Відомо, що кількість ТР, а, значить, обсяг обчислень зменшується, якщо періодичні коливання мають який-небудь вигляд симетрії. Наприклад, якщо періодичні коливання симетричні відносно осі абсцис, то достатньо розглядати ТВ лише на половині періоду коливань. У цьому випадку матриця коефіцієнтів ТР, що описують періодичний процес в ЕЕК, є блоковою матрицею з блоками косих циркулянтів. Усе вищенаведене залишається справедливим і в цьому випадку, якщо для визначення r_k замість рівняння (22) використовувати рівняння

$$r^m + 1 = 0. \tag{37}$$

Висновки. При розрахунку ПП у лінійних ЕЕК запропонованим методом для оцінки похибки можна використовувати оцінку похибки методу дискретизації, що лежить в основі даного ТМ. Це дозволяє вибирати кількість точок сітки і відповідну кількість спектральних складових ПП. Обсяг обчислень при визначенні спектральних складових ТВ менший, ніж при визначенні гармонічних складових ряду Фур'є. Тому при розрахунку періодичних режимів нелінійних електричних і електронних кіл запропонованим методом значно зменшується об'єм обчислень порівняно з методами гармонічного балансу. Відзначимо також, що запропонований метод добре стикується з алгоритмами розрахунку перехідних процесів у ЕЕК.

Використання спектральних складових ТВ для визначення ТР лінійних підсхем у періодичному режимі роботи показало ефективність запропонованого методу.

1. Ломоносов В.Ю. Периодические процессы в нелинейных цепях // Электричество. – 1952. – № 7. – С. 55–58. 2. Пухов Г.Е. Введение в теорию метода точек // Тр. Таганрогского радиотехнического ин-та. – Таганрог, 1955. – № 1. – С. 47–77. 3. Бондаренко В.М. Вопросы анализа нелинейных электрических и электронных цепей. – К.: Наукова думка, 1967. – 159 с. 4. Совпель В.Б. Расчет периодических процессов в нелинейных цепях с помощью простейших матриц интегрирования // Теоретическая электротехника: Респ. межвед. науч.-техн. сб. – Львов, 1970. – Вып. 10. – С. 52–56. 5. Фильц Р.В., Маляр В.С., Глухивский Л.И. Разностный метод расчета несимметричных установившихся режимов насыщенных явнополюсных синхронных машин // Изв. вузов СССР. Электротехника. – 1977. – № 1. – С. 40–49. 6. Беллман Р. Введение в теорию матриц. – М.: Наука, 1969. – 368 с. 7. Высоцкий В.М., Кирпатовский С.И., Совин Р.Я. О нахождении обратных блочных матриц, состоящих из циркулянтов. – Львов, 1974. – 8 с. – Деп. В ОВНИИЭМ 24.01.1975, № 674-д. 8. Совин Р.Я. Иследование и развитие методов двухточечной краевой задачи и точечных методов расчета периодических режимов нелинейных неавтономных электрических цепей: Автореф. дис. ...канд. техн. наук. – К., 1990. – 16 с.

УДК 621.83: 621.83.3.014

І.Д. Труфанов, І.А. Андріяс
Запорізький національний технічний університет

ОПТИМАЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИМИ СИСТЕМАМИ В ЕЛЕКТРОМЕТАЛУРГІЇ

Основные направления развития производства всех форм собственности в условиях энергетической ситуации в начале XXI ст. во всех странах мира характеризуется широким внедрением в сферу промышленного и агропромышленного комплекса принципиально новой и модернизированной техники и прогрессивной технологии, создание и выпуск машин и энерготехнического оборудования, способных производить конкурентноспособную на внешнем рынке продукцию. Развитие металлургии в последней четверти XX ст. проходило в условиях структурно-энергетического кризиса, который к 1970 г. Выявил значительные производственные мощности и нерентабельные предприятия. В это время было принято прогрессивное направление в разработке энерготехнологического оборудования: электротехнология прямого восстановления железа, электросталеплавления в печах переменного и постоянного тока, сталеплавление по схеме «печь – ковш», резое сокращение выплавки чугуна, широкое применение кислородных конверторов с комбинированной продувкой, установки непрерывной разливки стали, установки аргонного вакуумирования, оборудование электропечей водоохлаждающими панелями и сводами и др., т. к. сталеплавильное производство по своим масштабам к настоящему времени занимает 2-е место в мире (750 млн./т в год) среди других крупнейших отраслей промышленности, уступая только производству цемента (110 млн/т в год).

