

ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ ПЕРЕМІЩЕННЯ ЕЛЕКТРОДІВ ДУГОВОЇ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЇ ПЕЧІ З НЕЧІТКИМ РЕГУЛЯТОРОМ

А.О.Лозинський, докт.техн.наук, **Я.С.Паранчук**, докт.техн.наук, **Л.І.Демків**, канд.фіз.-мат.наук
Національний університет “Львівська політехніка”,
вул. С.Бандери, 12, Львів, 79013, Україна, e-mail: yparanchuk@yahoo.com

Для системи переміщення електрода дугової сталеплавильної печі проаналізовано вплив нелінійностей на показники її функціонування та синтезовано нечіткий регулятор, який забезпечує швидкий вихід системи на установлений режим при відсутності коливань вихідної координати системи. Для компенсації збурень використано формування керуючого впливу на основі відхилення напруги дуги від заданого значення. Проведено порівняльний аналіз отриманих результатів з традиційними підходами. Бібл. 10, рис. 7.

Ключові слова: електродинамічна система, система автоматичного керування, дугова сталеплавильна піч, нечітка логіка, нечіткий регулятор.

Вступ. Сучасні дугові сталеплавильні печі (ДСП) є потужними споживачами електроенергії зі складним автоматизованим процесом виробництва. Для зростання продуктивності та підвищення енергетичної ефективності сталеплавильних агрегатів реалізується загальна концепція створення нових та модернізації існуючих сталеплавильних комплексів на основі удосконалення системи автоматичного керування (САК) режимами плавлення.

Ієрархічний принцип побудови САК технологічними процесами ДСП передбачає наявність локальних систем керування, зокрема, системи переміщення електродів. Від якості роботи цієї системи значною мірою залежать електричні та техніко-економічні показники функціонування ДСП. Однією з основних вимог до такої системи є її висока швидкодія, що дає змогу не тільки рівномірніше вводити задану потужність у пічний простір, але й швидко відновити роботу печі в заданій точці при дії збурень, зокрема, у разі виникнення технологічного короткого замикання (КЗ) чи обриву дуги. Серед недоліків існуючих систем регулювання положення електродів можна виділити збільшення коливальності вихідної координати системи – довжини дуги – при підвищенні швидкодії системи, що спричинює збільшення дисперсії потужностей дуг та виникнення недопустимих зусиль в елементах кінематичної схеми під час запалювання дуг. Ефективна робота САК переміщення електродів в режимах значних переміщень під час різних технологічних операцій забезпечує підвищення техніко-економічних показників ДСП.

Дослідженню таких систем присвячено багато робіт як українських, так і закордонних науковців. Зокрема, в [4] досліджено теоретичні засади багатокритеріального керування режимами ДСП, у [7] проведено аналіз одно- та двомасових систем переміщення електродів електродугових печей з урахуванням дії дисипативних сил. В [6] запропоновано ієрархічну структуру системи оптимального керування режимами плавлення в ДСП за комплексним критерієм продуктивності та модель адаптації такого керування на основі системи нечіткого виводу. В роботі [2] обґрунтовано стратегію вдосконалення систем регулювання потужності дуг ДСП на основі методів нечіткого керування та опрацьовано структуру електромеханічної системи регулювання потужності дуг з нечіткою корекцією. Також там спроектовано нечіткий регулятор та запропоновано модель формування сигналу керування. В роботі [10] запропоновано застосувати нечітку систему керування на базі генетичних алгоритмів, яка контролює процес введення енергії в трифазних електричних печах, та синтезовано нечіткий ПІ-регулятор, розроблений із застосуванням генетичних алгоритмів. Завдяки використанню цих рішень підвищується динамічна точність стабілізації довжини дуги на заданому рівні. Однак ці результати одержано для ДСП з гідравлічним приводом, котрі, як зазначено в [7], мають низку недоліків у порівнянні з ДСП з електромеханічним приводом на основі тиристорного перетворювача напруги.

