

УДК 681.51, 621.365, 255:29.1

О.Ю. ЛОЗИНСЬКИЙ (д-р техн. наук, проф.), **Я. С. ПАРАНЧУК** (д-р техн. наук, проф.),
А.Б.МАЦИГІН

Національний університет «Львівська політехніка»

lozynsky@polynet.lviv.ua yparanchuk@yahoo.com Matsygin@ukr.net

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕГУЛЯТОРА ПОТУЖНОСТІ ДУГ ДУГОВОЇ ПЕЧІ З НЕЙРОРЕГУЛЯТОРОМ MODEL REFERENCE CONTROLLER

Розроблено структуру системи регулювання потужності дуг дугової сталеплавильної печі на основі нейрорегулятора Model Reference Controller. Опрацьовано структурну схему та цифрову Simulink-модель нейромережевої системи регулювання потужності дуг, запропоновано методику параметричного синтезу нейрорегулятора та проведено моделювання динаміки регулювання координат електричного режиму. Отримані результати підтвердили поліпшення показників якості динаміки за використання розробленої нейромережевої системи у порівнянні з типовим регулятором потужності дуг типу АРДМ-Т.

Ключові слова: дугова сталеплавильна піч, регулятор потужності дуг, нейрорегулятор, комп'ютерна модель, стабілізація, дисперсія, перерегулювання.

Актуальність роботи. Електрометалургійна галузь України відноситься до базових і приносить вагому частку валютних надходжень у бюджет. Водночас електрометалургійне виробництво є одним з найбільш енергоємних. Причиною цього є низькоефективні за показниками динаміки існуючі на більшості електрометалургійних заводів та підприємств зі сталеплавильним виробництвом електромеханічні системи регулювання довжин дуг (регулятори потужності дуг) дугових сталеплавильних печей (ДСП). Важливою і актуальною задачею для таких виробництв є розроблення комплексних системних, схемних та алгоритмічних рішень, що скеровані на створення нових високоефективних за показниками динаміки та енергоефективності систем автоматичного регулювання потужності дуг, які найдоцільніше було б реалізувати у процесі модернізації існуючих і за незначних капіталовкладень, а також і при проектуванні нових регуляторів потужності дуг. Тому проблема комплексного поліпшення показників електротехнологічної ефективності плавлення сталей в дугових сталеплавильних печах шляхом удосконалення систем регулювання координат електричного режиму (ЕР) є важливою та актуальною для електрометалургійної галузі України.

Аналіз відомих рішень. Для підвищення динамічної точності стабілізації струмів дуг в [1] обґрунтовано доцільність використання в структурі електромеханічної системи переміщення електродів ДСП нечіткого паралельного коректора. У роботі [2] для поліпшення показників динаміки регулювання координат ЕР розроблено нейромережеву систему ідентифікації параметрів елементів короткої мережі дугової печі та підвищення на основі цього точності експлуатаційного контролю напруг дуг – координати, за якою формується сигнал керування на переміщення електроду. Для підвищення динамічної точності регулювання потужності дуг в [3] опрацьовано двоконтурну систему оптимальної стабілізації координат електричного режиму на основі нейронної мережі.

Мета дослідження. Сучасні методи теорії керування, зокрема, feedback-лінеаризація, робастне керування досить важко застосовувати до таких складних об'єктів як ДСП. Це пояснюється як складністю математичних моделей, які описують режими зміни координат ЕР ДСП, так і складністю самої процедури синтезу керуючого впливу. Як показали дослідження, ефективним напрямком вирішування окресленої вище задачі є використання інтелектуальних методів керування, регулювання та ідентифікації, бо об'єкт керування є у системному плані надто складним, характеризується динамічним нестационарним характером навантаження і відсутністю точних математичних моделей режимів, необхідних для синтезу керування. Тому у даному дослідженні пропонується дослідити ефективність використання в прямому каналі системи регулювання потужності дуг (положення електродів) нейрорегулятора Model Reference Controller та порівняти отримані при цьому показники динаміки регулювання координат електричного режиму з відповідними показниками типового електромеханічного регулятора потужності дуг типу АРДМ-Т.

