

Підвищення ефективності технологічних процесів при виплавці сталі в електродугових печах

Виконав: Кожухар Кирило Вадимович

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до випускної кваліфікаційної роботи на тему «Підвищення ефективності технологічних процесів при виплавці сталі в електродугових печах»: 70 с., 16 табл., 18 рис., 16 джерел.

Об'єкт дослідження: технологічні процеси виплавки сталі в електродугових печах.

Предмет дослідження: методи і технічні засоби підвищення ефективності виплавки сталі в електродугових печах.

Мета роботи: розробка рекомендацій для підвищення ефективності технологічних процесів виплавки сталі в електродугових печах.

Методи дослідження: аналіз літературних джерел, розрахунково-аналітичні методи, графічні методи.

Результати роботи: Першочергово варто впровадити заходи з найшвидшою окупністю — встановлення тиристорних перетворювачів, які повертають вкладення вже за п'ять місяців. Паралельно доцільно готувати реалізацію більш енергоефективних рішень, таких як оптимізація насипної щільності металобрухту (економія до 2,5 млн кВт•год на рік) та підвищення ентальпії шихти за допомогою ТКГ (економія 2,284 млн кВт•год на рік). Такий підхід дозволяє досягти швидкого ефекту та водночас закласти основу для суттєвого зниження енерговитрат у перспективі. Такий підхід дає змогу підтримувати фінансову стабільність, оперативно досягати помітних результатів і водночас поступово створювати основу для тривалого зниження енергоспоживання та оновлення виробничих процесів.

ЕЛЕКТРОДУГОВА ПІЧ, ЕФЕКТИВНІСТЬ, СТАЛЬ, МЕТАЛЕВИЙ БРУХТ, ЕНЕРГОВИТРАТИ, ШЛАК

ВСТУП

Сьогодні сталеплавильна промисловість залишається одним із базових секторів економіки, без якого неможливе стабільне функціонування багатьох галузей — машинобудування, будівництва, транспорту та інших. Проте ця сфера не стоїть осторонь глобальних змін: зростання цін на енергоносії, посилення екологічних вимог та необхідність економії ресурсів ставлять перед виробниками сталі нові виклики.

Одним із головних напрямів у виробництві сталі сьогодні є застосування електродугових печей. Це обладнання забезпечує досить високу продуктивність і дозволяє гнучко використовувати різну сировину. Водночас експлуатація таких печей супроводжується значними енергетичними витратами й техногенним впливом на навколишнє середовище. Саме тому підвищення ефективності їхньої роботи є особливо актуальним.

Оптимізація технологічних процесів в електродугових печах дає змогу не лише скоротити споживання енергії, а й зменшити собівартість виробництва та підвищити якість кінцевої продукції. Це має важливе значення в умовах, коли підприємства змушені шукати шляхи підвищення своєї конкурентоспроможності. Вдосконалення процесу виплавки сталі — це не просто питання технологій, а необхідна умова для подальшого розвитку сучасної металургії.

Метою роботи є розробка рекомендацій для підвищення ефективності технологічних процесів виплавки сталі в електродугових печах.

Для досягнення цієї мети у роботі поставлені наступні завдання:

- 1) проаналізувати основні задачі процесу виплавки сталі в електродугових печах.
- 2) дослідити ключові реакції, що відбуваються при виплавці сталі в електродугових печах.

- 3) розглянути види шихтових матеріалів та їх вплив на процес виплавки сталі.
- 4) охарактеризувати та класифікувати електродугові печі.
- 5) проаналізувати технологічний процес дугової сталеплавильної печі
- 6) дослідити способи підвищення ефективності дугових сталеплавильних печей
- 7) описати та охарактеризувати шляхи оптимізації енерговитрат при роботі електродугових печей
- 8) виконати розрахунок ефективності впровадження енергоефективних заходів для дугових сталеплавильних печей та обрати оптимальне рішення.

Об'єктом дослідження є технологічні процеси виплавки сталі в електродугових печах.

Предметом дослідження є методи і технічні засоби підвищення ефективності виплавки сталі в електродугових печах.

Отримані результати можуть стати основою для модернізації сталеплавильних підприємств. Їх впровадження дозволить зменшити виробничі витрати, покращити екологічну ситуацію та зміцнити позиції вітчизняної металургії як на внутрішньому, так і на зовнішньому ринках.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПЕЧАХ

1.1 Основні задачі процесу виплавки сталі

Виробництво сталі — це послідовність технологічних операцій, які охоплюють складні фізичні та фізико-хімічні процеси. Ці процеси реалізуються у визначеному порядку або комбінації, залежно від обраної технології та вимог до кінцевого продукту.

Основним завданням плавлення у сталеплавильному агрегаті є отримання рідкої сталі потрібної марки та температури з максимально ефективним використанням ресурсів — як трудових, так і сировинних та енергетичних.

Найбільшу складність усього процесу становить досягнення необхідного хімічного складу сталі. Для цього потрібно виконати низку фізико-хімічних реакцій, частина з яких майже не піддається точному регулюванню або взагалі є складною для безпосереднього контролю [1].

Плавку металу на металургійних заводах поділяють на два основних етапи, які зображені на рисунку 1.1.

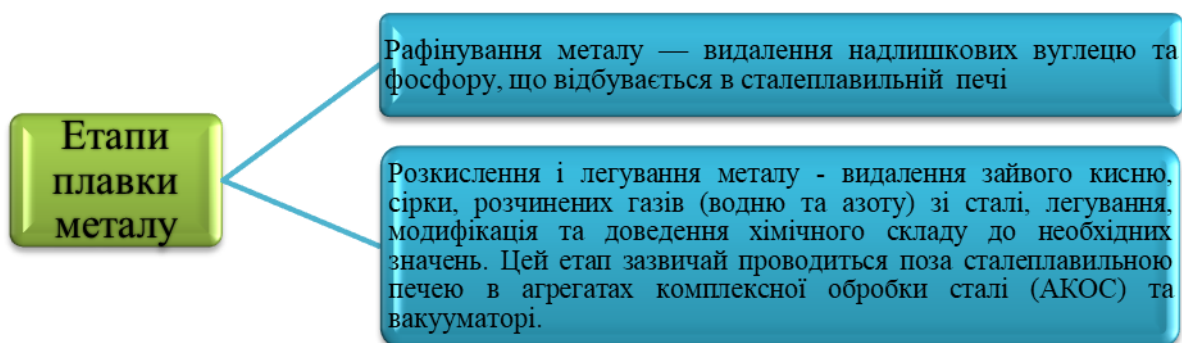


Рисунок 1.1 – Етапи плавки металу на металургійних заводах

Поділ етапів рафінування та розкислення пояснюється тим, що ці процеси мають протилежну природу й не можуть відбуватися одночасно. Під час рафінування з металу видаляють домішки шляхом їх окиснення, тобто з додаванням кисню. Натомість розкислення передбачає, навпаки, усунення надлишкового кисню з рідкої сталі.

Одним із найскладніших моментів у процесі виплавки є нагрівання металу до потрібної температури. Цей етап потребує синхронного проведення нагрівання та окисного рафінування, оскільки наприкінці цього процесу видаляється переважно вуглець. Відтак, особливу увагу слід приділяти точному узгодженню температурного режиму та швидкості обезуглерожування [2].

Усі сучасні сталеплавильні технології передбачають активну взаємодію рідкого металу зі шлаком. Шлаки є обов'язковим елементом процесу, незалежно від типу агрегату, в якому здійснюється плавка. Склад та властивості істотно впливають на якість кінцевого продукту, а саме:

- шлаки поглинають і фіксують шкідливі домішки, зокрема фосфор і сірку;
- регулюють швидкість перенесення кисню з газової фази до металу, що впливає на темп окиснення;
- утворюють захисний бар'єр від проникнення газів, таких як азот і водень;
- впливають на швидкість нагрівання металу, змінюючи теплопровідність і теплоємність системи.

До основних джерел утворення шлаку відносять [2]:

- продукти окиснення заліза та його домішок — до них належать оксиди FeO , Fe_2O_3 , SiO , P_2O_3 , MnO , які утворюються безпосередньо в процесі плавлення;
- руйнування вогнетривкої футерівки агрегатів, унаслідок чого до шлаку потрапляють компоненти вогнетривів, зокрема SiO_2 , CaO , MgO ;
- шлакоутворювальні добавки, що вводяться цілеспрямовано для формування потрібного складу шлаку: вапно, вапняк, кварцовий пісок, боксит, шамотний бій (основні оксиди — CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3);

- тверді окислювачі, які додаються для інтенсифікації процесу окиснення домішок: залізна руда, агломерат, залізородні котуни.

Отже, за хімічною природою основні компоненти сталеплавильних шлаків поділяють на кілька груп:

- основні оксиди: FeO , MnO , MgO , CaO ;
- амфотерні або умовно нейтральні: Al_2O_3 , Fe_2O_3 ;
- кислотні оксиди: SiO_2 .

У залежності від переважаючого складу шлаки класифікують як основні або кислі. Перші містять переважно основні оксиди й утворюються в печах із відповідним футеруванням. Кислі шлаки, натомість, мають високий вміст кислотних оксидів, насамперед SiO_2 , і формуються в агрегатах із кислою футеровкою [12].

1.2 Ключові реакції при виплавці сталі в електродугових печах

У процесі виплавки сталі в сталеплавильних агрегатах відбуваються інтенсивні окислювальні реакції. Під дією кисню окиснюються різні домішки, зокрема ті, що зображені на рисунку 1.2.



Рисунок 1.2 – Окислення домішок при виплавці сталі в сталеплавильних печах

Основні реакції окиснення можуть включати:

- $[\text{Fe}] + 1/2 (\text{O}_2) = (\text{FeO})$;
- $2[\text{P}] + 5/2 (\text{O}_2) = (\text{P}_2\text{O}_5)$;
- $[\text{C}] + 1/2 (\text{O}_2) = (\text{CO})$;
- $[\text{Mn}] + 1/2 (\text{O}_2) = (\text{MnO})$;
- $[\text{Si}] + (\text{O}_2) = (\text{SiO}_2)$.

Вміст вуглецю в сталі значно нижчий, ніж у чавуні, тому процеси сталеплавлення завжди супроводжуються окисненням вуглецю — основною реакцією одержання рідкої сталі. Вуглець виступає головним споживачем кисню, що подається у металеву ванну для окиснення домішок. Видалення вуглецю може відбуватися через різні джерела кисню, зокрема: кисень газової фази [2]:

- кисень газової фази: $[\text{C}] + 1/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}$;
- кисень, розчинений у металі: $[\text{C}] + [\text{O}] \rightarrow \text{CO}$;
- кисень оксидів заліза у шлаку: $[\text{C}] + \text{FeO} \rightarrow \text{CO} + [\text{Fe}]$.

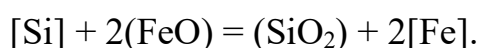
Особливістю реакції окиснення вуглецю є те, що її продуктом є газоподібний оксид — монооксид вуглецю (CO). Ця реакція проходить із утворенням бульбашок CO на межі розділу металу і футерування печі. Газ, що виділяється, проходить крізь металеву та шлакову ванни, інтенсивно перемішуючи їх. Об'єм CO значно перевищує об'єм металу, унаслідок чого метал «кипить» у процесі окиснення. Окрім того, реакції окиснення вуглецю є екзотермічними і супроводжуються виділенням тепла, що сприяє посиленню тепло- та масообміну в плавильній ванні. Це є важливим фактором інтенсифікації сталеплавильного процесу в цілому [11].

Окислення кремнію супроводжується виділенням значної кількості тепла. Цей процес може протікати інтенсивно у всьому температурному діапазоні сталеваріння за наявності окислювача. Продуктом реакції є діоксид кремнію (SiO_2), який переходить у шлак. У шлаку SiO_2 в основному взаємодіє з вапном

(CaO). Через низьку активність SiO_2 кремній активно переходить із металу у шлакову фазу.

Марганець — елемент, що також легко окислюється, особливо при порівняно низьких температурах. В результаті можуть утворюватися різні оксиди марганцю: Mn_2O_3 , Mn_3O_4 та MnO . При високих температурах найбільш стабільним є оксид марганцю (MnO).

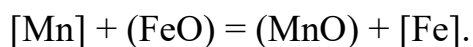
Однією з характерних реакцій окислення марганцю киснем, розчиненим у шлаку, є:



Окислення кремнію супроводжується значним виділенням тепла. Цей процес може відбуватися інтенсивно протягом усього температурного діапазону сталеваріння за умови наявності окислювача. Основним продуктом реакції є діоксид кремнію (SiO_2), який утворює шлакову фазу. У складі шлаку SiO_2 переважно взаємодіє з вапном (CaO). Через низьку хімічну активність SiO_2 кремній переходить із металу у шлак [15].

Марганець — елемент, що легко окислюється, особливо при відносно низьких температурах. У результаті окиснення можуть утворюватися різноманітні оксиди марганцю, зокрема MnO_2 , Mn_2O_3 , Mn_3O_4 та MnO . При високих температурах найбільш стабільним є закис марганцю (MnO).

Розглянемо реакцію окислення марганцю киснем, розчиненим у шлаку:



Подібно до реакцій окислення кремнію, окислення марганцю супроводжується значним тепловим ефектом. Продуктом цієї реакції є оксид, що утворює шлак. Основна зона протікання реакції знаходиться на межі розділу «метал — шлак» [2].

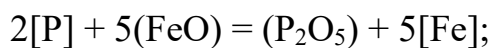
Фосфор негативно впливає на якість сталі, що проявляється в кількох аспектах:

- Зниження розчинності фосфору в α -залізі (α -Fe) при температурах нижче 1050 °C призводить до утворення метастабільних розчинів. При подальшому нагріванні ці розчини розпадаються з формуванням фази Fe_2P на межах зерен металу, що викликає підвищену крихкість. Це явище відоме як відпускна крихкість або холодноламкість металу, що погіршує його пластичні властивості.
- Лікваційна здатність фосфору проявляється у його схильності до перерозподілу в об'ємі зливка під час кристалізації, що негативно впливає на однорідність хімічного складу сталі.

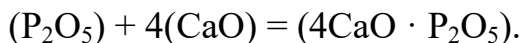
Відповідно до ГОСТ 380-2005, вміст фосфору у сталі не повинен перевищувати 0,045 % для сталей звичайної якості та 0,001 % — для високоякісних марок.

Процес дефосфорації здійснюється у два етапи [11]:

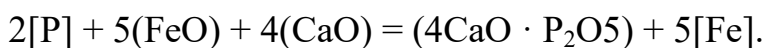
- Окислення фосфору металом киснем (FeO) та перехід (P_2O_5) у шлак:



- Перехід (P_2O_5) в міцну хімічну сполуку ($4\text{CaO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5$):



Підсумовуючи рівняння (1.1) та (1.2), отримуємо:



Повнота протікання цієї реакції залежить від складу шлаку і температури.

Вона зростає зі збільшенням основності (CaO) та окислювальної здатності шлаку (FeO) при порівняно низьких температурах. Таким чином, дефосфорація відбувається на початкових стадіях сталеваріння.

Сірка є домішкою, що погіршує якість сталі, тому її вміст у металі обмежується: для сталі звичайної якості $[\text{S}]$ — до 0,045%, для сталей особливо високої якості — менше 0,001%.

Аспекти шкідливого впливу сірки [15]:

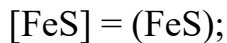
1. Сірка у вигляді FeS необмежено розчинна у рідкому залозі. Однак при кристалізації її розчинність знижується, і надлишкова сірка витісняється у рідку фазу, що розташовується по межах зерен аустеніту. Кристалізація

рідкої фази, збагаченої сіркою, завершується при температурі 988°C, утворюючи евтектику FeS-Fe. При подальшому нагріванні металу до 1200°C (перед прокаткою чи куванням) евтектика розплавляється, що може призвести до утворення тріщин і дефектів на поверхні злитка. Втрата пластичності металу при високих температурах називається червоноламкістю.

