

О. Ю. ЛОЗИНСЬКИЙ, Я. Ю. МАРУЩАК, В. І. МОРОЗ, Я. С. ПАРАНЧУК

ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ПРЕДСТАВЛЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО РЕЖИМУ ДУГОВОЇ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЇ ПЕЧІ МОДЕЛЛЮ ЗМІНИ СТАНІВ

Розвинуто теорію представлення електричного режиму (ЕР) дугових сталеплавильних печей (ДСП) моделлю зміни станів. Уточнено граф зміни станів процесу плавлення, який враховує як особливості перебігу технологічного процесу плавлення в дугових сталеплавильних печах, так і дію регулятора положення електродів. Створено математичну модель зміни станів електричного режиму ДСП у вигляді системи диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена, яка базується на теорії Марковських процесів з дискретними станами і неперервним часом. Отримано розв'язок складної системи диференціальних рівнянь у вигляді часових залежностей процесу зміни ймовірностей перебування електричного режиму у різних станах та зроблено їх аналіз. Виконано дослідження впливу швидкодії системи автоматичного регулювання (САР) положення електродів на значення ймовірності станів технологічного процесу. Показано значимість практичного застосування отриманої динамічної моделі зміни станів, зокрема для комплексного поліпшення показників енергоефективності плавлення сталей в дугових сталеплавильних печах.

Ключові слова: дугова сталеплавильна піч, електричний режим, ймовірність стану електричного режиму, Марковські випадкові процеси, інтенсивності потоків збурень і керуючих впливів.

О. Ю. ЛОЗИНСКИЙ, Я. Ю. МАРУЩАК, В. И. МОРОЗ, Я. С. ПАРАНЧУК

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РЕЖИМА ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ МОДЕЛЬЮ СМЕНЫ СОСТОЯНИЙ

Развита теорию представления электрического режима дуговых сталеплавильных печей (ДСП) моделью смены состояний. Получено уточненный граф изменения состояний процесса плавления, учитывающий как особенности протекания технологического процесса плавления в дуговых печах, так и действие регулятора положения электродов. Создана математическая модель изменения состояний электрического режима ДСП в виде системы дифференциальных уравнений Колмогорова-Чепмена, основанная на теории Марковских процессов с дискретными состояниями и непрерывным временем. Получено решение сложной системы дифференциальных уравнений в виде временных зависимостей изменения вероятностей пребывания электрического режима в разных состояниях и проведен их анализ. Выполнено исследование влияния быстродействия системы автоматического регулирования (САР) положения электродов на значение вероятности состояний электрического режима. Показана практическая значимость использования полученной динамической модели изменения состояний, в частности для комплексного улучшения показателей энергоэффективности плавления сталей в дуговых сталеплавильных печах.

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, электрический режим, вероятность состояния электрического режима, Марковские случайные процессы, интенсивности потоков возмущений и управляющих воздействий.

O. Y. LOZYSKYI, Y. Y. MARUSHCHAK, V. I. MOROZ, Y. S. PARANCHUK

TECHNOLOGICAL PECULIARITIES OF THE STEEL-MELTING FURNACE ELECTRIC MODE REPRESENTATION BY STATE CHANGE MODEL

The theory of the arc furnaces (AF) electric mode (EM) representation using the state change model is developed. The graph of changes of the melting process states, which takes into account both the peculiarities of the melting process flow in arc furnaces and the action of the electrodes position regulator, is specified. A mathematical model of the AF EM states change in the form of a Kolmogorov-Chapman differential equations system is created, which is based on the theory of Markov processes with discrete states and continuous time. The solution of a complex differential equations system in the form of the process of the probability change time dependencies of the electric mode presence in different states is obtained and their analysis is done. The study of the influence of the electrodes position automatic control system (ACS) speed on the value of the technological process states probability is fulfilled. The significance of the practical application of the obtained dynamic state change model is shown, in particular for the complex improvement of energy efficiency indices of steels melting in arc steelmaking furnaces.

