

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ РЕКОНСТРУКЦІІ  
ТРИФАЗНОЇ ДУГОВОЇ СТАЛЕВАРНОЇ ЕЛЕКТРОПЕЧІ

В.І. Гудим<sup>1\*</sup>, докт. техн. наук, В.В. Косовська<sup>2\*\*</sup>, канд. екон. наук,  
Н.П. Яворська<sup>2\*\*\*</sup>, канд. екон. наук, Т.І. Данько<sup>2\*\*\*\*</sup>, канд. екон. наук

<sup>1</sup> Львівський національний аграрний університет,  
вул. Володимира Великого, 1, Дубляни, 80381, Україна,

e-mail: [gudymvi@ukr.net](mailto:gudymvi@ukr.net)

<sup>2</sup> Національний університет «Львівська політехніка»,  
вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна,

e-mail: [virakos21@ukr.net](mailto:virakos21@ukr.net)

*Технологічні агрегати електродугового перетоплення металобрухту відносяться до найбільш енергомістких споживачів, для яких проблема енергозбереження є надзвичайно актуальною. Запропонована реконструкція електропечі, спрямована на скорочення обсягів споживання електричної енергії, вимагає техніко-економічного обґрунтування. Результати моделювання реконструйованої електропечі показали, що за рахунок оптимального розміщення електричних дуг у просторі електропечі вдається скоротити тривалість стадії розтоплення приблизно на 18 хв. Економічні розрахунки впровадження інноваційного рішення показали, що внаслідок скорочення тривалості стадії розтоплення металобрухту у реконструйованій печі зменшується обсяг споживання електроенергії приблизно на 28% на один технологічний процес. У даному випадку враховано лише скорочення обсягів споживання електроенергії, але не враховано можливості підвищення продуктивності електропечі, за рахунок збільшення кількості технологічних процесів за зміну. Бібл. 8, рис. 3, табл. 1.*

**Ключові слова:** електродугові печі, економія електроенергії, собівартість електросталі, технічні інновації, реконструкція електропечі.

**Вступ.** Найважливішою задачею виробництва є виготовлення конкурентоздатної продукції за параметрами якості та ціни, що забезпечує підприємствам стабільне функціонування в умовах високої конкуренції. Це стосується також підприємств електрометалургійної галузі, що споживають великі обсяги електричної енергії, скорочення яких може бути досягнуте за рахунок використання інновацій.

Вдосконалення технологічного обладнання часто вимагає зміни якості сировинних ресурсів або їхнього збагачення, що пов'язане з підвищенням собівартості готової продукції. Для електрометалургійних підприємств найперспективнішими є технічні інновації, які спрямовано на енергоощадність, оскільки вартість енергетичних ресурсів постійно зростає. В електродуговому металургійному виробництві особливо енергомісткою є стадія розтоплення металобрухту, тому в електропечах великої місткості задля скорочення тривалості даної стадії використовують комбіновані джерела тепла, зокрема одночасно електричні дуги та газові пальники.

У роботі [1] авторами здійснено дослідження енергетичних характеристик електродугових сталеплавильних печей (ДСП), де наведено усереднені тривалості окремих стадій технологічних процесів, а також обсяги споживання електроенергії на один технологічний процес в ДСП різної місткості. Найбільший обсяг електроенергії ДСП споживає на стадії розтоплення металобрухту, яка триває біля 50% від тривалості повного технологічного процесу. На стадії розтоплення обсяги споживання електричної енергії в середньому досягають 65-70% від загального обсягу споживання електроенергії на один технологічний процес. Це зумовлено також нерівномірністю нагрівання металобрухту дугами у ванні електропечі. З метою скорочення часу розтоплення металобрухту та економії енергоресурсів у [2, 3] здійснено дослідження комбінованого способу одночасного нагрівання металобрухту в дугових електропечах за допомогою електричних дуг та газових пальників. Це дає змогу зменшити обсяги споживання електроенергії в межах від 40 до 60 кВт·год/т, а також скоротити час розтоплення металобрухту в електропечах великої потужності від 20% до 35%

© Гудим В. І., Косовська В.В., Яворська Н.П., Данько Т.І., 2021

ORCID ID: \*<https://orcid.org/0000-0002-7470-3644>;\*\* <https://orcid.org/0000-0001-6627-1856>;

\*\*\* <https://orcid.org/0000-0002-8145-7752>; \*\*\*\* <https://orcid.org/0000-0001-7342-4830>

за рахунок чого підвищити продуктивність цих ДСП. Проте слід зауважити, що вихід готової продукції у випадку використання горілок знижується до 86-92% замість 96-96,5%, який досягається в печах лише з дуговим нагріванням. Крім того комбінований спосіб нагрівання суттєво ускладнює конструкції електропечей.

