

О.Ю. Лозинський, А.О. Лозинський, Я.С. Паранчук, Р.Я. Паранчук

СИНТЕЗ ТА АНАЛІЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИМ РЕЖИМОМ ДУГОВОЇ ПЕЧІ НА ОСНОВІ РОЗПОДІЛУ ТРИВИМІРНОГО ВЕКТОРА СТРУМІВ ФАЗ

Мета. Метою статті є створення методу оперативного синтезу сигналу керування електричним режимом (ЕР) дугової сталеплавильної печі (ДСП) на основі тривимірного вектора струмів фаз, що враховує стохастичну природу процесів у плавильному просторі, силовому електричному колі печі, має низьку чутливість до зміни параметрів об'єкта керування та розроблення структури системи керування для його реалізації. *Методика.* В основу створеного методу керування покладено положення статистичної теорії динамічних систем, а також положення статистичної теорії оптимального керування на основі рівняння Фоккера-Планка-Колмогорова, що дає змогу синтезувати оперативне керування за критерієм наближення густини розподілу регульованої координати до δ -функції, тобто мінімізувати дисперсію тривимірного вектора струмів фаз (дуг) дугової печі. *Результати.* Отримано систему рівнянь для оперативного в режимі *on-line* розрахунку керуючих впливів тиристорного комутатора фазних дроселів, що включені у силове коло живлення трифазних дуг, та структурну схему адаптивного контура формування дисперсії тривимірного вектора струмів дуг дугової печі для реалізації адаптивного оптимального керування. *Наукова новизна.* Вперше на основі рівняння Фоккера-Планка-Колмогорова отримано систему рівнянь, що подають математичну модель стохастичного адаптивного оптимального керування електричним режимом дугової сталеплавильної печі за критерієм мінімуму дисперсії тривимірного вектора струмів дуг, що дає змогу у порівнянні з відомими методами підвищити динамічну точність стабілізації струмів дуг на рівні заданих за критеріями енергоефективності та електромагнітної сумісності значень. *Практична цінність.* Реалізація запропонованої моделі адаптивного оптимального керування та структурної схеми системи для її реалізації дасть змогу у порівнянні з серійними регуляторами потужності дуг поліпшити динамічну точність стабілізації струмів дуг на рівні заданих оптимальних уставок і на основі цього комплексно поліпшити показники енергоефективності та електромагнітної сумісності режимів дугової печі та електромережі. Бібл. 18, рис. 5.

Ключові слова: дугова сталеплавильна піч, електричний режим, тривимірний вектор струмів фаз, стохастичне керування, дисперсія, оптимізація, адаптація, контур регулювання струмів дуг.

Цель. Целью статьи является создание метода оперативного синтеза сигнала управления электрическим режимом (ЕР) дуговой сталеплавильной печи (ДСП) на основе трехмерного вектора токов фаз, который учитывает стохастическую природу процессов в плавильном пространстве, силовой электрической цепи печи, имеет низкую чувствительность к изменению параметров объекта управления и разработка структуры системы управления для его реализации. *Методика.* В основе созданного метода управления использованы положения статистической теории динамических систем, а также положение статистической теории оптимального управления на основе уравнения Фоккера-Планка-Колмогорова, что позволяет синтезировать оперативное управление по критерию приближения плотности распределения регулируемой координаты к δ -функции, то есть минимизировать дисперсию трехмерного вектора токов дуг дуговой печи. *Результаты.* Получена система уравнений для оперативного в режиме *on-line* расчета управляющих воздействий тиристорного коммутатора фазных дроселей, включенных в силовую цепь питания трехфазных дуг, и структурную схему адаптивного контура формирования дисперсии трехмерного вектора токов фаз дуговой печи для реализации адаптивного оптимального управления. *Научная новизна.* Впервые на основе уравнения Фоккера-Планка-Колмогорова получена система уравнений, представляющих математическую модель стохастического адаптивного оптимального управления электрическим режимом дуговой сталеплавильной печи по критерию минимума дисперсии трехмерного вектора токов дуг, что позволяет по сравнению с известными методами повысить динамическую точность стабилизации токов дуг на уровне заданных по критериям энергоэффективности и электромагнитной совместимости значений. *Практическая ценность.* Реализация предложенной модели адаптивного оптимального управления и структурной схемы системы для ее реализации позволяет по сравнению с серийными регуляторами мощности дуг улучшить динамическую точность стабилизации токов дуг на уровне заданных оптимальных уставок и на основе этого комплексно улучшить показатели энергоэффективности и электромагнитной совместимости режимов дуговой печи и электросети. Библ. 18, рис. 5.

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, электрический режим, трехмерный вектор токов фаз, стохастическое управление, дисперсия, оптимизация, адаптация, контур регулирования токов дуг.

Вступ. Дугові сталеплавильні печі – це потужні електротехнологічні установки, що відносяться до класу складних систем і характеризуються вкрай випадковим, динамічним, нелінійним, пофазно несиметричним характером навантаженням та неперервною дією інтенсивних координатних та параметричних збурень у дугових проміжках та силовому колі живлення трифазних дуг. Вказані характеристики навантаження ускладнюють процес керування такими об'єктами та накладають відповідні обмеження на системотехніку – моделі, методи та підходи для удосконалення існуючих систем керування режимами та регулювання електричних координат.

Проблема комплексного покращення показників енергоефективності та електромагнітної сумісності дугових сталеплавильних печей (ДСП) диктується необхідністю підвищення конкурентоспроможності електросталей та високолегованих сплавів на внутрішньому та зовнішньому ринку металопродукції. Її стан у значній мірі визначається рівнем досконалості систем автоматичного керування (САК) електричними режимами (ЕР) дугових сталеплавильних печей, що характеризується швидкістю та динамічною точністю регулювання координат (перш за все струмів дуг), ефективністю моделей керування електрич-

© О.Ю. Лозинський, А.О. Лозинський, Я.С. Паранчук, Р.Я. Паранчук

ними режимами, ідентифікацією станів та прогнозуванням перебігу технологічного процесу електросталеплавлення.

Очевидно, що для таких електротехнологічних нелінійних стохастичних об'єктів керування з діапазоном встановленої потужності силового електрообладнання 1...175 МВА найдоцільніше використовувати моделі, які базуються на ймовірнісних характеристиках процесів керування і які найповніше відповідають природі процесів, що в них протікають. Ефективність та повнота розв'язання задач керування взагалі, та адаптивного оптимального зокрема, електричними режимами електросталеплавлення визначаються, перш за все, швидкістю та динамічною точністю регулювання координат електричного режиму і найважливіше струмів дуг.

Постановка проблеми. Складність задач сучасної теорії адаптивного оптимального керування стохастичними динамічними об'єктами та процесами вимагає удосконалення математичного апарату їх опису, ідентифікації та моделей синтезу керування, а також вимагає значних обчислювальних потужностей цифрових засобів (мікроконтролерів, мікропроцесорних пристроїв) для реалізації процесів ідентифікації та керування в режимі реального часу.

Нажаль, керування режимами на переважній більшості дугових сталеплавильних печах реалізується на основі класичних детермінованих моделей ідентифікації станів, параметрів, пофазного регулювання координат та керування режимами, які не відповідають стохастичній пофазно взаємозв'язаній природі процесів, що лежать в основі їх функціонування.

Тому, на наш погляд, найдоцільнішим підходом у вирішенні окресленої вище проблеми є удосконалення існуючих та створення нових ефективних методів та підходів для задач керування режимами та регулювання координат, зокрема оперативного формування керуючих впливів на основі тривимірного вектора струмів фаз і його ймовірнісних характеристик.

