

Жученко О.А.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ВУГЛЕГРАФІТОВИМ ВИРОБНИЦТВОМ

Виробництво вуглецевих виробів відіграє важливу роль, оскільки продукція цього виробництва широко використовується в різних визначальних для країни галузях промисловості, технологічні процеси яких нерозривно пов'язані з необхідністю використання електротермічних процесів. Зокрема, до таких виробництв належать підприємства чорної та кольорової металургії, машинобудування, хімічної промисловості та інші.

Виробництво вуглецевих виробів є значною мірою ресурсо- та енергозатратним. Саме тому підвищення ефективності цього виробництва є актуальною науково-практичною проблемою, особливо в сучасних умовах постійного зростання вартості енергоносіїв.

Дотепер питанням підвищення ефективності вуглеграфітового виробництва шляхом створення системи керування ним приділялося не досить уваги.

Метою роботи є розроблення загальної структури системи керування вуглеграфітовим виробництвом, яка б забезпечувала підвищення його ефективності шляхом функціонування основних енергоємних технологічних процесів у режимах ресурсо- та енергозбереження.

Система керування вуглеграфітовим виробництвом, що пропонується, складається з 2-х рівнів. На верхньому рівні розв'язується завдання календарного планування вуглеграфітового виробництва. Завдання верхнього рівня системи керування вуглеграфітового виробництва математично включає в себе критерій оптимальності разом з обмеженнями. Це завдання являє собою завдання цілочисельного нелінійного програмування, яке можна розв'язати відомими методами, використовуючи стандартне програмне забезпечення.

Декомпозиція загального завдання оптимізації вуглеграфітового виробництва показала доцільність використання питомих експлуатаційних затрат як критерію керування на нижньому рівні загальної системи – системи керування окремими технологічними процесами. Сформульовано шляхи забезпечення мінімізації вибраного критерію керування з урахуванням обмежень кожного розглядуваного технологічного процесу.

Ключові слова: вуглеграфітове виробництво, декомпозиція, система керування, календарне планування, критерій оптимальності.

Постановка проблеми. У народному господарстві України виробництво вуглецевих виробів відіграє важливу роль, оскільки продукція цього виробництва широко використовується в різних визначальних для країни галузях промисловості, технологічні процеси яких нерозривно пов'язані з необхідністю використання електротермічних процесів. Зокрема, до таких виробництв належать підприємства чорної та кольорової металургії, машинобудування, хімічної промисловості та інші.

Виробництво вуглецевих виробів є значною мірою ресурсо- та енергозатратним. Саме тому підвищення ефективності цього виробництва є актуальною науково-практичною проблемою, особливо в сучасних умовах постійного зростання вартості енергоносіїв.

Подальше підвищення ефективності вуглеграфітового виробництва пов'язане з оператив-

ним визначенням і реалізацією у реальному часі оптимальних ресурсо- та енергозощаджуючих режимів роботи технологічного обладнання. Це завдання може бути розв'язано тільки шляхом створення вискоєфективних систем керування технологічними процесами цього виробництва на основі їхніх математичних моделей.

Виробництво графітової продукції – складне, багатостадійне та дуже енергоємне. В результаті проведеного у роботі [1] системного аналізу технологічного комплексу вуглеграфітового виробництва як складної динамічної системи визначено технологічні процеси, сумарне споживання енергоресурсів якими фактично визначають енергоспоживання всього виробництва. До таких технологічних процесів віднесено: прожарювання вуглецевих матеріалів у печі шахтного типу, формування вуглецевих виробів, їхнє випалювання та графітування.

Постановка завдання. На жаль, дотепер питанням підвищення ефективності вуглеграфітового виробництва шляхом створення системи керування ним приділялося не досить уваги. Дослідження вітчизняних науковців, представлені у роботах [2–6], спрямовані на пошуки ефективних регламентів технологічних процесів. Роботи [7; 8] присвячені розв’язанню завдань електротехнічного стану печей графітування. У роботах [9; 10] розглядається тільки процес графітування.