Дослідження показали, що частка енергоносіїв у собівартості електросталі становить 20-25%, при цьому електричної енергії від 3% до 10%, тому зменшення обсягів її споживання є достатньо актуальним завданням [4, 5]. Одним з варіантів скорочення обсягів споживання електричної енергії ДСП є збільшення кількості оптимально розміщених над шихтою електричних дуг, що вимагає певної реконструкції окремих вузлів електродугової печі [6]. На даному етапі ефективність цього інноваційного рішення вимагає досліджень, які доцільно виконувати методом математичного моделювання задля отримання техніко-економічних показників реконструйованої електропечі [7]. З цією метою поставлено завдання дослідити режим стадії розтоплення металобрухту у 5-тонній електропечі за умови розтоплення однакової кількості шихти у триелектродній та реконструйованій шестиелектродній електропечі, оснащених однаковими пічними трансформаторними агрегатами, які живляться від електричної мережі з аналогічними параметрами.

**Мета роботи** полягає у дослідженні техніко-економічних показників реконструйованої шестиелектродної дугової електропечі (ДСП\_6\_ел) шляхом математичного моделювання електро-теплових процесів дугових сталеварних печей та визначенні тривалості стадії розтоплення шихти і обсягів споживання електричної енергії реконструйованою електропечі на цій стадії, а також порівняння цих показників для триелектродної електропечі (ДСП\_3\_ел) змінного струму аналогічної місткості.

**Розв'язання задачі.** У роботі здійснюються дослідження техніко-економічних показників електродугової печі місткістю 5 тон до та після її реконструкції на стадії розтоплення металобрухту методом математичного моделювання.

На рис. 1 наведено схему системи електропостачання (СЕР) реконструйованої шестиелектродної дугової електропечі, де від системи живлення через пічний трансформатор (ПТ) напруга

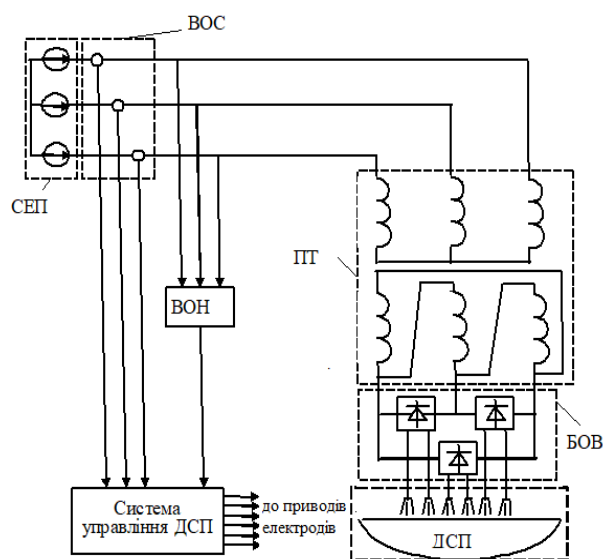


Рис. 1.

поступає на входи блоку трьох однофазних мостових випрямлячів (БОВ). Регулювання потужності електричних дуг здійснюється системою управління ДСП, яка виробляє команду задля зміни положення електродів. Внаслідок їхнього переміщення відбувається зміна потужності дуг за рахунок зміни величини струму, яка контролюється вимірювальними органами струму (ВОС) та напруги, що контролюється вимірювальними органами напруги (ВОН).

Обмотки ПТ з'єднані за схемою трикутник-зірка, що забезпечує обмеження поширення гармонік у систему електропостачання. Задля дослідження режимів розтоплення металобрухту існуюча математична модель системи електропостачання дугових сталеплавильних печей доповнена моделлю електротеплового балансу [7].

Для електромагнітних кіл цієї СЕР рівняння у матрично-векторній формі рівноваги струмів та потокозчеплень у вузлах має вигляд

$$P(\vec{i}, \vec{\psi})_t = 0, \quad (1)$$

де  $P$  – матриця вузлових з'єднань;  $(\vec{i}, \vec{\psi})_t$  – транспонований вектор-стовпець струмів та потокозчеплень віток схеми.