2. Висока лікваційна здатність сірки, яка приблизно втричі вища, ніж у фосфору, також погіршує якість сталі.

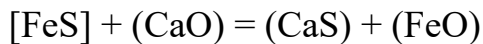
Десульфурація сталі здійснюється у дві стадії:

- Процес встановлення рівноваги FeS між металом та шлаком:



- Перехід (FeS) в (CaS): $(\text{FeS}) + (\text{CaO}) = (\text{CaS}) + (\text{FeO})$

Сумарну реакцію рівнянь можна записати як:



Основні умови, що сприяють десульфурації сталі [2]:

- Підвищення основності шлаку за рахунок збільшення вмісту CaO;
- Зниження окислювальної здатності шлаку (FeO) шляхом введення розкислювачів — феросплавів, активних до кисню (Al, FeAl, FeSi, FeMn);
- Оскільки реакція десульфурації є ендотермічною, підвищення температури позитивно впливає на її інтенсивність. Тому десульфурацію проводять у періоди максимальної температури металу;
- Реакція є гетерогенною і протікає на межі розділу «метал — шлак», тому для прискорення процесу металеву ванну інтенсивно перемішують;
- Шлак з підвищеним вмістом сірки необхідно своєчасно видаляти, щоб уникнути ресульфурації під час розливання сталі.

1.3 Види шихтових матеріалів та їх вплив на процес виплавки сталі

Процес виплавки сталі в електродугових печах (ЕДП) передбачає використання різних видів шихтових матеріалів, які суттєво впливають на енерговитрати, тривалість плавки, хід металургійних реакцій та якість кінцевого продукту. Шихта — це сировина, що містить залізо або його сполуки, і завантажується у піч для отримання розплаву з необхідним хімічним складом.

Основні шихтові матеріали, які застосовуються в електродугових сталеплавильних процесах показано на рис.1.3.

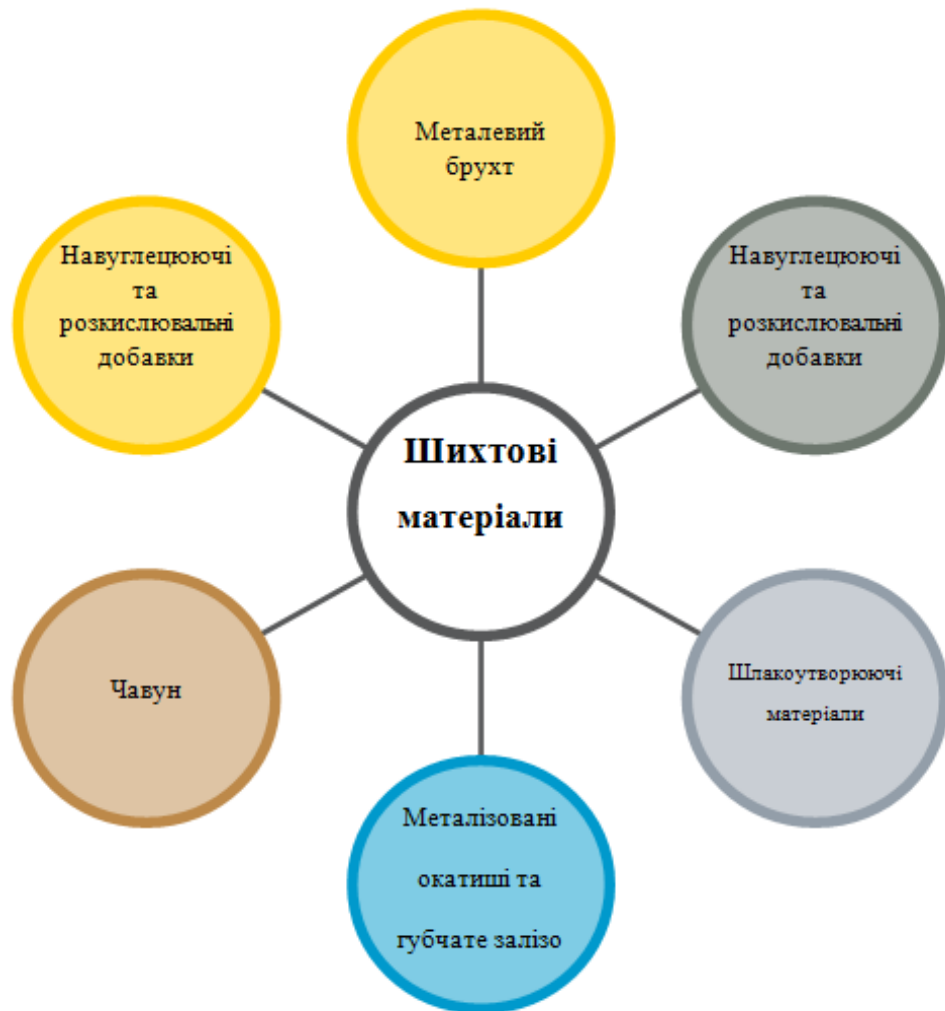


Рисунок 1.3 - Основні шихтові матеріали, які застосовуються в електродугових сталеплавильних процесах

Металевий брухт — найбільш розповсюджений вид шихти. Використовують як вуглецевий, так і легований брухт. Якість брухту визначається вмістом домішок, розмірами фрагментів, рівнем корозії та наявністю неметалічних включень. Низькоякісний брухт може стати джерелом небажаних домішок, таких як сірка, фосфор, водень або мідь.

Чавун — додається до шихти з метою підвищення вмісту вуглецю в розплаві, а також для зниження температури плавлення. Однак високий вміст сірки або фосфору в чавуні потребує додаткових операцій десульфурації або дефосфорації.

Металізовані окатиші та губчасте залізо — сучасні альтернативи брухту, особливо у регіонах з обмеженим доступом до металобрухту. Ці матеріали мають високу чистоту та низький вміст домішок. Виготовляються шляхом прямого відновлення залізорудної сировини в твердому стані і мають пористу структуру, що сприяє полегшенню плавлення.

Шлакоутворюючі матеріали — флюси (вапняк, доломіт, флюорит) сприяють утворенню рідкого шлаку, який поглинає шкідливі домішки, захищає метал від вторинного окиснення та покращує тепловий баланс. Важливим параметром є співвідношення CaO/SiO_2 у шлаку, а також його здатність до рафінації сталі.

Навуглецюючі та розкислювальні добавки — такі як графіт, кокс, феросплави, кремній, алюміній — використовуються для регулювання вмісту вуглецю та кисню в сталі. Вони зменшують окисдування легуючих елементів і сприяють формуванню бажаної структури металу.

Легуючі елементи — ферованадій, ферохром, феронікель, феромарганець та інші — вводяться переважно на завершальних етапах плавки або під час легування сталі в ковші. Вони забезпечують покращення механічних та експлуатаційних властивостей металу.

Вибір шихтових матеріалів визначає низку важливих параметрів сталеплавильного процесу [13]:

- Швидкість нагрівання і плавлення: пористі матеріали (наприклад, губчасте залізо) нагріваються і плавляться швидше, ніж щільні шматки металевого брухту.
- Хімічний склад сталі: використання шихти без шкідливих домішок зменшує потребу у корекції складу металу під час плавки.
- Енергетичні витрати: попереднє нагрівання шихти або застосування легкоплавких компонентів сприяє зниженню витрат електроенергії.
- Шлакоутворення і рафінація: наявність флюсів і оптимальне співвідношення CaO/SiO_2 у шлаку забезпечують ефективне видалення небажаних домішок.

Використання якісної шихти дозволяє не лише підвищити продуктивність електродугової печі, а й покращити екологічні показники виробництва, зокрема шляхом зниження викидів CO_2 , оксидів азоту та інших шкідливих сполук.

Сучасне виробництво сталі в електродугових печах має кілька чітких тенденцій: зменшення використання низькоякісного металобрухту, впровадження попереднього сортування та очищення матеріалів, зростання частки металізованих окатишів, а також оптимізація співвідношення різних видів шихти для стабільнішої роботи печі [15].

Тому правильний вибір та пропорції шихтових матеріалів дуже важливі для безперебійного плавлення, зниження витрат електроенергії та отримання якісної сталі. Проте, окрім шихти та хімічних процесів, великий вплив має і технічний стан самої електродугової печі.

Наступним кроком розглянемо основні типи таких печей, їх класифікацію та особливості технологічного процесу, який у них відбувається.

2 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ТА КЛАСИФІКАЦІЯ ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПЕЧЕЙ

2.1 Характеристика та класифікація електродугових печей

Електрична плавильна піч — це пристрій, в якому електрична енергія перетворюється на тепло, що використовується для розплавлення матеріалу.

За принципом роботи печі поділяються на печі опору та електродугові печі (рис. 2.1).

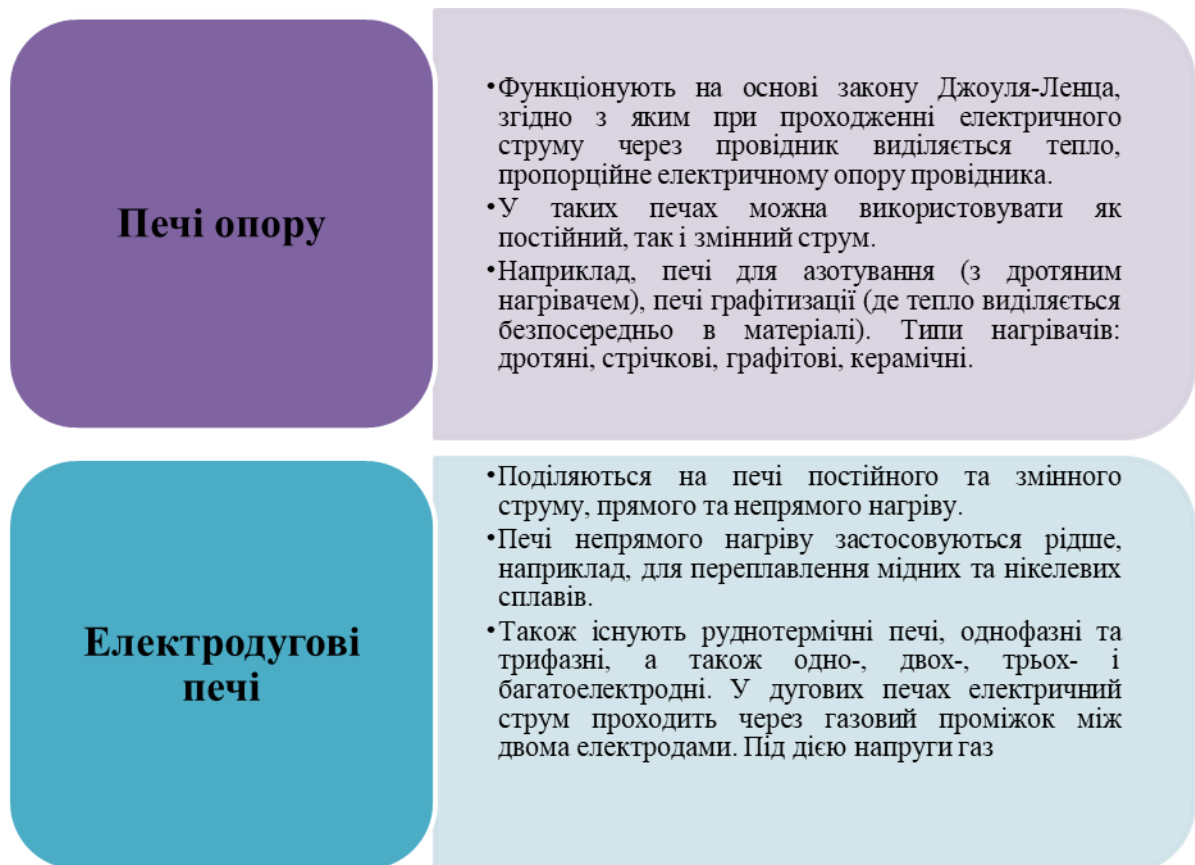


Рисунок 2.1 – Класифікація печей за способом перетворення

2. За призначенням [3]:

- Нагрівальні печі застосовуються для нагрівання матеріалів без переходу їх у рідкий стан. У металургії їх використовують для таких операцій, як випалення вогнетривів, вапняку, магнезиту, а також сушка ливарних форм, руди чи піску. Крім того, ці печі допомагають надавати металу пластичність перед деформацією та виконують термічну обробку для зміни структури і поліпшення механічних властивостей.
- Плавильні печі призначені для розплавлення і переплавки металів, тобто в них матеріали зазвичай переходять у рідкий стан.

3. За режимом роботи [3]:

- Печі безперервної дії працюють без зупинок — матеріали постійно рухаються від місця завантаження до випуску готового продукту. Прикладом таких є рудовідновні дугові печі.
- Печі періодичної (або циклічної) дії функціонують поетапно: спочатку завантажують шихту, потім нагрівають, випускають готовий продукт і проводять технічне обслуговування чи ремонт. Наприклад, сталеплавильні дугові печі. Кожен цикл включає всі ці етапи, а перед початком наступного циклу піч розігрівається і готується до роботи.

У електросталеплавильному виробництві використовується різноманітне обладнання, найбільш поширені типи якого наведені на рис. 2.2.

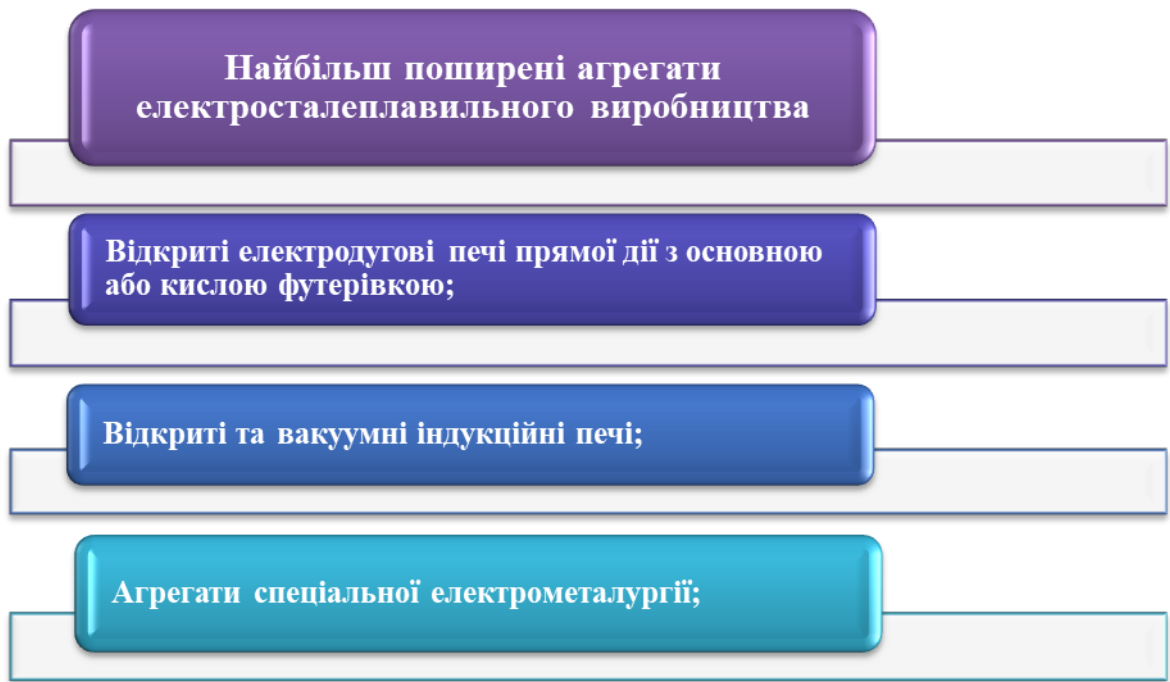


Рисунок 2.2 - Найбільш поширені агрегати електросталеплавильного виробництва

Сьогодні дугові сталеплавильні печі (ДСП) постійного струму набирають все більшої популярності завдяки своїм технологічним перевагам у порівнянні з традиційними печами змінного струму. Проте для їхнього використання потрібні більш складні системи електропостачання та керування.