У даній роботі для забезпечення високої швидкодії системи керування переміщенням електродів та зменшення коливальності пропонується застосувати підхід до синтезу нечіткого регулятора, описаний в роботах [1–3], а саме, розбивши траєкторію на ділянки, що відповідають областям лінгвістичних змінних, для кожної з яких методами класичної теорії керування формується керуючий вплив, що забезпечує певний критерій оптимальності.

Постановка задачі. Реалізувати неперервний експлуатаційний контроль довжини дуг є технологічно неможливо. Тому САК будують на основі поточного вимірювання координат режиму плавлення (електричних, механічних), які фізично пов'язані (тісно корельовані) з довжинами дуг. Зокре-

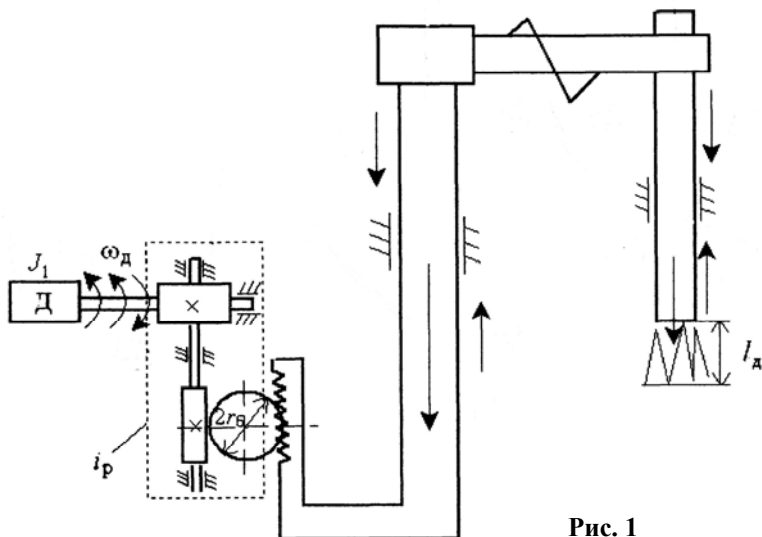


Рис. 1

ма, у сучасних ДСП використовуються САК переміщення електродів, які побудовані за імпедансним принципом [5, 7]. В них реалізують закон керування на основі сигналу розузгодження $\Delta_p = aI - bU$, де a, b – постійні коефіцієнти, що визначають усталене значення довжини дуги, котру має забезпечити САК в режимі стабілізації положення електрода; I, U – струм та напруга дуги. Залежність $I_0(l_0)$ є нелінійною функцією. Використання лінеаризованої моделі дуги при синтезі системи керування дає змогу отримати оптимальну динаміку системи

в околі робочої точки. У режимах значних відхилень адекватність лінеаризованої моделі та ефективність її використання при синтезі системи керування значно знижується, що у подальшому впливає на характеристики та показники роботи дугової печі у цілому.

Традиційно механізм переміщення електродів (рис. 1, див. [7]) зображають нелінійною одномасовою системою (рис. 2), де керуюча дія на переміщення електродів формується на основі збурення за довжиною дуги [7].

Лінеаризована математична модель такої системи може бути представлена системою рівнянь виду

$$\begin{cases} pU_{БП}(p) = (K_{БП}(aI_0(l_0) - bU_0(l_0)) - U_{БП}(p))/T_1; \\ pE_{ТП}(p) = (K_{ТП}(U_{БП}(p) - \omega_0(p)K_{ДШ}) - E_{ТП}(p))/T_{ТП}; \\ pI_я(p) = T_я^{-1}(R_я^{-1}(E_{ТП}(p) - c\omega_0(p)) - I_я(p)); \quad p\omega_0(p) = J_1^{-1}(cI_я(p) - M_c); \\ pl_e(p) = \omega_0(p)r_0/i_p; \quad I_0 = f(l_0); \quad U_0 = \alpha + \beta \cdot l_0; \quad l_0 = l_e(p) \pm l_{з0}, \end{cases} \quad (1)$$

