

Список использованных источников

1. *Теплофізика* механічної обробки : підручник / О. В. Якимов, А. В. Усов, П. Т. Слободяник, Д. В. Іоргачов. – Одеса : Астропринт, 2000. – 256 с.
2. *Барац Я. И.* Тепловые явления при обработке отверстий / Я. И. Барац, Л. Р. Милованова // *Стин.* – 2008. – № 4. – С. 22–26.
3. *Татьянченко А. Г.* Особенности развития тепловых процессов при чистовой обработке отверстий комбинированным осевым инструментом / А. Г. Татьяначенко, И. Н. Лаппо // *Вестник СевГТУ.* – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2013. – Вып. 140: Машиноприборостроение и транспорт. – С. 178–183.
4. *Малишко А. О.* Основы теорії проектування осьових комбінованих інструментів : авто-реф. дис. ... д-ра техн. наук : спец. 05.03.01 «Процеси механічної обробки, верстати та інструменти» / І. О. Малишко. – Донецьк : ДонДТУ, 1995. – 36 с.
5. *Кириллов К. Н.* Сверла повышенной жесткости для труднообрабатываемых материалов / К. Н. Кириллов // *Спиральные сверла : сборник материалов всесоюзного совещания по сверлам / под ред. К. П. Имшенника.* – М. : Машиностроение, 1966. – С. 38–53.
6. *Общемашиностроительные* нормативы времени и режимов резания для нормирования работ, выполняемых на универсальных и многоцелевых станках с ЧПУ : в 2 ч. – М. : Экономика, 1990. – 208 с.
7. *Справочник* технолога машиностроителя : в 2 т. Т. 2 / под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1985. – 496 с.

УДК 519.711:621.365

Р.М. Хрестін, викладач

Нікопольський технікум Національної металургійної академії України, м. Нікополь, Україна

РОЗРОБЛЕННЯ СТРУКТУРИ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЕНЕРГЕТИЧНОГО БАЛАНСУ ДУГОВОЇ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЇ ПЕЧІ

Р.Н. Хрестин, преподаватель

Никопольский техникум Национальной металлургической академии Украины, г. Никополь, Украина

РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО БАЛАНСА ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ

Roman Khriestin, teacher

Nikopol College of National Metallurgical Academy of Ukraine, Nikopol, Ukraine

DESIGN OF THE STRUCTURE OF THE MATHEMATICAL MODEL OF THE ENERGY BLOCK ELECTRIC ARC FURNACE

Розглянуто математичну модель енергетичного блока дугової сталеплавильної печі, яка є складовою частиною для створення системи управління режимами плавлення. Створено блок-схему моделі теплового блока, яка дозволяє визначити динаміку температур, потужностей та енергій плавильного процесу. Проведено аналіз цих параметрів. Аналіз показав відповідність результатів моделювання та результатів, що отримані на діючих печах.

Ключові слова: енергетичні режими дугової печі, керування параметрами плавлення, математична модель, динамічні зміни енергій та потужностей печі, температура шихти, температура дуги.

Рассмотрена структура математической модели энергетического блока дуговой сталеплавильной печи, которая является основой для создания системы управления режимами плавки. Создана блок-схема модели теплового блока, которая позволяет определять динамику температур, мощностей и энергий плавильного процесса. Проведен анализ этих параметров. Анализ показал соответствие результатов моделирования и результатов, полученных на действующих печах.

Ключевые слова: энергетические режимы дуговой печи, управление параметрами плавки, математическая модель, динамические изменения энергий и мощностей печи, температура шихты, температура дуги.

The structure of the mathematical model of the energy block electric arc furnace, which is part for the establishment of a system of management of modes of melting. Created block diagram model of the thermal unit, which allows you to determine the dynamics of temperature, power and energy of the melting process. These parameters are analyzed. Analysis has shown conformity the simulation results and the results obtained on the working furnaces.

Key words: energy regimes arc furnace, control of parameter smelting, the mathematical model, the dynamic changes in the energy and power of the furnace, the temperature of the metal, the temperature of the arc.