Відомі публікації іноземних фахівців ближнього зарубіжжя [11; 12], стосуються або виключно технології вуглеграфітового виробництва, або його окремих технологічних процесів, або навіть окремих питань, які можуть бути пов’язані з цим виробництвом.

Ще гірша ситуація з дослідженнями іноземних науковців дальнього зарубіжжя. Доступні публікації взагалі не розглядають вуглеграфітове

виробництво як таке, а тільки окремі наукові питання, які можна не напряду зв’язати з ним. До таких публікацій можна віднести роботи [13; 14].

Як видно з цього короткого аналізу, наявні сьогодні системи керування основними енергоємними технологічними процесами вуглеграфітового виробництва не відповідають сучасним завданням підвищення ефективності останнього, а, значить, потребують або їхнього вдосконалення або розроблення нових.

Отже, метою статті є розроблення загальної структури системи керування вуглеграфітовим виробництвом, яка б забезпечувала підвищення його ефективності шляхом функціонування основних енергоємних технологічних процесів у режимах ресурсо- та енергозбереження.

Система керування

Система керування вуглеграфітовим виробництвом, що пропонується, складається з 2-х рівнів (рис. 1).

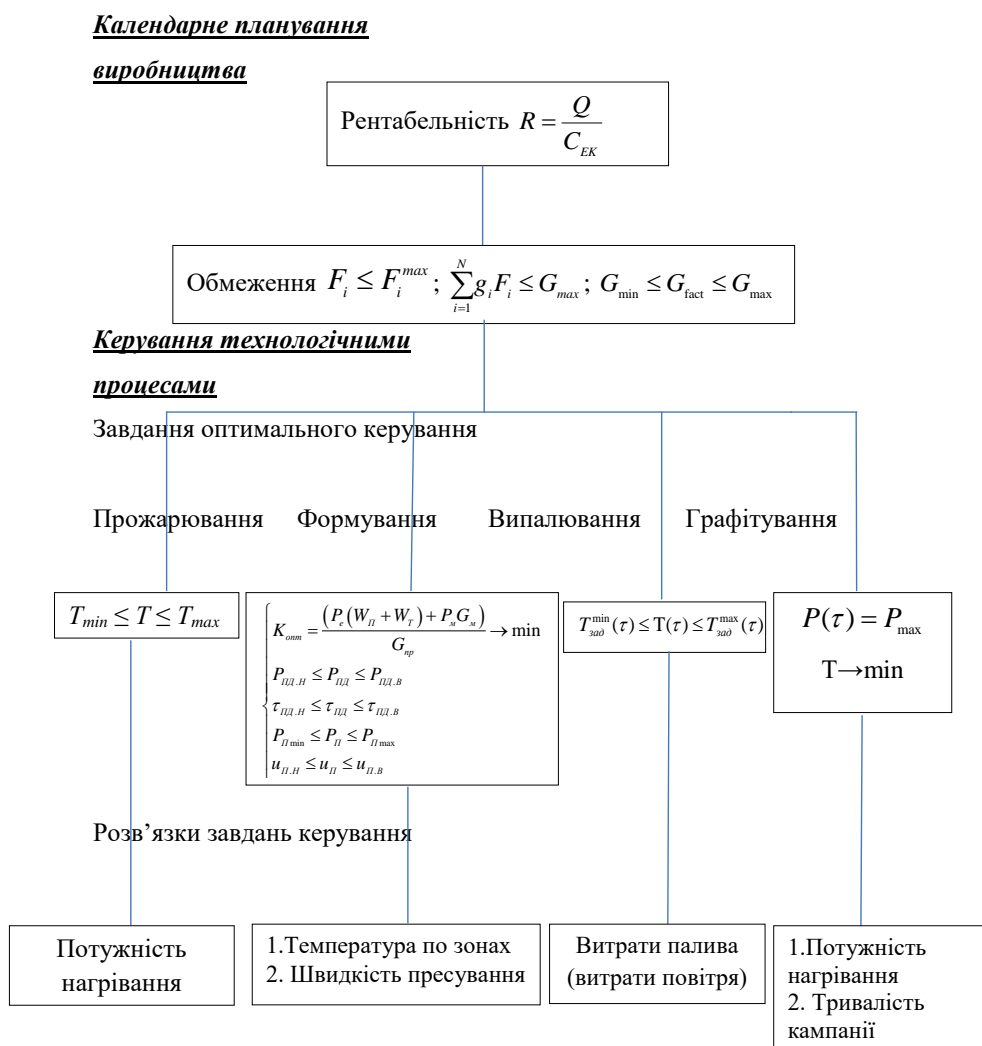


Рис. 1. Структурна схема системи керування вуглеграфітового виробництва

На верхньому рівні розв'язується завдання календарного планування вуглеграфітового виробництва. Для розв'язання поставленого завдання перш за все треба сформулювати загальний критерій оптимальності, на основі якого визначити завдання керування для кожного з розглянутих технологічних процесів.

У роботах [1; 15] проведено аналіз техніко-економічних показників, які можуть бути використані як критерії оптимальності вуглеграфітового виробництва. Як такі розглядалися продуктивність і питома собівартість виробництва, питома собівартість готової продукції, прибуток виробництва. За результатами проведеного аналізу обґрунтовано вибір модифікованого показника рентабельності як критерію оптимальності вуглеграфітового виробництва:

