

УДК 621.365.32

Д. С. Ярымбаш, канд. техн. наук

ОСОБЕННОСТИ ОПТИМИЗАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ГРАФИТАЦИИ

Аннотация. Предложен новый метод синтеза обобщенного критерия оптимальности режимов работы электротехнического комплекса графитации переменного тока на основе суперпозиции локальных критериев его систем и подсистем. Оптимизация режимов методом динамического программирования и их реализация в автоматической системе управления позволяет снизить суммарные затраты электроэнергии на 2,5 – 5,2% или до 7 – 8 МВт·час на кампанию графитации.

Ключевые слова: синтез, обобщенный критерий оптимальности, суперпозиция, динамическое программирование, затраты электроэнергии, потери

D. Yarymbash, PhD.

FEATURES OF ELECTRIC MODES GRAPHITIZATION OPTIMIZATION

Abstract. New method of generalized optimality criterion synthesis of the modes of electrotechnical complex of graphitization AC based on the superposition of local criteria of its systems and subsystems is developed. Optimization of modes by dynamic programming method and their realization in the automatic control system allows reducing total expenses of electricity to 2,5 – 5,2% or up to 7 – 8 MW-hour by campaign of graphitization.

Keywords: synthesis, generalized optimality criterion, superposition, dynamic programming, expenses of electricity, losses

Д. С. Ярымбаш, канд. техн. наук

ОСОБЛИВОСТІ ОПТИМІЗАЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНИХ РЕЖИМІВ ГРАФІТАЦІЇ

Запропоновано новий метод синтезу узагальненого критерію оптимальності режимів роботи електротехнічного комплексу графітації змінного струму на основі суперпозиції локальних критеріїв його систем та підсистем. Оптимізація режимів методом динамічного програмування та їх реалізація у автоматичній системі керування дозволяє знизити сумарні витрати електроенергії на 2,5 – 5,2 % або до 7 – 8 МВт·год на кампанію графітації.

Ключові слова: синтез, узагальнений критерій оптимальності, суперпозиція, динамічне програмування, витрати електроенергії, втрати

Введение. Освоение новых типов электродной продукции для современных электродуговых печей обуславливает необходимость существенного совершенствования технологического процесса графитации (ТПГ), который сопровождается значительным ростом как активной, так и реактивной мощности электротехнического комплекса графитации (ЭТКГ). При этом активная мощность графитации может достигать 10 – 12 МВт, а установленная мощность устройств поперечной компенсации – 15 – 20 МВАр [1]. В связи с этим потери активной мощности, обусловленные перетоками реактивной мощности в короткой сети (КС) и в самом ЭТКГ, могут возрастать до 1 МВт, существенно (до 10 %) снижая максимальную мощность графитации и, как следствие, энергоэффективность ТПГ и электродного производства в целом [2]. Решение этой сложной научно-технической проблемы требует разработки новых теоретических и практических подходов к постановке, формализации и численной реализации задачи многопараметрической мультикритериальной оптимизации при энергоэффективном управлении режимами компенсации, что является актуальным в научном и производственном плане.

Цель работы. Разработка новых подходов к реализации задачи мультикритериальной оптимизации электрических режимов графитации (ЭРГ) и компенсации реактивной мощности (КРМ) ЭТКГ с печами графитации (ПГ) большой мощности.

Материал и результаты исследований. Текущее состояние ЭТКГ переменного тока представляется совокупностью значений параметров, которые интерпретируются как проекции изображающего вектора в многомерном пространстве, размерность которого соответствует общему числу этих параметров.