Структурная перестройка энергетического комплекса металлургии обеспечила в ведущих металлопроизводящих странах (Японии, Германии, Испании, ЮАР и др.) непрерывное снижение удельного энергопотребления из 1980 г. По 2000 г. Среднее снижение удельного расхода энергоресурсов составило 3,9 ГДж/т стали.

В условиях действия комплексной энергетической программы научные исследования направлены на разработку электрооборудования и систем автоматизации технологических процессов, обеспечивающих:

а) ограничение электротехнических параметров в сетях промышленных предприятий напряжением 6–10 кВ (внутренние перенапряжения, высокочастотные составляющие и др.) до безопасных величин для персонала и оборудования;

б) повышенную динамическую стойкость конструкции и электрическую прочность изоляции при сниженных электрических потерях в электромагнитных системах;

в) функционирование защитных устройств по ограничению переходных составляющих при нормальных и аварийных режимах;

г) разработку и создание симметрирующих устройств для симметрирования параметров нагрузки питающих сетей 6–10, 35, 110 кВ металлургических предприятий в условиях стохастических несимметричных режимах нагрузки печного оборудования и силового оборудования подстанций;

д) работу реакторно-резисторных устройств ограничение токов несимметричных коротких замыканий: в обмотках силовых трансформаторов, выключателях и шинопроводах, увеличивающих срок службы, предотвращающих повреждения и отказы;

е) функционирование батарей статических конденсаторов, фильтр-компенсационных цепей и тиристорно0реакторных групп систем компенсации реактивной энергии, исключающего компенсационное напряжение и токовых бросков повышенных частот;

ж) разработку критериев комплексной оценки показателей качества электроэнергии, адекватно отражающих изменение функциональных свойств энергетического процесса трьохфазных систем;

з) разработку методов расчета комплексных показателей качества электроэнергии трьохфазных систем на стадии проектирования или модернизации системы электроснабжения, электрификации и автоматизации технологических процессов;

и) улучшение показателей качества функционирования электрооборудования: колебаний, отклонений, несимметрии, несинусоидальности напряжений и токов и др.;

к) оптимальную электромагнитную совместимость режимов работы источников и потребителей электрической энергии;

л) практическое симметрирование вторичных токопроводов электропечей;

м) оптимальные режимы компенсации реактивной энергии;

о) исследование режимов работы статических систем методами статического детерминированного и стохастического моделирования;

п) синтез статически оптимальных сложных динамических объектов (электропечей и их электрооборудования);

р) разработку статистических критериев качества функционирования;

с) разработку статистически оптимальных алгоритмов сенсорно-информационной и регулирующих подсистем АСУ ТП на базе вычислительных управляющих и регулирующих машин;

т) разработку алгоритмов управления технологическим процессом, обеспечивающих инвариантность по возмущениям и высокие энергетические показатели.

Математическая формулировка стохастической задачи управления процессом плавления металла в дуговой печи в обобщённом виде должна учитывать номер плавки, время τ (дискретное) ($\tau = 0,1,2,...,T$) плавки, векторы управляющих и возмущающих воздействий ($U(\tau, s), \eta_i(\tau, s)$), вектор $\theta(\tau, s)$ переменных (состав и температура шихты, синтетического шлака, металла), вектор $\xi(\tau, s)$ наблюдаемых переменных (информация информационно-измерительной системы). Модель объекта управления будет описываться в виде системы стохастических разностных уравнений:

$$\theta(\tau+1) = f_1\left\{\left[\vec{\theta}(\tau), \vec{U}(\tau), a(\tau), \vec{\eta}_1(\tau+1)\right], \vec{\theta}(0)\right\};$$
$$\xi(\tau+1) = f_2\left\{\left[\vec{\theta}(\tau), \vec{\xi}(\tau), A(\tau), \vec{\eta}_2(\tau+1)\right], \vec{\xi}(0)\right\}; \qquad (1)$$

где $\vec{\theta}(0), \vec{\xi}(0)$ – векторные значения начальных условий, определяемых априорной плотностью условного распределения мощности энергетических потоков (электроэнергии, природного газа, шихты, шлака, водоохлаждаемых панелей, кольцевых реакторов и др. агрегатов печи).

