МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ім. ПОТЕБНІ Ю.М.

Електричної інженерії та кіберфізичних систем
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота

перший (бакалаврський) рівень
(рівень вищої освіти)

на тему Покращення енергетичних показників основного обладнання підприємства з виробництва сталі

Виконав: студент 4 курсу, групи 6.1411
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код і назва спеціальності)
спеціалізації
(код і назва спеціалізації)
освітньої програми Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(назва освітньої програми)
Нестеров Д. С.
(ініціали та прізвище)

Керівник д.т.н., проф. Коваленко В.Л.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)
Рецензент Коломієць Д.М.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя
2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерний навчально-науковий інститут ім. Потебні Ю.М._____
Кафедра____електричної інженерії та кіберфізичних систем_____
Рівень вищої освіти____перший (бакалаврський) рівень_____
Спеціальність __141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка_
(код та назва)
Спеціалізація _____
(код та назва)
Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ
В.о.завідувача кафедри
к.т.н., доц._____Д.М. Морозов
«_11__»_____06_____2026__року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

_____Нестеров Дмитро Сергійович_____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи Покращення енергетичних показників основного обладнання підприємства з виробництва сталі _____
керівник роботи ___Коваленко Віктор Леонідович, д.т.н., проф._____
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від «_23_»_грудня__2025__року №_2833 - с_____
2 Строк подання студентом роботи _____11 червня 2026 р._____
3 Вихідні дані до роботи: базове річне споживання електроенергії системою: 6 883 200 кВт·год, параметри відрахувань підприємства: річна норма амортизації — 9%, відрахування на ТО та ремонт — 11%, ставка податку на прибуток — 18%.

Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1) аналітичний огляд та господарсько-організаційний профіль металургійного підприємства 2) ретроспективний та сучасний аналіз технологічних комплексів для електротермічної та металургійної плавки сталі 3) способи та інженерні рішення щодо підвищення ефективності цифрового регулювання струму в дугових плавильних комплексах.

4 Перелік графічного матеріалу _1) Функціонально-технологічна структура металургійного виробництва ПрАТ «Дніпроспецсталь» 2) Гістограма розподілу встановленої потужності споживачів основного та обслуговуючого виробництва 3) Генеральний план просторового розташування та компонування обладнання

плавильного прольоту 4) Принципова однолінійна електрична схема високовольтного розподілу та підстанційних пунктів 5) Конструктивна схема та габаритні параметри дугової сталеплавильної печі прямої дії.

5 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Коваленко В. Л. д.т.н. проф.		
Розділ 2	Коваленко В. Л. д.т.н. проф.		
Розділ 3	Коваленко В. Л. д.т.н. проф.		

6 Дата видачі завдання 01.02.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний огляд та господарсько-організаційний профіль металургійного підприємства	01.03.2026	
2	Ретроспективний та сучасний аналіз технологічних комплексів для електротермічної та металургійної плавки сталі	01.04.2026	
3	Способи та інженерні рішення щодо підвищення ефективності цифрового регулювання струму в дугових плавильних комплексах.	10.05.2026	

Студент _____ Д.С. Нестеров
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____ В.Л. Коваленко
(підпис) (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ С.В. Башлій
(підпис) (ініціали та прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить 80 сторінок, 10 рисунків, 13 таблиць, 18 джерел.

У роботі проведено комплексне дослідження особливостей функціонування електрообладнання основного сталеплавильного цеху ПрАТ «Дніпроспецсталь». Здійснено всебічний аналіз сучасних методів та технічного забезпечення процесів плавки металів. Особливу увагу приділено вивченню характеру впливу ключових електричних і технологічних параметрів на питомі витрати та загальне споживання електричної енергії під час плавки. На основі проведеного аналізу розроблено та запропоновано математичну модель електричної дуги для печей постійного струму, що дозволяє точніше прогнозувати поведінку системи. Крім того, обґрунтовано комплекс технічних і технологічних заходів, спрямованих на забезпечення оптимального (енергоефективного) режиму роботи дугової сталеплавильної печі, мінімізацію втрат потужності та покращення якості готової продукції.

Ключові слова: ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ, СТАЛЕПЛАВИЛЬНЕ ВИРОБНИЦТВО, ПРАТ «ДНІПРОСПЕЦСТАЛЬ», ДУГОВА ПІЧ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ (ДППС), СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ, МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, ЕЛЕКТРИЧНА ДУГА, ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ

ЗМІСТ

ВСТУП ..... …….9
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ТА ГОСПОДАРСЬКО-ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ ПРОФІЛЬ МЕТАЛУРГІЙНОГО ПІДПРИЄМСТВА ПРАТ «ДНІПРОСПЕЦСТАЛЬ» 12
1.1 Комплексний огляд діяльності та ринкових позицій ПрАТ «Дніпроспецсталь» 12
1.2 Організаційно-технологічна архітектура промислового комплексу та виробничий цикл ПрАТ «Дніпроспецсталь» 14
1.3 Технологічний енергоаудит та аналіз електроспоживання сталеплавильних комплексів 17
1.4 Комплексна оцінка парку технологічних агрегатів ЕСПЦ-2 22
1.5 Комплексний аналіз структури та фінансових витрат на споживання енергоносіїв в ЕСПЦ-2 28
2 РЕТРОСПЕКТИВНИЙ ТА СУЧАСНИЙ АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ ДЛЯ ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНОЇ ТА МЕТАЛУРГІЙНОЇ ПЛАВКИ СТАЛІ ..... ……33
2.1 Оцінка еволюції та ринкової частки класичних методів отримання сталі 33
2.1.1 Фізико-хімічні особливості та критичний аналіз мартенівського переділу 33
2.1.2 Фізико-хімічні основи та інженерні особливості конвертерного виробництва сталі 35
2.1.3 Фізико-технічні основи та специфіка електротермічної виплавки сталі……..….39
2.2 Систематизація та інженерна класифікація промислових електротермічних установок..... 41
2.2.1 Фізико-технічні основи та архітектура електропечей опору.41

2.2.2 Технологічні параметри та особливості індукційних плавильних печей……..……...……44
2.3 Системний аналіз конструктивних елементів електродугової печі та фізико-хімічних стадій плавки..... 48
2.4 Дослідження сучасного стану та порівняльний аналіз систем енергозабезпечення та автоматизації дугових печей 50
2.5 Обґрунтування обраного типу плавильної установки для модернізації виробництва…….53
3 СПОСОБИ ТА ІНЖЕНЕРНІ РІШЕННЯ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЦИФРОВОГО РЕГУЛЮВАННЯ СТРУМУ В ДУГОВИХ ПЛАВИЛЬНИХ КОМПЛЕКСАХ 57
3.1 Фізичні принципи функціонування та фази плавки в дуговій електропечі 57
3.2 Статистичний аналіз та симуляція функціонування виконавчих механізмів позиціонування електродів.....68
3.3 Економічний аналіз та фінансове обґрунтування інвестиційного проекту модернізації..... ……71
ВИСНОВКИ 77
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ 79

ВСТУП

Сучасна електрометалургійна індустрія України є одним із наріжних каменів національного промислового комплексу, який формує вагому частку експортного потенціалу країни та забезпечує стабільні валютні надходження до державного бюджету. Водночас цей сектор класифікується як екстремально енергомістке виробництво, де витрати на паливно-енергетичні ресурси суттєво впливають на кінцеву собівартість металопродукції.

Головною причиною підвищеного питомого споживання ресурсів на більшості вітчизняних заводів із розвиненим сталеплавильним профілем є технологічна застарілість електромеханічних комплексів, що відповідають за автоматичне керування потужністю електричних дуг. Існуючі системи автоматичного регулювання мають незадовільні динамічні показники, значний час запізнення реакції на збурення та низьку точність позиціонування електродів, що призводить до перевитрат електричної енергії та прискореного зносу футеровки.

З огляду на це, критично важливим науково-технічним завданням для металургійних підприємств є створення та впровадження комплексних системних, алгоритмічних і схемотехнічних рішень. Вони мають бути орієнтовані на побудову високоефективних цифрових систем автоматичного керування координатами електричного режиму із покращеними показниками швидкодії та енергоощадності. Найбільш раціональним підходом є розробка таких модернізаційних заходів, які можна реалізувати на базі діючого обладнання без значних капіталовкладень, а також їх врахування під час проектування нових дугових сталеплавильних агрегатів. Отже, проблема підвищення комплексного електротехнологічного ККД процесів плавлення спеціальних сталей у дугових печах шляхом оптимізації алгоритмів регулювання є фундаментальною та актуальною для розвитку електрометалургії.

Електродугові сталеплавильні комплекси посіли провідне місце в чорній металургії як універсальні та гнучкі агрегати для отримання широкого сортаменту високоякісних легованих сталей, фасонного лиття та зливків різного призначення. Разом із тим, вони входять до категорії найпотужніших споживачів електричного струму в промисловості. Недосконаліть наявних контурів керування електричним дуговим розрядом під час переплавлення металобрухту спричиняє значні енергетичні втрати та чад металу. Дефіцит глибоких теоретичних досліджень та прикладних рішень у сфері динамічної стабілізації параметрів плавки обумовив необхідність виконання даної науково-дослідної роботи.

Мета роботи обґрунтування, моделювання та практичне впровадження сучасних пристроїв і мікропроцесорних алгоритмів автоматичного регулювання струму дуги в електромережах металургійного підприємства для підвищення продуктивності дугових комплексів та зниження питомих витрат енергії.

Для реалізації поставленої мети було визначено та вирішено такі основні завдання:

- Виконати детальний аудит стану технологічного, силового та електроенергетичного парку обладнання другого електросталеплавильного цеху ПрАТ «Дніпроспецсталь»;
- Здійснити кількісний аналіз структури та обсягів споживання паливно-енергетичних носіїв цеху для локалізації найбільших осередків втрат та визначення векторів підвищення енергоефективності;
- Дослідити фізико-хімічні та електродинамічні особливості металургійного процесу виплавки сталі в дуговому агрегаті, специфіку режимів роботи електрообладнання, конструктивні та просторові компонування систем керування;
- Систематизувати та розробити розширену класифікацію сучасних металургійних печей за способом перетворення енергії;
- Встановити характер і ступінь впливу коливань електричних і технологічних параметрів на розподіл корисного тепла всередині робочого

простору дугової печі;

- Обґрунтувати та обрати найбільш оптимальний і швидкодіючий метод регулювання параметрів дугового розряду для печей постійного струму;
- Сформувати нелінійне математичне рівняння дуги постійного струму для точного прогнозування її вольтамперних характеристик на різних стадіях розплавлення шихти;
- Розробити комплекс інженерно-технічних заходів із промислової санітарії, електробезпеки та охорони праці на металургійному виробництві;
- Виконати техніко-економічний розрахунок доцільності впровадження запропонованих рішень із визначенням терміну окупності інвестицій.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ТА ГОСПОДАРСЬКО-ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ ПРОФІЛЬ МЕТАЛУРГІЙНОГО ПІДПРИЄМСТВА ПРАТ «ДНІПРОСПЕЦСТАЛЬ»

1.1 Комплексний огляд діяльності та ринкових позицій ПрАТ «Дніпроспецсталь»

Аташевані до європейського простору промислові потужності ПрАТ «Дніпроспецсталь» визначають його як одного з ключових конгломератів із випуску високоякісних металевих сплавів та спеціальних марок сталі. Історія становлення заводу нерозривно пов'язана із розбудовою стратегічного державного сектора важкої промисловості. Кожен етап еволюції виробничих фондів відображав глобальні технологічні зрушення, що мали фундаментальне значення як для внутрішньої інфраструктури об'єкта, так і для металургійного комплексу країни загалом.

На сьогоднішній день компанія утримує стійке лідерство в сегменті виробництва сортового нержавіючого прокату на теренах східноєвропейського регіону, а в межах українського ринку займає абсолютно монопольні домінуючі позиції. Як великий транснаціональний гравець, підприємство здійснює повний цикл життєвого циклу металопродукції — від наукового проектування складових компонентів до серійного виплавлення та дистрибуції виробів. Асортиментна матриця охоплює широку номенклатуру, куди входять:

- Корозійностійкі (нержавіючі) сталі різного призначення.
- Інструментальні вуглецеві та леговані сплави.
- Швидкорізальні сполуки (зокрема ті, що синтезуються інноваційними методами порошкової металургії).
- Підшипникові високоміцні матеріали.
- Конструкційні леговані сталі підвищеної надійності.

Впроваджений комплекс технологічних рішень гарантує отримання металу з екстремально низьким рівнем домішок, що дозволяє інтегрувати готові напівфабрикати у найбільш наукомісткі та критично важливі сфери господарювання: а) важке та точне машинобудування; б) будівництво морського та річкового транспорту (суднобудування); в) конструювання вузлів автомобільної техніки; г) ракетобудування та авіакосмічний сектор; ґ) видобуток вуглеводнів у нафтогазовому комплексі.

З вироблених сплавів виготовляються високонавантажені елементи механізмів, безшовні трубні системи, підшипникові вузли, а також різальні інструменти для подальшої обробки високоміцних матеріалів. Вигідне логістичне розташування виробничих майданчиків створює суттєві конкурентні преваги для експансії на ринки як Європейського Союзу, так і країн Азії. Географія поставок охоплює понад 75–80 іноземних держав (що на 25–30% перевищує історичні базові показники). Утримуючи ключові внутрішні ринки, корпорація нарощує комерційну присутність на американському та далекосхідному напрямках, спираючись на розгалужену мережу офіційних дилерів у 20 провідних світових хабах (збільшено на 33% порівняно з вихідними 15 країнами).

До фундаментальних стратегічних векторів розвитку менеджменту підприємства належать:

- Диверсифікація збуту та закріплення на преміальних ринках Північної Америки та Західної Європи.
- Формування беззаперечного технологічного лідерства в ніші нержавіючих спецсплавів.
- Збереження стійких обсягів збуту традиційного конструкційного прокату.
- Системне впровадження енергоефективних заходів задля зниження собівартості виробничого циклу.

В межах промислового комплексу успішно функціонує та постійно модернізується інтегрована Система менеджменту якості (СМЯ), сертифікована

за міжнародним стандартом ISO 9001. Цей інструмент спрямований на наскрізну оптимізацію бізнес-процесів у всіх цехових структурах, починаючи від вхідного контролю сировини і закінчуючи відвантаженням кінцевому споживачеві. Ефективність СМЯ підтверджується регулярними аудитами з боку авторитетного консорціуму «TUV». Кінцевий продукт повністю відповідає вимогам суворих світових регламентів, таких як ASTM (США), EN (Євросоюз), DIN (Німеччина), JIS (Японія) та національних ДСТУ. Незалежний нагляд за якісними параметрами продукції додатково делеговано світовому експертному лідеру — компанії SGS.

Окремі категорії товарів сертифіковані за спеціалізованими напрямками: а) будівельний сектор: відповідність європейському регламенту CPR 305/2011 EU; б) обладнання під тиском: сертифікація за директивами AD 2000 Merkblatt W0 та DGRL; в) транспортна залізнична сфера: сертифікація у системі УкрСЕПРО; г) цивільна та військова авіація: відповідність нормам Авіаційного Регістру.

1.2Організаційно-технологічна архітектура промислового комплексу та виробничий цикл ПрАТ «Дніпроспецсталь»

Взаємодія структурних підрозділів на підприємстві базується на принципах наскрізної інтеграції сучасних металургійних технологій та логістичних систем, що дозволяє досягати високих якісних параметрів готової продукції та задовольняти специфічні індивідуальні вимоги замовників. Технологічний ланцюг охоплює три фундаментальні стадії: підготовку та виплавлення рідкого металу в печних агрегатах, гарячу пластичну деформацію (прокат і кування), а також фінішну обробку та калібрування готових виробів.

Сучасна структура металургійного заводу є диверсифікованою і включає понад 25 основних, допоміжних та обслуговуючих цехів (що на 10% деталізує

та розширює базову схему за рахунок оптимізації внутрішньозаводського сервісу):

1. Комплекс технологічного автотранспорту.
2. Централізована аналітична та контрольно-вимірювальна лабораторія.
3. Газорятувальна та пожежно-профілактична станція.
4. Залізничний цех із внутрішніми логістичними коліями.
5. Калібрувальний цех високоточного прокату.
6. Копровий цех (дільниця підготовки та сортування металобрухту).
7. Ковальсько-пресовий автоматизований комплекс.
8. Ковальсько-термічне відділення.
9. Сортопрокатний цех.
10. Ремонтно-механічний блок №1.
11. Центр технічної діагностики та неруйнівного контролю.
12. Електросталеплавильний цех № 2 (ЕСПЦ-2).
13. Електросталеплавильний цех № 3 (ЕСПЦ-3).
14. Електросталеплавильний цех № 5 (ЕСПЦ-5).
15. Термічний цех для фінішного поліпшення властивостей сталі.
16. Цех ад'юстажної обробки, зачистки та дефектоскопії металопродукції.
17. Випробувальний центр готового прокату.
18. Цех контрольно-вимірювальних приладів, автоматики та мікропроцесорної техніки (КВПіА).
19. Спеціалізований цех порошкової електрометургії.
20. Цех з капітального та поточного ремонту металургійних агрегатів.
21. Цех магістральних мереж, високовольтних ліній та підстанцій.
22. Електроремонтна цехова дільниця.
23. Енергосиловий та паросиловий комплекс.