$$R = \frac{Q}{C_{EK}}, \quad (1)$$

де Q – прибуток від реалізації продукції; C_{EK} – вартість експлуатаційних витрат.

Прибуток від реалізації продукції розраховується так:

$$Q = \sum_{i=1}^N a_i F_i - \sum_{j=1}^M b_j S_j - Q_E, \quad (2)$$

де a_i та F_i – ціна одиниці та кількість одиниць i -го виду реалізованої продукції відповідно; b_j та S_j відповідно – ціна одиниці та кількість одиниць j -го виду сировини, що використовується у виробництві; N та M – кількість видів реалізованої продукції та сировини відповідно; Q_E – експлуатаційні витрати на виробництво.

Експлуатаційні витрати C_{EK} визначаються енерго- M та праце- L витратами на ведення технологічних процесів виробництва:

$$C_{EK} = M + L. \quad (3)$$

Енерговитрати на виробництво складаються з енерговитрат на кожну його ділянку:

$$M = \sum_{j=1}^S m_j,$$

де m_j – енерговитрати j -ї ділянки виробництва; S – кількість ділянок виробництва.

Працевитрати на ведення технологічних процесів виробництва визначаються так:

$$L = L_1 + L_2 + L_3,$$

де L_1 – прямі працевитрати, L_2 – цехові витрати (зарплатня цехового персоналу, амортизаційні витрати, утримання виробничих приміщень тощо); L_3 – загальнозаводські витрати (зарплатня загальнозаводського персоналу, утримання заводських лабораторій тощо).

Працевитрати L не залежать від технологічних режимів виробничих процесів і практично є сталою величиною, що дає можливість не враховувати їх у процесі визначення оптимальних режимів роботи.

Собівартість експлуатаційних витрат C_{EK} розраховується за формулою:

$$C_{EK} = \sum_{i=1}^N c_i F_i,$$

де c_i – собівартість одиниці i -го виду продукції.

Значення c_i в умовах виробництва, як правило, не є відомою величиною. Тому у [1; 15] пропонуються методики розрахунку цієї величини.

Під час розв'язання завдання календарного виробництва потрібно враховувати обмеження на змінні, що оптимізуються. На виробництві вуглеграфітових виробів обмеження можуть бути сформульовані по-різному.

