

Розділ 5

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ КОМПЛЕКСИ ТА СИСТЕМИ В АГРОПРОМИСЛОВОМУ ВИРОБНИЦТВІ

УДК 621.965.22

ДЕВ'ЯТИЕЛЕКТРОДНА ДУГОВА СТАЛЕВАРНА ПІЧ ДЛЯ ПЕРЕПЛАВЛЕННЯ МЕТАЛОБРУХТУ

Василь Гудим¹, д. т. н., Віра Косовська², к. е. н.

¹ Львівський національний аграрний університет,
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Жовківський р-н,
Львівська обл., Україна,
e-mail: gudymvi@ukr.net

² Національний університет «Львівська політехніка»
вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна,
e-mail: virakos21@ukr.net

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2020.24.095>

Гудим В., Косовська В. Дев'ятиелектродна дугова сталеварна піч для переплавлення металобрухту

Наявність і подальше накопичення значних запасів металобрухту чорних металів вимагає повторного використання металевих виробів у різних металомістких галузях. Із цією метою металобрухт переплавляють, використовуючи для цього дугові сталеварні печі (ДСП). Відомо, що собівартість електросталі, отриманої в ДСП великої місткості, є нижчою, ніж отриманої в печах меншої місткості. Проте технологічний процес у ДСП великої місткості вимагає значних витрат електричної енергії, особливо на стадії розплавлення металобрухту. У роботі наведено технічне інноваційне рішення, спрямоване на економію електричної енергії під час переплавлення металобрухту в ДСП місткістю понад 100 т. Суть інноваційного рішення полягає у вдосконаленні конструкції ДСП, зокрема використанні додатково до трьох електродів змінного струму ще шести електродів імпульсного струму.

Для виконання досліджень ДСП вдосконалено математичну модель, яка дає змогу здійснювати комплексне дослідження як електромагнітних, так і теплових процесів у ДСП. Крім того, за допомогою математичного моделювання можна досліджувати якість електричної енергії в системі електропостачання дугових сталеварних печей.

Дослідження показали, що оптимальне розміщення електродів змінного та імпульсного струмів у просторі електродугової печі забезпечує скорочення тривалості стадії розплавлення металобрухту приблизно на 20–25 %. Крім того, зменшується кількість технологічних операцій, пов'язаних із витратами теплової енергії, зосередженої в просторі печі, що суттєво впливає на економію електричної енергії.

Ключові слова: дугова сталеварна піч (ДСП), металобрухт чорних металів, стадія розтоплення, математична модель ДСП.

Hudym V., Kosovska V. Nine electrode arc furnace for scrap metal melting

The present and further accumulation of significant reserves of scrap ferrous metals requires its reuse for metal products in various metal-intensive industries. For this purpose, scrap metal is melted in arc steel furnaces (ASCF). It is known that the cost of electrical steel obtained in ASCF of large capacity is lower than the steel from furnaces of smaller capacity. However, the technological process in large-capacity ASCF requires significant electricity consumption, especially at the stage of scrap metal melting. The article deals with the technical innovative solution aimed at saving electricity during the reheating of scrap metal in ASCF with capacity of more than 100 tons. The essence of the innovative solution is to improve the design of the ASCF, in particular the use of additional six electrodes of pulsed current to three electrodes of alternating current.

The research considers the innovative technical decision directed to the electrical power savings while melting the scrap metal. The mathematical model was improved for the complex study of the electromagnetic and heat processes in the arc steel-casting furnaces. Using the developed mathematical model, one can study the quality of electrical power in the system of energy supply of arc steel-casting furnaces.

The experiment shows that the optimal placement of the electrodes of alternating and pulsed currents in the room of the electric arc furnace provides a reduction in duration of the stage of scrap metal melting by about 20–25 %. During the process, the number of technological operations associated with the consumption of thermal energy concentrated in the room of the furnace is reduced that significantly effects the savings of electricity.

Key words: arc steel-casting furnaces (ASCF), scrap of ferrous metal, melting stage, ASCF mathematical model.