Методики, що дозволяють ефективно аналізувати та проектувати системи управління для таких печей, поки що розвинені недостатньо. Це пов'язано з двома основними причинами [5]:

1. Обмежений практичний досвід експлуатації ДСП у поєднанні із сучасними системами керування.
2. Складність і нелінійний характер електричної дуги — ключового елемента печі.

Електрична дуга, яка виникає між рухомим електродом і шихтою, є основним джерелом тепла в печах як змінного, так і постійного струму. Через свою нелінійність та швидкі динамічні зміни вона ускладнює керування

процесом, що вимагає застосування нових підходів до управління і оптимізації технологічних режимів.

Електродугові печі широко використовують у металургії, хімічній, машинобудівній та інших промислових галузях [6]. Класифікація електродугових печей наведена в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Класифікація електродугових печей

Тип	Характеристика
Дугові печі побічної дії	У таких печах електричний дуговий розряд виникає між електродами, розташованими над матеріалом, що нагрівається. Основний механізм передачі тепла від дуги до матеріалу здійснюється через теплове випромінювання.
Дугові печі прямої дії	У цих печах дуга горить між кінцями електродів і нагріває матеріал безпосередньо. Теплова енергія передається через: — Виділення тепла в опорних плямах дуги. — Протікання струму через розплавлений матеріал. — Випромінювання плазми дуги. — Конвекцію та теплопровідність.
Дугові печі опору	У цих агрегатах дуга горить під шаром електропровідної шихти. Тепло утворюється як у дуговому розряді, так і при проходженні струму через шихту. Передача тепла до об'єму печі відбувається завдяки теплопровідності, випромінюванню та, меншою мірою, конвекції.
Вакуумні дугові печі	Працюють при низькому тиску, зазвичай в інертному газі або парах матеріалу, що переплавляється. Електрична дуга горить між: — Витратним електродом із матеріалу, що переплавляється, і ванною рідкого металу. — Невитратним електродом і ванною рідкого металу.

Ці типи печей дають змогу точно контролювати температуру та хімічний склад матеріалів, що робить їх незамінними у багатьох виробничих процесах.

На рисунку 2.3 розглянемо схему розміщення дугової сталеплавильної печі.

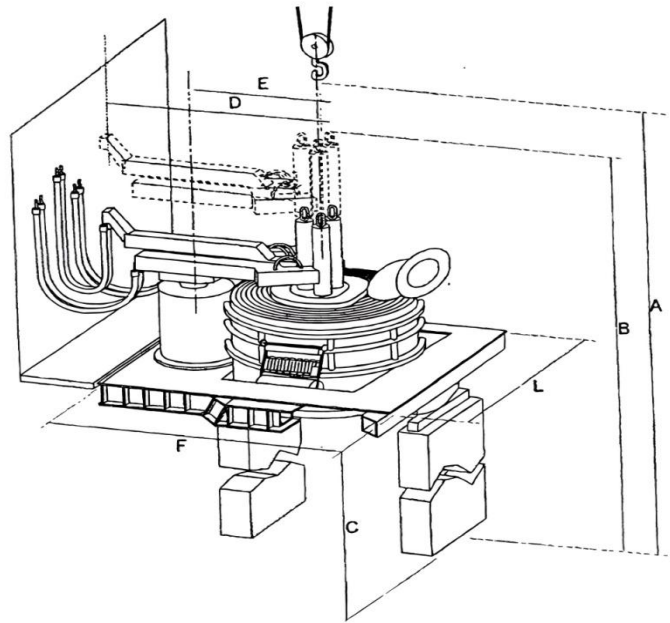


Рисунок 2.3 - Схема розміщення дугових сталеплавильних печей

Джерелом електропостачання дугових сталеплавильних печей служать підстанції з високою напругою — 35 або 110 кВт. Потужність трансформатора, необхідного для однієї печі місткістю 140 тонн, становить близько 125 МВА [4].

Якщо до цього додати трансформатор для установки типу «ківш-піч» (КП), загальна потужність системи збільшується до 145–150 МВА. У випадку одночасної роботи двох пар комплексів ДСП-КП сумарна потужність може сягати 300 МВА [4].

Такий розподіл потужностей дозволяє забезпечити високу енергоефективність і стабільність роботи всього електросталеплавильного виробництва.

2.2 Технологічний процес дугової сталеплавильної печі

Робота дугових печей базується на виділенні тепла в електричній дузі. Завдяки високій концентрації енергії в дузі досягаються дуже високі швидкості нагрівання та екстремальні температури. Електрична дуга може горіти в різних середовищах — у повітрі, парах металу або навіть у вакуумі.

Найчастіше в промисловості використовують дугові сталеплавильні печі. Вони застосовуються не лише у металургії, а й на машинобудівних та автомобільних підприємствах. Головне їхнє завдання — переплавляти відходи чорних металів [7].

Дугові сталеплавильні печі зазвичай мають трифазну конструкцію з трьома електродами. Живлення печей здійснюється через знижувальні трансформатори, які розташовують поряд із печами. Електричні струми, що протікають у системі, можуть сягати десятків тисяч ампер. Ефективність печі і коефіцієнт потужності багато в чому залежать від схеми короткої мережі [9] .

Розглянемо конструкцію дугової сталеплавильної печі, що ілюструє її конструкцію на рис. 2.4.

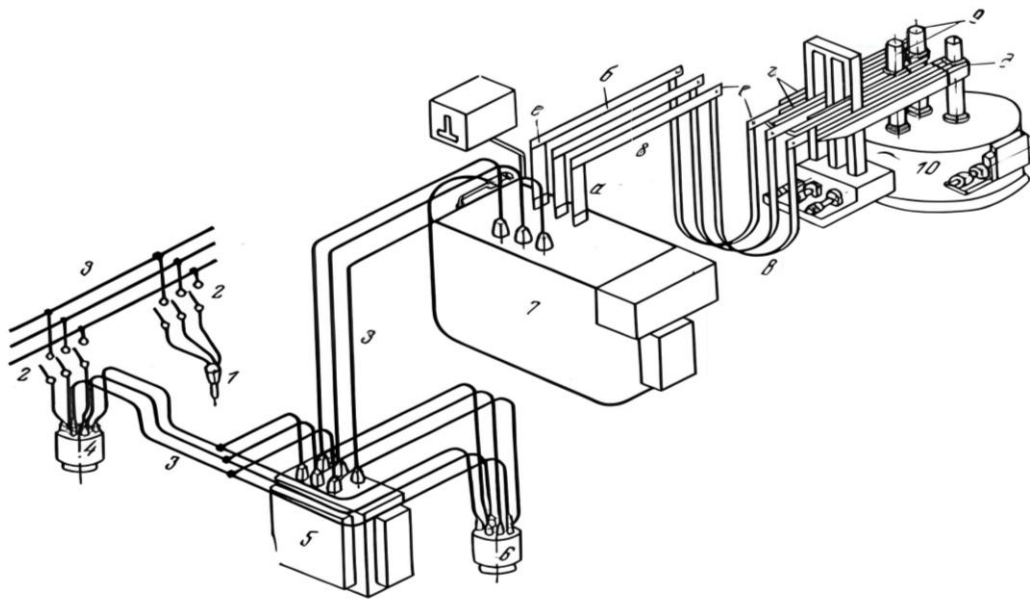


Рисунок 2.4 – Схема конструкції дугової сталеплавильної печі

На рис. 2.4 зображена схема конструкції дугової сталеплавильної печі, яка включає такі основні елементи:

1 — кабель для підведення напруги, 2 — апарат роз'єднання, 3 — шини, які передають високовольтну електроенергію, 4 — високовольтний вимикач, 5 — дросель для обмеження струму, 6 — вимикач із шунтувальним дроселем, 7 — трансформатор, який подає живлення на піч, 8 — елементи короткої мережі, що з'єднує трансформатор з піччю, до яких належать: а — компенсуючі пристрої, б — пакет шин, в — гнучкі провідники, г — трубчасті шини, розміщені безпосередньо на печі, д — тримачі електродів, е — контактні вузли з'єднання, 9 — електроди, 10 — сама піч.

Основним видом сировини для роботи дугових сталеплавильних печей є вторинні матеріали у вигляді сталевих брухтів. Завантаження печі здійснюють за допомогою кранів, які подають спеціальні корзини з відкритим дном. Після того, як піч наповнюється шихтою, звід печі встановлюють на місце, перекриваючи робочу зону зверху [9].

Потім на три графітові електроди подається електроживлення. У процесі запуску печі електроди опускаються до контакту з металом, утворюючи коротке міжфазне замикання. Після цього вони піднімаються, і між їх кінцями виникають електричні дуги, за допомогою яких починається розплавлення шихти. На цьому етапі піч працює з максимальною потужністю.

Під час плавки часто виникають короткі замикання, спричинені обвалом шихти та повторним запалюванням дуг. За один цикл плавки їх може бути десятки або навіть сотні, переважно однофазні, в тих фазах, де дуга тимчасово відсутня [7].

До трансформаторів, які живлять дугових сталеплавильних печей, ставляться особливі вимоги: вони мають бути міцними і витримувати великі перевантаження. Залежно від потужності трансформатора, їх оснащують перемикачами ступенів напруги — або без навантаження (до 10 МВА), або під

навантаженням (для більш потужних). Кількість таких ступенів може коливатись від 12 до 23.

Оскільки електрична дуга є нелінійним навантаженням, у мережі виникають вищі гармоніки, які можуть негативно впливати на конденсаторні батареї, спричиняючи їхнє перегрівання та вихід з ладу.

Для зменшення впливу цих коливань навантаження дугових печей на інші споживачі, їх підключають до потужних енергосистем. У таких випадках потужність печі не повинна перевищувати 40% від потужності підстанції. Для менших за потужністю пічних станцій ця межа становить приблизно 25%.

Дугові сталеплавильні печі допускають короточасні перебої з електропостачанням, але тривалі вимкнення без вивантаження печі можуть призвести до її поломки. Зазвичай великі печі на металургійних заводах працюють у три зміни, і при потребі їх можна використовувати для регулювання добових піків споживання електроенергії.

Одна піч не забезпечує рівномірне навантаження, оскільки впродовж циклу є періоди простою — під час завантаження шихти, розливання металу або зливу шлаку. Проте, якщо в роботі задіяно дві чи більше печей, це дозволяє рівномірніше розподілити споживання електроенергії.

Енергетичний баланс печі включає прибуткові та витратні частини, що враховуються за один цикл плавки [9].

- Втрати тепла через випромінювання крізь відкриті дверцята печі складають приблизно 2,5–3,0%, адже дверцята залишаються відкритими близько 20–40% часу плавки.
- Втрати тепла через відкриту піч під час завантаження оцінюються в межах 1,5–3,0%.
- Втрати тепла з вихідними газами важко точно підрахувати без детального аналізу хімічних реакцій, які викликають їх утворення. Зазвичай вони становлять 2–4%, але при застосуванні кисню можуть досягати 15–20% від загальних теплових витрат.

На рис. 2.5 наведена структурна діаграма типового енергетичного балансу дугової сталеплавильної печі.

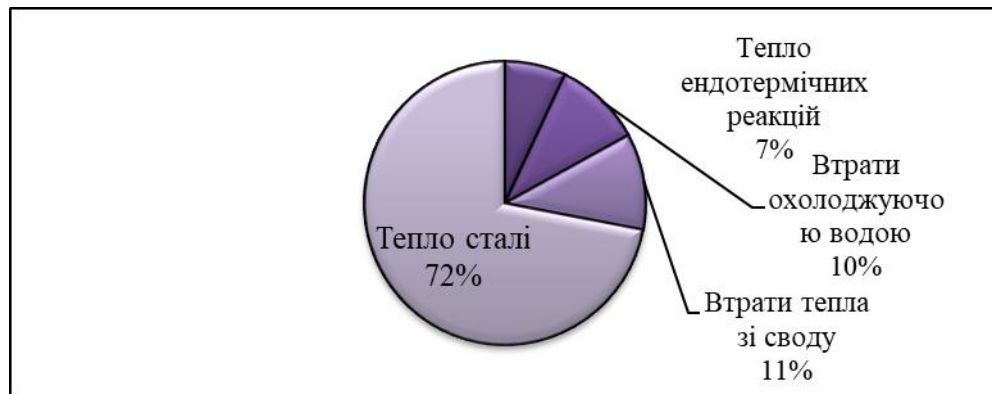


Рисунок 2.5 – Структура приходу енергії у дугових сталеплавильних печах

Отже, основна частина енергії, що надходить у піч, припадає на тепло, яке виділяється в дугах (72%), та тепло, що утворюється внаслідок ендотермічних реакцій (7%).

Основні складові теплових втрат в ДСП зображено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Теплові втрати в дугових сталеплавильних печах

№ п/п	Показник	Процентне відношення
1	Тепло сталі	46 %
2	Втрата тепла зі своду	7 %
3	Втрата з охолоджуючою водою	6 %
4	Тепло ендотермічних реакцій	4 %
5	Тепло випускного шлаку	3 %
6	Тепло газів, що виходять	17 %
7	Тепло скачаного шлаку	7 %
8	Втрата тепла через відкритий свод	2 %
9	Втрата через вікно	3 %
10	Втрата зі стін та дна	5 %

Складемо структурну діаграму типового балансу витрат енергії в дугових сталеплавильних печах (рис. 2.6).

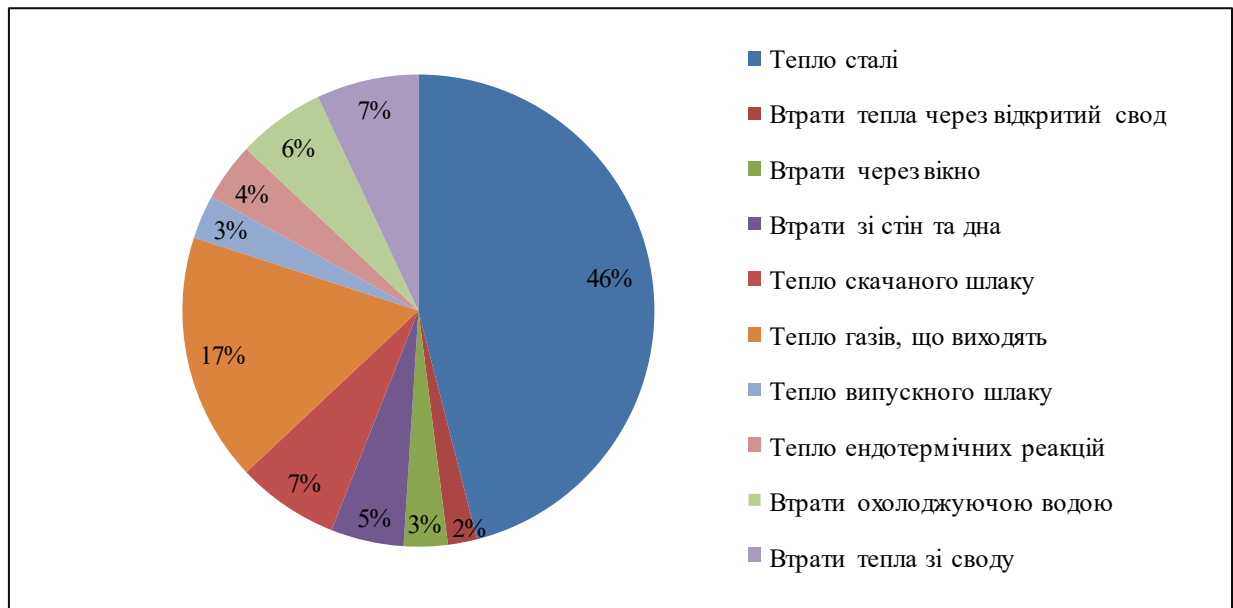


Рисунок 2.6 – Структура втрат тепла у дугових сталеплавильних печах

Отже, найбільша частина теплових витрат припадає на тепло, яке залишається в сталі — близько 46 %. Досить суттєва частка, приблизно 17 %, втрачається разом із пічними газами. Ще близько 15 % припадає на втрати через конструктивні елементи печі.