Огляд останніх публікацій. Уперше теоретичні засади стохастичних моделей формування керуючого впливу для електромеханічної системи переміщення електродів трифазних ДСП опубліковано у роботі [1]. Коефіцієнти взаємозв'язку між середньовипрямленими струмами дуг, що входять у створену модель ДСП, запропоновано визначати на основі ймовірнісного аналізу та з врахуванням кореляційних взаємозв'язків фазних процесів у пічному просторі трифазної дугової печі. Отримана в цій роботі модель керування електричним режимом ДСП дає змогу коригувати керуючі сигнали типових регуляторів електричного режиму за струмом i , тим самим, уникати помилкових спрацювань регулятора i -тої фази (усувати хибні переміщення електродів) через збурення в сусідніх фазах. За такої моделі керування покращується пофазна автономність керування електричним режимом, що, у свою чергу, дещо підвищує продуктивність електрометалургійної установки. Але за допомогою такої моделі реалізувати задекларований вище підхід керування режимами трифазної ДСП є неможливо.

Аналогічно, задачі пофазної автономізації керування електричним режимом за фазами дугової печі

на основі врахування стохастичних параметрів збурень сусідніх фаз присвячена робота [2]. Згідно з цією роботою сигнал, що формується на переміщенням електрода в кожній фазі, адитивно формується із сигналів розузгодження всіх трьох фаз, які нормуються коефіцієнтами ваги. Для знаходження значень цих коефіцієнтів отримано математичну модель, яка описує реакції такого складного об'єкта як ДСП на попередньо синтезовані керуючі впливи та процеси збурень, що переводять електричний режим печі в той чи інший стан. У кінцевому випадку, ці коефіцієнти представляють собою також якісь усереднені на деякому часовому інтервалі коефіцієнти ваги сигналів розузгоджень режимів фаз. Тим не менше, тут потрібно зауважити, що в цій роботі вперше зазначено, що оптимізацію системи регулювання електричного режиму ДСП потрібно проводити з орієнтацією на таку інтегральну характеристику режиму, як дисперсія тривимірного вектора струмів дуг, але конкретних рішень у цьому напрямі у вказаній роботі не запропоновано.

У роботі [3] для аналізу й синтезу систем керування електроприводами, які перебувають під дією випадкових збурень, обгрунтовано доцільність використання ймовірнісного підходу. За такого підходу забезпечується адекватна реакція САК на процеси та збурення, які мають місце в об'єкті керування. У цій роботі опрацьовано метод формування дисперсії регульованої координати, тобто метод стохастичної динамічної стабілізації для застосування в задачах стабілізації координат електромеханічних систем з випадковими збуреннями. При його реалізації представляється можливість керувати дисперсією вихідної координати динамічної системи у відповідності з поточними вимогами та умовами функціонування об'єкта керування, зокрема такого, як дугова сталеплавильна піч.

У роботі [4] опрацьовано математичний опис електромеханічної системи регулювання положення електродів, на основі якого виконується «on-line» синтез бажаних динамічних характеристик процесу зміни стану на основі інтегральних критеріїв якості. Запропонований підхід ґрунтується на врахуванні пофазної взаємозв'язаності електричних режимів, що спричиняється особливостями параметрично несиметричного силового кола живлення трифазних дуг та імпедансного чи диференційного закону формування сигналу керування на переміщення електродів. Але ця робота, як і попередня, по своєму задуму далека від ідеї застосування для керування процесами в дугових сталеплавильних печах ідеї формування тривимірного вектора струмів дуг і його стохастичних характеристик.

Запропоновані в роботах [5-9] математичні та комп'ютерні моделі керування електричними режимами трифазних дугових сталеплавильних печей мають певні переваги та недоліки поміж собою з точки зору повноти та точності опису режимів, ідентифікації станів, зручностей в користуванні та переналагодженні, але вони не відповідають окресленим вище вимогам до показників енергоефективності та електромагнітної сумісності режимів у повній мірі, у першу чергу через неадекватність моделей керування до характеру

реальних процесів зміни координат ЕР, а також через високий рівень чутливості отримуваної динаміки до зміни параметрів об'єкта керування, що є вкрай небезпечним в умовах неперервної дії стохастичних параметричних збурень у силовому колі печі та у фазних дугових проміжках.

Метою роботи є розроблення системних та структурних рішень для оперативного синтезу сигналу керування електричним режимом дугової сталеплавильної печі на основі тривимірного вектора струмів дуг, що враховує стохастичну природу процесів у плавильному просторі та силовому колі живлення трифазних дуг і має низьку чутливість до зміни параметрів об'єкта керування, використання яких у порівнянні з відомими рішеннями дає змогу підвищити динамічну точність стабілізації струмів дуг на рівні заданих за критеріями енергоефективності та електромагнітної сумісності значень.

Науковою задачею є створення методу адаптивного оптимального керування електричним режимом дугової сталеплавильної печі за критерієм мінімуму густини розподілу тривимірного вектора струмів фаз та структурної схеми системи керування для його реалізації, що у порівнянні з відомими методами керування дає змогу підвищити динамічну точність стабілізації струмів дуг на рівні заданих (зокрема, оптимальних) значень і, тим самим, покращити показники енергоефективності та електромагнітної сумісності режимів дугової сталеплавильної печі та електромережі живлення.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Динаміка регулювання координат ЕР ДСП, зокрема струмів дуг, на переважній більшості існуючих (серійних, типових) систем керування процесом електросталеплавлення (потужністю дуг) не відповідають у повній мірі високим сучасним вимогам до показників енергоефективності та електромагнітної сумісності режимів дугової печі та електромережі живлення. Тому проблема створення ефективних системних, схемних та алгоритмічних рішень, які скеровані на підвищення швидкодії процесів регулювання струмів фаз (дуг) і комплексного поліпшення на основі цього показників енергоефективності та електромагнітної сумісності режимів на сьогодні для електротеталургійної галузі є важливою та актуальною.

Виклад основного матеріалу дослідження. У даній роботі термін «оптимальність» використовується у вузькому сенсі, за якого система автоматичного керування оцінюється лише показниками якості динамічних процесів, причому одним з критеріїв цієї якості виступає інтегральний показник якості – узагальнена дисперсія регульованої координати. Такий опис критеріїв якості дає змогу застосовувати для знаходження оптимального управління сучасний добре розроблений математичний апарат оптимізації.

Під дією потоків випадкових збурень і керуючих впливів електричний режим (який оцінюється стохастичними характеристиками струмів дуг) трифазної дугової печі може знаходитися в різних станах.

Визначимо ці стани тривимірним вектором струмів фаз, який характеризує електричний режим дугової печі упродовж компанії плавки як:

1 – стан, який характеризується заданими (необхідними) значеннями координат електричного режиму, зокрема заданими значеннями струмів дуг;

2 – стан, який характеризується відхиленнями струмів дуг в область допустимих директивних відхилень;

3 – стан, який характеризується відхиленнями струмів дуг в область великих, зокрема екстремальних відхилень – коротких замикань, обривів дуг та близьких до них.

Зрозуміло, що поняття знаходження в тому чи іншому стані пов'язується з якимось визначеним проміжком часу T_0 . Граф станів тривимірного вектора станів електричного режиму дугової сталеплавильної печі зображено на рис. 1.

