропостачання ЕТКГ змінного струму

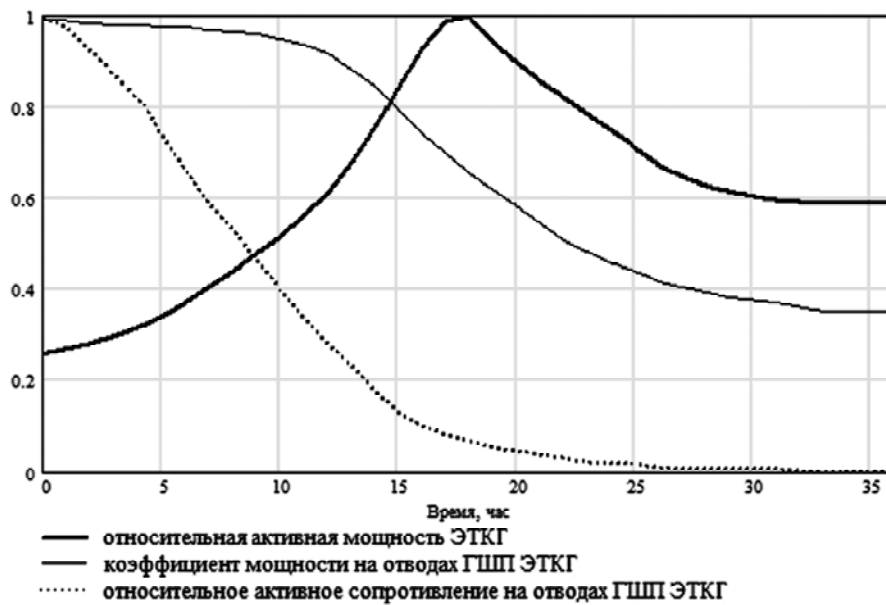


Рис. 2. Електричні режими графітації

Согласно [3], при расчете токов КЗ вторичных токопроводов ЭТКГ следует учитывать индуктивные сопротивления всех элементов короткозамкнутой цепи, силовых трансформаторов, проводников, трансформаторов тока, реакторов, токовых катушек автоматических выключателей, а также активные сопротивления элементов короткозамкнутой цепи, активные сопротивления контактов и контактных соединений. Рекомендуется также учитывать сопротивление электрической дуги в месте КЗ, изменение активного сопротивления проводников короткозамкнутой цепи, обусловленное их нагревом при КЗ, влияние комплексной нагрузки на ток КЗ [3]. При

этом допускается максимально упрощать и эквивалентировать всю внешнюю сеть по отношению к месту КЗ, не учитывать ток намагничивания трансформаторов и насыщение магнитных систем.

С учетом технологических режимов графитации, режимов работы ЭТКГ для расчетной точки K (рис. 1) составляют схемы замещения при работе одного питающего трансформатора (рис. 3, а), параллельной работе двух питающих трансформаторов (рис. 3, б) и параллельной работе как двух питающих, так и двух компенсационных трансформаторов КУ (рис. 3, в).