З огляду на це, аналіз конструкції, класифікації та принципів роботи електродугових сталеплавильних печей показує: незважаючи на їхню гнучкість і високу продуктивність, значна частина енергії витрачається неефективно. Високі теплові втрати, значні витрати електроенергії, зношення футеровки та технологічні простої свідчать про необхідність подальшої оптимізації процесу плавлення.

Тому в наступному розділі розглянемо конкретні заходи, які допоможуть підвищити ефективність технологічних процесів виплавки сталі в електродугових печах, з урахуванням енергетичних, технічних і екологічних аспектів.

3 ЗАХОДИ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ВИПЛАВЦІ СТАЛІ

3.1 Способи підвищення ефективності дугових сталеплавильних печей

В основі удосконалення дугових сталеплавильних печей лежать нові технологічні рішення направлені на підвищення ефективності сталеплавильного процесу.

У сучасній сталеплавильній практиці зростає інтерес до технологій, які дозволяють зменшити питомі витрати енергії та скоротити тривалість плавильного циклу. Одним із таких рішень є впровадження безперервного завантаження шихти, що значною мірою змінює тепловий режим роботи дугових печей.

У традиційних схемах, де скрап подається порціями, кожна нова закладка супроводжується різким охолодженням ванни — так званим ефектом "холодного старту". Це призводить до нерівномірного прогрівання металу, підвищеного навантаження на джерела живлення і необхідності додаткового часу для відновлення температури. У результаті збільшується загальний цикл плавки та зростають витрати енергії.

Однак, при безперервному завантаженні шихта подається до ванни рівномірно та поступово. Це дає змогу уникнути температурних провалів і забезпечити більш стабільний режим горіння дуг. У свою чергу, стабільність дугового розряду позитивно впливає на розподіл тепла у розплаві й сприяє швидкому формуванню пінного шлаку, який виконує роль теплоізолюючого

покриття. Завдяки цьому зменшуються теплові втрати через футерівку та підвищується ефективність використання введеної електричної енергії.

Одним з ключових ефектів переходу на безперервну подачу є збільшення активного часу роботи печі до 85 % від загальної тривалості плавки. Це дозволяє скоротити цикл до 22–24 хвилин, зменшити частоту вимушених зупинок і підвищити загальну продуктивність агрегату. Крім того, стабільне дугове горіння сприяє меншому зносу електродів, оскільки вони працюють в умовах менш інтенсивного окислення, а також знижує потребу в застосуванні допоміжних джерел тепла, зокрема газокисневих пальників.

З економічної точки зору, зниження питомого енергоспоживання, зменшення витрат на газ, електроди та вогнетриви позитивно впливає на собівартість виплавки сталі. А з технологічної — забезпечує більш передбачуване керування температурним режимом і стабільнішу якість металопродукції.

Додатковий ефект досягається за рахунок використання залишкового розплаву від попередньої плавки. Такий підхід дозволяє закрити подину розплавом, зменшуючи ризик її пошкодження при запуску дуг, і пришвидшує набір потужності в перші хвилини плавлення. Це також сприяє ефективнішому шлакоутворенню й полегшує перехід фосфору в шлак, оскільки кисень подається з самого початку плавки за умов зниженої температури.

Загалом, реалізація безперервного завантаження шихти є комплексним заходом, який забезпечує не лише економію енергії, а й підвищення ефективності всього виробничого процесу: від зменшення втрат тепла до поліпшення умов роботи дугових електропечей. Це відповідає вимогам сучасної екологічно орієнтованої та економічно обґрунтованої металургії.

У реальному виробництві продуктивність ДСП залежить не лише від максимальної подачі електричної потужності, що скорочує час роботи печі під струмом, а й від зменшення простоїв. Вони виникають як через заплановані перерви, так і через аварії або організаційні проблеми, наприклад, у логістиці

або через відмови обладнання. Враховуючи це, проводять аналіз силового обладнання і обирають сучасні системи управління, які дозволяють розглядати піч як частину загальної енергосистеми, а також через призму окремих локальних підсистем, що безпосередньо керують технологічним процесом.

Головними підсистемами є система регулювання напруги на високій стороні трансформатора та система управління електричним режимом печі. Перша відповідає за стабілізацію напруги, яка може змінюватися у широких межах через різні режими дуг — від холостого ходу до короткого замикання. Для цього використовують статичний компенсатор реактивної потужності з фільтрами гармонік 2-го, 3-го та 4-го порядку, а також тиристорно-реакторну групу з регульованою індуктивністю. Така стабілізація підвищує стійкість роботи печі і дозволяє краще контролювати потужність.

Друга підсистема має два рівні управління. На нижньому рівні вона враховує параметри трансформатора, реактора і номер робочої кривої, після чого система переміщення електродів формує завдання по робочому імпедансу або активному опору дуг. Поточні значення фазових струмів і напруг порівнюють із заданими, а відхилення коригують ПІ-регулятором, який пов'язаний із сервоприводом переміщення електродів. На верхньому рівні відбувається визначення стадії плавки, ґрунтуючись на складі шихти і накопиченій кількості електроенергії. За цими даними вибирається відповідний режим роботи трансформатора і реактора. Традиційні методи, які базувалися на статистиці, зараз дедалі більше замінюють інтелектуальні регулятори — вони працюють із урахуванням декількох параметрів, наприклад, вмісту гармонік, температури або даних віртуальних моделей, побудованих на основі тепло- та масообміну. У майбутньому очікується активне впровадження нейронних мереж для більш точного моделювання електричного контуру.

Серед виконавчих органів управління окрім гідроприводу електродів — печний трансформатор і реактор. Під час плавки часто відбуваються переключення, що можуть сягати шести за цикл. Через це 3–4 хвилини, або

близько 7–10 % часу роботи під струмом, піч працює в неоптимальному режимі, бо система управління тимчасово відключена. Регулювання напруги та індуктивності реактора відбувається в третинній обмотці трансформатора, де досягається баланс між параметрами первинної і вторинної обмоток. Для підвищення надійності і скорочення часу переключень потрібне впровадження безконтактних схем регулювання на основі одноопераційних тиристорів чи замикальних ключів. Через складність конструкції трансформатора важливо мінімізувати аварійні відключення, адже часті спрацьовування захисту потребують зливу масла для огляду елементів, що знижує загальну продуктивність.

Отже, всі перераховані способи підвищення ефективності дугових сталеплавильних печей для наочності зобразимо на рис.3.1.

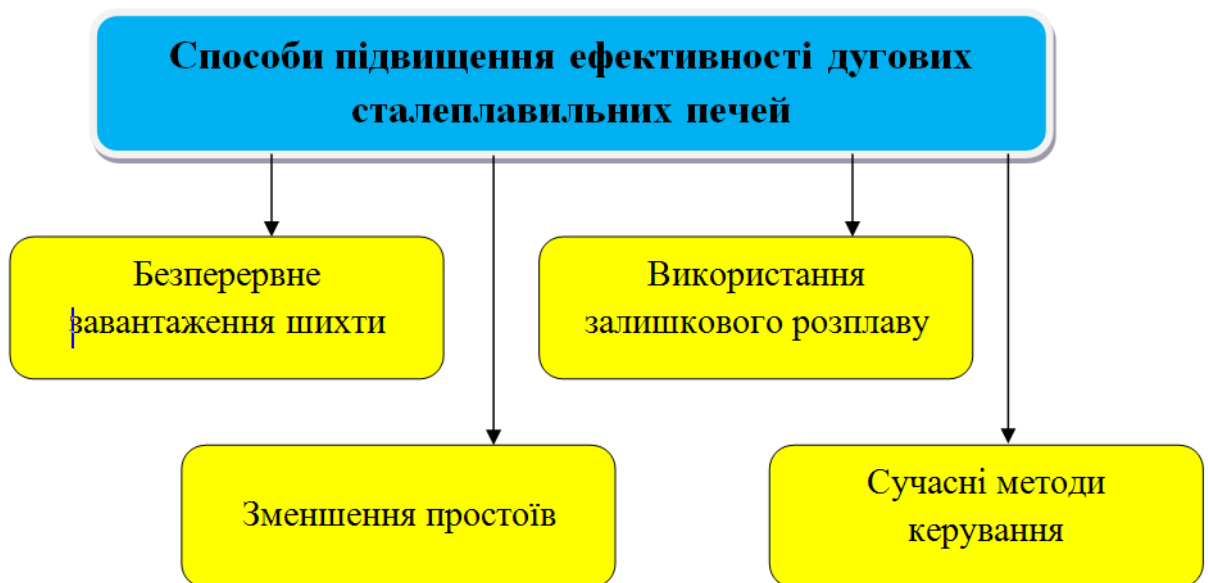


Рисунок 3.1 - Способи підвищення ефективності дугових сталеплавильних печей

Таким чином, оптимальне використання залишку розплаву, точне дозування шихти, організацію технологічного процесу, мінімізацію простоїв і сучасні системи управління електричним режимом, значно покращує ефективність роботи дугових сталеплавильних печей, стабілізуючи напругу і підвищуючи продуктивність.

3.2 Шляхи оптимізації енерговитрат при роботі електродугових печей

У сучасних умовах стрімкого зростання цін на енергоносії та складної енергетичної ситуації в Україні, спричиненої воєнними діями, питання підвищення енергоефективності на промислових підприємствах стає вкрай важливим. Через цілеспрямовані удари по енергетичній інфраструктурі з боку агресора металургійні підприємства стикаються з регулярними обмеженнями в подачі електроенергії, аварійними відключеннями та нестабільною напругою в мережі. Такі «блекаути» серйозно впливають на стабільність технологічних процесів, збільшують ризик зупинок виробництва та пошкодження обладнання [10].

Саме тому особливу увагу зараз приділяють впровадженню технологічних заходів, які не тільки допомагають зменшити енергоспоживання, а й забезпечують стабільну, прогнозовану і безпечну роботу устаткування навіть в умовах нестабільної енергоподачі.

Одним із ефективних способів знизити енергоспоживання дугових сталеплавильних печей є оптимізація конструкції системи токопідводу. Йдеться про модернізацію існуючої схеми шляхом скорочення довжини силових кабелів, які з'єднують трансформатор із електродами печі. Це можна досягти, раціонально перерозподіливши розташування трансформаторного обладнання — наблизивши його до робочої зони печі. Такий підхід значно скорочує

довжину провідників і, відповідно, знижує активний опір у колі подачі електроенергії.

Поєднання цієї оптимізації дозволяє суттєво зменшити втрати енергії в кабелях, що особливо важливо при великих струмах, характерних для електродугових печей. Це підвищує ефективність роботи трансформатора, знижує нагрівання елементів токопідводу, зменшує ризики аварій і продовжує термін служби силової апаратури. В результаті покращується загальна енергоефективність процесу плавки сталі, а також зменшуються витрати на експлуатацію та технічне обслуговування обладнання.

Складемо таблицю 3.1 з основними перевагами та недоліками оптимізації конструкції системи токопідводу для електродугових печей.

Таблиця 3.1 - Переваги та недоліки оптимізації конструкції системи токопідводу для електродугових печей.

Переваги	Недоліки
Зниження втрат у силових кабелях сприяє кращому використанню встановленої потужності	Потреба перепланування просторової організації цеху
Зменшення теплового навантаження на елементи токопідводу підвищує їх ресурс і зменшує аварійність	Можливе порушення існуючих маршрутів обслуговування та транспортування
Покращення електромагнітного балансу стабілізує електричний режим роботи печі	Необхідність високої точності під час монтажу нової кабельної схеми
Зменшення навантаження на трансформатор знижує ризик виходу з ладу та подовжує термін його служби	Потреба в капіталовкладеннях на перенесення та модернізацію трансформаторного обладнання
Підвищення надійності електропостачання зменшує простой і забезпечує більш стабільний виробничий цикл	Можливі короткострокові зупинки під час монтажних та налагоджувальних робіт
Комплексна оптимізація сприяє загальному підвищенню техніко-	Необхідність залучення кваліфікованого технічного персоналу для обслуговування

економічної ефективності плавильного процесу	оновленої системи
--	-------------------

Другим важливим напрямом удосконалення технологічного процесу є оптимізація насипної щільності металобрухту, який використовується як шихтовий матеріал. Цей захід полягає у збільшенні насипної щільності брухту з приблизно $0,7 \text{ т/м}^3$ до $1,1 \text{ т/м}^3$ шляхом попередньої підготовки та ущільнення шихти перед її завантаженням у піч.

Збільшення щільності досягається за рахунок застосування пресованих брикетів, використання фрагментованого брухту або попереднього сортування та класифікації металобрухту за розміром і формою. Також можуть використовуватись спеціальні засоби механічного ущільнення, зокрема гідравлічні преси та дробарки. У результаті суттєво зменшується об'єм шихти, необхідний для завантаження заданої маси металу, що дозволяє більш рівномірно розмістити її в робочому просторі електродугової печі.

Рівномірне завантаження покращує контакт між окремими фрагментами брухту і електродами, що сприяє більш ефективному проходженню електричного струму через шихту. Це призводить до зниження опору шихти і позитивно впливає на енергетичний баланс процесу. Крім того, покращується розподіл тепла всередині металевий ванни, зменшуються зони недостатнього прогріву, характерні для «холодного старту», що дозволяє уникнути перевитрат електроенергії на розплавлення верхніх шарів брухту.

Оптимізована насипна щільність також сприяє стабільності електричної дуги, зменшує кількість холостих розрядів і скорочує загальний час плавки. В результаті знижуються питомі витрати електроенергії на тонну готової сталі, підвищується продуктивність печі і зменшується знос графітових електродів. У комплексі це дозволяє не лише підвищити енергоефективність, а й знизити експлуатаційні витрати сталеплавильного виробництва.

Розглянемо основні переваги та недоліки заходу з оптимізації насипної щільності металобрухту (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 - Переваги та недоліки заходу з оптимізації насипної щільності металобрухту

Переваги	Недоліки
Забезпечення більш ефективного використання електроенергії при плавці 1 тонни сталі	Необхідність впровадження додаткового обладнання для пресування або дроблення металобрухту
Покращення рівномірності теплового режиму у печі	Збільшення часу і ресурсів на підготовку шихти
Скорочення часу плавки за рахунок оптимізації прогріву	Впровадження процедур попереднього сортування металобрухту
Підвищення використання об'єму печі за рахунок ущільненого завантаження	Обмеження за типами брухту, що можна ефективно ущільнювати
Збільшення ресурсу електродів та стабілізація електричного режиму печі	Необхідність контролю та запобігання деформації ущільненої шихти
Підвищення продуктивності за рахунок зменшення «холодного старту»	Модернізація логістичних процесів подачі шихти
Забезпечення більш стабільного електричного процесу плавки	Впровадження систем контролю за рівномірністю та щільністю завантаження

Третім важливим заходом підвищення ефективності роботи електродугової печі є модернізація футеровки з одночасним скороченням часу плавки. Використання сучасних вогнетривких матеріалів з низькою теплопровідністю та високою термостійкістю дозволяє значно зменшити теплові втрати, що позитивно впливає на зниження витрат електроенергії та скорочення тривалості плавки.

Модернізована футеровка забезпечує швидший прогрів печі, підвищує її експлуатаційний ресурс та зменшує потребу у ремонтах. Крім того, це сприяє зниженню механічного навантаження на корпус печі та покращенню умов праці персоналу. У сукупності такі зміни підвищують загальну ефективність та надійність сталеплавильного процесу.