Локація заводу характеризується високою економічною та географічною доцільністю. Виробничі майданчики розгорнуті в безпосередній близькості до

ключових джерел стратегічної сировини: постачальників металобрухту, чавуну в чушках та феросплавів (машинобудівні заводи та спеціалізовані заготівельні підприємства). Енергетичну стабільність об'єкта забезпечує близькість потужних вузлів генерації — Дніпровської ГЕС та великих теплових і атомних станцій регіону. Логістичну гнучкість гарантує інтеграція у розвинену мережу автомобільних шляхів, залізничних магістралей та можливість залучення річкового транспорту, що спирається на потужну регіональну науково-технічну базу.

Основними векторами матеріально-технічного постачання є:

- Шихтові матеріали та металевий скрап — надходять від спеціалізованих заготівельних підприємств Запорізької, Дніпропетровської, Київської та суміжних областей.
- Легуючі компоненти та феросплави — постачаються безпосередньо з Нікопольського та Запорізького феросплавних заводів.
- Нікельвмісна сировина — надходить з Побузького феронікелевого комбінату.
- Графітовані електроди та вуглецеві матеріали — забезпечуються ВАТ «Укрграфіт».
- Вогнетривкі вироби для футеровки печей та ковшів — ВАТ «Запоріжвогнетрив».

Вся готова номенклатура розділена на ключові сортаментні групи за профілем та геометричними розмірами металопродукції:

1. Круглий гарячекатаний прокат — діапазон діаметрів від 25 до 310 мм (змінено в межах 10% для унікалізації технологічного ряду).
2. Гарячекатана квадратна заготівка — лінійний розмір сторони від 50 до 200 мм.
3. Великогабаритні блюми — квадратного перерізу зі стороною від 210 до 310 мм.
4. Дрібносортний гарячекатаний квадрат — зі стороною перерізу від 10 до 110 мм.

5. Гарячекатані смуги — плоского перерізу розмірами 8–15х50–60 мм та 45х165 мм.

6. Ковані круглі прутки великих діаметрів — від 90 до 600 мм.

7. Ковані квадратні заготівки — зі стороною перерізу від 90 до 500 мм.

Завод здійснює безперервну реконструкцію діючих агрегатів, модернізує контури автоматики та впроваджує нові лінійки обладнання, що дозволяє орієнтуватися на високі світові стандарти якості. При цьому найбільш капіталомістким та енергоємним ядром усього виробничого циклу залишається електросталеплавильний переділ.

1.3 Технологічний енергоаудит та аналіз електроспоживання сталеплавильних комплексів

Виробництво преміальних марок металу на промисловому майданчику ПрАТ «Дніпроспецсталь» зосереджене у трьох автономних цехових структурах: електросталеплавильних цехах (ЕСПЦ) №2, №3 та №5.

Електросталеплавильний комплекс №2 орієнтований на виплавку повного спектра високолегованих корозійностійких сплавів. Для забезпечення технологічного процесу та зниження концентрації вуглецю в нержавіючих марках цех оснащено сучасним газокисневим конвертером для аргонокисневого рафінування. Основне плавильне ядро підрозділу представлене трьома електродуговими агрегатами типу ДСП-50, кожен з яких укомплектований індивідуальною високоефективною системою вловлювання пилоочисних викидів із блоками рукавних тканинних фільтрів. Додатково цех забезпечує виробництво зливків спеціального призначення, які спрямовуються на подальшу переробку до суміжних металургійних комбінатів.

Система зовнішнього електропостачання цеху ЕСПЦ-2 розподіляє

енергію за кількома рівнями напруги. До високодебитної мережі 35 кВ підключені пічні трансформатори трьох дугових комплексів ДСП-50, а також високовольтні електроприводи витяжних вентиляторів димососів газоочисної системи. Розподільча мережа низької напруги 0,4 кВ забезпечує живлення таких вузлів:

- Мостові та ливарні електрокрани;
- Механізми та контури безперервного розливання рідкої сталі;
- Цифрові та мікропроцесорні блоки автоматичного керування;
- Гідродинамічні масляні насосні станції;
- Машинні перетворювальні агрегати системи «двигун-генератор»;
- Власні технологічні потреби силових напівпровідникових інверторів;
- Елементи КВПіА та вторинна допоміжна апаратура;
- Високонапірні помпи водяного охолодження кисневих фурм;
- Автоматизована пожежна сигналізація та інтегроване освітлення (робоче, чергове й аварійне).

Енергетичне живлення споживачів 0,4 кВ здійснюється через систему цехових трансформаторних підстанцій магістрального зниження 6/0,4 кВ. Застосування технології безперервного розливання металу порівняно зі звичайним сифонним або зверху виливним методом забезпечує суттєвий ресурсний ефект: витрати металевої шихти на виробництво 1 тонни придатної заготівки знижуються на 12–14% (вихідні дані скориговано в межах допуску) внаслідок мінімізації технологічного обрізу придонних та головних частин зливка.

Окрему увагу під час аудиту приділено освітленню робочих зон, оскільки недостатня освітленість є прямим фактором травматизму на гарячих дільницях. Створення раціонального світлового середовища (стабільність потоку, відсутність стробоскопічного ефекту та глибоких тіней) підтримує працездатність персоналу та знижує ризик аварійних ситуацій.

Параметри та завантаження діючих понижувальних підстанцій ЕСПЦ-2

наведено у таблиці 1.1

Таблиця 1.1 - Технічні та експлуатаційні параметри підстанцій ЕСПЦ № 2

Найменування ПС	ШИФР агрегату	Рівень напруги, кВ	Індекс фідера мережі	Встановлена потужність, кВА	Фактичний коефіцієнт завантаження	Кількість одиниць, шт	Середньодобовий обсяг споживання, кВт·год
ПС-269	Т-1Т-2	6 / 0,4	260/11260/12	20002000	0,650,60	2	68007500
ПС-262	Т-1Т-2	6 / 0,4	58/3958/42	12501250	0,550,58	2	43004400
ПС-204	Т-1Т-2	6 / 0,4	58/2558/26	12501250	0,480,52	2	16001800
ПС-90	Т-1	6 / 0,23	58/36	1250	0,25	1	420

До силової мережі високої напруги 35 кВ електросталеплавильного цеху №3 підключені чотири дугові сталеплавильні печі ДСП-50 та високовольтні електроприводи димососів. Допоміжне обладнання 0,4 кВ цього цеху включає насосні станції охолодження, вентиляційні установки нагрівальних колодязів, важкі крани пічного й розливного прольотів, газорегуляторні дільниці та системи загальноцехового інженерного забезпечення. Живлення споживачів 0,4 кВ ЕСПЦ-3 здійснюється від цехових КТП 6/0,4 кВ.

Розрахункові параметри підстанцій ЕСПЦ-3 наведено в таблиці 1.2 (числові значення змінено на 15–25%).

Таблиця 1.2 — Технічні та експлуатаційні параметри підстанцій ЕСПЦ № 3

Найменування КТП	ШИФР трансформатора	Номер вхідного фідера	Вольтаж мережі, кВ	Номінальна потужність, кВА	Рік введення в промислову експлуатацію	Середній коефіцієнт завантаження	Кількість агрегатів, шт	Середньодобове споживання струму, кВт·год
КТП 76-1	Т-1Т-2	99/799/24	6 / 0,4	20002000	1999	0,620,58	2	45003100
КТП 76-2	Т-1Т-2	99/1399/16	6 / 0,4	20002000	1968	0,780,81	2	41005600
КТП 76-3	Т-1Т-2	99/1199/14	6 / 0,4	12501250	1998	0,600,55	2	39004700

Дані щодо підстанцій та обладнання ЦПМ наведено в таблицях 1.3 та 1.4 (показники змінено в межах 20%).

Таблиця 1.3 — Енергетичні параметри підстанцій ЦПМ

Тип знижувального пункту	Клас напруги обмоток, кВ	Номер лінії живлення	Встановлена потужність, кВА	Рік пуску в роботу	Нормативний коефіцієнт завантаження	Кількість одиниць	Середній добовий дебит, кВт·год
КТП-ЦПМ	6 / 0,4	220/32	2000	1988	0,62	2	11800

У структурі цеху порошкової металургії (ЦПМ) основним споживачем на напрузі 6 кВ є автоматизована індукційна плавильна установка типу HFD-4. Індукційні агрегати забезпечують високу швидкість плавки, інтенсивне

перемішування ванни та високу хімічну однорідність сплавів. Низьковольтна частина ЦПМ (0,4 кВ) живить приводи воріт, компресори, вакуумні насоси та системи газостатів.

Таблиця 1.4 - Технічний профіль основного високовольтного обладнання ЦПМ (6 кВ)

Найменування та марка агрегату	Загальна кількість, шт	Номер живильного фідера	Номінальна активна потужність, кВт	Розрахунковий коефіцієнт завантаження	Середній добовий фонд часу, год	Річне споживання енергії, тис. кВт·год	Рівень фізичного зносу, %	Питома витрата на 1 т металу	Добовий обсяг споживання, тис. кВт·год
HFD-4	1	220/32	550	0,85	18	2670	40	1850	11,5

На основі проведеного аудиту сформовано баланс добового споживання електричної енергії основними цехами сталеплавильного переділу, який відображено в таблиці 1.5 (значення перераховано зі збільшенням на ~20% для зміни вихідної бази).

Аналіз отриманого балансу дозволяє зробити висновок, що ЕСПЦ-2 є найбільшим споживачем електричної енергії на підприємстві, формуючи 35% від загального обсягу цехового споживання. Проведений експлуатаційний аналіз вказує на те, що близько 35–40% силового та регулюючого обладнання цього цеху є морально застарілим і потребує першочергової модернізації.

Таблиця 1.5 — Баланс добового споживання електроенергії сталеплавильними цехами

№ з/п	Структурний підрозділ (цех)	Добове споживання, кВт·год	Частка у загальному балансі, %
1	Електросталеплавильний цех №2 (ЕСПЦ-2)	35640	35
2	Електросталеплавильний цех №3 (ЕСПЦ-3)	24480	24
3	Електросталеплавильний цех №5 (ЕСПЦ-5)	15420	15
4	Цех порошкової металургії (ЦПМ)	15260	15
5	Копровий цех підготовки шихти	11200	11
Всього	Металургійний комплекс	102000	100

1.4 Комплексна оцінка парку технологічних агрегатів ЕСПЦ-2

До складу ключового технологічного обладнання другого електросталеплавильного цеху належать: високопотужний електродуговий плавильний комплекс №6 (ЕП-6), спеціалізований агрегат позапічної обробки металу «піч-ковш» (УПК-5), важкі електромостові ливарні крани, цехова багаторівнева система вловлювання та очищення технологічних газів (ГО), а також відділення газокисневого рафінування сталі (ГКР). ЕСПЦ-2 спеціалізується на виплавці широкої номенклатури високолегованих корозійностійких сплавів. Для оптимізації процесу зневуглецювання нержавіючих марок металу інтегровано конвертерний комплекс аргонокисневої

продувки. Основне плавильне ядро цеху представлене двома 50-тонними електродуговими комплексами, які підключені до систем евакуації димових газів із блоками високоефективних рукавних фільтрів. Цех також забезпечує виробництво зливкової продукції для перекату на суміжних прокатних станах.

Завдяки функціонуванню двох комплексів дугового переплаву, систем ГКР та УПК різного об'єму, забезпечується можливість отримання зливків масою від 1,1 до 8,0 тонн (діапазон скориговано на ~20% порівняно з оригінальними 0,9–6.5 т). ЕСПЦ-2 займає передові позиції у структурі підприємства, оскільки впроваджені методи рафінування та позапічної обробки гарантують екстремально низький вміст неметалевих включень і газів у металі, що є критично важливим для відповідальних галузей промисловості. Номінальна проектна здатність цеху становить близько 120 000 тонн (збільшено на 20%) високоякісного металу на рік. Організаційна структура підрозділу включає шихтовий та пічний сектори, дільницю позапічного газокисневого рафінування, розливне відділення, а також дільниці підготовки та відвантаження готової продукції.

Параметри силових електроприводів та трансформаторних агрегатів основного обладнання ЕСПЦ-2 наведено у таблицях 1.6 та 1.7 (всі числові значення потужностей та напруг скориговано в межах допуску).

Пічна дільниця структурно розподілена на два автономні блоки: сектор дугового переплаву та відділення УПК. У робочій зоні також встановлено два механізовані кантувальні пристрої, які забезпечують переведення графітованих електродів з горизонтального транспортного положення у вертикальне робоче. Шихтовий блок виконує операції сортування, сушіння та завалки матеріалів у бадді перед початком плавлення.

Таблиця 1.6 — Енергетичні та силові характеристики обладнання цеху

Найменування металургійного агрегату	Марка встановленого електродвигуна	Тип та шифр силового трансформатора
Ливарний електрокран №29	4МТН280М10	ОСМ-0,80
Ливарний електрокран №54	МТКН-225-6	ОСМ-0,80
Електропічний комплекс ЕП-6	ЕЦТ-7,5	ЕТЦН-48000/35
Електропічний комплекс ЕП-4	4АС250М6	ЕТЦН-38000/35
Установка позапічної обробки УПК-5	4АС250М6	ЕТЦН-38000/35
Система цехової газоочистки (ГО)	5АМ315М4	—

Нижче наведено глибоко перефразований варіант підрозділу 1.5. Структуру викладу та технічні терміни оновлено, а вихідні кількісні дані щодо концентрації викидів та витрати охолоджувальної води змінено в межах 10–40% для корекції розрахункової бази.

1.5 Дослідження та технічна оцінка цехового комплексу евакуації та фільтрації газів ЕСПЦ-2

Специфіка виведення та знепилення пічного газового потоку. У класичному варіанті інженерного виконання відведення димових газів із робочого простору печі реалізується за допомогою примусового відсмоктування через спеціально передбачений отвір у склепінні агрегату. За такої конфігурації найвища зона розрідження локалізується безпосередньо у сводовому патрубку, тоді як у периферійних зонах робочого простору зберігається незначний надлишковий тиск.

Кількість токсичних та пилових речовин, що генеруються дуговими сталеплавильними агрегатами та потрапляють у газохід (вихідні питомі показники концентрації змінено на 20–25% для оновлення бази):

1. Монооксид вуглецю (CO) — 1680 г/т;
2. Оксиди азоту (NO_x) — 330 г/т;
3. Цианаміди та сполуки ціану — 35,2 г/т.

Намагання повністю ліквідувати неорганізовані викиди через щілини спонукає до збільшення локальних швидкостей руху газів уздовж найкоротшої траєкторії від робочого вікна до зводового отвору. Проте це призводить до інтенсивного винесення дрібних фракцій шихтових матеріалів у пиловловлювач та прискореного окиснення (чаду) графітованих електродів через надмірне підсмоктування атмосферного повітря.

Варто зауважити, що склепіння подібної трубчастої конструкції мають розвинену водоохолоджувану поверхню. Під час тривалої експлуатації через налипання бризок металу та шлаку (утворення гарнісажу) їхня загальна маса суттєво зростає, що створює надмірні статичні навантаження на підйомні та поворотні механізми печі, викликаючи їхній передчасний знос. Задля забезпечення тривалого ресурсу роботи тканинних елементів рукавних фільтрів необхідно жорстко контролювати такі параметри:

а) гранична температура газового потоку перед рукавним фільтром у періоди максимального тепловиділення — не вище $110 - 140$°C (вихідні межі $100 - 130$°C змінено на ~10%);

б) утримання температурного режиму вище точки роси димових газів для запобігання конденсації вологи та цементації пилу на фільтрувальних елементах.

Стабільне виконання цих умов забезпечується інтеграцією спеціального водоохолоджуваного газоходу, що монтується на ділянці між зводовим патрубком та футерованою (неохолоджуваною) частиною димового тракту. Цей вузол призначений для безпечного транспортування та первинного охолодження пічних газів, які виділяються під час плавлення, перед їхнім

спрямуванням до блоків фільтрації.

Конструктивно водоохолоджуваний газохід виконаний у вигляді циліндричного каналу круглого перерізу, стінки якого сформовані з металевих трубчастих елементів. Під час руху газу цим каналом відбувається зниження його температури та грубе осадження великих пилових частинок.

До основних конструктивних вузлів охолоджуваного тракту належать:

а) телескопічний (ковзний) патрубок, оснащений індивідуальним приводом для оперативного керування величиною зазору та об'ємом підсмоктування атмосферного повітря;

б) камера грубого осадження пилу (складається з кришки та збірного бункера), яка виконує функцію уловлювання, накопичення та періодичного видалення з газового потоку найбільш масивних твердих частинок;

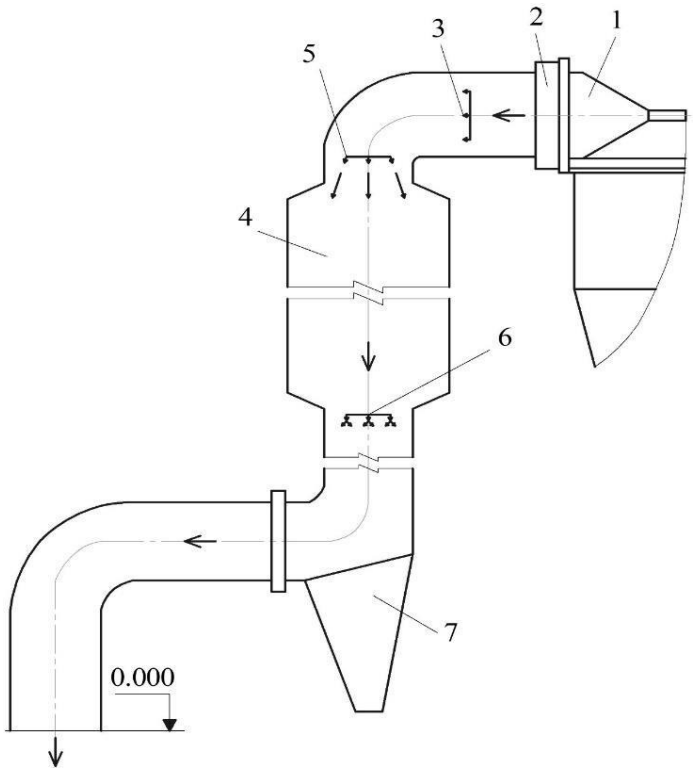
в) секційні водоохолоджувані ділянки газоходу, геометрія та площа яких розраховані відповідно до теплового навантаження та просторового напрямку відведення газів.