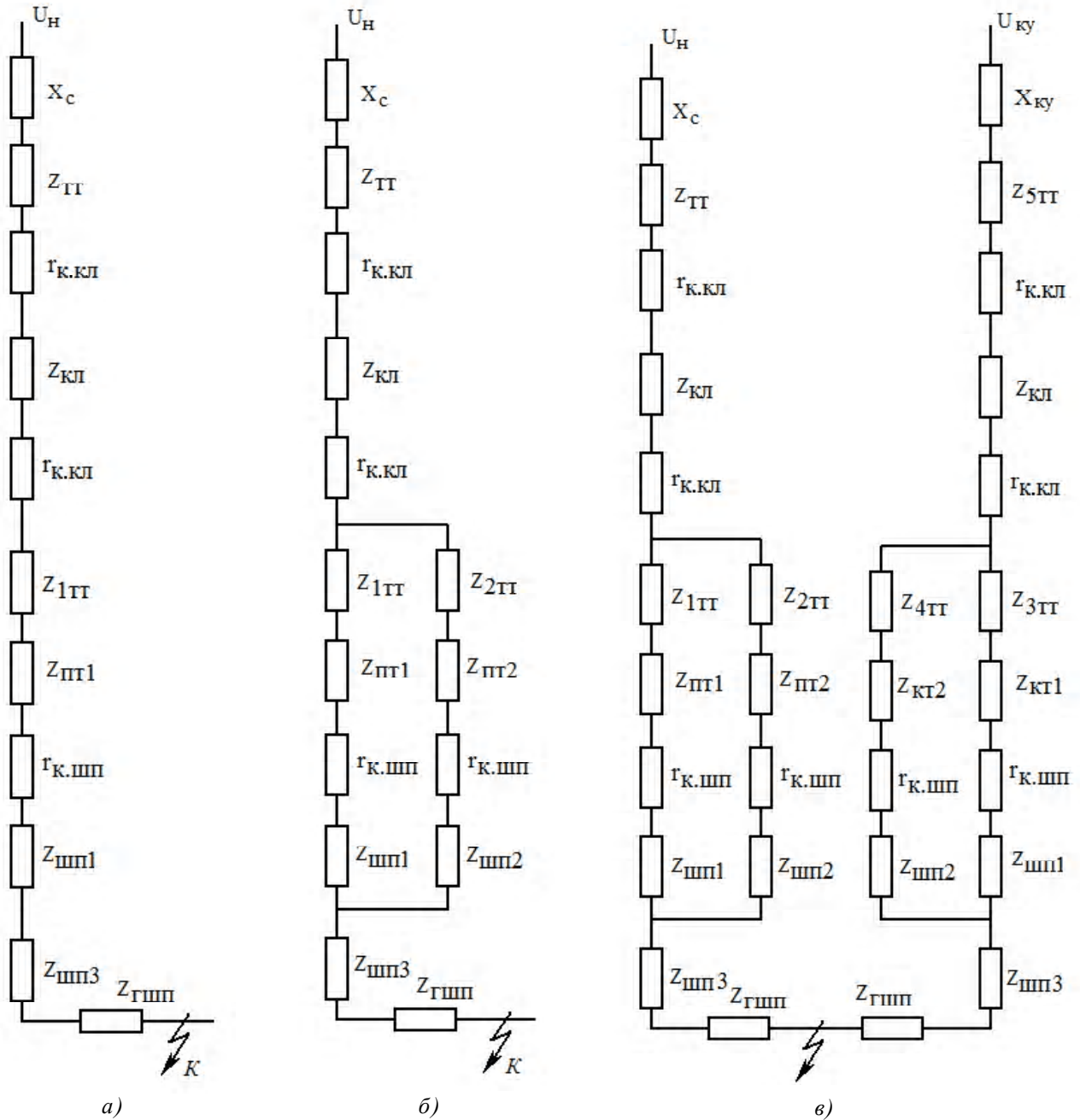


Рис. 3. Схемы замещения КЗ:

а – один питающий трансформатор; б – параллельная работа двух питающих трансформаторов; в – работают питающие и компенсационные трансформаторы

В схемах замещения (рис. 3) принимаются следующие обозначения: x_c – индуктивное сопротивление энергосистемы; $z_{тг}$ – сопротивление трансформаторов тока; $r_{к.кл}, r_{к.шп}$ – переходные контактные сопротивления для кабельных линий и шинпроводов; $z_{кл}$ – сопротивление кабельных линий; $z_{пт}, z_{кт}$ – сопротивления КЗ питающих и компенсационных трансформаторов, [3]; $z_{шп}, z_{гшп}$ – сопротивления шинпроводов в камерах печных и компенсационных трансформаторов и участков главного шинного пакета секции печей графитации; $x_{ку}$ – емкостное сопротивление компенсирующего устройства.

При оценке сопротивлений модернизированных коротких сетей секций мощных печей графитации ЭТКГ

переменного тока существующие методики [5] могут давать погрешности более 10 % и не удовлетворяют требованиям точности расчетов [3]. Это обуславливает необходимость идентификации активных и реактивных сопротивлений участков вторичных токопроводов ЭТКГ на основе электротепловой модели преобразования энергии переменного тока в тепловую энергию [6–9].