Розглянемо переваги та недоліки модернізації футеровки електродугової печі в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 - Переваги та недоліки модернізації футеровки електродугової печі

Переваги	Недоліки
Підвищення теплової ефективності за рахунок зменшення теплових втрат	Високі капіталовкладення на закупівлю сучасних високоефективних вогнетривких матеріалів
Скорочення часу плавки завдяки прискореному прогріванню печі	Потреба у спеціалізованих знаннях і технологіях монтажу нової футеровки
Збільшення довговічності футеровки, що зменшує частоту і тривалість ремонтних простоїв	Тимчасове припинення виробництва під час заміни або оновлення футеровки
Покращення умов праці через зниження нагрівання зовнішніх поверхонь печі	Необхідність адаптації конструкцій для сумісності з новими матеріалами
Підвищення надійності печі завдяки зменшенню механічних навантажень на корпус	Можливі технологічні труднощі при інтеграції нових футерувальних матеріалів із існуючими системами

Четвертим важливим напрямом удосконалення технологічного процесу є підвищення ентальпії шихти за допомогою технології газового попереднього нагріву (ТКГ). Встановлення ТКГ у електродуговій печі дозволяє попередньо нагрівати металошихту до температури приблизно 300 °С перед безпосередньою дією електричної дуги. Це дає змогу знизити обсяг енергії, яку має забезпечувати електрична дуга для досягнення температури плавлення сталі (близько 1500 °С), за рахунок часткового теплового внеску від спалювання газоподібного палива.

Попередній нагрів шихти до 300 °С має суттєвий енергетичний ефект. Для кількісної оцінки цього ефекту доцільно розрахувати кількість енергії, що передається шихті при нагріванні з 25 °С до 300 °С.

Розглянемо переваги та недоліки використання топливно-кисневих горілок для підвищення ентальпії шихти в електродугових печах в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 - Переваги та недоліки використання топливно-кисневих горілок для підвищення ентальпії шихти в електродугових печах

Переваги	Недоліки
Підвищення загальної енергоефективності за рахунок зниження споживання електроенергії	Необхідність інвестицій у монтаж і запуск систем топливно-кисневих горілок
Скорочення часу плавки, що збільшує продуктивність печі	Потрібна надійна система подачі кисню та палива (газ, мазут тощо)
Збільшення кількості плавок за зміну, що покращує рентабельність виробництва	Підвищене навантаження на системи газоочистки через збільшення викидів
Зменшення зносу електродів завдяки зниженню термічних навантажень	Потрібен точний контроль процесу для запобігання перегріву та нерівномірного нагрівання
Зниження теплового навантаження на футеровку, що продовжує її ресурс	Додаткові вимоги до обслуговування пальників і систем керування
Покращення теплової однорідності шихти, що оптимізує плавку	Залежність від стабільності та вартості постачання палива
Гнучке локальне нагрівання шихти для адаптації до технологічних умов	

П'ятим напрямом удосконалення технологічного процесу є оптимізація електричних режимів плавки.

Оптимізація електричних режимів плавки є ключовим чинником підвищення енергоефективності електродугової печі, особливо на етапах розплавлення та перегріву металу. Впровадження систем автоматичного регулювання, що базуються на алгоритмах адаптивного керування та обробки даних у режимі реального часу, дозволяє забезпечити точний контроль таких параметрів, як струм, напруга, довжина та стабільність дуги. Це сприяє ефективнішому перетворенню електричної енергії у теплову та знижує втрати, пов'язані з надмірними коливаннями електродугового процесу.

Автоматизоване керування дає змогу знизити кількість холостих дугових розрядів, що зменшує знос електродів і знижує енергетичні втрати. Крім того, оптимізація режимів впливає на зменшення термічного навантаження на футеровку печі, що продовжує її ресурс та зменшує частоту ремонтних робіт.

Результати промислових випробувань свідчать, що впровадження стабілізованих електричних режимів дозволяє знизити питоме енергоспоживання на 1–1,5% та підвищити якість сталі завдяки кращому контролю температурного профілю розплаву.

Додатковим позитивним ефектом є зменшення пікових навантажень на енергетичну мережу та покращення електромагнітної сумісності печі з іншими споживачами, що особливо важливо для підприємств із централізованим енергозабезпеченням. Таким чином, оптимізація електричних режимів плавки є не лише шляхом до енергоощадності, а й до підвищення стабільності, надійності та передбачуваності технологічного процесу електросталеплавлення.

Розглянемо переваги та недоліки удосконалення технологічного процесу є оптимізація електричних режимів плавки (табл. 3.5.)

Таблиця 3.5 - Переваги та недоліки удосконалення технологічного процесу є оптимізація електричних режимів плавки

Переваги	Недоліки
Підвищення енергоефективності за рахунок зниження теплових втрат	Високі капіталовкладення, пов'язані з оновленням обладнання і технологій
Скорочення часу плавки завдяки більш оптимальному електричному режиму	Необхідність залучення кваліфікованих фахівців для впровадження нових режимів
Збільшення ресурсу футеровки через стабілізацію теплових режимів	Можливі виробничі простої під час переходу на нові режими і налаштування
Покращення умов праці через зниження нагрівання корпусу печі	Потреба адаптації існуючих конструкцій і систем до нових технологічних вимог
Зниження механічних і теплових навантажень на обладнання, що підвищує надійність	Технологічні складнощі при інтеграції нових рішень у існуючі виробничі процеси

Шостим варіантом підвищення ефективності роботи електродугової печі є впровадження тиристорного перетворювача для керування електроприводами

системи газоочищення. Такий підхід забезпечує безступінчасте регулювання швидкості обертання двигунів вентиляторів відповідно до поточних технологічних потреб. Це дозволяє уникати надмірного енергоспоживання у режимах часткового навантаження та підвищити загальну енергоефективність системи газоочистки.

Завдяки плавному запуску двигунів зменшуються пускові струми та механічні навантаження, що позитивно впливає на довговічність електрообладнання. Регулювання частоти обертання також сприяє зниженню пульсацій у повітропроводах, стабілізує роботу газоочисних агрегатів і зменшує рівень шуму та вібрацій. Таке рішення особливо актуальне у випадках нерівномірної або циклічної роботи системи, що характерно для процесів виплавки сталі.

Промисловий досвід впровадження тиристорних перетворювачів (за даними провідних виробників ABB, Siemens, Schneider Electric, Danfoss) свідчить про можливість економії електроенергії в межах 10–20% залежно від конфігурації системи та режиму її роботи. При значному зниженні частоти обертання вентиляторів економія може сягати до 30%, що робить цей захід одним із найбільш ефективних з точки зору окупності інвестицій і досягнутого результату.

Складемо таблицю 3.6 з основними перевагами та недоліками впровадження тиристорного перетворювача на двигуни системи газоочищення електродугової печі.

Таблиця 3.6 - Переваги та недоліки впровадження тиристорного перетворювача на двигуни системи газоочищення електродугової печі

Переваги	Недоліки
Зниження споживання електроенергії вентиляторам на 10–30%	Висока вартість придбання та встановлення тиристорного перетворювача
Плавний пуск двигунів, зменшення пускових струмів і навантаження на електромережу	Необхідність модернізації існуючих електроприводів або їх заміни

Продовження таблиці 3.6

Підвищення надійності і ресурсу двигунів завдяки зменшенню механічного зношування	Залучення кваліфікованого персоналу для обслуговування та налаштування системи
Гнучке регулювання швидкості обертання відповідно до потреб газоочищення	Інтеграція перетворювача з існуючими системами автоматизації
Стабілізація роботи системи газоочищення та зниження пульсацій повітряного потоку	Регулярне технічне обслуговування і контроль параметрів

Отже, було розглянуто шість технічно обґрунтованих заходів, спрямованих на підвищення енергоефективності процесу виплавки сталі в електродугових печах. Кожен із них має власні особливості, переваги та обмеження, проте всі сприяють у тій чи іншій мірі зниженню питомих витрат електроенергії, скороченню часу плавки, зменшенню теплових втрат або підвищенню стабільності технологічного процесу.

Усі зазначені заходи мають практичне значення та можуть бути реалізовані на підприємстві як окремо, так і в комплексі з урахуванням техніко-економічної доцільності.

Далі здійснимо розрахунок економічної та енергетичної ефективності кожного з розглянутих заходів. Проведений аналіз дозволить визначити потенційну економію електроенергії, оцінити витрати на впровадження та термін окупності, що дасть змогу обрати найбільш доцільне та вигідне технічне рішення для підвищення ефективності роботи електродугових печей.

3.3 Розрахунок ефективності впровадження енергоефективних заходів для дугових сталеплавильних печей та вибір оптимального рішення

Одним із потенційно ефективних заходів щодо зниження енергоспоживання при виплавці сталі в електродугових печах є оптимізація

конструкції системи токопідводу. Запропонований захід передбачає скорочення довжини силових кабелів шляхом раціонального перепланування розміщення трансформаторів у безпосередній близькості до печей. Крім того, передбачається впровадження схеми трикутного підключення кабелів, відомої як «треангулярна зірка». Такий підхід дає змогу зменшити електричні втрати за рахунок зниження опору провідників, що, у свою чергу, підвищує ефективність передачі електроенергії безпосередньо до електродугової печі.

Теплові втрати в кабелях визначаються законом Джоуля–Ленца:

$$P = I^2 \cdot R, \quad (3.1)$$

де P - потужність втрат,

I - сила струму,

R - опір кабелю.

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A}, \quad (3.2)$$

де ρ – питомий опір матеріалу міді $\rho = 1,7 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{м}$

L – довжина кабелю

A – площа поперечного перерізу

У якості вихідних даних для оцінки ефективності запропонованого енергозберігаючого заходу використовуються такі параметри. Робочий струм становить 40 000 А.

Довжина силового кабелю до впровадження оптимізації складає 10 метри, після реалізації заходу вона зменшується 5 метрів. Площа поперечного перерізу кабелю приймається рівною 600 мм². Система трифазна, тобто враховується три незалежні кабельні лінії.

Тривалість одного плавильного циклу становить 1 годину, при цьому вихід сталі з однієї плавки складає 100 тонн. Річний обсяг виробництва сталі становить 130 000 тонн.

Повна вартість електроенергії, включаючи мережеві, транспортні та інші супутні витрати, становить 7,715 грн за 1 кВт·год.

З урахуванням наведених параметрів, розрахуємо опір кабелів до та після оптимізації:

$$R_1 = \frac{1.7 \cdot 10^{-8}}{6 \cdot 10^{-4}} = 0,000283 \text{ Ом}$$

$$R_2 = \frac{1.7 \cdot 10^{-8} \cdot 5}{6 \cdot 10^{-4}} = 0,000142 \text{ Ом}$$

Розрахуємо потужність втрат:

$$P_1 = 3 \cdot (40000)^2 \cdot 0,000283 = 1,36 \text{ МВт} = 1360 \text{ кВт}$$

$$P_2 = 3 \cdot (40000)^2 \cdot 0,000142 = 0,68 \text{ МВт} = 680 \text{ кВт}$$

Для наочності зобразимо потужність втрат до і після впровадження оптимізації конструкції системи токопідводу на рис. 3.2.

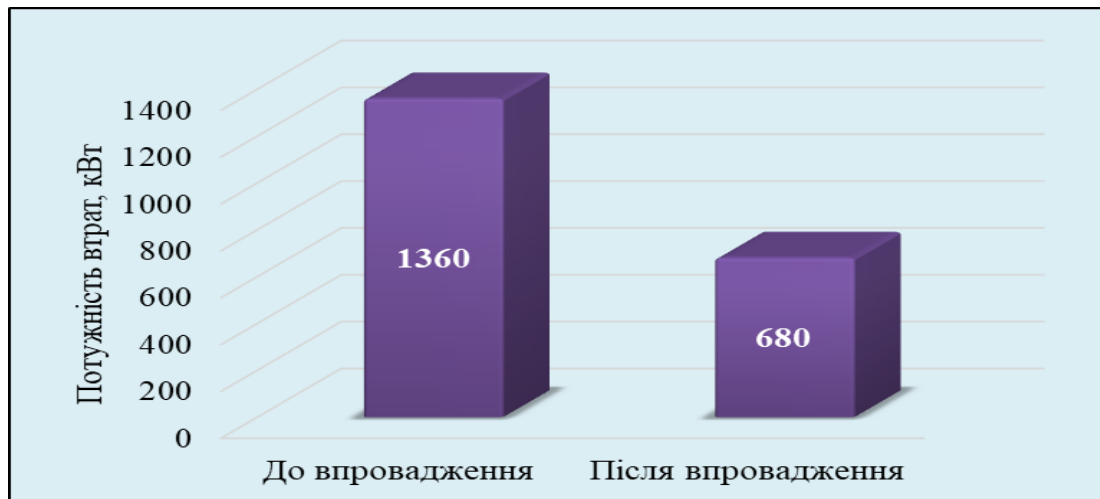


Рисунок 3.2 – Динаміка зміни потужностей втрат до і після впровадження оптимізації конструкції системи токопідводу

Розрахуємо економію електроенергії за одну плавку:

$$\Delta E = 0,68 \text{ МВт} = 680 \text{ кВт}$$

Питома економія на тонну сталі:

$$\Delta q = \frac{680}{100} = 6,8 \text{ кВт/год}$$

Річна економія:

$$E = 6,8 \cdot 130\,000 = 884\,000 \frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{рік}}$$

Отже, фінансова вигода від впровадження заходу:

$$G = 884\,000 \cdot 7,715 \approx 6\,820\,060 \frac{\text{грн}}{\text{рік}}$$

Занесемо до таблиці 3.7 детальний розрахунок витрат на впровадження.

Таблиця 3.7 - Детальний розрахунок витрат на впровадження оптимізації конструкції системи токопідводу

Стаття витрат	Опис	Кількість / параметри	Ціна за одиницю (грн)	Загальна вартість (грн)
Силові мідні кабелі (600 мм²)	Кабель для трьох фаз, довжина до кожної фази ~5 м (в обох напрямках), разом ~30 м кабелю з запасом.	30 м	13 500 грн/м	405 000
З'єднання, наконечники, кріплення	Високотемпературні контактні елементи, болтові з'єднання, ущільнення, монтажна арматура.	Комплект на 3 фази	—	100 000
Силовий трансформатор	Один новий трансформатор на 20–30 МВА, масляний або сухий.	1 шт.	1 000 000 грн	1 000 000
Система моніторингу	Вимірювальні трансформатори струму та напруги, датчики температури, модулі збору даних, інтерфейси.	Повний комплект	—	250 000
Проектування та монтаж	Розробка нової схеми підключення, перенесення обладнання, монтаж кабелів та систем контролю.	1 проєкт	—	200 000
Навчання персоналу	Навчання чергових електриків та інженерів: 2 групи по 10 осіб, тренінг 2 дні.	20 осіб	1 500 грн/особа	30 000
Потенційні втрати від зупинки печі	Ризик зупинки однієї печі на 3 доби при монтажі. Вартість простою печі ≈1 млн грн/добу (виробнича втрата).	3 доби	1 000 000 грн	3 000 000
Разом (з урахуванням ризиків)	—	—	—	4 985 000 грн

Отже, на основі прорахованих даних розрахуємо ефективність інвестицій ROI. Цей показник показує, наскільки окупаються інвестиції та дозволяє оцінювати ефективність різних проєктів.

$$ROI = \frac{4\,985\,000}{6\,820\,000} = 1,37 \text{ роки} = 1 \text{ рік } 4 \text{ місяці}$$

Складемо підсумкову фінансову таблицю 3.8.

Таблиця 3.8 – Економічна ефективність заходів з оптимізації конструкції системи токопідводу

Показник	Значення
Енергозбереження	884 000 $\frac{\text{кВт}\cdot\text{год}}{\text{рік}}$
Фінансовий ефект	6 820 060 $\frac{\text{грн}}{\text{рік}}$
Інвестиції	4 985 000 грн
ROI	1 рік 4 місяці

Підсумовуючи, можна зробити висновок, що оптимізація токопідводу забезпечує значну економію електроенергії (близько 7 млн грн/рік) та окупається за 1 рік та 4 місяці з урахуванням усіх супутніх витрат. Він є технічно досяжним, економічно ефективним і екологічно виправданим рішенням.