Критерий оптимальности энергетической эффективности электрокомплекса в обобщённом виде может быть представлен как математическое ожидание суммарных энергетических потерь на плавку

$$R(u) = m\sum_{\tau=1}^{T}\left\{g\left[\tau, \theta(\tau), u(\tau-1)\right], \xi_0^{\tau}\right\}; \qquad (2)$$

где $g(\bullet)$ – функция потерь; T – длительность плавки; $\xi_0^{\tau} \overset{\Delta}{=} \xi(0), \xi(1), ..., \xi(\tau)$ – аргумент функции потерь, откуда функция стратегии управления, переводящая энергетическое состояние печи из начального в заданное конечное состояние таким образом, чтобы значение критерия (2) было минимальным, т. е.

$$u^*(\tau) = \varphi^*\left(\tau, \xi_0^{\tau}\right) \longrightarrow \min\{\arg\inf R(u), \tau \in [0, T]\}; \qquad (3)$$

Соотношения (1)–(3) являются алгоритмами исходных математических положений формализации стохастических процессов управления энергетическими потоками на основе структурного представления моделей отдельных агрегатов электротехнического комплекса печи, задаваемых с точностью до параметра на базе моделей преобразования энергопотоков.

Применительно к условиям электротехнической системы дуговой печи принимаем следующие обозначения: $z_i e^{\xi_{ik}}$ – комплексное сопротивление между узлами i, k; $g_{ik} + jh_{ik}$ – шунтирующее сопротивление расплава ванны печи; $\vec{U}_i^{H}$, $\vec{U}_i^{B}$ – верхнее (max) и нижнее (min) предельное значение напряжений узлов; $g(i)$ – число узлов короткой сети; $\alpha(i)$ – узлы, соединенные с рассматриваемым узлом i; $\vec{P}_i^{K}$, $\vec{Q}_i^{K}$ $(K = 1,2,...,n)$ – активная и реактивная мощности в узле i; $\vec{P}_i^{H}$, $\vec{P}_i^{B}$; $\vec{Q}_i^{H}$, $\vec{Q}_i^{B}$ – max, min значений изменений активной и реактивной мощности; $\vec{C}, \vec{D}$ – составляющие потребляемой мощности печью.

Уравнение баланса по активной и реактивной мощности имеют вид:

$$C_i + P_i = u_i^2 \sum\left(\frac{\cos\xi_{ij}}{z_{ij}} + g_{ij}\right) - u_i \sum \frac{u_j}{z_{ij}}\cos\left(\xi_{ij} + \theta_i - \theta_j\right);$$
$$D_i + Q_i = u_i^2 \sum\left(\frac{\sin\xi_{ij}}{z_{ij}} + h_{ij}\right) - u_i \sum_{j\in\alpha(i)} \frac{u_j}{z_{ij}}\sin\left(\xi_{ij} + \theta_i - \theta_j\right);$$
$$i = \overline{1,n}; \; j \in \alpha(i); \qquad (4)$$

Полагая $\overrightarrow{C}_i, \overrightarrow{D}_i = const$, уравнения (4) запишем в виде

$$\overrightarrow{P_i} = \varphi_i(u,\theta);\ \overrightarrow{Q_i} = \psi_i(u,\theta),\ i = \overline{1,n}; \tag{5}$$

Матрица якоби уравнений (4) и (5) – квадратная матрица порядка 2n вида

$$I = \begin{bmatrix} \frac{d\varphi_{(\theta)}}{dt} & \frac{d\varphi_{(u)}}{dt} \\ \frac{d\psi_{(\theta)}}{dt} & \frac{\mathrm{d}\psi_{(\mathrm{u})}}{\mathrm{dt}} \\ & \end{bmatrix}.$$

Сумма элементов строки матрицы $\frac{d\varphi_{(\theta)}}{dt}$ равна

$$\sum^{n} \frac{\partial\varphi_i}{\partial\theta_j} = U_i \sum_{j\in\alpha(i)} \frac{U_i}{z_{ij}} \sin(\xi_{ij} + \theta_i - \theta_j) - \sum_{j\in\alpha(i)} \frac{U_i U_j}{z_{ij}} \sin(\xi_{ij} + \theta_i - \theta_j) = 0.$$