Результати досліджень. Основним завданням системи переміщення електроду є надійне запалювання дуг і підтримання їх довжин на заданому рівні з мінімальною динамічною і статичною похибкою. Структура типового електромеханічного регулятора потужності дуг ДСП типу АРДМ-Т функціонує на основі електроприводу переміщення електродів (ППЕ), що зібраний за схемою “тиристорний перетворювач – двигун постійного струму” (ТП-Д) з формуючими від'ємними зворотними зв'язками за струмом та напругою (швидкістю) двигуна, а механізм переміщення електроду (МПЕ) є типу “шестерня - рейка” з черв'ячним редуктором (рис.1). Механічна конструкція для передавання руху від шестерні до електроду має обмежену жорсткість, що є причиною вільних коливань електроду за трьома осями. Ці коливання є додатковим джерелом збурень за довжиною дуги у процесі її регулювання. Пружні властивості цієї конструкції на функціональній схемі регулятора рис.1 еквівалентуються коливною ланкою другого порядку. Кінематична схема механізму переміщення електроду є близькою до зрівноваженої.

© Лозинський О.Ю., Паранчук Я.С., Мацігін А.Б., 2013

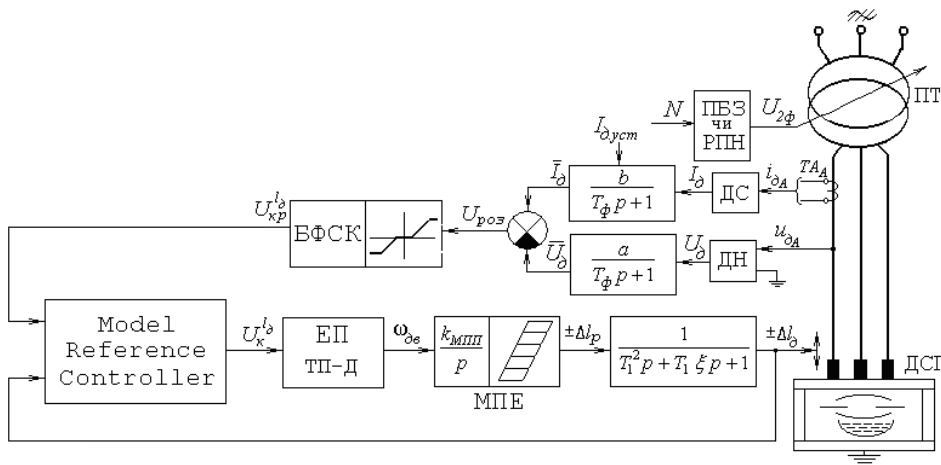


Рисунок 1 – Функціональна схема регулятора потужності дуг дугової печі з нейрорегулятором Model Reference Controller

середньовипрямлені значення струму та напруги дуг, що формуються на виходах давачів струму ДС та напруги ДН дуги відповідно.

Основною причиною низької динамічної точності регулювання координат ЕР дугової печі (напруг, струмів, потужностей дуг) є випадкові нестационарні флуктуації параметрів дугових проміжків, зокрема довжин дуг та градієнта напруг на дугах, наявність нелінійностей, люфтів, зон нечутливості в елементах системи керування, приводу та механізму переміщення електрода, зазначена вище обмежена пружність консольної конструкції підвіски електрода тощо.

Для усунення чи значного послаблення інтегрального негативного впливу на показники динаміки названих вище характеристик та особливостей параметрів і збурень у плавильному просторі запропоновано включити у пряму канал регулятора потужності дуг АРДМ-Т нейрорегулятор типу Model Reference Controller. Нейрорегулятор включено на вході електроприводу ЕП механізму переміщення електрода. На виході нейрорегулятора Model Reference Controller неперервно формується сигнал керування на переміщення електрода $U_k^{ld} = f(U_{kp}^{ld})$.