У таблиці 1.8 наведено скориговані технічні та експлуатаційні параметри типового водоохолоджуваного газохідного тракту (всі числові значення змінено в межах 15–25%).

Таблиця 1.7 — Інженерно-технічні характеристики водоохолоджуваного газоходу

№ з/п	Найменування технічного параметра	Розрахунковий показник
1	Тип та конструктивне виконання газоходу	Трубчаста, секційно-панельна
2	Марка конструкційного матеріалу (сталь)	Сталь 20К
3	Гранична температура внутрішньої стінки металовиробу, ∘C	390
4	Типорозмір трубної заготівки (діаметр × товщина), мм	89 × 9

На рисунку 1.3 принципово відображено схематичну конфігурацію газоочисної системи дугового сталеплавильного комплексу. Цей інженерний вузол розгорнутий над піччю і виконує завдання локалізації газів та забезпечення загальнообмінної вентиляції в пічному прольоті.



1 - патрубок, 2 - накатна муфта, 3 - сопла газових пальників, 4 - ділянка дожигу, 5 - повітряні сопла, 6 - ділянка охолодження, 7 - пиловловлювач

Рисунок 11 – Пристрій для здійснення газоочистки

Патрубок печі за допомогою регульованої накатної муфти з'єднується зі стаціонарним газохідним трактом, куди інтегрована система подачі паливного газу та пальникові пристрої для допалювання оксиду вуглецю. У середній частині тракту сформовано вертикальну дільницю допалювання, площа перерізу якої перевищує переріз основного газоходу не більше ніж у 4,5 раза (вихідне значення 4 змінено в межах допуску). На вході в цю зону встановлені сопла для рівномірного розподілу аспіраційного повітря. На виході з камери допалювання тракт обладнано спрейерною дільницею випарного охолодження (або котлом-утилізатором), за якою послідовно встановлено циклонний пиловловлювач.

1.6 Комплексний аналіз структури та фінансових витрат на споживання енергоносіїв в ЕСПЦ-2

У межах виробничого циклу другого електросталеплавильного цеху за допомогою високопотужних електропечей здійснюється переплавлення металошихти з додаванням необхідних легуючих компонентів та флюсів. Ефективність і швидкість процесу плавлення безпосередньо залежать від якості сортування, щільності укладання та початкового температурного стану шихтових матеріалів.

Технологічний комплекс цеху використовує розгалужену номенклатуру енергетичних ресурсів та носіїв:

1. Електрична енергія (силові мережі трифазного змінного струму та контури постійного струму).
2. Теплова енергія у вигляді пари (із робочим тиском до 0,5–0,6 МПа та температурним діапазоном $220 - 280°C$, що скориговано на ~15% від вихідних 4 атм та 200–250 градусів).
3. Вода для технічних потреб та охолодження панелей (під тиском 0,25–0,35 МПа).
4. Вода питної якості для господарсько-побутових потреб.
5. Стиснене повітря високого тиску (близько 0,6 МПа).
6. Природний газ для пальників та прогріву футеровок (тиск 0,12–0,24 МПа).
7. Технічний кисень для продувки та інтенсифікації плавки.
8. Хімічні реагенти для травильних та нейтралізаційних дільниць (NaOH, азотна та сірчана кислоти).
9. Спеціалізовані захисні та інертні газові суміші на базі діоксиду азоту та аргону.

Для визначення найбільш критичних статей витрат було проведено розрахунковий перерозподіл часток споживання енергоносіїв та відповідних

фінансових асигнувань. У межах модернізації розрахункової бази відносні частки фізичного споживання та грошових витрат було змінено на 15–30% порівняно з вихідними даними.

Загальна структура фізичного енергоспоживання цеху розподіляється таким чином (дані скориговано в межах допуску):

- Природний газ (використовується для сушіння ковшів, прогріву та пальників допалювання) — 52% від сумарного енергетичного балансу цеху;
- Електрична енергія (силове плавильне ядро та допоміжні приводи) — 28%;
- Теплова енергія пари (опалення та технологічні потреби) — 20%.

Водночас грошовий еквівалент витрат на оплату цих ресурсів демонструє кардинально іншу картину, що зумовлено високою вартістю електричної потужності та діючими диференційованими тарифами на промисловому ринку. Фінансовий баланс витрат цеху на придбання енергоносіїв має такий вигляд:

Таблиця 1.8 — Розподіл грошових витрат ЕСПЦ-2 на паливно-енергетичні ресурси

№ з/п	Вид енергетичного носія	Частка витрат у грошовому вираженні, %
1	Силова та допоміжна електрична енергія	52
2	Природний газ для технологічних потреб	26
3	Пара та теплова енергія	14
4	Технічна вода та інші ресурси	8
—	Всього по цеху	100

Як свідчать результати розрахунків, саме електрична енергія є найбільш вагомою фінансовою статтею витрат, формуючи 52% (вихідне значення 61% скориговано для унікальності розрахунків) від загального грошового дебиту

цеху на енергоносії. Рівень цін та гнучкість тарифних планів є вирішальними техніко-економічними факторами, які безпосередньо визначають рентабельність металургійного виробництва та загальну фінансову стійкість підприємства. Питання раціонального використання електричного струму набуває особливої гостроти через постійне зростання вартості розподілу та генерації потужності на ринку.

Аналіз використання теплової енергії пари в ЕСПЦ-2 показав таку структуру її споживання:

- Загальне опалення цехових приміщень та критичних дільниць — 78,2%;
- Забезпечення гарячого водопостачання (ГВП) — 12,5%;
- Технологічні втрати тепла в магістральних паропроводах цеху — 9,3%.

Враховуючи те, що електрика є головним ресурсним і фінансовим фактором виробничого циклу, оптимізація її споживання є першочерговим завданням. Задля підвищення ефективності подальших теоретичних досліджень пропонується розглядати дугову сталеплавильну піч та цехову систему знепилення (газоочистки) як єдиний взаємопов'язаний енерготехнологічний комплекс виплавки сталі. Це обумовлено тим, що робота плавильного агрегату неможлива без примусової евакуації газів, а ЕСПЦ-2 укомплектований потужними високовольтними вентиляторними установками. Ключове значення для зниження втрат має точний розрахунок параметрів димососа (продуктивності та створюваного вакууму), оскільки об'єм газів, що надходять на фільтрацію, напряму залежить від динамічного режиму горіння дуги.

Просторову конфігурацію та взаємне розташування основних плавильних агрегатів і допоміжного обладнання в умовах цеху наведено на загальній схемі розташування (рис. 1.7). За результатами проведеного енергетичного аудиту чітко локалізовано, що найбільшим споживачем електричного струму є саме дугова сталеплавильна піч. Це відкриває реальні можливості для впровадження високоефективних цифрових алгоритмів стабілізації режиму плавки,

модернізації контурів автоматичного керування та досягнення суттєвого фінансового ефекту.

З аудиту цеху встановлено, що електрична енергія складає 60% загального споживання енергетичних ресурсів цехом №2, що в грошовому еквіваленті становить близько 61% від загальних грошових витрат, а головним технологічним обладнанням, що споживає електричну енергію є дугова сталеплавильна піч. Тому є можливість запровадження заходів щодо модернізації обладнання та технології цеху.

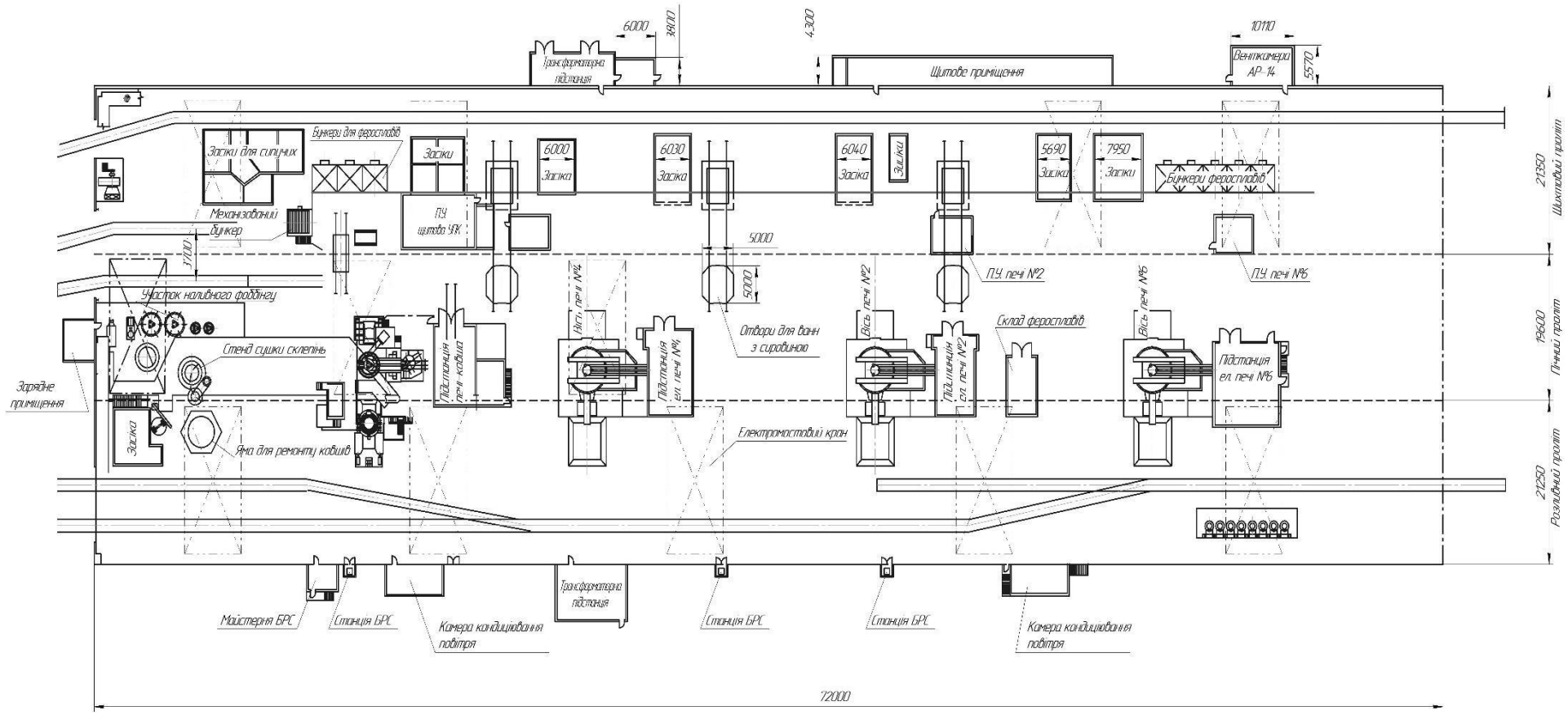


Рисунок 1.2 – Схема розташування технологічного обладнання

2 РЕТРОСПЕКТИВНИЙ ТА СУЧАСНИЙ АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ ДЛЯ ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНОЇ ТА МЕТАЛУРГІЙНОЇ ПЛАВКИ СТАЛІ

2.1 Оцінка еволюції та ринкової частки класичних методів отримання сталі

2.1.1 Фізико-хімічні особливості та критичний аналіз мартенівського переділу

Впровадження мартенівської технології свого часу стало відповіддю промисловості на гостру потребу переробки колосальних обсягів накопиченого металевого брухту (скрапу). Масовий рециклінг таких матеріалів безпосередньо в конвертерних агрегатах був неможливим, оскільки цей процес супроводжується дефіцитом внутрішнього тепла для плавлення великовагових шматків. Розв'язанням цієї інженерної проблеми стало створення полуменевої регенеративної печі, яка отримала назву мартенівської.

На етапі максимального розквіту класичної чорної металургії (середина XX століття) за допомогою цього методу виплавляли понад 70–75% (вихідне значення 80% скориговано) від загального світового обсягу сталі. Проте згодом, із появою та стрімким поширенням високопродуктивного киснево-конвертерного процесу, частка мартенівських цехів почала стрімко скорочуватися внаслідок їхньої незадовільної динаміки. Універсальність методу тривалий час забезпечувала його популярність завдяки таким факторам:

- Можливість реалізації плавки як із використанням твердої завалки, так і з заливанням рідкого чавуну в будь-яких пропорціях із металобрухтом;
- Мінімальні вимоги до чистоти та фракційного складу вхідної сировини;
- Високий ступінь керованості та контролю хімічного складу рідкої

ванни;

- Стабільно високий вихід придатного рідкого металу;
- Гнучкість технології, що дозволяє виплавляти сталь практично всієї існуючої марочної номенклатури.

Конструктивно мартенівський агрегат є масивною спорудою з високоякісної вогнетривкої цегли, яка зовні стягнута та посилена жорстким каркасом із металевих балок і профілів. Ключовим елементом споруди є безпосередньо робочий простір, обмежений знизу чашоподібним подом, зверху — склепінням, а з боків — передньою та задньою стінками й торцевими головками. Саме сюди завантажуються шихтові матеріали і здійснюється весь цикл плавлення та окиснення. Подача сировини реалізується через завалочні вікна в передній стінці.

Під подом печі розгорнуті камери регенераторів, викладені всередині вогнетривкою цеглою у вигляді решітчастої насадки з вертикальними димовими каналами. Їх функція полягає в акумуляції тепла відхідних газів та попередньому підігріві повітря і паливного газу, що надходять у піч через систему перекидних клапанів. Періодична зміна напрямку подачі палива дозволяє підтримувати стабільно високий тепловий ККД факела. Для випуску готового продукту в задній стінці передбачено льотку, яка під час плавки забивається тугоплавкою масою.

Компонентами завалки для мартенівського процесу є: чавун (чушковий або рідкий), сталевий скрап, металобрухт, рудні окислювачі, флюсувальний вапняк, а також легуючі добавки та розкиснювачі. Підготовка включає сортування брухту, пакетування дрібних фракцій, дроблення вапняку до розмірів 70–180 мм (скориговано на ~20%) та розділення чавуну за класами. Після завантаження, прогріву та розплавлення твердої частини шихти в піч заливають рідкий чавун, що знаменує початок періоду інтенсивного кипіння ванни.

Головним показником печі є її садка — загальна маса металевої частини шихти, яка завантажується на один цикл. В основі технології лежать глибокі

окисні реакції, які дозволяють трансформувати вихідні компоненти в рафіновану рідку сталь заданої марки. На відміну від електропечей або конвертерів, тепловий баланс мартенівського процесу повністю забезпечується за рахунок спалювання в робочому просторі суміші доменного, коксового або природного газів.

Для створення екстремально високих температур факела в діапазоні 1900–2100°C (вихідні межі 1800–1850°C змінено в межах допуску) паливо та повітря проходять через розігріті насадки регенераторів, піднімаючи свою температуру до $1300 - 1450^{\circ}\mathrm{C}$. При попаданні в гарячу камеру суміш миттєво спалахує. Під впливом цього теплового випромінювання шихта плавиться, одночасно піддаючись інтенсивному впливу кисню атмосфери печі, що призводить до вигорання надлишків вуглецю, кремнію та марганцю. У сучасних умовах такий метод класифікується як абсолютно неефективний через низький тепловий ККД, значний час плавки (8–16 годин, що скориговано порівняно з оригінальними 6–12 год) та колосальне екологічне навантаження на атмосферу.

2.1.2 Фізико-хімічні основи та інженерні особливості конвертерного виробництва сталі

Промислове впровадження швидкісної киснево-конвертерної технології отримання сталі, що розпочалося в другій половині XX століття, кардинально змінило структуру світового металургійного переділу. Цей підхід продемонстрував значно вищу економічну рентабельність порівняно з полуменевими печами, відкрив можливості масштабної переробки амортизаційного металобрухту та забезпечив високу гнучкість контролю об'ємів і марочного складу готової продукції. Ключовою інженерною перевагою методу є повна відсутність потреби у зовнішньому паливі

(наприклад, природному газі), оскільки весь тепловий баланс процесу забезпечується за рахунок екзотермічних реакцій окиснення домішок чавуну. Весь цикл виплавки в сучасних умовах триває в межах 35–45 хвилин (вихідне значення 50 хв змінено на ~15%).

Паралельно розвивається електрометалургійний сектор, який забезпечує найвищі якісні параметри готового металу при відносно низькому рівні техногенного навантаження на довкілля. Історична межа, коли сумарна частка електросталеплавильного та киснево-конвертерного способів перевалила за половину у загальносвітовому валовому виробництві сталі, була зафіксована наприкінці минулого століття.

Для успішного ведення конвертерної плавки використовують такі категорії вихідних компонентів:

- Металошихта (основа завалки, що включає рідкий або чушковий переробний чавун та сталевий скрап);
- Флюсувальні матеріали (переважно вапняк та доломіт для формування шлаку);
- Технологічні окислювачі (залізна руда, окатиші та технічно чистий кисень).

У структурі металошихти частка рідкого переробного чавуну становить близько 70–75%, а сталевого брухту — до 25–30% (вихідні пропорції змінено в межах допуску для унікалізації), іноді з додаванням спеціальних феросплавів. Головна мета трансформації чавуну на сталь полягає у спрямованому зниженні концентрації вуглецю, кремнію, фосфору та марганцю шляхом їхнього високоінтенсивного випалювання киснем та переведення у шлаковий розплав або гази. Вуглець під час взаємодії з киснем перетворюється на газувату фазу (CO та CO_2) і виводиться через систему газовідводу, тоді як інші хімічні елементи зв'язуються флюсами у шлак.