Key words: arc furnace, electric mode, probability of electric mode state, Markov random processes, intensity of perturbation flows and control influences

Вступ. Дугові сталеплавильні печі – це потужні електротехнологічні установки, що відносяться до класу складних систем і характеризуються випадковим характером навантаження 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.

Метою даної роботи є розвинути теорію представлення електричного режиму ДСП моделлю зміни станів, зокрема створити уточнений граф зміни станів системи регулювання електричного режиму, який вра-

ховував би особливості технологічного процесу плавлення з використанням регулятора переміщення електродів, та саму математичну модель динаміки зміни станів електричного режиму.

Проблема комплексного покращання показників енергоефективності та електромагнітної сумісності дугових печей диктується необхідністю підвищення конкурентоспроможності електросталей та високолегованих сплавів на внутрішньому та зовнішньому ринку металопродукції. Її стан в значній мірі визначається рівнем досконалості системи керування, що в свою чергу визначається прийнятою моделлю її синтезу.

Зрозуміло, що для таких електротехнологічних стохастичних об'єктів найдоцільніше використовувати моделі, які базуються на ймовірнісних характеристи-

ках процесів збурень, тобто найповніше відповідають природі процесів, які протікають в ДСП.

Аналіз відомих рішень. Вперше задача представлення електричного режиму ДСП моделлю зміни станів розв'язана в роботі [1], де запропоновано методику розрахунку часових значень ймовірностей цих станів, яка базується на представленні процесів зміни станів Марковською моделлю випадкових процесів з дискретними станами і неперервним часом.

Стан електричного режиму в кожній фазі ДСП згідно з [1] ідентифікується значенням струму дуги, яке може бути заданим діапазоном незначних відхилень для даної технологічної стадії плавлення, може знаходитися в зоні директивних відхилень (раціональні електричні режими), або може попадати в зону екстремальних (критичних, аварійних) відхилень. Приймаючи, що система переходить зі стану в стан під дією пуасонівських потоків подій, введемо поняття інтенсивностей потоків збурень, а також інтенсивностей потоків керуючих впливів, що дасть змогу сформулювати для опису зміни ймовірностей станів електричного режиму ДСП систему диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена і внаслідок її розв'язку отримати часові залежності зміни ймовірностей станів електричного режиму.

Аналізуючи графіки зміни в часі ймовірностей станів електричного режиму ДСП можна вибрати потрібну інтенсивність потоку керуючих впливів, який забезпечує знаходження ЕР в заданому стані при дії відповідного потоку збурень.

Роботами, які для синтезу керуючих впливів в дугових сталеплавильних печах використовують ймовірнісні моделі процесів в таких об'єктах, слід признати праці [2, 3]. Проте це статті, в яких або за критерій функціонування системи приймають моментні функції різних координат, або синтезуються процеси керуючих впливів на основі спектральних характеристик таких координат.

В згаданій роботі [1] розроблено основні аспекти керування ЕР ДСП з метою забезпечення його знаходження в заданому стані з максимальною ймовірністю. Граф станів динамічної системи регулювання електричного режиму ДСП, представлений в цій роботі, показано на рис. 1.

На цьому рисунку стан X_1 характеризує заданий електричний режим ДСП; стан X_2 характеризується директивними відхиленнями електричного режиму від заданого значення; стан X_3 характеризується екстремальними (аварійними) відхиленнями електрично-

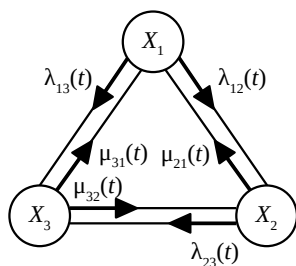


Рис. 1. Граф станів динамічної системи регулювання електричного режиму ДСП

го режиму. У стан X_3 система може переходити як у наслідок виникнення коротких замикань, так і обривів дуги. Тут потрібно відзначити, що такий граф станів не враховує технологічних особливостей стану X_3 .

Виклад основного матеріалу. Для найбільш загального випадку представимо модель зміни станів електричного режиму графом рис. 2.