Рівняння рівноваги електричних і магнітних напруг у контурах електромагнітних кіл системи електропостачання трифазної ДСП у матрично-векторній формі записується як

$$\Gamma \begin{pmatrix} R & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} (\vec{i}, \vec{\psi})_t + \Gamma \begin{pmatrix} M & K_{12} \\ K_{21} & -R_\mu \end{pmatrix} (d\vec{i}/dt, d\vec{\psi}/dt)_t + \Gamma(\vec{u}_d + \vec{u}_c + \vec{u} - \vec{e}_n, 0)_t = 0, \quad (2)$$

де  $\Gamma$  – матриця контурних з'єднань віток електричної і магнітної частини розрахункової схеми;  $\begin{vmatrix} R & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix}$

– квадратна матриця активних опорів схеми;  $\begin{vmatrix} M & K_{12} \\ K_{21} & -R_{\mu} \end{vmatrix}$  – квадратна матриця індуктивностей та

взаємоіндуктивностей схеми;  $(d\vec{i} / dt, d\vec{\psi} / dt)_t$  – транспонований вектор-стовпець похідних струмів та потокозчеплень віток схеми;  $(\vec{u}_d + \vec{u}_c + \vec{u}_n - \vec{e}, 0)_t$  – транспонований вектор-стовпець суми напруг дуг, конденсаторів, нелінійних елементів та електрорушійних сил СЕП.

Математична модель балансу електричної енергії, що споживають  $N$  електричних дуг і теплової енергії, яка витрачається задля нагрівання металобрухту масою  $m$ , нагрівання внутрішньої поверхні стін в середині електропечі, записується у вигляді

$$N \cdot k_{ee} U_d I_d dt = C_{m\sigma} m \cdot d\theta + \alpha \cdot F_c (\theta - \theta_c) dt, \quad (3)$$

де  $N$  – кількість дуг в електропечі;  $k_{ee}$  – безрозмірний коефіцієнт використання електричної енергії;  $U_d$  – напруга дуги, В;  $I_d$  – струм дуги, А;  $C_{m\sigma}$  – теплоємність металобрухту, Вт/(кг·°C);  $m$  – маса металобрухту в печі, кг;  $dt$  – зміна часу, с;  $d\theta$  – зміна температури металобрухту, °C;  $\alpha$  – коефіцієнт теплопередачі конвекцією, Вт/(м²·°C);  $F_c$  – площа поверхні стін в середині електропечі, м²;  $\theta$  – поточне значення температури металобрухту, °C;  $\theta_c$  – середнє значення температури поверхні стін всередині печі, °C.

Поділивши обидві частини рівняння (2) на приріст часу  $dt$ , отримуємо диференціальне рівняння балансу енергії в електродуговій печі

$$C_{m\sigma} \cdot m \frac{d\theta}{dt} + \alpha \cdot F_c (\theta - \theta_c) = N \cdot k_{ee} U_d I_d. \quad (4)$$

Якщо рівняння (3) поділити на  $C_{m\sigma} m$  та позначити сумарну потужність дуг  $N \cdot U_d \cdot I_d$  символом  $p_d$ , то отримуємо рівняння вигляду

$$\frac{d\theta}{dt} + \frac{\alpha F_c}{C_{m\sigma} m} (\theta - \theta_c) = \frac{k_{ee}}{C_{m\sigma} m} p_d. \quad (5)$$

Для інтегрування систем диференціальних рівнянь (2) і (5) використовуємо А-стійкий чисельний метод формул диференціювання назад (ФДН) другого порядку [8]. Електромагнітні кола СЕП записуються через контурні струми та магнітні потоки у вигляді

$$\Gamma \begin{vmatrix} R_{k+1}^{(l)} + a_0 h^{-1} M_{k+1}^{(l)} + a_0^{-1} h (C_{k+1}^{(l)})^{-1} & a_0 h^{-1} K_{12} \\ a_0 h^{-1} K_{21} & a_0 h^{-1} R_{\mu k+1}^{(l)} \end{vmatrix} \Gamma_t \begin{vmatrix} \Delta i_{k+1}^{-(l)} \\ \Delta \psi_{k+1}^{-(l)} \end{vmatrix} = \Gamma \begin{vmatrix} R_{k+1}^{(l)} + a_0 h^{-1} M_{k+1}^{(l)} + a_0^{-1} h (C_{k+1}^{(l)})^{-1} & a_0 h^{-1} K_{12} \\ a_0 h^{-1} K_{21} & a_0 h^{-1} R_{\mu k+1}^{(l)} \end{vmatrix} \Gamma_t \begin{vmatrix} i_{k+1}^{-(l)} \\ \psi_{k+1}^{-(l)} \end{vmatrix} + \quad (6)$$

