

УДК 681.51, 621.365, 255:29.1

**Я. С. Паранчук**, д-р техн. наук,  
**А. Б. Мацигін**

### МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ ТРИФАЗНОЇ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ ДУГ ДУГОВОЇ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЇ ПЕЧІ НА ОСНОВІ НЕЙРОРЕГУЛЯТОРА У МИТТЄВИХ КООРДИНАТАХ

**Анотація.** Розроблено математичну та цифрову моделі трифазної системи регулювання довжин дуг дугової сталеплавильної печі з нейрорегулятором у миттєвих координатах. Отримано результати модельних досліджень показників динаміки регулювання координат електричного режиму з використанням нейрорегулятора та проведено їх порівняння з показниками динаміки серійного регулятора потужності типу АРДМ-Т.

**Ключові слова:** дугова сталеплавильна піч, нейрорегулятор, комп'ютерна модель, регулятор потужності дуг, миттєві координати, вольт-амперна характеристика, стабілізація

**Y. Paranchuk**, ScD.,  
**A. Matsyhin**

### MODELING AND RESEARCH OF A THREE-PHASE ELECTRIC ARC FURNACE ARC POWER REGULATION SYSTEM WITH NEURO-CONTROLLER IN THE INSTANTANEOUS COORDINATES

**Abstract.** The authors propose the model of a three-phase EAF arc power regulation system in the instantaneous coordinates. The elaborated system of regulating arcs lengths of an electric arc furnace with a neuro-controller and the obtained results of computer simulation of electric mode for the existing and proposed systems have shown improvement of dynamics indicators of regulating arcs lengths as compared with a serial power controller – AFAR-T.

**Keywords:** arc steel-making furnace, neuro-controller, computer model, arc power regulator, instantaneous coordinates, current-voltage characteristic, stabilization.

**Я. С. Паранчук**, д-р техн. наук,  
**А. Б. Мацигін**

### МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМИ РЕГУЛИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ ДУГ ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ НА ОСНОВЕ НЕЙРОРЕГУЛЯТОРА В МГНОВЕННЫХ КООРДИНАТАХ

**Аннотация.** Разработано математическую и цифровую модели трехфазной системы регулирования длин дуг дуговой печи с нейрорегулятором в мгновенных координатах. Получено результаты исследований показателей динамики регулирования координат электрического режима с использованием нейрорегулятора и проведено сравнительный их анализ с показателями динамики серийного регулятора мощности типа АРДМ-Т.

**Ключевые слова:** дуговая сталеплавильная печь, нейрорегулятор, компьютерная модель, регулятор мощности дуг, мгновенные координаты, вольт-амперная характеристика, стабилизация

**Актуальність роботи.** Дугові сталеплавильні печі (ДСП) знайшли широке застосування у чорній металургії для виробництва легованих сталей та прецизійних сплавів. Електричний режим (ЕР) упродовж плавлення характеризується нестабільністю і супроводжується постійними коливаннями потужності дуг. Відхилення електричного режиму від раціонального (зокрема оптимального) погіршує показники електротехнологічної ефективності. Основна вимога, що ставиться до систем автоматичного керування режимами плавлення ДСП полягає у необхідності якісної стабілізації координат електричного режиму (ЕР) для кожної технологічної стадії плавки.

**Обґрунтування напрямку дослідження.** Існуючі системи автоматичного керування (САК) режимами та регулювання (САР) координат ЕР ДСП не відповідають комплексу сучасних вимог у повній мірі. Зокрема точність регулювання довжин дуг в існуючих САР довжин дуг є невисокою, що не дає змоги отримати високі показники енергоефективності, енергозбереження, елек-

тромагнітної сумісності. Зважаючи на складність об'єкта керування (ОК) – силового кола дугової печі, динамічність, нестационарність, нелінійність та пофазну несиметрію і взаємозв'язаність режимів, параметричну нестабільність, неможливість отримати точні математичні моделі силового кола, реалізувати якісну стабілізацію координат ЕР на основі методів класичної теорії автоматичного керування неможливо.

Для вирішення окресленої задачі пропонується використати підходи на основі методів новітньої теорії керування, а саме реалізувати адаптивну якісну стабілізацію координат ЕР на основі методів нейромережевого керування. З огляду літератури та аналізу практичних застосувань, такий підхід є ефективним саме для умов відсутності точного математичного опису, дії параметричних та координатних збурень, що сама і відповідає особливостям режимів ДСП.

