

УДК 621.365.5

Д. С. ЯРЫМБАШ, кандидат технических наук

Севастопольский национальный технический университет, г. Севастополь

ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ РЕГИСТРАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ГРАФИТАЦИИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Разработана методика динамической обработки дискретных данных регистрации токов, напряжений и активной мощности во время графитации заготовок электродов в печах переменного тока, которая уменьшает объем входной информации, обеспечивает вычислительную эффективность и точность, позволяет повысить качество автоматизированного управления режимами работы электротехнического комплекса графитации.

Розроблено методику динамічної обробки дискретних даних реєстрації струмів, напруг та активної потужності під час графітації заготовок електродів в печах змінного струму, що дозволяє зменшити обсяг вхідної інформації, забезпечує обчислювальну ефективність та точність, поліпшити якість автоматизованого керування режимами електротехнологічного комплексу графітації.

Введение

На современном этапе развития металлургической промышленности Украины одним из основных требований, предъявляемых к электродной продукции, следует считать высокий уровень качества при минимальной себестоимости, обеспечивающий ее конкурентоспособность и спрос на внутреннем и внешнем рынках.

Основным оборудованием на предприятиях графитового производства являются энергоемкие электротермические установки, поэтому затраты на электроэнергию сопоставимы с затратами на сырье и оказывают существенное влияние на себестоимость готовой продукции. При производстве электродов для мощных электродуговых печей применяются печи переменного тока, оборудованные системами автоматизированного управления мощностью на различных этапах технологического процесса графитации. Они, как объекты управления, характеризуются большой потребляемой мощностью (единичная мощность печи составляет 8-10 МВт и более [1]), значительной долей времени работы в динамических режимах, частой сменой исходных данных, что необходимо учитывать при расчете управляющих воздействий.

Существенным фактором, определяющим качественный уровень готовых электродов, является соблюдение технологического температурного режима, который определяется, прежде всего, технологическими регламентами ввода мощности для каждого вида электродной продукции. Нестабильность температурного поля ядра печи и графитируемых заготовок приводит к повышению удельной доли брака и, следовательно, к перерасходу сырья и электроэнергии.

Для обеспечения стабильности температурных режимов графитации должно уделяться особое внимание разработке новых подходов к синтезу системы оптимального управления электротехническим комплексом графитации (ЭТКГ). Анализ и синтез таких систем управления достаточно сложный, так как технологическая структура «питающие трансформаторы – короткие сети ЭТКГ – печная петля с загруженной печью графитации» должна рассматриваться в виде совокупности объектов с распределенными параметрами, которые описываются дифференциальными уравнениями в частных производных [2,3].

Эффективность систем автоматизации технологических процессов зависит как от задач, решаемых этими системами, так и от качества информации, используемой для решения. Известные методы и алгоритмы [1,4] не учитывают ряд особенностей, таких как дискретность данных, наличие скачков и разрывов при регистрации токов, напряжений и

активной мощности со стороны высокого напряжения питающих трансформаторов, трансформаторов компенсирующего устройства, а также в короткой сети ЭТКГ и печи графитации. Это требует разработки новых подходов к обработке сигналов в системах автоматизации ЭТКГ при графитации заготовок электродов для мощных электродуговых печей. Поэтому следует считать актуальной задачей повышения точности обработки динамических массивов исходной информации, адаптированной к автоматизированному управлению технологическими режимами графитации в режиме реального времени.

Основная часть

Целью работы является разработка новых подходов, обеспечивающих повышение точности и эффективности при математической обработке динамической исходной информации при регистрации токов, напряжений, активной мощности печи графитации в структуре ЭТКГ, улучшение качества автоматизированного управления технологическими режимами графитации в режиме реального времени.

В соответствии с [2,3] технологическая система «питающие трансформаторы – короткие сети ЭТКГ – печная петля с загруженной печью графитации», как объект управления с распределенными параметрами, может быть представлена системами дифференциальных уравнений в частных производных.