$$+ \Gamma \begin{vmatrix} a_0 h^{-1} M_{k+1}^{(l)} + a_0^{-1} h (C_{k+1}^{(l)})^{-1} & a_0 h^{-1} K_{12} \\ a_0 h^{-1} K_{21} & a_0 h^{-1} R_{\mu k+1}^{(l)} \end{vmatrix} \Gamma_t \left( \sum_{s=1}^p a_s \begin{vmatrix} i_{k+1}^{-(l)} \\ \psi_{k+1}^{-(l)} \end{vmatrix} + \Gamma \begin{vmatrix} u_{d k+1}^{-(l)} + a_0^{-1} \sum_{s=1}^p h^{-1} u_{c k+1-s}^{-(l)} - e_{k+1}^{-(l)} \\ 0 \end{vmatrix} \right);$$

$$\left( a_0 h^{-1} + \frac{\alpha F_c}{C_{m\sigma} m} \right) \Delta \theta_{k+1}^{(l)} = \left( a_0 h^{-1} + \frac{\alpha F_c}{C_{m\sigma} m} \right) \theta_{k+1}^{(l)} + (C_{m\sigma} m)^{-1} \sum_{s=1}^p \left( a_s \theta_{k+1-s}^{(l)} - \frac{\alpha F_c}{C_{m\sigma} m} \theta_{k+1}^{(l)} - \frac{k_{ee}}{C_{m\sigma} m} p_{d k+1}^{(l)} \right) \quad (7)$$

$$\begin{vmatrix} \vec{i}_{K,k+1}^{-(l+1)} \\ \vec{\psi}_{K,k+1}^{-(l+1)} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \vec{i}_{K,k+1}^{-(l)} \\ \vec{\psi}_{K,k+1}^{-(l)} \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} \Delta \vec{i}_{K,k+1}^{-(l)} \\ \Delta \vec{\psi}_{K,k+1}^{-(l)} \end{vmatrix}; \quad (8)$$

$$p_{d,k+1}^{(l+1)} = \sum u_{d,k+1}^{-(l+1)} \cdot i_{d,k+1}^{-(l+1)}; \quad (9)$$

Після визначення з рівняння (7) приросту температури  $\Delta \theta_{k+1}^{(l)}$  на  $(k+1)$ -му кроці інтегрування обчислюється уточнене значення температури металобрухту за виразом

$$\theta_{k+1}^{(l+1)} = \theta_{k+1}^{(l)} - \Delta \theta_{k+1}^{(l)}, \quad (10)$$

де  $a_0, \dots, a_s$  – коефіцієнти апроксимації похідних у методі ФДН;  $h$  – крок інтегрування;  $\Gamma_t$  –

транспонована матриця контурних з'єднань;  $\begin{vmatrix} \Delta \vec{i}_{K,k+1}^{-(l)} \\ \Delta \vec{\psi}_{K,k+1}^{-(l)} \end{vmatrix}$  – вектор приростів контурних струмів та потокозчеплень;  $\Delta \theta_{k+1}^{(l)}$  – приріст температури на даному кроці інтегрування.

Адекватність математичної моделі перевірено шляхом порівняння математичних експериментів з результатами вимірювань на реальних електродугових трифазних печах місткістю 5 тон, при цьому розбіжність не перевищує 12%. Враховуючи характеристики сучасної тепловимірювальної апаратури таку точність можна вважати цілком задовільною.

Використовуючи математичні моделі (6)-(10), здійснено дослідження режимів нагрівання металобрухту в дуговій електропечі до стану розтоплення. На рис. 2 наведено залежності температури нагрівання металобрухту до стану розтоплення від часу у триелектродній електропечі змінного струму (крива 1) та шестиелектродній електропечі імпульсного струму (крива 2).

Як видно із рис. 2, тривалість нагрівання металобрухту до рідкого стану у триелектродній дуговій електропечі становить понад 63 хв., що достатньо близько збігається із часом тривалості стадії розтоплення, наведеним у [1, 2].

На рис. 3 наведено графічну залежність потужності електричної дуги імпульсного струму від напруги дуги, яку отримано за допомогою моделей (6)-(10).