В этом пространстве условно выделяются подпространства множества физических, конструктивных и технологических параметров графитируемых заготовок электродов (ГЗЭ) и керна ПГ – $\{F_n, K_n, T_n\}$; множества геометрических параметров ГЗЭ и их взаимного расположения в кернах ПГ – $\{G_m\}$; множества физических, конструктивных и эксплуатационных параметров ПГ секции ЭТКГ – $\{F_l, K_l, T_l\}$; множества физических, конструктивных и эксплуатационных параметров КС ЭТКГ – $\{F_k, K_k, T_k\}$; множества конструктивных и эксплуатационных параметров печных (ПТ) и компенсационных трансформаторов (КТ) и компенсирующего устройства (КУ) – $\{F_y, K_y, T_y\}$.

На множестве параметров $\{p\}$, объединяющем указанные выше подмножества параметров

$$\{p\} = \{F_n, K_n, T_n\} \cup \{G_m\} \cup \{F_l, K_l, T_l\} \cup \{F_k, K_k, T_k\} \cup \{F_y, K_y, T_y\}, \quad (1)$$

выделяются подмножества инвариантно варьируемых и зависимых параметров оптимизации

$$\{p\} = \{Inv_\chi\} \cup \{Ninv_\xi\}.$$

© Ярымбаш Д.С., 2014

Синтез обобщенного критерия оптимальности осуществлялся на основе суперпозиции локальных критериев минимума активных электрических потерь в отдельных элементах ЭТКГ с помощью ортонормированных весовых функций произвольного независимого параметра η :

$$\min(M_{Gl}) = \min \left[\sum_i \varphi_i(\eta) \cdot (P_{ai}) \right], \quad (2)$$

каждая, из которых удовлетворяет таким условиям:

$$\int_0^1 \varphi_i(\eta)^2 d\eta = 1, \quad \int_0^1 [\varphi_i(\eta) \cdot \varphi_j(\eta)] d\eta = 0. \quad (3)$$

Для построения процесса многопараметрической мультикритериальной оптимизации осуществлялась процедура дифференцирования соотношения (2) по параметру η

$$M_{Gl(\eta)} = \sum_i \varphi(\eta)_i \cdot (P_{ai}) + \sum_i \varphi_i \cdot (P_{a(\eta)_i}),$$

после чего это соотношение интегрировалось с дискретным шагом $\Delta\eta$ методом Эйлера

$$M_{Gl}|_{\eta=j\Delta\eta} = M_{Gl}|_{\eta=(j-1)\Delta\eta} + \left\{ \sum_i \varphi(\eta)_i (P_{ai}) + \sum_i \varphi_i (P_{a(\eta)_i}) \right\}_{\eta=(j-1)\Delta\eta} \Delta\eta,$$

и исходной задаче оптимизации (2) ставилась в соответствие итерационная система локальных задач оптимизации вида

$$\min(M_{Gl}|_{\eta=j\Delta\eta}) = M_{Gl}|_{\eta=(j-1)\Delta\eta} + \min \left\{ \sum_i \varphi(\eta)_i (P_{ai}) + \sum_i \varphi_i (P_{a(\eta)_i}) \right\}_{\eta=(j-1)\Delta\eta} \Delta\eta. \quad (4)$$

Для управления ЭРГ и КРМ вводится начальное приближение, необходимое для численной реализации системы оптимальных соотношений (4), соответствующее условию максимума мощности графитации

$$M_{Gl}|_{\eta=0} = \max(P_{\text{граф}}). \quad (5)$$

Ограничения, описывающие связи между компонентами изображающего вектора для ПТ и КТ, включенных попарно на параллельную работу, устанавливаются известными уравнениями работы трансформатора под нагрузкой для действующих значений напряжений, токов и ЭДС [3]:

$$\begin{cases} \dot{U}_{1,i} = -\dot{E}_{1,i} + \dot{I}_{1,i} (R_{1,i} + j \cdot X_{1,i})|_{n_i}, \\ \dot{E}_{2,i} - \dot{I}_{2,i} (R_{2,i} + j \cdot X_{2,i}) = \dot{U}_{2,i}|_{n_i}, \quad i \in \{N_{\text{РПН}}\} \\ \dot{I}_{1,i} w_{1,i} + \dot{I}_{2,i} w_{2,i} = \dot{I}_{0,i} w_{1,i}|_{n_i}, \end{cases} \quad (6)$$

где U, E, I – напряжения, ЭДС и токи; R, X – активное и индуктивное сопротивление; n – ступень регулирования напряжения на стороне ВН; \dot{I}_0, w – ток холостого хода и число витков в обмотках, $j=1,2$ – к первичной и вторичной обмоткам, $i=1,2$ – номер трансформатора в трансформаторной камере, $N_{\text{РПН}}$ – число ступеней РПН печных трансформаторов.