Для идентификации электрических сопротивлений компонентов в структуре ЭТКГ применяются сопряженные системы уравнений Максвелла в формулировках для комплексных амплитуд векторного магнитного и электрического потенциалов [3]:

$$\begin{cases} -\nabla[(j\omega\sigma_i - \omega^2\varepsilon_0\varepsilon_{r,i}) \cdot \mathbf{A}_i] + \nabla[(\sigma_i + j\omega\varepsilon_0\varepsilon_{r,i})\nabla V_i - \mathbf{J}_i^e] = 0, \\ (j\omega\sigma_i - \omega^2\varepsilon_0\varepsilon_{r,i})\mathbf{A}_i + \nabla \times (\mu_i^{-1}\nabla \times \mathbf{A}_i) + (\sigma_i + j\omega\varepsilon_0\varepsilon_{r,i})\nabla V_i = \mathbf{J}_i^e, \end{cases} \quad i = 1, \dots, I, \quad (1)$$

где ω – угловая частота, рад/с;

σ – удельная электрическая проводимость, 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;

μ – магнитная проницаемость, Гн/м;

индексы $i = 1, \dots, I$ – соответствуют расчетным областям в структурах ЭТКГ.

Для идентификации температурных параметров в расчетных структурах ЭТКГ применяются системы уравнений для квазистационарного конвективного теплообмена [5]:

$$\begin{cases} (\mathbf{x}_i \cdot \nabla)\mathbf{x}_i = -\rho_{0,i}^{-1}\nabla p_i + v_i\Delta\mathbf{x}_i - \zeta_i T_i \mathbf{g}, \\ \rho(T_i) = \rho_0(1 - \zeta_i T), \\ \mathbf{x}_i \nabla T_i = \chi_i \Delta T_i, \quad \text{div} \mathbf{x}_i = 0, \end{cases} \quad i = 1, \dots, N_i, \quad (2)$$

квазистационарной теплопроводности в расчетных областях активных элементов структуры ЭТКГ[5]:

$$\begin{cases} \text{div}(\lambda_i(T_i) \cdot \mathbf{grad}(t_i)) - Q_i(T_i) = 0, \\ Q_i(t_i) = 0,5 \cdot \sigma_i(T_i)^{-1} \mathbf{J}_i \cdot \mathbf{J}_i^*, \quad \mathbf{J}_i = -\sigma_i(T_i) \cdot (\mathbf{grad}(V_i) + j\omega \mathbf{A}_i), \end{cases} \quad i = 1, \dots, N_A, \quad (3)$$

в расчетных областях конструктивных элементов структуры ЭТКГ[5]:

$$\text{div}(\lambda_i(T_i) \cdot \mathbf{grad}(t_i)) = 0, \quad i = 1, \dots, N_c, \quad (4)$$

где ρ_0 – плотность газа при температуре T_0 , кг/м³;

T – отклонение температуры от значения T_0 , °С;

v – вектор скорости свободной конвекции воздуха, м/с;

p – давление, Па;

$\chi = \lambda/c \cdot \rho$ – коэффициент температуропроводности, м²/с;

c – теплоемкость, Дж/(кг·°С);

g – ускорение свободного падения, м/с²;

ζ – коэффициент объемного расширения газа, 1/°С;

ν – кинематическая вязкость, м²/с,

$\lambda(T)$ – коэффициент теплопроводности; $Q(T)$ – удельные мощности источников тепла;

J – амплитудное значение плотности тока в проводящей среде.

В работах [2, 3] обоснован высокоэффективный подход, позволяющий путем численного решения систем уравнений Максвелла (1) методом конечных элементов, идентифицировать электрические сопротивления активных элементов в структуре ЭТКГ, а из решения систем уравнений (2)–(4) определяются условия и ограничения, обеспечивающие заданные температурные режимы графитации и эксплуатационных температурные режимы работы электротехнических систем и оборудования ЭТКГ. Следовательно, для управления ЭТКГ в режиме реального времени можно применить матричную форму для описания состояния динамической системы:

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{X}(\tau) + \mathbf{B} \cdot \mathbf{W}(\tau), \quad (5)$$

где \mathbf{X} , \mathbf{W} – векторы состояния и входных воздействий;

\mathbf{A} , \mathbf{B} – матрицы системы и параметров для входных воздействий.

Для управления процессом графитации по входным дискретным целочисленным значениям напряжений, токов и активной мощности в контрольных точках при их регистрации в режиме реального времени τ в динамических массивах данных [6,7] необходимо обеспечить отображение их непрерывными функциями с множеством значений

– $\mathbf{Z}_j = \{U_j(\tau_i), I_j(\tau_i), P_j(\tau_i)\}_{j,0 \cup n, i \in I = \text{var}}$ и непрерывными производными с множеством значений – $\mathbf{Z}'_j = \{U'_j(\tau_i), I'_j(\tau_i), P'_j(\tau_i)\}_{j,0 \cup n, i \in I = \text{var}}$.