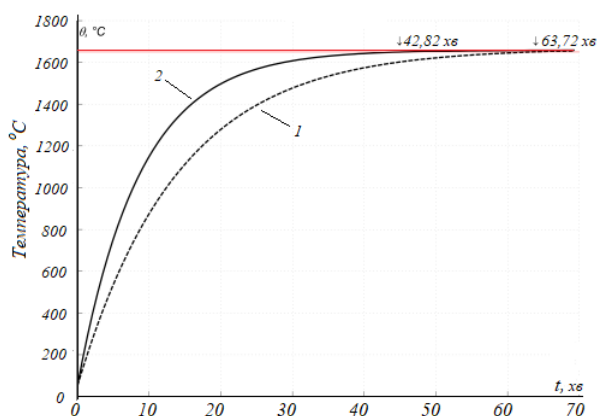


Рис. 2.

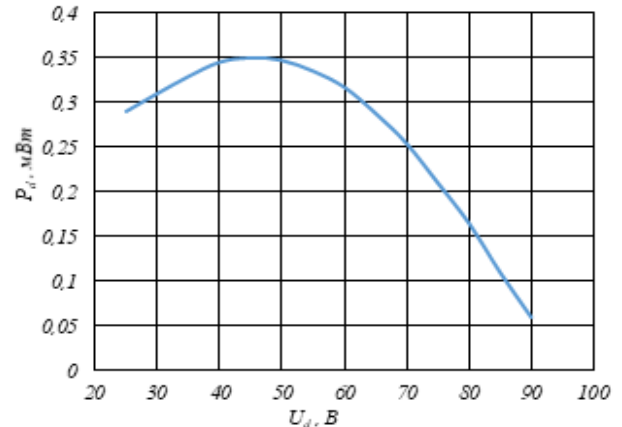


Рис. 3.

Моделювання електричних режимів у шестиелектродних ДСП (ДСП\_6\_ел) показало, що струм дуги під кожним електродом протікає впродовж майже 75% періоду промислової частоти [7]. Хоча під електродами трьохелектродних ДСП (ДСП\_3\_ел) тривалість протікання струму дуги під кожним електродом становить біля 80% періоду промислової частоти, при цьому в ДСП\_6\_ел сумарна енергетична ефективність шести дуг є вища, ніж у ДСП\_3\_ел. Пояснюється це тим, що завдяки оптимальному розміщенню шести електричних дуг над поверхнею шихти, які є основними джерелами тепла в електропечі, метал розтоплюється швидше, ніж від трьох дуг. Крім того, додатково шихта нагрівається теплом, зумовленим протіканням струму через шихту між електродами. Саме ці чинники забезпечують скорочення тривалості стадії розтоплення.

Як видно із рис. 3, потужність електричної дуги залежить від величини напруги, що дає змогу вибрати оптимальну потужність дуг ДСП. Найбільшу електричну потужність дуга споживає на інтервалі напруги від 35 В до 55 В, при цьому потужність дуги змінюється від 325 кВт до 350 кВт, а сумарна потужність, яку споживає шестиелектродна електропеч, становить біля 2,0 мВт.

За умови споживання кожною дугою ДСП\_6\_ел в середньому 340 кВт отримано графічну залежність (рис. 2) тривалості нагрівання металобрухту до температури 1650 °C, тобто до його повного розтоплення. Порівняння результатів моделювання режиму розтоплення металобрухту у ДСП\_3\_ел та ДСП\_6\_ел за однакової кількості металобрухту та живлення електропечей від трансформатора однакової потужності показали, що тривалість стадії розтоплення металобрухту в ДСП\_6\_ел становить біля 45 хв., що майже на 18 хв. менше, ніж у ДСП\_3\_ел (рис. 2). Це пояснюється тим, що у ДСП\_6\_ел за рахунок збільшення кількості електричних дуг та їхнього оптимального розміщення у просторі електропечі процес нагрівання металобрухту до рідкого стану відбувається швидше.

За даними, наведеними у [1], та розрахунками авторів витрати електроенергії на стадії розтоплення металобрухту у п'ятитонній ДСП\_3\_ел складають 1920 кВт·год, тоді як у реконструйованій п'ятитонній ДСП\_6\_ел вони становлять 1377 кВт·год за рахунок скорочення тривалості стадії розтоплення.

Як видно з отриманих результатів, реконструкція ДСП забезпечує зменшення обсягів спожи-

вання електроенергії, але це вимагає додаткових витрат коштів, тому доцільно здійснити економічні розрахунки з метою визначення економічної ефективності використання вказаної інновації.

В кінцевому результаті використання інноваційного рішення призводить до зниження собівартості готової продукції. З виконаних вище досліджень видно, що реконструкція дугової електропечі забезпечує зменшення обсягів споживання електричної енергії за рахунок скорочення стадії розтоплення металобрухту, що дає змогу підвищити її продуктивність.