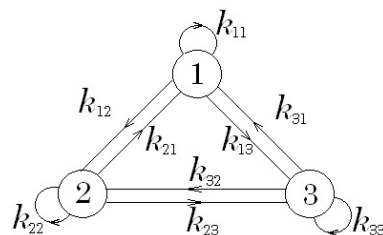


Рис. 1. Граф станів електричного режиму дугової сталеплавильної печі – $k_{1,1}(t), k_{1,2}(t), k_{2,1}(t), k_{2,2}(t), k_{1,3}(t), k_{2,3}(t), k_{3,3}(t), k_{3,1}(t), k_{3,2}(t)$ – інтенсивності переходу режиму зі стану в стан

Кожен з цих станів пропонується ідентифікувати за допомогою значення інтегрального параметра (показника), яким є узагальнена дисперсія тривимірного вектора струмів дуг ДСП. У свою чергу, цей інтегральний показник визначається як детермінант матриці моментів другого порядку, або кореляційної матриці [10], і характеризує він величину відхилень вектора струмів дуг трифазної дугової печі від бажаного стану.

Отож, прийнявши позначення тривимірного вектора регульованих координат (для розглядуваної задачі струмів дуг) як

$$I_a = y = |y_1 \ y_2 \ y_3|,$$

отримаємо вираз для дисперсії тривимірного вектора у вигляді:

$$D_{I_a} = D_y = \det A_y,$$

де A_y – кореляційна матриця, або матриця моментів другого порядку виду:

$$A_y = \begin{vmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} & \lambda_{13} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} & \lambda_{23} \\ \lambda_{31} & \lambda_{32} & \lambda_{33} \end{vmatrix}.$$

Критерієм функціонування такої динамічної системи є бажаний рівень ймовірності знаходження системи в стані **1** упродовж часу розплавлення шихти. З урахуванням сказаного вище, вираз для густини тривимірного вектора регульованої координати запишемо як:

$$p(y_1, y_2, y_3) = \frac{1}{(2/\pi)^{3/2} \sqrt{\det A_y}} \times \exp \left[-\frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^3 \Lambda_{y_{i,j}}^{-1} \cdot |y_i - \bar{y}_i| \cdot |y_j - \bar{y}_j| \right], \quad (1)$$

де $A_{y_{i,j}}^{-1} = \frac{1}{\det A_y} \cdot A_{i,j}$ – елементи оберненої матриці

A_y^{-1} ; $A_{i,j}$ – відповідні елементи приєднаної матриці, а

ймовірність перебування електричного режиму дугової печі у тому чи іншому стані знайдемо як інтеграл від густини (1):

$$P(y_1, y_2, y_3) = \int_0^{y_1^*} \int_0^{y_2^*} \int_0^{y_3^*} p(y_1, y_2, y_3) dy_1 dy_2 dy_3,$$

де y_1^* , y_2^* , y_3^* – максимальні значення зміни координат електричного режиму, наприклад, значення струмів короткого замикання за фазами ДСП.

Зрозуміло, що чим меншою буде дисперсія тривимірного вектора регульованої координати (струмів дуг для дугової сталеплавильної печі), тим більшою буде ймовірність стану, який ідентифікує така величина дисперсії, тобто стану 1. З врахуванням того, що в реальному об'єкті ми маємо потік збурень і потік керуючих впливів, які змінюють стан системи (стан електричного режиму), модель динаміки станів запишемо у вигляді рівняння Колмогорова-Чепмена [11]:

$$\frac{dP_i(t)}{dt} = \sum_{j=1}^3 P_{j,i} \cdot k_{j,i}(t) - \sum_{j=1}^3 P_i \cdot k_{i,j}(t),$$

а система рівнянь для визначення ймовірностей окремих станів запишеться як:

$$\frac{dP_1(t)}{dt} = -P_1(t) \cdot [k_{12}(t) + k_{13}(t)] + k_{21}(t) \cdot P_2(t) + k_{31}(t) \cdot P_3(t);$$

$$\frac{dP_2(t)}{dt} = -P_2(t) \cdot [k_{21}(t) + k_{23}(t)] + k_{12}(t) \cdot P_1(t); \quad (2)$$

$$\frac{dP_3(t)}{dt} = -P_3(t) \cdot [k_{31}(t) + k_{32}(t)] + k_{13}(t) \cdot P_1(t).$$

З приведеної системи рівнянь (2) і графа рис. 1 можна зробити висновок, що інтенсивності переходів $k_{21}(t)$; $k_{31}(t)$; $k_{32}(t)$ формуються керуючими впливами системи керування, які виводять електричний режим дугової печі з небажаних станів 2 і 3, а особливо зі стану 3 у стан 1. У той же час, інтенсивності переходів $k_{12}(t)$; $k_{13}(t)$; $k_{23}(t)$ зумовлюються збуреннями, які діють у плавильному просторі та силовому колі ДСП.

У роботах [12-15] опрацьовано метод формування ефективних керуючих впливів, а саме метод формування вектора керуючих впливів так званого другого (швидкодійного електричного) контуру регулювання струмів дуг, включеного в структуру існуючих (серійних) одноконтурних системи керування електричним режимом дугової сталеплавильної печі. Основною особливістю такої двоконтурної структури системи керування електричного режиму дугової печі є висока швидкодія регулювання струмів дуг (час регулювання струмів складає 0.03-0.04 с), що дає змогу суттєво поліпшити динаміку регулювання, тобто отримати високу динамічну точність стабілізації струмів дуг і, тим самим, з високою точністю керувати динамікою графа станів, зокрема переводити електричний режим дугової печі в стани 1 чи 2.

Функціональна схема такої двоконтурної системи керування ЕР дугової печі показана на рис. 2. Ця система містить традиційний електромеханічний (чи електрогідрравлічний) контур регулювання довжин дуг ЕМКРДД (його традиційно називають регулятор потужності дуг), якому властива відносно велика інерційність, через що робота такого регулятора потужності дуг супроводжується значною дисперсією координат ЕР – довжин, напруг, струмів та потужностей дуг.

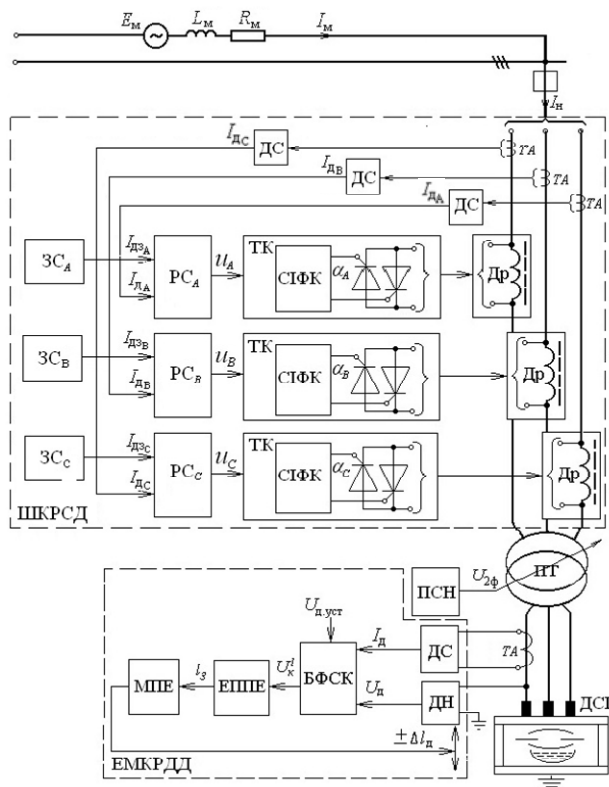


Рис. 2. Функціональна схема двоконтурної системи керування електричним режимом дугової сталеплавильної печі

У кожен фазний канал цього контуру входять давчі напруги (ДН) і струму (ДС) дуг, блок формування сигналу керування (БФСК), електропривод переміщення електрода (ЕППЕ) та механізм переміщення електрода (МПЕ), а також містить перемикач ступенів напруги (ПШН) пічного трансформатора ПТ. Найчастіше в таких ЕМКРДД сигнал керування на переміщення електрода у кожній фазі формується за диференціальним законом.