Проектування нейрорегулятора включає етап ідентифікації моделі об’єкта керування - ‘вхід електроприводу ЕП – електрод’ та етап синтезу закону керування. На етапі ідентифікації розроблено модель керованого об’єкта у вигляді нейронної мережі, котра на етапі синтезу використовується для параметричного синтезу нейрорегулятора [4]. Структурна схема для цього зображена на рис.2.

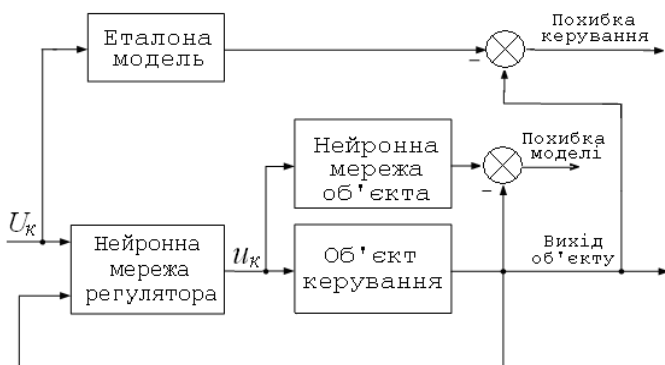


Рисунок 2 – Схема ідентифікації моделі об’єкта керування

керування. Лінії затримки, які використовуються для формування входів НМ, мають такт дискретності 0,05 с. Розмір навчальної вибірки склав $N_B = 10000$, а крок дискретизації $\Delta t = 0.01$ с. Елементи запізнення включено на вході і на виході НМ, що дало змогу надати такій прямонапрявленій НМ властивостей динамічної. Вектори входу нейронної мережі представлялися числовими масивами у форматі double, що відповідає груповому представленню даних. Особливості даної системи керування полягають у тому, що необхідно створити дві НМ: моделі об’єкта керування і самого регулятора. Для проектування нейрорегулятора та дослідження ефективності його роботи створено цифрову Simulink-модель об’єкта керування – регулятора потужності дуг типу АРДМ-Т-12, що використовується на надпотужній дугової печі типу ДСП-200. Модель об’єкта керування – ‘вхід електроприводу ЕП – електрод’ представлялася нейронній мережі для навчання з метою відтворення її режимів. За результатами моніторингу цифрової моделі об’єкта керування формувалися тренувальні набори

Регулювання положення електродів (довжин дуг) виконується за диференціальним законом. Сигнал керування регулятора на переміщення електрода U_{kp}^{ld} формується на виході блока формування сигналу керування БФСК за диференціальним законом у функції сигналу розузгодження:

$$U_{роз} = aU_{\bar{\delta}} - bI_{\bar{\delta}},$$

де $\bar{I}_{\delta}, \bar{U}_{\delta}$ – згладжені

даних, які використовувалися для навчання НМ. Навчання проводилося з використанням функції `trainlm`, яка