Оцінку економічного ефекту від трансферу інновацій для дугової електропечі шляхом розрахунку річної собівартості електросталі здійснимо за умови, що термін експлуатації електропечі після реконструкції становить не менше, ніж 3 роки. Якщо за одну зміну в дуговій електропечі можна здійснити два технологічні процеси, то впродовж року з однозмінним графіком роботи підприємства в одній електропечі реалізовується 480 процесів.

Сумарні фінансові витрати, пов'язані з реалізацією інноваційного рішення ( $C_R$ ), складаються з витрат на: придбання або отримання патентів чи ліцензій; придбання обладнання; виконання проекту; виконання монтажних та пусконаладжувальних робіт. У даному випадку витрати на придбання патентів та ліцензій на інноваційне рішення рівні нулю, оскільки прийнято, що ці розробки безкоштовно передані власниками інноваційного рішення підприємству на безоплатній основі. Вартість додаткових елементів та силового електрообладнання, які необхідні для реконструкції, вибрано з Інтернет інформації фірм, що займаються реалізацією вказаного обладнання, і дорівнює 865 тис. грн. За даними проектного інституту «Укрзахіденергопроект» вартість проектних робіт складає від 1% для об'єктів вартістю понад 40 млн. грн. і до 3% – для об'єктів вартістю до 40 млн. грн. Враховуючи те, що вартість електродугової печі місткістю 5 тон є до 40 млн. грн., то вартість проекту приймаємо 3% від вартості дугової електропечі, що становить 32,048 тис. грн. Вартість монтажних та пусконаладжувальних робіт становлять від 30% для об'єктів малої вартості до 40% – для об'єктів великої вартості, тому вартість цих робіт приймаємо 30%, тобто 259,5 тис. грн. Таким чином, загальний обсяг витрат на реконструкцію дугової електропечі складає 1156,598 тис. грн.

У загальному випадку собівартість електросталі складається із постійної та змінної складових. У результаті реконструкції електропечі змінюються як постійна складова за рахунок збільшення величини амортизаційних відрахувань, так і змінна складова, яка пов'язана зі зміною обсягів споживання електричної енергії. У даному випадку не вказуються витрати на поточні ремонти та обслуговування електропечі, оскільки вони приймаються однаковими як для електропечі до її реконструкції, тобто базової, так і для реконструйованої.

Таким чином вираз для визначення собівартості електросталі за рахунок впровадження інноваційного технічного рішення запишеться у вигляді

$$S_i = (W_i \cdot p_E + VC_p) + (FC_0 + C_R / T_i), \quad (11)$$

де  $W_i$  – обсяг електричної електроенергії, необхідний для розплавлення металобрухту, який споживається після реконструкції дугової електропечі, кВт·год/рік;  $VC_p$  – решта змінних витрат у собівартості електросталі до реконструкції електропечі, тис. грн./рік;  $C_R$  – витрати на реконструкцію дугової електропечі, тис. грн;  $FC_0$  – постійні витрати у собівартості електросталі, тис. грн./рік;  $T_i$  – термін використання реконструйованої дугової електропечі (де  $T_i=1, 2, \dots, 8$ ), років.

Вираз (11) враховує зменшення обсягів споживання електричної енергії лише на стадії розтоплення металобрухту, який в середньому становить 65–70 % від сумарного обсягу споживання електроенергії, необхідної задля реалізації повного технологічного процесу.

Використовуючи дані щодо обсягів споживання електроенергії реконструйованою електропечі, оцінимо економічну вигоду від реалізації інноваційного рішення, шляхом визначення собівартості електросталі до і після її реконструкції (таблиця).

Види витрат	$S_i$ до реконструкції, тис. грн./рік	$S_i$ після реконструкції, тис. грн./рік	Відхилення показника, тис. грн./рік
I. Змінні витрати у т.ч.:	24047,376	23550,256	-497,12
– електроенергія	2676,02	2178,9	-497,12
– решта змінних витрат	21371,356	21371,356	–
II. Постійні витрати у т.ч.:	2774,54	2919,115	
– постійні витрат у собівартості продукції	2774,54	2774,54	–
– витрати на реконструкцію	–	144,575	144,575
Разом собівартість	26821,92	26469,371	-352,549

З таблиці видно, що результатом експлуатації реконструйованої електропечі місткістю 5 тон впродовж 8 років є зниження річної собівартості електросталі на 352,549 тис. грн. або на 1,31 %. Таким чином економічні розрахунки вказують на доцільність реалізації такої інновації. У даному випадку розглядається випадок, коли реконструкція електропечі здійснюється за власні кошти підприємства без залучення кредитів, що не вимагає додаткових коштів на покриття кредиту.

