

О.Ю. Лозинський, Я.С. Паранчук, Р.Я. Паранчук, Ф.Д. Матіко

РОЗВИТОК МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ РЕЖИМІВ ДУГОВОЇ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЇ ПЕЧІ

Мета. Метою статті є створення трифазної у миттєвих координатах комп'ютерної Simulink-моделі системи живлення та системи автоматичного регулювання (САР) координат електричного режиму (ЕР) дугової сталеплавильної печі типу ДСП-200, яка має зручний інтерфейс для зміни структури та параметрів системи живлення трифазних дуг, структури системи та законів керування електричним режимом, а також стохастичних характеристик параметричних та координатних збурень. *Методика.* Для проведення досліджень використовувалися положення теорії електричних кіл, експериментальні дослідження і математичне та комп'ютерне моделювання в додатку Simulink пакету Matlab. *Результати.* Створено високоточну комп'ютерну у миттєвих координатах Simulink-модель системи живлення та САР координат ЕР ДСП-200 та з її використанням проведено дослідження ЕР та отримано оцінки показників функціонування дугової печі у різних технологічних періодах плавлення та за різних структур системи автоматичного керування (САК). *Наукова новизна.* Вперше на основі поєднання елементів бібліотеки додатку Simulink та типових бібліотечних блоків SimPowerSystems програми Matlab складено трифазну у миттєвих координатах повну модель системи живлення та САК ЕР дугової печі ДСП-200, яка має значні переваги по точності, швидкодії та функціональних можливостях у порівнянні з відомими моделями. *Практична цінність.* Можливість виконання на створеній Simulink-моделі математичних експериментів з дослідження показників динаміки регулювання координат ЕР та показників електромагнітної сумісності режимів ДСП та електромережі при дії детермінованих і випадкових збурень. Бібл. 11, табл. 3, рис. 16.

Ключові слова: дугова сталеплавильна піч, комп'ютерна Simulink-модель, система живлення, система автоматичного регулювання, електричний режим, регулятор, динамічна вольт-амперна характеристика дуги, електромеханічний контур.

Цель. Целью статьи является создание трехфазной в мгновенных координатах компьютерной Simulink-модели системы питания и системы автоматического регулирования (САР) координат электрического режима (ЭР) дуговой сталеплавильной печи типа ДСП-200, которая имеет удобный интерфейс для изменения структуры и параметров системы питания трехфазных дуг, структуры системы и законов управления электрическим режимом, а также стохастических характеристик параметрических и координатных возмущений. *Методика.* Для проведения исследований использовались положения теории электрических цепей, экспериментальные исследования и математическое и компьютерное моделирование в приложении Simulink программы Matlab. *Результаты.* Создана высокоточная компьютерная в мгновенных координатах Simulink-модель системы питания и САР координат ЭР ДСП-200 и ее использованием проведены исследования ЭР и получены оценки показателей функционирования дуговой печи в различных технологических периодах плавления и при различных структурах системы автоматического управления (САУ). *Научная новизна.* Впервые на основе сочетания элементов библиотеки приложения Simulink и типовых библиотечных блоков SimPowerSystems программы Matlab составлена трехфазная в мгновенных координатах полная модель системы питания и САУ ЭР дуговой печи ДСП-200, которая имеет значительные преимущества по точности, быстродействию и функциональным возможностям по сравнению с известными моделями. *Практическая ценность.* Возможность выполнения выполения на созданной Simulink-модели математических экспериментов по исследованию показателей динамики регулирования координат ЭР и показателей электромагнитной совместимости режимов ДСП и электросети при действии детерминированных и случайных возмущений. Библ. 11 табл. 3, рис. 16.

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, компьютерная Simulink-модель, система питания, система автоматического регулирования, электрический режим, регулятор, динамическая вольт-амперная характеристика дуги, электромеханический контур.

Вступ. Дугові сталеплавильні печі (ДСП) – це потужні електротехнологічні об'єкти для плавлення сталей і сплавів в основному з металобрухту. Зважаючи на значну встановлену потужність та вкрай динамічний несиметричний та нелінійний характер навантаження, проведення експериментальних досліджень їх режимів та показників процесу плавлення в ДСП з огляду низки організаційних, технічних та виробничих причин не завжди є можливим. Особливі труднощі виникають при необхідності виконання експериментальних досліджень для різних структур системи автоматичного керування (САК), для різних її параметрів, для різних схемних змін у силовому колі живлення трифазних дуг тощо.

Постановка проблеми. Одним з підходів для отримання вказаної інформації (показників динаміки, електротехнологічної ефективності та електромагнітної сумісності) є математичне та комп'ютерне моде-

лювання [1, 2]. Проте існуючі математичні та комп'ютерні моделі процесів в ДСП за швидкодією, точністю відтворення режимів, функціональними можливостями, зручністю зміни структури, параметрів та постановки модельних експериментів не відповідають сучасним вимогам для комплексного дослідження показників динаміки, електротехнологічної ефективності та електромагнітної сумісності.

Огляд останніх публікацій. Існуючі комп'ютерні моделі [3, 4] мають складний та незручний інтерфейс зі зміни параметрів та структури САК ЕР та силового кола живлення трифазних дуг, законів керування електричним режимом, оперативного формування характеристик збурень з різними стохастичними характеристиками, що відповідають досліджуваному технологічним стадіям плавлення, статистичного опрацювання результатів моделювання в on-line

© О.Ю. Лозинський, Я.С. Паранчук, Р.Я. Паранчук, Ф.Д. Матіко

режимі, що ускладнює комп'ютерні дослідження ЕР дугової печі при пошуку найкращих рішень для структури та параметрів САК і законів керування ЕР. Деякі з відомих моделей застосовуються лише для аналізу процесів зміни координат ЕР у силовому колі без замкненої системи регулювання довжин дуг в усереднених координатах [5], інші мають складний і незручний інтерфейс із зміни структури САК, законів керування, характеристик параметричних та координатних збурень, залежностей динамічних вольтамперних характеристик дуг тощо [6-8]. Їм властива або низька точність відтворення режимів [5], чи обмежені функціональні можливості з постановки та проведення різних математичних експериментів [6-8].

Обґрунтування актуальності. Тому задача створення нових високоточних та швидкодійних комп'ютерних моделей системи живлення та САК координат ЕР ДСП, у яких враховуються всі основні нелінійності, особливості зміни параметричних та координатних збурень у процесі плавлення, у яких реалізуються зручні інтерфейси зміни структури, законів керування та параметрів САК, постановки математичних експериментів та статистичного опрацювання результатів досліджень на сьогодні є актуальною та важливою науково-технічною задачею.

Метою роботи є створення трифазної у миттєвих координатах структурної Simulink-моделі системи живлення трифазних дуг та системи автоматичного керування електричним режимом дугової сталеплавильної печі та дослідження показників динаміки електричних режимів та показників електромагнітної сумісності з її використанням.

Науковою задачею є створення структурної Simulink-моделі системи живлення трифазних дуг та системи автоматичного керування електричним режимом дугової сталеплавильної печі на основі поєднання модельних елементів бібліотеки Simulink та структурних блоків SimPowerSystem програми Matlab.