Авторами вже проводилися дослідження ефективності окресленого вище підходу на однофазній моделі ДСП, складеної в усереднених координатах [1 – 3]. Але на такій моделі нема змоги отримати повну інформацію про вплив запропонованого керування на показники

© Паранчук Я.С., Мацигін А.Б., 2014

енергоєфективності та електромагнітної сумісності, враховувати реально існуючу пофазну несиметрію взаємозв'язаність режимів та несинусоїдність координат ЕР за використання запропонованого нейромережевого керування. Для більш точного та адекватного відтворення реальних процесів зміни координат ЕР у силовому колі та системі автоматичного керування, розроблено трифазну модель ДСП у миттєвих координатах. Зумовлено це, перш за все, наявністю суттєвих нелінійностей у силовому колі, несиметричних міжфазних електромагнітних взаємозв'язків, що призводять на наявності так званих «мертвої» та «дикой» фази тощо. Іншою характерною особливістю роботи трифазної ДСП є зміна параметрів динамічних вольт-амперних характеристик дуг (ДВАХ) на різних періодах плавки. У створеній моделі реалізовано можливість відтворення трьох основних типів ДВАХ.

**Матеріали і результати досліджень.** Оптимальним для системи регулювання положення електродів є реалізація процесу відпрацювання детермінованих збурень за довжиною дуг за аперіодичним (неколивним) чи близьким до нього законом руху електродів і за максимально можливою швидкості, що позитивно впливає на інтегральний показник якості регулювання – на зниження дисперсії координат ЕР (напруг, струмів, потужностей дуг) у процесі електросталеплавлення [4].

Для дослідження показників динаміки системи регулювання потужності дуг та інших координат ЕР дугової сталеплавильної печі з використанням нейрорегулятора створено цифрову структурну трифазну модель електричного режиму ДСП у миттєвих координатах, яка реалізована у додатку SIMULINK математичного пакету МАТІАВ (рис. 1).

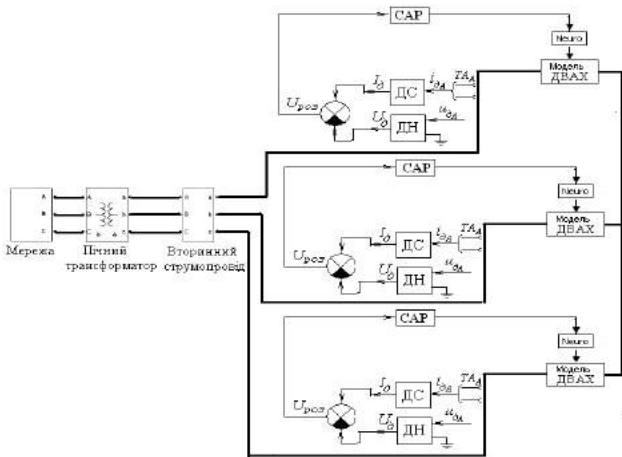


Рис. 1. Трифазна модель силового кола ДСП у миттєвих координатах без нульового провідника та САР ЕР

Зображена трифазна модель ДСП складається з наступних блоків: моделей електромережі живлення, силового пічного трансформатора, вторинного струмопроводу (короткої мережі дугової печі) та моделей динамічних вольт-амперних характеристик дуг трьох різних типів, а саме математичної моделі Кассі 1, тріпеліцидивного типу 2 та лінійної 3. Модель САР ЕР включає давачі струму ДС і напруги ДН дуги, які порівнюються і на основі яких формується в блоці САР (рис. 1) сигнал розузгодження  $U_{роз}$  за диференціальним

законом [5].

В основу принципу регулювання положення електродів у запропонованих САК ЕР з нейромережевим керуванням покладено диференціальний закон:  $U_{роз} = a\bar{U}_\delta - b\bar{I}_\delta$ , де  $\bar{U}_\delta$  і  $\bar{I}_\delta$  – усереднені на періоді напруги мережі живлення напруга та струм дуги, які формуються на виходах фільтрів низької частоти каналу напруги та струму дуги відповідно;  $a, b$  – сталі коефіцієнти, що визначають заданий ЕР. На рис. 2 показано отримані на складеній SIMULINK-моделі часові залежності напруги та струму дуги для різних типів ДВАХ дуг за номінальної їх провідності.

Реалізовано три типи ДВАХ характеристик:

*Перший тип.* На основі рівня Кассі:

$$\frac{dg}{dt} = \frac{1}{\theta} \cdot \left( \frac{i^2}{U_\delta^2 \cdot g} - g \right), \quad (1)$$

$$u_\delta = \frac{i}{g} \quad (2)$$

де  $g$  – провідність дуги;  $i$  – миттєве значення струму дуги,  $U_\delta$  – діюче значення напруги на дузі;  $\theta$  – стала часу провідності дуги,  $u_\delta$  – миттєве значення напруги на дузі.

