

Центральноукраїнський національний технічний університет
Центр заочної та дистанційної освіти
Кафедра “Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент”

“Допущено до захисту ”
Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ
к.т.н., професор
_____Петро ПЛЄШКОВ
“ ___ “ _____ 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої освіти
на тему:
**«Підвищення енергоефективності дугових
сталеплавильних печей на основі оптимізації
електричних та технологічних режимів»**

Виконав здобувач вищої освіти
__II__ курсу, групи ЕЕ-24 Мз
ОПП «Електротехнічні системи
електроспоживання»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
_____Юлія ПОНОМАРЕНКО
« ___ » _____ 2025 р.

Керівник роботи к.т.н., професор
_____Петро ПЛЄШКОВ
« ___ » _____ 2025 р.

Рецензент

Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет ЦЗДО
Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту
Освітній ступінь магістр
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Освітньо-професійна програма Електротехнічні системи електроспоживання

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Завідувач кафедри
Плешков П.Г.
« » 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Пономаренко Юлії Олегівні

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) Підвищення енергоефективності дугових сталеплавильних печей на основі оптимізації електричних та технологічних режимів
Improving the energy efficiency of electric arc furnaces based on optimization of electrical and technological modes

2. Керівник роботи (проекту) Плешков Петро Григорович, к.т.н., професор

(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання студентом роботи до захисту 15.12.2025 р.

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту) Вступ; Основні типи електричних печей і принципи їх енергоефективної роботи; Основні характеристики електричної дуги та фактори, що визначають енергоспоживання дугових печей; Методи моделювання електричної дуги; Аналіз електротехнічних характеристик дуги змінного струму та отриманих технологічних параметрів; Оптимізація електричних режимів дугової сталеплавильної печі шляхом зміщення робочої точки; Економічний ефект від впровадження оптимізованого електричного режиму; Охорона праці; Висновки

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>к.т.н, доц. Савеленко І.В.</i>		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Вступ</i>	<i>06.10.25</i>	
2	<i>Основні типи електричних печей і принципи їх енергоефективної роботи</i>	<i>13.10.25</i>	
3	<i>Основні характеристики електричної дуги та фактори, що визначають енергоспоживання дугових печей</i>	<i>20.10.25</i>	
4	<i>Методи моделювання електричної дуги</i>	<i>27.10.25</i>	
	<i>Аналіз електротехнічних характеристик дуги змінного струму та отриманих технологічних параметрів</i>	<i>03.11.25</i>	
5	<i>Оптимізація електричних режимів дугової сталеплавильної печі шляхом зміщення робочої точки</i>	<i>10.11.25</i>	
6	<i>Економічний ефект від впровадження оптимізованого електричного режиму</i>	<i>17.11.25</i>	
7	<i>Охорона праці</i>	<i>21.11.25</i>	
	<i>Висновки</i>	<i>25.11.25</i>	
8	<i>Оформлення пояснювальної записки МР</i>	<i>28.11.25</i>	
9	<i>Оформлення презентаційної частини МР</i>	<i>01.12.25</i>	

Дата видачі завдання

« ____ » _____ 2025 р.

Підпис керівника _____

Петро ПЛЄШКОВ

Завдання прийнято до виконання

« ____ » _____ 2025 р.

Підпис здобувача _____

Юлія ПОНОМАРЕНКО

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота: 106 с.; 46 рис.; 16 табл.; 23 джерела.

Пономаренко Ю.О. Підвищення енергоефективності дугових сталеплавильних печей на основі оптимізації електричних та технологічних режимів. – Рукопис.

Магістерська робота за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», ОПП «Електротехнічні системи електроспоживання». – Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2025 рік.

Магістерська робота присвячена дослідженню шляхів зниження енергоспоживання та підвищення ефективності процесу плавлення у дугових сталеплавильних печах за рахунок вдосконалення електротехнічних параметрів та режимів роботи печі.

У роботі проведено аналіз факторів, що визначають рівень енергоспоживання у процесі плавки. Наведено фізико-математичні моделі електричної дуги змінного струму, розроблено алгоритм оцінки її характеристик і залежностей між електричними та технологічними параметрами процесу.

Проведено моделювання електричних режимів ДСП-180 до та після оптимізації робочих точок на кожній стадії плавки. На основі отриманих результатів визначено оптимальні значення струмів і опорів, що забезпечують максимальне значення коефіцієнта потужності та підвищення енергоефективності процесу.

Проведено економічне обґрунтування впровадження оптимізованого режиму, яке показало доцільність реалізації даного підходу з урахуванням вартості сучасного обладнання та програмного забезпечення.

Ключові слова: дугова сталеплавильна піч, енергоефективність, електричний режим, оптимізація, електрична дуга, коефіцієнт потужності, енергоспоживання, економічний ефект.

ABSTRACT

Qualification work: 106 p.; 46 fig.; 16 tables; 23 sources.

Ponomarenko Yu.O. Increasing the energy efficiency of arc steelmaking furnaces based on the optimization of electrical and technological modes. – Manuscript.

Master's thesis in the specialty 141 "Electrical power engineering, electrical engineering and electromechanics", OPP "Electrical systems of electricity consumption". – Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2025.

The master's thesis is devoted to the study of ways to reduce energy consumption and increase the efficiency of the melting process in arc steelmaking furnaces by improving the electrical parameters and operating modes of the furnace.

The work analyzes the factors that determine the level of energy consumption in the melting process. Physical and mathematical models of an alternating current electric arc are presented, an algorithm for assessing its characteristics and dependencies between electrical and technological parameters of the process is developed.

The electrical modes of the DSP-180 were simulated before and after optimization of operating points at each stage of melting. Based on the results obtained, the optimal values of currents and resistances were determined, which ensure the maximum value of the power factor and increase in the energy efficiency of the process.

An economic justification of the implementation of the optimized mode was carried out, which showed the feasibility of implementing this approach taking into account the cost of modern equipment and software.