Постановка проблеми. Дугові сталеплавильні печі (ДСП) використовуються не тільки на профільних металургійних підприємствах, а й на машинобудівних підприємствах, де вони входять до складу ливарних цехів [1]. При цьому навіть ДСП малої ємності (з обсягом ванни до 6 т) є одними з найбільш потужних споживачів енергії [2]. Зважаючи на вищевикладене, а також на появу нових можливостей покращення керування ДСП, знов і знов виникає необхідність розроблення алгоритмів керування режимами плавлення. Для вирішення цієї задачі необхідна побудова адекватних та, водночас, порівняно простих математичних моделей ДСП. Однією зі складових частин таких моделей має бути блок, що відтворює енергетичні процеси плавлення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема побудови конструкції та системи керування ДСП, яка б забезпечувала економію електроенергетичних та матеріальних ресурсів у процесі плавлення, є темою багатьох наукових праць [3; 4; 5; 6].

Найбільш важливі показники ДСП характеризують витрати потужності, геометричні розміри, виробничі показники та технологічні особливості процесу [7]. Для ДСП всі ці показники тією чи іншою мірою визначаються електричними параметрами, оскільки під час розплавлення шихти головним чином витрачається електроенергія. Залишок (10–35 %) становить енергія хімічних процесів екзотермічних реакцій [8].

Складність безпосередніх вимірів багатьох параметрів технологічного процесу плавлення породжує значну кількість різних поглядів на питання визначення складових енергетичного балансу печей та їх співвідношення. Аналіз цих поглядів та порівняння їх з даними, що отримані на реальних печах, дозволяють зупинитися на наступному. Для дугового розряду як головні вхідні величини приймають струм та напругу дуги [9]. Дуга втрачає енергію внаслідок теплопровідності та випромінювання [10].

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Більшість відомих нині математичних моделей енергетичних процесів ДСП є або достатньо складними (а отже, потребують великих ресурсів ЕОМ), або не повною мірою відтворюють динамічні процеси змін енергетичного стану у просторі ванни ДСП.

Мета статті. Метою цієї роботи є отримання математичної моделі енергетичного блоку ДСП. Отримана модель має стати складовою частиною повної моделі ДСП. З огляду на це отримана модель енергетичного блоку повинна бути достатньо простою, потребувати мінімально можливої кількості ресурсів машинного часу. З іншого боку, модель повинна давати результати, які з достатньою точністю збігаються з параметрами реального процесу плавлення.

Виклад основного матеріалу. Як вказано у роботі [11], енергетичний баланс ДСП складається з прибуткових та видаткових статей. Оскільки безпосередній вимір динамічних змін величини потужності P_h та енергії Q_h , що йде на нагрівання шихти, технічно реалізувати складно, то в моделі запропоновано розраховувати їх як різницю прибуткових W_{h+} та видаткових W_{h-} енергій теплового балансу ДСП. Прибутковими статтями є енергія, що внесена дугою Q_d , та енергія екзотермічних реакцій Q_r . Видатковими статтями втрат вважаємо: теплову енергію, що виноситься з печі газами Q_g ; втрати енергії випромінюванням Q_i ; втрати енергії теплопровідністю Q_t .

Пропонуємо умовний поділ математичної моделі енергетичного блоку печі на контур енергій дуги та контур енергій шихти.

Контур енергій шихти має такий баланс енергій та потужностей.

Потужність та енергія дуги:

$$\begin{aligned} P_d &= U_d \cdot i_d; \\ Q_d &= \int P_d dt. \end{aligned} \tag{1}$$

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGY

де U_d та i_d – напруга та струм дуги. Експериментальні та аналітичні дослідження, що викладені в роботі [12], показують складність залежностей процесів виділення енергії у ході екзотермічних реакцій під час плавлення. Тому у процесі моделювання прийняте припущення про усереднення цих залежностей у вигляді експотенційних залежностей вигорання заліза, марганцю, кремнію та вуглецю. Енергії реакцій інших речовин виключаються з огляду на незначність їх величин.