Невідома стала часу  $\theta$  може бути підібрана на основі порівняння вольт-амперних характеристик, розрахованих для різних періодів плавки, отримані експериментально по приблизному співпадінню їх форм.

*Другий тип.* Апроксимована функцією аркангенса

$$u_\delta = \left( \frac{2 \cdot U_\delta}{\pi} \right) \cdot \arctan(i \cdot 0,002) \quad (2)$$

*Третій тип.* Лінійна залежність

$$u_\delta = k \cdot i \quad (3)$$

де  $k$  – коефіцієнт пропорційності.

В створених моделях ДВАХ дуг реалізовано також генератори випадкових процесів для відтворення стохастичних процесів зміни їх провідності. Крім цього, в цих моделях реалізовано можливість адекватного впливу на миттєву провідність дуг сигналом керування системи автоматичного регулювання положення електродів, як існуючої, на основі серійного регулятора потужності типу АРДМ-Т, так і модифікованої, шляхом включення у прямий канал регулювання довжини дуги нейрорегулятора [6 – 8]. Ця можливість реалізована в блоці NEURO (рис. 1)

Для оперативного синтезу сигнала керування на переміщення електродів в САК з нейрокеруванням використано типовий нейрорегулятор (НР) типу NARMA-L2 Controller.

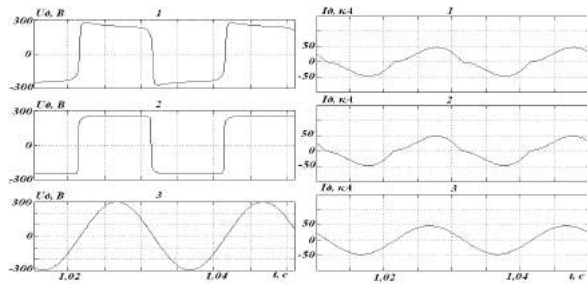


Рис. 2. Криві напруг а) і струмів б) дуг при різних типах вольт-амперної характеристики (2), (3), (4)

Проектування нейрорегулятора включало етап ідентифікації моделі ОК та етап синтезу закону керування [9]. Для ідентифікації моделі об'єкту керування на основі нейронної мережі (НМ) розроблено Simulink-модель електроприводу та механізму переміщення електродів, що реалізовано у блоці САР (рис. 1).

Нейронна мережа (НМ) нейрорегулятора типу NARMA-L2 Controller мала один прихований шар, вісім нейронів у прихованому шарі, три елементи запізнення на вході і два на виході [10]. Синтез нейрорегулятора виконувався активацією блоку NARMA-L2 Controller з бібліотеки додатку SIMULINK.

Ефективність розробленої САР координат ЕР з нейрорегулятором оцінювалася порівнянням показників динаміки за роботи серійного регулятора потужності дуг типу АРДМ-Т-12, адаптованого до параметрів дугової печі типу ДСП-200. Для цього виконувались відповідні математичні експерименти на створених її Simulink-моделях при дії в дугових проміжках детермінованих та стаціонарних випадкових збурень. Експерименти відрізнялися лише наявністю чи відсутністю блоку, що представляв модель нейрорегулятора NARMA-L2 Controller.

На рис.3 і рис. 4 показано графіки миттєвих значень струмів дуг  $i_{\phi}(t)$ , та при роботі САР ЕР без та з використанням нейрорегулятора NARMA-L2 Controller при відпрацюванні короткого замикання у фазі С відповідно. Аналіз залежностей  $i_{\phi}(t)$  показав зменшення часу регулювання довжини (напруг, струмів та потужностей) дуг при роботі САР з нейрорегулятором в 1,4 – 1,6 разів.