#### **Висновки.**

1. Вдосконалено математичну модель системи електропостачання дугових сталеплавильних печей за рахунок доповнення її моделлю балансу електричної та теплової енергії дугової електропечі, яка забезпечує дослідження процесу нагрівання металобрухту електричними дугами на стадії розтоплення металобрухту та режимів споживання електроенергії електричними дугами.

2. Результати моделювання режимів нагрівання металобрухту в триелектродній та шестиелектродній дугових електропечах місткістю 5 тон показали, що, завдяки модернізації електропечі, тривалість одного технологічного процесу в шестиелектродній електропечі скорочується майже на 18 хв., що забезпечує зменшення споживання обсягів електроенергії приблизно на 28% у порівнянні з триелектродною дуговою електропечічю.

3. Розрахунки собівартості електросталі отриманої в 5-ти тонній реконструйованій електропечі за умови її експлуатації на інтервалі 8 років, показали, що зниження собівартості електросталі становить 1,31 %. Отриманий результат підтверджує доцільність реалізації розглянутого інноваційного технічного рішення.

1. Рыжнев Ю.Л., Минеев Р.В., Михеев А.П., Смелянский М.Я. Влияние дуговых электропечей на системы электроснабжения. М.: Энергия, 1975. 184 с.

2. Миронов Ю.М., Миронова А.Н. Повышение экономической эффективности дуговых сталеплавильных печей с помощью оптимизации их энергопотребления. *Вестник Чувашского университета. Электротехника и энергетика*. 2018. № 3. С. 79-92.

3. Гудим Ю.А., Зиннуров И.Ю., Киселев А.Д., Шумаков А.М. Рациональные способы интенсификации плавки в современных дуговых сталеплавильных печах. *Вестник ЮУрГУ. Серия "Металлургия"*. 2015. № 9. С. 10-13.

4. Смагин В.Н., Ойленбах Р. Энергосбережение – условие эффективной работы предприятий черной металлургии. *Вестник ЮУрГУ. Серия «Экономика и менеджмент»*. 2011. Вып. 19. № 28. С. 110 - 117.

5. Катунин А.И., Анашкин Н.С., Козырев Н.А., Тиммерман Н.Н., Захарова Т.П. Экономические вопросы использования жидкого чугуна при производстве электростали. *Сталь*. 2001. № 7. С. 26-27.  
URL: [http://elcomet.narod.ru/estee/est\\_3.htm](http://elcomet.narod.ru/estee/est_3.htm) (дата звернення 25.09.2020)

6. Гудим В.І., Дурняк Б.В., Косовська В.В. Система електропостачання шестиелектродної дугової електропечі з пасивним керованим фільтром струмів вищих гармонік. Патент України на корисну модель. № 109823, 2016.

7. Hudym V., Drozdowski P., Postoliuk A., Mamcarz D. Mathematical model of the six electrode pulse current electric arc furnaces. *Technical transactions. Electrical engineering*, 2016. Issue 3-E. Pp. 151-161. DOI: <https://doi.org/10.4467/2353737XCT.16.273.6072>

8. Чуа Л.О., Лин Пен-Мин. Машинный анализ электронных схем. Алгоритмы и вычислительные методы. М: Энергия, 1980. 640 с.

#### **ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ РЕКОНСТРУКЦИИ ТРЕХФАЗНОЙ ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОПЕЧИ**

**В.И. Гудым<sup>1</sup>**, докт.техн.наук, **В.В. Косовская<sup>2</sup>**, канд.эконом.наук, **Н.П. Яворская**, канд.эконом.наук, **Т.И. Данько<sup>2</sup>**, канд.эконом.наук

<sup>1</sup> Львовский национальный аграрный университет,  
ул. Владимира Великого, 1, Дубляны, 80381, Украина,

e-mail: [gudymvi@ukr.net](mailto:gudymvi@ukr.net)

<sup>2</sup> Национальный университет «Львовская политехника»,  
ул. С. Бандеры, 12, Львов, 79013, Украина,

e-mail: [virakos21@ukr.net](mailto:virakos21@ukr.net)

*Технологические агрегаты электродугового переплава металлолома относятся к наиболее энергоемким потребителям, для которых проблема экономии электроэнергии весьма актуальна. Предложенная реконструкция электропечи для сокращения объемов потребления электроэнергии требует технико-экономических обоснований. Результаты моделирования реконструированной электропечи показали, что за*



счет оптимального размещения электрических дуг в пространстве электропечи продолжительность стадии расплавления сокращается на 19 мин. Экономические расчеты внедрения инновационного решения показали, что вследствие сокращения продолжительности стадии расплавления металлолома в реконструированной электропечи снижается объем потребления электроэнергии приблизительно на 28% на один технологический процесс. В данном случае учтено только сокращение потребления электроэнергии, но не учтена возможность повышения производительности электропечи за счет увеличения количества технологических процессов на протяжении одной смены. Библ. 8, рис. 3, табл. 1.