Так, обмеження можуть бути виражені щодо кількості кожного виду продукції, що виробляється:

$$F_i \leq F_i^{max}, \quad (4)$$

де F_i^{max} – максимальна продуктивність виробництва i -го виду продукції.

Обмеження, що інтегрує в собі всі види продукції, може бути сформульоване так:

$$\sum_{i=1}^N g_i F_i \leq G_{max}, \quad (5)$$

де g_i – вага i -го виду продукції; G_{max} – максимальна потужність виробництва, виражена в одиницях ваги.

Отже, завдання верхнього рівня системи керування вуглеграфітового виробництва математично включає в себе критерій оптимальності (1) разом з обмеженнями (4) і (5). Це завдання являє собою завдання цілочисельного нелінійного програмування, яке можна розв'язати відомими методами [16; 17], використовуючи стандартне програмне забезпечення [18].

Як показано в [1; 15], це завдання нелінійного програмування також може бути розв'язано у 2 етапи з використанням методів [19; 20] та програмних засобів [18] лінійного програмування.

Крім названих вище обмежень, потрібно враховувати обмеження на якісні показники вуглеграфітових виробів. Ці обмеження в загальному вигляді можуть бути сформульовані так:

$$G_{\min} \leq G_{\text{факт}} \leq G_{\max},$$

де G_{\min} , $G_{\text{факт}}$, G_{\max} – вектори відповідно мінімально допустимих, фактичних і максимально допустимих значень показників якості вуглеграфітових виробів. До складу цих векторів можуть входити [12; 21; 22]: для вуглецевих блоків – густина, пористість, межа міцності на стискання, температурний коефіцієнт лінійного розширення, коефіцієнт теплопровідності; для графітових електродів – об’ємна густина, вміст зольних домішок, питомий електричний опір, термічний коефіцієнт лінійного розширення, межа механічної міцності на вигин, модуль пружності Юнга.

Розв’язання завдання календарного планування вуглеграфітового виробництва повинно відбуватися перед початком чергового календарного періоду. Крім того, потреба в повторному розв’язанні цього завдання може виникнути у разі непланової або аварійної зупинки виробництва, наприклад у разі відключення енергопостачання.

Сформулювавши загальне завдання оптимізації вуглеграфітового виробництва, надалі потрібно виконати декомпозицію цього завдання, сформулювавши завдання керування для нижнього рівня загальної системи керування, тобто поставити завдання для систем керування кожним окремим технологічним процесом, що розглядається.

Для максимізації вибраного загального критерію оптимізації вуглеграфітового виробництва (1) потрібно, з одного боку, збільшувати чисельник, а з іншого – зменшувати знаменник цього виразу. Враховуючи, що ціна продукції визначається поточною ринковою ситуацією і ніяк не залежить від режимів роботи технологічних процесів виробництва, завдання максимізації критерію (1) може бути розв’язане виключно завдяки таким його складникам, як продуктивність та експлуатаційні витрати. Показником, який включає в себе як продуктивність технологічного процесу, так і експлуатаційні витрати на його ведення є питома собівартість. Тому саме цей показник доцільно вибрати як критерій оптимальності кожного з розглядуваних технологічних процесів.

У дослідженнях [1; 15] показано, як завдання мінімізації питомої собівартості технологічного процесу трансформується для кожного з них.

Для процесу прожарювання вуглецевої сировини завдання керування виглядає так:

$$T_{\min} \leq T \leq T_{\max}, \quad (6)$$

де T – поточне значення температури термообробки в характерній точці; T_{\min} , T_{\max} – його мінімально та максимально допустиме значення відповідно.

Для розв’язання завдання (6) потрібно визначити потужність нагрівальних пристроїв, забезпечивши значення температури у межах заданих обмежень. Для процесу прожарювання ці обмеження досить жорсткі [23].