Потужність та енергія екзотермічних реакцій:

$$P_r = \sum_{n=1}^6 S_{\max n} \cdot (1 - e^{-k_m \cdot T_h}) q_n; \quad (2)$$

$$Q_r = \int P_r dt,$$

де $S_{\max n}$ – потік маси окислення речовин; T_h – температура шихти; q_n – тепловий ефект окислення речовин; k_m – коефіцієнт інтенсивності окислення. В моделі запропонована можливість обрання коефіцієнтів інтенсивності окислення окремо для кожної з речовин (відповідно до марки сталі).

Потужність та енергія втрат шихти теплопровідністю (визначається формулами Фур'є та Ньютона – Рихмана):

$$P_t = \frac{F_t}{\frac{x}{k_1} + \frac{1}{a_c}} \cdot (T_h - T_{os}); \quad (3)$$

$$Q_t = \int P_t dt,$$

де T_{os} – температура навколишнього середовища; x – товщина перехідного прошарку між шихтою та навколишнім середовищем; F_t – площа стикування шихти з навколишнім середовищем; k_1 – коефіцієнт теплопровідності; a_c – коефіцієнт конвекційної тепловіддачі. В моделі пропонується прийняти припущення, що коефіцієнт теплопровідності та коефіцієнт конвекційної тепловіддачі незмінні на рівні їх усереднених значень.

Потужність та енергія втрат шихти з газами:

$$P_g = B_{\max} \cdot T_h \cdot (p_{co2} \cdot N_{co2} + p_{o2} \cdot N_{o2} + p_{co} \cdot N_{co} + p_{n2} \cdot N_{n2}); \quad (4)$$

$$Q_n = \int P_g dt,$$

де B_{\max} – потік обсягу вихідних газів окислення; p – відсоток вихідного газу; N – ентальпія вихідного газу. Експериментальні та аналітичні дослідження, що викладені в роботі [13], показують складність залежностей процесів видалення енергії з газами у процесі плавлення. Тому під час моделювання прийняте припущення про усереднення цих залежностей у вигляді монотонних лінійних залежностей витрат енергії з газами CO_2 , CO , O_2 та N_2 .

Потужність та енергія втрат шихти з випромінюванням (визначається законом Стефана – Больцмана):

$$P_i = (2 \cdot h + b) \cdot S \cdot E_h \cdot C_0 \left[\left(\frac{T_h}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{i0}}{100} \right)^4 \right]; \quad (5)$$

$$Q_i = \int P_i dt,$$

де $F_i = S(2h + b)$ – площа випромінюючої поверхні; C_0 – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла; E_h – ступінь чорноти; T_{i0} – початкова температура випромінювання.

Температура шихти:

$$T_h = \frac{Q_h}{m_h \cdot C_h} + T_{h0}, \quad (6)$$

де C_h – теплоємність шихти; m_h – маса шихти.

У контурі енергій дуги баланс енергій та потужностей такий.

Потужність та енергія дуги визначається формулами (1).

Потужність та енергія втрат дуги теплопровідністю:

$$P_{dt} = \frac{F_{td}}{\frac{x_d}{k_{1d}} + \frac{1}{a_{cd}}} \cdot (T_d - T_h); \quad (7)$$

$$Q_{td} = \int P_{dt} dt,$$

де T_d – температура дуги; x_d – товщина перехідного прошарку між дугою та шихтою;

F_{td} – площа стикання дуги та шихти; k_{1d} – коефіцієнт теплопровідності.

Потужність та енергія втрат дуги з випромінюванням:

$$P_{di} = F_d \cdot E_d \cdot C_o \left[\left(\frac{T_d}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_h}{100} \right)^4 \right]; \quad (8)$$

$$Q_{id} = \int P_{di} dt,$$

де F_d – площа випромінюючої поверхні дуги; E_d – ступінь чорноти дуги.

Температура дуги:

$$T_d = \frac{W_d}{m_d \cdot C_d}, \quad (9)$$

де C_d – теплоємність шихти; m_d – маса шихти; W_d – енергія нагрівання дугового проміжку.