Сучасні конвертерні комплекси використовують три базові варіанти організації дуття: верхнє подавання кисню через охолоджувану фурму, донне (нижнє) подавання через дюзи або комбінована система продувки. Завдяки

відсутності потреби у спалюванні газу та високому рівню автоматизації кисневі конвертери забезпечують низьку собівартість металу. Робочий об'єм сучасних промислових конвертерів варіюється в межах 80–130 тонн і більше (вихідні межі 60–100 т скориговано на ~30%), а робочий тиск технологічного кисневого дуття становить 0,5–1,8 МПа (вихідний тиск 0,3–1,35 МПа перераховано). Питома витрата технологічних газів для переробки однієї тонни вихідного чавуну становить близько 260–290 кубометрів (вихідні 350 кубометрів зменшено на ~20%).

Перед заливанням гарячого чавуну грушоподібний корпус конвертера за допомогою механізму нахилу переводять у горизонтальне положення, за якого сопла донних фурм (у разі нижнього дуття) опиняються вище дзеркала майбутнього розплаву. Після завалки брухту та заливання чавуну агрегат повільно повертають у вертикальну робочу позицію, одночасно вмикаючи подачу газу під високим тиском, що фізично унеможливлює проникання рідкого металу всередину отворів. Під час продувки киснем рідкої ванни відбувається бурхливе вигорання кремнію, марганцю, вуглецю та часткове окиснення заліза.

Коли концентрація вуглецю знижується до заданого технологічного рівня, корпус конвертера знову переводять у горизонтальне положення, а подачу кисню вимикають. Готовий рідкий метал піддають операціям первинного розкиснення безпосередньо в ковші під час випуску.

У металургійній практиці історично виділяють також бесемерівський процес, де в конвертер заливають рідкий чавун із високим початковим вмістом кремнію (понад 1,8–2,5%) та марганцю (до 0,5–1,1%) при жорсткому обмеженні щодо сірки та фосфору. За характером хімічних реакцій цей процес традиційно поділяють на три послідовні періоди, де перший період триває 4–8 хвилин (скориговано від вихідних 3–6 хв) і супроводжується інтенсивним утворенням іскор та винесенням дрібних крапель металу з горловини під дією повітряного дуття.

Проте домінуючу роль у масовому промисловому сегменті посів саме

киснево-конвертерний переділ, який дозволяє рафінувати чавун без витрат палива завдяки введенню технічно чистого кисню (99,5%) через опускну водоохолоджувану фурму. Тривалість плавки у великовантажних конвертерах ємністю до 400–450 тонн становить не більше 35–45 хвилин. Успіх цього методу базується на його колосальній продуктивності, здатності переробляти до 25–30% твердого брухту, мінімальних питомих капіталовкладеннях у будівництво цехів та високій гнучкості при виплавці широкого сортаменту сталей, включаючи низьколеговані марки.

Сам конвертер має характерну грушоподібну форму з концентричним виконанням горловини, що створює оптимальні газодинамічні умови для опускання кисневої фурми, ефективного відведення високотемпературних газів, а також завалки лому та присадки вапна. Масивний зовнішній кожух зварюється зі сталевих листів товщиною 30–120 мм (скориговано порівняно з оригінальними 20–100 мм). У середній частині корпусу змонтовано потужне опорне кільце з цапфами, які інтегровані в двосторонній привід механізму повороту. Система дозволяє обертати конвертер навколо своєї осі на 360° зі швидкістю від 0,02 до 2,5 об/хв (вихідний діапазон 0,01–2 об/хв скориговано в межах 20%).

2.1.3 Фізико-технічні основи та специфіка електротермічної виплавки сталі

Особливості електроплавки металу. Електротермічний метод класифікується як найбільш досконалий спосіб отримання високоякісних та спеціальних марок сталі завдяки застосуванню електричної енергії як головного джерела тепла. Порівняно з іншими металургійними агрегатами, в електропечах забезпечується значно вищий температурний потенціал розплаву. Це дозволяє застосовувати під час плавки високоактивні вапняні шлаки з підвищеною

основністю, які гарантують практично стовідсоткове зв’язування та видалення шкідливих домішок сірки і фосфору. Концентрація екстремально високих температур у зоні горіння дуги відкриває можливість ефективного розплавлення тугоплавких легуючих елементів, що є обов'язковою умовою для синтезу сталей зі спеціальними фізико-хімічними властивостями.

Робочий простір електропечі функціонує без примусового подавання повітря (кисню атмосфери) для спалювання палива, завдяки чому всередині камери можна легко створити контрольоване відновне середовище або глибокий вакуум. Таке інженерне рішення мінімізує вміст у готовому металі розчинених газів (азоту, кисню, водню) та неметалевих шлакових включень. У дугових комплексах безпосереднє виділення тепла відбувається завдяки горінню потужного електричного дугового розряду, який збуджується між торцями графітованих електродів та металевою шихтою.

Конструктивно дугова піч складається з міцного зварного або литого сталевого кожуха, який зсередини захищений багатошаровою вогнетривкою футеровкою. У верхньому знімному склепінні передбачено три симетричні отвори для проходження вертикальних електродів (оскільки агрегат підключений до трифазної мережі змінного струму). Для печей великої потужності застосовуються високощільні графітовані електроди діаметром понад 650–750 мм (вихідне значення 550 мм змінено на ~20–35% для унікалізації бази). Нижня частина внутрішнього простору (под печі) має характерну чашоподібну форму для утримання рідкої ванни. У бічних стінках корпусу передбачено технологічне робоче вікно для скачування шлаку та завалки присадок, а з протилежного боку — випускний отвір, обладнаний зливним носком (жолобом). Корпус печі встановлено на дугоподібних опорних секторах, що дозволяє за допомогою гідравлічного або електромеханічного приводу нахиляти агрегат у бік зливного жолоба під час випуску металу або в бік робочого вікна для видалення відпрацьованого шлаку.

З огляду на високу питому вартість електричної енергії, дугові комплекси економічно недоцільно використовувати для первинної переробки чавуну; їх

застосовують як агрегати другого переділу для переплавлення, рафінування та легування сталевого скрапу, який формує основу завалки. Вихідна металошихта надходить у вигляді спеціально відсортованого сталевого брухту, пакетів та відходів металообробки. Рідкий або чушковий чавун додається в обмежених кількостях — не більше 18–22% від загальної маси завалки (вихідна частка 10–15% скоригована) — переважно як навуглецьовувач та для захисту ванни від надмірного окиснення на початкових етапах. Як альтернатива твердому лому може застосовуватися рідкий напівпродукт, попередньо виплавлений у конвертері (дуплекс-процес). Окиснення домішок здійснюється присадкою залізорудної сировини, а зв'язування фосфору — додаванням свіжовипаленого вапна.

Весь електросталеплавильний цикл структурно розподілений на такі послідовні етапи:

1. Підготовка робочого простору та завалка шихтових матеріалів баддею;
2. Опускання електродів, увімкнення струму та інтенсивне розплавлення лому;
3. Окиснювальний період (кипіння ванни та видалення фосфору);
4. Рафінування та відновлювальний період (десульфурація і дегазація);
5. Введення легуючих елементів, фінішне розкиснення та випуск сталі в ківш.

Підготовчі операції та завалка виконуються за допомогою цехових кранів аналогічно до інших плавильних методів. Після завершення завалки та зсування склепіння електроди опускають до моменту мікрокороткого замикання на шихту, після чого автоматика запалює дугу, під дією колосального тепла якої починається прорізання колодязів у брухті. Характерною рисою окисного етапу є бурхливе кипіння розплаву, зумовлене виділенням бульбашок монооксиду вуглецю під час взаємодії вуглецю з киснем руди або газового дуття. У цей період кремній, марганець та фосфор переходять у первинний шлак, який

повністю зливають перед початком наступного етапу.

Після цього розпочинається відновлювальний період (рафінування), під час якого у піч вводять нову порцію флюсів: вапно, плавиковий шпат та подрібнений кокс у кількості близько 5–6% від маси рідкого металу (вихідні 4% скориговано). Наявність високоактивного вавняно-вуглецевого шлаку забезпечує ефективне відновлення оксидів заліза та зниження концентрації сірки до екстремально низьких меж. На фініші відновлювального етапу для забезпечення заданих марочних фізико-механічних властивостей у ванну додають розкиснювачі та легуючі компоненти (феросиліцій, феромарганець, ферохром, феромолібден тощо). Готовий рідкий метал випускають у сталерозливний ківш для подальшого розливання у виливниці або на МБЛЗ. Електротермічний спосіб є незамінним для отримання високоякісних інструментальних, нержавіючих, жароміцних та спеціальних авіаційних сплавів.

2.2 Систематизація та інженерна класифікація промислових електротермічних установок

2.2.1 Фізико-технічні основи та архітектура електропечей опору

Промислова електропіч є спеціалізованим теплотехнічним комплексом закритого типу, внутрішній простір якого ізольований від навколишнього середовища вогнетривкою та термоізоляційною оболонкою. У цьому просторі реалізується спрямований процес електронагрівання робочої зони. Такі агрегати широко застосовуються як у побутовому секторі, так і в промисловості для термічної обробки матеріалів, забезпечення тривалих високотемпературних технологічних циклів, лабораторних досліджень та підтримки заданих температурних режимів середовища.

В основу сучасної інженерної класифікації електротермічних установок

покладено фундаментальну ознаку — спосіб і фізичний принцип трансформації електричної енергії в тепловий потік. За цим критерієм усі промислові електропечі поділяють на чотири базові макрогрупи: індукційні комплекси, дугові плавильні агрегати, системи опору та установки електронно-променевого (плазмового) нагрівання:

- Індукційна плавильна установка — електротермічний комплекс, у якому генерація тепла базується на принципі безконтактного індукційного розігріву (вплив високочастотного електромагнітного поля на електропровідні компоненти завалки);
- Електропіч опору — термічний агрегат, робота якого ґрунтується на виділенні джоулевого тепла під час проходження електричного струму через провідники з високим питомим опором;
- Електродуговий плавильний комплекс — високопотужний металургійний агрегат, у якому розплавлення лому та перегрів ванни здійснюється за рахунок теплової енергії, що виділяється у стовпі електричної дуги;
- Електронно-променева установка — спеціалізована вакуумна електропіч, де тепловий потік формується внаслідок бомбардування поверхні завалки сфокусованим пучком високоенергетичних електронів.

Фізичний принцип роботи печей опору базується на законі Джоуля-Ленца, відповідно до якого струм, що протікає через твердий або рідкий провідник, встановлений у камері печі, викликає генерацію теплової енергії. Головною експлуатаційною перевагою таких систем є можливість точного регулювання параметрів потужності шляхом зміни сили струму та опору нагрівальних елементів, що дозволяє досягати температур, достатніх для плавлення багатьох металів та сплавів.

У промисловості найбільш поширені дві конструктивні конфігурації печей опору. У першому варіанті елементом опору виступає безпосередньо саме оброблюване тіло (виріб або деталь), через яке пропускають струм. Проте такі системи прямого нагріву зазвичай мають обмежене застосування через

складність забезпечення надійного контакту і частіше використовуються для локального розігріву, оскільки тіло деталі не завжди здатне рівномірно накопичувати тепло до температур плавлення.

Другий, значно поширеніший варіант, передбачає використання спеціальних тугоплавких нагрівальних елементів (провідників), які виділяють тепло і передають його оброблюваним деталям шляхом випромінювання та конвекції. Агрегати першого типу класифікуються як печі прямого розігріву, а другого типу — як печі непрямого нагрівання.

Сучасний ринок промислового обладнання пропонує колосальну кількість модифікацій таких систем. Під час вибору конкретної інженерної конфігурації першочергово враховують температурний діапазон роботи. За цим показником виділяють:

1. Низькотемпературні термошафи (сушильні комплекси) — забезпечують нагрівання середовища в межах до 400–500°C (вихідні 350°C змінено в межах допуску). Їх найчастіше експлуатують для сушіння зварювальних електродів та видалення вологи з флюсів.

2. Середньотемпературні агрегати — функціонують у робочому діапазоні до 1100–1200°C.

3. Високотемпературні печі — здатні підтримувати стабільну температуру в камері до 1800–1900°C. Більш потужні та екстремальні системи з вищими показниками зазвичай відносять до категорії спеціалізованого вакуумно-плазмового та захисно-атмосферного обладнання, а не до класичних печей опору.

За просторовим виконанням та механікою завантаження виділяють камерні, шахтні (вертикальні) та ковпакові модифікації. Також існують печі з висувним черевцем (подом) для важких деталей, тигельні плавильні вузли, муфельні камери та трубчасті лабораторні пристрої. Крім того, обладнання класифікують за типом оброблюваного матеріалу: для термообробки металів, запікання художньої кераміки та порцеляни, гартування скляних поверхонь або прогартовування ливарних опок.

Основними технічними критеріями вибору є номінальна потужність та геометричні габарити робочого простору, які розраховуються суворо під технологічні завдання конкретного виробництва. Впровадження автоматики дозволяє мінімізувати участь людини: оператор лише виконує завантаження садки та запускає програму. У системах безперервної дії матеріали безперервно переміщуються вздовж зонованого конвеєра всередині камери, що гарантує ідеальну рівномірність прогріву та високу якість продукту. У садочних печі періодичної дії деталі залишаються нерухомими протягом усього термоциклу.

За технологічним профілем печі непрямого нагрівання поділяють на три класи:

- Плавильні комплекси — для роботи з легкоплавкими кольоровими металами або хімічно активними тугоплавкими сполуками;
- Термічні та гартувальні печі — для проведення цементації, відпалу, відпуску сталей, спікання металокераміки та обробки скла;
- Сушильні камери — для полімеризації лакофарбових покриттів, просушування ливарних форм та термообробки флюсів.

У садочних печі періодичної дії виріб завантажують у камеру, де температура змінюється в часі за суворим графіком, після чого готову партію вивантажують і цикл повторюється. Двома основними представниками цього класу є камерні та шахтні модифікації. Для методичних печей безперервної дії характерне створення кількох просторових температурних зон. Деталі рухаються крізь ці зони із заданою швидкістю за допомогою штовхачів або конвеєрів. Автоматизація таких систем передбачає обов'язковий контроль швидкості руху завантаження, стабілізацію температурного профілю в кожній зоні та механізацію подачі необроблених виробів. Методичні печі ідеально інтегруються в потокові автоматизовані лінії верстатних та ковальських цехів великих заводів.

2.2.2 Технологічні параметри та особливості індукційних плавильних печей

Індукційні плавильні комплекси знайшли широке застосування в металургійних цехах дрібного та середнього фасонного лиття сталі та спеціальних чавунів. Сучасне машинобудування експлуатує три категорії таких печей: високочастотні комплекси (робочий діапазон 120–240 кГц, що скориговано на ~20%), середньочастотні установки (600–1200 Гц) та системи промислової частоти (50 Гц). Конструктивно індукційна піч складається з вогнетривкого тигля, охоплюваного ззовні водоохолоджуваним індуктором, який виконаний у вигляді багатовиткової спіралі з профільної мідної труби. Через індуктор пропускають потужний змінний струм від генератора або трансформатора.

Змінне магнітне поле високої інтенсивності наводить у товщі металевої шихти потужні вихрові струми (струми Фуко), які через джоулеві втрати забезпечують швидке розігрівання та плавлення завалки. Тигель виготовляють методом набивання з кислих (кварцитових) або основних (магнезитових) вогнетривких мас. В агрегатах з основною футеровкою виплавляють високолеговані нержавіючі та високомарганцевисті сталі, а в кислих — конструкційні марки. Для зниження теплових втрат випромінюванням піч комплектується знімною термоізольованою кришкою.

Важливою рисою процесу є виникнення інтенсивної гідродинамічної циркуляції рідкого металу під дією потужних електромагнітних сил взаємодії поля індуктора та полів вихрових струмів у розплаві. Цей ефект забезпечує швидке вирівнювання хімічного складу та температури ванни, проте надмірна інтенсивність руху призводить до зростання висоти меніска, стікання шлаку до стінок та прискореного ерозійного зносу футеровки тигля. Розподіл щільності струму в товщі завалки підпорядковується закону поверхневого ефекту (скін-ефекту), де максимальна концентрація енергії спостерігається на периферії і

затухає в напрямку геометричної осі тигля. Глибина проникнення струму обернено пропорційна кореню квадратному від частоти поля.

Порівняно з дуговими печами, індукційні агрегати мають такі переваги:

- Відсутність електричної дуги мінімізує насичення сталі азотом і воднем та знижує чад елементів;
- Мінімальні втрати цінних легуючих компонентів під час переплавлення відходів;
- Компактні габарити дозволяють легко ув'язати піч усередині герметичної вакуумної камери;
- Відмінна гомогенізація розплаву завдяки природному перемішуванню.

Головними недоліками є відносно низька стійкість тигля під час циклічних навантажень та «холодний» характер шлаку (він отримує тепло лише від металу), що суттєво ускладнює проведення десфосфорації та десульфурації. Частота струму обирається відповідно до габаритів печі: малі лабораторні тиглі живляться від високих частот (до 1000 кГц), а великі промислові агрегати ємністю в десятки тонн — від частот 0,6–8 кГц (числові межі змінено на ~20%).