Для процесу формування вуглецевих виробів завдання керування полягає в забезпеченні потрібного температурного режиму в зонах і розрахункової швидкості пресування залежно від режиму роботи [1; 24].

Заданий температурний режим може бути забезпечений системою керування температурою в контрольованих точках, де є технічна можливість встановлення датчиків температури, або всередині вуглецевої маси, використовуючи як датчик температури математичну модель, запропоновану у [1; 25]. Така система керування може бути побудована на стандартних ПІ- або ПІД-регуляторах.

Що стосується швидкості пресування, то, на думку багатьох дослідників [26; 27], вона є ключовою змінною для цього процесу і характеризується нелінійністю та нестационарністю. Враховуючи, що для кожного виду вуглецевої продукції процес формування виробів є фактично циклічним, керування ним доцільно здійснювати, використовуючи метод ітеративного навчання [28].

Для мінімізації питомої собівартості процесу випалювання вуглецевих виробів в умовах забезпечення заданих показників якості виробів після випалювання потрібно жорстко дотримуватись встановленого температурного режиму для кожної стадії процесу випалювання [1; 15; 29], тобто:

$$T_{\text{зад}}^{\min}(\tau) \leq T(\tau) \leq T_{\text{зад}}^{\max}(\tau), \quad (7)$$

де $T_{\text{зад}}^{\min}(\tau)$, $T_{\text{зад}}^{\max}(\tau)$ – вектори заданих мінімальних і максимальних температур; $T(\tau)$ – вектор поточної температури випалювання; τ – поточний час.

Вектор $T(\tau)$ має таку структуру:

$$T(\tau) = \begin{bmatrix} T_1(\tau) \\ T_2(\tau) \\ \dots \\ T_l(\tau) \end{bmatrix},$$

де T_1, T_2, T_i – температури в характерних точках процесу.

Відповідну структуру мають і вектори $T_{зад}^{min}(\tau)$ та $T_{зад}^{max}(\tau)$.

Завдання забезпечення виконання умови (7) не є тривіальним, враховуючи взаємний вплив температур у різних точках і різних камерах процесу випалювання в багатокамерних печах.

Експлуатаційні витрати на процес графітування визначається так [1; 15; 30]:

$$C_{ЕК} = \int_0^T P(\tau) d\tau = \int_0^T I(\tau)U(\tau) d\tau, \quad (8)$$

де T – тривалість процесу графітування; $P(\tau)$, $I(\tau)$, $U(\tau)$ – відповідно потужність, напруга та сила електричного струму залежно від поточного часу τ .

У формулі (8) відсутні такі складники експлуатаційних витрат, як витрати на охолодження печі, витрати на завантаження та розвантаження, у зв'язку з тим, що вони незрівнянно менші за витрати електроенергії безпосередньо на графітування, які входять у формулу (8).

В умовах заданого режиму підведення потужності $P(\tau)$ завдання мінімізації собівартості процесу графітування $C_{ЕК} \rightarrow \min$ рівнозначне завданню мінімізації тривалості кампанії графітування $T \rightarrow \min$.

Отже, для штатного режиму роботи завдання оптимального керування процесом графітування може бути сформульована у вигляді:

$$T \rightarrow \min$$

за обмежень:

$$U_{\min}(\tau) \leq U(\tau) \leq U_{\max},$$

$$I_{\min} I(\tau) \leq I_{\max},$$

$$\beta \geq \beta_{зад},$$

де U_{\min} , U_{\max} – відповідно мінімально та максимально допустимі напруга; I_{\min} та I_{\max} – мінімальна та максимальна сила електричного струму; $\beta_{зад}$ – задане значення ступеня графітування виробів, β – ступінь графітування в характерній точці.

Висновки. У статті запропоновано нову систему керування вуглеграфітовим виробництвом, основною особливістю якої є системний підхід до останнього як до складної динамічної системи.