Для коррекции токовых нагрузок керна печи в процессе графитации заготовок электродов для мощных дуговых сталеплавильных печей достаточно применить метод наименьших квадратов [8] для локальной кубической полиномиальной аппроксимации относительных токовых нагрузок и активной мощности печи по критерию относительного времени графитации:

$$\tilde{I}(\tilde{\tau}_i)_j = \sum_{l=0}^3 \gamma_{l,j} \tilde{\tau}_i^l, \quad \tilde{P}(\tilde{\tau}_i)_j = \sum_{p=0}^3 \eta_{l,j} \tilde{\tau}_i^l, \quad ,$$

где $\tilde{\tau}_i = \tau_i / \tau_{gp}$, $\tilde{I}_i = I_i / I_{\text{max}_{gp}}$, $\tilde{P}_i = P_i / P_{\text{max}_{gp}}$, индекс $j=1$ соответствует этапу графитации без компенсации реактивной мощности, а $j=2$ – этапу графитации при компенсации реактивной мощности.

Так как функции $\tilde{I} = \tilde{I}(\tilde{\tau}_i)$ и $\tilde{P} = \tilde{P}(\tilde{\tau}_i)$ можно рассматривать, как параметрические, то следует считать определенными функции вида:

$$\tilde{P}_j = J_j(\tilde{I}_j), \quad j = 1, 2,$$

При этом среднее значение относительной погрешности для относительной токовой нагрузки не превышает 1,6 % – для этапа графитации без компенсации реактивной мощности и 2,3 % – для этапа графитации при компенсации реактивной мощности.

Для отображения исходной информации измерений токов и активной мощности на токоподводах печи графитации заменим дискретные множества данных непрерывными функциями сплайн-интерполяции:

$$\tilde{\mathbf{Z}}(\tilde{\tau}) = \mathbf{P}\mathbf{f}(\tilde{\tau}) = \varphi_0(\tilde{\tau})\mathbf{f}(\tilde{\tau}_i) + \varphi_1(\tilde{\tau})\mathbf{f}(\tilde{\tau}_{i+1}) + \varphi_2(\tilde{\tau})(\tilde{\tau}_{i+1} - \tilde{\tau}_i)\lambda_i + \varphi_3(\tilde{\tau})(\tilde{\tau}_{i+1} - \tilde{\tau}_i)\lambda_{i+1}, \quad (6)$$

с базисными полиномами Эрмита [8]:

$$\varphi_0(\tilde{\tau}) = (2\tilde{\tau} + 1) \cdot (1 - \tilde{\tau}^2), \quad \varphi_2(\tilde{\tau}) = \tilde{\tau} \cdot (1 - \tilde{\tau}^2)^2, \quad \varphi_1(\tilde{\tau}) = (3 - 2 \cdot \tilde{\tau}) \cdot \tilde{\tau}^2, \quad \varphi_3(\tilde{\tau}) = (\tilde{\tau} - 1) \cdot \tilde{\tau}^2,$$

где $\tilde{\tau} = \frac{\tilde{\tau} - \tilde{\tau}_i}{\tilde{\tau}_{i+1} - \tilde{\tau}_i}$ на отрезках $\tilde{\tau}_i \leq \tilde{\tau} \leq \tilde{\tau}_{i+1}$;

При определении неизвестных производных функции сплайн-интерполяции $\lambda_i = \mathbf{P}\mathbf{f}'(\tilde{\tau}_i)$, $\lambda_{i+1} = \mathbf{P}\mathbf{f}'(\tilde{\tau}_{i+1})$ потребуем, чтобы выполнялись условия минимальной кривизны [8] в дифференциальной форме:

$$\mathbf{P}\mathbf{f}''(\tilde{\tau}_i) = 0, \quad \mathbf{P}\mathbf{f}''(\tilde{\tau}_{i+1}) = 0 \quad (7)$$

или в тождественной интегральной форме:

$$\min \mathbf{J}(\lambda) = \min \sum_{i=0}^{I-1} \int_{\tilde{\tau}_i}^{\tilde{\tau}_{i+1}} \left[\mathbf{P}\mathbf{f}'' \left(\frac{\tilde{\tau} - \tilde{\tau}_i}{\tilde{\tau}_{i+1} - \tilde{\tau}_i} \right) \right]^2 d\tilde{\tau}$$

совместно с условиями интерполяции [8]:

$$\overline{\delta(\mathbf{P}\mathbf{f}(\tilde{\tau}))}_{i,j,0 \cup n} = \{ \mathbf{Z}_{i,j,0 \cup n} \}_{i \in E = \text{var}}, \quad \tilde{\tau}_0 < \tilde{\tau}_1 < \dots < \tilde{\tau}_E \quad (8)$$

Таким образом, сплайн-интерполяция базисными полиномами Эрмита (6) – (8) позволяет в режиме реального времени с высокой точностью преобразовывать массивы дискретных целочисленных значений напряжений, токов (рис.1,а) и активной мощности (рис.1,б) в непрерывные функции с непрерывными производными.