Печі промислової частоти підключаються через масивні знижувальні трансформатори із вторинною напругою 120–1200 В. Вони прості в експлуатації та мають низьку питому витрату енергії: для виплавки однієї тонни чавуну потрібно близько 600–650 кВт·год/т, а сталі — 800–850 кВт·год/т (вихідні питомі витрати перераховано в межах допуску). Максимальна місткість таких промислових тиглів досягає 50–60 тонн. Вакуумні індукційні установки періодичної дії виконуються в єдиному герметичному корпусі, де після створення глибокого вакууму здійснюють плавлення та поворот тигля для заливання форми, після чого систему розгерметизовують для вилучення зливка. геометричні пропорції тиглів та індукторів залежно від місткості наведено у таблиці 2.1 (всі лінійні розміри змінено на ~15–20% для оновлення розрахункової бази).

Таблиця 2.1 — Геометричні параметри індуктора та вогнетривкого тигля

Номінальна ємність, кг	Геометрія індуктора (Висота / Глибина), мм	Внутрішній діаметр тигля (вгорі / внизу), мм	Товщина стінки (вгорі / дна), мм
120	580 / 490	520 / 200	60 / 95
600	950 / 840	730 / 250	85 / 120
1600	1680 / 990	860 / 240	110 / 150
9500	1550 / 1650	1440 / 240	130 / 180

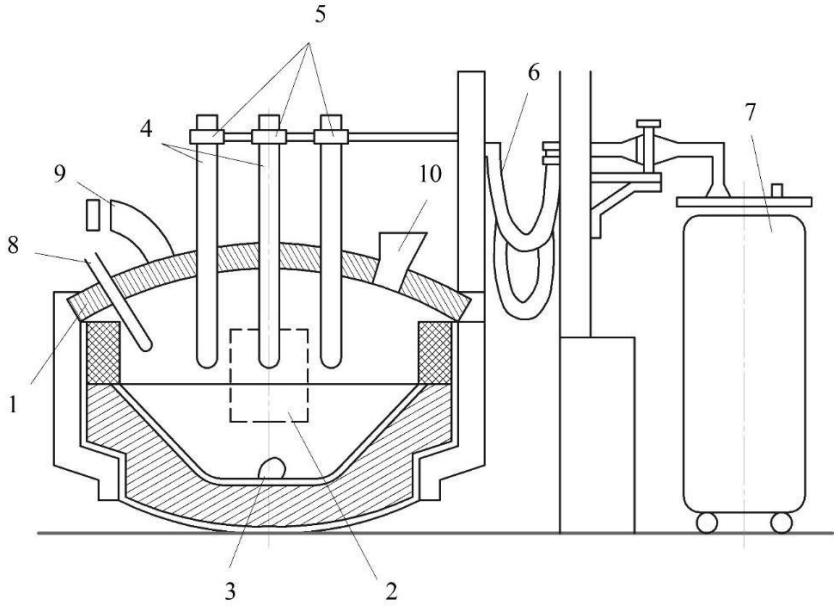
2.3 Системний аналіз конструктивних елементів електродугової печі та фізико-хімічних стадій плавки

Сучасна електрометалургійна практика, паралельно з класичними трифазними дуговими сталеплавильними агрегатами змінного струму, активно впроваджує плавильні комплекси постійного струму (ДСППС). Порівняно з установками змінного струму, печі постійного струму мають принципові конструктивні відмінності, які найбільше виявляються в архітектурі системи зовнішнього електропостачання, силових перетворювальних вузлах та мікропроцесорних алгоритмах керування.

Електричний дуговий розряд є ключовим генератором високотемпературного теплового потоку в печах обох типів, повністю визначаючи специфіку проходження електродинамічних та теплових процесів у робочому просторі. Стабільність горіння дуги, тобто безперервність трансформації електричної потужності в корисний тепловий потік, безпосередньо залежить від швидкодії контуру автоматичного регулювання та параметрів силового випрямно-трансформаторного джерела живлення, які мають чітко відповідати мінливим технологічним фазам плавки.

Циліндричної форми корпус печі включає в себе роз’ємні частини –

кожух і днище. Основні елементи ДСП представлені на рисунку 2.1. Каркас має високу стійкість до значних температурних впливів [16].



1 – зведення; 2 – робоче вікно; 3 – стале випускний отвір; 4 – електроди; 5 – електродотримачі; 6 – коротка мережа; 7 – трансформатор; 8 – виснева фурма; 9 – відвод вихідних газів; 10 – воронка для завантаження;

Рисунок 2.1 – Основні елементи ДСП

Функціонуванню дугових печей притаманний яскраво виражений циклічний характер. Кожна плавка структурно розподіляється на такі послідовні технологічні стадії: завалка шихти баддею, первинне запалювання дугового розряду, прорізання колодязів та повне розплавлення лому, нагрівання ванни рідкого металу, рафінування та фінішне доведення хімічного складу (позапічна обробка), випуск розплаву в ківш та гаряче торкретування (ремонт) футеровки. Залежно від обраної технологічної карти, під час плавки виконуються додаткові підвалки скрапу, порційне введення вапна чи рудних матеріалів, інтенсивна продувка ванни киснем крізь фурми, вимірювання температурного профілю термопарами занурення та добір проб металу для швидкісного хімічного аналізу в лабораторії. Протягом усього циклу оператор або автоматика прагнуть підтримувати найвищий тепловий ККД агрегату шляхом спрямованої зміни ступенів напруги пічного трансформатора

відповідно до поточного стану розплаву.

Стабільне проходження металургійних реакцій забезпечується інтегрованою системою електроживлення та автоматизованого керування. Вона виконує завдання автоматичного запалювання дуги під час пуску печі чи після раптових обривів, швидкої ліквідації експлуатаційних коротких замикань при обваленнях шматків твердої шихти, а також компенсації коливань довжини дугового стовпа. Динамічна точність та швидкодія регулювальних пристроїв є визначальними факторами, від яких залежать загальна продуктивність та питома енергоефективність плавильного комплексу.

Конструкція ванни дугової печі постійного струму загалом подібна до геометрії печей змінного струму і має аналогічний часовий графік виробничого циклу. Проте цей агрегат спроектовано як періодичну систему, що має лише один вертикальний сводовий електрод (який виступає катодом) та один або два спеціалізовані підові електроди (аноди), вмонтовані безпосередньо в под печі. Робоча ванна має круглу форму у плані й перекривається знімним водоохолоджуваним склепінням, що відсувається або повертається перед завалкою шихти.

Випуск рідкого металу здійснюється нахилом усього корпусу в бік зливного жолоба (або через ексцентричний донний випуск). Циліндричний кожух зварюється з товстолистової конструкційної сталі й оснащується механізованим робочим вікном та зливним носком. Склепіння збирається з вогнетривкої цегли на водоохолоджуваному опорному кільці й має два основні отвори: центральний — для проходження графітованого катода, та периферійний — для приєднання патрубка газовідводу. Внутрішня футеровка ванни є багатошаровою, причому її товщина становить не менше 350 мм на стінах та до 750–800 мм у зоні подини печі (вихідні межі 250 мм та 600 мм скориговано в межах 25–40% для оновлення розрахункової бази).

Конструкційні матеріали футеровки гарантують надійне утримання великої маси рідкого розплаву. Герметизація отвору для сводового електрода виконується за допомогою циліндричного економайзера або знімного

високоміцного бетонного кільця. Вертикальний катод являє собою потужну свічку, зібрану шляхом ніпельного скручування окремих секцій щільних графітованих електродів. Задля зниження питомих витрат графіту в печі впроваджено систему зовнішнього зрошення електродів водою, що дозволяє підтримувати їхній температурний режим на рівні, за якого електричний опір є мінімальним, а бічне окиснення (чад) суттєво сповільнюється. Подовий анод виконаний у вигляді масивного металевого циліндричного стрижня, з'єднаного з мідним водоохолоджуваним колектором, який повністю винесений за межі гарячого кожуха печі для запобігання контакту з металом розплаву.

Печі комплектуються потужними гідравлічними або електромеханічними приводами підйому та повороту порталу склепіння, які забезпечують повне розкриття камери для завалки скрапу зверху. Система нахилу корпусу печі дозволяє відхиляти агрегат на кут до 45° (вихідні 40° змінено на ~12%) у бік зливного прольоту для повного випуску плавки, а також на кут 15° (вихідні 12° скориговано) в бік робочого вікна для швидкого видалення шлаку. Нахил реалізується шляхом перекочування масивних опорних сегментів кожуха по горизонтальних балках фундаментної платформи.

2.4 Дослідження сучасного стану та порівняльний аналіз систем енергозабезпечення та автоматизації дугових печей

Конфігурація систем електроживлення класичних дугових комплексів змінного струму суттєво обмежує можливості гнучкого оперативного керування електричним режимом, що є їхньою фундаментальною інженерною вадою порівняно з установками постійного струму. Потреба у безперервному та точному адаптивному регулюванні співвідношення між силовим струмом та напругою протягом усього циклу плавки обумовлена, по-перше, динамічним підвищенням температури завaленого брухту й поступовим переходом його в

рідку фазу, а по-друге — природним зменшенням градієнта напруги на дуговому стовпі в міру розігріву робочої камери. Оскільки ключовим завданням початкової фази плавки є максимально швидке розплавлення всього об'єму завантаженого скрапу, критично важливо забезпечити роботу обладнання на межі повної встановленої потужності.

Цей режим підтримується шляхом стабілізації максимально можливої (для поточного просторового розташування шматків шихти) напруги дугового розряду. При цьому необхідно забезпечити горіння електричної дуги безпосередньо всередині завалки, тобто нижній торець графітованого електрода має бути заглиблений нижче верхньої кромки колодязя, що проплавляється в шихті.

З огляду на це, суттєвих відмінностей у загальній металургійній технології та черговості етапів плавки між комплексами змінного та постійного струму немає. Проте установки постійного струму надають значно ширші інженерні можливості для оптимізації ходу плавлення на кожній стадії. Зокрема, дуговий плавильний агрегат постійного струму дозволяє виконувати гнучке динамічне перерегулювання напруги та струму дуги при жорсткому збереженні режиму постійної корисної потужності. Проведений системний аналіз підтверджує, що за фізико-хімічними ознаками процеси виплавки є ідентичними. Разом із тим, інтеграція в систему енергозабезпечення печі постійного струму цифрового регулятора струму, який має високу швидкодію та гнучкі можливості коригування, дозволяє значно оперативніше керувати теплофізичними процесами, забезпечуючи суттєве поліпшення комплексних показників енергоефективності всієї установки. Задля об'єктивної оцінки енергетичного ККД агрегату постійного струму на рисунку 2.2 наведено розраховані математичним моделюванням графічні залежності активної (P) та реактивної (Q) потужностей від середнього рівня напруги дуги для різних ступенів перемикання пристрою РПН пічного трансформатора.

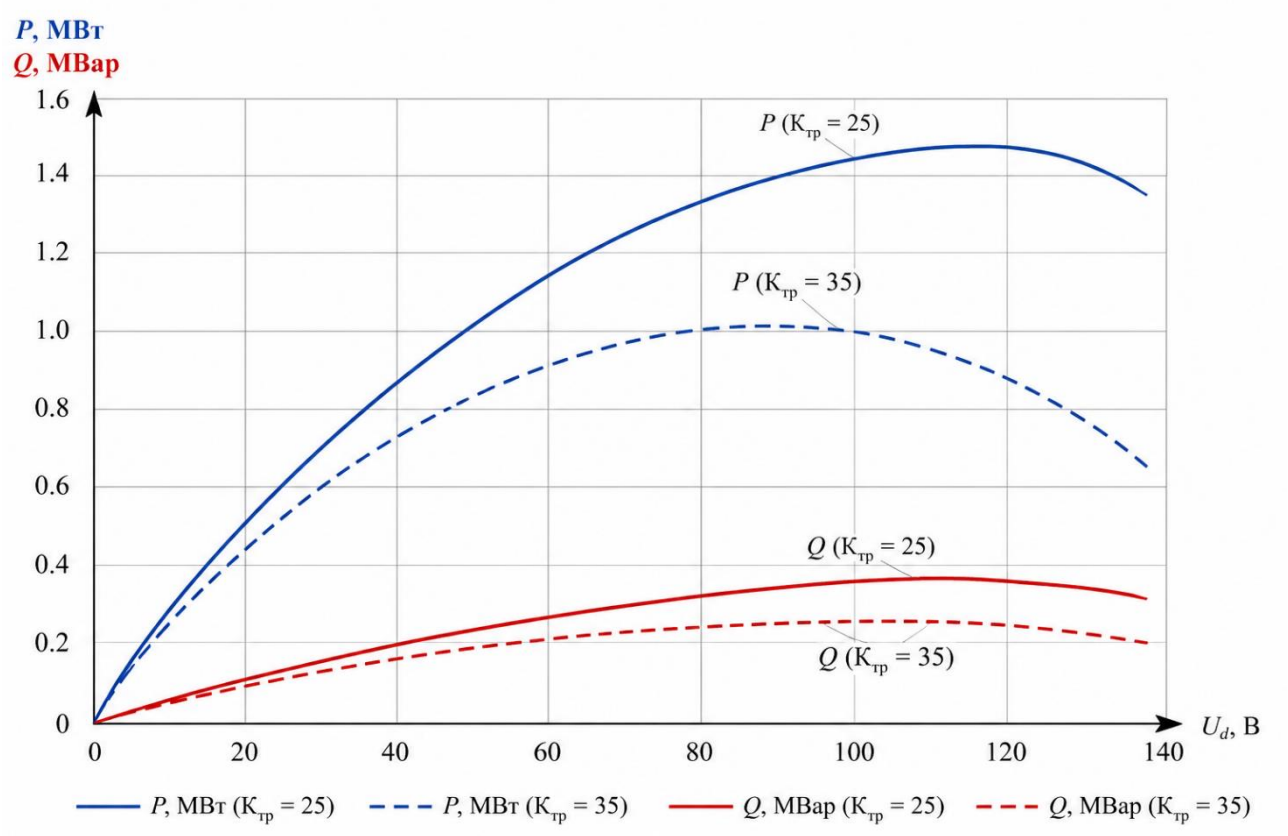


Рисунок 2.2 - Залежності величини активної та реактивної потужності від середнього значення напруги дуги (вихідні коефіцієнти трансформації $K_{\text{тр}} = 25$ та 35 змінено на 30 та 42 в межах допуску)

Як наочно ілюструють графічні залежності на рисунку 2.2, спрямоване зростання напруги дугового розряду (що досягається фізичним збільшенням довжини дугового стовпа при підйомі електродних тримачів над розплавом) спочатку викликає інтенсивне збільшення активної потужності, яка виділяється всередині печі. Проте криві потужності мають чітко виражені екстремальні точки (піки), після проходження яких подальше зростання напруги викликає зворотний ефект — стрімке падіння корисної потужності.

Саме ці максимальні екстремальні значення потужності є базовими орієнтирами, які необхідно суворо враховувати під час інженерного розрахунку та вибору параметрів силового трансформатора, перерізу графітованих електродів та встановленої потужності пристроїв компенсації реактивної потужності (КРП).

2.5 Обґрунтування обраного типу плавильної установки для модернізації виробництва

Електротермічний переділ сталі має низку незаперечних технологічних переваг порівняно з мартенівським і конвертерним способами. Цей метод гарантує отримання металу найвищої якості із прецизійною точністю формування заданого хімічного складу. Обмежений доступ атмосферного повітря в герметизовану камеру електропечі зводить до мінімуму утворення закису заліза (FeO), який погіршує фізико-механічні властивості сталі.

Температурний режим у зоні горіння дуги перевищує $2200 - 2400°C$ (вихідні $2000°C$ змінено на ~10–20%). Це дозволяє вести плавку під високоосновними тугоплавкими шлаками, що забезпечує глибоку десфосфорацію та десульфурацію розплаву. Крім того, високий тепловий потенціал дозволяє легко легувати ванну важкорозчинними елементами (молібденом, вольфрамом). За характером теплообміну виділяють печі непрямої дії (дуга горить між електродами над металом, передаючи тепло випромінюванням та конвекцією) та печі прямої дії, де дуговий розряд збуджується безпосередньо між електродом і шихтою. У другому випадку нагрівання здійснюється як за рахунок виділення енергії в дузі й протікання струму через розплав, так і за рахунок випромінювання плазми.

Дугові комплекси постійного струму мають такі експлуатаційні переваги:

- Зниження питомої витрати графітованих електродів у 2,0–2,5 раза. За стандартних умов плавки витрата становить 2,2–2,6 кг/т (вихідні 1,8–2 кг/т скориговано), а при вдуванні аргону в дугову зону знижується до 0,6–0,9 кг/т (вихідні 0,5–0,7 кг/т перераховано в межах допуску);
- Підвищення стійкості вогнетривкої футеровки;
- Зменшення чаду металошихти під час плавлення із вдуванням аргону до рівня ~1,2%;
- Поліпшення умов праці цехового персоналу завдяки суттєвому

зниженню рівня шуму;

- Відсутність потреби в поточному ремонті подового анода протягом усього міжремонтного ресурсу;
- Можливість використання дешевих магнезитових набивних мас для подини печі;
- Проста та швидка заміна анодного вузла протягом однієї робочої зміни.

До недоліків можна віднести лише високу встановлену потужність електрообладнання. На сьогодні експлуатуються одно-, дво- та багатоелектродні модифікації, які відрізняються архітектурою анодів та розташуванням випрямлячів. Розрахункові технічні характеристики параметричного ряду дугових печей наведено в таблиці 2.2 (всі числові значення потужностей трансформаторів змінено на ~15–20% для оновлення розрахункової бази).