Приклад динаміки регулювання струмів дуг електромеханічним контуром, що виконується в структурі САК ЕР дугової печі ДСП-200 серійним регулятором потужності дуг типу АРДМ-Т-12, ілюструється на рис. 3, а фрагментами часових залежностей струмів дуг $I_{aj}(t)$ ($j=A, B, C$) (комп'ютерні експерименти виконувалися на часових інтервалах стаціонарності $T_c=180-300$ с випадкових процесів збурень за довжинами дуг печі ДСП-200 для різних технологічних стадій плавлення).

У склад кожного фазного каналу електричного швидкодійного контуру регулювання струмів дуг (ШКРСД) входять давчі (ДС), задавач (ЗС) і регулятор (РС) струму дуги, тиристорний комутатор (ТК),

керуючим впливом якого є час шунтування дроселя (Др) на певній регульованій частині півперіоду напруги, що подається кутом α керування паралельної тиристорно-реакторної групи. При сумісному функціонуванні цих двох контурів регулювання поєднуються їх переваги: надійне запалювання дуг при відпрацюванні екстремальних збурень – експлуатаційних коротких замикань та обривів дуг ЕМКРДД та висока швидкість регулювання струмів дуг ШКРСД. У результаті такого поєднання контурів в двоконтурній структурі САК ЕР ДСП вдається досягнути високих показників керованості та динамічної точності стабілізації струмів (довжин, напруг, потужностей) дуг в умовах дії неперервних випадкових нестационарних параметричних та координатних збурень.

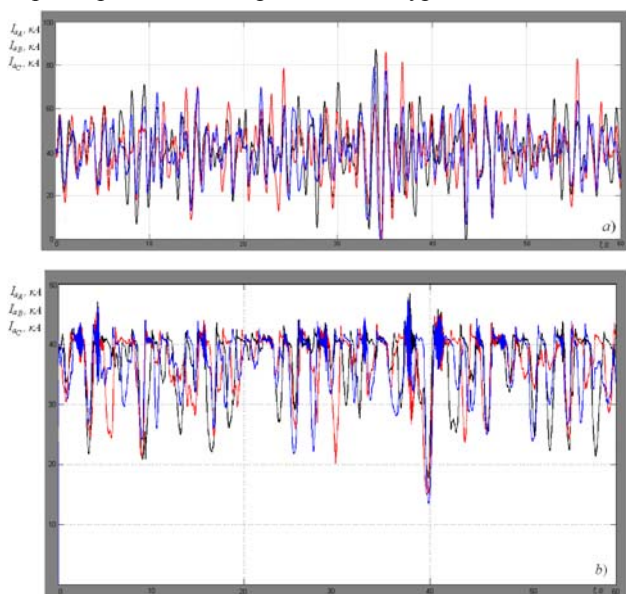


Рис. 3. Часові залежності струмів дуг печі ДСП-200 при роботі регулятора АРДМ-Т-12 (а) та АРДМ-Т-12 із швидкодійним контуром при керуванні за критерієм $D_O \Rightarrow \min$ (б)

Для порівняння динаміки, як приклад, на рис. 3, б показано часові залежності струмів дуг при функціонуванні двоконтурної системи при дії випадкових збурень з такими ж параметрами стохастичних характеристик збурень за використанням пропорційно-інтегрального регулятора струму РС та оптимізації ЕР за скалярним критерієм мінімуму дисперсії реактивної потужності печі $D_O \Rightarrow \min$, що у значній мірі корелюється з критерієм мінімуму дисперсії струмів дуг. Дисперсії струмів дуг у двоконтурній структурі САК ЕР ДСП-200 при функціонуванні пропорційно-інтегрального регулятора склали: $D_{I_{aA}} = 2.95 \cdot 10^7 \text{ A}^2$; $D_{I_{aB}} = 3.15 \cdot 10^7 \text{ A}^2$; $D_{I_{aC}} = 2.35 \cdot 10^7 \text{ A}^2$. Середня по фазах дисперсія струмів дуг склали $\overline{D}_{I_a} = 2.82 \cdot 10^7 \text{ A}^2$. Наведені часові залежності ілюструють високу швидкодію регулювання та якісну динамічну стабілізацію струмів дуг у структурі двоконтурної САК ЕР дугової печі. Порівняння дисперсій наведених на рис. 3 процесів зміни струмів дуг $I_{ai}(t)$, зі значеннями дисперсій при інших параметрах стохастичних збурень за довжинами дуг показує значне (майже на порядок) зменшення дисперсії струмів дуг при сумісній роботі еле-

ктромеханічного та швидкодійного електричного контурів з пропорційно-інтегральним регулятором струмів дуг у двоконтурній структурі САК ЕР дугової печі у порівнянні з роботою одноконтурної САК ЕР (регулятор АРДМ-Т-12) [10].

Для такої двоконтурної структури САК ЕР дугової печі важливим є розроблення ефективних системотехнічних рішень – моделей формування фазних керуючих впливів швидкодійного контуру регулювання струмів дуг ШКРСД, за яких би комплексно поліпшувалися показники електроефективності та електромагнітної сумісності режимів дугової печі та електромережі.

Тому доцільним в контексті поставленої в роботі задачі є розроблення теоретичних засад стохастичної моделі оперативного синтезу керуючих впливів за тривимірним вектором струмів дуг у структурі такої двоконтурної САК електричним режимом ДСП.

Для синтезу вектора керуючих впливів на регулювання струмів дуг двоконтурної САК ЕР дугової печі застосуємо принцип, згідно з яким реалізується оптимальна зміна густини розподілу тривимірного вектора струмів дуг, зокрема у напрямку наближення цього розподілу до виду δ -функції.

Так, в ідеальному випадку, система тим краще буде виконувати своє призначення, а саме забезпечувати стан **1** тривимірного вектора струмів фаз, чим швидше вона буде перетворювати початкову густину розподілу $p(y_A, y_B, y_C, t_0)$ тривимірного вектора струмів дуг печі в δ -функцію, або в δ -розподіл, який суміщений з точкою $y_A = y_{A.set}, y_B = y_{B.set}, y_C = y_{C.set}$, де $y_A, y_B, y_C, y_{A.set}, y_{B.set}, y_{C.set}$ – поточні та задані значення регульованих координат – струмів дуг дугової печі.

Цей висновок відповідає положенню статистичної теорії перехідних процесів, згідно з яким на основі рівняння Фоккера-Планка-Колмогорова [16] знаходиться оптимальне керування по відношенню до перехідного процесу зміни густини n -вимірного розподілу ймовірностей до густини виду δ -функції.

Для нашого випадку запишемо рівняння Фоккера-Планка-Колмогорова у вигляді

$$\frac{dp}{dt} = \sum_{i=1}^3 \frac{d(p \cdot F_i)}{dy_i}, \quad (3)$$

як рівняння для динамічної системи при відсутності шумів.

У цьому рівнянні (3) позначено: p – густина розподілу імовірності тривимірного вектора $p = p(y_1, y_2, y_3)$; $\dot{y}_i + F_i(y_1, y_2, y_3) = 0$ – рівняння, яке описує рух координат системи.

Для системи автоматичного керування функції F_i можуть бути представлені у вигляді сукупності двох функцій:

$$F_i = f_i(y_1, y_2, y_3) - u(y_1, y_2, y_3),$$

де функція f_i відноситься до об'єкта керування, а функція u – до системи керування.