На цьому рисунку стан X_3 з рис.1 характеризується екстремальними відхиленнями ЕР і на рис. 2 він представлений двома станами: станом X_3 , який характеризується відхиленням електричного режиму за рахунок технологічного короткого замикання; станом X_4 , який характеризується відхиленням електричного режиму за рахунок технологічного обриву дуги.

Таке представлення відповідає умовам регулювання електричного режиму ДСП електрогідравлічними чи електромеханічними регуляторами потужності дуг. Щоб ліквідувати обрив дуги, потрібно спочатку її запалити, тобто торкнутися електродом(и) шихти, тобто спричинити експлуатаційне коротке замикання, а потім розтягувати дугу до заданої довжини.

Таким чином, кожен стан електричного режиму у процесі плавлення в дуговій печі може змінюватися під дією двох потоків впливів – потоку збурень, які діють в плавильному просторі дугової сталеплавильної печі і які виводять електричний режим із заданого стану, і потоку керуючих впливів, які є реакцією системи регулювання довжин дуг з метою усунення відхилень координат електричного режиму від директивно заданих.

Збурення електричного режиму за причини дії випадкових змін довжин дуг відбувається миттєво і тому $\lambda_{ij}(t) = \lambda_{ij}$, тобто інтенсивності збурень не залежать від часу. Значення інтенсивностей таких збурень може змінюватися лише за рахунок пере ходу режиму в іншу технологічну стадію, які характеризуються різними амплітудними та частотними параметрами спектральної густини збурень. Ми ж в цій роботі розглядаємо зміну станів електричного режиму упродовж однієї конкретної технологічної стадії плавлення сталі, наприклад технологічної стадії проплавлення колодязів в твердій шихті. Також, як показують приведені в роботі [4] результати дослідження, постійними для конкретної стадії можна прийняти і інтенсивності реакцій системи регулювання положення електродів.

З урахуванням сказаного, система рівнянь Колмогорова-Чепмена для динаміки зміни ймовірностей станів електричного режиму прийме вигляд:

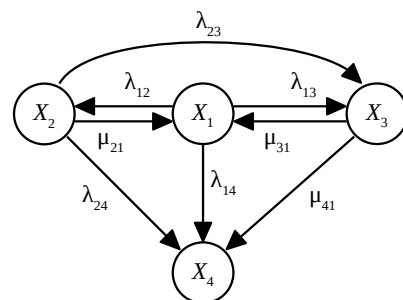


Рис. 2. Модель зміни станів електричного режиму дугової печі у процесі електросталеплавлення

$$\begin{aligned} \frac{dP_1(t)}{dt} &= -(\lambda_{12} + \lambda_{13} + \lambda_{14})P_1(t) + \mu_{21} \cdot P_2(t) + \mu_{31} \cdot P_3(t); \\ \frac{dP_2(t)}{dt} &= -(\lambda_{23} + \lambda_{24} + \mu_{21})P_2(t) + \lambda_{12} \cdot P_1(t); \\ \frac{dP_3(t)}{dt} &= -\mu_{31} \cdot P_3(t) + \lambda_{13} \cdot P_1(t) + \lambda_{23} \cdot P_2(t) + \mu_{43} \cdot P_4(t); \\ \frac{dP_4(t)}{dt} &= -\mu_{43} \cdot P_4(t) + \lambda_{14} \cdot P_1(t) + \lambda_{24} \cdot P_2(t); \\ P_3(0) &= 1. \end{aligned} \quad (1)$$

де $P_1(t)$, $P_2(t)$, $P_3(t)$, $P_4(t)$ – ймовірності перебування технологічного процесу у відповідному стані.

Традиційно у рівняннях Колмогорова-Чепмена початкові умови першого стану приймаються рівними одиниці, а всі решта – нульові. Для технологічного процесу плавлення сталей в дугових печах вказане вище твердження не справджується. Особливістю динаміки ЕР ДСП є те, що запалювання дуг, а значить початок технологічного процесу плавлення, починається з режиму короткого замикання. Тому для стану ХЗ (рис. 2) $P_3(0) = 1$, а всі інші початкові умови станів ЕР будуть нульовими.