Для участков КС, по которым протекает ток гра-

фитации $I_{\text{граф}}$ (кern и печная петля (ПП) с шинными пакетами (ТШП) переднего и заднего торцов, боковые шинные пакеты (БШП), главный шинный пакет (ГШП)), можно составить уравнения для активной $P_{\Sigma R_ПП}$, реактивной $Q_{\Sigma X_ПП}$ и полной мощности $S_{\Sigma R_ПП}$:

$$\begin{cases} P_{\Sigma R_ПП} = I_{\text{граф}}^2 \cdot \sum_i R_i, \quad Q_{\Sigma X_ПП} = I_{\text{граф}}^2 \cdot \sum_i X_i, \\ S_{\Sigma R_ПП} = \sqrt{P_{\Sigma R_ПП}^2 + Q_{\Sigma X_ПП}^2}, \end{cases} \quad (7)$$

где R, X – активные и индуктивные сопротивления участков КС ЭТКГ. Для уменьшения объемов данных и времени расчетов применялись зависимости для электрических сопротивлений участков КС от их геометрических параметров с учетом электрических нагрузок и температурных режимов вторичных токопроводов.

Для участков ЭТКГ, которые нагружены результирующими токами питающей и компенсационной ветвей ГШП $I_{\text{ГШП}}$ (участки ГШП, ПТ и КТ, шинные пакеты трансформаторных камер со стороны НН (шп), КУ и высоковольтные кабели), уравнения для активной $P_{\Sigma R}$, реактивной $Q_{\Sigma R}$ и полной мощности $S_{\Sigma R}$ будут иметь вид:

$$P_{\Sigma R} = \sum_j \left\{ |I_j|^2 \left(\frac{w_{2,j}}{w_{1,j}} \right)_{n_j}^2 \left(R_{kj}|_{n_j} + R_{\text{шп},j} \right) + P_0|_{n_j} + P_{\text{ку}}|_{n_j} \right\} + |I_{\text{ГШП}}|^2 \sum_k R_{\text{ГШП},k}, \quad (8)$$

$$Q_{\Sigma R} = \sum_j \left\{ |I_j|^2 \left(\frac{w_{2,j}}{w_{1,j}} \right)_{n_j}^2 \left(X_{kj}|_{n_j} \right) + X_{\text{шп},j} \right\} + Q_0|_{n_j} - Q_{\text{ку}}|_{n_j} \left\{ |I_{\text{ГШП}}|^2 \sum_k X_{\text{ГШП},k}, \right. \quad (9)$$

$$\left. + X_{\text{шп},j} \right\} + Q_0|_{n_j} - Q_{\text{ку}}|_{n_j} \left\{ |I_{\text{ГШП}}|^2 \sum_k X_{\text{ГШП},k}, \right.$$

$$S_{\Sigma R} = \sqrt{P_{\Sigma R}^2 + Q_{\Sigma R}^2} = |I_{\text{ГШП}}|^2 \cdot Z_{\Sigma R}, \quad (10)$$

где P_0, Q_0 – мощности ХХ трансформаторов, R_k, X_k – сопротивления КЗ трансформаторов.