Условие совместности уравнений (4) определяются малыми вариациями $\Delta\overrightarrow{P}$ и $\Delta\overrightarrow{Q}$, т. е.

$$[P,Q] = \begin{bmatrix} \frac{d\varphi_{(\theta)}}{dt} & \frac{d\varphi_{(u)}}{dt} \\ \frac{d\psi_{(\theta)}}{dt} & \frac{\mathrm{d}\psi_{(\mathrm{u})}}{\mathrm{dt}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta Q \\ \Delta U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}.$$

Полагая, что $(\overrightarrow{\lambda,\mu})$ – собственный вектор, соответствующий нулевому корню характеристического уравнения I^T, получим: $[\mu,\lambda] = \begin{bmatrix} \frac{d\varphi^T_{(\theta)}}{dt} & \frac{d\varphi^T_{(u)}}{dt} \\ \frac{d\psi^T_{(\theta)}}{dt} & \frac{\mathrm{d}\psi^T_{(u)}}{\mathrm{dt}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda \\ \mu \end{bmatrix} = 0$, которые для условия совместности запишутся в виде $(\lambda,\Delta P) + (\mu,\Delta Q) = 0$.

Если ввести векторы $\Delta P^T = (\Delta P_1,...,\Delta P_n)$; $\Delta Q^T = (\Delta Q_1,...,\Delta Q_n)$; $\Delta \tilde{U}^T = (\Delta U_1,...,\Delta U_n)$; $\Delta \tilde{Q}^T = (\Delta Q_1,...,\Delta Q_{n-1})$; ΔU_n – заданная вариация модуля напряжения в узле $\{n\}$.

Условия совместности для заданного ΔU_n реализуются из уравнений $[P,Q]\times[\lambda,\mu]$:

$$\begin{bmatrix} \frac{d\varphi_{(\theta)}}{dt} & \frac{d\varphi^{(n)}_u}{dt^u} & \frac{d\varphi_{u_n}}{dt} \\ \frac{d\psi^{(u)}_{(\theta)}}{dt^u} & \frac{d\psi_{\theta^n}}{dt} & \frac{d\psi_{un}}{dt} \\ \frac{d\psi_{n_1\theta}}{dt} & \frac{d\psi_{n_1 u}}{dt} & \frac{d\psi_{un}}{dt} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta\tilde{u} \\ \Delta u_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta\tilde{Q} \\ \Delta Q_n \end{bmatrix}; \tag{6}$$

Якобиан $I^{(n)}$ – особенная матрица, то при $U_n = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i^{(n)} \frac{\partial\varphi_i}{\partial U_n} + \sum_{i=1}^{n-1} \mu_i^{(n)} \frac{\partial\psi_i}{\partial U_n}$ условие совместности примет вид:

$$(\lambda^{(u)},\Delta P) + (\mu^{(u)},\Delta Q) - U_n \Delta U_n = 0; \tag{7}$$

В дальнейшем решается задача определения минимума переменной части целевой функции, т. е.

$$\min I^T = \min\left(\sum\sum b_i^k P_i^k - \sum\sum c_i^k Q_i^k\right); \tag{8}$$

Для нахождения коэффициентов (8) на основании (7) систему (6) представляем в виде блочно-матричных уравнений:

– отклонений зависимых и независимых переменных $\left[\dfrac{\Delta P_i}{\Delta Q_i}\right] = \left[J_{ij}\right] \times \left[\dfrac{\Delta \delta_j}{\Delta U_j}\right]$;

– приращение мощности по каналам подачи энергопотоков $\left[\dfrac{\Delta P_{pq}}{\Delta Q_{pq}}\right] = \left[J_{pq,j}\right] \times \left[\dfrac{\Delta \delta_j}{\Delta U_j}\right]$;

– распределение энергопотоков $\left[\dfrac{\Delta \delta_j}{\Delta U_j}\right] = \left[\left(J^t W^{-1} J\right)^{-1} J^t W^{-1}\right] \times \left[\dfrac{\Delta P_i}{\Delta Q_i} : \dfrac{\Delta P_{pq}}{\Delta Q_{pq}}\right]^T$;