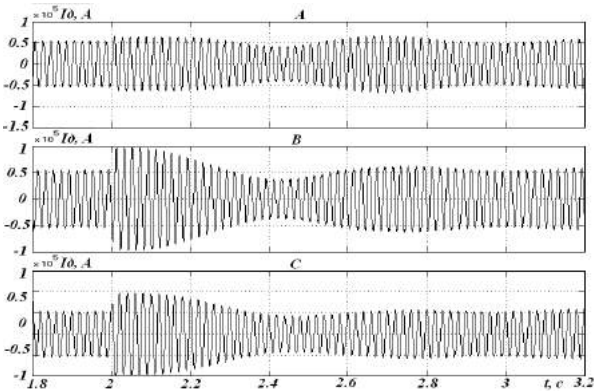


Рис. 3. Часові залежності струмів дуг при відпрацюванні КЗ у фазі С в САР на основі АРДМ-Т

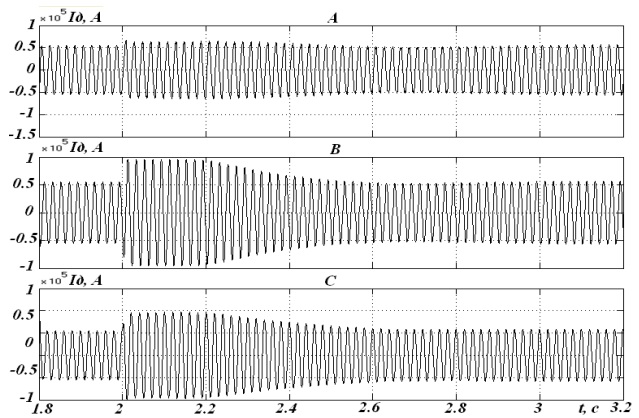


Рис. 4. Часові залежності струмів дуг при відпрацюванні КЗ у фазі С в САР з нейрорегулятором

**Висновки.** 1. Розроблена Simulink-модель САР ЕР у трифазних миттєвих координатах дає змогу з необхідної точністю відтворювати процеси зміни координат ЕР при дії детермінованих та випадкових збурень за довжиною дуги.

2. Використання запропонованого принципу нейрорегулювання дає змогу підвищити динамічну та статичну точність стабілізації координат ЕР ДСП у квазіусталених режимах, і, як наслідок, покращити інтегральні значення показників електротехнологічної ефективності та електромагнітної сумісності.

3. Час регулювання при відпрацюванні детермінованих збурень за використання нейрорегулятора зменшується на 30 – 40 %, а дисперсія координат електричного режиму у квазіусталених режимах при дії випадкових збурень за довжиною дуги зменшується в 1,4 – 1,6 разів.

4. На основі отриманих результатів можна стверджувати про доцільність практичного використання розробленої стратегії синтезу сигналу керування на переміщення електродів на основі нейрорегулятора NARMA-L2 Controller на діючих ДСП.

5. Наступним етапом є дослідження на створеній моделі трифазної САР ЕР впливу нейрорегулювання на значення коефіцієнта спотворення синусоїдності координат ЕР та коефіцієнта несиметрії навантаження.

#### Список використаної літератури

1. Паранчук Я. С. Дослідження режимів системи регулювання довжин дуг дугової сталеплавильної печі з нейрорегулятором / Я. С. Паранчук, А. Б. Мацигін // Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика», Кременчук : Кр.НУ, 2012. – Вип. 3/2012(19). – С. 546 – 547.
2. Минеев А. Р. Моделирование электро-технологических процессов и установок / А. Р. Минеев, А. И. Коробов, М. Я. Погребисский – М. : Спутник+, 2004. – 124 с.
3. Лозинский О. Ю. Оптимизация режимов системы управления процессом электросталеплавления в дуговых сталеплавильных печах / О. Ю. Лозинский, Я. С. Паранчук // Электротехника. –2004. – 50 – 54.

4. 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.

5. Lozinsky O.Y., Lozinsky A.O., Paranchuk R.Ya, and Paranchuk Ya.S., (2009), Energy Efficient, Multicriterion Intelligent Control System of the Electrical Regimes of arc Steel Melting Furnace, *Bydgoszcz. Elektrotechnika*, No. 14, pp. 5 – 16.

6. Медведев В. С. Нейронные сети. MATLAB 6 / В. С. Медведев, В. Г. Потемкин, М. : – МИФИ, 2003. – 489 с.

7. Паранчук Р. Я. Нейромережева система оптимальної стабілізації координат електричного режиму дугової сталеплавильної печі / Р. Я. Паранчук // Збірник тез МНТК МІССУ'2008.–Москва–Донецьк : – 2008. – С. 177 – 178.

8. 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.

9. Кузнецов Б. И. Синтез нейроконтроллера с предсказанием для двухмассовой электромеханической системы / Б. И. Кузнецов, Т. Е. Василец, А. А. Варфоломеев // *Электротехника і електромеханіка*. – 2008. – № 3. – С. 27 – 32.

10. Терехов В. А. Нейросетевые системы управления / В. А. Терехов, Д. В. Ефимов – М. : ИПРЖР. – 2002. – 480 с.