Крім цього, зазначимо, що традиційно рівняння Колмогорова-Чепмена стосуються графу станів, котрі мають таку властивість, що права частина будь-якого рівняння може бути отримана як лінійна комбінація правих частин решти рівнянь. Щоб усунути проблему лінійної залежності системи рівнянь традиційно усувають із розгляду будь-яке рівняння, замінюючи його рівнянням повної групи подій.

Як видно із записаної вище системи рівнянь Колмогорова-Чепмена (1) для процесу плавлення в дуговій печі, права частина таких рівнянь не є лінійно залежною. Тому для визначення часових залежностей $P_i(t)$, числово розв'яжемо отриману систему диференціальних рівнянь (1) для певних значень інтенсивностей переходів з урахуванням вказаних вище значень початкових умов.

Так, на основі аналізу процесу електросталеплавлення в ДСП-100 НЗА на технологічному період проплавлення колодязів, встановлено, що інтенсивності переходів, що зумовлені збуренням електричного режиму, мають наступні значення: $\lambda_{12} = 10,29 \text{ 1/c}$; $\lambda_{13} = 4,5 \text{ 1/c}$; $\lambda_{23} = 6,86 \text{ 1/c}$; $\lambda_{14} = 2 \text{ 1/c}$; $\lambda_{24} = 2,3 \text{ 1/c}$.

Фізично інтенсивність «відновлення» μ характеризує швидкість роботи САР положення електродів, а тому приймається однаковою для всіх станів і становить $\mu = 3 \text{ c}^{-1}$.

Для наведених вище значень параметрів системи диференціальних рівнянь (1) шляхом її числового інтегрування отримано динамічні процеси (часові залежності) зміни ймовірностей перебування електротехнічної системи – електричного режиму дугової печі типу ДСП-100 НЗА на період проплавлення колодязів у твердих шихті, у різних станах (стани згідно рис. 2), які показано на рис. 3.

Як видно з отриманих часових залежностей динаміки зміни станів, перехід в зону усталених значень ймовірностей станів відбувається упродовж однієї секунди.

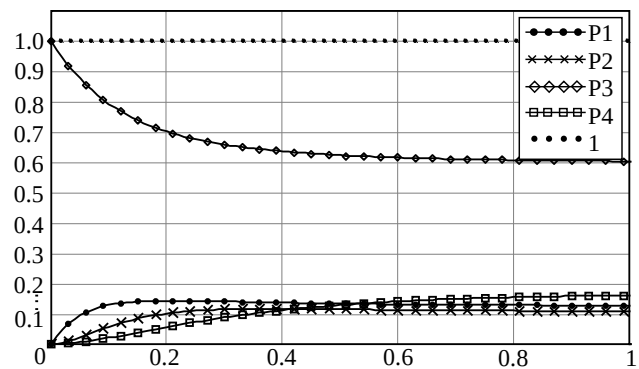


Рис. 3. Часові залежності зміни ймовірностей станів електричного режиму для $(\mu = 3 \text{ c}^{-1})$

Крім цього виявилось, що і в динамічному і в усталеному режимі сума всіх чотирьох ймовірностей дорівнювала одиниці. Це означає, що розглядувані стани утворюють повну групу подій. Отож, наведені часові залежності – розв'язки системи (1), підтвердили правомірність представлення процесу плавлення в ДСП графом, представленим на рис. 2, і використання відповідної системи диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена без порушення представлення реальних фізичних процесів під час плину технологічного процесу плавлення сталі в ДСП-100 ЗНА. Адже при створенні математичної моделі (1) не закладалася умова наявності повної групи подій, що подаються розглядуваними стадіями. У результаті числового інтегрування системи (1) виявилось, що ця умова виконується, а це значить, що вибір всіх можливих станів електричного режиму здійснено коректно.