Структурна Simulink-модель системи живлення та САК координат ЕР печі ДСП-200. На рис. 1 показано розроблену функціональну схему системи електроживлення трифазних дуг без нульового провідника та одноконтурної системи автоматичного регулювання координат ЕР з диференціальним законом формування сигналу керування на переміщення електродів (автоматичного регулювання довжин дуг).

На основі цієї функціональної схеми створено комп'ютерну Simulink-модель (рис. 2), яка налаштована на параметри системи живлення, силового електрообладнання та регулятора потужності дуг типу АРДМТ-12 (САК координат ЕР) дугової печі типу ДСП-200. Тестування моделі виконувалося шляхом порівняння показників динаміки відпрацювання детермінованих та стаціонарних випадкових збурень за довжиною (напругою) дуги, що отримувалися на діючій дугової печі ДСП-200 та на складеній її Simulink-моделі при керуванні за диференціальним законом.

Для адекватного відтворення в складеній комп'ютерній моделі реальних залежностей динамічних вольтамперних характеристик (ДВАХ) дуг, що мають місце на різних технологічних стадіях плавлення, у модулі трифазних дуг Simulink-моделі перед-

бачено можливість реалізації в поточному математичному експерименті однієї з чотирьох моделей, що відповідають основним технологічним стадіям плавлення – лінійної $u_a(t) = R_a(t) \cdot i_a(t)$ та нелінійних – на основі функції арктангенса $u_a(t) = 2 \cdot E_{am}(t) \cdot \arctan(k \cdot i_a(t)) / \pi$, на основі диференційного рівняння Кассі

$$\theta \frac{dg_a(t)}{dt} = \left(\frac{u_g(t)^2}{E_{am}^2} \right) g_a(t)$$

та нелінійної зі складною нелінійною функціональною залежністю на основі використання кусково-лінійних та кусково-нелінійних сплайнів $u_a(t) = \Psi(i_a(t), l_a(t))$ з можливістю відтворення гістерезисних властивостей дуги, піків запалювання, погасання дуги тощо, де $g_a(t)$, $R_a(t)$ – миттєва провідність та опір дуги; E_{am} – максимальне значення проти-ЕРС дуги; $u_a(t)$, $i_a(t)$, $l_a(t)$ – миттєві напруга, струм та довжина дуги, θ_a – стала часу, що характеризує теплову інерційність дуги [9].

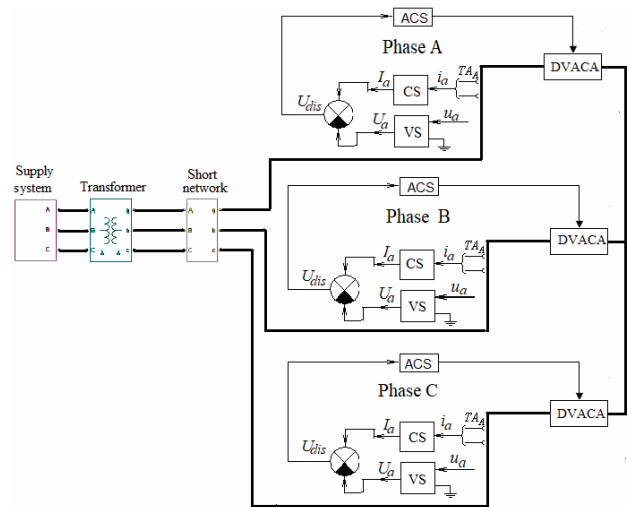


Рис. 1. Функціональна схема трифазної Simulink-моделі системи живлення та САК координат ЕР печі ДСП-200

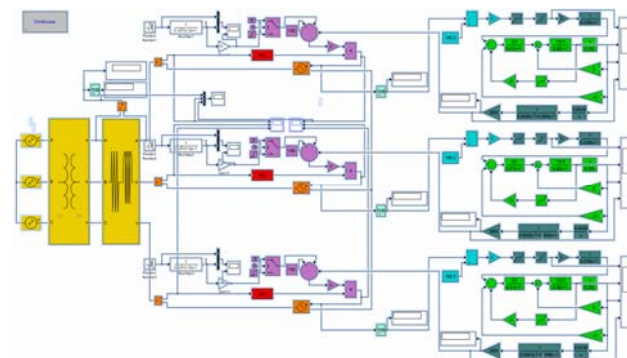


Рис. 2. Структурна схема трифазної Simulink-моделі системи живлення та САК координат ЕР дугової печі ДСП-200

Зміною значення сталої часу θ_a в моделі можна відтворювати умови горіння дуг на різних технологічних стадіях плавки, тобто реалізувати різні ДВАХ дуг (їх площа характеризує реактивну потужність дуги). На початку плавки $\theta_a = 0.2 \div 0.5$ мс; $\theta_a = 1 \div 1.5$ мс на інтервалі утворення рідкої фази розплаву, а на періодах окислення та рафінування – $\theta_a = 3 \div 5$ мс.

Модель блока трифазних дуг за внесення відповідних структурних і параметричних змін має мож-

ливість відтворювати вказані вище типи ДВАХ дуг, що властиві різним технологічним стадіям плавлення.

На рис. 2 жовтим кольором позначено елементи моделі трифазної симетричної електричної мережі (ЕМ), пічного трансформаторного агрегату (ПТА) та вторинного струмопровода – короткої мережі (КМ) печі, які подають модель силового електричного кола живлення трифазних дуг ДСП з відповідними ДВАХ дуг, що зібрані на елементах бібліотеки SimPowerSystems (червоний колір). На цих елементах реалізовано можливість відтворення описаних вище чотирьох типів динамічних ДВАХ дуг, які мають місце на різних технологічних стадіях плавлення.

Джерела напруги відтворюють трифазну синусоїдну напругу мережі живлення дугової печі з частотою 50 Гц, амплітудою $35\sqrt{2}$ кВ та кутом зсуву 120 ел.град. Блок «пічний трансформатор» представляє собою трифазний трансформатор з коефіцієнтом трансформації $k_{tr} = 35000/480 = 72.92$ та потужністю $S = 125$ МВА.

Блок «сумарний повний опір» імітує сумарний опір всіх активних опорів елементів системи живлення дуг (дроселя, трансформатора, короткої мережі та електрода у кожній фазі), що об'єднані в опір r_{ss} , а всі їх індуктивні опори об'єднані в опір x_{ss} .

Червоний блок $I_a(U_a)$ відтворює статичну зовнішню характеристику дугової печі ДСП-200 для відповідної ступені силового пічного трансформатора.

Помаранчевий блок є джерелом керованої напруги, характеристика «вхід-вихід» якого формується блоком $I_a(U_a)$ та блоком задання збурень.

Фіолетові блоки з групи елементів задання збурень моделюють детерміновані та випадкові збурення за довжиною дуги, що виникають при роботі ДСП у дугових проміжках на різних технологічних стадіях плавлення. Призначенням цієї групи блоків є формування різних часових реалізацій збурень за довжинами дуг у фазах короткої мережі печі, з однаковими статистичними характеристиками, які відповідають досліджуваному технологічному стадіям плавлення.

Блоки яскраво блакитного кольору відтворюють модель блока порівняння вхідних сигналів САР для реалізації відповідного закону формування сигналу розузгодження ЕР. Його вихідним сигналом є сигнал розузгодження U_{dis} , а його залежність «вхід-вихід» $U_{dis}=F(U_a, I_a)$ змінюється відповідно до досліджуваного закону керування електричним режимом.