Постановка проблеми. Значущість електromеталургійної галузі невпинно збільшується через постійне зростання потреби в металопродук-

ції для промислового та аграрного секторів, промислового та цивільного будівництва, транспортного машинобудування та інших галузей вироб-

ництва. У країнах світу, які володіють значними запасами природного газу і високоякісного вугілля, економічно вигіднішим є виробництво металопродукції в полуменевих печах, однак такий спосіб використовується в разі виробництва металопродукції з металевих руд. Водночас у багатьох країнах світу щорічно накопичуються величезні запаси металобрухту, зокрема чорних металів, який є концентрованою сировиною, тому виникає потреба в його переробленні. Промислово розвинені країни (США, Англія, Китай, Німеччина, Японія та ін.), які володіють великими запасами металобрухту та достатніми обсягами електричної енергії, металобрухт переробляють у дугових електропечах постійного та змінного струму місткістю від 30 т до 400 т [1].

За даними [2], 77 % собівартості електросталі становлять матеріали, 10 % – електрична енергія, 8 % – електроди, 2 % – вогнетриви та 3 % решта витрат, при цьому собівартість готової продукції, отриманої в електродугових печах великої місткості, є нижчою, ніж в електропечах меншої місткості, тому перспектива електродугового перероблення металобрухту за електродуговими печами великої місткості. Особливо це стосується електродугових печей з агрегатами позапічного оброблення рідкого металу [3].

Економія енергоносіїв під час електродугового переплавлення металобрухту забезпечується також за рахунок можливості керування режимами електричних дуг на різних технологічних стадіях. Особливо цей ефект має місце на стадії розплавлення металобрухту, коли дугова сталеварна піч споживає близько 65–70 % від загального обсягу споживання електроенергії на весь технологічний процес [3; 4]. Водночас заміна електродів, дозаправлення електропечі металобрухтом та скидання нерозплавленого металобрухту з бокових стінок електропечі у ванну вимагають відкривання печі навіть на короткий інтервал часу, що призводить до втрат тепла з простору електропечі, які для завершення технологічного процесу компенсуються за рахунок додаткових витрат електричної енергії, що й знижує енергоефективність ДСП [4]. Таким чином, проблема енергозбереження в електродугових печах, зокрема за рахунок скорочення тривалості технологічного процесу, є достатньо актуальною і вимагає вирішення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вказані недоліки в сучасних потужних та надпотужних дугових електропечах усуваються до певної міри за рахунок використання газових

пальників, що для ДСП великої місткості дає змогу знизити споживання електричної енергії на тону готової продукції з 650 кВт·год до 450 кВт·год. Попри зазначені обсяги економії електричної енергії, не наводиться інформація щодо обсягів витрат газу, що не дозволяє повною мірою оцінити економічний ефект від такого технічного рішення [4; 5]. Крім того, використання газових пальників вимагає побудови газопостачальних систем та підведення газу до об'єктів з високою небезпекою, використання газових пальників суттєво ускладнює умови експлуатації електродугових печей та безпеку праці сталеварів. Для скорочення стадії розплавлення металобрухту фахівцями англійської фірми GWB запропоновано в дуговій електропечі місткістю 400 т встановити шість електродів трифазного змінного струму, з яких три електроди живляться від одного пічного трансформатора, а інші три – від другого трансформатора такої самої потужності [6].

Постановка завдання. Враховуючи актуальність проблеми, поставлено завдання запропонувати інноваційне технічне рішення, яке б дозволило помітно скоротити тривалість стадії розплавлення металобрухту і тим самим забезпечити скорочення споживання електричної енергії ДСП, яка живиться лише від джерела електричної енергії. Для дослідження електричних і теплових режимів реконструйованої ДСП та електромагнітних процесів в її системі електропостачання слід запропонувати відповідну математичну модель, вдосконаливши існуючу [7].