Электромагнитные процессы преобразования энергии переменного тока описываются сопряженной системой уравнений Максвелла для комплексных амплитуд векторного магнитного и электрического потенциалов в геометрических областях шинных пакетов короткой сети ЭТКГ [9]

$$\begin{cases} -\nabla \left[(j\omega\sigma_{кк}(T_{кк}) - \omega^2\varepsilon_0\varepsilon_{r,кк}) \cdot \mathbf{A}_{кк} + (\sigma_{кк}(T_{кк}) + j\omega\varepsilon_0\varepsilon_{r,кк}) \nabla V_{кк} - \mathbf{J}_{кк}^e \right] = 0, \\ (j\omega\sigma_{кк}(T_{кк}) - \omega^2\varepsilon_0\varepsilon_{r,кк}) \mathbf{A}_{кк} + \nabla \times (\mu_0^{-1} \mu_{r,кк}^{-1} \nabla \times \mathbf{A}_{кк}) + (\sigma_{кк}(T_{кк}) + j\omega\varepsilon_0\varepsilon_{r,кк}) \nabla V_{кк} = \mathbf{J}_{кк}^e, \end{cases} \quad (1)$$

где ω – угловая частота, рад/с; $\sigma(T)$ – температурная зависимость электрической проводимости, См/м; $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ – электрическая постоянная, Ф/м; ε_r – диэлектрическая проницаемость; \mathbf{A} – векторный магнитный потенциал, Вб/м; V – комплексная амплитуда электрического потенциала, В; \mathbf{J}^e – комплексная плотность тока, А/м²; $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ – магнитная постоянная, Гн/м; μ_r – относительная магнитная проницаемость.

Распределения температур в областях шинных пакетов определяются уравнениями теплопроводности [7]

$$\text{div}(\lambda_{кк}(T_{кк}) \cdot \text{grad}(T_{кк})) = \mathbf{J}_{кк} \cdot (\mathbf{J}_{кк})^* / \sigma_{кк}(T_{кк}), \quad (2)$$

где $\lambda(T)$ – температурные зависимости коэффициентов теплопроводности, Вт/(м²·°С).

Механизмы теплопереноса в окружающей среде описываются системой уравнений конвективного теплообмена в приближении Буссинеска с линеаризованной температурной зависимостью плотности охлаждающего воздуха $\rho(T) = \rho_0 [1 - \beta(T - T_0)]$ [7]

$$\begin{cases} (\mathbf{w}_{oc} \cdot \nabla) \mathbf{w}_{oc} = -\rho_{0,oc}^{-1} \nabla p_{oc} + \nu_{oc} \Delta \mathbf{w}_{oc} - \beta_{oc} (T_{oc} - T_0) \mathbf{g}, \\ \mathbf{w}_{oc} \nabla T_{oc} = \chi_{oc} \Delta T_{oc}, \\ \text{div} \mathbf{w}_{oc} = 0, \end{cases} \quad (3)$$

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

Система уравнений (1) замыкается условиями калибровки Кулона, граничными условиями магнитной и электрической изоляции, сопряжения сред с различными электрическими и магнитными свойствами [6]. Для уравнений теплопроводности (2) и конвективной теплопередачи (3) граничные условия определяются известными механизмами кондуктивного, конвективного и лучистого теплообмена [7].

Численная реализация электротепловой модели короткой сети и печи графитации, представленной сопряженными системами уравнений в частных производных (1)–(3), выполнялась с помощью метода конечных элементов, успешно апробированного автором для этого класса задач в работах [8, 9].

Активные и индуктивные сопротивления участков короткой сети определялись по данным расчетов полей температуры, электрического и магнитного потенциалов по зависимостям [9]

$$R_{кк} = \sum_k \iiint_{V_k} \sigma_{кк,k}(T_i)^{-1} \mathbf{J}_{кк,k} \cdot (\mathbf{J}_{кк,k})^* dx dy dz / I_{кк}^2, \quad X_{кк} = \omega L_{кк}, \quad (4)$$

$$\mathbf{i}_{кк} = \iint_s (\mathbf{J}_{кк} d\mathbf{S}_{кк}); L_{кк} = \Psi_{кк} / \mathbf{i}_{кк}; \Psi_{кк} = \int \Phi_{кк} d\mathbf{i}_{кк} / \mathbf{i}_{кк};$$

$$\Phi_{кк} = \iint_s (\mathbf{B}_{кк} d\mathbf{S}_{кк}); \mathbf{B}_{кк} = \text{rot}(\mathbf{A}_{кк}),$$

Ψ – потокосцепление, Вб; \mathbf{i} – ток участков короткой сети, А; Φ – магнитный поток, Вб; \mathbf{J} – плотность тока, А/м²; \mathbf{B} – вектор магнитной индукции, Тл; $d\mathbf{S} = \mathbf{n}_s \cdot dS$ – элементарные поверхности (с учетом векторов нормали \mathbf{n}_s) участков короткой сети, м².