Елементи Simulink-моделі темно-зеленого кольору моделюють статичну залежність «вхід-вихід» блока формування сигналу керування на переміщення електрода певної фази печі. У ньому реалізується «зона нечутливості» ($\delta = 2...10$ %), коефіцієнт підсилення на підняття та опускання електродів, обмеження максимальної швидкості на підняття U_t^{max} та опускання U_d^{max} електродів, відтворюється інерційність фільтра низьких частот, що включається у кожній фазі на виході випрямлячів давача струму ДС та давача напруги ДН. На рис. 3 показано статичну характеристику блока формування сигналу керування $U_c = f(U_{dis})$.

Блок «Редуктор» слугує для перетворення кутової швидкості двигуна, зведеної до кутової швидкості шес-

терні, у лінійні переміщення електрода і представляється в Simulink-моделі нелінійною ланкою типу «люфт» та інтегруючою ланкою, які моделюють механічну передачу типу «шестерня - рейка». Блок «Коливна ланка» відтворює обмежену жорсткість окремих елементів кінематичної схеми механізму переміщення електрода, зокрема вертикальної колони, горизонтального рукава електродотримача та самого електрода.

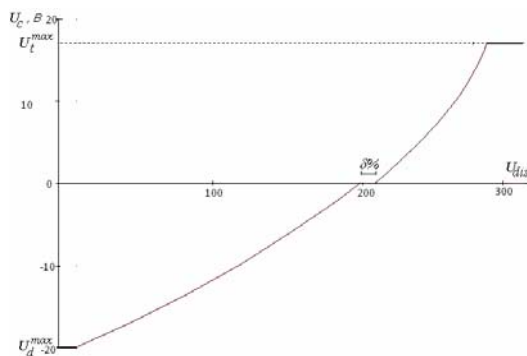


Рис. 3. Залежність «вхід-вихід» блока формування сигналу керування

Група елементів зеленого кольору моделює електропривод механізму переміщення електрода регулятора потужності дуг типу АРДМ-Т-12, який зібраний за схемою «реверсивний тиристорний перетворювач – двигун постійного струму» із нелінійним від'ємним зворотним зв'язком за струмом якоря та від'ємним за швидкістю двигуна і з підсумовуванням цих сигналів на вхідному підсилювачі.

В блоках RMS неперевно у процесі моделювання розраховуються діючі значення струму і напруги дуги

$$\text{за формулою } RMS(f(t)) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T}^t f(t)^2 dt}$$

У табл. 1 наведено експериментально отримані на печі ДСП-200 дані, які описують статичну зовнішню характеристику $I_a(U_a)$ цієї печі та залежність потужності дуг $P_a(U_a)$, які відтворюються функціональними блоками в моделі силового кола печі ДСП-200.

Таблиця 1
Експериментальні дані для характеристик $I_a(U_a)$ та $P_a(U_a)$ дугової сталеплавильної печі ДСП-200

| I_a, A | U_a, B | $P_a, Bт$ |
|----------|----------|-----------|
| 70962 | 3.96E-06 | 0.28101 |
| 68808 | 39.39 | 2710347 |
| 65339 | 77.98 | 5095135 |
| 60614 | 115.13 | 6978490 |
| 54723 | 149.99 | 8207903 |
| 47894 | 183.34 | 8780886 |
| 43970 | 198.2 | 8714854 |
| 40800 | 208.5 | 8506800 |
| 33590 | 227.9 | 7655161 |
| 27593 | 241.85 | 6673367 |
| 19392 | 256.72 | 4978314 |
| 14749 | 263.25 | 3882674 |
| 7673 | 271.11 | 2080227 |
| 2877 | 275.2 | 791750.4 |
| 1428 | 276.25 | 394485 |
| 142.7 | 277.08 | 39539.32 |
| 14.27 | 277.14 | 3954.788 |
| 1.4273 | 277.16 | 395.5905 |

На рис. 4 та рис. 5 наведено побудовані на основі цих експериментальних даних модельні залежності цих двох основних характеристик дугової печі ДСП-200.

На рис. 5 пунктирними лініями показано координати точки режиму максимальної потужності дуг та точки потужності дуг, що відповідає усталеному режиму печі на першій ступені напруги пічного трансформатора. Координати точки усталеного режиму (напруга та струм дуги) відповідають уставкам регулятора потужності дуг типу АРДМ-Т-12 за напругою U_{set} та за струмом I_{set} дуги відповідно.

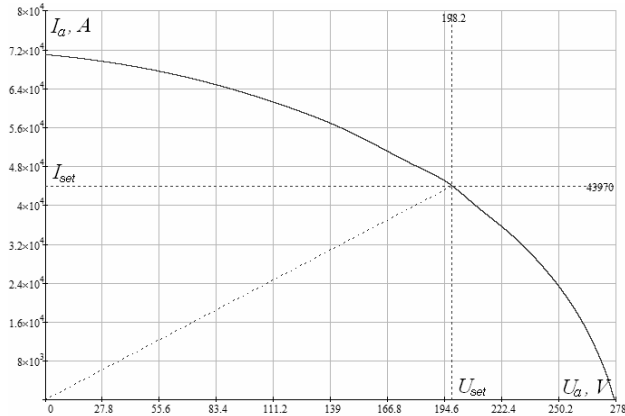


Рис. 4. Зовнішня характеристика $I_a(U_a)$ печі ДСП-200

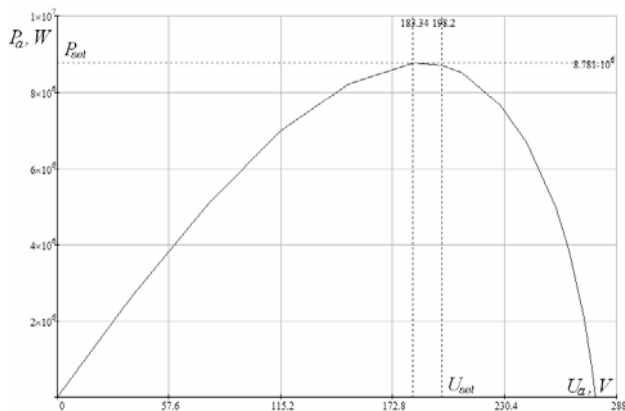


Рис. 5. Залежність потужності $P_a(U_a)$ дуг ДСП-200

В структурну схему Simulink-моделі включено модуль генератора детермінованих (зокрема екстремальних, що спричиняють симетричні чи несиметричні по фазах експлуатаційні короткі замикання (к.з.) чи обриви дуги (о.д.)) та стаціонарних випадкових збурень за довжиною дуги, які за стохастичними характеристиками відповідають збуренням, що діють в дугових проміжках в досліджуваних технологічних стадіях. У створеній Simulink-моделі включено також модуль розрахунку інтегральних характеристик часових процесів зміни координат ЕР та показників електромагнітної сумісності, які комплексно характеризують ефективність керування режимами та динаміку регулювання координат ЕР печі ДСП-200 з налаштованою структурою САР для певної технологічної стадії, характеристик збурень та вибраних законів керування ЕР.