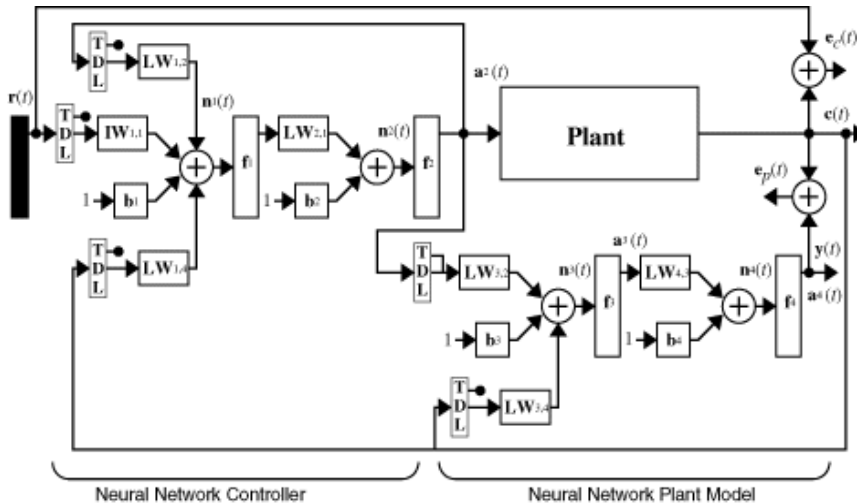


Рисунок 3 – Архітектура НМ нейрорегулятора типу Model Reference Control

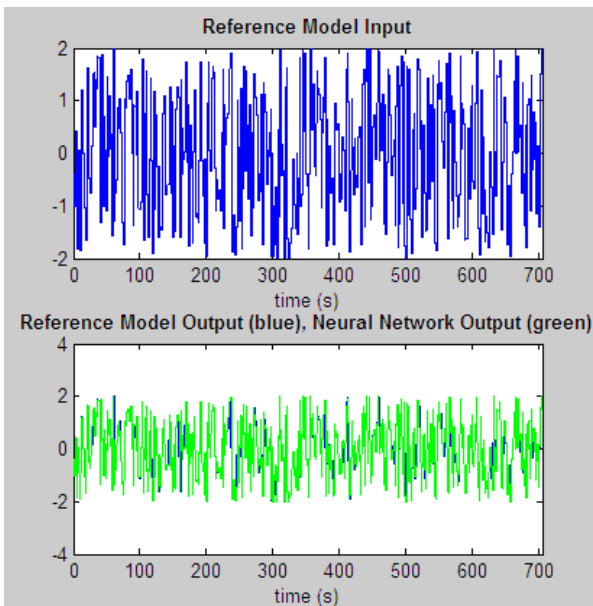


Рисунок 4 – Графіки вихідних сигналів еталонної моделі об'єкту управління по завершенні навчання

Зазначимо, що аперіодичний закон руху електрода є доцільним як за вимогою зменшення дисперсії координат електричного режиму (напруг, струмів та потужностей дуг), так і за необхідності зменшення потужності електричних втрат в елементах короткої мережі ДСП, необхідності зменшення рівня споживання реактивної потужності (збільшення коефіцієнта потужності), а також зменшення негативного впливу навантаження дугової печі на показники якості електроенергії на шинах її під'єднання до електромережі.

На рис.6 показано отримані для двох досліджуваних структур регулятора потужності дуг (без та з нейрорегулятором Model Reference Controller) часові залежності $I_{3\phi}(t)$, $I_{\phi}(t)$, $I_{\phi}(t)$ та $U_{\phi}(t)$ при відпрацюванні стаціонарних випадкових збурень за довжиною дуги $l_{3\phi}(t)$ у частотному діапазоні 0-5 Гц, що відповідає технологічному періоду проплавлення колодязів. Аналіз наведених на рис.6 часових залежностей $I_{\phi}(t)$ та $U_{\phi}(t)$ показав зменшення дисперсії напруг та струмів дуг при роботі запропонованої структури регулятора потужності дуг з нейрорегулятором Model Reference Controller в 1.4-1.6 разів у порівнянні із серійним регулятором типу АРДМ-Т-12.

Висновки. Використання розробленої структури САР електричного режиму ДСП з нейроконтролером Model Reference Controller дає змогу підвищити динамічну точність стабілізації координат ЕР на заданих рівнях. Час регулювання при відпрацюванні детермінованих збурень зменшується на 30-40 %, а дисперсія координат ЕР у квазіусталених режимах при дії випадкових збурень за довжиною дуги зменшується в 1.4-1.6 разів, що підтверджує доцільність практичного використання запропонованої структури регулятора АРДМ-Т з нейроконтролером.

реалізує алгоритм Левенберга-Марквардта. На рис.4 приведено графіки виходів еталонної моделі і об'єкта керування, що отримані по завершенню процедури навчання нейронної мережі.

Синтез нейрорегулятора виконувався активацією блоку Model Reference Controller з бібліотеки додатку Simulink [5]. Ефективність розробленої САР ЕР з нейрорегулятором Model Reference Controller оцінювалася за результатами порівняння показників динаміки при відпрацюванні детермінованих та випадкових

збурень за довжиною дуги $l_{\phi}(t)$ типового регулятора потужності дуг АРДМ-Т-12. Для цього, на створеній Simulink-моделі регулятора АРДМ-Т-12 та моделі запропонованої системи регулювання з нейрорегулятором Model Reference Controller (рис.1), виконано математичні експерименти при дії однакових реалізацій детермінованих та випадкових збурень $l_{\phi}(t)$.