Keywords: arc steelmaking furnace, energy efficiency, electrical mode, optimization, electric arc, power factor, energy consumption, economic effect.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 ОСНОВНІ ТИПИ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕЧЕЙ І ПРИНЦИПИ ЇХ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОЇ РОБОТИ.....	11
1.1 Класифікація печей за принципом генерації теплоти.....	11
1.2 Класифікація печей за технологічним призначенням і характером енергетичного режиму роботи.....	14
1.3 Плазмові й вакуумно-дугові сталеплавильні печі.....	15
1.4 Порівняння особливостей роботи печей прямої і непрямой дії	17
1.5 Порівняння характеристик дугових сталеплавильних печей змінного та постійного струму.....	18
1.6 Висновки по розділу.....	23
2 ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ДУГИ ТА ФАКТОРИ, ЩО ВИЗНАЧАЮТЬ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ДУГОВИХ ПЕЧЕЙ.....	25
2.1 Оцінка впливових чинників на рівень енергоспоживання.....	25
2.2 Електрична дуга, технологія плавки та оптимізаційні підходи...	27
2.3 Висновки по розділу.....	35
3 МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ДУГИ.....	37
3.1 Моделювання дуги змінного струму на основі рівняння Кассі...	37
3.2 Побудова електричних характеристик	43
3.3 Висновки по розділу.....	46
4 АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДУГИ ЗМІННОГО СТРУМУ ТА ОТРИМАНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ.....	47
4.1 Обчислення робочих і технологічних показників.....	47
4.2 Перевірка адекватності математичної моделі експериментальними даними.....	54
4.3 Оптимізація режимів плавки.....	56

4.4	Висновки по розділу.....	76
5	ОПТИМІЗАЦІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ РЕЖИМІВ ДУГОВОЇ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЇ ПЕЧІ ШЛЯХОМ ЗМІЩЕННЯ РОБОЧОЇ ТОЧКИ.....	78
5.1	Електричні, технологічні та робочі параметри до і після оптимізації.....	79
5.2	Розрахунок електроспоживання електротехнологічною установкою ДСП-180 до і після оптимізації.....	92
5.3	Висновки по розділу.....	95
6	ЕКОНОМІЧНИЙ ЕФЕКТ ВІД ВПРОВАДЖЕННЯ ОПТИМІЗОВАНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО РЕЖИМУ.....	96
6.1	Розрахунок економії електроенергії.....	96
6.2	Розрахунок економії коштів на електроенергії.....	96
6.3	Витрати на впровадження оптимізації.....	96
6.4	Термін окупності.....	97
6.5	Висновки по розділу.....	97
7	ОХОРОНА ПРАЦІ.....	98
7.1	Оцінка небезпечних чинників у ливарному виробництві.....	98
7.2	Електробезпека та заходи захисту працівників.....	100
	ВИСНОВКИ.....	104
	ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	105

ВСТУП

У сучасних умовах розвитку промисловості питання енергоефективності посідає одне з провідних місць серед пріоритетних напрямів технічного вдосконалення металургійного виробництва. Металургійна галузь традиційно є одним із найбільших споживачів енергоресурсів, а процес виплавки сталі — найбільш енергоємним етапом у ланцюгу виробництва металопродукції. Серед різних способів виплавки сталі особливе місце займають дугові сталеплавильні печі (ДСП), які завдяки своїй гнучкості, технологічній мобільності та можливості переробки металобрухту відіграють важливу роль у сучасному сталеплавильному виробництві. Проте, незважаючи на переваги, процес роботи ДСП супроводжується значними енергетичними витратами, що зумовлює необхідність їх оптимізації та вдосконалення.

Енергоспоживання дугових печей визначається як сукупністю електричних параметрів, так і технологічних умов плавлення. Традиційно на одну тону виплавленої сталі в ДСП витрачається від 350 до 600 кВт·год електроенергії, залежно від конструкції печі, складу шихти, організації плавильного процесу та рівня автоматизації керування. Зменшення цих витрат навіть на кілька відсотків дає змогу суттєво підвищити економічну ефективність виробництва, знизити собівартість сталі та скоротити екологічне навантаження. Саме тому розроблення методів і технічних рішень, спрямованих на оптимізацію електричних і технологічних режимів роботи дугових сталеплавильних печей, є актуальним завданням сучасної енергетичної та металургійної науки.

Проблема енергоефективності ДСП є багатофакторною. Вона охоплює як питання оптимального керування електричною енергією, так і удосконалення теплотехнічних процесів усередині робочого простору печі. Одним із головних чинників енергозбереження є раціональне використання електричної енергії шляхом вибору оптимального співвідношення між

напругою, струмом і тривалістю дуги. Неправильне налаштування цих параметрів може призвести до підвищених втрат енергії через надмірне випромінювання, нестабільність дуги або нерівномірний нагрів металу. Водночас технологічні параметри — температура, хімічний склад шихти, інтенсивність продування киснем, організація окисно-відновних реакцій — також визначають ефективність використання підведеної енергії.

Суттєвий вплив на енергоефективність мають і конструкційні особливості печі: тип футерівки, форма зводу, розташування електродів, система відсмоктування газів, стан системи живлення тощо. Сучасні тенденції у проєктуванні дугових печей передбачають використання регульованих джерел живлення, високовольтних трансформаторів, адаптивних систем керування дугою, що дозволяє автоматично підтримувати оптимальний режим плавлення. Додатковим резервом підвищення ефективності є застосування технологій вторинного використання теплоти відхідних газів, які можуть забезпечити попередній підігрів шихти або повітря для горіння.

Удосконалення технологічних режимів плавки передбачає впровадження інтелектуальних систем моніторингу, які здатні в реальному часі аналізувати стан процесу, прогнозувати зміни температурного поля і хімічного складу металу, а також автоматично коригувати параметри подачі енергії. Такі системи дозволяють зменшити тривалість плавки, скоротити простої обладнання й підвищити стабільність процесу, що безпосередньо відображається на зниженні енергоспоживання.

Окрім технічних і технологічних факторів, важливу роль відіграє організаційно-економічний аспект енергоефективності. Оптимізація режимів роботи ДСП має бути спрямована не лише на зменшення споживання енергії, а й на підвищення загальної продуктивності та якості сталі. Для цього необхідно враховувати інтегровані показники — питомі витрати електроенергії, тривалість плавки, втрати металу з пилом, ступінь використання теплової енергії димових газів тощо.

З огляду на зазначене, підвищення енергоефективності дугових сталеплавильних печей є комплексною задачею, що вимагає системного підходу, поєднання електротехнічних, термодинамічних, хімічних і автоматизаційних рішень. Оптимізація електричних і технологічних режимів плавки дозволяє не лише зменшити витрати енергії, але й стабілізувати якість сталі, продовжити ресурс обладнання та знизити шкідливі викиди в атмосферу.

Метою даної роботи є дослідження шляхів підвищення енергоефективності дугових сталеплавильних печей на основі оптимізації електричних і технологічних режимів їх роботи. Для досягнення поставленої мети передбачено виконання таких завдань:

- проаналізувати основні енергетичні показники дугових печей та фактори, що впливають на їх ефективність;
- дослідити вплив технологічних параметрів плавки на енергоспоживання;
- визначити потенційні можливості зниження витрат електроенергії шляхом вибору раціональних робочих параметрів на електричних характеристиках печі;
- створити математичну модель електричного кола дугової сталеплавильної печі, яка відображає основні закономірності перебігу електричних процесів у її системі;
- запропонувати обґрунтовані способи скорочення питомих енерговитрат без погіршення якості виплавленої сталі.

Отже, підвищення енергоефективності дугових сталеплавильних печей шляхом оптимізації електричних і технологічних режимів є не лише технічною необхідністю, а й стратегічним завданням сталого розвитку металургійної промисловості. Реалізація цього підходу забезпечує економію енергоресурсів, зменшує вплив на довкілля та сприяє підвищенню конкурентоспроможності підприємств у сучасних умовах енергетичної трансформації.