Виклад основного матеріалу. Серед таких рішень ефективним є використання дев'ятиелектродної ДСП [8], в якій до трьох електродів підводиться змінна напруга, а до шести – імпульсна. На рис. 1 наведено принципову схему живлення запропонованої дев'ятиелектродної ДСП, в якій від джерела трифазної напруги ДЖ через трансформатори струму ТС приєднані первинні обмотки пічного трансформатора ПТ, з'єднані за схемою зірка з ізольованою нейтраллю. Три електроди змінного струму (ЕЗС) приєднані через проводи короткої мережі безпосередньо до виводів вторинної обмотки пічного трансформатора ПТ, а шість електродів імпульсного струму (ЕІС) приєднані до виводів БНВ через окремі проводи короткої мережі імпульсного струму. Входи БНВ приєднані до виводів вторинної обмотки пічного трансформатора (ПТ) паралельно з короткою мережею змінного струму. Ванна такої електропечі виготовлена у вигляді спарених трьох ванн круг-

лої форми однакового діаметра, при цьому середня ванна містить завантажувальне вікно. ЕЗС розміщені в середній ванні віддалено від центра і приєднані до виводів короткої мережі фаз А, В і С.

ЕІС розміщені по три в крайніх ваннах і приєднані до катодних виводів однофазних випрямлячів 1К, 2К та 3К та анодних виводів 1А, 2А, і 3А, як показано на рис. 2.

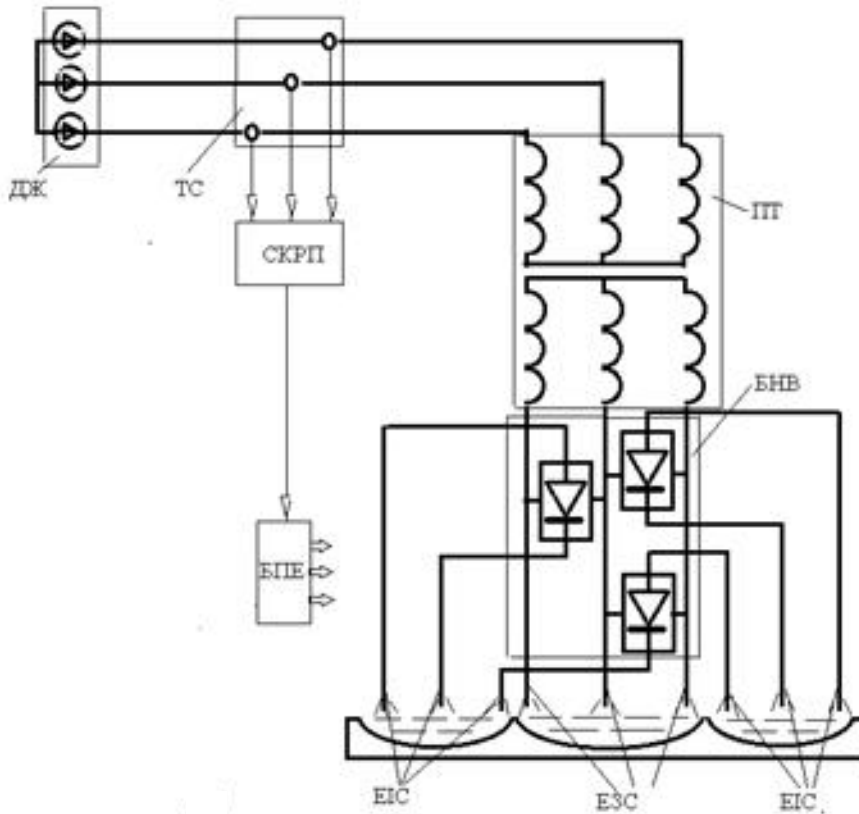


Рис. 1. Схема живлення дев'ятиелектродної дугової електропечі
Fig.1. Scheme of supply of the 9-electrode arc furnace

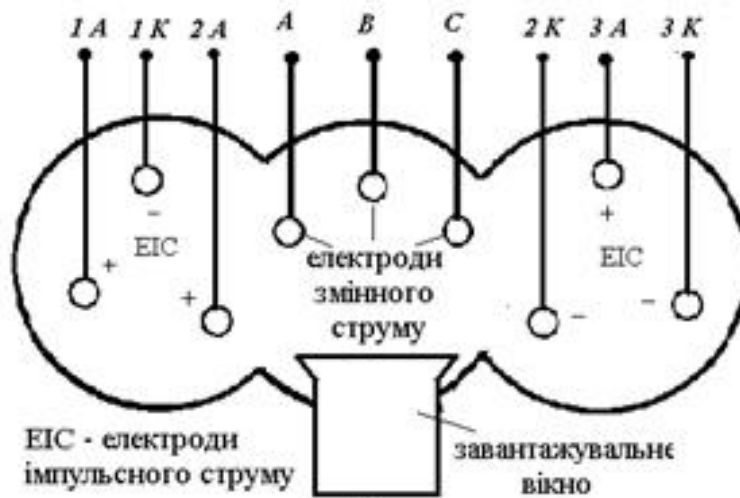


Рис. 2. Схема розміщення електродів у дуговій електропечі
Fig 2. Scheme of electrode placement in the electric arc furnace