Дослідження точності створеної Simulink-моделі виконувалося на основі порівняння математичних сподівань та дисперсій процесів зміни середньоквад-

ратичних значень струмів дуг $I_a(t)$, отриманих на діючій дуговій печі ДСПА-200 та її Simulink-моделі на різних технологічних стадіях плавлення. Порівняння їх значень виконувалося на основі М-критерію Барлетта [10]. Критеріальні оцінки для математичного сподівання t_M та для дисперсій t_D струмів дуг отримувалися за формулами (1) та (2) відповідно:

$$t_M = \frac{N-k}{k-1} \cdot \frac{\sum_{i=1}^k n_i \cdot (\bar{x}_i - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{x}_i)^2}; \quad (1)$$

$$t_D = \frac{\ln 10}{c} \left[(N-k) \cdot \lg s^2 - \sum_{i=1}^k (n_i - 1) \cdot \lg s_i^2 \right];$$

$$c = 1 + \frac{1}{3 \cdot (k-1)} \cdot \left(\sum_{i=1}^k \frac{1}{n_i - 1} - \frac{1}{N-k} \right); \quad (2)$$

$$s^2 = \frac{1}{N-k} \cdot \sum_{i=1}^k (n_i - 1) \cdot s_i^2,$$

де $N = \sum_{i=1}^k n_i$ – загальна кількість даних; k – число вибірок; n_i , $i = 1, 2, \dots, k$ – чисельність i -ої вибірки;

$\bar{x}_i = \frac{1}{n_i} \cdot \sum_{j=1}^{n_i} x_{ij}$, $i = 1, 2, \dots, k$ – середнє значення i -ої вибірки;

$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} x_{ij}$ – загальне середнє значення генеральної сукупності даних;

$s_i^2 = \frac{1}{n_i - 1} \cdot \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{x}_i)^2$ дисперсія i -ої вибірки.

Отримані значення цих критеріїв не перевищували допустиме (табличне) значення критерію – 3,84, що бралось для 5 %-го рівня значимості α . На основі порівняння цих оцінок отримано підтвердження про досягнення достатньої точності відтворення реальних процесів зміни струмів дуг $I_a(t)$ у створеній Simulink-моделі дугової печі ДСП-200.

Дослідження динаміки та ефективності різних структур САК ЕР печі ДСП-200. На першому етапі досліджень виконувалося моделювання процесів в електроприводі механізму переміщення електродів (електромеханічній системі «тиристорний перетворювач – двигун» (ТП-Д)) регулятора потужності дуг типу АРДМ-Т-12 та механізмі переміщення електродів (МПЕ). Їх динамічні та статичні властивості відчутно впливають на показники якості регулювання довжин дуг (відпрацювання збурень за довжинами дуг). На рис. 6 представлено фрагмент загальної Simulink-моделі ДСП-200, що відтворює процеси зміни координат електропривода та МПЕ в одній фазі, а на рис. 7 показано отримані на цій моделі динамічні процеси зміни струму якоря $I_m(t)$ та кутової швидкості $\omega_m(t)$ двигуна МПЕ при детермінованих змінах сигналу керування $U_c(t)$ на вході тиристорного перетворювача.

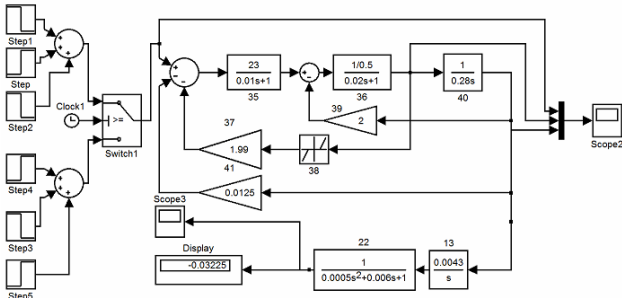


Рис. 6. Simulink-модель ЕП за схемою ТП-Д механізму переміщення електрода регулятора потужності дуг АРДМ-Т-12

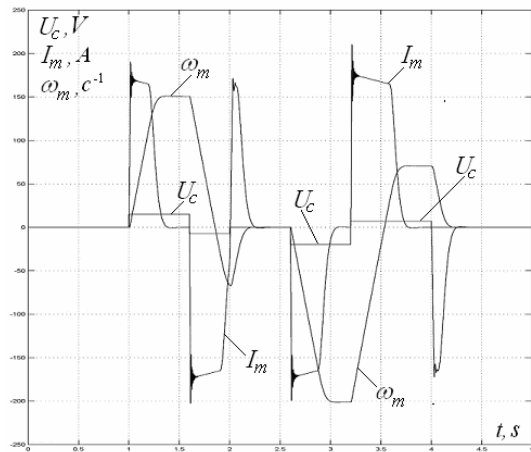


Рис. 7. Динаміка струму $I_m(t)$ і швидкості $\omega_m(t)$ двигуна МПЕ при детермінованій зміні сигналу керування $U_c(t)$ ЕП МПЕ

На рис. 8 показано отримані на створеній Simulink-моделі часові залежності зміни миттєвих значень напруги вторинної обмотки ПТ $u_{2p}(t)$ та струму $i_a(t)$ і напруги $u_a(t)$ дуги у фазі А в квазіусталеному режимі відпрацювання випадкових збурень при нелінійній ДВАХ дуги, що описується функцією арктангенса. Наведені часові залежності ілюструють вплив трапецеподібної форми напруги на дугах, яка спостерігається в кінці розплавлення твердої шихти, на спотворення синусоїдності форми струму дуги та фазної напруги вторинної обмотки пічного трансформаторного агрегату.

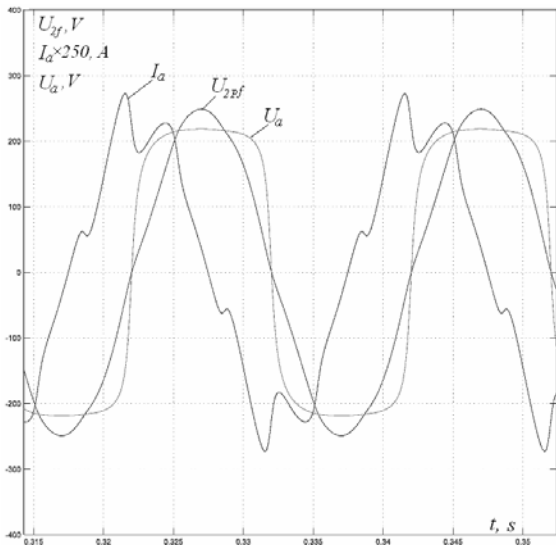


Рис. 8. Часові залежності квазіусталеного процесу зміни напруги $u_a(t)$, струму $i_a(t)$ дуги та напруги $u_{2p}(t)$ ПТА

На комп'ютерні моделі досліджувалися також і режими відпрацювання несиметричних по фазах детермінованих збурень за довжинами дуг – режими одно- та двофазних к.з. та о.д. і визначалися відповідні їм показники якості динаміки.

Так на рис. 9 показано отримані процеси зміни діючих значень напруги $U_a(t)$, струму $I_a(t)$, дуги та струму $I_m(t)$ і швидкості $\omega_m(t)$ двигуна електропривода механізму переміщення електрода у всіх трьох фазах при відпрацюванні к.з. у фазі А за диференційного закону регулювання довжин дуг.