– изменение независимых переменных ΔP_i, ΔQ_i, выраженные через $\Delta \delta_j$, ΔU_j:

$$\left[\frac{\Delta j}{\Delta U_j}\right] = \left[J^{-1}{}_{ij}\right] \times \left[\frac{\Delta P_i}{\Delta Q_i}\right]; \quad \left[\frac{\Delta P_{pq}}{\Delta Q_{pq}}\right] = \left[J_{pq,j}\right] \times \left[J_{ji}^{-1}\right] \times \left[\frac{\Delta P_i}{\Delta Q_i}\right];$$

– изменение узловых потоков мощностей по каналам управления $\left[\dfrac{\Delta P_{pq}}{\Delta Q_{pq}}\right] = \left[S_{pq,i}\right] \times \left[\dfrac{\Delta P_i}{\Delta Q_i}\right]$;

$$\left[\frac{\Delta P_{pq}}{\Delta Q_{pq}}\right] = \left[S_{pq,\mu}\right] \times \left[\frac{\Delta P_\mu}{\Delta Q_\mu}\right] + \left[S_{pq,i}\right] \times \left[\frac{\Delta P_i}{\Delta Q_i}\right];$$

– параметров коррекции $\left[\dfrac{\Delta P_\mu}{\Delta Q_\mu}\right] = \left[S_{pq,\mu}\right] \times \left\{ \left[\dfrac{\Delta P_{pq}}{\Delta Q_{pq}}\right] - \left[S_{pq,i}\right] \times \left[\dfrac{\Delta P_i}{\Delta Q_i}\right] \right\}$,

где J_{ij} – квадратная матрица Якоби; J – матрица, составленная из матриц J_{ij} и $J_{pq,i}$; $J_{pq,i}$ – прямоугольная матрица, получаемая дифференцированием потоков мощностей по независимым переменным.

Уравнение оптимизации (3) при разложении в ряд Тейлора дает приращение целевой функции в виде

$$\Delta F = \sum \frac{dF_{ig}}{dP_{ig}} \Delta P_{ig} + \frac{1}{2} \sum \frac{d^2 F_{ig}}{dP_{ig}^2} \Delta P_{ig}^2; \quad \sum_{g=1}^{g_1} \Delta P_{1g} = \sum_{i=2}^{n} \frac{\partial I_1}{\partial I_i} \sum \Delta P_{ig} + \frac{1}{2} \sum_{i=2}^{n} \sum_{j=2}^{n} \frac{\partial^2 I_1}{\partial I_i \partial I_j} \sum_{g=1}^{g_i} \Delta P_{ig} \sum_{g=1}^{g_j} \Delta P_{ig}.$$

Условия Куна-Такера определяют необходимые и достаточные условия минимума для функции Лагранжа

$$\frac{\partial L}{\partial(\Delta P_1 g)} = \frac{dF_1 g}{dP_1 g} + \frac{d^2 F_1 g}{dP_1^2 g} \Delta P_1 g - \lambda_1 + \overline{\pi}_{1g} - \underline{\pi_1}_g = 0, \tag{9}$$

где $\overline{\pi}_{ig}, \underline{\pi}_{ig}$ – *inf, sup* значения функции (6).

Значение составляющих уравнения (9) будут иметь следующий вид с учетом блочного матричного уравнения (8):

$$\frac{\partial L}{\partial(\Delta P_1 g)} = \frac{dF_1 g}{dP_1 g} + \frac{d^2 F_1 g}{dP_1^2 g} \Delta P_1 g + \lambda_1 \left\{ \frac{\partial I_1}{\partial I_i} + \sum_{j=2}^{n} \frac{\partial^2 I}{\partial I_i \partial I_j} \sum_{g=1}^{g_1} \Delta P_{ig} \right\} + \sum_{j \in \alpha(k)} \tau_{kj} \frac{\partial J_{kj}}{\partial I_i} + \overline{\pi}_{1g} - \underline{\pi_1}_g = 0;$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_1} = \sum_{g=1}^{g_i} \Delta P_1 g - \sum_{i=2}^{n} \frac{\partial I_1}{\partial I_i} \sum_{g=1}^{g_i} \Delta P_{ig} - \frac{1}{2} \sum_{i=2}^{n} \sum_{j=2}^{n} \frac{\partial^2 I_1}{\partial I_i \partial I_j} \sum_{g=1}^{g_1} \Delta P_{ig} \sum_{g=1}^{g_1} \Delta P_{jg} = 0; \tag{10}$$

$$\frac{\partial L}{\partial \overline{\pi}_{ig}} = \overline{P}_{ig} - P_{ig} - \Delta P_{ig} \geq 0\,; \quad \frac{\partial L}{\partial \underline{\pi}_{ig}} = P_{ig} - \underline{P}_{jg} + \Delta P_{ig} \geq 0\,; \quad \frac{\partial L}{\partial \tau_{kj}} = \overline{J}_{kj} - J_{kj} - \sum_{i=2}^{n} \frac{\partial I_{kj}}{\partial I_i} \cdot \sum_{g=1}^{g_i} \Delta P_{ig} = 0\,.$$