Зважаючи на розгалуженість моделі, у ній виділено ряд субблоків Pr1, tk1, ik1, qg1, ikd, tkd, в яких зібрані постійні коефіцієнти. Вихідні параметри T_h та Q_h дозволяють пов'язати модель енергетичного блока з моделлю системи керування приводом переміщення електрода. Вихідний параметр T_d забезпечує пов'язання з блоком дуги [14].
Всі величини наведені в одиницях СІ.

За цією моделлю була складена блок-схема (рис. 1 та рис. 2). Блок-схему реалізовано у середовищі Matlab/Simulink. Блок-схему було параметровано за даними ДСП-5М, що встановлено у ТОВ «ВНЦ НВО «Трубосталь».

Прийнятність цієї блок-схеми підтверджується відповідністю результатів моделювання результатам, що отримані на реальній печі. Наприклад, у разі збільшення маси шихти m_h уповільнюється зростання температури шихти T_h і зростає величина відданої на нагрівання шихти енергії Q_h . Такі ж зміни відбуваються під час реального плавлення у ДСП-5М (це особливо помітно під час підсипання шихти).

У випадку зміни теплопровідності шихти k_1 змінюється інтенсивність зростання температури шихти T_h . Це також відповідає реальному процесу (особливо помітно при порівнянні двох плавлень з різною за складом шихтою). Результати моделювання (рис. 3) показують, що температура дуги на початку процесу різко зростає і, досягнувши величини 5850 °К, стабілізується. Температура шихти зростає поступово і стабілізується на рівні 1900 °К. Цей результат з достатньою точністю збігається як з результатом вимірів на реальній печі (температури розплавленої шихти лежать у межах 1890–1920 °К для вуглецевої сталі марки 60Л), так і з результатами, що викладені в монографії (температура дуги ДСП становить 5200–5800 °С) [2].