1 ОСНОВНІ ТИПИ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕЧЕЙ І ПРИНЦИПИ ЇХ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОЇ РОБОТИ

1.1 Класифікація печей за принципом генерації теплоти

Процес утворення теплової енергії у промислових печах відбувається внаслідок перетворення електричної або хімічної енергії у тепло. Залежно від способу отримання тепла, печі поділяють на паливні, автогенні та електричні. Останні набули особливого поширення в металургійній галузі, де їх використовують для виплавлення сталі, одержання феросплавів, нагріву металу перед пластичною обробкою, а також у термічних та термохімічних процесах обробки виробів. Такі установки посідають важливе місце у сучасних технологічних комплексах, забезпечуючи високу точність температурного контролю та можливість енергоощадного керування процесами.

За характером перетворення електроенергії у тепло електричні печі металургійного типу поділяються на дугові, індукційні та опору. Кожен із цих видів має свої принципи дії, що безпосередньо впливають на рівень енергоспоживання та ефективність процесу нагріву.

Дугові печі працюють на основі явища утворення електричної дуги між електродами або між електродом і металевим розплавом. Під впливом високої напруги відбувається іонізація газового проміжку, що створює плазмову зону, де електрична енергія трансформується у тепло. Температура такої дуги може досягати 3–20 тис. К, що дає змогу виплавити значні об'єми металу. Ефективність процесу залежить від стабільності дуги, сили струму, напруги, довжини розряду та геометрії розташування електродів. Оптимізація цих параметрів безпосередньо впливає на зменшення енергетичних втрат і підвищення електричної економічності печі.

Індукційні печі базуються на дії змінного електричного струму, який створює навколо індуктора змінне магнітне поле. При розміщенні металевої заготовки в цьому полі в ній виникають вихрові струми, що викликають

внутрішнє нагрівання матеріалу. Такий спосіб забезпечує рівномірний розподіл температури, високу ефективність перетворення енергії та мінімальні втрати тепла в навколишнє середовище. Завдяки високому коефіцієнту корисної дії індукційні системи вважаються одними з найперспективніших у сфері енергозбереження.

Печі опору працюють згідно із законом Джоуля–Ленца: кількість тепла, що виділяється в провіднику, пропорційна квадрату сили струму, опору матеріалу та часу протікання струму. У таких установках як джерело тепла використовують електричний опір нагрівальних елементів, через які пропускають постійний або змінний струм. Висока стабільність температури та можливість точного регулювання режимів роботи робить печі опору зручними для енергоощадного термічного оброблення металів.

З позицій енергетичної ефективності, кожен тип печей має свої переваги та резерви вдосконалення. Для дугових агрегатів ключовим є стабілізація дуги та оптимальний вибір електричних режимів, що дозволяє скоротити питомі витрати енергії. В індукційних установках основна увага приділяється підвищенню якості індукторів та мінімізації реактивних втрат. У печах опору найбільший ефект дає вдосконалення теплоізоляції та впровадження систем автоматизованого керування, які забезпечують раціональне використання електроенергії.

Таким чином, класифікація печей за принципом теплогенерації дозволяє не лише визначити сферу їх застосування, а й оцінити потенціал зменшення енергоспоживання в кожному випадку. Раціональний вибір типу установки та оптимізація режимів її роботи є одним із основних шляхів досягнення енергоефективного сталеплавильного виробництва.

Схематичне зображення типової технологічної послідовності виготовлення сталевих виробів наведено на рисунку 1.1.

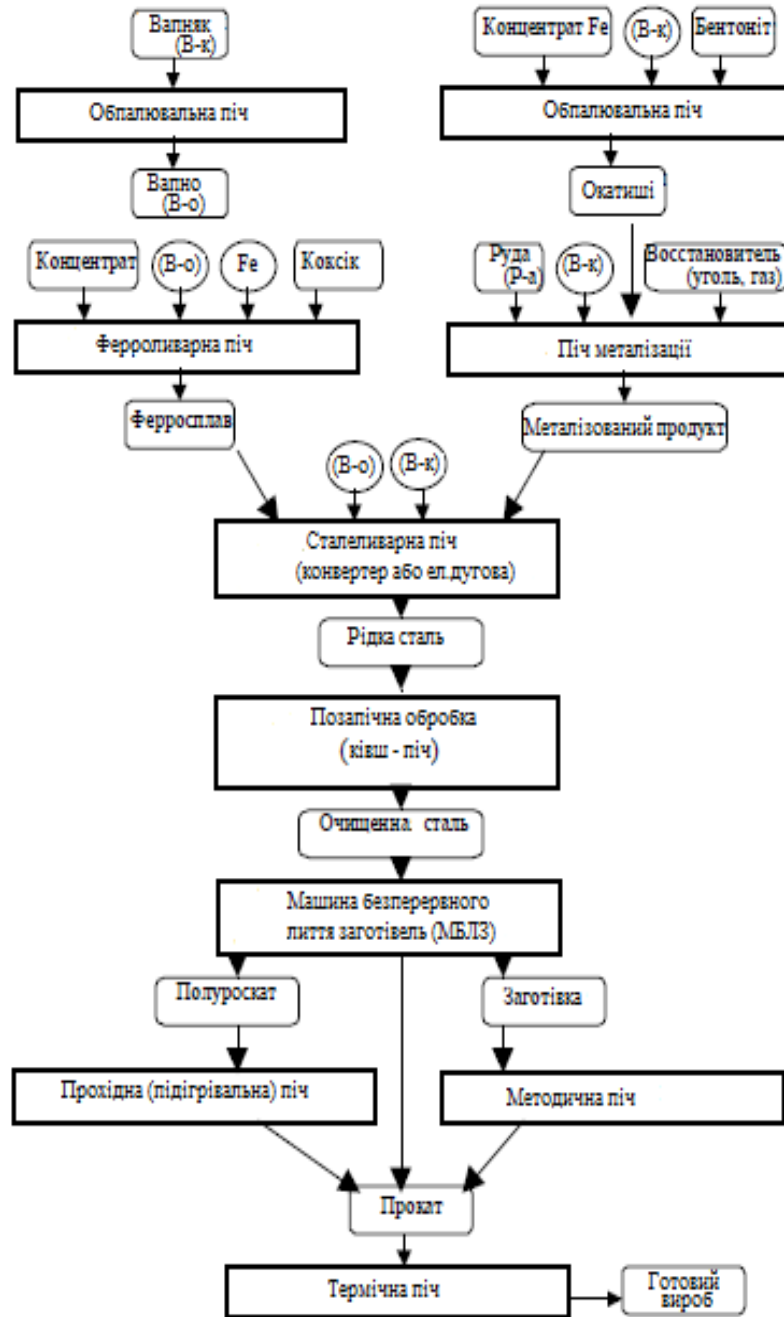


Рисунок 1.1 - Технологічна послідовність виготовлення сталевих виробів

1.2 Класифікація печей за технологічним призначенням і характером енергетичного режиму роботи

За функціональним призначенням металургійні печі умовно поділяють на плавильні та нагрівальні. Плавильні агрегати використовуються для первинного одержання металів або їх переплавлення з метою очищення, легування чи зміни структури. У процесі роботи таких печей відбувається перехід речовини в рідкий стан, що супроводжується значними енерговитратами. Тому підвищення ефективності цих установок пов'язане насамперед із зменшенням втрат електричної енергії, оптимізацією теплового балансу та вдосконаленням конструкції дугового простору.