Отримані на цифровій моделі часові залежності $l_{\phi}(t)$, $I_{\phi}(t)$ та $U_{\phi}(t)$ відпрацювання детермінованих збурень за довжиною дуги показано на рис.5. Аналіз цих залежностей показує, що при роботі регулятора АРДМ-Т-12 має місце значна коливність, перерегулювання за довжиною дуги, яка склала $\delta=35-40\%$, а час регулювання екстремального збурення (відпрацювання експлуатаційного короткого замикання) склав $t_p=2-2.5$ с. У запропонованій структурі регулювання потужності дуг з нейрорегулятором Model Reference Controller за дії таких же збурень за довжиною дуги – перерегулювання за довжиною дуги (а також і струму та напруги дуги) відсутнє – реалізується аперіодичний без перерегулювання закон руху електрода, а час регулювання склав $t_p=1.0-1.1$ с.

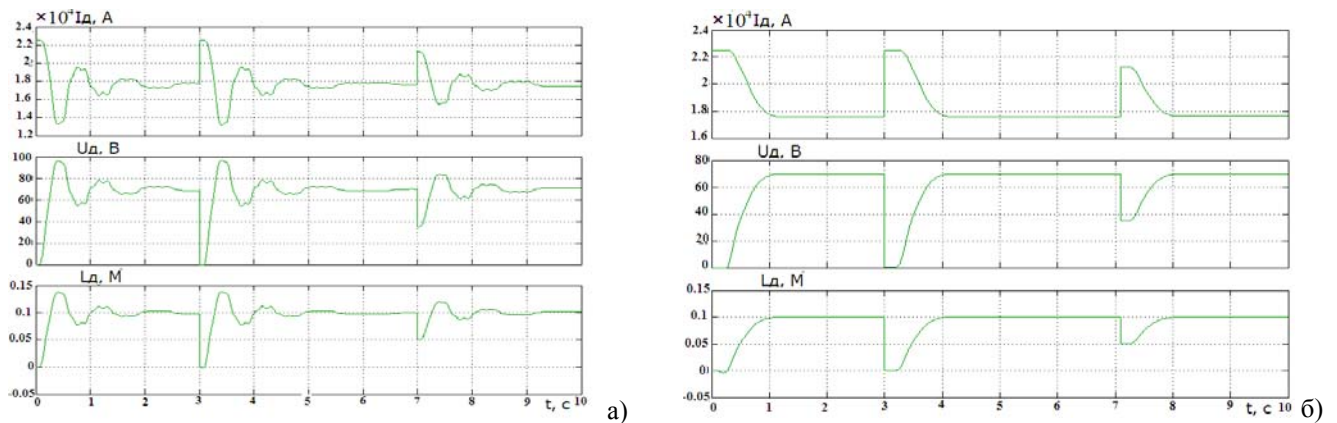


Рисунок 5 – Часові залежності довжини $l_d(t)$, струму $I_d(t)$ та напруги $U_d(t)$ дуги при відпрацювання детермінованих збурень за довжиною дуги регулятором АРДМ-Т-12 а) та з включенням в його структуру нейрорегулятора б)