Другим варіантом підвищення ефективності технологічного процесу виплавки сталі є оптимізація насипної щільності металобрухту. Рівномірне завантаження металобрухту досягається шляхом підвищення насипної щільності з 0,7 до 1,1 т/м³. Це дозволяє забезпечити більш рівномірне завантаження шихти, покращити розподіл тепла в об'ємі печі, зменшити явище «холодного старту» і, як наслідок, знизити питомі втрати електроенергії.

Теоретичні розрахунки енергоспоживання ґрунтуються на потребі у теплоті для нагріву та плавлення однієї тонни сталі. Для нагріву сталі до температури плавлення використовується формула:

$$Q_{\text{нагр.}} = c \cdot m \cdot \Delta T \quad (3.3)$$

де c - питома теплоємність сталі $0,139 \frac{\text{кВт}\cdot\text{год}}{\text{кг}\cdot^\circ\text{C}}$,

m — 1000 кг, а температура нагріву — 1 500 °C.

$$Q_{\text{нагр.}} = 0,139 \cdot 1\,000 \cdot 1\,500 = 208\,500 \frac{\text{Вт}\cdot\text{год}}{\text{т}} = 208,5 \frac{\text{кВт}\cdot\text{год}}{\text{т}}$$

Також додатково ще враховується питома теплота плавлення сталі — 270 кВт·год/т.

Отже, сумарна теоретична потреба в енергії становить:

$$Q = 208,5 + 270 = 478,5 \frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{т}}$$

До впровадження заходу фактичне енергоспоживання складало 410 кВт·год/т, відповідно, ефективність процесу:

$$q_1 = \frac{478,5}{410} = 1,167$$

За рахунок ущільнення брухту ефективність зростає орієнтовно на 5 % і становить:

$$q_2 = 1,167 \cdot 1,05 = 1,225$$

Визначимо нову питому витрату енергії:

$$q_2 = \frac{Q_{\text{теор.}}}{q} = \frac{478,5}{1,225} = 390,7 \frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{т}}$$

$$\Delta q = 410 - 390,7 = 19,3 \frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{т}}$$

Таким чином, економія на 1 тонні становить 19,3 кВт·год.

При річному обсязі випуску в 130000 т сталі річна економія електроенергії становить:

$$E_{\text{рік}} = 19,3 \cdot 130\,000 = 2\,509\,000 \frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{рік}}$$

Розглянемо з точки зору фізики контактних тепловий опір. При ущільненні металобрухту зростає площа контакту між частинками, що зменшує контактний тепловий опір:

$$R_c = \frac{1}{h \cdot A}, \quad (3.4)$$

де R_c — контактний тепловий опір

h — коефіцієнт тепловіддачі $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$

A – площа контакту, м^2

Згідно із законом теплопередачі:

$$Q = \frac{\Delta T}{R_c} = h \cdot A \cdot \Delta T \quad (3.5)$$

Отже, чим більше A , тим менший R_c , і тим вища швидкість передачі тепла, а отже менші витрати та нижче споживання.

Фінансова вигода від впровадження заходу значна, враховуючи вартість електроенергії 7,715 грн/кВт·год.

Розрахуємо річну економію:

$$G = 2\,509\,000 \cdot 7,715 = 19\,365\,035 \frac{\text{грн}}{\text{рік}}$$

Для забезпечення можливості самостійного ущільнення брухту підприємству необхідно здійснити інвестиції в закупівлю відповідного обладнання:

- гідравлічного прес-компактора продуктивністю 100 т/год (12 млн. грн);
- грейферного навантажувача (5,5 млн. грн), облаштування підготовчого майданчика (1,2 млн. грн);
- проведення пусконаладжувальних робіт (1 млн. грн),
- навчання персоналу (0,3 млн. грн).

Загальні капітальні витрати становлять близько 20 млн. грн.

Щорічні експлуатаційні витрати споживання електроенергії пресом становлять:

$$E_{\text{прес.}} = 150 \cdot 8 \cdot 2 \cdot 250 = 600\,000 \frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{рік}}$$

Вартість електроенергії:

$$C_{\text{енергія}} = 600\,000 \cdot 7,715 = 4\,629\,000 \frac{\text{грн}}{\text{рік}}$$

Оплата праці трьох операторів становить близько $1,8 \frac{\text{млн грн}}{\text{рік}}$.

Разом експлуатаційні витрати складають:

$$4\,629\,000 + 1\,800\,000 = 6\,429\,000 \frac{\text{грн}}{\text{рік}}$$

Занесемо до таблиці 3.9 показники до та після впровадження.

Таблиця 3.9 – Технічні показники до та після модернізації

Показник	До впровадження	Після впровадження
Насипна щільність	$\approx 0,7 \text{ т/м}^3$	$\approx 1,1 \text{ т/м}^3$
Енерговитрати	410 кВт·год/т	390,7 кВт·год/т

Для наочності результати розрахунків до та після модернізації відобразимо на рис. 3.3.

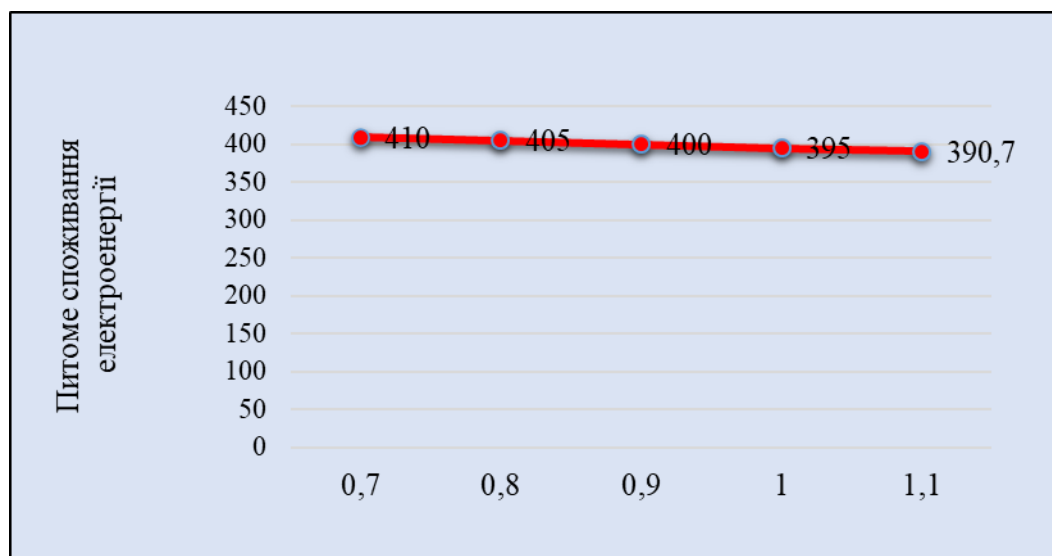


Рисунок 3.3 - Залежність енерговитрат від насипної щільності

Отже, чистий економічний ефект після впровадження заходу становить:

Чистий економічний ефект за рік = $19\,365\,035 - 6\,429\,000 = 12\,936\,035$ грн.

Термін окупності становить:

$$ROI = \frac{20\,000\,000}{12\,936\,035} = 1,55 \text{ роки} = 1 \text{ рік } 7 \text{ місяців}$$

Це означає, що інвестиції окупляться приблизно за 1 рік і 7 місяців.

Складемо підсумкову фінансову таблицю 3.10 .

Таблиця 3.10 – Економічна ефективність заходів з оптимізації насипної щільності металобрухту

Показник	Значення
Енергозбереження	19 365 035 $\frac{\text{кВт}\cdot\text{год}}{\text{рік}}$
Фінансовий ефект	12 936 035 $\frac{\text{млн. грн}}{\text{рік}}$
Інвестиції	20 000 000 грн
ROI	1 рік 7 місяців

Крім безпосереднього економічного ефекту, захід має також екологічне значення — зниження викидів CO₂ за рахунок зменшення енергоспоживання. Проєкт передбачає врахування технічних, економічних та організаційних ризиків, а також проведення сценарного аналізу для оцінки чутливості інвестиційного проєкту до змін на ринку.

Третім варіантом підвищення ефективності роботи електродугової печі є модернізація футеровки із одночасним скороченням часу плавки.

Футеровка, що виконує функції теплового захисту конструкцій печі, істотно впливає на теплові втрати та загальний енергетичний баланс процесу. Використання сучасних високоякісних вогнетривких матеріалів дозволяє підвищити теплоізоляційні властивості футеровки, знизити кількість необхідних ремонтів, зменшити витрати часу на обслуговування та пришвидшити сам процес виплавки сталі.

Раніше футеровка зазвичай виконувалась зі штучних вогнетривких матеріалів загального призначення. Основу складали магнезитові та шамотні цеглини, де магнезит (MgO) характеризується високою жаротривкістю, але й високим коефіцієнтом теплопровідності (приблизно 1,5–2,5 Вт/м·К), а шамот (Al₂O₃·SiO₂) — помірною вогнетривкістю з тенденцією до розтріскування при термошоках. Шви заповнювались мономасами на основі глини та кварцу.

Важливо зазначити, що конструкція не передбачала ефективної термоізоляції, тож тепло активно відводилось через футеровку, створюючи значні втрати.

Нова футеровка є енергозберігаючою й базується на використанні високотехнологічних вогнетривких матеріалів з низькою теплопровідністю і високою термостійкістю. Зокрема, у зонах склепіння та дії дуги застосовуються периклазовуглецеві (MgO–C) блоки, в яких вміст вуглецю знижує теплопровідність до 0,5–0,8 Вт/м·К, забезпечуючи високу стійкість до термошоку та ерозії.

Под печі викладається алюміній-магнезійними бетонними масами, що вирізняються щільністю, зносостійкістю та теплоакумулювальними властивостями. Додатково між футеровкою та сталевим кожухом розміщується теплоізоляційна прокладка (наприклад, з мулітокремнеземистого волокна), яка суттєво знижує втрати тепла через теплопровідність.

Розрахунок коефіцієнтів теплопровідності старої футеровки включала магнезитові та шамотні матеріали. Усереднення виконано таким чином:

$$\text{Магнезит (MgO): } k_1 = \frac{1,5+2,5}{2} = 2 \frac{\text{Вт}\cdot\text{К}}{\text{м}}$$

$$\text{Шамот: } k_2 = \frac{1+1,8}{2} = 1,4 \frac{\text{Вт}\cdot\text{К}}{\text{м}}$$

Розрахуємо усереднене значення:

$$k_{\text{стара}} = \frac{2 + 1,4}{2} = 1,7 \frac{\text{Вт}\cdot\text{К}}{\text{м}}$$

Нова футеровка має комбіновану структуру:

$$\text{MgO–C матеріали: } k_1 = \frac{0,5+0,8}{2} = 0,65 \frac{\text{Вт}\cdot\text{К}}{\text{м}}$$

$$\text{Ізоляційна прокладка: } k_2 = \frac{0,1+0,3}{2} = 0,2 \frac{\text{Вт}\cdot\text{К}}{\text{м}}$$

Приблизна частка теплопередачі через ізоляційний шар оцінюється як 20%, отже еквівалентне середнє значення розраховується за формулою зваженого середнього:

$$k_{\text{нова}} = 0,8 \cdot 0,65 + 0,2 \cdot 0,2 = 0,52 + 0,04 = 0,56 \approx 0,6 \frac{\text{Вт} \cdot \text{К}}{\text{м}}$$

Це спрощене інженерне припущення, яке дозволяє об'єднати теплопровідність кількох шарів у загальне ефективне значення, без складного послідовного розрахунку через термічні опори.

Для наочності порівняння коефіцієнтів теплопровідності футеровки до і після впровадження модернізації футеровки зобразимо на рис. 3.4.

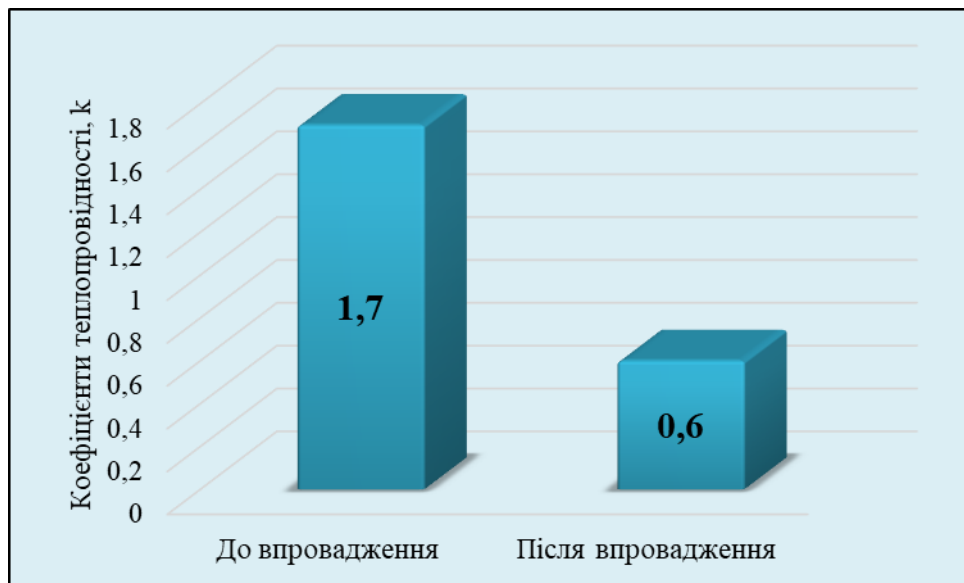


Рисунок 3.4 – Динаміка зміни коефіцієнтів теплопровідності до і після впровадження модернізації футеровки

З точки зору фізики при роботі електродугової печі велика частина тепла втрачається через футеровку стінок і склепіння. Щоб знизити ці витрати, застосовують сучасні вогнетривкі матеріали з кращими теплоізоляційними властивостями (тобто з нижчим коефіцієнтом теплопровідності k).

Закон теплопровідності розраховують за формулою:

$$Q = k \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{d} \quad (3.6)$$

Припустимо, що площа футерованої поверхні печі — $A = 60 \text{ м}^2$, середня товщина старої футеровки — $d_1 = 0,25 \text{ м}$, нової — $d_2 = 0,35 \text{ м}$, а температурна різниця — $\Delta T = 1500 \text{ К}$.

Розрахуємо тепловтрати через стару футеровку:

$$Q_1 = \frac{k_1 \cdot A \cdot \Delta T}{d_1} = \frac{1,7 \cdot 60 \cdot 1500}{0,25} = 612\,000 \text{ Вт} = 612 \text{ кВт}$$

Тепловтрати через нову футеровку:

$$Q_2 = \frac{k_2 \cdot A \cdot \Delta T}{d_2} = \frac{0,6 \cdot 60 \cdot 1500}{0,35} = 154\,286 \text{ Вт} = 154,3 \text{ кВт}$$

Визначимо на скільки зменшаться витрати:

$$\Delta Q = Q_1 - Q_2 = 612 - 154,3 = 457,7 \text{ кВт}$$

Отже, якщо цикл плавки триває 1 годину, а на рік припадає 3 000 плавок:

$$\text{Економія} = \Delta Q \cdot t \cdot N = 457,7 \cdot 1 \cdot 3000 = 1\,373\,100 \frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{рік}}$$

Розрахуємо річну економію:

$$G = 1\,373\,100 \cdot 7,715 = 10\,594\,000 \frac{\text{грн}}{\text{рік}}$$

Визначена дана річна економія — це максимальна технічна економія, реальна нижча через додаткові фактори — втрати через інфільтрацію, конвекцію, неповну заміну матеріалу тощо).

Завдяки зменшенню тепловтрат і скороченню тривалості циклу плавлення, знижується й питоме енергоспоживання, яке має знизитися до 7–9 $\frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{т}}$.

Визначимо економію для річного обсягу випуску 130 000 т:

$$E_{\text{економія}} = 130\,000 \cdot 8 = 1\,040\,000 \frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{рік}}$$

Розрахуємо фінансову економію:

$$G = 1\,040\,000 \cdot 7,715 = 8\,024\,000 \frac{\text{грн}}{\text{рік}}$$

Цей розрахунок ближчий до реальної практики, ніж теоретичний максимум, і враховує неідеальні умови роботи та часткову реалізацію.