Нагрівальні печі, навпаки, працюють без зміни агрегатного стану металу й призначені для попереднього або проміжного підігріву матеріалів. Їх застосовують у металургії для випалювання вогнетривів, вапняку, магнезиту, сушіння ливарних форм і шихтових матеріалів, а також для надання металу необхідної пластичності перед обробкою тиском чи проведення термічної обробки з метою зміни структури та механічних властивостей. Висока стабільність температурного режиму таких установок є визначальним чинником енергозбереження, адже саме рівномірність нагріву дозволяє зменшити тривалість циклу та запобігти перевитратам енергії.

За режимом роботи металургійні печі поділяють на безперервної та періодичної (циклічної) дії.

До безперервних належать рудовідновлювальні дугові установки, шахтні агрегати, печі «киплячого» або зваженого шару, тунельні печі для випалювання вогнетривких виробів, трубчасті, роликові та кільцеві печі прокатного виробництва. У таких системах технологічний процес триває без зупинок: матеріал постійно рухається від зони завантаження до виходу готової продукції. Енергетична доцільність цих печей забезпечується завдяки рівномірному розподілу тепла, зменшенню втрат при пусках і можливості використання вторинних енергоресурсів (наприклад, теплоти відхідних газів).

Печі періодичної дії працюють за послідовним циклом операцій. До них належать дугові сталеплавильні агрегати, мартенівські печі, конвертери, нагрівальні колодязі, а також установки, що застосовуються у ковальсько-пресовому та термічному виробництвах. Кожен цикл включає етапи завантаження шихти, теплової обробки, випуску або вивантаження готового продукту та короткі періоди підготовки до наступного плавлення. У перервах здійснюють поточні ремонти та технічне обслуговування, наприклад, підготовку футерівки або підігрів робочого простору перед новим запуском.

Енергозбереження в печах періодичної дії досягається за рахунок скорочення тривалості допоміжних операцій, теплоізоляції корпусів, використання акумульованого тепла та автоматизованого контролю режимів роботи. Важливим напрямом підвищення енергоефективності є впровадження систем керування електричним навантаженням, які дозволяють підтримувати стабільну температуру при мінімальних витратах електроенергії.

Отже, класифікація печей за технологічним призначенням і режимом роботи дає змогу системно оцінювати їх енергетичну ефективність, обґрунтовувати вибір типу агрегату для конкретного виробництва та визначати напрями оптимізації споживання електроенергії в сталеплавильних процесах.

1.3 Плазмові й вакуумно-дугові сталеплавильні печі

Перетворення електричної енергії в теплову енергію в дугових печах здійснюється завдяки електричній дузі, яка являє собою різновид дугового розряду в газовому середовищі. Такий тип розряду дозволяє сконцентрувати значну потужність у невеликому об'ємі, що створює надвисокі температури. Саме висока густина теплової енергії в дузі забезпечує інтенсивне плавлення та нагрівання металу до необхідного рівня, скорочуючи тривалість процесу і знижуючи питомі витрати електроенергії.

У сучасному виробництві все ширше впроваджуються спеціалізовані дугові установки, серед яких важливе місце посідають вакуумно-дугові печі (ВДП). Такі агрегати належать до печей прямої дії. Розрізняють два їх основні різновиди: з витратним і невитратним електродом. У першому випадку дуга утворюється між плавким електродом та поверхнею металевої ванни, тоді як у другому — між нерозплавлюваним електродом (графітовим або з тугоплавкого металу) і розплавом. Плавлення відбувається в герметичній вакуумній камері, що мінімізує теплові втрати та покращує якість металу завдяки відсутності контакту з атмосферою.

Вакуумно-дугові установки не мають традиційної вогнетривкої футеровки — усі елементи, які зазнають впливу високих температур, охолоджуються водою. Така конструкція не лише забезпечує термостійкість обладнання, а й дозволяє концентрувати тепло без перевитрати енергії. Завдяки цьому створюються умови для плавлення тугоплавких металів (вольфраму, молібдену, танталу, ніобію) та активних елементів (титану, цирконію). Крім того, вакуумне середовище сприяє очищенню сталі й формуванню її покращеної мікроструктури під час кристалізації.

Джерелом енергії для плазмових печей прямої дії виступає стислий дуговий розряд із високою щільністю струму. У порівнянні зі звичайною дугою, така плазма характеризується значно вищою температурою, що в інертних газах може сягати близько 30 000 °С. Надвисока концентрація тепла забезпечує швидке плавлення металу при менших енергетичних витратах і підвищує продуктивність процесу.

Стиснення дуги може здійснюватися як магнітним полем, так і потоком газу. Використовуючи різні газові середовища — інертні або активні — можна створювати нейтральну чи реакційно-активну атмосферу, що впливає на властивості розплаву та якість кінцевого продукту. Завдяки цьому плазмові й вакуумно-дугові печі вважаються одним із найефективніших напрямів підвищення енергоефективності сучасної електromеталургії.

1.4 Порівняння особливостей роботи печей прямої і непрямой дії

Електрична дуга може передавати тепло металу двома способами. Коли вона горить між двома електродами, нагрів відбувається через випромінювання — це печі непрямой дії. Якщо ж дуга замикається між електродом і розплавом, тепло переходить безпосередньо до металу — у цьому разі йдеться про печі прямого нагріву.

У печах прямої дії зона високих температур розміщується безпосередньо над поверхнею металу. Значна частина енергії дуги одразу потрапляє до розплаву, а решта поширюється через теплопровідність. Електроди водночас виконують функцію екрана, який захищає склепіння від перегріву. Завдяки цьому забезпечується висока концентрація теплової потужності, скорочуються втрати енергії та зменшується час плавлення.

Печі непрямой дії, навпаки, мають зону високих температур, віддалену від металу. Тепло надходить до поверхні переважно після відбиття від стін і склепіння. Унаслідок цього футерівка піддається сильним тепловим навантаженням, що обмежує максимальну температуру нагріву приблизно 1300–1400 °С. Такі установки зазвичай застосовують для розплавлення чавуну у невеликих ливарних виробництвах, де не потрібні надвисокі температури.

Вертикально встановлені графітові електроди у печах прямої дії працюють на розтяг, що дозволяє використовувати стрижні великого діаметра, здатні проводити струми великої сили. Це робить такі агрегати більш потужними, місткими й продуктивними.