Синтезовані в роботі [16] керування для динамічних систем, які забезпечують оптимальну зміну густини розподілу n -вимірного вектора регульованих координат y_i розраховуються за виразом:

$$u_i = d_i \cdot \text{sign}\left(\frac{\partial \ln(p)}{\partial y_i}\right),$$

де d_i – максимально допустиме або граничне значення керуючого впливу; y_i – складова n -вимірного вектора регульованих координат.

Таке керування по одній з координат, наприклад по першій, для нашого випадку запишеться як:

$$u_1 = d_1 \cdot \text{sign}\left(\frac{\partial \ln(p(y_1, y_2, y_3))}{\partial y_1}\right).$$

Для знаходження відповідного керування запишемо густину розподілу (1) тривимірного вектора регульованої координати електричного режиму ДСП у вигляді зручному для диференціювання:

$$p(y_1, y_2, y_3) = \frac{1}{(2/\pi)^{3/2} \sqrt{\det A_y}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\det A_y} \times \right. \\ \left. \times \{A_{11}(y_1 - \bar{y}_1)^2 + 2 \cdot A_{12}(y_1 - \bar{y}_1) \cdot (y_2 - \bar{y}_2) + \right. \\ \left. + 2 \cdot A_{13}(y_1 - \bar{y}_1) \cdot (y_3 - \bar{y}_3) + A_{22}(y_2 - \bar{y}_2)^2 + \right. \\ \left. + 2 \cdot A_{32}(y_2 - \bar{y}_2) \cdot (y_3 - \bar{y}_3) + A_{33}(y_3 - \bar{y}_3)^2\} \right],$$

де $\bar{y}_1, \bar{y}_2, \bar{y}_3$ – математичні сподівання фазних регульованих координат, які для розглядуваного об'єкта подаються значеннями струмів дуг окремих фаз ДСП.

Якщо проробити необхідні математичні перетворення і замість узагальнених регульованих координат y_i ($i = A, B, C$) підставити струми дуг I_{aA}, I_{aB}, I_{aC} , то отримаємо вирази для згаданих керуючих впливів u_A, u_B, u_C для кожної з фаз дугової печі у вигляді:

$$u_A = d_1 \cdot \text{sign}\left\{\frac{1}{\sqrt{\det A_I}} \cdot [A_{11}(I_{aA} - \bar{I}_{aA}) + \right. \\ \left. + A_{12}(I_{aB} - \bar{I}_{aB}) + A_{13}(I_{aC} - \bar{I}_{aC})]\right\}; \\ u_B = d_2 \cdot \text{sign}\left\{\frac{1}{\sqrt{\det A_I}} \cdot [A_{21}(I_{aA} - \bar{I}_{aA}) + \right. \\ \left. + A_{22}(I_{aB} - \bar{I}_{aB}) + A_{23}(I_{aC} - \bar{I}_{aC})]\right\}; \\ u_C = d_3 \cdot \text{sign}\left\{\frac{1}{\sqrt{\det A_I}} \cdot [A_{31}(I_{aA} - \bar{I}_{aA}) + \right. \\ \left. + A_{32}(I_{aB} - \bar{I}_{aB}) + A_{33}(I_{aC} - \bar{I}_{aC})]\right\}.$$

Як бачимо, для оперативного формування керуючих впливів $u_A(t), u_B(t), u_C(t)$ потрібно знати матрицю A_I других моментів тривимірного вектора струмів дуг (фаз) ДСП. Оперативний розрахунок керуючих впливів за отриманою моделлю (4) для сучасних мікропроцесорних пристроїв є нескладною (у певній мірі тривіальною) технічною задачею.

Тут зауважимо, що сигнали керування за отриманими рівняннями (4) сформульовані як граничні керування і їх можна вважати лише умовно оптимальними. Тим не менше, в роботі [16] приведені дослідження, які показують, що ці керування можуть бути досить близькими, а навіть і співпадати зі строго оптимальними керуваннями, які переводять n -вимірний розподіл регульованої координати у δ -функцію.

Отримана модель (4) оперативного синтезу вектора керуючих сигналів u_A, u_B, u_C реалізується в за-

пропонованій структурі двоконтурної адаптивної системи керування електричним режимом дугової печі, функціональна блок-схема якої проказана на рис. 4.

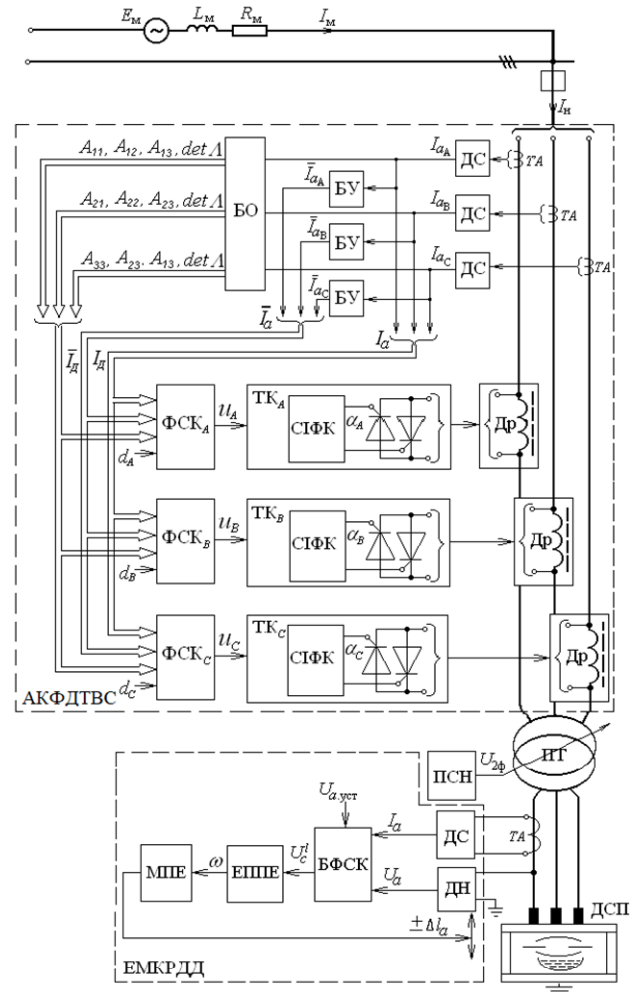


Рис. 4. Функціональна схема двоконтурної адаптивної системи керування електричним режимом дугової печі для мінімізації дисперсії тривимірного вектора струмів

У наведеній схемі двоконтурної адаптивної САК за значеннями реалізації середньовипрямлених струмів трьох фаз I_{aA}, I_{aB}, I_{aC} , дугової печі в блоці обчислень БО оперативно на кожному інтервалі стаціонарності ($T_c = 3-5$ хв) процесів зміни струмів фаз виконується розрахунок матриці A_I других моментів тривимірного вектора струмів дуг дугової печі, її детермінанта $\det A_I$ та значень елементів $A_{i,j}$ приєднаної матриці A оберненої матриці A_I^{-1} .

Вказані сигнали з виходів БО подаються на третій векторний вхід кожного фазного формувача сигналу керування струмом I_{ai} , а саме: $A_{11}, A_{12}, A_{13}, \det A_I$ – на третій вхід ФСК_A; $A_{21}, A_{22}, A_{23}, \det A_I$ – на третій вхід ФСК_B; $A_{31}, A_{32}, A_{33}, \det A_I$ – на третій вхід ФСК_C, а на перший і другий векторні входи ФСК_A, ФСК_B, ФСК_C поступає тривимірний вектор поточних середньовипрямлених значень струмів дуг I_{ai} з виходів давачів струмів ДС і тривимірний вектор усереднених на інтервалах стаціонарності T_c струмів \bar{I}_{ai} відповідно. На четвертий вхід формувачів ФСК_i пода-

ється скалярний сигнал d максимального значення керуючого впливу. На виходах формувачів ФСК_к неперервно в режимі on-line формуються фазні сигнали керування u_i за отриманою моделлю керування (4), які подаються на відповідні фазні тиристорні комутатори ТК_к. Вихідні сигнали a_i систем імпульсно-фазового керування (СІФК) визначають моменти шунтування/включення у силовому колі відповідних фазних дроселів Др_к.