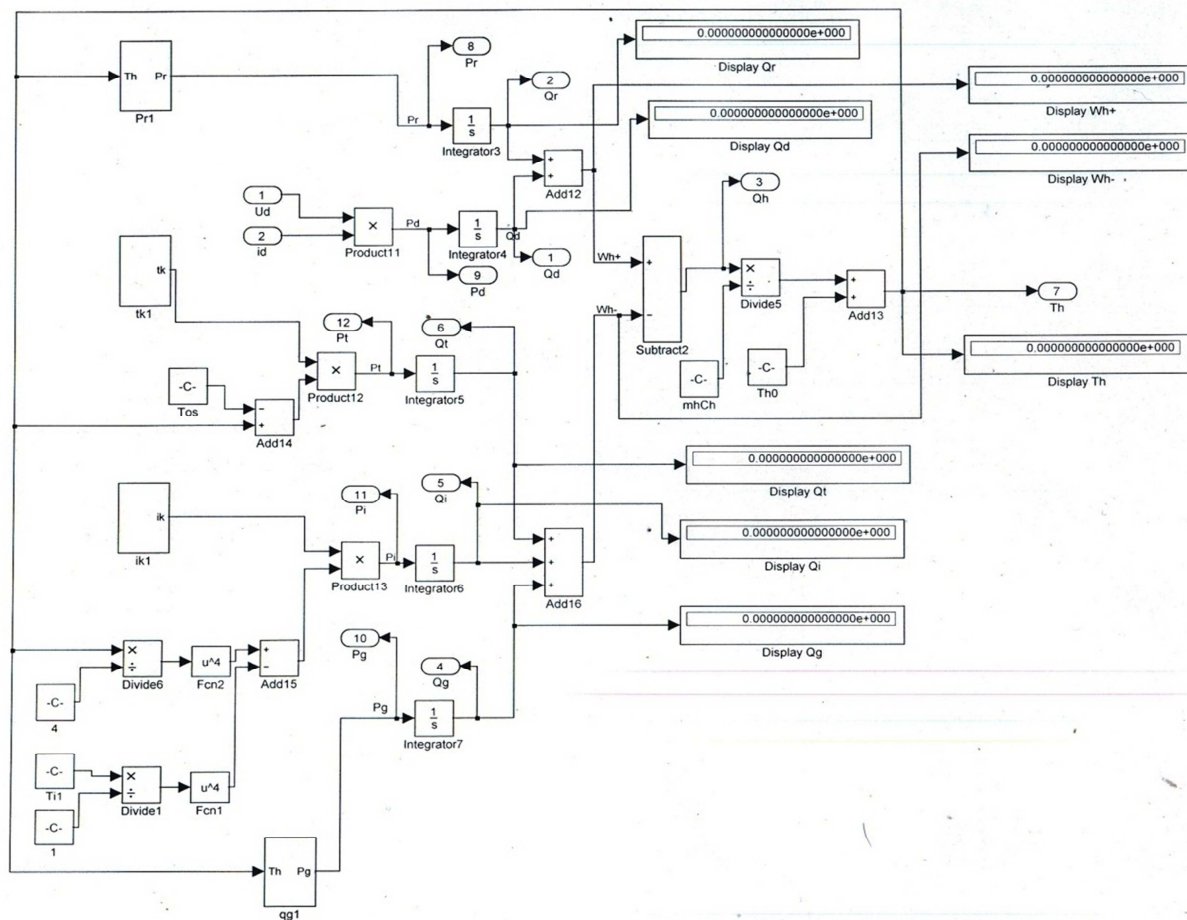


Рис. 1. Блок-схема математичної моделі контуру енергії шихти

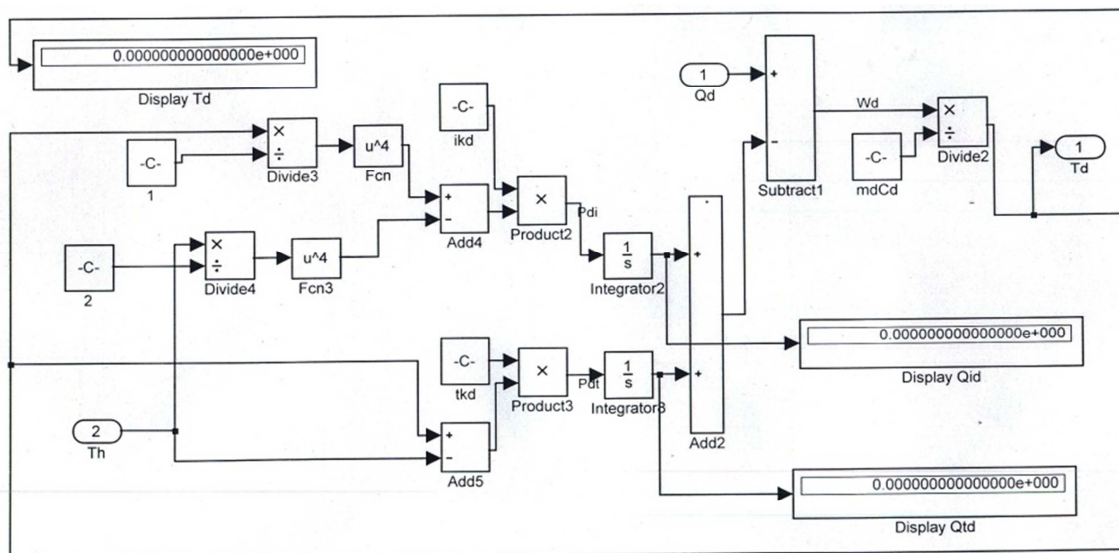


Рис. 2. Блок-схема математичної моделі контуру енергії дуги

Результати, отримані у ході моделювання (рис. 4 та рис. 5), були порівняні з даними, що отримані під час плавлення на печі ДСП-5М (встановлена у ТОВ «ВНЦ НВО Трубосталь»). Порівняння результатів показали, що модельні розрахунки з достатньою точністю збігаються з реальними даними. Це дає змогу вважати отриману модель теплового блока ДСП адекватною до встановленої мети.