Для керування режимами дев'ятиелектродної дугової електропечі призначена система керування режимами електропечі (СКРП), яка отримує інформацію про рівень завантаження струмом від трансформаторів струму (ТС). Сигнали, які виробляються в СКРП, надходять у блок переміщення електродів (БПЕ), який подає сигнал на приводи переміщення електродів змінного та імпульсного струмів з метою зміни величини струмів електричних дуг. Електроди змінного (ЕЗС) та імпульсного (ЕІС) струму у просторі електропечі розміщуються залежно від форми ванни печі.

Другий варіант ванни дев'ятиелектродної електропечі може мати круглу форму, в якій оптимально буде розмістити електроди змінного струму в кутах правильного трикутника, розташованого ближче до центра ванни, а електроди імпульсного струму розмістити у вершинах правильного шестикутника, розміщеного на зовнішньому колі між стінами електропечі та трьома електродами змінного струму. Центри трикутника і шестикутника збігаються з центром ванни електропечі.

Виконання натурних експериментів на запропонованих ДСП є неможливим через їх відсутність, тому оцінку техніко-економічних показників доцільно здійснювати методом математичного моделювання. З цією метою математичну модель ДСП та її системи електропостачання в контурних струмах і контурних магнітних потоках доповнено рівняннями теплового балансу [7].

Остаточно математична модель для дослідження електромагнітних та теплових процесів у ДСП та її системі електропостачання з використанням неявного числового методу ФДН запишеться в такому вигляді:

$$\begin{aligned} & \Gamma \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{R}_{k+1}^{(l)} + a_0 h^{-1} \mathbf{M}_{k+1}^{(l)} + a_0^{-1} h \mathbf{C}_{k+1}^{-1} & a_0 h^{-1} \mathbf{K}_{12} \\ a_0 h^{-1} \mathbf{K}_{21} & -a_0 h^{-1} \mathbf{R}_{\mu k+1}^{(l)} \end{pmatrix} \times \Gamma_t \begin{pmatrix} \Delta \vec{\mathbf{I}}_{K,k+1}^{(l)} \\ \Delta \vec{\Psi}_{K,k+1}^{(l)} \end{pmatrix} = \\ & \Gamma \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{R}_{k+1}^{(l)} + a_0 h^{-1} \mathbf{M}_{k+1}^{(l)} + a_0^{-1} h \mathbf{C}_{k+1}^{-1} & a_0 h^{-1} \mathbf{K}_{12} \\ a_0 h^{-1} \mathbf{K}_{21} & -a_0 h^{-1} \mathbf{R}_{\mu k+1}^{(l)} \end{pmatrix} \times \Gamma_t \begin{pmatrix} \vec{\mathbf{I}}_{K,k+1}^{(l)} \\ \vec{\Psi}_{K,k+1}^{(l)} \end{pmatrix} + \\ & + \Gamma (h^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{M}_{k+1}^{(l)} & \mathbf{K}_{12} \\ \mathbf{K}_{21} & -\mathbf{R}_{\mu k+1}^{(l)} \end{pmatrix} \times \Gamma_t \cdot \sum_{s=1}^p a_s \begin{pmatrix} \vec{\mathbf{I}}_{k+1-s}^{(l)} \\ \vec{\Psi}_{k+1-s}^{(l)} \end{pmatrix} + \\ & + \begin{pmatrix} \vec{\mathbf{u}}_{HE,k+1-s}^{(l)} + a_0^{-1} \sum_{s=1}^p a_s \vec{\mathbf{u}}_{C,k+1-s}^{(l)} - \vec{\mathbf{e}}_{k+1}^{(l)} \\ 0 \end{pmatrix}) = 0; \\ & \begin{pmatrix} \vec{\mathbf{I}}_{K,k+1}^{(l+1)} \\ \vec{\Psi}_{K,k+1}^{(l+1)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \vec{\mathbf{I}}_{K,k+1}^{(l)} \\ \vec{\Psi}_{K,k+1}^{(l)} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \Delta \vec{\mathbf{I}}_{K,k+1}^{(l)} \\ \Delta \vec{\Psi}_{K,k+1}^{(l)} \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (1) \quad (2)$$