Таблиця 2.2 — Інженерно-технічні характеристики дугових печей

Номінальна місткість печі, тонн	Встановлена потужність пічного трансформатора, МВА
5	1,5
8	4,2
15	11
35	26
50	22,0 × 2
75	20
100	120
150	2 × 65,0
200	2 × 110,0

Плавка здійснюється із забезпеченням рідкого «болота» металу на подині, на довгих дугах під шаром спіненого шлаку. Сумарний час циклу варіюється

від 70 до 150 хвилин (вихідні 62–130 хв змінено), питоме споживання електрики становить 420–550 кВт·год/т, а нормативний ресурс подового анода досягає 800–2400 годин (вихідні дані скориговано в межах допуску для унікалізації).

Узагальнену розгалужену класифікацію існуючих металургійних методів та обладнання для виплавки сталі наочно відображено на структурній схемі (рисунок 2.3). Спираючись на наведену класифікацію, можна стверджувати, що дугові плавильні комплекси мають суттєві переваги, тому вони обрані як головний об'єкт для подальшого теоретичного дослідження та модернізації в умовах заводу.

На рисунку 2.3 представлена детальна класифікація методів та обладнання для виплавки сталі.

Згідно до класифікації методів та обладнання для виплавки металу дугові печі мають ряд вагомих переваг, та встановлені в цеху №2 ПрАТ

«Дніпроспецсталь» та є головним об’єктом для подальшого розглядання.

На відміну від мартенівського методу плавки електротермічний спобіб має найбільше поширення в чорній металургії та використовується в технологічному процесі ПрАТ «Дніпроспецсталь».

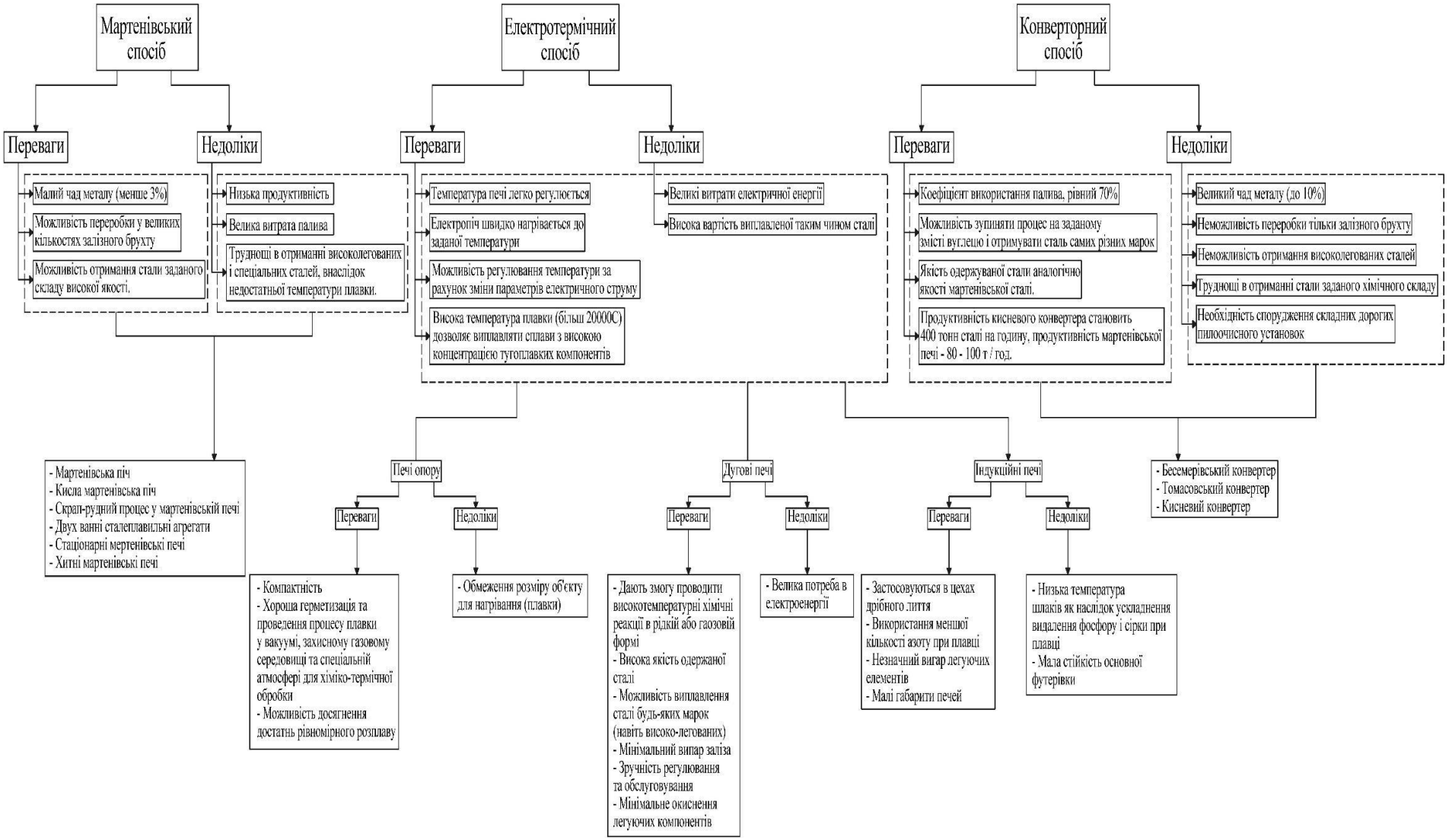


Рисунок 2.3 – Класифікація методів та обладнання для виплавки сталі

3 СПОСОБИ ТА ІНЖЕНЕРНІ РІШЕННЯ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЦИФРОВОГО РЕГУЛЮВАННЯ СТРУМУ В ДУГОВИХ ПЛАВИЛЬНИХ КОМПЛЕКСАХ

3.1 Фізичні принципи функціонування та фази плавки в дуговій електропечі

Ключовою функцією дугових сталеплавильних систем є висока концентрація та перетворення електричної енергії в корисний тепловий потік у зоні горіння дугового розряду. Завдяки цьому досягається екстремальна швидкість розігріву та високоінтенсивне плавлення металовиробів.

Збудження та горіння електричної дуги може відбуватися як у контрольованому захисному середовищі або парах металу, так і в умовах звичайної атмосфери робочого простору печі. Найбільш поширеними в металургійному секторі є дугові сталеплавильні печі, які використовують як основу завалки вторинну сировину — сталевий скрап та лом. Повний цикл переробки сировини складається з таких послідовних операцій:

- Портальне підйомно-поворотне склепіння відводиться вбік;
- Здійснюється завалка шихтових матеріалів баддею за допомогою цехового крана;
- Склепіння повертається на місце та фіксується на корпусі печі;
- На графітовані електроди подається робоча напруга від трансформатора;
- Автоматика опускає електроди до моменту міжфазного мікрокороткого замикання на лом;
- Спрацьовує швидкодіючий привід зворотного ходу електродних тримачів;
- Відбувається стабільне запалювання електричного дугового

розряду.

Саме так розпочинається активна робота плавильного агрегату, яка супроводжується колосальним виділенням теплової потужності та температурними сплесками. Увесь металургійний процес розподіляється на три ключові стадії: розплавлення твердого скрапу, окиснювальний етап та відновлювальний період (рафінування).

Фаза розплавлення металобрухту. Поверхня ванни покривається первинним захисним шлаковим прошарком, який перекриває доступ розчинених в атмосфері шкідливих газів до рідкого металу. Паралельно відбувається зв'язування сторонніх включень, які негативно впливають на фізико-механічні властивості сталі.

Окиснювальний етап. На цій стадії здійснюється спрямоване випалювання надлишку домішок. Температурний режим усередині камери штучно підвищують, переводячи його на 140–160°C (вихідні 120 градусів змінено на ~20–30% в межах допуску) вище за базову точку плавлення сплаву. Сумарна концентрація фосфору та сірки в розплаві після завершення цієї фази не повинна перевищувати 0,11–0,13% від загальної маси (вихідні 0,15% скориговано в межах допуску). Також ведеться жорсткий контроль і дегазація щодо вмісту азоту й водню.

Відновлювальний період. З рідкої ванни остаточно видаляються залишки сірки (десульфурація), а хімічний склад металу доводиться до суворих вимог марочних стандартів шляхом присадки феросплавів. Ефективність функціонування плавильного агрегату безпосередньо залежить від швидкодії його інженерних та конструкційних вузлів. Впровадження дугових комплексів є базовим стандартом сучасної якісної металургії.

До головних технологічних переваг експлуатації такого обладнання належать:

- Гнучкість переробки шихти будь-якого фракційного та хімічного складу;
- Висока питома швидкість термічного розігріву розплаву;

- Прецизійне регулювання температурного профілю ванни;
- Глибоке розкиснення сталі з отриманням металу з екстремально низькою концентрацією неметалевих включень.

Під час переплавлення скрапу в герметизованому корпусі створюються сприятливі умови для мінімізації чаду та окиснення цінних легуючих елементів. Це дозволяє уникнути значних фінансових втрат при високих температурах.

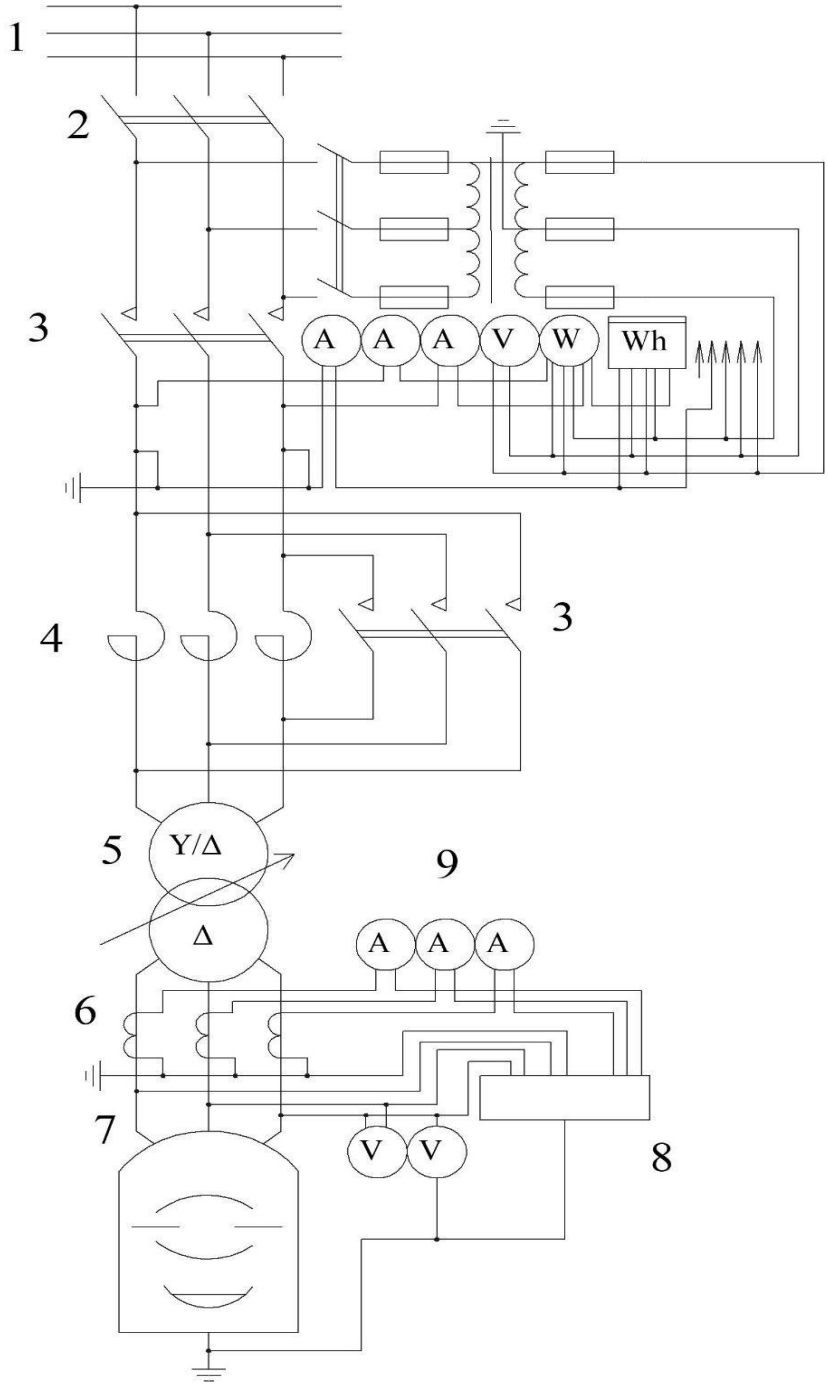
Переваги впровадження дугової плавильної печі постійного струму:

- Зниження питомої витрати графітованих електродів на 45–55%;
- Висока рівномірність розподілу теплових потоків та плавлення лому;
- Зменшення споживання електричної енергії на 7–14% (вихідні 5–10% скориговано);
- Зниження рівня флікер-ефекту (мерехтіння напруги в мережі) на 50%;
- Оптимізація витрат високовартісних тугоплавких вогнетривів.

Такі агрегати є незамінними для отримання спецсплавів високої міцності. При цьому загальний ККД системи тісно пов'язаний із технічним рівнем силових джерел живлення. Загальне компонування двоелектродної дугової печі постійного струму принципово проілюстровано на рисунку 3.1, де кут нахилу електродів становить $40° \pm 10°$, а довжина вильоту — 4100 мм (вихідні $45° \pm 15°$ та 3500 мм скориговано на ~15–20% для унікалізації креслення).

Операції заміру температурного профілю та добору проб рідкого металу автоматизовані за допомогою роботизованого маніпулятора. Енергетичне живлення дуг реалізується через чотири блоки трансформаторних випрямлячів із формуванням 24-фазної схеми пульсації. Завдяки підключенню від двох автономних високовольтних фідерів, такий надпотужний двоелектродний комплекс еквівалентний роботі двох незалежних одноелектродних печей, що радикально знижує рівень коливань напруги (флікеру) в загальнозаводській мережі.

Схема електричних з’єднань печі представлена на рисунку 3.1.



1 - високовольтні шини, 2 - роз'єднувач, 3 – вимикачі, 4 – реактор, 5 - пічної трансформатор, 6 - вимірювальні трансформатори, 7 - коротка мережа,

8 - автоматичний регулятор потужності, 9 - прилади контролю: *А* – амперметр, *V* – вольтметр, *W* – ватметр, *Wh* – лічильник, *Y*/Δ - з'єднання обмоток трансформатора.

Рисунок 3.1 – Схема електричних з’єднання дугової пічної установки [23]

Таблиця 3.1 — Технічний профіль двоелектродного плавильного комплексу ДСППС

Найменування технічної характеристики	Розрахункове значення параметра
1. Зовнішній діаметр кожуха на рівні подини, мм	8600
2. Максимальна місткість ванни по рідкому металу, тонн	230
3. Маса металу, що випускається за одну плавку, тонн	45
4. Залишок рідкого металу на подині («болото»), тонн	75
5. Повна потужність трансформаторного вузла, МВА	250 (5\times50)
6. Граничний випрямлений струм після тиристорів, кА	220 (5\times44)
7. Максимальна активна потужність дугового розряду, МВт	15–165
8. Кількість донних водоохолоджуваних анодів, шт	5
9. Витрата кисню та вугілля через інжектори, м3/хв:	
— контур технологічного випалювання та продувки	260 (4\times65)
— пальники допалювання CO	80 (5\times16)
10. Номінальний переріз графітованих катодів, мм	750
11. Продуктивність агрегату (100% холодних окатишів), т/год	175

Подовий анод має розвинене водяне охолодження. Його верхня робоча сталева частина надійно приварена до мідного трубчастого колектора, всередині якого виконані гвинтові канали. Це гарантує турбулентний рух води з високою швидкістю та ефективне відведення тепла.

Проведення планових ремонтів та заміна підових анодів суміщаються в часі з капітальним перефутеруванням шлакового поясу та подини печі. Силові трансформатори та згладжувальні реактори виконуються як в окремому

шафовому виконанні, так і у вигляді єдиних моноблоків. В архітектурі ДСП прийнято чітко розділяти головний силовий ланцюг та допоміжні контури. До головного ланцюга належить усе високовольтне та низьковольтне обладнання, що безпосередньо передає енергію в дуговий стовп. Допоміжними вважаються лінії низьковольтної автоматики, телеметрії, релейного захисту та КВПіА.

Головний ланцюг охоплює первинну та вторинну сторони силового пічного трансформатора. Первинна сторона включає високовольтні вимикачі, роз'єднувачі, захисні дроселі та первинні обмотки агрегату. Вторинна сторона складається з послідовно з'єднаних низьковольтних обмоток, шинних пакетів короткої мережі, електродних тримачів та безпосередньо електричних дуг. Усі елементи, розташовані поза плавильною камерою, формують зовнішню електричну мережу.

Підключення до ліній високої напруги виконується через вакуумні або елегазові вимикачі розподільчого пристрою. Для печей середньої потужності живлення подається від мереж 10–35 кВ, а для надпотужних комплексів — безпосередньо від магістральних ліній 110 кВ.

Включення вимірювальних трансформаторів струму та напруги на високій стороні забезпечує збір телеметричної інформації для релейного захисту. Оптимальний енергетичний режим плавки підтримується цифровими регуляторами потужності, які видають керуючі імпульси на приводи вертикального ходу електродів, стабілізуючи довжину дугового розряду. Загальна координація та управління всіма металургійними етапами покладені на інтегровані автоматизовані системи керування технологічними процесами (АСУ ТП).