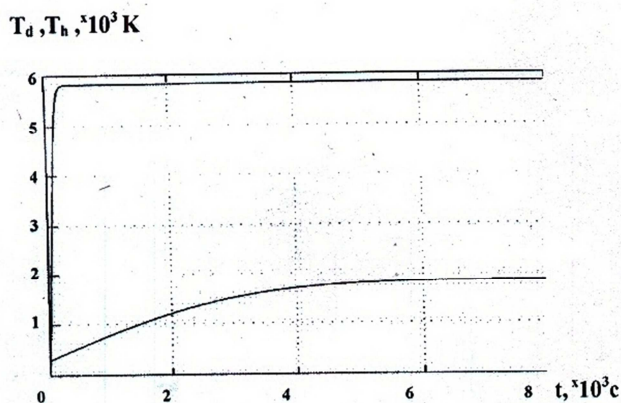


Рис. 3. Осцилограми температур дуги та шихти ДСП

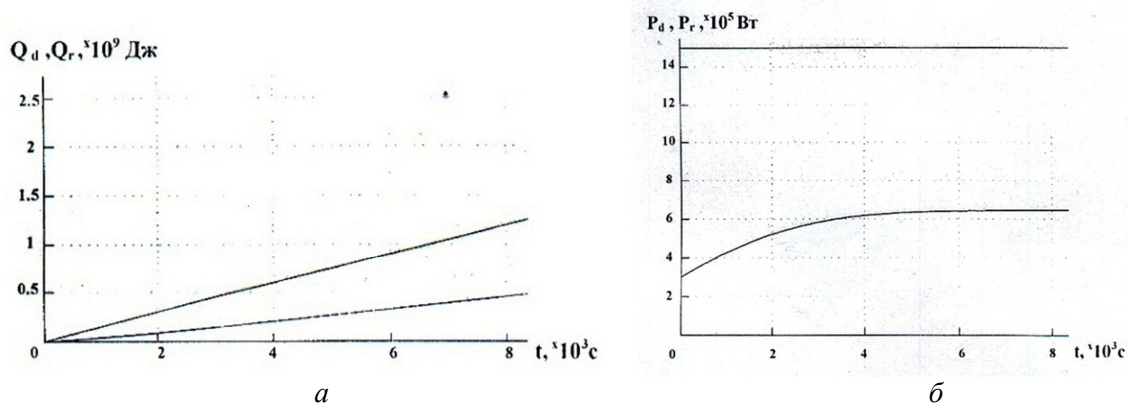


Рис. 4. Осцилограми прибуткових енергій (а) та потужностей (б) ДСП

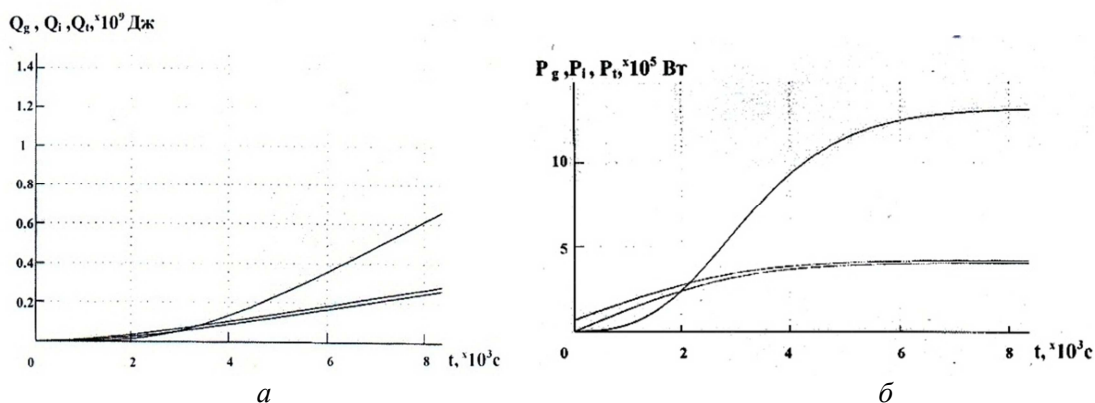


Рис. 5. Осцилограми видаткових енергій (а) та потужностей (б) ДСП

Висновки і пропозиції. Розглянуто математичну модель енергетичного блока – складова частина повної моделі ДСП. Розроблено блок-схему математичної моделі енергетичного блока ДСП. За допомогою побудованої блок-схеми проаналізовано протікання змін температур, енергій та потужностей етапу розплавлення та наведено відповідні осцилограми, які підтверджують адекватність побудованої моделі.