Запропонована процедура оперативного синтезу керуючих впливів $u_A(t)$, $u_B(t)$, та $u_C(t)$ розділяється на два паралельних в часі процеси: перший процес реалізує адаптацію коефіцієнтів моделі синтезу (4) до зміни параметрів стохастичних характеристик координатних та параметричних збурень на часовому інтервалі плавки, а другий – виконує оперативний в режимі on-line з дискретністю Δt розрахунок керуючих впливів $u_A(t)$, $u_B(t)$, та $u_C(t)$ в блоках ФСК_А, ФСК_В та ФСК_С за цією моделлю. Перший процес передбачає на кожному інтервалі стаціонарності T_c , тривалість яких є корельованою з технологічними стадіями плавки (фізико-хімічним станом розплаву) і залежить типів дугових печей ($T_c = 180-300$ с), розрахунок в БО коефіцієнтів моделі (4): $\det \Delta_I$, $\bar{I}_{a,j}$, $A_{n,m}$, а другий реалізує процес розрахунку керуючих впливів u_A , u_B , u_C і виконується з інтервалом $\Delta t = 0.02$ с у функції зміни усереднених на цьому інтервалі (середньоквадратичних) значень струмів фаз $I_j(t_k)$ ($t_k = t_{k-1} + \Delta t$, $m = 1, 2, 3$, $n = 1, 2, 3$, $j = A, B, C$).

Для перевірки ефективності запропонованої стохастичної моделі синтезу керуючих сигналів $u_A(t)$, $u_B(t)$, та $u_C(t)$ були виконані відповідні математичні експерименти на трифазній у миттєвих координатах Simulink-моделі [17, 18] двоконтурної САК ЕР дугової печі ДСП-200 (рис. 2). Модельні дослідження виконувалися при функціонуванні пропорційно-інтегрального регулятора струмів дуг і при використанні запропонованої стохастичної моделі (4) синтезу керуючих сигналів $u_A(t_i)$, $u_B(t_i)$, та $u_C(t_i)$, яка реалізована в запропонованій структурі адаптивної САК ЕР дугової печі (рис. 4), що реалізує стратегію мінімізації дисперсії тривимірного вектора струмів фаз.

Для цього в структуру Simulink-моделі введено обчислювальний блок, в якому за відомою моделлю [10] на інтервалах стаціонарності $T_{c,i}$ розраховувалися коефіцієнти моделі (4) $\det \Delta_I$, $\bar{I}_{a,j}$, $A_{n,m}$. На наступному інтервалі стаціонарності $T_{c,i+1}$ ці коефіцієнти використовували в формувачах ФСК_А, ФСК_В та ФСК_С для синтезу сигналів керування u_A , u_B , u_C за моделлю (4) у функції поточних усереднених на періоді напруги живлення $\Delta t = 0.02$ с струмів фаз I_A , I_B , I_C . Отримувані сигнали керування u_A , u_B , u_C подавалися на входи тиристорних комутаторів. Одночасно з цим на поточному інтервалі стаціонарності $T_{c,i+1}$ обчислювалися нові значення коефіцієнтів моделі (4) $\det \Delta_I$, $\bar{I}_{a,j}$, $A_{n,m}$, які використовувалися на

наступному $T_{c,i+2}$ інтервалі on-line синтезу сигналів керування u_A , u_B , u_C і т.д.

На рис. 5 показано отримані на Simulink-моделі початкові фрагменти часових залежностей струмів фаз при керуванні за отриманою вище моделлю (4), що реалізує стратегією мінімізації дисперсії тривимірного вектора струмів фаз.

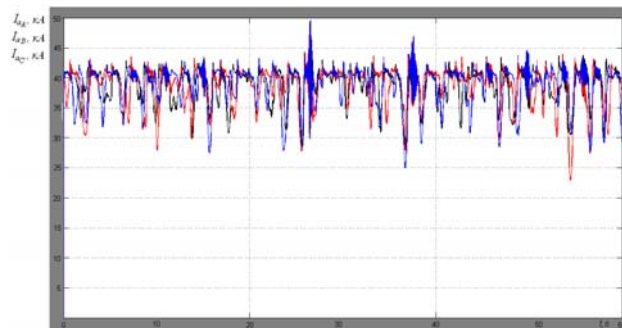


Рис. 5. Часові залежності струмів дуг печі ДСП-200 при регулюванні за отриманою моделлю (4) мінімізації дисперсії тривимірного вектора струмів дуг у двоконтурній структурі САК ЕР дугової печі ДСП-200

У результаті опрацювання часових залежностей струмів дуг $I_j(t)$ на рис. 5, отримано наступні значення їх дисперсій: $D_{I_A} = 0.95 \cdot 10^7$ А²; $D_{I_B} = 1.05 \cdot 10^7$ А²; $D_{I_C} = 1.03 \cdot 10^7$ А². Середня по фазах дисперсія струмів дуг складала $\bar{D}_I = 1.01 \cdot 10^7$ А².

Порівняльний аналіз часових залежностей струмів дуг рис. 3,б та рис. 5 показує, що середня по фазах дисперсія струмів дуг при регулюванні за отриманою моделлю (4) мінімізації дисперсії тривимірного вектора струмів дуг у двоконтурній структурі САК ЕР зменшилася у 2.73 рази. Виконані комп'ютерні дослідження для процесів збурень за довжинами дуг інших технологічних стадій плавлення, які різнилися частотним спектром та амплітудою коливань, показали, що середня дисперсія струмів дуг при регулюванні за отриманою моделлю (4) мінімізації дисперсії тривимірного вектора струмів дуг у двоконтурній структурі САК ЕР у порівнянні з використанням відомої пропорційно-інтегральної моделі формування сигналів керування $u_A(t_i)$, $u_B(t_i)$, та $u_C(t_i)$ зменшувалася в 1,6-3 рази.

Завдяки циклічному поновленню матриці Δ_I других моментів тривимірного вектора струмів дуг дугової печі в блоці БО та елементів вектора I_{a_i} на виходах блоків усереднення БУ реалізується адаптація вектора керуючих впливів $u_A(t_i)$, $u_B(t_i)$, та $u_C(t_i)$ до зміни параметрів стохастичних характеристик координатних і параметричних збурень у силовому колі та дугових проміжках дугової печі на повному інтервалі плавки.

Таким чином, завдяки отриманій моделі (4) оперативного формування та адаптації вектора керуючих впливів і їх реалізації через адаптивний контур формування дисперсії тривимірного вектора струмів АКФДТВС дуг дугової печі можна отримати істотне наближення розподілу тривимірного вектора струмів фаз дугової печі до виду δ -функції. А те, що зменшення дисперсії струмів дуг суттєво впливає на покращання показників енергоефективності (елект-

ричного коефіцієнта корисної дії печі, питомих витрат електроенергії, питомої продуктивності ДСП, ціни тони виплавленої сталі тощо) такої електротехнологічної установки, якою є дугова сталеплавильна піч змінного струму, є загальновідомим фактом.