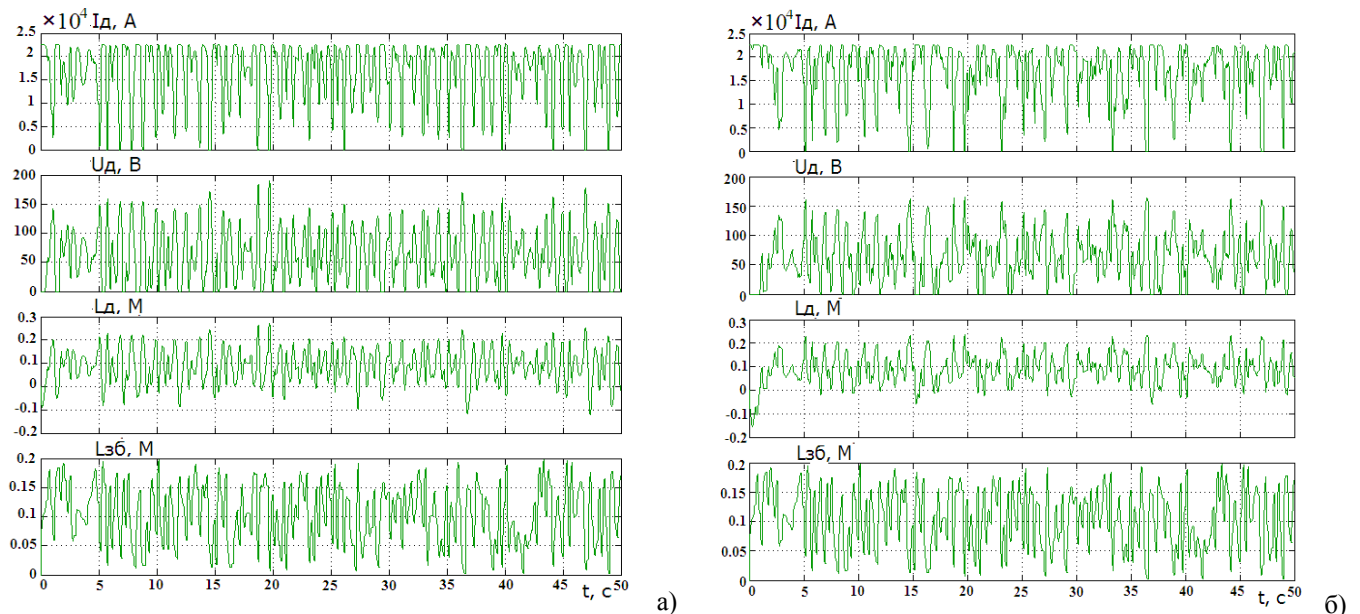


Рисунок 6 – Часові залежності довжини $l_d(t)$, струму $I_d(t)$ та напруги $U_d(t)$ дуги при відпрацюванні випадкових збурень за довжиною дуги регулятором АРДМ-Т-12 а) та з включенням в його структуру нейрорегулятора б)

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Лозинський О.Ю. Дослідження режимів електромеханічної системи регулювання потужності дуг дугової сталеплавильної печі з нечітким паралельним коректором / О.Ю. Лозинський, Я.С. Паранчук, В.І. Мороз, Р.Я. Паранчук // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Тематичний випуск "ПАЕП Теорія й практика". - 2012 (19). - №3. – С. 524-525
2. Паранчук Р.Я. Експлуатаційний контроль параметрів та напруг дуг дугової печі на основі нейронної мережі / Р.Я. Паранчук // Вісник НТУ ХПІ "Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія та практика". – Харків: НТУ ХПІ.- 2008.- С.580-581.
3. Паранчук Р.Я. Нейромережева система оптимальної стабілізації координат електричного режиму дугової сталеплавильної печі / Р.Я. Паранчук // Збірник тез МНТК МИССУ'2008. - Москва-Донецьк.- 2008. – С.177-178.
4. Терехов В. А. Нейросетевые системы управления / В. А. Терехов, Д. В. Ефимов – М.: ИПРЖР.- 2002. – 480с.
5. Медведев В. С Нейронные сети. MATLAB 6 / В. С. Медведев, В. Г. Потемкин. – М.: МИФИ.- 2003. – 489 с.

REFERENCES

1. Lozynskyy A.O., Paranchuk Y.S., Moroz V.I., Paranchuk R.Y. Study mode electromechanical system power control arc welding furnace with fuzzy parallel moderators. Electromechanical and Energysparing system. Thematic issue "PAEP Theory and Practice". 2012 (19). №3. pp. 524-525.