Хоча інтенсивне випаровування металу обмежує застосування цих печей для плавлення дорогоцінних або легколетких металів, у виробництві сталі їх переваги очевидні: висока енергоефективність, швидке досягнення необхідної температури та зменшення питомих витрат електроенергії. Саме тому трифазні дугові печі прямої дії, що працюють у повітряному середовищі, залишаються найпоширенішими у сучасній чорній металургії.

1.5 Порівняння характеристик дугових сталеплавильних печей змінного та постійного струму

Нині в ливарних цехах машинобудівних підприємств як основне обладнання для плавлення металу широко застосовують дугові сталеплавильні печі — постійного (ДППС) і змінного струму (ДСП). Обидва типи агрегатів мають подібну конструкцію основних вузлів, аналогічні схеми завантаження шихти й випуску металу, однакові вогнетривкі матеріали та забезпечують використання схожих технологічних процесів плавлення й доведення сталі.

Водночас між цими печами існують помітні конструктивні та експлуатаційні відмінності, зумовлені різницею фізичних процесів, що відбуваються у дугах постійного та змінного струму, а також специфікою взаємодії електромагнітного поля з розплавом. Врахування цих особливостей дозволяє правильно визначити сфери найраціональнішого використання кожного типу печей для підвищення енергоефективності плавильного процесу.

На відміну від триелектродних ДСП, дугова піч постійного струму обладнана лише одним вертикально розташованим електродом, який проходить через отвір у центрі склепіння та закріплений у тримачі. Така конструкція сприяє кращій герметичності, рівномірному прогріванню шихти та футерування по всьому периметру ванни, що мінімізує локальні перегріву й втрати тепла. Крім того, рівномірний розподіл температури зменшує зношування футерівки, підвищуючи загальну довговічність агрегату.

Живлення ДППС здійснюється від спеціального напівпровідникового джерела постійного струму, де негативний полюс з'єднано з верхнім електродом (катодом), а позитивний — із токопідводом до розплавленого металу (анодом). Така схема живлення забезпечує стабільніше горіння дуги, кращу теплопередачу та зменшення коливань електричної потужності, що безпосередньо впливає на зниження питомих витрат електроенергії при плавленні сталі.

Джерело живлення дугових печей постійного струму являє собою комплекс обладнання, до складу якого входять силовий трансформатор, перетворювач постійного струму, згладжувальні реактори та теплообмінник. За компактного компонування у сталеплавильному цеху пічний трансформатор зазвичай розміщують на нульовій позначці, а над ним встановлюють перетворювач, реактори та теплообмінники, що забезпечує зручність обслуговування і зменшує втрати електроенергії на передачу.

Перетворювач постійного струму оснащений високошвидкісним електронним регулятором із часом реакції близько 6–10 мс, що гарантує стабільність струму та точне регулювання режиму дуги в широкому діапазоні напруг. До системи керування печі також входить регулятор, який підтримує необхідний рівень напруги дуги за допомогою осьового переміщення електрода. Зміна довжини дуги відбувається з постійною часу приблизно 0,3–1,5 с, що дозволяє оперативно компенсувати коливання напруги під час плавлення.

У дугових печах змінного струму, навпаки, застосовуються менш швидкодіючі регулятори, які впливають лише на положення електродів, що робить процес керування менш точним. Завдяки стабільнішому електричному режиму ДППС забезпечує зниження амплітуди коливань напруги дуги у фазі розплавлення в порівнянні з ДСП. Це досягається за рахунок утримання електрода над рівнем шихти без занурення в так званий “колодязь”, що дозволяє ефективніше використовувати потужність трансформатора — на 10–15% більше, ніж у печах змінного струму.

Наявність двох незалежних регуляторів струму та напруги дає змогу підтримувати у ДППС стабільний електричний режим, уникати впливу струмів суміжних фаз і усувати явища переносу чи перекоосу потужності. Завдяки цьому дугові печі постійного струму характеризуються вищою енергоефективністю, меншими втратами електроенергії та підвищеною надійністю роботи.

У трифазних дугових печах змінного струму зменшити нерівномірність режимів між фазами можна за допомогою сучасних регуляторів, проте повністю усунути асиметрію фаз і електродів усе ж неможливо. У печах постійного струму, завдяки високій герметичності та стабільному тиску в робочому просторі, усувається підсмоктування повітря, що значно знижує окислення шихти під час плавлення. Втрати металу становлять не більше 3 % для ДППС, тоді як у ДСП вони сягають 9–10 %. Крім того, у ДППС істотно зменшуються пилогазові викиди та рівень шуму: середній показник становить близько 85 дБА, тоді як у ДСП — 105–110 дБА [7].

Незалежна робота регуляторів струму й напруги дозволяє точніше дозувати теплове навантаження на футерівку в усі фази плавлення, що сприяє її довговічності та енергоощадності процесу.

Одним із ключових елементів печі постійного струму є струмопідвід до шихти — подовий електрод. Його конструкція включає сталеву головку, що контактує з рідким металом, та мідний корпус із водяним охолодженням. Охолоджувальна зона винесена за межі корпусу, а контроль температурного стану здійснюється термопарами.

Експлуатаційна надійність і тривалість служби подини з подовими електродами у ДППС та у ДСП є практично рівноцінними. Завдяки властивості електрода до самовідновлення під час плавлення й можливості гарячого ремонту між циклами, тривалість його безперервної роботи становить 2000–3000 плавок. Після цього електрод проходить технічне обслуговування й повторно встановлюється на піч.

У процесі плавлення напруга дуги поступово зменшується — від початкового максимуму після запуску до величин у 2–3,5 рази нижчих наприкінці розплавлення шихти, що сприяє стабільнішому електричному режиму й ефективнішому використанню енергії.

Для збереження сталої потужності під час роботи дуги зменшення напруги компенсують відповідним збільшенням струму. Це реалізується за рахунок конструктивних рішень у системі живлення, які дозволяють

підтримувати роботу печі на рівні, максимально наближеному до номінальної потужності джерела [3, 4].

Використання багатопульсних схем випрямлення та оптимальних режимів живлення забезпечує низький рівень вищих гармонік струму, що надходять у енергомережу, зменшуючи електромагнітні завади та підвищуючи енергоефективність установки.

Результати експериментальних досліджень і математичного моделювання показують, що у печах ємністю 0,5–25 тонн швидкість руху рідкого металу в центральній зоні ванни становить 0,12–0,35 м/с. Це відповідає умовам інтенсивної турбулентності, за яких досягається ефективне вирівнювання температурного поля та рівномірне розподілення легувальних елементів.

Застосування електромагнітного перемішування разом із формуванням відновлювальної атмосфери в робочому просторі печі сприяє раціональнішому використанню феросплавів.

У печах постійного струму розплав контактує лише із анодною плямою дуги, тоді як у печах змінного струму чергуються анодна та катодна ділянки. Оскільки тепловий потік і щільність струму в анодній плямі менші, у ДППС інтенсивність випаровування металу та шлаку значно нижча, а утворення пилу зменшується у 6–8 разів. Утрати шихти знижуються на 5–7 %, а витрати феросплавів — на 20–30 % [8–10].