Загальні інвестиції на впровадження становлять — 7 500 000 грн та включають:

Вогнетривкі матеріали — 4 000 000 грн

Обладнання для демонтажу, монтажу та футерування - 1 000 000 грн

Система моніторингу температур і автоматизації процесу - 2 500 000 грн
Отже, термін окупності становить:

$$ROI = \frac{7\,500\,000}{8\,024\,000} = 0,94 \text{ роки} = 11 \text{ місяців}$$

Складемо підсумкову фінансову таблицю 3.11 .

Таблиця 3.11 – Економічна ефективність заходів з модернізація футеровки із одночасним скороченням часу плавки.

Показник	Значення
Енергозбереження	1 040 000 $\frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{рік}}$
Фінансовий ефект	8 024 000 $\frac{\text{млн. грн}}{\text{рік}}$
Інвестиції	7 500 000 грн
ROI	11 місяців

У межах реалізації проєкту слід провести детальний аналіз ризиків. До технічних ризиків можна віднести можливість виникнення помилок під час демонтажу старої футеровки або складнощі при монтажі нової. Серед економічних ризиків важливо врахувати ймовірне зростання вартості матеріалів або затримки з поставками.

Також існують організаційні ризики, пов'язані зі складністю виконання робіт та необхідністю попереднього навчання персоналу. Для мінімізації цих ризиків доцільно передбачити ретельне планування етапів реалізації, навчання персоналу і резервування графіку виконання робіт.

Важливим аспектом є технічні характеристики використовуваних матеріалів: вони повинні мати низьку теплопровідність, високу механічну міцність і термостійкість. Часовий план реалізації проєкту охоплює кілька етапів: аудит передбачено на 1–2 місяці, проєктування — на 1 місяць, закупівлю матеріалів — на 1,5–2 місяці, монтажні роботи займуть приблизно 2–3 місяці, а тестування систем і навчання персоналу триватиме близько одного місяця.

У контексті екологічної оцінки модернізація футеровки сприятиме зниженню енерговитрат, що, своєю чергою, зменшить обсяг викидів CO_2 в атмосферу. Для забезпечення стабільної експлуатації нової системи слід передбачити регулярне технічне обслуговування, зокрема щоквартальний огляд стану футеровки та функціонування систем автоматизації.

Також доцільно провести сценарний аналіз, щоб оцінити вплив можливих змін вартості матеріалів або енергоресурсів на термін окупності інвестицій (ROI). При виборі постачальників необхідно орієнтуватися на такі критерії, як наявність сертифікатів якості, конкурентна ціна та надання сервісного обслуговування після продажу.

Четвертим варіантом підвищення ефективності роботи електродугової печі є підвищення ентальпії шихти за допомогою ТКГ.

Встановлення топливно-кисневих горілок дає змогу попередньо нагрівати металошихту до температури приблизно $300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Це зменшує обсяг енергії, яку має забезпечити електродуга для досягнення робочої температури плавлення близько $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Питомі параметри сталевих брухту такі: питома теплоємність $c = 0,46 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C}}$, маса однієї тонни шихти — $m = 1000\text{ кг}$, температура до нагріву — $T_0 = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, після попереднього нагріву — $T_1 = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$, кінцева температура плавлення — $T_2 = 1500\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Розрахуємо енергію, яка витрачається без використання ТКГ:

$$Q_0 = m \cdot c \cdot (T^2 - T^0) = 1000 \cdot 0,46 \cdot (1500 - 25) = 678,5 \frac{\text{МДж}}{\text{т}}$$

При використанні ТКГ енергія, що передається шихті, становить:

$$Q_{\text{ТКГ}} = 1000 \cdot 0,46 \cdot (300 - 25) = 126,5 \frac{\text{МДж}}{\text{т}}$$

За реального ККД ТКГ на рівні $\eta \approx 0,5$, ефективно передається:

$$Q_{\text{еф}} = 0,5 \cdot 126,5 = 63,25 \frac{\text{МДж}}{\text{т}}$$

Це дає змогу зменшити споживання електроенергії :

$$\Delta Q = \frac{63,25}{3,6} = 17,57 \frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{т}}$$

Отже, прогнозована економія становить $17,57 \frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{т}}$. За стандартного питомого споживання $410 \frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{т}}$, після підвищення ентальпії шихти за допомогою ТКГ воно зменшиться до $392,43 \frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{т}}$, так як економія становить:

$$\Delta Q = 410 - 405,08 = 17,57 \frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{т}}$$

$$Q_{\text{після}} = 410 - 17,57 = 392,43 \frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{т}}$$

Після підвищення ентальпії шихти за допомогою ТКГ розраховані дані до та після впровадження зобразимо на рис. 3.5.

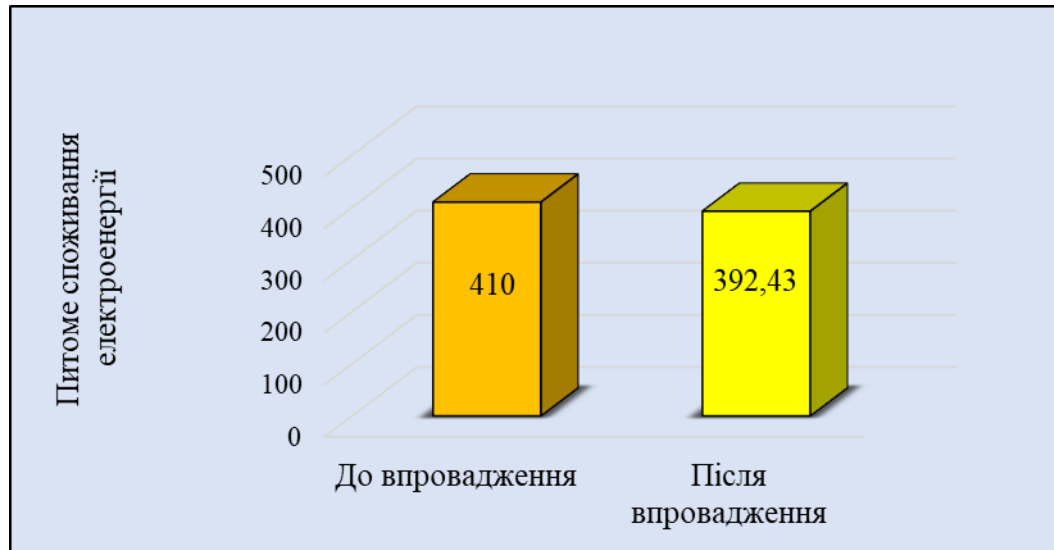


Рисунок 3.5 – Динаміка зміни питомого споживання електроенергії до і після підвищення ентальпії шихти за допомогою ТКГ, $\frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{т}}$

За річного обсягу виплавки 130 000 т економія електроенергії становитиме:

$$E_{\text{річна}} = 17,57 \cdot 130\,000 = 2,284 \text{ млн } \frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{рік}}$$

Щоб забезпечити нагрів 100 тонн шихти до 300°C , обсяг енергії визначається:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T = 100\,000 \cdot 0,46 \cdot 275 = 12\,650\,000 \text{ кДж} = 12\,650 \text{ МДж}$$

Встановлення двох горілок по 2000 кВт кожна забезпечує сумарну теплову потужність з урахуванням ККД (50%) на рівні 2000 кДж/с. Для такого обладнання час нагріву становить:

$$t = \frac{12\,650\,000}{2000} = 6325 \text{ с} = 1,76 \text{ год}$$

Розрахуємо потужність, яка потрібна для того, щоб скоротити час нагріву до 1 години:

$$P = \frac{12\,650\,000}{3600} = 3514 \text{ кВт} = 3514 \text{ кВт} = 7028 \text{ кВт} \text{ (з урахуванням ККД 50\%)}$$

Таким чином, необхідно близько 4 горілок по 2000 кВт для ефективного нагріву за одну годину.

Розрахуємо річну економію електроенергії:

$$E = 2,284 \cdot 7,715 = 17,63 \frac{\text{млн. грн}}{\text{рік}}$$

З іншого боку, річне споживання газу становить:

$$3,61 \frac{\text{м}^3}{\text{т}} \cdot 130\,000 = 469\,300 \text{ м}^3$$

Визначимо ціну газу для поточних розрахунків:

- Середня базова ціна газу - 17 грн/м³
- Тариф на розподіл - 3 грн/м³
- Інші витрати та податки (ПДВ, акциз) - 5,2 грн/м³

Разом становитиме 25,2 грн/м³

З урахуванням повної вартості газу 25,2 грн/м³, витрати на паливо складають:

$$469\,300 \cdot 25,2 = 11,83 \frac{\text{млн. грн}}{\text{рік}}$$

Витрати на персонал (2–3 особи):

$$300\,000 \cdot 12 = 3,60 \frac{\text{млн. грн}}{\text{рік}}$$

Сумарні річні витрати:

$$11,83 + 3,60 = 15,43 \frac{\text{млн. грн}}{\text{рік}}$$

Отже, чиста річна економія:

$$17,63 - 15,43 = 2,20 \frac{\text{млн. грн}}{\text{рік}}$$

Орієнтовні інвестиції у впровадження системи становлять 3,33 млн грн:

- 4 горілки ПАД-В-200-3Г або аналог — 3 000 000 грн
- Система автоматизації та контролю — 330 000 грн

Отже, розрахуємо термін окупності впровадженого заходу:

$$ROI = \frac{3,33}{2,20} = 1,51 \text{ років} = 1 \text{ рік } 6 \text{ місяців}$$

Складемо підсумкову фінансову таблицю 3.12 .

Таблиця 3.12 – Економічна ефективність заходів з підвищення ентальпії шихти за допомогою ТКГ.

Показник	Значення
Енергозбереження	2,284 млн $\frac{\text{кВт}\cdot\text{год}}{\text{рік}}$
Фінансовий ефект	2,20 $\frac{\text{млн. грн}}{\text{рік}}$
Інвестиції	3,33 $\frac{\text{млн. грн}}{\text{рік}}$
ROI	1 рік 6 місяців

Таким чином, впровадження ТКГ дає змогу суттєво знизити енергоспоживання електродугової печі, підвищити ефективність процесу виплавки сталі та досягти економічного ефекту з коротким терміном окупності.

П'ятим варіантом підвищення ефективності роботи електродугової печі є оптимізація електричних режимів плавки.

Інтеграція сучасних систем автоматичного управління параметрами дугової печі (струм, напруга, довжина дуги) дозволяє оптимізувати режим роботи печі, зменшуючи надлишкове споживання електроенергії та забезпечуючи стабільність процесу плавки.

Втрати через нестабільну дугу можуть сягати 5–10% у гірших умовах (за даними ABB, Danieli, Siemens). Водночас, за результатами детального аналізу, очікуване зниження питомого споживання електроенергії при впровадженні стабілізованого електричного режиму становить приблизно 1,2%, що є обґрунтованим та фізично досяжним показником.

Для обґрунтованого аналізу приймаємо економію на рівні 1,2%. За стандартного питомого споживання 410 кВт·год/т, після впровадження системи воно зменшиться до 405,08 кВт·год/т, так як:

$$q_{\text{після}} = 410 - 1,2\% = 405,08 \frac{\text{кВт}\cdot\text{год}}{\text{т}}$$

Отже, економія:

$$\Delta q = 410 - 405,08 = 4,92 \frac{\text{кВт}\cdot\text{год}}{\text{т}}$$

Отже, загальна річна економія при обсязі 130 000 тонн становить:

$$E_{\text{рік}} = 4,92 \cdot 130\,000 = 639\,600 \text{ кВт}\cdot\text{год}.$$

Після оптимізації електричних режимів плавки розраховані дані до та після впровадження зобразимо на рис. 3.6.

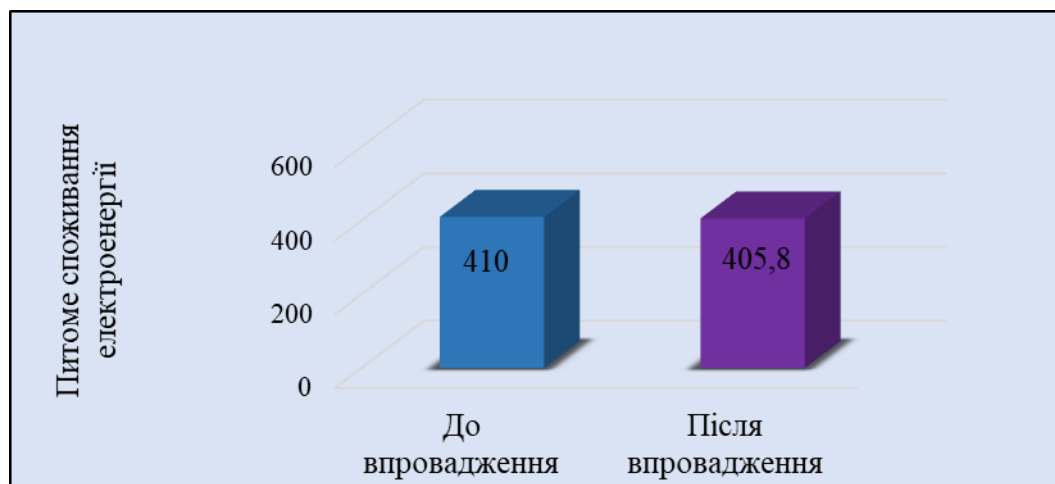


Рисунок 3.6 – Динаміка зміни питомого споживання електроенергії до і після оптимізації електричних режимів плавки, $\frac{\text{кВт}\cdot\text{год}}{\text{т}}$

Потужність дуги визначається як добуток напруги та струму:

$$P = U \cdot I \quad (3.7)$$

де P - потужність (Вт), U - напруга (В), I - струм (А).

При коливаннях формула має вигляд:

$$\Delta P = \Delta U \cdot I + U \cdot \Delta I + \Delta U \cdot \Delta I \quad (3.8)$$

Для типових значень $U=100\text{В}$, $I=50\ 000\text{ А}$ без автоматизації маємо коливання струму 7% і напруги 5%, а з автоматизацією — 3% і 1% відповідно.

Таким чином, зменшення коливань потужності становить приблизно 2,3 раза, що забезпечує економію до 1–1,5% електроенергії.

Розрахуємо фінансовий ефект:

$$G = 639\ 600 \cdot 7,715 = 4,93 \frac{\text{млн. грн}}{\text{рік}}$$

Визначимо обладнання та його вартість для впровадження:

1) Програмований логічний контролер (ПЛК)

- Призначення - централізоване управління параметрами напруги, струму та довжини дуги.
- Кількість - 1 комплект
- Орієнтовна вартість - 400 000 грн

2) Датчики напруги (високоточної дії)

- Призначення - моніторинг реальної напруги на дуговій печі в реальному часі.
- Кількість - 3–4 шт
- Орієнтовна вартість - 250 000 грн

3) Датчики струму (типу струмових трансформаторів або шунтів)

- Призначення - визначення реального струму через електроди.
- Кількість - 3 шт (по одному на фазу)
- Орієнтовна вартість - 300 000 грн

4) Блоки стабілізації довжини дуги (дугові регулятори)

- Призначення - підтримка постійної довжини дуги шляхом аналізу напруги та струму.
- Кількість - 3 шт

- Орієнтовна вартість - 600 000 грн
- 5) Серводвигуни або виконавчі механізми
 - Призначення - автоматичне регулювання положення електродів.
 - Кількість - 3 шт
 - Орієнтовна вартість - 450 000 грн
- 6) Система збору та обробки даних (HMI + SCADA)
 - Призначення - візуалізація, архівування та аналіз даних для операторів.
 - Орієнтовна вартість - 500 000 грн
- 7) Інтеграційні модулі та кабелі (Modbus, Ethernet, Profibus)
 - Призначення - забезпечення обміну між пристроями.
 - Орієнтовна вартість - 200 000 грн
- 8) Резерв на непередбачувані витрати та технічні узгодження — 800 000 грн

Отже, сумарна вартість інвестицій - 3 500 000 грн

Так як орієнтовні інвестиції становлять 3,5 млн. грн., то термін окупності:

$$ROI = \frac{3,5}{4,93} = 0,7 \text{ роки} = 8,5 \text{ місяців}$$

Складемо підсумкову фінансову таблицю 3.13 .