Також необхідно відзначити, що запропонована стохастична модель регулювання координат ЕР дугової печі та модель адаптивного синтезу сигналів керування на основі тривимірного вектора струмів фаз реалізує релейний, на відміну від існуючих, закон керування. Такий закон керування за дотримання умов стійкості, як відомо, забезпечує максимальну швидкодію регулювання і, як результат, високу динамічну точність стабілізації струмів дуг на рівні оптимальних за вибраними критерієм значень, а також характеризується значно нижчою чутливістю до зміни параметрів об'єкта керування – параметрів динамічних вольт-амперних характеристик трифазних дуг та параметрів елементів силового кола (короткої мережі) дугової сталеплавильної печі. Остання особливість запропонованого способу є особливо важлива для реалізації стратегій адаптивного оптимального керування в умовах неперервної дії інтенсивних стохастичних параметричних збурень у силовому колі та дугових проміжках дугової печі упродовж плавки.

Отримані в статті стохастична модель оперативного синтезу та адаптації вектора керуючих для мінімізації дисперсії тривимірного вектора струмів дуг доцільна для практичного використання в двоконтурних структурах САК ЕР дугових печей з швидкодіючим контуром регулювання струмів дуг.

Висновки. Опрацьовані в статті теоретичні основи методу керування електричним режимом дугової сталеплавильної печі на основі формування густини розподілу тривимірного вектора струмів дуг дають змогу реалізувати адаптивну оптимальну стратегію керування електричним режимом за критерієм мінімуму дисперсії струмів дуг. Як показали результати виконаних модельних досліджень, синтез вектора керування струмами дуг за отриманою стохастичною моделлю (4) у порівнянні з використанням для керування ЕР пропорційно-інтегрального регулятора струмів дуг зменшує дисперсію струмів дуг в 1,6-3 рази. Мінімізація дисперсії струмів дуг позитивно впливає на зниження потужності електричних втрат в елементах короткої мережі дугової печі, і, як наслідок, призводить до зменшення питомих витрат електроенергії, відповідного зростання продуктивності печі та електричного коефіцієнта корисної дії дугової печі. Крім цього, трансформація тривимірного вектора струмів дуг до виду δ -функції у процесі керування електричним режимом значно зменшить споживання реактивної потужності печі, відповідно підвищить коефіцієнт потужності, понизить коливність та відхилення напруги мережі на шинах живлення печі та відповідно зменшить дозу флікера.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Лозинський О.Ю., Марушак Я.Ю. Тривимірний стохастична модель системи регулювання електричного режиму дугової сталеплавильної печі // Автоматизація виробничих процесів в машинобудуванні та приладобудуванні. – 1993. – № 31. – С. 7-11.

2. Лозинський О.Ю., Паранчук Я.С., Лозинський А.О. Оптимізація динамічних режимів взаємозалежних електромеханічних систем // Вісник НУ «Львівська політехніка». Серія «Електроенергетичні та електромеханічні системи». – 2001. – №421. – С. 98-103.
3. Лозинський О.Ю., Паранчук Я.С., Мороз В.І. Синтез процесу керуючих впливів для електромеханічних систем, які перебувають під дією випадкових збурень // Вестник НТУ «ХПІ». Темат. вып.: Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. – 1994. – С. 104-106.
4. Лозинський О.Ю., Паранчук Я.С., Цяпа В.Б. Математичний опис динаміки системи регулювання положення електродів ДСП моделлю у просторі станів // Вісник НУ «Львівська політехніка». Серія «Електроенергетичні та електромеханічні системи». – 2017. – №840. – С. 54-60.
5. Nikolaev A., Povelitsa E., Kornilov G., Anufriev A. Research and Development of Automatic Control System for Electric Arc Furnace Electrode Positioning // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – vol.785, pp. 707-713. doi: [10.4028/www.scientific.net/amm.785.707](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.785.707).
6. Ghiormez L., Panoiu M. Current control of a 3-phase electric arc furnace using fuzzy logic // ANNALS of Faculty Engineering Hunedoara – International Journal of Engineering. – 2015. – Fascicule 4 Tome XIII. – pp. 237-242.
7. Nikolaev A.A., Tulupov P.G. Method of setting optimum asymmetric mode of operation of electric arc furnace // 2016 11th France-Japan & 9th Europe-Asia Congress on Mechatronics (MECATRONICS) / 17th International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM), Jun. 2016. doi: [10.1109/mecatronics.2016.7547111](https://doi.org/10.1109/mecatronics.2016.7547111).
8. Zheng T., Makram E.B. An adaptive arc furnace model // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2000. – vol.15. – no.3. – pp. 931-939. doi: [10.1109/61.871355](https://doi.org/10.1109/61.871355).
9. Hooshmand R., Banejad M., Torabian Esfahani M. A New Time Domain Model for Electric Arc Furnace // Journal of Electrical Engineering. – 2008. – vol.59. – no.4. – pp. 195-202.
10. Пугачов В.С. Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления. – М.: Физматиздат, 1960. – 883 с.
11. Казаков В.А. Введение в теорию марковских процессов и некоторые радиотехнические задачи. – М.: Советское радио, 1973. – 232 с.
12. Lozynskyy O., Lozynskyy A., Paranchuk Y., Paranchuk R., Marushchak Y., Malyar A. Analysis and Synthesis of Intelligent System for Electric Mode Control in Electric Arc Furnace // Part of the Lecture Notes in Electrical Engineering book series (vol.452). – Analysis and Simulation of Electrical and Computer Systems. – 2017. – pp. 111-130. doi: [10.1007/978-3-319-63949-9_7](https://doi.org/10.1007/978-3-319-63949-9_7).
13. Lozynskyy O., Lozynskyy A., Paranchuk Y., Paranchuk R., Holovach I., Tsyapa V. Fuzzy extreme control and electric mode coordinates stabilization of arc steel-melting furnace // 2016 XIth International Scientific and Technical Conference Computer Sciences and Information Technologies (CSIT). – Sep. 2016. doi: [10.1109/stc-csit.2016.7589866](https://doi.org/10.1109/stc-csit.2016.7589866).
14. Lozynskyy O., Paranchuk Y., Paranchuk R. Fuzzy control law of electrode travel in arc steelmaking furnace // 16th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE). – Sep. 2015. doi: [10.1109/cpee.2015.7333349](https://doi.org/10.1109/cpee.2015.7333349).
15. Лозинский О.Ю., Паранчук Я.С. Оптимизация режимов системы управления процессом электросталеплавления в дуговых сталеплавильных печах // Электротехника. – 2004. – №6. – С. 50-54.
16. Красовский А.А. Статистическая теория переходных процессов в системах управления. – М.: Наука, 1968. – 240 с.
17. Lozynskyy O.Y., Paranchuk Y.S., Paranchuk R.Y., Matico F.D. Development of methods and means of computer simulation for studying arc furnace electric modes // Electrical engineering & electromechanics. – 2018. – no.3. – pp. 28-36. doi: [10.20998/2074-272X.2018.3.04](https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.3.04).

18. Lozynskyy O., Paranchuk Y., Stakhiv P. The Study of Dynamics of the Two-Loop Arc Furnace Electric Mode ACS on a Simulink-model // *Przegląd Elektrotechniczny*. – 2018. – vol.1. – no.12. – pp. 24-27. doi: [10.15199/48.2018.12.06](https://doi.org/10.15199/48.2018.12.06).