В точке минимума должны соблюдаться условия:

$$\overline{\pi}_{ig}(\overline{P}_{ig} - P_{ig} - \Delta P_{ig}) = 0\,; \; \underline{\pi}_{ig}(P_{ig} - \underline{P}_{jg} + \Delta P_{ig}) = 0\,; \; \tau_{kj}(\overline{J}_{kj} - J_{kj} \sum_{k=2}^{n} \frac{\partial J_{kj}}{\partial I_i} \cdot \sum_{g=1}^{g_i} \Delta P_{ig}) = 0\,;$$

$$\overline{\pi}_{ig}, \underline{\pi}_{ig}, \tau_{kj} \geq 0\,. \tag{11}$$

Значения $\frac{\partial J_{kj}}{\partial J_i}$ определяются с помощью выражений $\frac{\partial J_{kj}}{\partial J_i} = \frac{\partial I_{kj}}{\partial \theta_k} \frac{\partial \theta_k}{\partial I_i} + \frac{\partial I_{kj}}{\partial \theta_j} \frac{\partial \theta_j}{\partial I_i}$.

Рекуррентные соотношения, используемые в качестве алгоритма итеративного процесса реализуются из систем (10) и (11):

$$\lambda_1^{(z)} - \frac{d^2 F_{1g}}{dP_{1g}^2} \Delta P_{1g}^{(z)} = \frac{dF_{1g}}{dP_{1g}} + \overline{\pi}_{1g}^{(z)} - \underline{\pi}_{1g}^{(z)}\,;$$

$$\lambda_1^{(z)} - \frac{1}{\beta_i^{(z-1)}} \{ \frac{d^2 F_{ig}}{dP_{ig}^2} \Delta P_{ig}^{(z)} + \nu \lambda^{(z-1)} \frac{\partial^2 I_1}{\partial I_i^2} [\Delta P_{ig}^{(z)} - \Delta P_{ig}^{(z-1)}] \} - \frac{1}{\beta_i^{(z-1)}} \sum_{k,j} \tau_{kj}^{(z-1)} \frac{\partial I_{kj}}{\partial I_i} = \frac{1}{\beta_i^{(z-1)}} \cdot$$

$$\cdot [\frac{dF_{ig}}{dP_{ig}} + \overline{\pi}_{ig}^{(z)} - \underline{\pi}_{ig}^{(z)}]\,;$$

$$\beta_i = -\frac{\partial I_1}{\partial I_i} - \sum_{j=2}^{n} \frac{\partial^2 I_1}{\partial I_i \partial I_j} \sum_{g=1}^{g_1} \Delta P_{ig}\,; \; \sum_{g=1}^{g_1} \Delta P_{ig}^{(z)} - \frac{1}{2} \left[\frac{\partial I_1}{\partial I_i} - \beta_i^{(z-1)} \right] \cdot \sum_{g=1}^{g_1} \Delta P_{ig} = 0\,;$$

$$P_{ig}^{(0)} = 0\,; \; \lambda_1^{(0)} = \frac{dF_{11}}{dP_{11}}\,; \; \tau_{kj}^{(0)} = 0\,; \; \beta_i^{(0)} = -\frac{\partial I_1}{\partial I_i}\,. \tag{12}$$

После определения значений итераций проверяются значения условий (11). Если ограничения не удовлетворяются, изменяются коэффициенты τ_{kj}. Эти изменения определяются по соотношениям:

$$\Delta J_{kj}^{(z+1)} - \Delta J_{kj}^{(z)} = \sum_{i=2}^{n} \frac{\partial I_{kj}}{\partial I_i} \sum_{g=1}^{g_1} \left(\Delta P_{ig}^{(z+1)} - \Delta P_{ig}^{(z)} \right); \; \Delta J_{kj}^{(z+1)} \cong \Delta J_{kj}^{(z)} - \sum_{i,g} \frac{\left(\frac{\partial I_{kj}}{\partial I_i} \right)^2}{\frac{\partial^2 F_{ig}}{\partial P_{ig}^2} + \lambda_1 \frac{\partial^2 I_1}{\partial I_i^2}} \Delta \tau_{kj}\,. \tag{13}$$