Система керування складається із двох рівнів. На першому розв'язується завдання календарного планування вуглеграфітового виробництва загалом. Як критерій оптимальності використовується модифікований показник рентабельності виробництва.

Декомпозиція загального завдання оптимізації вуглеграфітового виробництва показала доцільність використання питомих експлуатаційних затрат як критерію керування на нижньому рівні загальної системи – системи керування окремими технологічними процесами. Сформульовано шляхи забезпечення мінімізації вибраного критерію керування з урахуванням обмежень кожного розглядуваного технологічного процесу.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на синтез систем керування окремими технологічними процесами з урахуванням завдань, сформульованих у статті.

Список літератури:

1. Жученко О.А., Коротинський А.П., Хібеба М.Г. Математичне моделювання енергоємних технологічних процесів вуглеграфітового виробництва : монографія. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 344 с. : іл. 300 прим.
2. Теоретичні та експериментальні дослідження теплоелектричного та механічного стану високотемпературних агрегатів : монографія / А.Я. Карвацький, Є.М. Панов, С.В. Кутузов та ін. Київ : НТУУ «КПІ», 2012. 352 с. : іл. Бібліогр.: С. 328–347. 300 пр.
3. Обжиг и пуск алюминиевых электролизеров : монография / Б.С. Громов, Е.Н. Панов, М.Ф. Боженко и др. Москва : Изд. дом «Руда и металлы», 2001. 336 с.
4. Моделювання графітування нафтового коксу в шахтній електропечі неперервної дії / Є.М. Панов, А.Я. Карвацький, С.В. Кутузов, С.В. Лелека та ін. *Вісник НТУУ «КПІ». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження* : зб. наук. праць. 2011. №1 (7). С. 48–52.
5. Закономірності процесу високотемпературного оброблення сипучих вуглецевих матеріалів в електричних печах : монографія / Т.В. Лазарев та інші ; МОН України, НТУУ «КПІ». Київ : НТУУ «КПІ», 2016. 153 с.
6. Лелека С.В. Теплоэлектрическое состояние печей графитирования Ачесона : монография ; Министерство образования и науки Украины, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт». Киев : НТУУ «КПІ», 2014. 237 с.
7. Ярымбаш Д.С. Анализ электромагнитных и термоэлектрических процессов в печах Ачесона. *Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит*, Харків, 2014. № 6. С. 11–21.