2. Paranchuk R.Y. Operating parameters and control voltages arcs arc furnace based on neural network. *Visnyk NTU KPI. "Problems of automated electric drive. Theory and Practice."* - Kharkov: NTU KPI. 2008; 580-581.
3. Paranchuk R.Y. Neural network system for optimal stabilization of coordinates of electric arc furnace electric mode. Abstracts IRTC MYSSU'2008 - Donetsk-Moscow. 2008. pp. 177-178.
4. Terekhov V.A. Efimov D.V. *Neyrosetevye systemy upravleniya* [Neuronetwork control systems]. Moscow: YPRZHR, 2002. 480 p.
5. Medvedev V.S., Potemkin V.G. *Neyronnye seti. MATLAB 6* [Neural networks. MATLAB 6] – Moscow: MIFI, 2003. 489 p.

Надійшла до редакції 28.03.2013

Рецензент: О.І. Толочко

О.Ю. ЛОЗИНСКИЙ, Я.С. ПАРАНЧУК, А.Б. МАЦИГИН
Национальный университет «Львовская политехника»

Исследование регулятора мощности дуг дуговой печи с нейрорегулятором Model Reference Controller.

Разработана структура системы регулирования мощности дуг дуговой сталеплавильной печи на основе нейрорегулятора Model Reference Controller. Предложено структурную схему и цифровую Simulink-модель нейросетевой системы регулирования мощности дуг, разработано методику параметрического синтеза нейрорегулятора и проведено моделирование динамики регулирования координат электрического режима. Полученные результаты подтвердили улучшение показателей качества динамики при использовании разработанной нейросетевой системы по сравнению с серийным регулятором мощности дуг типа ARDM-T.

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, регулятор мощности дуг, нейрорегулятор, компьютерная модель, стабилизация, дисперсия, перерегулирование.

O.Y. LOZYNSKYY, Y.S. PARANCHUK, A.B. MATSYHIN
National University "Lviv polytechnic"

Study of Arc Furnace Arcs Power Regulator with MODEL REFERENCE CONTROLLER Neural Controller.

The issue of complex electrotechnological efficiency indices improvement during steel melting in electric arc furnaces is urgent and important for electric metallurgy industry of Ukraine. Great energy consumption of arc furnaces metal production is the result of outdated and worn out electric mode control systems. Existing arc power regulators are characterized by a significant lag, nonlinearity, limited stiffness and allow significant dispersion of electric mode coordinates during control process. Such characteristics do not allow to obtain accurate mathematical models of the furnace power circuit and control system. We propose to increase performance and decrease power consumption through the improvement of electric mode coordinates control systems. To improve dynamic accuracy of arcs lengths and electric mode coordinates control it is proposed to use neural network control principles. The structure of arcs power regulator based on Model Reference Controller neural controller was designed. Neural controller is included in the input of electrodes movement electric drive thyristor converter. A digital Simulink-model of proposed arcs power control system with Model Reference Controller neural controller was developed. Identification of control object model based on neural network using a digital model was performed. Training of reference model, which defines the desired trajectory of the electrode movement, was performed. The appropriateness of aperiodic law of electrodes motion is substantiated. The neural network controller is composed of two layers and has 5 inputs, 13 neurons in the hidden layer and 1 output. It contains delay elements, included in inputs and outputs, which allows to give such direct neural network dynamic properties. To design neural controller and study the effectiveness of its work a digital Simulink model of control object, namely the ARDM-T arcs power regulator regarding its parameters for super-power DSP-200 electric arc furnace, was created. Neural controller synthesis is performed using Model Reference Controller block from the MatLAB Simulink library. The efficiency of the developed electric mode control system with Model Reference Controller neural controller is estimated by the results of comparisons of the dynamics when working out deterministic and random perturbations of arc length by typical ARDM-T-12 arcs power regulator with and without neural controller. For this purpose, using the created Simulink-model of ARDM-T-12 controller and model of the proposed system with Model Reference Controller neural controller the dynamics of working out identical implementations of deterministic and random perturbations of arc length have been studied. The results of research on the digital model confirmed the feasibility of the practical use of the proposed ARDM-T regulator structure with Model Reference Controller neural controller.

Key words: arc steelmaking furnace, arcs power regulator, neural controller, computer model, stabilization, dispersion, overshoot.