Рассматривая совместно (6) – (10), можно перейти к уравнениям баланса активной P_{Σ} , реактивной Q_{Σ} , полной мощности S_{Σ} ЭТКГ и его токов:

$$\begin{cases} P_{\Sigma} = P_{\Sigma R_ПП} + \sum_{\text{пт,кт}} P_{\Sigma R}, \\ Q_{\Sigma} = Q_{\Sigma X_ПП} + \sum_{\text{пт,кт}} Q_{\Sigma R}, \\ S_{\Sigma} = \sqrt{P_{\Sigma}^2 + Q_{\Sigma}^2}, \quad \sum \dot{I}_{\text{ГШП}} + \dot{I}_{\text{граф}} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

Точность оптимизации ЭТКГ переменного тока существенным образом зависит от точности задания электрических параметров ПТ, КТ и КС в системах ограничений (6) – (11). Это требует учета особенностей электромагнитного взаимодействия токопроводов друг с другом, БШП с kernом ПТ, температурных режимов, поверхностных эффектов, эффектов близо-

сти, внешних поверхностных эффектов, само- и взаимной индукции проводников. При этом функциональные связи между токами и падениями напряжения в контуре ПГ могут предварительно идентифицироваться посредством численной реализации полевых моделей для трех подсистем: первая подсистема включает малую ПП, вторая – участок ТШП заднего торца, третья – керн с участком БШП [4 – 6].

Таким образом, целевая функция ($M_{Gl}|_{\eta=j\cdot\Delta\eta}$) может быть представлена, как функция векторов инвариантно варьируемых $\{Inv_{\chi}\}$ и зависимых параметров $\{Ninv_{\xi}\}$. Для построения эффективного алгоритма оптимизации на каждом дискретном шаге изменения параметра η целесообразно применить базовые подходы и математические методы.

В соответствии с выражениями (1) – (5) число связей, которые устанавливаются системами уравнений (6) – (11), соответствует числу проекций вектора зависимо варьируемых параметров. Следовательно, падения напряжения ΔU_{ij} на участках ЭТКГ могут рассматриваться как проекции вектора независимо варьируемых параметров $\{Inv_{\chi}\}$. Это позволяет преобразовать целевую функцию ($M_{Gl}(\{Inv_{\chi}\}, \{Ninv_{\xi}\})|_{\eta=j\cdot\Delta\eta}$) в функцию вектора независимо варьируемых параметров $\tilde{M}(\{Inv_{\chi}\})|_{\eta=j\cdot\Delta\eta}$ и привести условие оптимальности (5) к виду

$$\min \left[M_{Gl}|_{\eta=j\cdot\Delta\eta} = \tilde{M}(\{Inv_{\chi}\})|_{\eta} \right]. \quad (12)$$

При оптимизации (12) целесообразно применить хорошо отработанный для подобного класса задач метод динамического программирования [7]. Для этого на каждом шаге η рассчитываются начальные приближения вектора падений напряжений $Inv_{\chi_0} = \{\Delta \dot{U}_{ij}\}_0$ на участках контура ПП и соответствующее ему начальное приближение значения целевой функции $\tilde{M}_0|_{\eta} = \tilde{M}(Inv_{\chi_0})|_{\eta}$.

Для построения рекуррентной системы уравнения Беллмана [8] вектор параметров оптимизации представляется в виде суммы векторов начального приближения и приращения независимо варьируемых параметров

$$\{\Delta \dot{U}_{ij}\} = \{\Delta \dot{U}_{ij}\}_0 + \{\delta \Delta \dot{U}_{ij}\}_1,$$

что позволяет преобразовать целевую функцию

$$\begin{aligned} \tilde{M}(\{\Delta \dot{U}_{ij}\})|_{\eta} &= \tilde{M}(\{\Delta \dot{U}_{ij}\}_0 + \{\delta \Delta \dot{U}_{ij}\}_1)|_{\eta} = \\ &= [\tilde{M}(\{\Delta \dot{U}_{ij}\}_0) + \Delta \tilde{M}]|_{\eta} = [\tilde{M}_0 + \\ &+ \Delta \tilde{M}(Inv_{\chi_0}, \delta Inv_{\chi_1})]|_{\eta} = [\tilde{M}_0 + \Delta \tilde{M}_1]|_{\eta} \end{aligned} \quad (13)$$