де $U_{БП}(p)$ – напруга на виході блока порівняння; $E_{ТП}(p)$ – ЕРС тиристорного перетворювача (ТП); $I_я(p)$ – струм якоря двигуна; $\omega_0(p)$ – кутова швидкість обертання двигуна; $l_e(p)$ – положення електрода; $l_{з0}$ – збурення за довжиною дуги; T_1 – стала часу блока порівняння; $K_{БП}$ – коефіцієнт підсилення блока порівняння; $T_я$ – стала часу якійного кола; $R_я$ – опір якійного кола двигуна; $T_{ТП}$ – стала часу ТП; $K_{ТП}$ – коефіцієнт підсилення ТП; c – конструктивна стала двигуна; J_1 – момент інерції; r_0 – радіус барабана; i_p – передавальне число редуктора; α, β – колоелектродний спад напруги та градієнт напруги на стовпі дуги l відповідно.

У роботі [8] запропоновано для компенсації збурень використовувати закон керування на

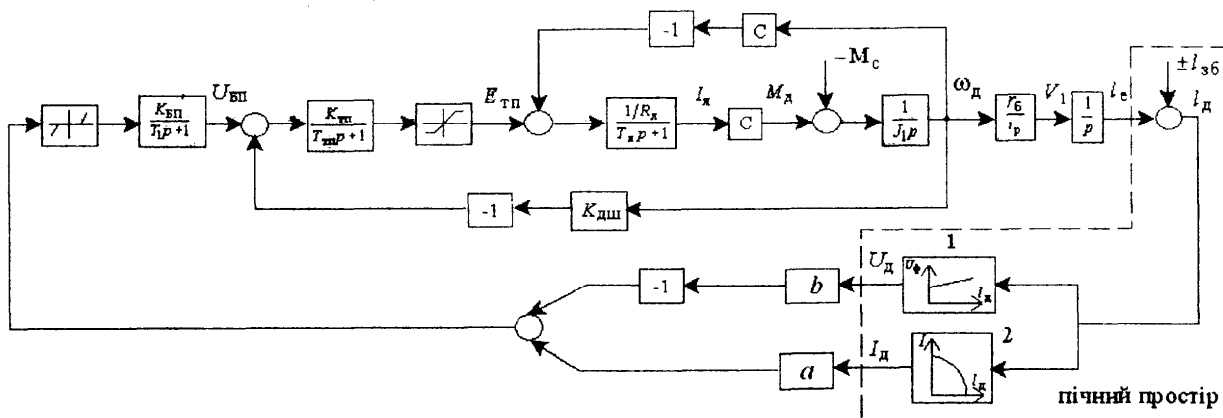


Рис. 2

основі відхилення напруги дуги від заданого значення $\Delta = (U_{o\text{зад}} - U_o)k$, де k – коефіцієнт підсилення регулятора напруги дуги. Це дозволяє уникнути нелінійної залежності $I_o(l_o)$ в моделі формування сигналу керування та переміщення електрода.

Синтез нечіткого регулятора буде проводитися на основі математичної моделі системи (1).

Результати досліджень. Окреме застосування синтезованих з використанням лінійної моделі коефіцієнтів не забезпечує бажаної динаміки зміни координат системи, зокрема, швидкодії.