Вектори струмів та потокозчеплень віток через вектори їх контурних величин визначають із виразу

$$\begin{pmatrix} \vec{\mathbf{I}}_{K,k+1}^{(l+1)} \\ \vec{\Psi}_{K,k+1}^{(l+1)} \end{pmatrix} = \Gamma_t \cdot \begin{pmatrix} \vec{\mathbf{I}}_{K,k+1}^{(l+1)} \\ \vec{\Psi}_{K,k+1}^{(l+1)} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Рівняння теплового балансу у ДСП через вектор температури металу в місцях горіння дуг записується в такому вигляді:

$$\begin{aligned} & (a_0 \cdot h^{-1} + 2 \cdot \alpha \cdot \gamma^{-1} \cdot C_T^{-1}) \cdot \Delta \vec{\Theta}_{k+1}^{(l)} = \\ & = (a_0 \cdot h^{-1} \cdot \vec{\Theta}_{k+1}^{(l)} + 2 \cdot \alpha \cdot \gamma^{-1} \cdot C_T^{-1}) \cdot \vec{\Theta}_{k+1}^{(l)} + \\ & + h^{-1} \cdot \sum_{s=1}^p a_s \cdot \vec{\Theta}_{k+1-s}^{(l)} - \rho_{k+1}^{(l)} \cdot (\vec{\mathbf{J}}_{k+1}^{(l)})^2 \cdot \gamma^{-1} \cdot C_T^{-1} \\ & \vec{\Theta}_{k+1}^{(l+1)} = \vec{\Theta}_{k+1}^{(l)} - \Delta \vec{\Theta}_{k+1}^{(l)}, \end{aligned} \quad (4)$$

де $\mathbf{R}_{k+1}^{(l)}$, $\mathbf{C}_{k+1}^{(l)}$ – матриці лінійних резистансів та ємностей конденсаторів електричних кіл на l -тій ітерації $(k+1)$ -го кроку інтегрування; $\mathbf{M}_{k+1}^{(l)}$ – матриця власних і взаємних індуктивностей електричних кіл схеми на l -тій ітерації $(k+1)$ -го кроку інтегрування; $\mathbf{R}_{\mu,k+1}^{(l)}$ – матриця магнітних опорів трансформаторів на l -тій ітерації $(k+1)$ -го кроку інтегрування; $\mathbf{K}_{1,2}$, $\mathbf{K}_{2,1}$ – матриця коефіцієнтів трансформації трансформаторів; Γ , Γ_t – пряма і транспонована матриці контурних з'єднань електричних і магнітних кіл схеми; $a_0 \dots a_s$ – коефіцієнти апроксимуючого полінома методу ФДН; h – крок числового інтегрування; p – порядок методу; $\vec{\mathbf{e}}_{k+1}^{(l)}$ – вектор електрорушійних сил віток схеми на l -тій ітерації $(k+1)$ -го кроку інтегрування; $\vec{\mathbf{u}}_{C,k+1}^{(l)}$, $\vec{\Psi}_{K,k+1}^{(l)}$ – вектори напруг конденсаторів та потокозчеплень обмоток трансформаторів на l -тій ітерації $(k+1)$ -го кроку інтегрування; $\vec{\mathbf{u}}_{HE,k+1-s}^{(l)}$ – вектор напруг нелінійних елементів схеми (віток дуг ДСП) на l -тій ітерації $(k+1)$ -го кроку інтегрування; $\vec{\mathbf{I}}_{K,k+1}^{(l)}$, $\vec{\mathbf{I}}_{K,k+1}^{(l+1)}$, $\vec{\Psi}_{K,k+1}^{(l)}$, $\vec{\Psi}_{K,k+1}^{(l+1)}$ – вектори контурних струмів схеми і контурних потокозчеплень трансформаторів на l -тій та $(l+1)$ -ій ітерації $(k+1)$ -го кроку інтегрування; $\Delta \vec{\mathbf{I}}_{K,k+1}^{(l)}$, $\Delta \vec{\Psi}_{K,k+1}^{(l)}$ – вектори приростів контурних струмів схеми і контурних потокозчеплень трансформаторів на l -тій ітерації $(k+1)$ -го кроку інтегрування; $\vec{\Theta}_{k+1}^{(l)}$ – вектор температур у місцях віддачі тепла від дуг до металу на l -тій ітерації $(k+1)$ -го кроку інтегрування; α – коефіцієнт тепловіддачі; γ , C_T – відповідно питома густина та теплоємність металобрухту, який розплавлюється.