Однако эта методика обладает рядом существенных недостатков, так как объем информации динамически возрастает пропорционально времени и такту ее регистрации. Следует также обратить внимание на низкую достоверность при определении значений скоростей электрических параметров в контрольных точках (рис.1,а), обусловленную целочисленным представлением информации и необходимостью аппаратного ограничения ее разрядности.

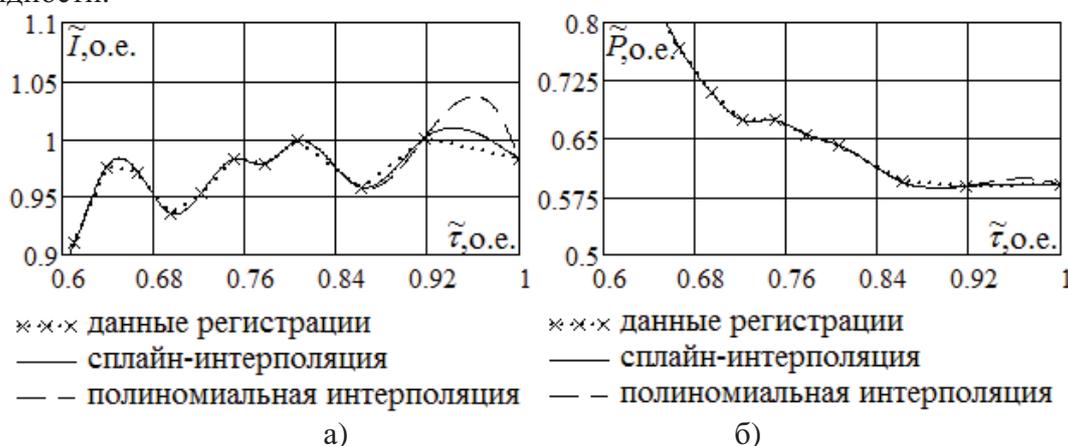


Рис. 1. Локальная обработка данных регистрации тока (а) и мощности (б) графитации

Поэтому требуется последующая аппроксимация непрерывной функции (6) на базе тригонометрических функций, что уже было успешно апробировано и реализовано авторами в работе [6]. С учетом особенностей технологического регламента подъема мощности во

время кампании графитации заготовок электродов рассматриваются ортонормированные базисные функции:

$$v(\varpi) = (\varpi^0, \sin(\varpi), \cos(\varpi), \dots, \sin(n\varpi), \cos(n\varpi)) \quad (9)$$

вводится функция аргумента $\tilde{\tau}$ вида: $\varpi(\beta_1, \beta_2, \tilde{\tau}) = (\beta_1 \cdot \tilde{\tau}^{\beta_2})$ и применяется аппроксимация непрерывной функции сплайн-интерполяции (6) на базе (9) вида:

$$Af(\tilde{\tau}) = \left(\sum_{r=1}^R \alpha_r v_r(\beta_1, \beta_2, \tilde{\tau}) \right) \quad (10)$$

с непрерывными производными порядка n :

$$Af^{(n)}(\tilde{\tau}) = \left(\sum_{r=1}^R \alpha_r v_r^{(n)}(\beta_1, \beta_2, \tilde{\tau}) \right), n \geq 1,$$

где неизвестные коэффициенты аппроксимации $\{\alpha_r\}_{r \in R}$ определяются из достаточного условия:

$$\min(\varphi(Af)) = \int_0^{\tilde{\tau}_r} \left[Pf(\tilde{\tau}) - \left(\sum_{r=1}^R \alpha_r v_r(\beta_1, \beta_2, \tilde{\tau}) \right) \right]^2 d\tilde{\tau}$$

или соответствующих ему необходимых условий вида:

$$\begin{cases} \overline{\partial \varphi(Af) / \partial \alpha_r = 0, r \in R} \\ \overline{\partial \varphi(Af) / \partial \beta_{1,2} = 0} \end{cases} \quad (11)$$

представляют собой систему линейных алгебраических уравнений относительно $\{\alpha_r\}_{r \in R}$ и нелинейных уравнений относительно $\{\beta_{1,2}\}$.