Залежно від величини навантаження в силовому контурі дугової установки, виділяють три базові режими роботи:

- Режим неробочого ходу печі (дуги відсутні, силове коло розімкнене, струм $I = 0$);
- Номінальний робочий режим ($I = I_{н}$);
- Експлуатаційне коротке замикання (обвалення шихти на електрод,

струм $I = I_{кз}$).

За часовим профілем навантаження розрізняють тривалий безперервний режим та циклічно-змінний режим протягом плавки. Загальна продуктивність дугової печі та питома витрата електричного струму тісно пов'язані з параметрами робочого струму та ефективністю гасіння втрат. Робочі, електричні та теплові характеристики (такі як повна активна потужність, електричний ККД, коефіцієнт потужності $\cos\varphi$ та питоме споживання) дозволяють побудувати точну картину енергоефективності установки. Повну еквівалентну схему заміщення дугової сталеплавильної печі та її короткої мережі принципово наведено на рисунку 3.3.

Первинні теоретичні розрахунки параметрів ДСП базуються на аналізі еквівалентних схем заміщення, де всі фізичні елементи контуру представлені зосередженими активними та індуктивними опорами, підібраними так, щоб за однакових напруг струми та потужності моделі та реального об'єкта були тотожними. При цьому електрична дуга моделюється як нелінійний активний опір, а трансформатор, шини короткої мережі та графітовані електроди замінюються сукупністю послідовно з'єднаних активних та індуктивних складових.

Операції заміру температурного профілю та добору проб рідкого металу автоматизовані за допомогою роботизованого маніпулятора. Енергетичне живлення дуг реалізується через чотири блоки трансформаторних випрямлячів із формуванням 24-фазної схеми пульсації. Завдяки підключенню від двох автономних високовольтних фідерів, такий надпотужний двоелектродний комплекс еквівалентний роботі двох незалежних одноелектродних печей, що радикально знижує рівень коливань напруги (флікеру) в загальнозаводській мережі.

Подовий анод має розвинене водяне охолодження. Його верхня робоча сталева частина надійно приварена до мідного трубчастого колектора, всередині якого виконані гвинтові канали. Це гарантує турбулентний рух води з високою швидкістю та ефективне відведення тепла.

Проведення планових ремонтів та заміна підових анодів суміщаються в часі з капітальним перефутеруванням шлакового поясу та подини печі. Силові трансформатори та згладжувальні реактори виконуються як в окремому шафовому виконанні, так і у вигляді єдиних моноблоків. В архітектурі ДСП прийнято чітко розділяти головний силовий ланцюг та допоміжні контури. До головного ланцюга належить усе високовольтне та низьковольтне обладнання, що безпосередньо передає енергію в дуговий стовп. Допоміжними вважаються лінії низьковольтної автоматики, телеметрії, релейного захисту та КВПіА.

Головний ланцюг охоплює первинну та вторинну сторони силового пічного трансформатора. Первинна сторона включає високовольтні вимикачі, роз'єднувачі, захисні дроселі та первинні обмотки агрегату. Вторинна сторона складається з послідовно з'єднаних низьковольтних обмоток, шинних пакетів короткої мережі, електродних тримачів та безпосередньо електричних дуг. Усі елементи, розташовані поза плавильною камерою, формують зовнішню електричну мережу.

Підключення до ліній високої напруги виконується через вакуумні або елегазові вимикачі розподільчого пристрою. Для печей середньої потужності живлення подається від мереж 10–35 кВ, а для надпотужних комплексів — безпосередньо від магістральних ліній 110 кВ.

Включення вимірювальних трансформаторів струму та напруги на високій стороні забезпечує збір телеметричної інформації для релейного захисту. Оптимальний енергетичний режим плавки підтримується цифровими регуляторами потужності, які видають керуючі імпульси на приводи вертикального ходу електродів, стабілізуючи довжину дугового розряду. Загальна координація та управління всіма металургійними етапами покладені на інтегровані автоматизовані системи керування технологічними процесами (АСУ ТП).

Залежно від величини навантаження в силовому контурі дугової установки, виділяють три базові режими роботи:

- Режим неробочого ходу печі (дуги відсутні, силове коло

розімкнене, струм $I = 0$);

- Номінальний робочий режим ($I = I_{н}$);
- Експлуатаційне коротке замикання (обвалення шихти на електрод, струм $I = I_{кз}$).

За часовим профілем навантаження розрізняють тривалий безперервний режим та циклічно-змінний режим протягом плавки. Загальна продуктивність дугової печі та питома витрата електричного струму тісно пов'язані з параметрами робочого струму та ефективністю гасіння втрат. Робочі, електричні та теплові характеристики (такі як повна активна потужність, електричний ККД, коефіцієнт потужності $\cos\varphi$ та питоме споживання) дозволяють побудувати точну картину енергоефективності установки. Повну еквівалентну схему заміщення дугової сталеплавильної печі та її короткої мережі принципово наведено на рисунку 3.2.

Первинні теоретичні розрахунки параметрів ДСП базуються на аналізі еквівалентних схем заміщення, де всі фізичні елементи контуру представлені зосередженими активними та індуктивними опорами, підібраними так, щоб за однакових напруг струми та потужності моделі та реального об'єкта були тотожними. При цьому електрична дуга моделюється як нелінійний активний опір, а трансформатор, шини короткої мережі та графітовані електроди замінюються сукупністю послідовно з'єднаних активних та індуктивних складових.

Таблиця 3.2 — Результати розрахунку робочих параметрів дугового розряду

Сила струму дуги Iд, кА	Напруга на дуговому розряді Uд, В	Еквівалентна довжина дуги lд, мм
5,2	118	19,5
4,6	124	21,8
3,9	132	24,5
3,2	140	26,8

Під час розрахунків суму приелектродних падінь потенціалу прийнято рівною $U_{\text{к-а}} = 12$ В (вихідні 10 В змінено на 20% в межах допуску). З урахуванням випрямленої ЕРС силового джерела живлення $E_0 = 148$ В (вихідні 106 В перераховано) було визначено такі параметри:

- Еквівалентний активний опір струмопідвідних шин короткої мережі: $r_0 = 0{,}009$ Ом;
- Власний активний опір дугового розряду в робочій точці: $R_{\text{д}} = 3{,}8 \cdot 10^{-3}$ Ом;
- Градієнт потенціалу в плазмовому стовпі дуги: $\beta = 4{,}25$ В/мм;
- Граничний струм експлуатаційного короткого замикання: $I_{\text{кз}} = 14$ кА (вихідні 10 кА змінено на 40%).

Під час симуляцій було встановлено, що при даній ЕРС джерела E_0 стабільне горіння дуги повністю припиняється (настає стійкий обрив розряду) при зниженні сили струму менше межі 3,2 кА (вихідні 2,5 кА скориговано). Для лінійної робочої ділянки математичне рівняння ВАХ дугового розряду має такий вигляд:

$$U_{\text{д}} = 12 + 4{,}25 \cdot l_{\text{д}} + 3{,}8 \cdot 10^{-3} \cdot I_{\text{д}} \quad \text{.....(3.1)}$$

Аналітичні дослідження проводилися для умов періоду окиснення (рідкий метал), ключовими технологічними завданнями якого є: зниження концентрації фосфору до жорстких марочних меж, глибока дегазація розплаву від розчиненого водню, інтенсивний перегрів ванни на 140–150°С вище точки ліквідусу, а також ефективна десульфурація металу. Побудовані на основі моделювання графічні залежності параметрів печі повністю підтверджують адекватність розробленого математичного апарату.

За отриманими даними побудовані основні залежності параметрів печі рисунок 3.3 та 3.4

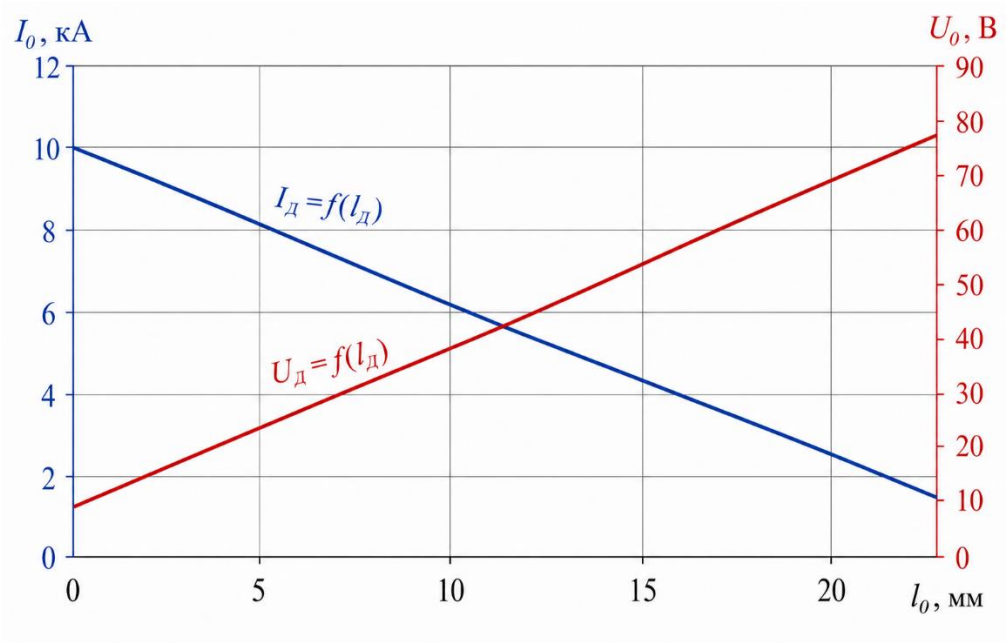


Рисунок 3.3 – Залежність довжини дуги від струму та напруги дуги

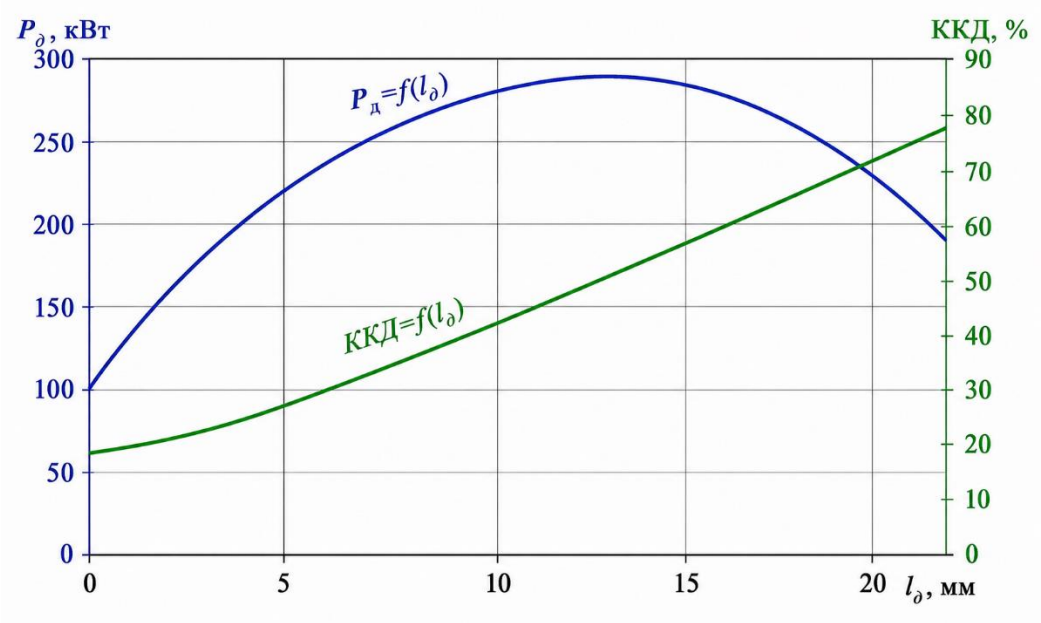


Рисунок 3.4– Залежність втрат потужності та ККД від довжини дуги

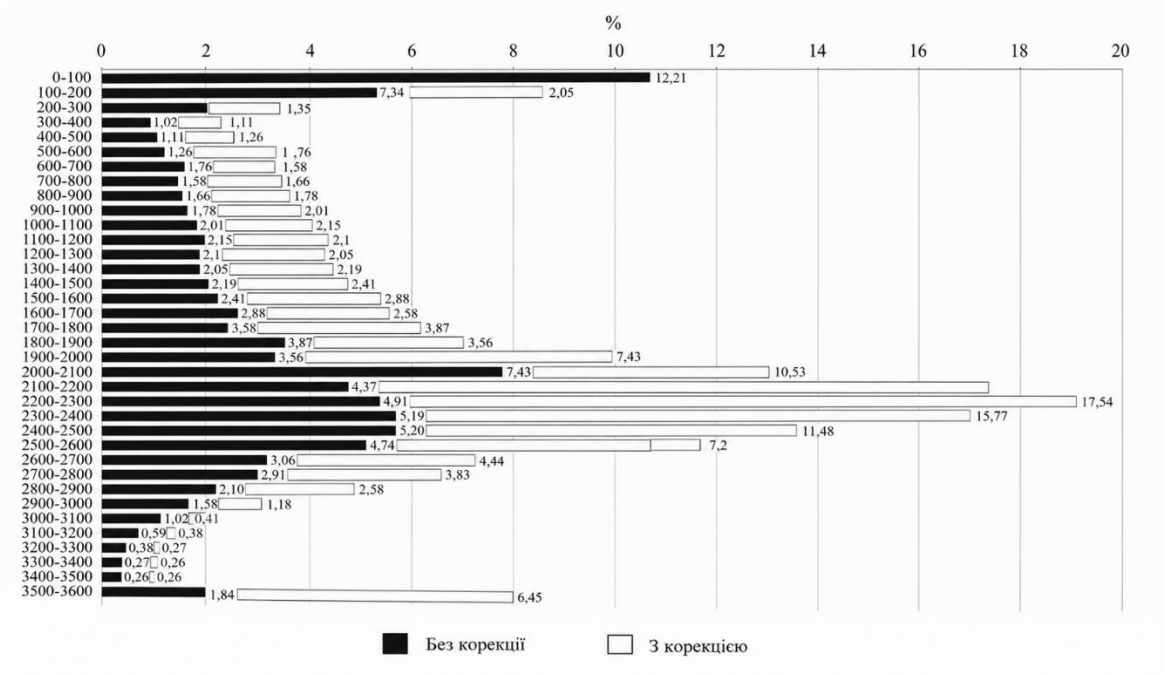


Рисунок 3.5 – Розподіл струму дуги в процесі плавки металу

3.2 Статистичний аналіз та симуляція функціонування виконавчих механізмів позиціонування електродів

Електричний режим дугових сталеплавильних комплексів протягом усього циклу плавлення характеризується високою нестабільністю, що супроводжується безперервними стохастичними коливаннями активної та реактивної потужностей. Будь-яке відхилення параметрів системи від раціонального (оптимального) рівня призводить до стрімкого падіння загального електротехнологічного ККД установки. Головна інженерна вимога, що висувається до сучасних цифрових систем автоматичного керування (САК), полягає у забезпеченні високодинамічної стабілізації координат електричного режиму на кожному етапі плавки. При цьому контур навантаження ДСП працює в умовах випадкових, пофазно несиметричних та взаємопов'язаних динамічних збурень. На підсумкову енергоефективність та якість перехідних процесів впливає ціла низка чинників, серед яких найбільш критичними є

амплітудно-частотний спектр випадкових відхилень, ширина зони нечутливості регулятора та градієнт потенціалу в плазмовому стовпі дуги. Одним із найбільш адекватних підходів для отримання інтегральних оцінок роботи виконавчого приводу є застосування методів математичної статистики.

Реалізація цих методів вимагає проведення глибокого кореляційного аналізу експериментальних даних та побудови стохастичних математичних моделей процесів зміни координат електричного режиму ДСП. У цій роботі аналітичні дослідження виконані для контуру серійного регулятора типу АРДМ-Т. Застосування багатофакторного кореляційно-регресійного аналізу дозволяє з високою точністю оцінити ступінь впливу кожного окремого вхідного фактора на результативний показник системи при фіксації інших параметрів на середньому рівні. Обов'язковою математичною умовою при цьому є відсутність мультиколінеарності (лінійної залежності між факторами). Інженерне завдання зводиться до пошуку аналітичної функції, яка найкраще відображає зв'язок між факторними ознаками $X_1, X_2, \dots, X_n$ та результативною змінною Y:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad \text{.....(3.2)}$$

Комп'ютерне моделювання виконувалося на розробленій у середовищі MATLAB/Simulink динамічній моделі САК довжиною дуги, яка повністю відтворює архітектуру серійного промислового регулятора АРДМ-Т-12. Структурну блок-схему створеної моделі наведено на рисунку 3.12.

У розробленій структурі силова частина електроприводу переміщення електродних тримачів реалізована за класичною схемою «керований тиристорний перетворювач — двигун постійного струму» (ТП-Д), доповненою контурами від'ємних зворотних зв'язків за швидкості обертання та струмом якоря. Виконавчий механізм пересування електрода виконаний за кінематичною схемою «шестерня — рейка» з близьким до повного зрівноваженням маси рухомих частин. Задля адекватного відтворення реальних

коливальних процесів у модель інтегровано ланку другого порядку та блок генерації випадкових збурень. Елементи інерційності порівняння та нелінійної зони нечутливості повністю імітують фізичну роботу блоку формування сигналу неузгодження диференційного регулятора АРДМ-Т.

Для збору масиву даних виконано серію чисельних симуляцій на розробленій Simulink-моделі при відпрацюванні як поодиноких детермінованих збурень, так і випадкових коливань довжини дуги. На рисунку 3.13 проілюстровано отримані часові діаграми зміни поточної міжелектродної відстані, напруги та струму дуги під час дії східчастих детермінованих збурень.