и поставить в соответствие условиям оптимальности (5) задачу вида

$$\begin{aligned} \min \Delta \tilde{M}_{\Sigma}|_{\eta} &= \Phi(Inv_{\chi_0}) = \\ &= \min \dots \min \left[\begin{aligned} &\Delta \tilde{M}_1(Inv_{\chi_0}, \delta Inv_{\chi_1}) + \\ &+ \dots \Delta \tilde{M}_k(Inv_{\chi_{k-1}}, \delta Inv_{\chi_k}) \end{aligned} \right]|_{\eta}. \end{aligned} \quad (14)$$

Соотношение (14) можно преобразовать в систе-

му рекуррентных уравнений Беллмана [8], которая численно решается по апробированному для этого класса задач алгоритму [9]. При реализации соотношений (4) – (14) применяется принцип самообучения, который позволяет уменьшать размерность задачи оптимизации, исключая те электрические параметры элементов ЭТКГ, влияние которых на изменение соответствующего локального критерия оптимальности становится несущественным. Динамическая коррекция электрических параметров ПП и ПГ в соотношениях (7) выполняется по данным регистрации электрических параметров на отводах [10]. Итерационный вычислительный процесс удовлетворяет заданным критериям точности для токовых погрешностей $\varepsilon_{I_{\text{тшп}}} \leq 0,5\%$ и угловых погрешностей $\varepsilon_{\text{тшп}} \leq 1\%$ [10].

Данные оптимизации для ГЗЭ диаметром 500 мм представлены в виде зависимостей нормированных токов графитации и ПГ от тока КУ для текущего момента нормированного времени $\tau = 0,436$ (Рис. 1) (оптимизированные ступени РПН $n_{\text{пт,1опт}} = 7$, $n_{\text{пт,2опт}} = 7$, $n_{\text{кт,1опт}} = 2$, $n_{\text{кт,2опт}} = 1$) и изменения мощности ПГ (графитации), ЭТКГ, потерь во время действующей (ДР) и оптимизированной (ОР) кампаний (рис. 2).

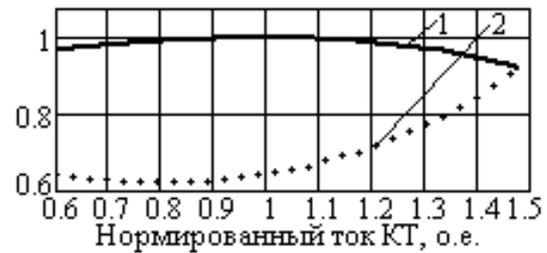


Рис. 1. Оптимизация ЭРГ по току КУ:
1 – ток графитации; 2 – результирующий ток ПТ

При управлении мощностью графитации со стороны ВН ПТ стремятся обеспечить коэффициент мощности не ниже 0,98. Однако при этом не выполняются условия резонанса токов в параллельных контурах ПП и КУ. Как следствие, ток КУ на 24 – 47 % превышает оптимальное для текущего момента времени значение, а ток графитации снижается на 7 – 8 % (рис. 1).



Рис. 2. Изменение мощности ЭТКГ, ПГ и потерь при графитации заготовок электродов:
(1), (2) – активная мощность ЭТКГ ДР и ОР; (3), (4) – мощность ПГ ДР и ОР; (5), (6) – потери в ЭТКГ ДР и ОР

Посредством контроля токов в токоподводах ПГ, падений напряжения в ПП, активной и реактивной мощности ПГ обеспечивается для установленного технологического режима графитации (ТРГ) оптимальное управление нагрузкой ПТ, КТ, которое реализуется посредством дискретного задания ступеней РПН и емкостей КУ, наиболее близких к оптимальным параметрам оптимизации для текущего шага по времени. Это обеспечивает снижение тока КУ на 22 – 37 % при росте ПГ на 5 – 8 % во время второй фазы кампании при параллельной работе ПТ и КТ (рис.1).