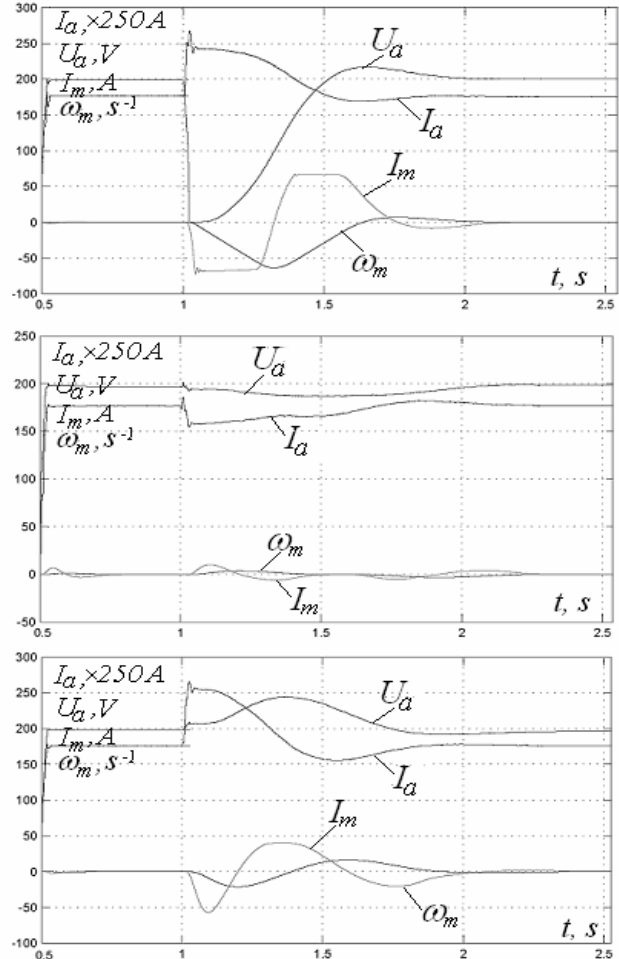


Рис. 9. Часові залежності координат ЕР печі ДСП-200 та двигуна МПЕ у кожній з фаз при відпрацюванні к.з. у фазі А

На рис. 10 наведено отримані на складеній Simulink-моделі часові залежності цих же координат ЕР у кожній з фаз силового кола печі ДСП-200 та двигуна електропривода МПЕ регулятора потужності дуг АРДМ-Т-12 у режимі відпрацювання екстремального (симетричного по фазах) збурення, що призводить до трифазного обриву дуг. Аналіз наведених на рис. 9 та рис. 10 часових залежностей показує коливий характер процесів відпрацювання вказаних детермінованих екстремальних збурень з часом регулювання 1.2 с та 1.4 с відповідно.

Окрім диференційного закону, досліджувалися також і інші закони формування сигналу керування на переміщення електродів. На рис. 11 показано отримані на моделі часові залежності зміни координат ЕР (напруги $U_a(t)$, струму $I_a(t)$, дуги) дугової печі

ДСП-200 та координат двигуна механізму переміщення електрода (струму $I_m(t)$, швидкості $\omega_m(t)$ кожній з фаз) при відпрацюванні обриву дуги у фазі А і регулюванні за законом відхилення напруги дуги від заданого $U_{dis}=k(U_{a.set} - U_a)$.

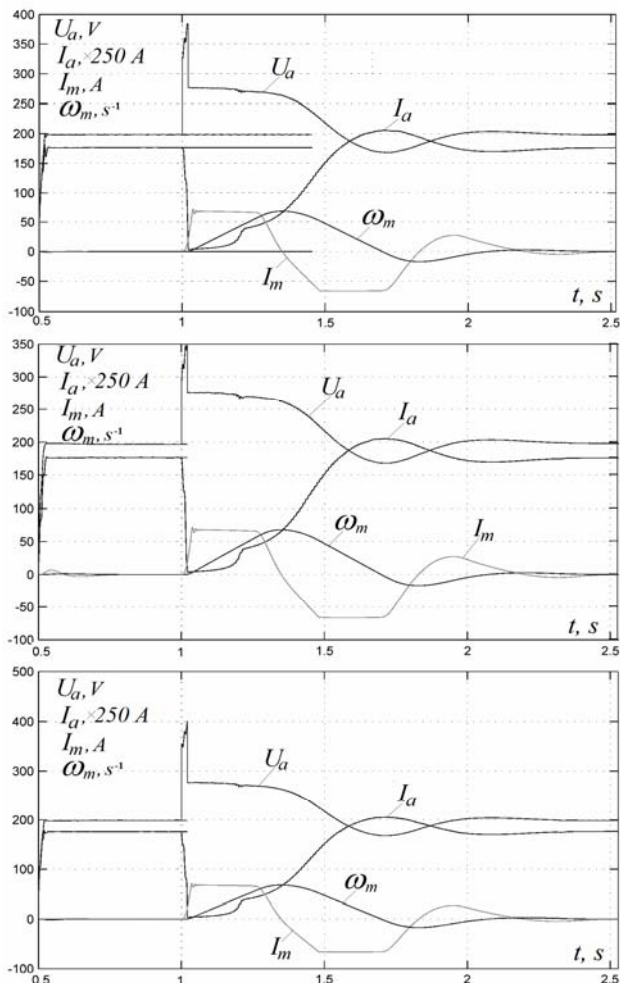


Рис. 10. Часові залежності напруги $U_a(t)$, струму $I_a(t)$ дуги печі ДСП-200 та струму $I_m(t)$ і швидкості $\omega_m(t)$ двигуна МПЕ кожної з фаз при відпрацюванні трифазного о.д.

Основними збуреннями у процесі плавлення шихти в дуговій печі є стаціонарні випадкові збурення за довжиною дуги, стохастичні характеристики яких змінюються упродовж плавки. З випадковим характером коливається теж і напруга на шинах живлення ДСП, випадково змінюються також і параметри елементів силового кола (елементів короткої мережі печі) тощо.

Для відтворення в складеній Simulink-моделі вказаних вище випадкових процесів координатних та параметричних збурень, створено і включено в модель модуль генерування трьох незалежних реалізацій випадкових процесів з однаковими стохастичними характеристиками і з можливістю зміни їх параметрів у відповідності з параметрами характеристик цих збурень, що діють у досліджуваних технологічних стадіях плавлення в діючій дуговій печі ДСП-200.

На початкових стадіях вказані збурення мають максимальні амплітуди в діапазоні низьких частот (0.2-1.5 Гц), далі амплітуди зменшуються, а їх частоти зростають, а на стадії окислення та рафінування

(зокрема стадії кипіння шлаку) амплітуди мінімальні, а їх частоти лежать в смузі 5-8 Гц. У створеному модулі генерування випадкових збурень реалізовано можливість такої зміни їх параметрів відповідно до значень параметрів стохастичних характеристик реальних збурень у досліджуваних технологічних стадіях плавки. Фрагмент таких випадкових збурень для технологічної стадії проплавлення колодязів в дуговій печі ДСП-200 показано на рис. 12.