Для уменьшения затрат времени и объемов расчетных данных моделирования методами кубической сплайн-интерполяции и аппроксимации [4] выполнялась идентификация зависимостей электрических сопротивлений участков короткой сети от их геометрических параметров (a, b) с учетом электрических нагрузок и температурных режимов вторичных токопроводов по зависимостям

$$\begin{cases} R_{кк} = R_{кк}(a_{кк}, b_{кк}, T_{кк}) = \sum_{\xi} \left(\sum_{\vartheta} C_{R\vartheta, \xi}(T_{кк}) \cdot a_{кк}^{\vartheta} \right) b_{кк}^{\xi}, \\ X_{кк} = X_{кк}(a_{кк}, b_{кк}, T_{кк}) = \sum_{\xi} \left(\sum_{\vartheta} C_{X\vartheta, \xi}(T_{кк}) \cdot a_{кк}^{\vartheta} \right) b_{кк}^{\xi}. \end{cases} \quad (5)$$

Соотношения (5) позволяют учесть влияние температурных факторов, электромагнитного взаимодействия токопроводов друг с другом, поверхностных эффектов, эффектов близости, внешних поверхностных эффектов, само- и взаимной индукции проводников и конструктивных размеров модернизированных шинных пакетов на активные и индуктивные сопротивления участков короткой сети.

Исходя из особенностей системы энергоснабжения секций печей графитации переменного тока (рис. 1) короткое замыкание, вызванное соприкосновением или замыканием шин ГШП, по которым протекают токи разного направления, является двухфазным коротким замыканием. В этом случае, принимая сопротивления прямой и обратной последовательности одинаковыми, начальное действующее значение периодической составляющей тока при КЗ для вторичных токопроводов ЭТКГ без учета КУ рассчитывают по формуле [3]

$$I_{по} = U_{нн} / \left(2 \cdot \sqrt{r_{\Sigma}^2 + x_{1\Sigma}^2} \right), \quad (6)$$

где $U_{нн}$ – среднее номинальное напряжение сети, в которой произошло короткое замыкание; $r_{\Sigma}, x_{1\Sigma}$ – суммарное активное и реактивное сопротивления прямой последовательности цепи КЗ [3] в соответствии со схемами замещения (рис. 3), и соотношениями для сопротивлений участков шинных пакетов (5).

Поскольку для подключения трансформаторов в каждой кабельной линии задействовано две жилы, а третья наглухо заземлена, то ее индуктивное сопротивление рассчитывается по формуле [5]

$$x_{кл} = 25,13 \cdot 10^{-7} \cdot l_{кл} \cdot (\ln(d/r) + 0,25),$$

где $d, r, l_{кл}$ – расстояние между осями жил, радиус жилы и длина участка кабельной линии, соответственно. При расчете активного сопротивления кабельной линии учитывается его рост из-за нагрева кабеля током КЗ [3].

Наибольшее начальное значение аperiodической составляющей тока КЗ (i_{a0}) определяется амплитудой

периодической составляющей тока (6) в начальный момент КЗ

$$i_{a0} = \sqrt{2} I_{по}. \quad (7)$$

С учетом (7) для произвольного момента времени t наибольшее значение аperiodической составляющей тока КЗ будет равно

$$i_{at} = i_{a0} e^{-t/T_a}, \quad (8)$$

где T_a – постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока КЗ [3]:

$$T_a = x_{\Sigma} / (\omega_c r_{\Sigma}).$$

Ударный ток КЗ в короткой сети ЭТКГ без учета КУ определяют по формуле [3] с учетом соотношения (8) для момента времени от начала КЗ до появления ударного тока $t_{уд} = 0,01 \cdot (\pi/2 + \varphi_k) / \pi$ [3]

$$i_{уд} = \sqrt{2} I_{по} (1 + \sin \varphi_k e^{-t_{уд}/T_a}) = \sqrt{2} I_{по} K_{уд}, \quad (9)$$

где $K_{уд}$ – ударный коэффициент, φ_k – угол сдвига по фазе напряжения и периодической составляющей тока КЗ.