Ще однією суттєвою перевагою є скорочення витрат графітованих електродів: у дугових печах змінного струму вони сягають щонайменше 6 кг на тонну сталі, тоді як у печах постійного струму не перевищують 1,5 кг/т, що додатково підвищує загальну енергоекономічність процесу.

Переваги дугових печей постійного струму (ДППС) особливо помітні у випадках, коли під час розплавлення не використовують газокисневі пальники, кисневу підрізку шихти та інші джерела хімічного тепла, що створюють окислювальне середовище та спричиняють додаткові викиди парникових газів. Це має особливе значення для численних ливарних

підприємств, де відсутні умови для широкого впровадження кисневих технологій або двостадійних процесів, типових для великої металургії.

Водночас слід враховувати, що вартість ДППС на 10–35 % вища за печі змінного струму (ДСП) через потребу у напівпровідниковому джерелі живлення. Проте при необхідності встановлення потужних систем газоочищення для ДСП, а також компенсуючих пристроїв для стабілізації якості електроенергії, загальні капітальні витрати стають приблизно рівнозначними.

У деяких випадках вибір типу агрегату визначається техніко-економічними умовами. Якщо мережа живлення має недостатню потужність (потужність короткого замикання менша ніж у сто разів від номінальної потужності трансформатора), то перевага однозначно на боці печей постійного струму. Таким чином, у разі обмеженої енергомережі або необхідності плавлення високоякісних сталей доцільно віддавати перевагу ДППС [11].

Для виробництва звичайних сталей при достатній потужності мережі вибір між ДСП і ДППС має базуватися на техніко-економічних розрахунках. Практичний досвід модернізації дугової печі змінного струму ємністю 25 тонн показав, що оновлення гідравлічних механізмів, впровадження сучасних систем керування та автоматизації процесів дає змогу скоротити тривалість плавки та зменшити енергоспоживання.

Проте повний ефект від застосування сучасних механізмів, автоматичних систем і адаптивних алгоритмів управління реалізується переважно в печах постійного струму. Саме ДППС мають додаткові резерви підвищення ефективності завдяки своїм конструктивним і технологічним перевагам. Найбільш раціональним напрямом розвитку є модернізація застарілих ДСП із переходом на постійний струм, що дозволить поєднати технологічні переваги ДППС із можливостями сучасних систем автоматизованого керування та виконавчих механізмів.

Таблиця 1.1 - Порівняння характеристик дугових сталеплавильних печей змінного та постійного струму

Показники	ДСП (змінного струму)	ДППС (постійного струму)
Питомі витрати електроенергії, кВт·год/т	340,0	315,0
Витрати електродів, кг/т	4,0–5,5	0,8–1,5
Витрати кисню, м ³ /т	48,0	28,0
Рівень шуму, дБА	105,0–110,0	85,0
Викид газів (СО та ін.), відносна величина	1,0	0,8
Витрата вогнетривів, кг/т	6,0	4,0
Відносна вартість	0,7	1,0

Хоча ДППС дорожча за ДСП, її експлуатаційні показники (енергоефективність, екологічність, зменшене споживання електродів і кисню) компенсують початкові капітальні витрати.

1.6 Висновки по розділу

У цьому розділі проаналізовано основні типи дугових сталеплавильних печей та їхні експлуатаційні особливості. З енергетичної точки зору, доцільним є вдосконалення саме електричного режиму роботи дугових печей змінного струму, оскільки вони залишаються найпоширенішими в сучасній металургії. Такі агрегати відзначаються високою продуктивністю, здатністю забезпечувати інтенсивні теплові процеси та відносно низькою собівартістю виплавленого металу.

Хоча перехід на технологію постійного струму має певні переваги з точки зору енергоефективності та екологічності, його реалізація вимагає значних капіталовкладень, пов'язаних із придбанням і впровадженням

потужних перетворювачів струму. Тому для більшості підприємств економічно виправданішим є не повна модернізація, а оптимізація існуючих режимів роботи печей змінного струму — шляхом удосконалення систем керування, вибору раціональних електричних параметрів та підвищення ефективності використання енергії.

Отже, підвищення енергоефективності дугових сталеплавильних печей змінного струму шляхом оптимізації їх електротехнічних та технологічних режимів є найбільш практичним і раціональним напрямом розвитку сучасного електросталеплавильного виробництва.

2 ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ДУГИ ТА ФАКТОРИ, ЩО ВИЗНАЧАЮТЬ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ДУГОВИХ ПЕЧЕЙ

2.1 Оцінка впливових чинників на рівень енергоспоживання

Дугові сталеплавильні печі належать до найбільш енергоємного обладнання в металургійному виробництві. Для сучасних надпотужних установок типовим є показник, за якого на плавлення однієї тонни сталі витрачається близько 1 МВА встановленої потужності.

Основними параметрами, що формують споживання електричної енергії, виступають: сила струму дуги, напруга дуги, її потужність, коефіцієнт потужності, а також втрати енергії у живильному електричному контурі.

Склад шихти, зокрема співвідношення сталевого брухту та рідкого чавуну, визначає характер та тривалість окремих стадій плавлення. У процесі роботи піч послідовно переходить між технологічними етапами, що відрізняються енергетичними параметрами. Критерієм таких переходів є питома витрата електроенергії дугового розряду, розрахована відносно маси металеві шихти, яка завантажується в поточному циклі плавки.

2.1.1 Типи завантаження та їх вплив на енергоспоживання

У практиці експлуатації дугових сталеплавильних печей застосовують п'ять основних варіантів шихти, що відрізняються часткою металобрухту та рідкого чавуну:

- Варіант №1 — запуск після тривалої зупинки або технічного обслуговування;
- Варіант №2 — повне завантаження металобрухтом;
- Варіант №3 — 75% металобрухту і 25% рідкого чавуну;
- Варіант №4 — 60% металобрухту та 40% чавуну;
- Варіант №5 — робота без використання СТК.

Перший і п'ятий варіанти практично не застосовуються через низьку продуктивність агрегату. Основними вважаються №2, №3 та №4, при цьому максимальні енергетичні витрати припадають на повне завантаження металобрухту (№2), оскільки для його розплавлення потрібна більша питома потужність у порівнянні з чавуном.

2.1.2 Сучасні підходи до енергоефективного управління

Сучасна оптимізація роботи ДСП ґрунтується на взаємозв'язку електричних параметрів і швидкості технологічних процесів. На стадії твердого металу основним показником є темп розплавлення шихти, тоді як у рідкому стані — інтенсивність нагріву металу.