На первом этапе процесса графитации постепенно увеличивают мощность изменением ступеней РПН на высокой стороне ПТ таким образом, чтобы она соответствовала заданному ТРГ. По мере разогрева керна ПГ снижается его активное сопротивление и увеличивается сила тока графитации. Реактивные и активные сопротивления основных элементов КС, по сравнению с изменением активным сопротивлением керна ПГ, практически не изменяются. С ростом тока графитации растет реактивная мощность, поэтому подключаются трансформаторы КУ, к высокой стороне которых подключена емкостная нагрузка. К моменту достижения максимальной мощности активная и реактивная мощности сближаются по абсолютной величине.

В дальнейшем реактивная мощность возрастает, а загруженность КТ в 2 – 3 раза превышает загруженность ПТ. В процессе графитации растут токовые нагрузки КУ и увеличиваются переменные потери в КС и в ЭТКГ в целом (рис. 2).

В последней трети кампании происходит стабилизация активного сопротивления керна ПГ на минимальном уровне. Поэтому, хотя изменения КПД ЭТКГ и коэффициента мощности ПП будут незначительными, потери в системе электроснабжения сохраняются на максимальном уровне даже при снижении активной мощности ЭТКГ и ПГ на 40 – 50 % (рис. 2).

Реализация оптимизированных по методике (4) – (12) ЭРГ и КРМ обеспечивает снижение суммарных потерь в КС, ПТ и КТ на 8 – 16 % на завершающих этапах графитации, а суммарные затраты электроэнергии ТПП сокращаются на 2,5 – 5,2 %.

Выводы. Синтезирован обобщенный критерий оптимальности для ЭТКГ на основе суперпозиции локальных критериев минимума активных электрических потерь в отдельных элементах комплекса и выполнена оптимизация режимов КРМ ЭТКГ методом динамического программирования.

Оптимизация ЭРГ и КРМ ЭТКГ обеспечивает снижение суммарных затрат электроэнергии до 2,5 – 5,2 % или до 7 – 8 МВт·час на кампанию графитации.

Список использованной литературы

1. Кузнецов Д. М. Графитация крупногабаритных электродов. Процесс Ачесона / Д. М. Кузнецов. – Ростов н/Д : РГАСХМ ГОУ. – 2003. – 168 с.
2. Соседов В. П. Графитация углеродистых материалов / В. П. Соседов, Е. Ф. Чалых – М. : Металлургия. 1987 – 187 с.

3. Костенко М. П. Электрические машины. / М. П. Костенко, Л. М. Пиотровский. – [3-е изд.] // Машины постоянного тока. Трансформаторы. – Л. : Энергия, 1972. – Ч. 1. – 544 с.

4. Ярымбаш Д. С. Идентификация температурных зависимостей удельных электрических сопротивлений керна в процессе графитации / Д. С. Ярымбаш // *Электротехника и электромеханика*. – 2014. – № 2. – С. 66 – 70.

5. Ярымбаш Д. С. Исследование электромагнитных и электротепловых процессов в области торцевых шинных пакетов печей графитации / Д. С. Ярымбаш, А. М. Олейников // *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*. – 2013. – № 11. – С. 60 – 68.

6. Ярымбаш Д. С. Численно-полевой анализ электромагнитных и электротепловых процессов в шинных пакетах печей графитации / Д. С. Ярымбаш // *Ползуновский вестник*. – 2013. – № 4 – 2. – С. 216 – 222.

7. Аветисян Д. А. Оптимальное проектирование электрических машин на ЭВМ / Д. А. Аветисян, В. С. Соколов, В. Хан. – М. : Энергия, 1976. – 208 с.

8. Bellman R., and Dreyfus S., (1962), *Applied Dynamic Programming, Princeton: Princeton University Press*, New Jersey, 363 p.