Для синтезу нечіткого регулятора траєкторія руху системи розбивається на дві зони: великих і малих відхилень довжини дуги від заданого значення. Лінгвістичні змінні для цих зон мають функції належності S -типу та Z -типу. В зоні малих відхилень для уникнення перерегулювань запропоновано використовувати регулятор, який надає мінімального значення функціоналу

$$F_{\text{оін}}^*(\bar{x}(t)) = x^2(t) + 3\omega_0^{-2}\dot{x}(t) + 3\omega_0^{-4}\ddot{x}(t) + \omega_0^{-6}\ddot{\ddot{x}}(t),$$

а для зони великих відхилень з метою підвищення швидкодії системи синтезовано керуючий вплив,

$$F_1^*(\bar{x}(t)) = x^2(t) + \omega_0^{-6}\ddot{\ddot{x}}(t).$$

що забезпечує мінімум функціоналу

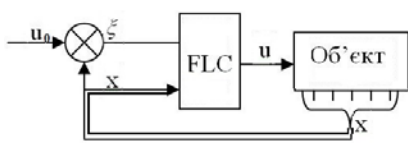


Рис. 3

Застосування такого поділу на зони дає змогу уникнути громіздких баз правил (див. [9]) і не вимагає фазифікації усіх змінних, з яких формується керуючий вплив (рис. 3).

Застосування ξ -ідентифікатора стану, на основі якого формується керуючий вплив, дає змогу уникнути громіздкості в базі правил, оскільки змінні x не фазифікуються.

Точка перетину функцій належності визначається шляхом мінімізації узагальненого функціоналу

$$J = \int_0^{\infty} (\lambda_1(t)F_1^*(\bar{x}(t)) + \lambda_2(t)F_2^*(\bar{x}(t)) + r(x \cdot \text{sign}(x))) dt, \quad \lambda_1(t) + \lambda_2(t) = 1,$$

де $r(\cdot)$ – функція покарання за перерегулювання.

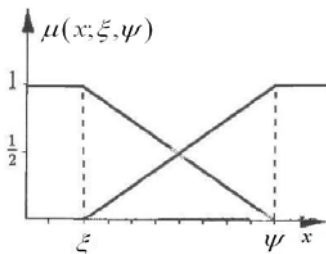


Рис. 4

Для дефазифікації використано спрощений гравітаційний метод. В результаті проведених досліджень вигляд функції належності представлено на рис. 4. Тут ξ та ψ – параметри функції належності, що визначають точку переключення та ширину вікна перемикавання.

Матриці K_i нечіткого регулятора пропонується синтезувати за допомогою класичної теорії керування за повним вектором стану, а перемикавання здійснювати за допомогою обраних функцій належності. За такого підходу траєкторія руху електрода складатиметься з ділянок траєкторій, які формуються окремими підсистемами. Варто також зазначити, що можливою є і комбінація підсистем системи з різними значеннями середньгеометричного кореня ω_0 .

Тестування синтезованих систем керування проведемо на моделі, в якій враховано нелінійність тиристорного перетворювача, зону нечутливості, які властиві системі керування переміщенням електродів ДСП (рис. 5).

На рис. 6 показано зміну положення електрода в часі у випадку імпедансного регулятора (рис. 6, а) та у випадку використання запропонованого регулятора (рис. 6, б) при $\omega_0 = 50$. Аналіз залежностей на рис. 6 дає змогу стверджувати,