Виділяють три ключові стратегії економії електроенергії:

1. Режим проплавлення колодязів — забезпечення максимальної довжини дуги для ефективного переносу тепла у ванну.
2. Режим плавлення шихти — найбільш тривалий і енергоємний етап. Оптимізація досягається при максимальному значенні коефіцієнта зносу футеровки ($K_{ЗФ}$), що відображає випромінювальну здатність дуги:

$$K_{ЗФ} = \frac{P_d \cdot U_d}{a^2} \max,$$

де P_d — потужність дуги, U_d — напруга дуги, a — відстань між електродом та стінкою печі.

3. Режим нагрівання рідкого металу — підтримання максимального коефіцієнта інтенсивності нагріву ($K_{ІН}$), який характеризує швидкість підвищення температури:

$$K_{ІН} = (P_d \cdot I_d) \max,$$

де I_d — струм дуги.

2.1.3 Енергетичні переваги оптимізації

Впровадження зазначених підходів дозволяє зменшити споживання електроенергії, скоротити тривалість плавки та підвищити продуктивність печі. Додатково це знижує ступінь зношування футеровки та зменшує питомі витрати на обслуговування обладнання.

2.2 Електрична дуга, технологія плавки та оптимізаційні підходи

Електрична дуга характеризується різними формами вольтамперних динамічних характеристик, які можуть бути ламаними, прямими або вигнутими. У більшості випадків її поведінку можна відобразити, як показано на рисунку 3.1.

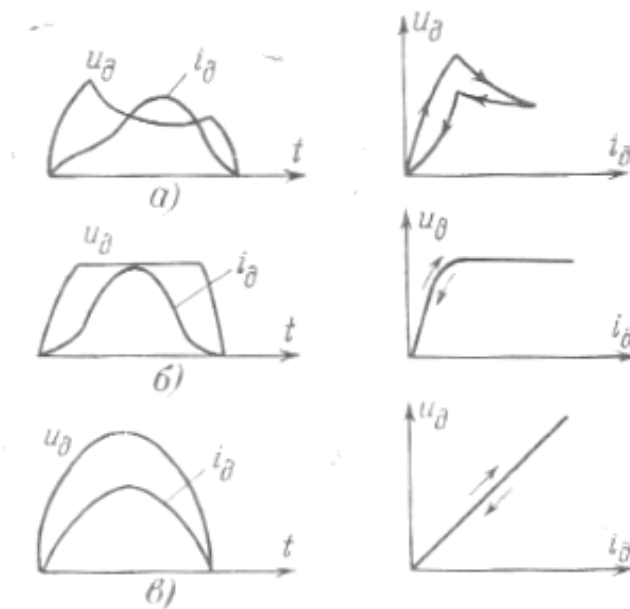


Рисунок 2.1 – Типові динамічні характеристики дуги (ДВАХ):

- а) малопотужна дуга; б) дуга для ДСП на початкових та середніх етапах плавки; в) дуга для ДСП у стійкому режимі наприкінці плавки.

На рисунку 2.1,а показано характеристику дуги змінного струму в атмосфері відкритого повітря, що призводить до інтенсивного охолодження. Разом із цим відображено осцилограми струму та напруги.

Під час проходження струму через нуль газовий проміжок охолоджується та деіонізується, внаслідок чого опір зростає. Для підтримки струму необхідне підвищене значення напруги, що проявляється як пік запалювання дуги. При збільшенні струму напруга зменшується і досягає мінімального значення на піку струму. Зниження струму супроводжується новим підйомом напруги, який зазвичай нижчий за початкову амплітуду і визначається як напруга затухання дуги.

Із збільшенням потужності дуги та зменшенням її охолодження піки запалювання і затухання знижуються, а форма кривої напруги наближається до трапецієподібної, тоді як вольтамперна характеристика набуває ламаної конфігурації (рисунок 2.1, б). Саме така поведінка є типовою для дуг сталеплавильних печей.

У випадку, якщо дуга має високий рівень теплоізоляції і значну потужність, її електропровідність практично не змінюється протягом періоду. У цьому випадку криві напруги і струму наближаються до синусоїдальної форми, а динамічна характеристика дуги представляє похилу пряму (рисунок 2.1, в).

Таким чином, у більшості випадків дуги змінного струму демонструють відхилення від синусоїди, і частина періоду може проходити без струму через дуговий проміжок. При синусоїдальному живленні дуга здатна горіти безперервно, а струм плавно переходить через нуль без перерв.

Можливий також переривчастий нестійкий режим, коли дуга в деякі моменти не запалюється і зрештою гасне. Форма кривих напруги і струму, режим горіння (безперервний або переривчастий) та стабільність дуги залежать від низки факторів: характеру джерела живлення (амплітуда та частота напруги), потужності дуги, теплового стану газового проміжку (ступінь ізоляції дуги) та параметрів електричного контуру, що включає дугу.

Головне завдання дугової сталеплавильної печі полягає у виплавці сталі з металобрухту. У таких печах зазвичай отримують високолеговані

марки металу, для яких важливо забезпечити ретельне видалення шкідливих домішок, зокрема сірки, а також усунути неметалічні включення та газу.

Процес виробництва легованих сталей складається з кількох етапів: плавлення шихти, очищення від домішок і газів, розкислення, введення необхідних легуючих елементів та перелив металу в розливний ківш.

Послідовність плавлення шихти в дуговій печі ілюструється на рисунку 2.2.

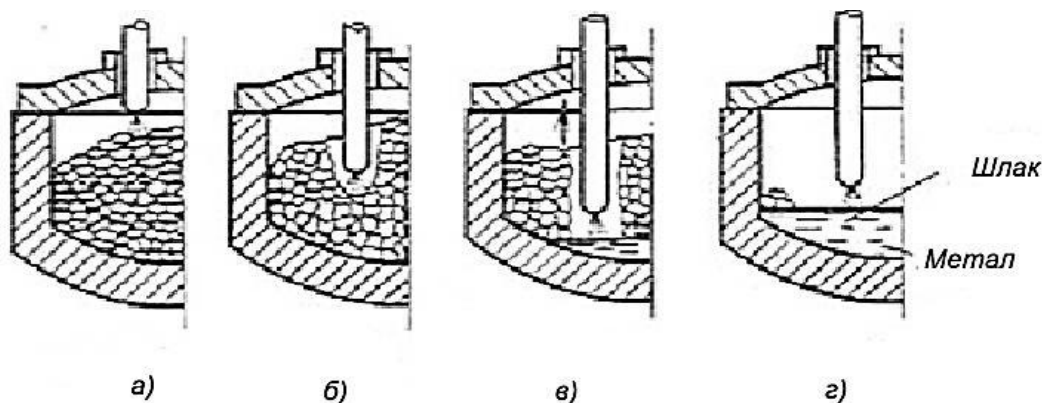


Рисунок 2.2 - Послідовність плавлення шихти

Дуга спочатку виникає між кінцем електрода та поверхнею шихти (рисунок 2.2, а). Поступово в шихті формуються колодязі, у які занурюються електроди. Їхнє опускання триває до моменту досягнення дна ванни (рисунок 2.2, б). Дуга, що горить між електродом і розплавом, нагріває метал, починається розмив та плавлення шихти в колодязях (рисунок 2.2, в). Колодязі розширюються, рівень рідкого металу підвищується, а електроди починають підніматися. На завершальному етапі більшість металу перебуває в розплавленому стані, а дуга горить у спокійному і стійкому режимі (рисунок 2.2, г). Після цього здійснюють злив розплавленого металу та завантаження нового брухту для початку наступного циклу плавки.