Перевагою моделі є можливість оцінювання величин енергій як у динаміці, так і за кінцевим результатом. Кінцевий результат у порівнянні з результатами розрахунків за реальними вимірами енергій плавлення дозволяє оцінити ступінь адекватності отриманої моделі.

Особливістю розробленої моделі енергетичного блока ДСП є її достатня простота і можливість в умовах реального процесу плавлення порівняно швидко (протягом кіль-

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGY

кох секунд) скласти алгоритми керування режимами плавлення. Це видається важливим з огляду на те, що модель є одним зі складових блоків повної моделі ДСП. Повна модель ДСП має бути створена з метою побудови автоматичного регулятора ДСП. Такий регулятор повинен підвищити точність управління енергетичними режимами ДСП. Підвищення точності управління має забезпечити зниження енергоспоживання та матеріалоемності технологічного процесу плавлення.

Список використаних джерел

1. *Влияние дуговых электропечей на системы электроснабжения* / Ю. Л. Рыжнев, Р. В. Минеев, А. П. Михеев, М. Я. Смелянский ; под ред. М. Я. Смелянского и Р. В. Минеева. – М. : Энергия, 1975. – 184 с.
2. *Макаров А. Н. Теория и практика теплообмена в электродуговых и факельных печах, топках, камерах сгорания : монография. Ч. 1* / А. Н. Макаров. – Тверь : ТГТУ, 2007. – 184 с.
3. *Толоконников Л. С. Расчет и конструирование механизмов электрических печей* / Л. С. Толоконников. – М. – Л. : Госэнергоиздат, 1961. – 240 с.
4. *Кацевич Л. С. Теория теплопередачи и тепловые расчеты электрических печей : учебник для техникумов* / Л. С. Кацевич. – М. : Энергия, 1977. – 304 с.
5. *Утегулов В. В. Специальные вопросы электротехнологии* / В. В. Утегулов, И. В. Захаров, А. Д. Ижикова. – М. : Metallurgia, 1985. – 227 с.
6. *Кудрин В. А. Теория и технология производства стали : учебник для вузов* / В. А. Кудрин. – М. : АСТ, 2003. – 528 с.
7. *Самохвалов Г. В. Электрические печи черной металлургии : учебное пособие для вузов* / Г. В. Самохвалов, Г. И. Черныш. – М. : Metallurgia, 1984. – 232 с.
8. *Егоров А. В. Электроплавильные печи черной металлургии* / А. В. Егоров. – М. : Metallurgia, 1985. – 280 с.
9. *Сисоян Г. А. Электрическая дуга в электрической печи* / Г. А. Сисоян. – М. : Metallurgia, 1974. – 304 с.
10. *Манин А. В. Электротехнологические процессы и установки : учебное пособие. Ч. 1* / А. В. Манин. – Рыбинск : РГАТА им. П. А. Соловьева, 2010. – 188 с.
11. *Мастрюков Б. С. Теория, конструкции и расчеты металлургических печей : учеб. для техникумов : в 2 т. Т. 2* / Б. С. Мастрюков. – М. : Metallurgia, 1986. – 376 с.
12. *Logar V., Dovžan D., Škrjanc I. (2012). Modeling and validation of an electric arc furnace: Part 2, thermo-chemistry. ISIJ International, Vol. 52, No. 3, pp. 414–424.*
13. *Logar V., Dovžan D., Škrjanc I. (2012). Modeling and validation of an electric arc furnace: Part 1, heat and mass transfer. ISIJ International, Vol. 52, No. 3, pp. 402–413.*
14. *Хрестін Р. М. Моделювання електричних параметрів дуги дугової сталеплавильної печі* / Р. М. Хрестін // Електротехніка і електромеханіка. – 2015. – № 4. – С. 40–43.