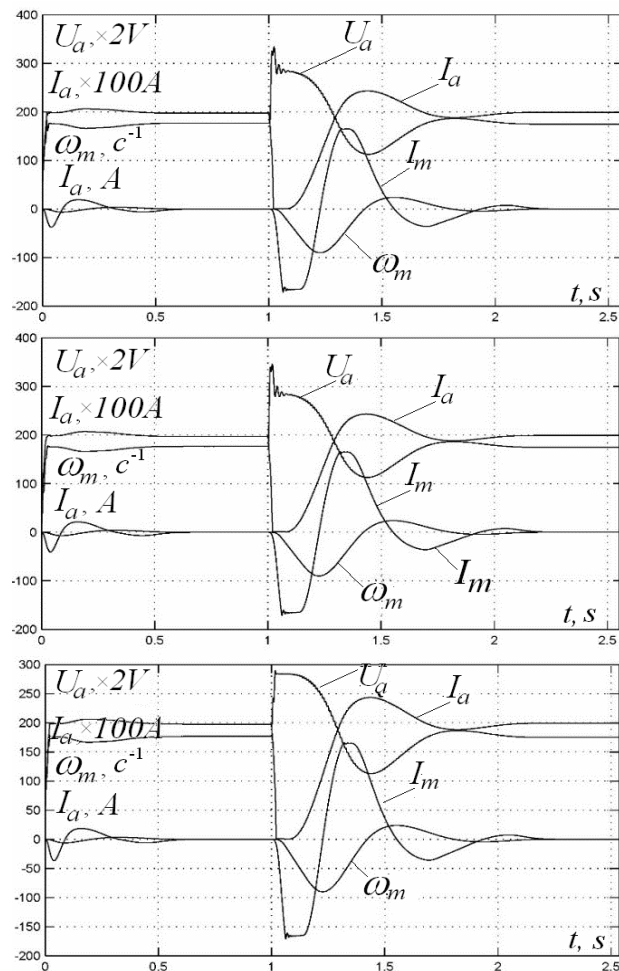


Рис. 11. Зміна координат ЕР $U_a(t)$, $I_a(t)$ печі ДСП-200 та двигуна МПЕ $I_m(t)$ $\omega_m(t)$ регулятора АРДМ-Т-12 при відпрацюванні о.д. у фазі А за законом відхилення напруги дуги

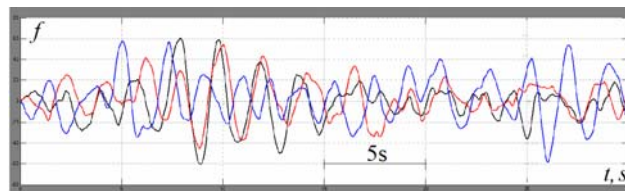


Рис. 12. Фрагмент випадкових збурень за довжинами дуг $f(t)$ у трьох фазах на стадії проплавлення колодязів

Як приклад, на рис. 13 показано отримані на створеній структурній Simulink-моделі за дії стаціонарних випадкових збурень за довжинами дуг процеси зміни струмів дуг при відпрацюванні регулятором потужності типу АРДМ-Т-12 стохастичних збурень в кожній фазі на технологічному періоді кипіння шлаку і при керуванні за диференціальним законом.

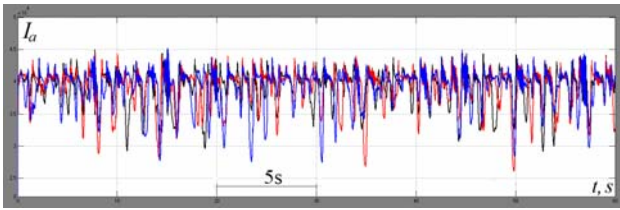


Рис. 13. Часові залежності зміни струмів дуг $I_a(t)$ дугової печі ДСП-200 на технологічному періоді кипіння шлаку при роботі регулятора АРДМ-Т-12 (диференційний закон)

На створеній Simulink-моделі виконувалися математичні експерименти з дослідження показників динаміки при використанні кожного із зазначених вище законів керування в одноконтурній САК (регулятор АРДМ-Т-12), а також при сумісній дії електро-механічного контуру (регулятор потужності дуг АРДМ-Т-12) та швидкодійного виключно електричного контуру регулювання струмів дуг (двоконтурна структура САК [11]) при дії як детермінованих так і стаціонарних випадкових координатних та параметричних збурень у кожній фазі.

Як приклад, на рис. 14 показано результати виконаних математичних експериментів з дослідження процесу відпрацювання детермінованих збурень, що призводили до симетричного трифазного к.з. в печі ДСП-200 при роботі лише електромеханічного контура з диференційним законом керування рис. 14,а; лише швидкодійного електричного контура рис. 14,б та у випадку сумісної роботи обох контурів (двоконтурна САК) рис. 14,с). Як видно з наведених на рис. 14 процесів, при використанні одноконтурної САК (електромеханічний контур – регулятор потужності дуг АРДМ-Т-12) час регулювання струмів дуг складає $t_{reg}=1,65s$, при роботі швидкодійного контуру $t_{reg} = 0,05 s$, а для двоконтурної САК – $t_{reg} = 0,125 s$. Деяке зростання часу регулювання у двоконтурній САК пояснюється несиметрією динаміки регулювання електромеханічного контуру через пофазну несиметрію параметрів силових елементів короткої мережі дугової печі ДСП-200.

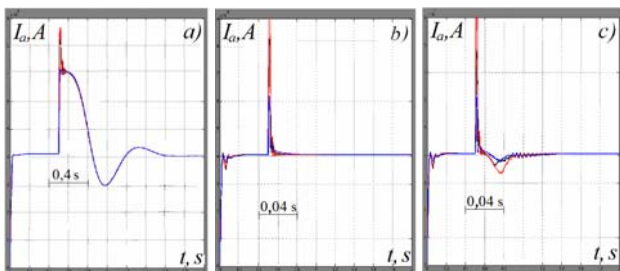


Рис. 14. Струми дуг $I_a(t)$ у трьох фазах при симетричному к.з. печі ДСП-200 та роботі АРДМ-Т-12 (а); лише швидкодійного контуру (б); та двоконтурної САК (с)

Практичний інтерес представляють показники динаміки двоконтурної САК електричного режиму ДСП-200 при відпрацюванні стаціонарних випадкових збурень за довжиною дуги на різних стадіях плавлення, так як такі збурення є основними на кожній плавці. Саме тому на створеній Simulink-моделі було проведено низку математичних експериментів з дослідження показників динаміки регулювання координат ЕР, показників енергоефектив-

ності та електромагнітної сумісності. Метою цих досліджень було отримати інтегральні оцінки якості динаміки, зокрема значення дисперсії струмів (напруг, потужностей) дуг та показників електромагнітної сумісності режимів дугової печі та електромережі при функціонуванні двоконтурної САК, як найдосконалішої з точки зору енергоефективності і, для порівняння, показників двох інших структур САК електричними режимами при дії стаціонарних випадкових збурень на різних технологічних стадіях плавлення.

Як приклад, на рис. 15 та рис. 16 показано часові залежності збурень (рис. 15,а та рис. 16,а) та відповідні їм часові залежності струмів дуг (рис. 15,б та рис. 16,б) у трьох фазах, які відповідають технологічним стадіям обвалів колодязів та доплавлення твердої шихти (рис. 15 та рис. 16 відповідно) при функціонуванні двоконтурної системи автоматичного регулювання струмів дуг дугової печі ДСП-200.