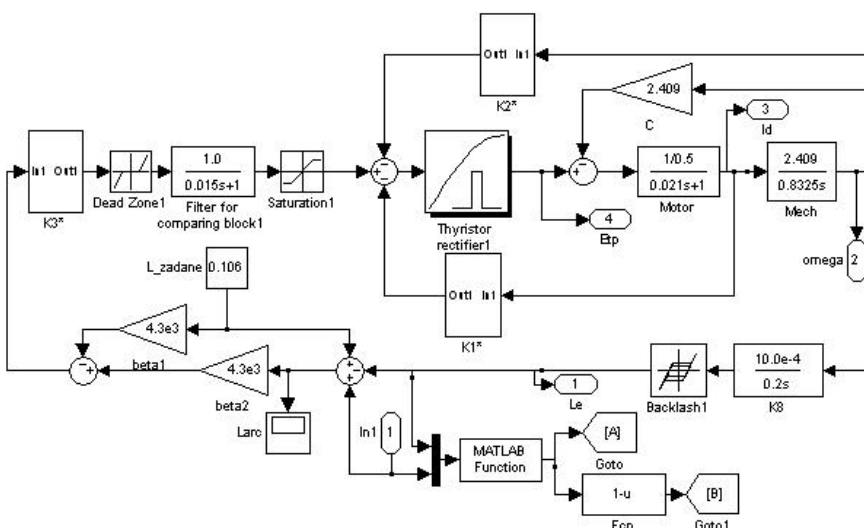


Рис. 5

що при запропонованому підході (у порівнянні з системою з імпедансним регулятором) забезпечується швидший вихід на заданий рівень функціонування системи (0,8 с проти 1,2 с) за відсутності перерегулювання.

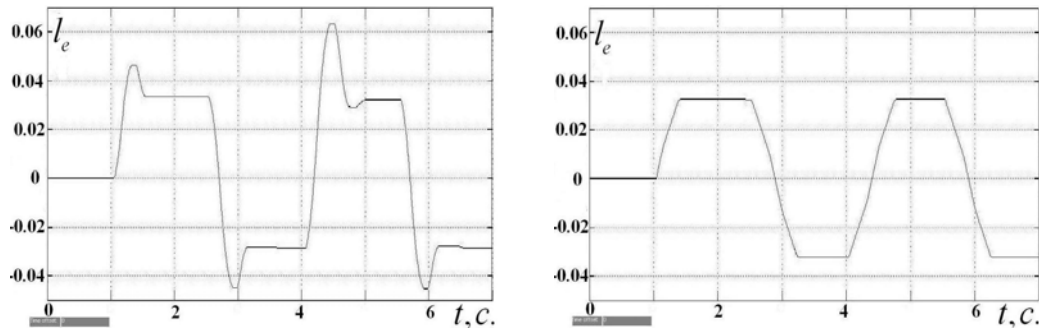


Рис. 6, а, б

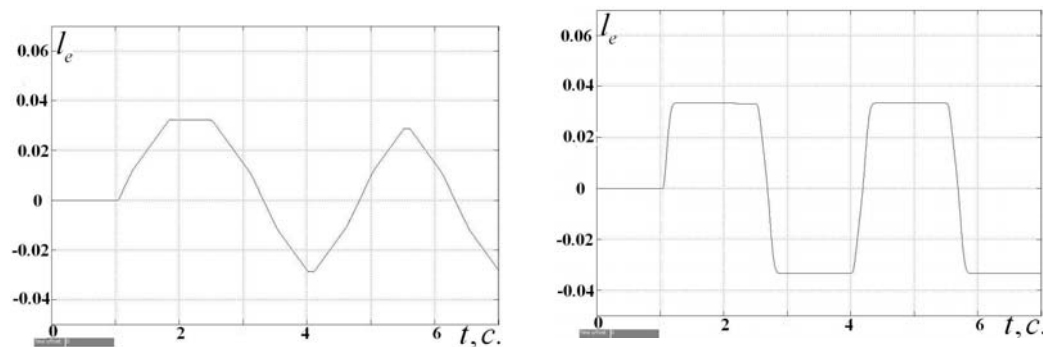


Рис. 7, а, б

значення струму якоря двигуна. Зокрема, при $\omega_0 = 75$ $I_a = 194$ А, при $\omega_0 = 50$ $I_a = 263$ А, а при $\omega_0 = 30$ $I_a = 355$ А.

Висновки. Аналіз результатів виконаних досліджень (рис. 6 та рис. 7) дає змогу стверджувати, що запропонований підхід до побудови системи забезпечує відпрацювання збурень різної величини з необхідною швидкістю і без перерегулювання. При цьому проміжні координати системи перебувають у допустимих межах і САК є фізично реалізованою. Поряд з цим необхідно зазначити, що використання лінеаризованої в окремій точці простору станів системи для синтезу керуючих впливів не дає змоги класичними методами синтезувати оптимальне керування на повному діапазоні зміни координат і збурень САК.