Отримано 17.07.2014

#### References

1. Paranchuk Y., and Matsyhin A. Issledovanie rejumov systemu regulirovaniya dlin dug dugovoj staleplavilnoj pechi s nejroregulatorom [Neurocontroller-Based arc Steel Melting Furnace arc Lengths Control System Modes Research], (2012), *Preview Issue "Problems of Automated Electric Drive. Theory and Practice"*, Kremenchug, *Kr.NU*, Vup. 3/2012(19), pp. 546 – 547 (In Ukrainian).

2. Mineev A.R, Korobov A.I., and Pogrebisskiy M.Y. Modelirovanie elektrotehnologicheskikh prozesov i ustanovok. [Electrotechnological Complexes and Appliances Simulation], (2002), Moscow, Russian Federation, *Sputnik+*, 124 p. (In Russian).

3. Lozynskyy O.A., and Paranchuk Y. Optimizachij regimov sistemu upravleniya prochesom electrostaleplavleniya v dugovuch snaleplavilnuch pechah [Optimization of the Process Control System Elektrostaleplavleniya in Electric arc Furnaces], (2004), *Elektrotechnic*, No. 6, pp. 50 – 54 (In Russian).

4. Lozynskyy A.O., Paranchuk Y.S., Moroz V.I., and Paranchuk R.Y. Issledovanie rejumov elektromehanicheskoj systemu regulirovaniya dlin dug dugovoj staleplavilnoj pechi s nechotkim paralelnum korektorom

[Study Mode Electromechanical System Powercontrol arc Welding Furnace with Fuzzy Parallel Moderators], (2012), *Electromechanical and Energysparing System. Thematic issue "PAEP Theory and Practice"*, 2012 (19), No. 3. pp. 524 – 525 (In (In Ukrainian))

5. Lozinsky O., Lozinsky A.O., Paranchuk R.Y., and Paranchuk Y.S. Energoefektivna bagatokriterialna intelektualna sistema upravleniya regumov dugovoi staleplavilnoj pechi. [Energy Efficient, Multicriterion Intelligent Control System of the Electrical Regimes of arc Steel Melting Furnace], (2009), *Bydgoszcz. Elektrotechnika*, No. 14, pp. 5 – 16 [In English].

6. Medvedev V.S. Nejrionnye seti MATLAB 6 [Neural Networks. MATLAB 6], (2002), Moscow, Russian Federation, *DIALOG-MIFI*, 221 p. (In Russian).

7. Paranchuk R.Y. Nejrosetevaja sistema optimalnoj stabilizatsyi koordynat elektricheskoho regumy dugovoj staleplavilnoj pechi [Neural Network System for Optimal Stabilization of Coordinates of Electric arc Furnace Electricmode], (2008), *Abstracts IRTC MYSSU'2008*, Donetsk, Ukraine – Moscow, Russian Federation, pp. 177 – 178. (In (In Russian)).

8. Paranchuk R.Y. Eksplytazyonnyj control parametrov i naprug dug dugovoi staleplavilnoj pechi. na osnovanej neyronnoj seti [Operating Parameters and Control Voltages arcs arc Furnace Based on Neural Network], (2008), *Visnyk NTU KPI. "Problems of automated electric drive. Theory and Practice"*, Kharkov, Ukraine, *NTU KPI.*, pp. 580 – 581 (In Ukrainian).

9. Kuznezov B.I., Vasilez T.E., and Vorfolomeev A.A. Sintez neyrokontollera s predskazaniem dlja dvochmasovoj elektromehanicheskoj sistemu [Creation of neuro-controller with Prediction for the two-mass Electromechanical System], (2008), *Elektrotehnik i and Elektromehaniik*, No. 3, pp. 27 – 32 (In Russian).

10. Terekhov V.A., and Efimov D.V. Neyrosetevye systemy upravleniya [Neuronetwork Control Systems], (2002), Moscow, Russian Federation, *YPRZHR*, 480 p. (In Russian).



Паранчук  
Ярослав Степанович,  
д-р техн. наук, проф., каф. електроприводу НУ "Львівська політехніка", Львів-13, вул. Бандери 12.  
тел. (032) 258-26-20.  
Тел.: 0672813764.  
E-mail: yparanchuk@yahoo.com,



Мацигін  
Андрій Богданович,  
аспірант каф. електроприводу НУ "Львівська політехніка", Львів-13, вул. Бандери 12.  
Тел.: 0673969336.  
E-mail: matsygin@ukr.net.