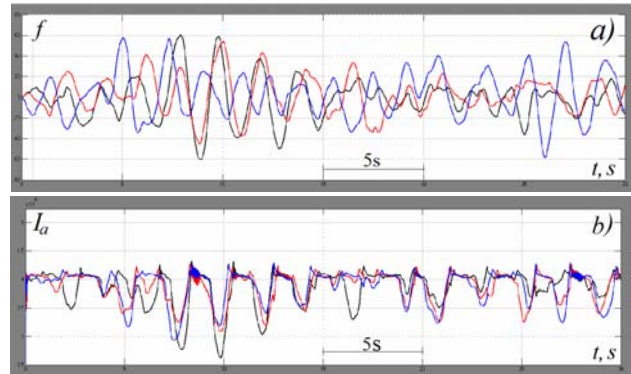


Рис. 15. Збурення за довжинами дуг $f(t)$ у фазах (а) та відповідні їм струми дуг $I_a(t)$ (б) двоконтурної САК на технологічній стадії обвалів колодязів

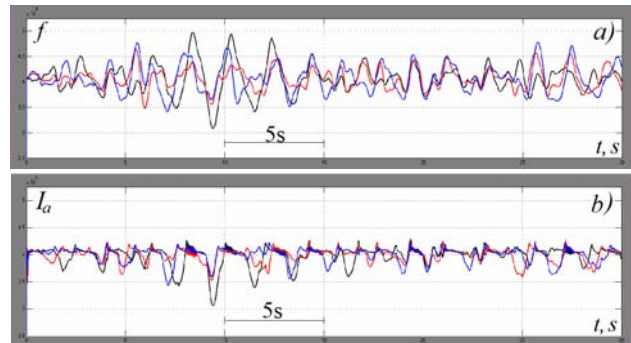


Рис. 16. Збурення за довжинами дуг $f(t)$ у фазах (а) та відповідні їм струми дуг $I_a(t)$ (б) двоконтурної САК на технологічній стадії доплавлення твердої шихти

У табл. 2 подано усереднені по фазах значення дисперсій струмів дуг, що отримані в комп'ютерних експериментах при дії в дугових проміжках однакових реалізацій трифазних збурень за довжинами дуг для однієї і тієї ж технологічної стадії але при функціонуванні різних структур САК ЕР ДСП-200.

Аналіз наведених у табл. 2 значень дисперсій струмів дуг показує, що використання в структурі системи регулювання швидкодійного електричного контуру регулювання струмів дуг дає змогу суттєво – у 2.5-5 разів зменшити дисперсію струмів.

Таблиця 2

Усереднені по фазах значення дисперсій струмів дуг печі ДСП-200 для різних САК та різних технологічних стадіях

| Структура САК | Технологічна стадія | | | |
|--------------------------|------------------------------------|---|------------------------------|------------------------------|
| | Початок плавлення, кА ² | Проплавлення колодязів, кА ² | Окислювання, кА ² | Рафінування, кА ² |
| Одноконтурна (АРДМ-Т-12) | 26.0 | 40 | 29.0 | 6.8 |
| Швидкодійний контур | 13.0 | 16.5 | 6.9 | 2.2 |
| Двоконтурна | 9.5 | 8.2 | 6.7 | 2.0 |

Завдяки підвищенню швидкодії регулювання струмів дуг у двоконтурній структурі САК, відповідно покращується пофазна автономність (симетрія) регулювання струмів дуг, активної та реактивної потужностей, а також показники енергоефективності та електромагнітної сумісності режимів дугової печі та електромережі. У табл. 3 показано отримані за результатами модельних досліджень на створеній Simulink-моделі інтегральні оцінки деяких показників електромагнітної сумісності режимів дугової печі ДСП-200 та електромережі живлення.

Таблиця 3

Усереднені по фазах показники електромагнітної сумісності дугової печі ДСП-200 на періоді розплавлення шихти

| Показники функціонування | Структури САК | |
|--------------------------|------------------|-----------------|
| | Одноконтурна САК | Двоконтурна САК |
| C_{thd} | 0.096 | 0.081 |
| $\cos\varphi$ | 0.82 | 0.89 |
| δU_{ss} % | 1.42 | 0.92 |
| F | 0.168 | 0.058 |

Аналіз отриманих оцінок показників електромагнітної сумісності режимів печі ДСП-200 та мережі живлення у різних технологічних стадіях плавлення показав, що коефіцієнт спотворення синусоїдності струмів електромережі C_{thd} при роботі двоконтурної САК у порівнянні з функціонуванням одноконтурної (регулятор потужності АРДМТ-12) зменшується на 12-20 %, коефіцієнт потужності $\cos\varphi$ при роботі двоконтурної САК зростає на 6-10 %, коливання напруги електромережі живлення δU_{ss} печі при цьому зменшується на 30-40 %, а доза флікера F – на 48-65 %.

Одночасно з цим, завдяки суттєвому покращанню динаміки регулювання струмів дуг (зменшенню дисперсії струмів дуг), при функціонуванні двоконтурної САК зменшується потужність електричних втрат в короткій мережі печі, у тому числі і за рахунок зменшеного споживання реактивної потужності, відповідно цьому покращується електричний коефіцієнт корисної дії, зменшується дисперсія потужності дуг і покращується рівномірність в часі та по фазах (по периметру розплаву) введення активної потужності в піч (завдяки цьому рівномірніше нагрівається розплаву і відповідно усуваються локальні перегріву розплаву та бокових стінок кладки печі). Підвищення швидкодії регулювання струмів дуг позитивно позначається на вирівнюванні фазних навантажень печі і, як результат, практично усувається чи значно послаб-

люється негативна дія «дикої» та «мертвої» фази, а також зменшується коефіцієнт пофазної несиметрії напруг електромережі.

Висновки.

1. На основі застосування статистичного М-критерію Бартлетта показано, що створена трифазна у миттєвих координатах Simulink-модель має достатню точність (адекватність) відтворення процесів зміни струмів дуг.

2. Створена на основі поєднання типових елементів бібліотеки додатку Simulink та блоків SimPowerSystems програми Matlab структурна Simulink-модель дугової сталеплавильної печі має зручний інтерфейс налаштування на дослідження показників динаміки ЕР та показників електромагнітної сумісності для різних структур та параметрів САК і силового кола живлення трифазних дуг, законів керування, залежностей динамічних вольт-амперних характеристик дуг та параметрів стохастичних характеристик збурень.

3. Отримані значення показників якості динаміки досліджених структур САК ЕР дугової печі ДСП-200 показали, що найкращі показники динаміки властиві двоконтурній системі керування: у порівнянні з одноконтурною системою (регулятор потужності дуг АРДМ-Т) час регулювання струмів дуг при відпрацюванні екстремальних збурень електричного режиму (к.з. та о.д.) при використанні швидкодійного контуру в структурі двоконтурної САК зменшується у 20-40 разів, а дисперсія струмів дуг при відпрацюванні випадкових збурень за інших рівних умов зменшується у 3-5 разів, відчутно покращуються також і показники електромагнітної сумісності режимів дугової сталеплавильної печі та електромережі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Wang Y., Mao Z., Tian H., Li Y., Yuan P. Modeling of electrode system for three-phase electric arc furnace // Journal of Central South University of Technology. – 2010. – vol.17. – no.3. – pp. 560-565. doi: 10.1007/s11771-010-0523-3.
2. Паранчук Я.С. Моделювання та дослідження режимів електричної системи регулювання струмів дуг дугової сталеплавильної печі // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: «Електроенергетичні та електромеханічні системи». – 2000. – №403. – С. 126-133.
3. Лозинський О.Ю., Паранчук Я.С., Лозинський А.О., Марущак Я.Ю. Математична модель системи живлення та регулювання режимів електротехнологічного комплексу ДСП-ЕПМ // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2004. – №3. – С. 8-15.
4. Varetsky Y., Lozynsky O., Paranchuk Y. A new design of SVC thyristor controlled reactor // Proceedings of the International Conference EPQU'03: «Electrical Power Quality and Utilization». – Krakow, Poland. – 2003. – pp. 353-360.
5. Balan R., Maties V., Hancu O., Stan S., Lapusan C. Simulation of an electric arc furnace electrode position system. Режим доступу: <http://www.freepatentsonline.com/article/Annals-DAAAM-Proceedings/177174488.html>.
6. Balan R., Maties V., Hancu O., Stan S., Ciprian L. Modeling and control of an electric arc furnace // 2007 Mediterranean Conference on Control & Automation, Jun. 2007. doi: 10.1109/med.2007.4433737.
7. Rahmatollah Hooshmand, Mahdi Banejad, Mahdi Torabian Eshfahanj. A new time domain model for electric arc furnace //