**Ключевые слова:** электродуговые печи, экономия электроэнергии, себестоимость электростали, технические инновации, реконструкция электропечи.

## TECHNICAL AND ECONOMIC ASSESSMENT OF THE RECONSTRUCTION OF THREE-PHASE ELECTRIC-ARC STEEL FURNACE

V.I. Hudym<sup>1</sup>, V.V. Kosovska<sup>2</sup>, N.P. Yavorska<sup>2</sup>, T.I. Danko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Lviv National Agrarian University,

1, V.Velykoho str., Dubliany, 80381, Ukraine,

e-mail: [gudymvi@ukr.net](mailto:gudymvi@ukr.net)

<sup>2</sup> Lviv Polytechnic National University,

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

e-mail: [virakos21@ukr.net](mailto:virakos21@ukr.net)

*The technological units of electric arc steel remelting are among the most energy-intensive consumers for whom the problem of energy saving is extremely urgent. The proposed reconstruction of the electric-arc steel furnace is aimed at reducing the amount of electricity consumption. The feasibility study makes it possible to assess the technical and economic parameters of project of an electric-arc steel furnace reconstruction. The simulation results of the reconstructed electric furnace showed that due to the optimal placement of electric arcs in the electric furnace space, the duration of the metal melting stage can be reduced by approximately 19 min. Cost-effectiveness calculations for the implementation of the innovative solution showed that reducing the duration of steel remelting in a reconstructed furnace reduces the electricity consumption by approximately 28% per process. The article takes into account only the reduction of electricity consumption, but does not take into account the possibility of improving the productivity of the furnace by increasing the number of technological processes per shift. References 7, figures 3, table 1.*

**Key words:** electric-arc furnace, energy saving, cost of electric steel, technical innovation, reconstruction of electric furnace.

1. Ryzhnev Yu.L., Mineev R.V., Mikheev A.P., Smelianskii M.Ya. Effect of electric arc furnaces on power supply systems. Moskva: Eenergiia, 1975. 184 p. (Rus)
2. Mironov Ju.M., Mironova A.N. Increasing the economic efficiency of electric arc furnaces by optimizing their energy consumption. *Vestnik Chuvashskogo universiteta. Elektrotehnika i energetyka*. 2018. No 3. Pp. 79-92. (Rus)
3. Gudim Yu.A., Zinurov I.J., Kiselev A.D., Shumakov A.M. Rational Methods for Smelting Intensification in Modern Electric Arc Furnaces. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Metalurgiya*. 2008. No 9. Pp. 10-13. (Rus)
4. Smagin W.N., Ojlenbakh R. Energy saving is a condition for the efficient operation of ferrous metallurgy enterprises. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Ekonomika i menedzment*. 2011. Vyp. 19. No 28. Pp. 110-117. (Rus)
5. Katunin A.I., Anashkin N.S., Kozyrev N.A., Timmerman N.N., Zaharova T.P. Economic issues of using liquid iron in the production of electric steel. *Stal*. 2001. No 7. Pp. 26-27. URL: [http://elcomet.narod.ru/esteeel/est\\_3.htm](http://elcomet.narod.ru/esteeel/est_3.htm) (accessed at 25.09.2020). (Rus)
6. Hudym V., Durniak B., Kosowska V. Power supply system of a six-electrode arc electric furnace with a passive controlled filter of currents of higher harmonics. Patent UA No 109823, 2016. (UA)
7. Hudym V., Drozdowski P., Postoliuk A., Mamcarz D. Mathematical model of the six electrode pulse current electric arc furnaces. *Technical transactions. Electrical engineering*, 2016. Issue 3-E. Pp. 151-161. DOI: <https://doi.org/10.4467/2353737XCT.16.273.6072> .
8. Chua L.O., Lin Pen-Min. Machine analysis of electronic circuits. Algorithms and computational methods. Moskva: Energiia, 1980. 640 p. (Rus)

Надійшла 10.02.2020  
Остаточний варіант 24.09.20