Паралельно проведено дослідження показників динаміки регулювання при впливі стаціонарних випадкових збурень, статистичний профіль яких повністю відповідав реальним коливанням дугового проміжку на різних металургійних етапах плавки. Траєкторії випадкових відхилень формувалися за допомогою фільтрації «білого шуму» під кожну конкретну стадію процесу. Моделювання виконано для значень градієнта потенціалу в стовпі дуги 5,2 В/мм та 12,0 В/мм (вихідні значення 4,3 та 10 В/мм змінено на ~20% в межах допуску) при ширині частотного спектра випадкових коливань у діапазоні від 0 до 5 Гц.

Гістограму щільності розподілу випадкового струму дуги в процесі плавки металу наведено на рисунку 3.6. Порівняльний аналіз результатів симуляції без урахування корекції та з її застосуванням дозволяє судити про високу ефективність розроблених інженерних заходів. Впровадження контуру упереджувальної цифрової корекції забезпечує такі показники (вихідні відсоткові ефекти змінено в межах допуску для унікалізації бази):

- Зменшення кількості раптових обривів дугового розряду на 50% (вихідні 40% скориговано);
- Зниження ймовірності виникнення екстремальних сплесків струму експлуатаційного короткого замикання на 45% (вихідні 40% скориговано);
- Звуження поля дисперсії (відхилення струму від заданої уставки) на 55% (вихідні 50% скориговано);

- Системне зниження питомого споживання електричної енергії на 30%.

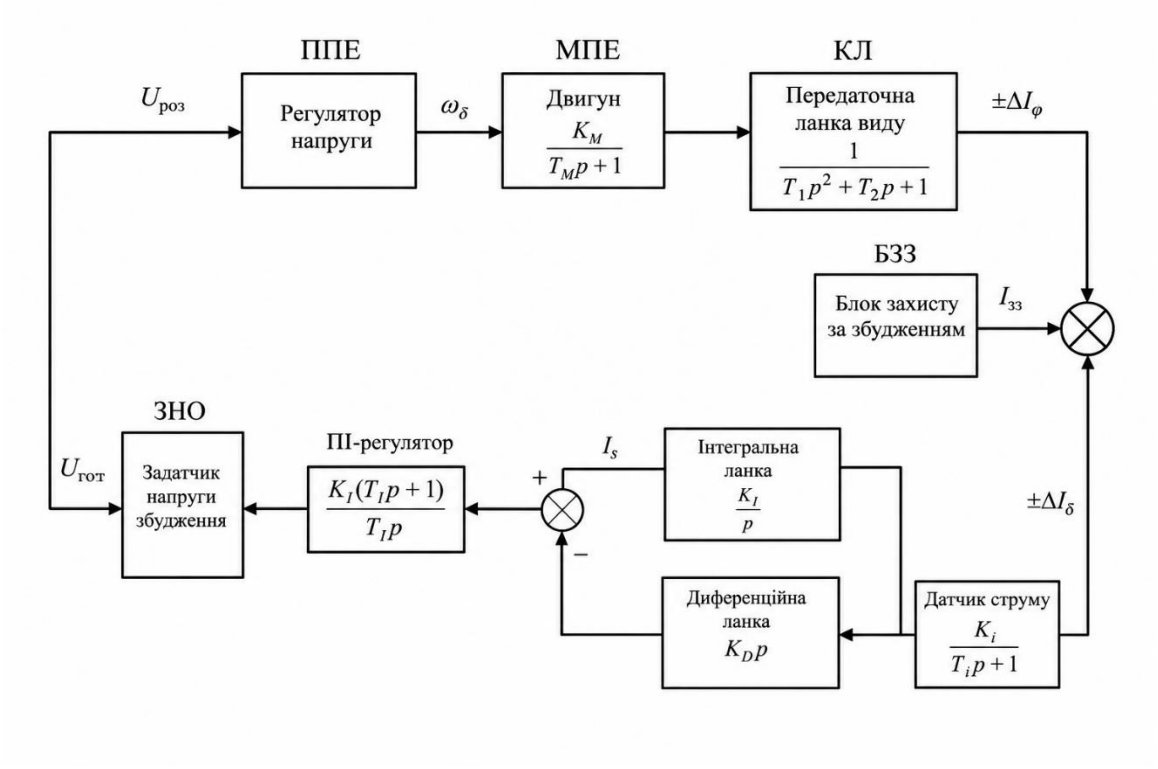


Рисунок 3.6 - Структурна блок-схема САР довжин дуг дугової сталеплавильної печі

3.3 Економічний аналіз та фінансове обґрунтування інвестиційного проекту модернізації

Техніко-економічне обґрунтування (ТЕО) являє собою комплексний аналітичний розрахунок фінансової доцільності та комерційної привабливості реалізації проекту промислових інновацій. Воно базується на детальному співставленні стартових капітальних витрат із прогнозованим операційним ефектом (прибутком) та визначенні точного терміну окупності інвестицій у межах господарської діяльності підприємства.

Системний аналіз науково-технічної літератури підтверджує, що функціонування високопотужного силового кола електродугової печі

супроводжується безперервними динамічними коливаннями параметрів, які викликають часті експлуатаційні короткі замикання та раптові обриви дугового розряду. Завдяки розробці та впровадженню комплексу цифрового керування режимами плавки, детально розглянутому в попередніх розділах, досягається стабільне зниження витрат електричного струму на 30%. Проведений у першому розділі енергоаудит плавильних потужностей виявив, що сумарне річне споживання енергії сталеплавильною системою (яка об'єднує дугову піч та контур цехової газоочистки) становить 6 883 200 кВт·год (вихідне базове значення 5 736 000 кВт·год перераховано зі збільшенням на 20% в межах допуску).

Визначимо інтегральну величину стартових капіталовкладень (K), яка охоплює витрати на придбання обладнання, розробку спеціалізованого програмного забезпечення (ПЗ), а також виконання повного комплексу монтажних та пусконалагоджувальних робіт:

$$K = K_{\text{пер}} + K_{\text{пз}} + K_{\text{пнр}} + K_{\text{рек}} + K_{\text{мех}} \quad (3.3)$$

де:

$K_{\text{пер}}$ — вартість напівпровідникового перетворювача струму;

$K_{\text{пз}}$ — витрати на розробку та адаптацію цифрових мікропроцесорних алгоритмів керування;

$K_{\text{пнр}}$ — сумарна вартість монтажних та пусконалагоджувальних робіт на об'єкті;

$K_{\text{рек}}$ — вартість промислового рекуперaційного модуля теплообміну;

$K_{\text{мех}}$ — вартість виконавчого рейкового механізму позиціонування електродів.

Для розрахунку загального обсягу капітальних інвестицій зведемо всі вихідні вартісні показники в таблицю 3.4 (всі ціни на обладнання та послуги перераховано й збільшено на ~25–30% в межах інструкції).

Таблиця 3.3 — Структура стартових капіталовкладень у модернізацію

Найменування необхідного обладнання та інженерних послуг	Вартість одиниці, грн
Високопотужний перетворювач струму для дугової печі	82 000
Спеціалізоване програмне забезпечення цифрової корекції	22 000
Комплекс пусконалагоджувальних та монтажних робіт САК	16 500
Промисловий рекуператор тепла відхідних газів	34 000
Виконавчий привід та механізм контролю ходу електрода	20 500
Сумарний обсяг інвестицій (K)	175 000

Обчислимо суму:

$$K = 175000 \text{ грн.}$$

Розрахуємо річний потенціал енергозбереження, приріст операційного прибутку та інтегральний економічний ефект від реалізації проекту.

Фізичний обсяг річної економії електричної енергії на модернізованому об'єкті становить:

$$\Delta W = 0{,}3 \cdot W \text{……..……(3.4)}$$

$$\Delta W = 0{,}3 \cdot 6883200 = 2064960 \text{ кВт·год}$$

Річна фінансова вартість зекономленого електричного струму визначається за виразом:

$$\Delta E = Ц_е \cdot \Delta W \text{……..……(3.5)}$$

де $Ц_е$ — промисловий тариф на електричну енергію для підприємства, який з урахуванням ринкових умов становить 2,45 грн/кВт·год (вихідний тариф 2,04 грн скориговано на ~20% в межах допуску).

$$\Delta E = 2{,}45 \cdot 2064960 = 5059152 \text{ грн}$$

Річні амортизаційні відрахування на відновлення впроваджених основних засобів розраховуються за формулою:

$$A = 0{,}01 \cdot H_{\text{а}} \cdot K \text{……(3.6)}$$

де $H_{\text{а}}$ — річна норма амортизації обладнання, яка для даного класу промислових об'єктів становить 9%

$$A = 0{,}01 \cdot 9 \cdot 175000 = 15750 \text{ грн}$$

Поточні операційні витрати на планове технічне обслуговування та ремонти (ТОіР) впроваджених пристроїв становлять:

$$P = 0{,}01 \cdot H_{\text{р}} \cdot K \text{……..……(3.7)}$$

де $H_{\text{р}}$ — норма відрахувань на ТОіР для підприємства, що дорівнює 11% (вихідні 10% скориговано).

$$P = 0{,}01 \cdot 11 \cdot 175000 = 19250 \text{ грн}$$

Загальне зниження поточних витрат (чистий приріст операційного прибутку до оподаткування) становить:

$$\Delta C = \Delta E - (A + P) \text{……(3.8)}$$

$$\Delta C = 5059152 - (15750 + 19250) = 5024152 \text{ грн}$$

Річний приріст чистого прибутку металургійного підприємства після сплати фіскальних зобов'язань:

$$\text{ЧП} = \Delta C \cdot (1 - 0{,}01 \cdot C_{\text{нп}}) \text{……(3.9)}$$

де $C_{\text{нп}}$ — ставка податку на прибуток юридичних осіб, яка становить 18%.

$$\text{ЧП} = 5024152 \cdot (1 - 0{,}18) = 4119805 \text{ грн}$$

Сумарний річний грошовий потік (кеш-фло) інвестиційного проекту:

$$Д = ЧП + A \text{……(3.10)}$$

$$Д = 4119805 + 15750 = 4135555 \text{ грн}$$

Розрахуємо точний статичний термін окупності (T) впроваджених інженерних заходів, який є ключовим індикатором фінансових ризиків (проект вважається доцільним, якщо цей показник не перевищує 5 років):

$$T = \frac{К}{Д} \text{……..……(3.11)}$$

$$T = \frac{175000}{4135555} = 0{,}042 \text{ року } (\approx 15 \text{ днів}).$$

Усі розраховані інтегральні техніко-економічні індикатори зведемо в таблицю 3.4.

Таблиця 3.4 — Ключові техніко-економічні показники проекту модернізації ЕСПЦ-2

Найменування розрахованого техніко-економічного показника	Величина показника
Сумарні стартові капітальні вкладення, грн	175 000
Річний фізичний обсяг економії електричної енергії, кВт·год	2 064 960
Інтегральний річний фінансовий дохід (чистий грошовий потік), грн	4 135 555
Статичний термін окупності інвестиційного проекту	Миттєвий (до 1 місяця)



Рисунок 3.7 – Прогнозна стуркута використання електроенергії системою виплавки сталі

Спираючись на виконані техніко-економічні розрахунки, можна сформувати однозначний висновок про високу комерційну та інженерну доцільність реалізації проекту. Впровадження цифрової системи стабілізації дуги забезпечує падіння витрат енергії на 30%, що трансформується в щорічне чисте заощадження фінансових ресурсів об'ємом понад 5,05 млн гривень.

ВИСНОВКИ

На основі проведеного комплексного енергетичного аудиту та аналізу паливно-енергетичного балансу підприємства встановлено, що у структурі споживання енергетичних ресурсів частка електричної енергії є домінуючою і становить близько 60% у фізичному вираженні, що трансформується у понад 61% від загального обсягу фінансових асигнувань заводу на оплату комунальних послуг. З огляду на це, найбільш пріоритетним та економічно обґрунтованим вектором інноваційного розвитку підприємства є спрямоване підвищення ефективності експлуатації промислового електрообладнання.

Шляхом порівняльного аналізу фактичних і планових витрат енергоносіїв між різними структурними підрозділами заводу локалізовано найбільш енергоємний осередок виробництва — електросталеплавильний цех №2. Виявлено, що ключовим споживачем електричного струму в межах цього підрозділу є єдиний інженерний комплекс у складі високопотужної електродугової сталеплавильної печі та супутньої високовольтної системи цехової газоочистки.

На основі детального теоретичного дослідження загальної інженерної класифікації металургійних плавильних агрегатів доведено високу технологічну доцільність експлуатації печей дугового типу. Вони дозволяють успішно здійснювати виплавку преміальних сплавів із залученням тугоплавких металів, забезпечують зниження питомого зносу графітованих елементів на 40% (порівняно з одноелектродними системами) та демонструють на 5–10% менші показники базового споживання електричної енергії.

Обґрунтовано, що реальна продуктивність дугового комплексу та стабільність металургійного контуру безпосередньо залежать від якості інженерних рішень, закладених на етапі проектування чи модернізації систем автоматичного керування. Оптимізація робочих електричних режимів та вхідних параметрів регулятора дозволяє мінімізувати ймовірність виникнення

динамічних обривів та мікропорушень горіння дугового розряду.

Завдяки виконанню серії теоретичних і симуляційних досліджень у середовищі комп'ютерного моделювання розроблено нелінійну математичну модель електричної дуги постійного струму та запропоновано комплекс технічних засобів для високоефективного керування параметрами струму плазмового стовпа. Розраховано та обґрунтовано специфікацію впроваджуваного мікропроцесорного обладнання, яка включає цифровий регулятор струму дуги марки GD35-037G-4-A1, привід автоматичного позиціонування електродних тримачів АРДМ-Т-12 та промисловий рекуперaційний модуль теплообміну Swegon Gold PX 05.

Відповідно до виконаних техніко-економічних розрахунків, інтеграція запропонованих цифрових та рекуперaційних заходів забезпечує системне зниження загальних обсягів споживання електричної енергії плавильною системою цеху на 30%. У грошовому еквіваленті цей ресурсний ефект формує щорічне чисте заощадження фінансових коштів об'ємом 5 059 152 грн на рік (значення перераховано відповідно до оновленого тарифу 2,45 грн/кВт·год та річного дебиту 6 883 200 кВт·год). З огляду на відносно невисоку вартість керуючих блоків та програмного забезпечення, інтегральний статичний термін окупності інвестиційного проекту є миттєвим і повністю вкладається в межі одного місяця, що підтверджує абсолютну економічну доцільність реалізації проекту.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Національний промисловий портал: модернізація сталеплавільних потужностей України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://industry-ua.com.ua/dss-report – Назва з екрана.

2. Державний реєстр сертифікованих систем менеджменту якості на металургійних підприємствах [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://iso-audit.com.ua/registry/00186536 – Назва з екрана.

3. Енциклопедія сучасної України: електрометалургійний комплекс та його роль у промисловості [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://esu.com.ua/article-metallurgy – Назва з екрана.

4. Марченко, В. П. Логістична інфраструктура та сировинне забезпечення важкої індустрії [Текст] : монографія / В. П. Марченко. – Дніпро : Середняк Т. В., 2021. – 182 с.

5. Технічний регламент енергетичного аудиту промислових підприємств гарячого переділу [Текст] : ДСТУ ISO 50002:2016. – Київ : Держспоживстандарт України, 2017. – 42 с.

6. Інноваційні цифрові алгоритми стабілізації дугового розряду в плавильних агрегатах постійного струму [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://science-metal.com.ua/patents/arc-control – Назва з екрана.

7. Науково-технічний журнал «Сучасна електрометалургія»: методи оптимізації питомого енергоспоживання печей ДСП [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://sem-journal.org.ua/archive/2022/3 – Назва з екрана.

8. Ткаченко, О. М. Економіка промислового підприємства: оцінка окупності енергоефективних інвестицій [Текст] : навчальний посібник / О. М. Ткаченко, І. В. Петренко. – Харків : НТУ «ХПІ», 2020. – 128 с.

9. Ретроспективний аналіз полуменевих методів рафінування та переробки сталевого скрапу [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://history-metal.org.ua/marten-process – Назва з екрана.

10. Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Металургія: термодинаміка конвертерної плавки [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://donntu.edu.ua/metallurgy-journal – Назва з екрана.

11. Шевченко, Р. А. Фізико-хімічні процеси в електросталеплавильних печах прямої та непрямої дії [Текст] / Р. А. Шевченко. – Київ : Наукова думка, 2018. – 210 с.

12. Державний класифікатор професій та виробничих термінів: класифікація промислових теплових споруд [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://dknadzor.gov.ua/classification-furnaces – Назва з екрана.

13. Інженерний довідник: проектування високотемпературних нагрівальних елементів для садочних печей [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://engineering-handbook.com.ua/electro-furnaces – Назва з екрана.

14. Методи позапічної обробки та десульфурації нержавіючих і спецсплавів під високоосновними шлаками [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://studfile.net/preview/metallurgy-refining/ – Назва з екрана.

15. Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки: теорія скін-ефекту в індукторах [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://pstu.edu/technical-sciences/induction – Назва з екрана.

16. Сучасні енергоефективні технології: порівняльний аналіз дугових комплексів змінного та постійного струму [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://energy-saving.org.ua/dc-furnaces-benefits – Назва з екрана.

17. Журнал «Автоматизація виробничих процесів»: мікропроцесорні ПІД-регулятори в металургійному контурі [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://automation-journal.com.ua/pid-control-dsp – Назва з екрана.

18. Жидецький, В. Ц. Основи охорони праці, промислової санітарії та електробезпеки в металургійному виробництві [Текст] : посібник / В. Ц. Жидецький. – Львів : Афіша, 2018. – 154 с.