В результате обработки динамических данных регистрации токов, напряжений и активной мощности графитации для различных кампаний графитации было установлено, что при аппроксимации их сплайн-интерполяции базисными полиномами Эрмита (6) можно ограничиться только тремя гармоническими составляющими относительно критериальной функции времени $\varpi(\beta_1, \beta_2, \tau) = \beta_1 \tilde{\tau}^{\beta_2}$ массива базисных функций (9). Совокупность векторов коэффициентов $\{\beta_{1,2}\}$ с достаточной для управления точностью определяется уже на начальных шагах регистрации для каждого этапа кампании графитации. Поэтому размерность вектора $\{\alpha_r\}_{r \in R}$ не превышает $R = 5$, что более чем на порядок уменьшает объем исходной информации, необходимой для расчета управляющих воздействий.

По результатам обработки измерений токов, напряжений и активной мощности во время кампании графитации как по методике (9) – (11), так и сплайн-интерполяции (6) – (8) следует отметить, что оба подхода обеспечивают практически одинаковую относительную точность результатов. Средние значения относительной токовой погрешности не превышают 1,2% (рис.1,а), а среднее значение погрешности для мощности графитации не более 0,2 %. Это существенно лучше точности зависимостей, полученных методом кусочно-полиномиальной интерполяции, для которых токовая погрешность превышает 3,5 % (рис.1,а), а относительная погрешность при расчете активной мощности – 2,1 % (рис.1,б).

При этом методика (9) – (11) обеспечивает вычислительную эффективность в 3–4 раза выше по сравнению с методикой (6) – (8).

В процессе кампании графитации данные регистрации действующих значений токов, напряжений и активной мощности поступают последовательно через заданный такт, их обработка выполняется для определенного локального временного интервала. При этом возникает необходимость сшивки результатов по методике (9) – (11) на различных этапах кампании графитации и смежных интервалах времени по критерию коллокации вида:

$$\left(Af(\tilde{\tau}_{i_1}) - Af(\tilde{\tau}_{i_2}) \right) \cdot \rho_w + \left| Af'(\tilde{\tau}_{i_1}) - Af'(\tilde{\tau}_{i_2}) \right| \cdot \rho_{T_w} \leq \varepsilon, \forall i_1 \in I_1 \cap \forall i_2 \in I_2 \cap \{ \tilde{\tau}_{i_1} = \tilde{\tau}_{i_2} \}, \quad (12)$$

где ρ_w, ρ_{T_w} – весовые коэффициенты,

ε – точность коллокации.

Вычислительная эффективность сшивки локальной аппроксимации (9) – (11) по критерию (12) соответствует методике (6) – (8), но при этом обеспечивается неразрывность, как электрических параметров графитации, так и скорости их изменения с установленной степенью точности ε .

Выводы

Предложенная методика динамической обработки данных измерений токов, напряжений и активной мощности печи Ачесона во время кампании графитации заготовок электродов на основе комбинации методов сплайн-интерполяции полиномами Эрмита и аппроксимации на тригонометрическом базисе (9) с необходимыми условиями (11), при одинаковом уровне вычислительной погрешности с известными подходами [8], позволяет более чем на порядок сократить объем входных данных для системы автоматизированного управления ЭТКГ, повысить вычислительную эффективность обработки входных данных в 3-4 раза. Таким образом, можно существенно снизить требования, предъявляемые к аппаратным средствам автоматизированной системы управления по вычислительным ресурсам и объему памяти, повысить качество управления технологическим процессом графитации, качество электродов для мощных электродуговых печей и сократить производственные затраты.