Согласно [3], при расчетах токов КЗ необходимо учитывать влияние каждой комплексной нагрузки, если ток в месте КЗ от этой нагрузки составляет не менее 5 % тока в месте КЗ, определенного без учета нагрузки.

Максимальную амплитуду тока КЗ от конденсаторных батарей устройства поперечной компенсации ЭТКГ определяют по формуле [10]

$$I_{max} = \frac{U_c(0)}{2 \cdot (\omega_0 L_{к\vartheta\Sigma} + R_{к\vartheta\Sigma})}, \quad (10)$$

где $U_c(0)$ – напряжение на конденсаторной батарее до КЗ; $L_{к\vartheta\Sigma}$ – суммарная индуктивность короткозамкнутого контура с КУ; $R_{к\vartheta\Sigma}$ – суммарное активное сопротивление короткозамкнутого контура с КУ;

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L_{к\vartheta\Sigma} C_{к\vartheta}} - \frac{R_{к\vartheta\Sigma}^2}{4L_{к\vartheta\Sigma}^2}},$$

– угловая частота собственных колебаний короткозамкнутого контура КУ с емкостью $C_{к\vartheta}$.

Свободную составляющую тока КЗ от конденсаторных батарей устройства поперечной компенсации ЭТКГ с учетом соотношения (10) следует определять по формуле [10]

$$i_{св} = I_{max} \cdot e^{-bt} \sin(\omega_0 t + \pi), \quad (11)$$

где $b = R/2L_{к\vartheta\Sigma} = [R_k(\omega_0) + R_{к\vartheta\Sigma}] / 2L_{к\vartheta\Sigma}$ – коэффициент затухания; $R_k(\omega_0)$ – активное сопротивление конденсаторной батареи при частоте ω_0 .

Соотношения (6)–(11) позволяют исследовать влияние режимов графитации и компенсации реактивной мощности на ударные токи КЗ в короткой сети с учетом ее электрических параметров (5).

С ростом напряжения стороны НН питающих трансформаторов увеличивается величина максимального ударного тока КЗ короткой сети ЭТКГ (рис. 4.). При этом наибольшее значение периодической составляющей тока КЗ достигается при параллельной работе питающих трансформаторов (рис. 3, б, в) на ступени регулирования, соответствующей максимальному значению напряжения НН, а наименьшее – при работе одного питающего трансформатора (рис. 3, а) на ступени регулирования, соответствующей минимальному напряжению НН. Отношение максимального значения к минимальному значению тока КЗ достигает 2,15.

На втором этапе графитации величины максимальной амплитуды тока КЗ от конденсаторных батарей поперечной компенсации в основном определяются мощностью КУ, а изменение коэффициента трансформации компенсационных трансформаторов сказывается менее значительно (рис. 5.). При этом максимальное значение амплитуды тока КЗ соответствует режиму максимальной реактивной мощности КУ на первой ступени РПН, а минимальное – при 40 % загрузке КУ на пятой ступени РПН компенсационного трансформатора. Отношение максимальной амплитуды тока КЗ от КУ к ее минимальному значению составляет 1,88.

Характер изменения тока КЗ обусловлен параметрами короткозамкнутого контура КУ для различных ступеней РПН трансформаторов и емкости КУ, определяющих частоту свободных колебаний контура ω_0 . Наложение

тока КЗ от системы и КУ может приводить к существенному увеличению величины тока КЗ при работе питающих трансформаторов на 2–8 ступенях РПН и загрузках КУ более 50 % (рис. 6, 7). Значение ударного тока КЗ достигает максимума на второй ступени РПН питающих трансформаторов и 100 % загрузке КУ (рис. 6, а). При параллельной работе питающих трансформаторов на 2–5 ступенях РПН и загрузке КУ на 40 % ударный ток КЗ снижается (рис. 6, 7) и достигает минимума на пятой ступени РПН питающих трансформаторов и 40 % загрузке КУ (рис. 6, б). При загрузке КУ менее 30 % его влияние на ударный ток КЗ незначительно (рис. 7).

ВЫВОДЫ

Предложена уточненная методика оценки токов КЗ, которая адаптирована к особенностям системы электроснабжения ЭТКГ, конструктивному исполнению вторичных токопроводов, учитывает режимы графитации и компенсации реактивной мощности.