8. Яримбаш Д.С. Системи живлення та режими потужних технологічних комплексів електропечей опору прямого нагріву : дис. ... докт. техн. наук : 05.09.03. Кременчук, 2015.
9. Коржик М.В., Кутузов С.В. Модель температурного поля печі гравітації. *Наукові вісти НТУУ «КПІ»*. 2007. № 1. С. 17–23.
10. Коржик М.В. Математичне моделювання та автоматизоване керування процесом гравітації в печах Ачесона : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.07 – «Автоматизація процесів керування». Київ, 2010.
11. Чалых Е.Ф. Обжиг электродов. Москва : Металлургия, 1981. 116 с.
12. Производство электродной продукции / А.К. Санников, А.Б. Сомов, В.В. Ключников и др. Москва : Металлургия, 1985. 129 с. Библиогр. : 21 назв.
13. Торнер Р.В. Теоретические основы переработки полимеров. Москва : Химия, 1977. 464 с.
14. Раувендаль К. Экструзия полимеров. Санкт-Петербург : Профессия, 2006. 768 с.
15. Zhuchenko O.A. Statement of the optimization problem of carbon products production. *Міжнародний науково-виробничий журнал «Автоматизація технологічних і бізнес-процесів»*. 2016. Vol. 8. Issue 2/2016. С. 39–43.
16. Vox George E.P., Jenkins Gwilym M. Time series analysis, forecasting and control. Holden-day, Inc., 1976.
17. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления: оценивание параметров и состояния. Москва : Мир, 1975. 683 с.
18. Gilat, Amos (2004). MATLAB: An Introduction with Applications 2nd Edition. John Wiley & Sons. ISBN 978-0-471-69420-5.
19. Bertsekas, Dimitri P. (1999). Nonlinear Programming (Second ed.). Cambridge, MA. : Athena Scientific. ISBN 1-886529-00-0.
20. Ruszczyński, Andrzej (2006). Nonlinear Optimization. Princeton, NJ : Princeton University Press. pp. xii+454. ISBN 978-0691119151.
21. Чалых Е.Ф. Технология и оборудование электродных и электроугольных предприятий. Москва : Металлургия, 1972. 432 с.
22. ДСТУ 4494:2005 Електроди зграфітовані та ніпелі до них. Загальні технічні умови. Зі зміною № 1 (ІЕС 60239:1997, NEQ).
23. Жученко О.А., Хібеба О.А. Постановка задачі керування електрокальцином у виробництві вуглецевих виробів. *Вісник приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2017. №34. С. 148–154.
24. Жученко О.А., Хібеба О.А. Постановка задачі керування процесом формування у виробництві вуглецевих виробів. *Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник «Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин»*. 2017. № 47. Ч. 2. Кропивницький : ЦНТУ. С. 81–88.
25. Жученко О.А., Хібеба О.А. Розробка спрощеної математичної моделі процесу формування вуглецевих виробів. *Технологічний аудит та резерви виробництва*. 2016. № 5/3(31). С. 16–22.
26. Rolling friction in the dynamic simulation of sandpile formation / Y.C. Zhou, B.D. Wright, R.Y. Yang, B.H. Xu, A.B. Yu // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 1999. № 269 (2-4). P. 536–553.
27. Mitsoulis, E. Flows of Viscoplastic Materials: Models and Computations. *Rheology Reviews*. 2007. P. 135–178.
28. Moore, K.L. Iterative Learning Control: An Expository Overview. *Applied and Computational Control, Signals, and Circuits*. Vol. 1. No. 1. 1999. P. 151–214.
29. Жученко О.А., Коротинський А.П. Постановка задачі керування процесом випалювання у виробництві вуглецевих виробів. *Гірничий вісник. Науково-технічний збірник. ДВНЗ «Криворізький національний університет»*. 2017. № 102. С. 174–179.
30. Жученко О.А., Цапар В.С. Постановка задачі оптимального керування процесом графітування вуглецевих виробів. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія : Технічні науки*. 2018. Т. 29 (68). № 2. С. 121–127.

Zhuchenko O.A. CONTROL SYSTEM OF CARBON PRODUCTION

The production of carbon products plays an important role, since the production of this production is widely used in various country-specific industries, the technological processes of which are inextricably linked to the need to use electrothermal processes. In particular, such industries include enterprises of ferrous and non-ferrous metallurgy, mechanical engineering, chemical industry and others.

The production of carbon products is largely resource- and energy-intensive. That is why improving the efficiency of this production is an urgent scientific and practical problem, especially in the current conditions of constant growth of energy costs.

Until now, the issue of improving the efficiency of carbon graphite production by creating a management system has received little attention.

The purpose of this work is to develop a general structure of the control system for coal production, which would ensure its efficiency through the operation of basic energy-intensive technological processes in the modes of resource and energy saving.

The offered carbon management system is offered in 2 levels. At the top level, the task of scheduling carbon production is solved. The task of top-level management of carbon production graphically includes the optimality criterion, together with the constraints. This task is a nonlinear integer programming problem that can be solved using known methods using standard software.

Decomposition of the overall task of optimizing carbon production has shown the feasibility of using unit operating costs as a criterion for control at the lower level of the overall system - the control system of individual technological processes. Ways of minimizing the selected control criterion are formulated, taking into account the limitations of each technological process under consideration.

Key words: *carbon production, decomposition, control system, scheduling, optimality criterion.*