Адекватність математичної моделі перевірено порівнянням зміни температури нагрівання

металобрухту в ДСП місткістю 20 т та форми і величини струмів у системі електропостачання вказаної печі.

На рис. 3 наведено миттєві значення напруги (див. рис. 3, а) і струму (див. рис. 3, б) дуг під од-

ним з імпульсних електродів катодної групи дев'ятиелектродної ДСП 100 т з пічним трансформатором потужністю 50 МВА за умови, що до електродів підводиться потужність 12 МВА, тобто 25 % від загальної потужності пічного трансформатора.

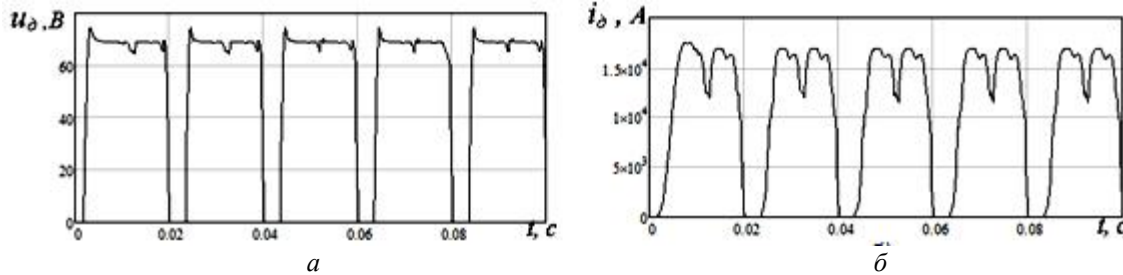


Рис. 3. Миттєві значення напруги та струму однієї з дуг
Fig. 3. Instant values of voltage and current of one of the arcs

З рис. 3, б видно, що час протікання струму дуги в симетричному режимі дорівнює 16,7 мс, що становить 83,55 % періоду промислової частоти. Це підтверджує енергетичну ефективність імпульсної частини загальної системи електропостачання ДСП. Враховуючи те, що дуги імпульсного струму забезпечують нагрівання шихти поблизу стінок ванни електропечі, їх потужність обмежена до 30 % від загальної потужності, споживаної ДСП. Такий розподіл потужностей між дугами змінного та імпульсного струмів досягається добором реактивних опорів ділянок мереж між вторинною обмоткою пічного трансформатора та відповідних дуг. Якщо відомі параметри мережі змінного струму та еквівалентний реактивний опір мереж змінного та імпульсного струму, то реактивний опір мережі імпульсного струму визначається з виразу

$$X_{IC} = \frac{X_{3C} X_E}{X_{3C} - X_E}. \quad (5)$$

Якщо відомий еквівалентний опір мережі імпульсного струму та еквівалентний опір мереж змінного та імпульсного струму, то опір мережі змінного струму ДСП визначається з виразу

$$X_{3C} = \frac{X_{IC} X_E}{X_{IC} - X_E}, \quad (6)$$

де X_{IC} – реактивний опір мережі імпульсного струму; X_{3C} – реактивний опір мережі змінного струму; X_E – еквівалентний реактивний опір мереж імпульсного та змінного струмів.

Сумарний реактивний опір відрізків мереж трифазного змінного струму та імпульсного струму визначається з умови, що струм у разі короткого замикання електродів на шихту не перевищує

трикратного номінального значення. Такий підхід не вимагає використання додаткової системи перерозподілення потужностей між короткими мережами дуг змінного та імпульсного струму.