Список литературы

1. Соседов В. П. Графитация углеродистых материалов [Текст] / В. П. Соседов, Е. Ф. Чалых. – М.: Металлургия, 1987. – 176 с.
2. Ярымбаш Д.С. Повышение энергоэффективности бокового шинопакета печей графитации переменного тока [Текст] / Д. С. Ярымбаш, С. Т. Ярымбаш // Технічна електродинаміка. Тематичний вип. Силова електроніка і енергоефективність. Ч. 1 – 2011, С. 229–233.
3. Ярымбаш Д.С. Идентификация электрических параметров печной петли мощных печей графитации [Текст] / Д. С. Ярымбаш // «Электротехника и электромеханика». – 2012. № 1. – С. 49–54.
4. Знамеровский В. Ю. Математическое моделирование процесса графитации [Текст] / В. Ю. Знамеровский. – М. : Металлургия, 1994. – 176 с.
5. Михеев М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
6. Ярымбаш Д. С. Особенности измерения переменного тока в токоподводах печей графитации [Текст] / Д. С. Ярымбаш // Электротехника и электроэнергетика. – 2005. – № 1. – с. 74 – 76.
7. Ярымбаш Д. С. Особенности контроля электрических параметров, мощности и энергопотребления во время кампании графитации в печи переменного тока [Текст] / Д. С. Ярымбаш, С. Т. Ярымбаш, А. В. Тютюнник // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету, 2006, – Вип. 3/2006 (38). С. 91 – 95.
8. Математика и САПР. Кн. 2 Вычислительные методы. Геометрические методы. [Текст] /Под ред. Волкова Н.Г. – М.: Мир, 1989. – 260 с.

SPECIFICS OF PROCESSING OF DATA OF REGISTRATION OF ELECTRICAL PARAMETERS OF ELECTROTECHNICAL COMPLEXES OF ALTERNATING CURRENT GRAPHITATION

D. S. YARYMBASH, Candidate of Engineering

The paper gives account of the technique of dynamic processing of discrete data of

registration of currents, voltages and active power during graphitization of blank electrodes in alternating current furnaces, which reduces the amount of input data, provides the computational efficiency and accuracy, improves the quality of automatic control over the operation modes of electrical graphitization complex.

1. Sosedov V. P. The graphitization of carbon materials / V. P. Sosedov, E. F. Chalyh. [Grafitatsia uglerodistykh materialov [Tekst]. – Moscow: Metallurgiya, 1987. – 176 p.
2. Yarymbash D. S. Improving the energy efficiency of side bus package of the AC graphitization furnaces [D. S. Yarymbash. Povyshenie energoeffektivnosti bokovogo shinopaketa pechey grafitatsii peremennogo toka] [Tekst]. – Tekhnichna elektrodynamika. Tematychnyy vyp. Sylova elektronika i enerhoefektyvnist. –Vol. 1 – 2011, P. 229–233.
3. Yarymbash D. S. The identification of the circuit furnace electrical parameters of the power graphitization furnaces [D S. Yarymbash. Identifikatsia elektricheskikh parametrov pechnoy petli moshchnyky pechey] [Текст]. – «Jelektrotehnika i jelektromehanika». – 2012. № 1. – P. 49– 54.
4. Znamerovskij V. Ju. Mathematic modeling of the graphitization process [V. Ju. Znamerovskij. Matematicheskoe modelirovanie protsessa grafitatsii][Tekst] . – M. : Metallurgija, 1994. – 176 p.
5. Miheev M. A. Fundamentals of Heat Transfer/ M. A. Miheev, I. M. Miheeva.[Osnovy teploperedachi]. – M.: Jenergija, 1977. – 344 p.
6. Yarymbash D. S. Features of current measuring in current supplies of graphitization furnaces [D. S. Yarymbash. Osobennosti izmereniya peremennogo toka v tokoprovodakh pechey grafitatsii] [Tekst]. – Jelektrotehnika i jelektrojenergetika] – 2005. – №1. – P. 74 – 76.
7. Yarymbash D. S. The features of the control of electrical parameters, power and energy consumption during the campaign graphitization furnaces AC / D. S. Yarymbash, S.T. Yarymbash, O.V. Tyutyunnik [Osobennosti kontrolya elektricheskikh parametrov, moshchnosti I energopotrebleniya vo vremia kampanii grafitatsii v pechi peremennogo toka] [Tekst]. – Visnyk Kremenchuckogo derzhavnogo politehnicnogo universytetu. – Kremenschuk: KDPU, 2006, – Vol. 3/2006(38), – P. 53 – 55.
8. Mathematics and CAD. Book 2 Computational methods. Geometric methods / By red. Volkova N.G. [Matematika I SAPR. Kn. 2. Vychislitelnye metody. Geometricheskie metody] [Tekst] /Pod red. Volkova N. G.].– M.: Mir, 1989. – 260 p.

Поступила в редакцию 10.10 2013 г.