Таблиця 3.13 – Економічна ефективність заходів з оптимізації електричних режимів плавки.

Показник	Значення
Енергозбереження	640 $\frac{\text{тис. грн}}{\text{рік}}$
Фінансовий ефект	4,93 $\frac{\text{млн. грн}}{\text{рік}}$
Інвестиції	3,5 $\frac{\text{млн. грн}}{\text{рік}}$
ROI	8,5 місяців

Крім економічного ефекту, автоматизація дає низку додаткових переваг: стабілізація процесу плавки, зниження зношування електродів, покращення

якості металу, зменшення кількості відходів і викидів CO₂. Технічні вимоги включають точність регулювання не гірше $\pm 1\%$ та підтримку стандартних промислових протоколів обміну (Modbus, Ethernet, Profibus).

Отже, автоматизація керування електричними параметрами дугової печі є технічно і економічно доцільним кроком у напрямку підвищення енергоефективності електromеталургійного виробництва.

Шостим варіантом підвищення ефективності роботи електродугової печі є встановлення тиристорного перетворювача на двигуни системи газоочищення.

Встановлення тиристорного перетворювача дозволяє здійснювати безступінчасте регулювання електроприводів системи газоочищення, що забезпечує плавний запуск двигунів, зменшення пульсацій та оптимізацію енергоспоживання. Дані провідних виробників енергетичного обладнання (ABB, Siemens, Schneider Electric, Danfoss) та незалежні дослідження свідчать, що в реальних умовах зниження споживання електроенергії вентиляторами становить 10–20%, залежно від режиму роботи та тривалості функціонування в умовах неповного навантаження. Максимально можлива економія сягає 30% у разі суттєвого зниження швидкості обертання.

Вихідні дані для розрахункових даних:

- Обсяг виробництва сталі: $130\,000 \frac{\text{т}}{\text{рік}}$
- Кількість основних вентиляторів у системі газоочищення печі: 3 шт.
- Потужність кожного вентилятора: 700 кВт
- Середній час роботи вентиляційної системи: $3000 \frac{\text{год}}{\text{рік}}$
- Потенційна економія енергії завдяки тиристорному керуванню: 12%
- Тариф на електроенергію: $7,715 \frac{\text{грн}}{\text{кВт}\cdot\text{год}}$
- Орієнтовні інвестиції - 2 500 000 грн
- Тиристорні перетворювачі – 1 800 000 грн
- Обладнання для інтеграції та моніторингу – 500 000 грн

– Монтажні та пусканалагоджувальні роботи – 200 000 грн

Розрахуємо потужність встановлених вентиляційних двигунів:

$$P_{\text{вентилятори}} = 3 \cdot 700 = 2100 \text{ кВт}$$

Загальне річне енергоспоживання вентиляційної системи в рік:

$$E_{\text{вентилятори}} = 2100 \cdot 3000 = 6\,300\,000 \frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{рік}}$$

Потенційна економія енергії завдяки тиристорному керуванню становитиме:

$$\Delta E = 6\,300\,000 \cdot 0,12 = 756\,000 \frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{рік}}$$

Розрахуємо фінансовий ефект:

$$G = 756\,000 \cdot 7,715 = 5\,834\,340 \frac{\text{грн. грн}}{\text{рік}}$$

Так як орієнтовні інвестиції становлять 2,5 млн. грн., то термін окупності:

$$ROI = \frac{2\,500\,000}{5\,834\,340} = 0,428 \text{ роки} = 5,1 \text{ місяці}$$

Складемо підсумкову фінансову таблицю 3.14 .

Таблиця 3.14 – Економічна ефективність заходів з встановлення тиристорного перетворювача на двигуни системи газоочищення

Показник	Значення
Енергозбереження	756 000 $\frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{рік}}$
Фінансовий ефект	5 834 340 $\frac{\text{грн. грн}}{\text{рік}}$
Інвестиції	2,5 $\frac{\text{млн. грн}}{\text{рік}}$
ROI	5,1 місяці

Для наочності порівняння до та після впровадження встановлення тиристорного перетворювача на двигуни системи газоочищення відобразимо дані на рис. 3.7.

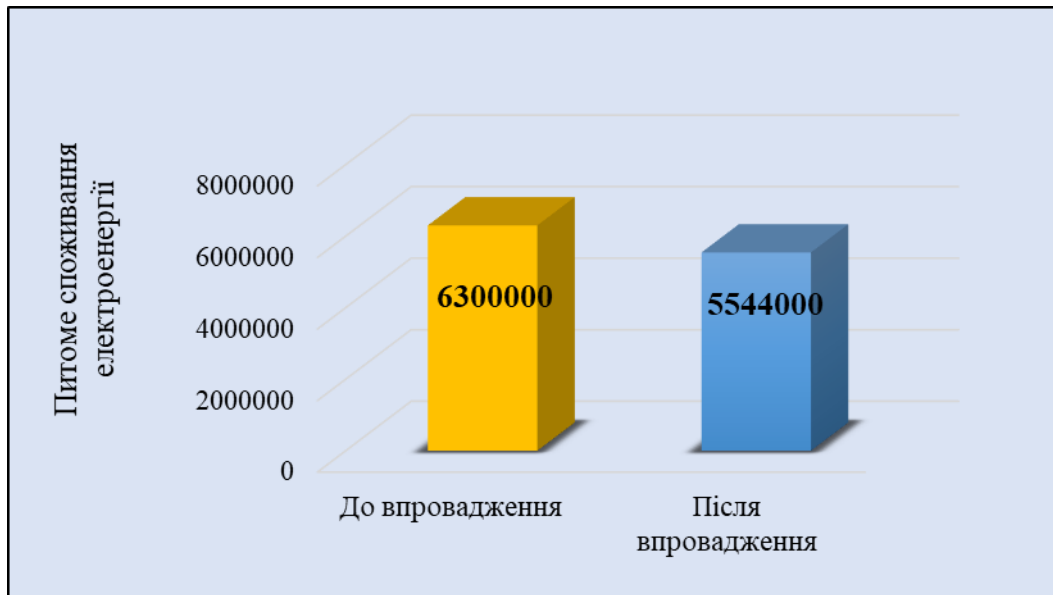


Рисунок 3.7 – Динаміка фінансового ефекту та інвестицій, грн.

Впровадження тиристорних перетворювачів у систему керування електроприводами вентиляторів газоочищення є технічно обґрунтованим і економічно доцільним заходом. Проведений аналіз показав, що завдяки зменшенню споживання електроенергії на 12 % можна досягти щорічної економії у розмірі близько 5,83 млн грн. Термін окупності проекту становить лише 5,1 місяця, що свідчить про його високу ефективність.

Окрім економії енергетичних ресурсів, впровадження тиристорного керування сприяє підвищенню надійності роботи обладнання, зниженню пускових навантажень на електромережу та поліпшенню екологічних характеристик виробництва за рахунок зменшення непродуктивних витрат енергії. Таким чином, встановлення тиристорного перетворювача є одним із ключових напрямів підвищення енергетичної ефективності сталеплавильного виробництва.

Отже, для підвищення ефективності виплавки сталі було проаналізовано шість енергоефективних заходів для дугових сталеплавильних печей, а також розраховано їх фінансову вигоду та термін окупності (рис. 3.8).



Рисунок 3.8 - Варіанти модернізації технологічного обладнання та інженерних систем

На основі проведеного аналізу зобразимо на рис. 3.9 терміни окупності кожного з запропонованих заходів.

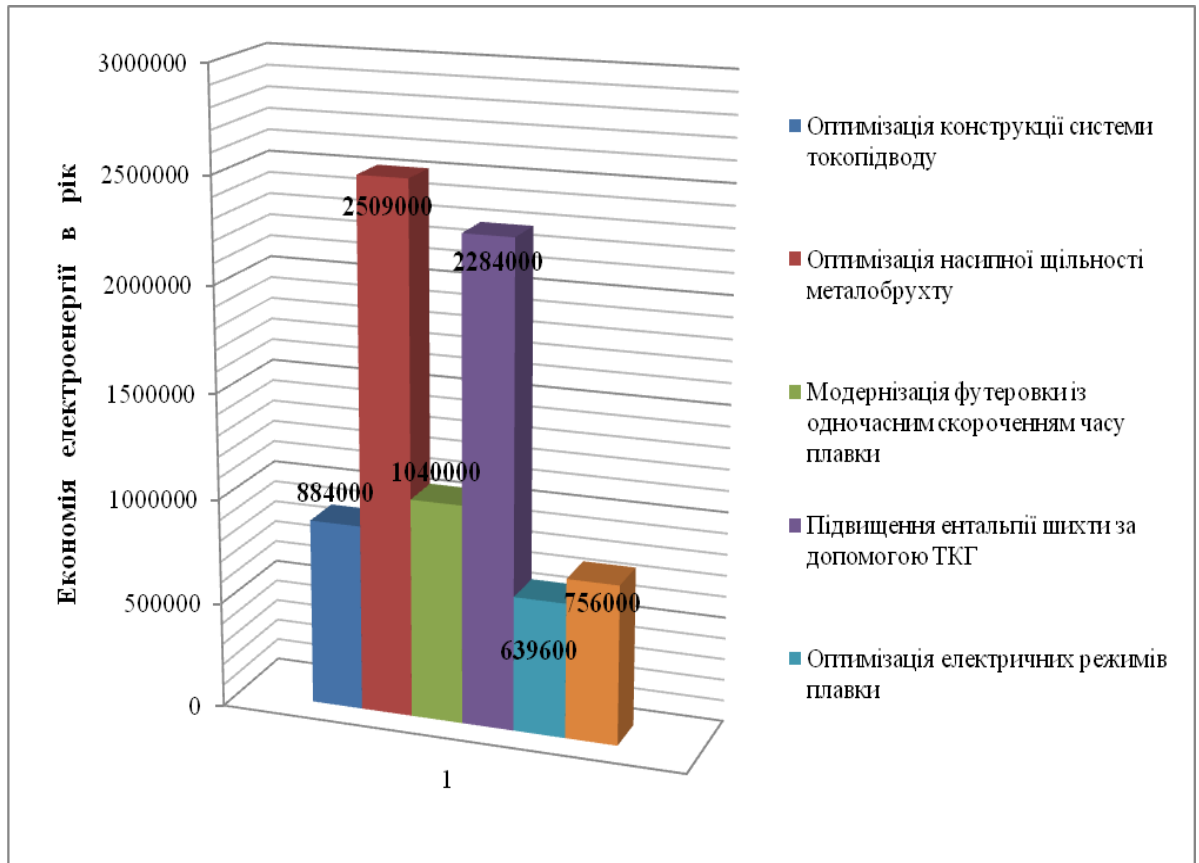


Рисунок 3.9 – Динаміка запропонованих заходів щодо підвищення ефективності технологічних процесів при виплавці сталі в електродугових печах

Отже, якщо підприємство розглядає сталий розвиток, енергоефективність і зниження собівартості продукції як довгострокові пріоритети, то варто надавати перевагу заходам, що забезпечують найбільшу абсолютну економію електроенергії, навіть якщо їхній термін окупності є дещо більшим.

Отже, оптимальною стратегією є комбінований підхід: спочатку варто впровадити заходи з найшвидшою окупністю — наприклад, встановлення тиристорних перетворювачів, які повертають вкладення вже за п'ять місяців. Паралельно доцільно готувати реалізацію більш енергоефективних рішень, таких як оптимізація насипної щільності металобрухту (економія до 2,5 млн

кВт·год на рік) та підвищення ентальпії шихти за допомогою ТКГ (економія 2,284 млн кВт·год на рік). Такий підхід дозволяє досягти швидкого ефекту та водночас закласти основу для суттєвого зниження енерговитрат у перспективі.

Такий підхід дає змогу підтримувати фінансову стабільність, оперативно досягати помітних результатів і водночас поступово створювати основу для тривалого зниження енергоспоживання та оновлення виробничих процесів.

ВИСНОВКИ

1. Основною метою процесу виплавки сталі є отримання рідкої сталі заданої марки та температури з мінімальними витратами енергетичних і матеріальних ресурсів. Для досягнення цієї мети необхідно точно контролювати перебіг складних фізико-хімічних процесів, зокрема рафінування, розкислення та нагрівання металу. Важливу роль у цих процесах відіграє шлак, який забезпечує очищення сталі від домішок, захист розплаву від дії газової фази та регулювання температурного режиму. Ефективне керування складом і властивостями шлаку є критичним чинником для забезпечення якості сталі та енергоефективності виробництва.
2. Процес виплавки супроводжується активними окислювальними реакціями, основна мета яких — видалення шкідливих домішок, таких як вуглець, кремній, марганець, фосфор і сірка. Головним джерелом кисню для цих реакцій є як газоподібний кисень, що подається до ванни, так і оксиди заліза, присутні в шлаку. Найбільше технологічне значення має реакція окиснення вуглецю, що супроводжується інтенсивним "кипінням" металу, активним тепло- і масообміном. Ефективне видалення фосфору та сірки можливе лише за оптимального складу шлаку, відповідної температури та застосування ефективних розкислювачів. Таким чином, раціональне керування окислювальними процесами є необхідною умовою досягнення високої якості металу.
3. Види шихтових матеріалів істотно впливають на ефективність виплавки сталі в електродугових печах. Основними компонентами шихти є металевий брухт, чавун, металізовані окатиші, шлакоутворюючі матеріали, науглецюючі та розкислювальні добавки, а також легуючі елементи. Їх склад визначає рівень енергоспоживання, тривалість плавки, ефективність металургійних реакцій і якість кінцевої продукції.

Раціональний підбір шихти сприяє стабільності процесу, зменшенню витрат електроенергії, поліпшенню екологічних показників і досягненню заданих механічних властивостей сталі.

4. Електрична плавильна піч — це установка, у якій електрична енергія перетворюється на теплову для розплавлення металевих матеріалів. Залежно від типу нагрівання, призначення та режиму роботи розрізняють кілька видів печей, однак найпоширенішими у сталеплавильній промисловості залишаються електродугові печі. У них тепло утворюється за рахунок електричної дуги, що дозволяє досягати температур до 1800 °С. Сучасні дугові печі можуть працювати на постійному або змінному струмі, мати різну конструкцію електродного вузла й систем керування. Енергоспоживання таких агрегатів може досягати 300 МВА, що дозволяє забезпечити високу продуктивність, але водночас вимагає ефективних рішень для зменшення енерговитрат.
5. Аналіз конструктивних особливостей, принципу дії та технологічних характеристик електродугових печей свідчить про те, що попри їхню гнучкість і високу продуктивність, значна частина енергії втрачається внаслідок теплових втрат, холостих режимів, технологічних зупинок і зношення футеровки. Це зумовлює необхідність системного підходу до підвищення енергоефективності роботи таких агрегатів.
6. Оптимальною стратегією щодо підвищення ефективності технологічних процесів при виплавці сталі є комбінований підхід: спочатку варто впровадити заходи з найшвидшою окупністю — встановлення тиристорних перетворювачів, які повертають вкладення вже за п'ять місяців. Паралельно доцільно готувати реалізацію більш енергоефективних рішень, таких як оптимізація насипної щільності металобрухту (економія до 2,5 млн кВт·год на рік) та підвищення ентальпії шихти за допомогою ТКГ (економія 2,284 млн кВт·год на рік). Такий підхід дозволяє досягти швидкого ефекту та водночас закласти

основу для суттєвого зниження енерговитрат у перспективі. Такий підхід дає змогу підтримувати фінансову стабільність, оперативно досягати помітних результатів і водночас поступово створювати основу для тривалого зниження енергоспоживання та оновлення виробничих процесів.