Идентификация зависимости электрических параметров участков короткой сети от электрических нагрузок и температурных режимов на основе полиномиальной аппроксимации обеспечивает высокую точность расчетов стационарных и переходных процессов.

Алгоритмическая простота уточненной методики снижает требования к вычислительным ресурсам, исключает дополнительные затраты на приобретение дорогостоящих вычислительных программ полевого моделирования и анализа электромагнитных процессов.

Перетоки реактивной мощности в ЭТКГ на втором этапе технологического процесса графитации при загрузке КУ более 40 % приводят к увеличению ударного

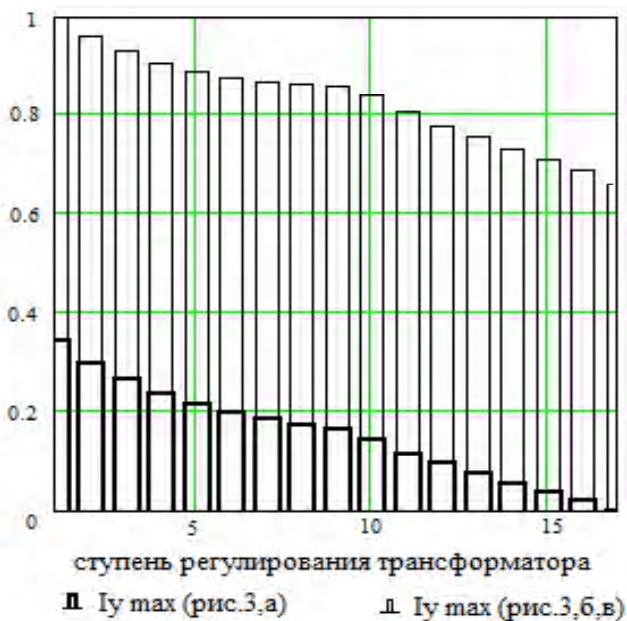


Рис. 4. Относительное изменение значения ударного тока КЗ от положения РПН питающих трансформаторов без учета КУ