З іншого боку, з'явилася можливість замінити будь-яке диференціальне рівняння в системі рівнянь (1) на алгебричне рівняння $\sum P_i(t)$, що визначається умовою повної групи подій. Тим самим, знайдено підтвердження традиційної методики запису рівнянь Колмогорова-Чепмена із нормувальним рівнянням для технологічного процесу. Виглядає так, що це одне й теж, але причиною введення рівняння $\sum P_i(t)$ в математичну модель технологічного процесу не є лінійно залежні вирази правих частин рівнянь Колмогорова-Чепмена, а спрощення математичного опису графу станів технологічного процесу плавлення.

Використовуючи створену математичну модель (1) графу станів (рис. 2), було також проведено дослідження впливу швидкодії системи регулювання положення електродів дугової сталеплавильної печі на динаміку процесу зміни ймовірності станів технологічного процесу (прийнято $\mu = 6 \text{ c}^{-1}$).

Аналіз наведених на рис. 4 часових залежностей зміни ймовірностей станів показує, що має місце значний вплив швидкодії μ системи регулювання положення електродів дугової печі на динаміку зміни ймовірностей станів $P_1(t)$ і $P_3(t)$. Зростання швидкодії САР ЕР ДСП призводить до збільшення ймовірності перебування системи в бажаному стані $P_1(t)$ і зниження $P_3(t)$.

Тут потрібно зазначити, що ймовірність стану $P_3(t)$ все ж залишається дещо вищою за інші ймовірності.

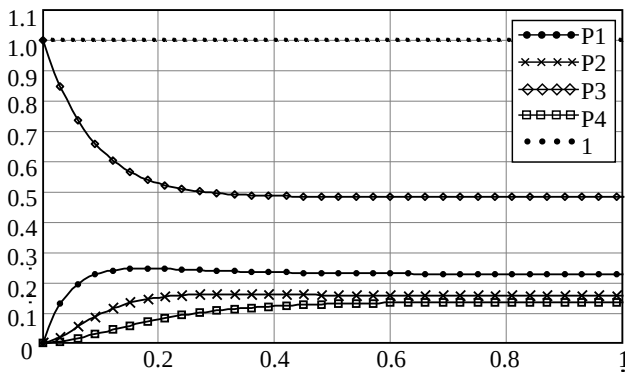


Рис. 4. Часові залежності зміни ймовірностей станів електричного режиму для $\mu = 6 \text{ с}^{-1}$

Це можна пояснити тим, що даний стан визначається не одним, а двома факторами:

а) станом експлуатаційного короткого замикання, у який цілеспрямовано переводиться електричний режим система автоматичного регулювання у процесі усунення (відпрацювання) обриву дуги;

б) станом короткого замикання, що виникає внаслідок дії екстремального випадкового збурення за довшиною дуги у тому чи іншому дуговому проміжку.

У той же час всі інші стани обумовлені тільки збуреннями за довжинами дуг у дугових проміжках кожної фази.

Висновки. 1. Опрацьована в статті математична модель зміни станів електричного режиму дугової сталеплавильної печі, яка базується на теорії Марковських процесів з дискретними станами і неперервним часом, на відміну від існуючих моделей опису станів враховує технологічні особливості процесу електросталеплавлення дугових печей.

2. Отримана модель дає змогу виконувати комп'ютерні дослідження впливу на показники динаміки процесів зміни ймовірностей станів електричного режиму у різних технологічних стадіях параметрів регуляторів потужності дуг дугових сталеплавильних печей.

3. Практична значимість опрацьованої математичної моделі зміни станів електричного режиму ДСП полягає в можливості отримання за результатами математичних експериментів бажаних значень інтенсивності реакцій регуляторів потужності дуг, реалізація яких дасть змогу комплексно поліпшити низку показ-

ників енергоефективності плавлення сталей в дугових сталеплавильних печах, на що будуть скеровані подальші дослідження авторів.