Дев'ятиелектродна ДСП призначена лише для розплавлення твердої шихти, а стадії окиснення та рафінування сталі реалізуються в ковшах позапічного оброблення рідкого металу. Вказана система розміщення електродів дев'ятиелектродної ДСП дає змогу скоротити час розплавлення твердої шихти у рідкий стан за рахунок рівномірного розподілення джерел теплової енергії, тобто електричних дуг, над поверхнею шихти. Особливістю такої конструкції електропечі є те, що кожен електрод та проводи коротких мереж мають менший діаметр і, відповідно, поперечний переріз та вагу, що забезпечує зменшення сталості часу під час переміщення електродів. Дев'ятиелектродну ДСП, яка належить до надпотужних [9], доцільно використовувати для розплавлення шихти масою понад 300 т, а потужність пічного трансформатора вибирати близько 100 МВА. Напругу вторинної обмотки пічного трансформатора дев'ятиелектродної ДСП доцільно вибирати в межах 500 – 700 В, що забезпечує оптимальні потужності електричних дуг. Завдяки вибору параметрів мереж змінного та імпульсного струмів згідно з виразами (5) і (6), величина струмів експлуатаційного короткого замикання на стадії розплавлення обмежується до допустимих значень, що не допускає струмових перевантажень силового електрообладнання системи електропостачання ДСП.

Висновки

1. На основі аналізу публікацій стосовно ДСП великої місткості показано, що проблема

економії електричної енергії для реалізації технології переплавлення металобрухту залишається актуальною.

2. Запропоноване інноваційне технічне рішення, зокрема реконструкція потужних ДСП, яке полягає у встановленні дев'яти електродів замість трьох без збільшення потужності пічного трансформатора, дозволяє скоротити час розплавлення металобрухту і, таким чином, зменшити обсяги споживання електричної енергії.

3. Для дослідження режимів ДСП та їх системи електропостачання вдосконалена математична модель, яка дозволяє досліджувати одночасно електромагнітні процеси систем електропостачання та теплові процеси в ДСП, пов'язані з нагріванням металобрухту електричними дугами змінного та імпульсного струму.

4. Вдосконалена математична модель дає змогу обчислити тривалість стадії розплавлення металобрухту в ДСП залежно від потужностей дуг змінного та імпульсного струму і, відповідно, обсяги споживання електричної енергії.

Бібліографічний список

1. Steel production and scrap consumption in leading markets in 2019. URL: <https://www.statista.comstatics/270835/world-steel-productions-and-scrap-consumption> (Last accessed: 01.10.2020).
2. Water-coded electrodes: potential and practice. *Restruct. Steelplants Nineties: Proc. Conf.*, London, May, 1986. London: Hill D, 1986. P. 283–291.
3. Влияние дуговых электропечей на системы электроснабжения / под ред. М. Я. Смелянского и Р. В. Минеева. Москва: Энергия, 1975. 184 с.
4. Karbowniczek M. Stalowniczy piec łukowy. Kraków: Wydawnictwa Akademii górniczo-hutniczej, 2015. 228 s.
5. Clark R. K. Burner assisted melting of steel in electric arc furnaces improves productivity. *Ind. Heat.* 1989. 56, No. 3. P. 30–31, 34, 36.
6. Промышленные установки электродугового нагрева и их параметры / под общ. ред. Л. Е. Никольского. Москва: Энергия, 1971. 272 с.
7. Mathematical model of the six electrode pulse current electric arc furnace / V. Hudym, P. Drozdowski, A. Postoliuk, D. Mamcarz. *Technical transactions electrical engineering.* 2016. Issue 3-E(13). P. 151–162.
8. Система електропостачання дев'ятиелектродної дугової сталеварної електропечі: пат. на винахід 116153, Україна: МПК H02J3/18, H02J 3/12, H05B 7/144, H05B 7/20, F27D 11/08 F27B 3/08; заявл. 22.02.2016; опубл. 12.02.2018, Бюл. № 3.
9. Taylor C. R. *Electric Furnace Steelmaking.* Warrendale: AIME Iron and Steel Society, 1985. 395 p.

Стаття надійшла 10.10.2020