1. Демків Л.І. Дослідження впливу параметрів функції належності на якісні показники функціонування системи з двома коренями в правій півплощині // Вісник НУ "Львівська політехніка". – 2012. – № 736. – С. 36–43.

2. Лозинський А.О., Демків Л.І. Синтез багатокритеріального оптимального керування зі змінними ваговими коефіцієнтами // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2012. – № 1. – С. 144–147.

3. Лозинський А.О., Демків Л.І. Дослідження впливу вигляду функції належності на динамічні показники системи при багатокритеріальній оптимізації зі змінними ваговими коефіцієнтами // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2012. – № 5. – С. 137–144.

4. Лозинський О.Ю., Паранчук Я.С., Лозинський А.О., Марущак Я.Ю., Паранчук Р.Я. Багатокритеріальне оптимальне керування режимами плавлення в дугових сталеплавильних печах. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2010. – 208 с.

5. Лозинський О.Ю., Паранчук Я.С., Мороз В.І., Паранчук Р.Я. Дослідження режимів електромеханічної системи регулювання потужності дуг дугової сталеплавильної печі з нечітким паралельним коректором // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2012. – Т. 3. – С. 524–525.

6. Лозинський О.Ю., Паранчук Я.С., Мороз В.І., Паранчук Р.Я., Андріяс І.А., Нечай О.М. Система оптимального керування режимами плавлення в дугових печах за комплексним критерієм продуктивності // Енергетика та електротехніка: Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – № 2. – С. 119–123.

На рис. 6 I_e – переміщення електрода за дії детермінованих збурень за довжиною дуги і зрівноваженої механічної системи ($M_c \cong 0$).

Досліджено динаміку запропонованої системи при різних значеннях середньгеометричного кореня $\omega_0 = 75; 50; 30$ (рис. 7, а, б та рис. 7, б). При зменшенні середньгеометричного кореня зменшується час виходу на заданий рівень функціонування, однак збільшується

7. Марущак Я.Ю., Лозинський О.Ю., Кушнір А.П. Динаміка двомасових систем стабілізації режиму в електродугових печах. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. – 224 с.

8. Паранчук Я.С. Дослідження законів регулювання довжини дуги у двоконтурній системі керування режимами дугової сталеплавильної печі // Вісник Технологічного університету Поділля. – 2002. – Т. 1(44). – № 33. – С. 173–177.

9. Alejandro Aceves-Lopes, Joseph Aguilar-Martin. A simplified version of Mamdani's fuzzy controller: the natural logic controller // IEEE Transactions on fuzzy systems. – 2006. – Vol. 14. – No. 1. – Pp. 16–30.

10. Mahmood Moghadasian, Emad Alenasser. Modelling and artificial intelligence-based control of electrode system for an electric arc furnace // J.Electromagnetic Analysis & Applications. – 2011. – No. 3. – Pp. 47–55.

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОДОВ ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ С НЕЧЕТКИМ РЕГУЛЯТОРОМ

А.О.Лозинский, докт.техн.наук, Я.С.Паранчук, докт.техн.наук, Л.И.Дэмкив, канд.физ-мат.наук

Национальный университет "Львовская политехника",

ул. С.Бандеры, 12, Львов, 79013, Украина, e-mail: yparanchuk@yahoo.com

Для системы перемещения электродов ДСП проанализировано влияние нелинейностей на функционирование системы и синтезирован нечеткий регулятор, который обеспечивает быстрый выход системы на установившийся режим при отсутствии колебаний выходной координаты системы. Для компенсации возмущений предложено использовать закон управления на основе отклонения напряжения дуги от заданного значения. Проведен сравнительный анализ полученных результатов с традиционными подходами. Библ. 10, рис. 7.

Ключевые слова: электродинамическая система, система автоматического управления, дуговая сталеплавильная печь, нечеткая логика, нечеткий регулятор.