REFERENCES

1. Lozynskyy O.Yu., Maruschak Y.Yu. Three-dimensional stochastic model of the electric mode regulation of an arc furnace. *Industrial Process Automation in Engineering and Instrumentation*, 1993, no.31, pp. 7-11. (Ukr).
2. Lozynskyy O.Yu., Paranchuk Ya.S., Lozynskyy A.O. Optimization of dynamic regimes of interconnected electro-mechanical systems. *Bulletin of Lviv Polytechnic National University, «Electric Power and Electromechanical Systems» series*, 2001, no.421, pp. 98-103. (Ukr).
3. Lozynskyy O.Yu., Paranchuk Ya.S., Moroz V.I. Synthesis of the control process for electromechanical systems that are under the influence of random perturbations. *Bulletin of NTU «KhPI». Series: Problems of automated electric drive. Theory and practice*, 1994, pp. 104-106. (Ukr).
4. Lozynskyy O.Yu., Paranchuk Ya.S., Tsyapa V.B. Mathematical description of the dynamics of the regulation of the position of the electrodes of the chipboard model in the space of states. *Bulletin of Lviv Polytechnic National University, «Electric Power and Electromechanical Systems» series*, 2017, no.840, pp. 54-60. (Ukr).
5. Nikolaev A., Povelitsa E., Kornilov G., Anufriev A. Research and Development of Automatic Control System for Electric Arc Furnace Electrode Positioning. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol.785, pp. 707-713. doi: [10.4028/www.scientific.net/amm.785.707](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.785.707).
6. Ghiormez L., Panou M. Current control of a 3-phase electric arc furnace using fuzzy logic. *ANNALS of Faculty Engineering Hunedoara – International Journal of Engineering*, 2015, Fascicule 4 Tome XIII, pp. 237-242.
7. Nikolaev A.A., Tulupov P.G. Method of setting optimum asymmetric mode of operation of electric arc furnace. *2016 11th France-Japan & 9th Europe-Asia Congress on Mechatronics (MECATRONICS) / 17th International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM)*, Jun. 2016. doi: [10.1109/mecatronics.2016.7547111](https://doi.org/10.1109/mecatronics.2016.7547111).
8. Zheng T., Makram E.B. An adaptive arc furnace model. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2000, vol.15, no.3, pp. 931-939. doi: [10.1109/61.871355](https://doi.org/10.1109/61.871355).
9. Hooshmand R., Banejad M., Torabian Esfahani M. A New Time Domain Model for Electric Arc Furnace. *Journal of Electrical Engineering*, 2008, vol.59, no.4, pp. 195-202.
10. Pugachov V.S. *Teoriya sluchainykh funktsii i ee primeneniye k zadacham avtomaticheskogo upravleniya* [The theory of random functions and its application to problems of automatic control]. Moscow, Fizmatizdat Publ., 1960. 883 p. (Rus).
11. Kazakov V.A. *Vvedeniye v teoriyu markovskikh protsessov i nekotorye radiotekhnicheskie zadachi* [Introduction to the theory of Markov's processes and some radio engineering problems]. Moscow, Soviet radio Publ., 1973. 232 p. (Rus).
12. Lozynskyy O., Lozynskyy A., Paranchuk Y., Paranchuk R., Marushchak Y., Malyar A. Analysis and Synthesis of Intelligent System for Electric Mode Control in Electric Arc Furnace. *Part of the Lecture Notes in Electrical Engineering book series (vol.452). Analysis and Simulation of Electrical and Computer Systems*, 2017, pp. 111-130. doi: [10.1007/978-3-319-63949-9_7](https://doi.org/10.1007/978-3-319-63949-9_7).
13. Lozynskyy O., Lozynskyy A., Paranchuk Y., Paranchuk R., Holovach I., Tsyapa V. Fuzzy extreme control and electric mode coordinates stabilization of arc steel-melting furnace. *2016 XIth International Scientific and Technical Conference Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*, Sep. 2016. doi: [10.1109/stc-csit.2016.7589866](https://doi.org/10.1109/stc-csit.2016.7589866).
14. Lozynskyy O., Paranchuk Y., Paranchuk R. Fuzzy control law of electrode travel in arc steelmaking furnace. *16th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*, Sep. 2015. doi: [10.1109/cpee.2015.7333349](https://doi.org/10.1109/cpee.2015.7333349).

15. Lozynskyy O.Yu., Paranchuk Y.S. Optimization of the modes of the process control system for electric steel-melting in arc steel-smelting furnaces. *Electrical engineering*, 2004, no.6, pp. 50-54. (Rus).

16. Krasovskiy A.A. *Statisticheskaya teoriya perekhodnykh protsessov v sistemakh upravleniya* [Statistical theory of transient processes in control systems]. Moscow, Nauka Publ., 1968. 240 p. (Rus).

17. Lozynskyy O.Y., Paranchuk Y.S., Paranchuk R.Y., Matico F.D. Development of methods and means of computer simulation for studying arc furnace electric modes. *Electrical engineering & electromechanics*, 2018, no.3, pp. 28-36. doi: [10.20998/2074-272X.2018.3.04](https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.3.04).

18. Lozynskyy O., Paranchuk Y., Stakhiv P. The Study of Dynamics of the Two-Loop Arc Furnace Electric Mode ACS on a Simulink-model. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2018, vol.1, no.12, pp. 24-27. doi: [10.15199/48.2018.12.06](https://doi.org/10.15199/48.2018.12.06).

Надійшла (received) 30.04.2019

Лозинський Орест Юліанович¹, д.т.н., проф.,
Лозинський Андрій Орестович¹, д.т.н., проф.,
Паранчук Ярослав Степанович¹, д.т.н., проф.,
Паранчук Роман Ярославович¹, к.т.н.,
¹ Національний університет «Львівська політехніка»,
79013, Львів, вул. С. Бандери, 12,
e-mail: yparanchuk@yachoo.com

O.Y. Lozynskyy¹, A.O. Lozynskyy¹, Y.S. Paranchuk¹, R.Y. Paranchuk¹
¹ Lviv Polytechnic National University,
12, S. Bandera Str., Lviv, 79013, Ukraine.

Synthesis and analysis of arc furnace electrical mode control system on the basis of three-dimensional phase currents vector distribution.

Goal. The purpose of the article is to create the method for the operative synthesis of an arc steel-melting furnace (ASF) electric mode (EM) control signal on the basis of a three-dimensional arc currents vector, which takes into account the stochastic nature of the processes in the melting space and power circuit and has low sensitivity to the control object parameters changes, as well as development of the control system structure for its implementation.

Method. The basis of the created control method is formed on the statistical theory of dynamical systems, as well as the provisions of the statistical theory of optimal control based on the Fokker-Planck-Kolmogorov equation, which enables to synthesize operational control by the criterion of approaching the regulated coordinate distribution density to the δ -function, that is to minimize the dispersion of the three-dimensional furnace phases arc currents vector.

Results. The system of equations for operational real-time calculation of control influences of the thyristor switch of phase inductors, included in the power supply circuits of three-phase arcs, and the structural scheme of the adaptive contour for the formation of three-dimensional phase currents vector dispersion for the implementation of adaptive optimal control were obtained. **Scientific novelty.** For the first time, based on the Fokker-Planck-Kolmogorov equation, we obtain a system of equations representing a mathematical model of a stochastic adaptive optimal control of the arc furnace electric mode by the criterion of a minimum dispersion of three-dimensional phase (arcs) currents vector, which enables, in comparison with known methods, to increase dynamic precision of the arc currents stabilization at the level set by the criteria of energy efficiency and electromagnetic compatibility values. **Practical value.** The use of the proposed adaptive optimal control model and structural system scheme for its implementation allows, in comparison with the serial arc power regulators, to improve the dynamic accuracy of the arc current currents stabilization at the level of given optimal settings and, based on this, to improve the energy efficiency and electromagnetic compatibility indices of the arc furnace and power supply network. References 18, figures 5.

Key words: arc furnace, electric mode, three-dimensional vector of phase currents, stochastic control, dispersion, optimization, adaptation, arc current control circuit.