Journal of Electrical Engineering. – 2008. – vol.59. – no.4. – pp. 195-202.

8. Mahmood Moghadasian, Emad AlNasser. Modelling and control of electrode system for an electric arc furnace // 2nd International Conference on Research in Science, Engineering and Technology (ICRSET'2014), March 21-22, 2014 Dubai (UAE), pp. 129-133. doi: 10.15242/iee.e0314558.

9. Паранчук Я.С. Моделирование характеристик та процесів дуг дугової сталеплавильної печі // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: «Електроенергетичні та електромеханічні системи». – 2003. – №487. – С. 108-116.

10. Гайдышев И. Анализ и обработка данных: специальный справочник. – СПб: Питер, 2001. – 752 с.

11. Паранчук Я.С. Дослідження дворівневої системи компенсації реактивної потужності в мережах з дуговими сталеплавильними печами // Технічна електродинаміка. Тем. випуск «Силова електроніка та енергоефективність». – 2004. – Ч.2. – С. 73-78.

REFERENCES

1. Wang Y., Mao Z., Tian H., Li Y., Yuan P. Modeling of electrode system for three-phase electric arc furnace. *Journal of Central South University of Technology*, 2010, vol.17, no.3, pp. 560-565. doi: 10.1007/s11771-010-0523-3.

2. Paranchuk Y.S. Modeling and research of electric arc furnace current regulation system modes. *Bulletin of Lviv Polytechnic National University. Series: «Electrical and electromechanical systems»*, 2000, no.403, pp. 126-133. (Ukr).

3. Lozynskyy O.Y., Paranchuk Y.S., Lozynskyy A.O., Maruschak Y.Y. Mathematical model of power supply system and modes control of the EAF-PSN electrotechnology complex. *Scientific Bulletin of the National Mining University*, 2004, no.3, pp. 8-15. (Ukr).

4. Varetsky Y., Lozynsky O., Paranchuk Y. A new design of SVC thyristor controlled reactor. *Proceedings of the International Conference EPQU'03: «Electrical Power Quality and Utilization»*. Krakow, Poland, 2003, pp. 353-360.

5. Balan R., Maties V., Hancu O., Stan S., Lapusan C. Simulation of an electric arc furnace electrode position system. Available at: <http://www.freepatentsonline.com/article/Annals-DAAAM-Proceedings/177174488.html> (accessed 02 May 2017).

6. Balan R., Maties V., Hancu O., Stan S., Ciprian L. Modeling and control of an electric arc furnace. *2007 Mediterranean Conference on Control & Automation*, Jun. 2007. doi: 10.1109/med.2007.4433737.

7. Rahmatollah Hooshmand, Mahdi Banejad, Mahdi Torabian Esfahanj. A new time domain model for electric arc furnace. *Journal of Electrical Engineering*, 2008, vol.59, no.4, pp. 195-202.

8. Mahmood Moghadasian, Emad AlNasser. Modelling and control of electrode system for an electric arc furnace. *2nd International Conference on Research in Science, Engineering and Technology (ICRSET'2014)*, March 21-22, 2014 Dubai (UAE), pp. 129-133. doi: 10.15242/iee.e0314558.

9. Paranchuk Y.S. Modeling of the arcs characteristics and processes in arc steelmaking furnace. *Bulletin of Lviv Polytechnic National University. Series: «Electrical and electromechanical systems»*, 2003, no.487, pp. 108-116. (Ukr).

10. Gaydyshev I. *Analiz i obrabotka dannykh: spetsial'nyi spravochnik* [Analysis and processing of data: special reference book]. Saint Petersburg, Piter Publ., 2001. 752 p. (Rus).

11. Paranchuk Y.S. Investigation of the two-level reactive power compensation system in networks with arc steelmaking furnaces. *Technical electrodynamics. Thematic issue «Power electronics & energy efficiency»*, 2004, part 2, pp. 73-78. (Ukr).

Надійшла (received) 20.02.2018

Лозинський Орест Юліанович¹, д.т.н., проф.,

Паранчук Ярослав Степанович¹, д.т.н., проф.,

Паранчук Роман Ярославович¹, к.т.н.,

Матіко Федір Дмитрович¹, д.т.н., доц.,

¹ Національний університет «Львівська політехніка»,

79013, Львів, вул. С. Бандери, 12,

тел/phone +380 2582468,

e-mail: yparanchuk@yahoo.com

O.Y. Lozynskyy¹, Y.S. Paranchuk¹, R.Y. Paranchuk¹, F.D. Matico¹

¹ Lviv Polytechnic National University,

12, S. Bandera Str., Lviv, 79013, Ukraine.

Development of methods and means of computer simulation for studying arc furnace electric modes.

Goal. The purpose of the article is the creation of a three-phase instantaneous coordinates Simulink computer model of the power supply and automatic coordinates control system (ACS) of the DSP-200 type arc furnace electric mode (EM). The model has a convenient interface for changing the structure and parameters of the three-phase arcs power supply system, the structure and laws of the electric mode control system, as well as the stochastic characteristics of parametric and coordinate disturbances. **Method.** The provisions of the electric circuits theory, experimental study and mathematical and computer simulation in the Simulink system of the MatLAB computing environment were used for the research. **Results.** A high-precision instantaneous coordinates Simulink-model of the power supply system and electric mode coordinates ACS of the ER DSP-200 furnace was created. This model was used to study the EM and evaluate the performance of the arc furnace during various technological melting periods and with various structures of the automatic control system. **Scientific novelty.** For the first time, based on a combination of Simulink application library elements and SimPowerSystems standard library blocks of the MatLAB environment a complete high-precision three-phase instantaneous coordinate model of arc furnace DSP-200 power supply system and EM ACS was developed. The developed model has significant advantages in accuracy, performance and features compared to existing ones. **Practical value.** Possibility to run on the created Simulink-model mathematical experiments on the research of the electric mode coordinates control dynamic indices and electromagnetic compatibility indices of the electric arc furnace and the supply network under the influence of the deterministic and random perturbations. References 11, tables 3, figures 16.

Key words: arc furnace, Simulink computer model, power supply system, automatic control system, electric mode, regulator, dynamic current-voltage arc characteristic, electromechanical circuit.