9. Ibaraki T., (1973), Solvable Classes of Discrete Dynamic Programming, *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, No. 43, pp. 642 – 693.

10. 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 КДПУ – Кременчук* : – 2006. – № 3. – С. 53 – 55.

Получено 27.06.2014

References

1. Kuznecov D.M. Grafitatsiya krupnogabaritnykh elektrodov. Protsess Achesona [Graphitization of the Large Electrodes. Acheson Process], (2003), *RGASHM GOU Publ.*, Rostov on Donn, Russian Federation, 168 p. (In Russian).

2. Sosedov V.P., and Chalyh E.F. Grafitatsiya ugle-rodistykh materialov [Graphitization of Carbon Materials], (1987), *Metallurgiya Publ.*, Moscow, Russian Federation, 187 p. (In Russian).

3. Kostenko M.P., and Piotrovsky L.M. Elektricheskie mashiny. Ch.1 Mashiny postoyannogo toka. Transformatory [Electrical Machines.P.1 DC Machine Transformers], (1972), *Jenergiya Publ.*, Leningrad, Russian Federation, 544 p. (In Russian).

4. Yarymbash D.S. Identifikatsiya temperaturnykh zavisimostei udel'nykh elektricheskikh soprotivlenii kerna v protsesse grafitatsii [The Identification of the Temperature Dependence of the SER of the Core during Graphitization Process], (2014), *Jelektrotehnika i Jelektromehanika*, Kharkiv, Ukraine, No. 2, pp.66 – 70 (In Russian).

5. Yarymbash D.S. Issledovanie elektromagnitnykh i elektroteplovnykh protsessov v oblasti tortsevykh shinnykh paketov pechei grafitatsii [Research of Electromagnetic and Electrothermal Processes in bus Packages area of Gra-

phitization Furnace], (2013) *Jenergoberezhnie. Jenergetika. Jenergoaudit*. Kharkiv, Ukraine, No. 11, pp.60 – 68 (In Russian).

6. Yarymbash D.S. Chislennno-polevoi analiz elektromagnitnykh i elektroteplovykh protsessov v shin-nykh paketakh pechei grafitatsii [Numerical-Field Analysis of Electromagnetic and Electrothermal Processes in bus Packages Furnaces of Graphitization], (2013), *Polzunovskij Vestnik*, Barnaul, Russian Federation, No. 4 – 2, pp. 216 – 222 (In Russian).

7. Avetisyan D.A., Sokolov V.S., and Han V.H. Optimal'noe proektirovanie elektricheskikh mashin na EVM [Optimal Design of Electric Machines on the Computer], (1976), *Jenergiya Publ.*, Moscow, Russian Federation, 208 p. (In Russian).

8. Bellman R., and Dreyfus S., (1962), Applied Dynamic Programming, *Princeton: Princeton University Press*, New Jersey, 363 p. (In English).

9. Ibaraki T., (1973), Solvable Classes of Discrete Dynamic Programming, *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, No. 43, pp. 642 – 693 (In English).

10. Yarymbash D.S., Yarymbash S.T., and Tyutyunnik O.V. Osobennosti kontrolya elektricheskikh parametrov, moshchnosti i energopotrebleniya vo vremya kam-panii grafitatsii v pechi peremennogo toka [The Features of the Control of Electrical Parameters, Power and Energy Consumption During the Campaign Graphitization Furnaces AC], (2006), *Visnyk KDPU*, Kremenchuk, Ukraine, No. 3, pp. 53 – 55 (In Russian).



Ярымбаш
Дмитрий Сергеевич,
канд. техн. наук, доц. каф.
электроснабжения промышлен-
ных предприятий Запорожского нац. технич. ун-та,
69063, г. Запорожье,
ул. Жуковского, 64, Украина,
69063,
тел. (066) 965-86-73.
E-mail: yarymbash@gmail.com