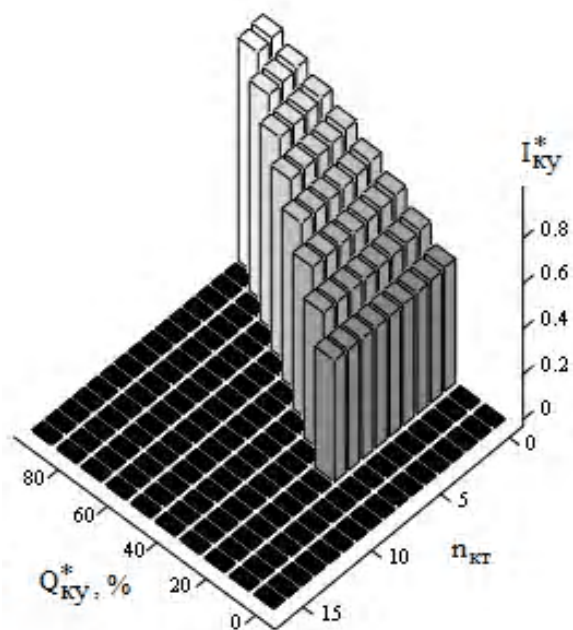


Рис. 5. Относительное изменение амплитуды тока КЗ от КУ

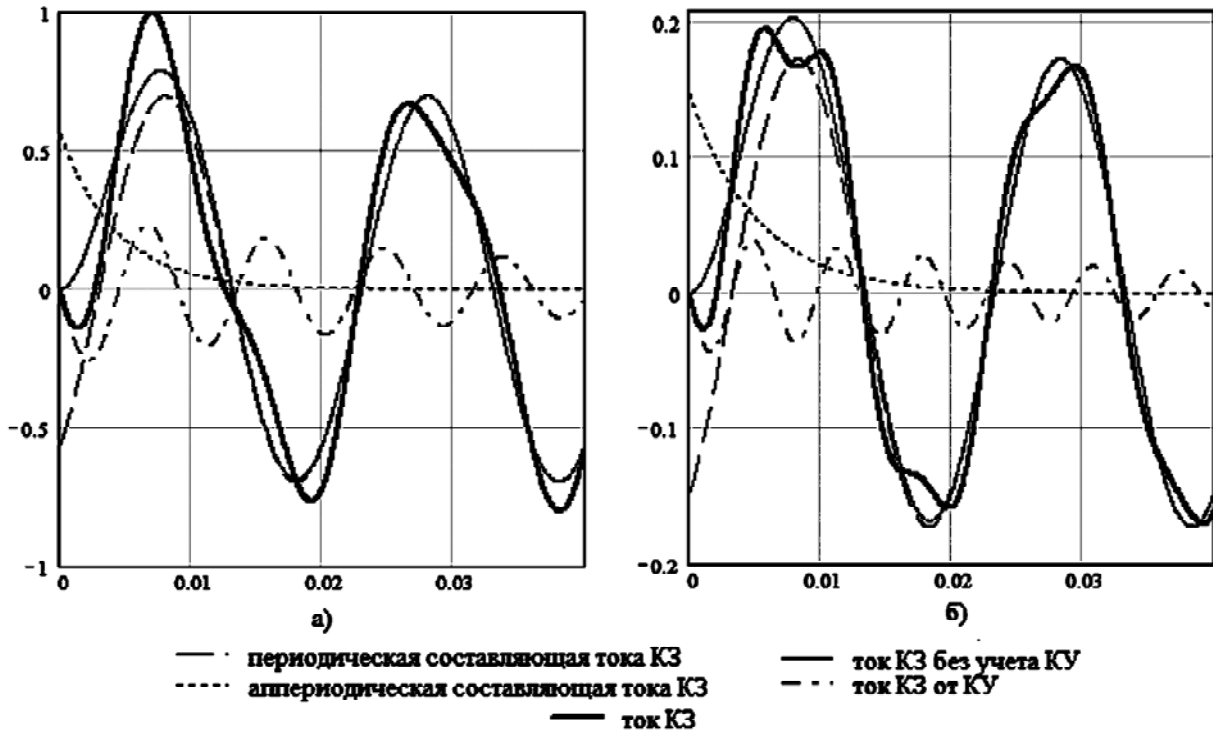


Рис. 6. Изменение тока КЗ и его составляющих в короткой сети ЭТКГ с учетом КУ:
 а – для 2-й ступени регулирования и 100 % мощности КУ; б – для 5-й ступени регулирования и 40 % мощности КУ

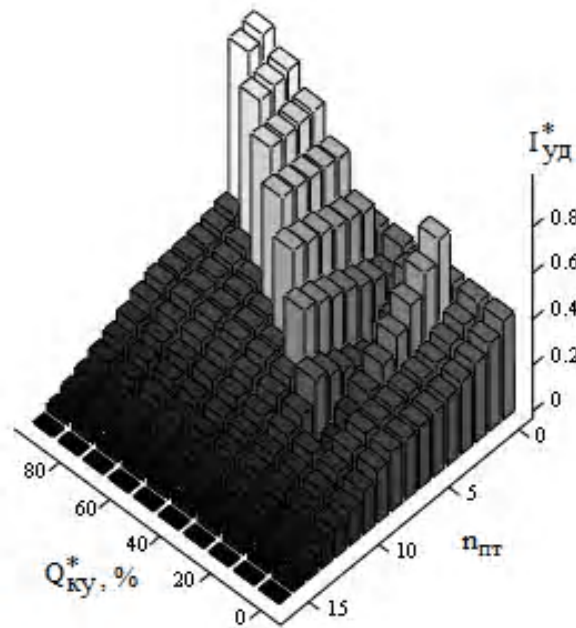


Рис. 7. Относительное изменение амплитуды тока КЗ в короткой сети ЭТКГ с учетом КУ

тока КЗ на 20–27 %, а его кратность для 1–2 ступеней РПН питающих и компенсационных трансформаторов при номинальной нагрузке КУ возрастает в 1,5 раза. Это обуславливает применение динамически стойких многорядных шихтованных шинных пакетов при модернизации ГПП ЭТКГ большой мощности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чалых, Е. Ф. Оборудование электродных заводов : [учебное пособие для вузов] / Е. Ф. Чалых. – М. : Metallurgy, 1990. – 238 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. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ: ГОСТ 28249-93 [Действующий от 1-01-1995] – М. : ФГУП «Стандартинформ». – 2006. – 47 с.
4. 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. – 2006. – Вип. 3/2006(38). – С. 53–55.
5. Данцис, Я. Ю. Короткие сети и электрические параметры дуговых электропечей. Справ. изд. / Я. Ю. Данцис, Л. С. Кацевич, Г. М. Жилов и др. / 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Metallurgy, 1987. – 320 с.
6. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле / Бессонов Л. А. – М. : Высшая школа, 2003. – 317 с.
7. Джалурия, Й. Естественная конвекция. Тепло- и массообмен / Й. Джалурия. – М. : Мир, 1983. – 399 с.