Общий критерий оценки условий выполнения уравнения (3) является следствием сравнения двух соседних выражений

$$\delta = \max_{i,g} \left| \frac{\frac{1}{\beta_i} \frac{dF_{ig}}{dP_{ig}} - \lambda_1}{\lambda_1} \right|, \tag{14}$$

полученных в соседних циклах при принятом детерминированном значении δ (обычно $\delta = 0{,}01$).

Заключение. Разработанная методология систематизированного иерархического алгоритма создания структурных моделей обеспечивает приспосабливаемость системы к различным перестройкам параметров дуговой печи и облегчает разработку систем управления технологическими процессами электросталеплавления, как многофазных, многокомпонентных и неравновесных физических, химических, теплотехнических, электромагнитных и теплоэнергетических процессов, описываемых статистически детерминированной моделью. Реализованная модель применима для автоматизированного управления широким классом периодических и полунепрерывных (в смысле марковских) процессов пуска, останова и перехода с одного режима плавления на другой при изменении шихты и технологии плавки чистых, особо чистых и прецизионных сталей и сплавов.

УДК 631. 365

В.Г. Турковський, Ю.М. Жовнір
Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра електропостачання промислових підприємств, міст та сільського господарства

АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ У ДУГОВІЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНІЙ ПЕЧІ З УСТАНОВКОЮ СТАБІЛІЗАЦІЇ РЕЖИМУ

Наведено рівняння для дослідження періодичних процесів у нелінійній схемі установки стабілізації режиму дугової сталеплавильної печі, отримані аналітичним методом.

Equation for research periodic proceses in nonlinear shems the arc-furnace steel-melting of installation stabilization of mode presenting the analitical metod to get.

Постановка проблеми. Робота дугових сталеплавильних печей змінного струму (ДСП) за традиційної системи електропостачання спричиняє появу коливань струмів фаз, наслідком яких є зменшення корисної потужності, що вводиться в піч, збільшення втрат електроенергії в елементах електропостачальної системи (ЕПС), а також тривалості плавки й відповідно теплових втрат. Коливання струмів печі також обумовлюють появу коливань напруги мережі, які можуть перевищувати допустимі рівні й, у свою чергу, негативно впливати на ефективність паралельно працюючих електроприймачів [1].

Одним з перспективних напрямків до комплексного вирішення проблем енергоощадності та електромагнітної сумісності електропостачання ДСП є застосування установки стабілізації режиму (УСР) на базі індуктивно-ємнісного перетворювача джерела напруги в джерело струму, яка вмикається між джерелом живлення й власне пічною електроустановкою [2, 3].

Аналіз останніх досліджень. Наявність в ЕПС печі УСР, за певних умов (зокрема після увімкнення на неробочий хід), може спричинити появу ферорезонансних явищ на гармоніках основної частоти джерела живлення, ультрагармоніках та субгармоніках, що обумовлено нелінійністю характеристик трансформатора і дроселя. Як показав огляд літературних джерел, узагальнені дослідження таких явищ в ЕПС дугової сталеплавильної печі з УСР проведені недостатньо.

Задачі досліджень. Дослідження періодичного режиму неробочого ходу УСР на базі узагальнених методів аналізу нелінійних кіл.

Виклад основного матеріалу. Аналіз електромагнітних процесів ЕПС ДСП з УСР в режимі неробочого ходу можна здійснити, вивчаючи одну фазу електропічного контуру [1], заступна схема якого показана на рис. 1.

На рис. 1 показано індуктивність L стабілізувального реактора та ємність C конденсаторної батареї установки стабілізації струму; e_L, e_C – електрорушійні сили, що діють відповідно в контурі зі стабілізувальним реактором та конденсаторною батареєю; R_L, R_C – резистанси стабілізувального реактора та конденсаторної батареї; індуктивність розсіяння L_T та резистанс R_T первинної обмотки пічного трансформатора і вітка намагнічення з вебер-амперною характеристикою (рис. 2).