Список літератури

- Lozynskiy O., Lozynskiy A., Paranchuk Y. Representation of electrical mode in arc furnaces by a state change model and determination of the possibilities of these states. *Computational Problems of Electrical Engineering*. 2018. Vol. 8, №1. pp. 26 – 30.
- Лозинський О.Ю., Марущак Я.Ю. Тривимірний стохастична модель системи регулювання електричного режиму дугової сталеплавильної печі. *Автоматизація виробничих процесів в машинобудуванні та приладобудуванні*. Львів: Світ, 1993, Вип. 31. С. 7 – 11.
- Лозинський О.Ю., Паранчук Я.С., Лозинський А.О. Оптимізація динамічних режимів взаємозалежних електромеханічних систем. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Сер.: *Електроенергетичні та електромеханічні системи*. Львів: НУ «Львівська політехніка», 2001, № 421. С. 98 – 103.
- Соколов М.М., Грасевич В.Н. *Электрооборудование механизмов электротермических установок: учебное пособие для вузов*. Москва: Энергоатомиздат, 1983. 320 с.

References (transliterated)

- Lozynskiy O., Lozynskiy A., Paranchuk Y. Representation of electrical mode in arc furnaces by a state change model and determination of the possibilities of these states. *Computational Problems of Electrical Engineering*. 2018. Vol. 8, №1. pp. 26 – 30.
- Lozynskiy O.Iu., Marushchak Ya.Iu. Tryvymirna stokhastychna model systemy rehulivannia elektrychnoho rezhymu duhovoї staleplavylnoi pechi [Three-dimensional stochastic model of the electric mode regulation of an arc furnace] *Avtomatyzatsiia vyrobnychkykh protsesiv v mashynobuduvanni ta prylobuduvanni* [Industrial Process Automation in Engineering and Instrumentation]. Lviv: Svit, 1993, Vyp. 31. pp 7 – 11.
- Lozynskiy O.Iu., Paranchuk Ya.S., Lozynskiy A.O. Optymizatsiia dynamichnykh rezhymiv vzaiemozaleznykh elektromekhanichnykh system [Optimization of dynamic regimes of interconnected electromechanical systems]. *Visnyk Natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnika»*. Ser.: *Elektroenergetychni ta elektromekhanichni systemy* [Bulletin of Lviv Polytechnic National University. Series: Electric Power and Electromechanical Systems]. Lviv: NU «Lvivska politekhnika», 2001, № 421. pp. 98 – 103.
- Sokolov M.M., Grasevich V.N. *Elektrooborudovanie mekhanizmov elektrottermicheskikh ustanovok: uchebnoe posobie dlya vuzov* [Electrical equipment of the mechanisms of electrothermal plants: university textbook]. Moskva: Energoatomizdat, 1983. 320 p.

Надійшла 15.01.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Лозинський Орест (Лозинский Орест, Lozynskiy Orest) – Заслужений діяч науки і техніки України, доктор технічних наук, професор, Національний університет «Львівська політехніка», професор кафедри електромехатроніки та комп'ютеризованих електромеханічних систем; м. Львів, Україна; Orcid ID: 0000-0002-4943-8746, e-mail: orest.y.lozynskiy@lpnu.ua

Марущак Ярослав (Марущак Ярослав, Marushchak Yaroslav) – доктор технічних наук, професор, Національний університет «Львівська політехніка», професор кафедри електромехатроніки та комп'ютеризованих електромеханічних систем; м. Львів, Україна; Orcid ID: 0000-0002-7901-3343, e-mail: ya.marushchak@gmail.com

Мороз Володимир (Мороз Володимир, Moroz Volodymyr) – доктор технічних наук, професор, Національний університет «Львівська політехніка», професор кафедри електромехатроніки та комп'ютеризованих електромеханічних систем; м. Львів, Україна; Orcid ID: 0000-0001-7130-3525; e-mail: volodymyr.i.moroz@lpnu.ua

Паранчук Ярослав (Паранчук Ярослав, Paranchuk Yaroslav) – доктор технічних наук, професор, Національний університет «Львівська політехніка», професор кафедри електромехатроніки та комп'ютеризованих електромеханічних систем; м. Львів, Україна; Orcid ID: 0000-0002-8400-1267, e-mail: yparanchuk@yahoo.com