8. Ярымбаш, Д. С. 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.
9. 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.
10. Гимоян, Г. Г. Электромагнитные переходные процессы в системах электроснабжения промышленных предприятий / Г. Г. Гимоян, Л. В. Егизарян, В. И. Саакаян. – Ер. : ГИУА. – 2000. – 393 с.

Стаття надійшла до редакції 20.12.2011.
Після доробки 12.01.2012.

Д. С. Ярымбаш

Особливості розрахунків струмів короткого замикання потужних електротехнічних комплексів графітації змінного струму

Запропоновано методику ідентифікації електричних параметрів короткої мережі електротехнічного комплексу графітації змінного струму, що враховує особливості конструктивного виконання і температурні режими. Виконано розрахунки і аналіз ударних струмів короткого замикання електротехнічного комплексу з урахуванням параметрів системи електропостачання, технологічних режимів графітації і компенсації реактивної потужності.

Ключові слова: струм короткого замикання, система електропостачання, режим графітації, компенсаційний пристрій, шинний пакет.

D. S. Yarymbash

Features of the short-circuit current calculations of the ac graphitization power electrical complex

Method of identification of short circuit electrical parameters of AC graphitization complex, taking into account the application design features and temperature regimes is proposed. The calculation and analysis of the short-circuit peak currents, taking into account the power system characteristics, graphitization technological regimes and reactive power compensation are presented.

Key words: short-circuit current, electrical power system, graphitization mode, compensating device, bus package.

УДК 629.423.24

Д. О. Кулагін¹, П. Д. Андрієнко²

¹Канд. техн. наук, старший викладач Запорізького національного технічного університету

² Д-р техн. наук, професор Запорізького національного технічного університету

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ТЯГОВОЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ ДИЗЕЛЬ-ПОЇЗДА ДЕЛ-02 ПРИ ЗБУРЕННЯХ В ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ

Проведено дослідження роботи тягової електропередачі дизель-поїзда ДЕЛ-02 при появі збурень в електричних колах тягового інвертора. Показано, що вмикання системи опалення, кондиціонування, компресорів і т. ін. збурюючі чинники не призводять до значних відхилень в колах тягової електропередачі дизель-поїзда.

Ключові слова: динаміка, збурення, система автоматичного керування, тяговий інвертор, потужність опалення, тягова електропередача.

ВСТУП

Накопичений досвід експлуатації дослідних дизель-поїздів ДЕЛ-02 та нові потреби у партіях серійних зразків даної розробки вказали на необхідність удосконалення системи тягової електропередачі, підвищення ефективності роботи (збільшення прискорення руху дизель-поїзда, отримання нормованих перехідних характеристик роботи тягової електропередачі в умовах зовнішніх та параметричних збурень, тощо). Для підвищення ефективності роботи необхідно використовувати методи проектування та синтезу систем керування тяговою електропередачею, що дозволяють отримати збільшення прискорення руху дизель-поїзда, стійкість системи керування до збурень та варіації параметрів контурів тягової електропередачі в процесі роботи [1–3].

Однією з характерних особливостей тягових електропередач з автономними джерелами живлення [4], в яких з'являються специфічні, властиві лише даному класу систем вимоги, є обмеженість потужності джерела живлення. Дана особливість вимагає стійкої роботи синтезованої системи при появі збурень в електричних колах тягової електропередачі, що живиться від автономного джерела живлення. Тому дослідження, присвячені поведінці електричних тягових передач, що живляться від автономних генераторів, є актуальними.

Досвід використання тягових приводів з опорно-рамною підвіскою [6] показав, що наявність в таких приводах спеціальних передавальних механізмів та муфт з еластичними ланками зменшує власні частоти кутових коливань привода, які перекривають діапазон частот верти-