INVESTIGATION OF THE ELECTRODES MOVEMENT SYSTEM OF ARC FURNACE FUZZY CONTROLLER

A.O.Lozynskyi, Ja.S.Paranchuk, L.I.Demkiv

National University "Lviv Polytechnic",

str. S. Bandera, 12, Lviv, 79013, Ukraine, e-mail: yparanchuk@yahoo.com

For electrodes movement system of arc furnace impact of nonlinearities on the system is analyzed. Fuzzy controller, which provides a quick pass of the system to steady state at the absence of fluctuations in the output system's coordinate, is synthesized. To reduce a complexity of the rule base, a natural fuzzy controller is used. To synthesis the fuzzy controller system's motion trajectory is divided into two zones: large and small deviations of arc length from initial value. Corresponding linguistic variables have membership function of S-type and Z-type respectively. To compensate the perturbation a control law based on arc voltage deviation from the set value is suggested. It is shown that the use of system which is linearized in the single point of space of state for the synthesis of control actions does not allow classical methods of synthesizing the optimal control for the full range of coordinate changes and disturbances of ASC. The approach to system construction which provides disturbances of various sizes rejection with the necessary speed and without overshoot is proposed. At this, intermediate system's coordinates are within acceptable limits and ACS is physically realized. References 10, figures 7.

Key words: electrodynamic system, automatic control system, arc furnace, fuzzy logic, fuzzy controller.

1. Demkiv L. The influence of parameters of membership function for quality performance of the system with two roots in the right half-plane // Visnyk Natsionalnoho Universytetu "Lvivska politekhnik". – 2012. – № 736. – Pp. 36–43. (Ukr)

2. Lozynskyi A., Demkiv L. Synthesis of multicriterion optimal control with variable weights // Radioelektronika, informatyka, upravlinnia. – 2012. – № 1. – Pp. 144–147. (Ukr)

3. Lozynskyi A., Demkiv L. Investigation of a membership function influence on dynamic performance of the system in multiobjective optimization with variable weights // Elektrotekhnichni ta kompiuterni systemy. – 2012. – № 5. – Pp. 137–144. (Ukr)

4. Lozynskyi O., Paranchuk Ja., Lozynskyi A., Marushchak Ya., Paranchuk R. Multiobjective optimal control regimes of melting in arc furnaces. – Lviv: Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniky, 2010. – 208 p. (Ukr)

5. Lozynskyi O., Paranchuk Ja., Moroz V., Paranchuk R. Arcs power control mode of electromechanical system of arc furnace with fuzzy parallel proofreader investigation // Elektromekhanichni i enerhozberihaiuchi systemy. – 2012. – Vol. 3. – Pp. 524–525. (Ukr)

6. Lozynskyi O., Paranchuk Ja., Moroz V., Paranchuk R., Andriyas I., Nechai A. Optimal control system modes in arc melting furnaces in integrated performance criterion // Enerhetyka ta elektrotekhnika: Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu. – 2012. – № 2. – Pp. 119–123. (Ukr)

7. Marushchak Ya.Yu., Lozynskyi A., Kushnir A.P. Dynamics of two-mass mode stabilization systems in electric arc furnaces. – Lviv: Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniky, 2011. – 224 p. (Ukr)

8. Paranchuk Ja.S. Research of the laws which control the length of the arc in the two-contour arc furnace system // Visnyk Tekhnolohichnoho universytetu Podillia. – 2002. – Vol.1(44). – No.33. – Pp.173–177. (Ukr)

9. Alejandro Aceves-Lopes., Joseph Aguilar-Martin. A simplified version of Mamdani's fuzzy controller: the natural logic controller // IEEE Transactions on fuzzy systems. – 2006. – Vol. 14. – No. 1. – Pp. 16–30.

10. Mahmood Moghadasian, Emad Alenasser. Modelling and artificial intelligence-based control of electrode system for an electric arc furnace // J.Electromagnetic Analysis & Applications. – 2011. – No. 3. – Pp. 47–55.

Надійшла 05.02.2013

Остаточний варіант 15.07.2013