Умови теплообміну, що визначають нагрівання ванни дугової сталеплавильної печі, є складними та багатofакторними. Теплова енергія надходить до ванни ззовні через шлакову поверхню та генерується всередині завдяки внутрішнім джерелам. Зовнішніми джерелами виступають

електричні дуги, паливно-кисневі пальники і нагріті гази, що заповнюють робочий простір печі, якщо їх температура перевищує температуру розплаву. Такі умови створюються, наприклад, при допалюванні двовалентного оксиду вуглецю біля поверхні ванни. Внутрішнє нагрівання забезпечують хімічні реакції окислення вуглецю, заліза та його легуючих домішок, таких як кремній і марганець.

Ванна втрачає тепло через виділення бульбашок двовалентного оксиду вуглецю, теплопровідність через кладку подини і укосів, а також випромінювання шлакової поверхні на охолоджувані водою панелі стін і склепіння. Значна частина отриманого тепла використовується для нагріву зануреного в розплав металобрухту. Основні втрати тепла визначаються випромінюванням і утворенням бульбашок, інші витрати у інженерних розрахунках можна не враховувати.

Головним джерелом теплової енергії залишаються електричні дуги, які забезпечують нагрів металобрухту зверху. За останні 30–40 років потужність дуг зросла більш ніж у чотири рази. При цьому тепловий потік розподіляється нерівномірно, концентруючись у центральній частині ванни, що забезпечує інтенсивне нагрівання верхнього шару металу.

Раціональним підходом до нагріву рідких металевих ванн є прогрів знизу, оскільки менш щільні розплавлені маси піднімаються вгору, а холодні тверді частини брухту опускаються вниз. Це призводить до природного перемішування вмісту без додаткових джерел енергії, яке називають гравітаційним. Інтенсивність такого перемішування зростає разом із потужністю джерела нагріву.

У дугових печах нагрів відбувається зверху, через що гравітаційне перемішування практично відсутнє. Крім того, рідка сталь має високу теплопровідність у порівнянні з неметалевими рідинами. Перемішування розплаву забезпечується спливаючими бульбашками чадного газу, що утворюються при окисленні вуглецю киснем ванни. У печах великої

потужності для посилення циркуляції розплаву застосовують донне продування інертним газом, зазвичай аргоном.

У дугових сталеплавильних печах перемішування розплаву називають циркуляційним. Спостереження показують, що вміст ванни постійно перебуває в русі. Горизонтальні потоки мають порівняно невеликі лінійні швидкості — близько 1–1,5 м/с, але завдяки великій щільності металу (7830 кг/м³) значення критерію Re досягають 100 000–1 000 000, що свідчить про виражений турбулентний характер руху. Крім горизонтальної циркуляції, у ванні формуються вертикальні потоки зі схожими швидкостями та турбулентністю. Разом ці рухи забезпечують ефективне циркуляційне перемішування металу.

Інжекція вуглецю у ванну виконує два технологічні завдання: спінювання шлаку та відновлення окислів заліза для підвищення виходу придатного металу. Шлак вспінюють для занурення в нього дуг.

Для зменшення споживання електроенергії при нагріванні металобрухту застосовують його попередній прогрів за рахунок використаних димових газів.

Перший метод передбачав нагрівання брухту у корзинах, які широко використовувалися для завантаження в піч. Іноді для досягнення вищих температур застосовували спеціальні бадді з жароміцної сталі, оснащені пальниками.

Для конвеєрного підігріву використовували два основні типи пристроїв: стрічкові конвеєри спеціальної конструкції та секціоновані шахтні підігрівачі. На стрічковому конвеєрі брухт переміщується до печі горизонтально, аналогічно процесу Consteel. Секціонований шахтний підігрівач встановлюється вертикально над піччю, і брухт поступово переміщується з верхніх секцій у нижні під дією гравітації, нагріваючись по мірі проходження.

Принципова схема такого пристрою наведена на рисунку 3.3. Ємність, встановлена в камері нагрівання, забезпечена верхньою камерою, куди

надходять гази з високою температурою — або від печі, або від згоряння палива у пальниках. Камера рівномірно розподіляє тепло по перерізу шару брухту. Проходячи зверху вниз через ємність, гази віддають енергію металобрухту, охолоджуються та виходять через отвори в нижній частині. Після цього нагрітий лом за допомогою відкриваючого днища потрапляє у піч.

Розглянемо основні закономірності нагріву брухту за схемою, наведеною на рисунку 2.3, без занурення в складні розрахунки нестационарного процесу. На відміну від окремих шматків, теплопровідність шару брухту, як у вертикальному, так і в горизонтальному напрямку, визначається контактом між окремими елементами і настільки мала, що її можна не враховувати у розрахунках. Через це теплові втрати через бічні стінки ємності невеликі, і її охолодження повітрям або водою не впливає істотно на ефективність нагріву.

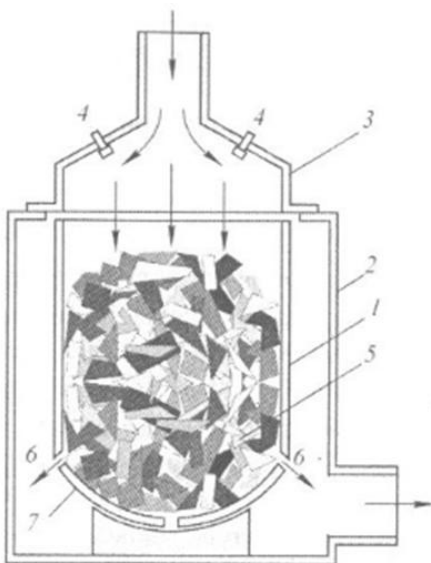


Рисунок 2.3 - Схема підігріву металобрухту в завантажувальному кошику: 1 — ємність; 2 — камера нагрівання; 3 — верхня камера; 4 — пальники; 5 — металобрухт; 6 — отвори для виходу охолоджених газів; 7 — спадне днище для подачі брухту в піч.

Аналогічно, можна знехтувати передачею тепла випромінюванням від нагрітих газів, оскільки проміжки між шматками мінімальні, а гази в них мають низький ступінь поглинання.

У шарі брукхту тепло передається конвекцією від гарячих газів, що контактують із поверхнею шматків, та випромінюванням між нагрітими елементами. Випромінювання починає відігравати істотну роль при температурах понад 300–350 °С.

Недоліком цього методу є обмеження середньої температури брукхту — досягти 600–700 °С за рахунок гарячих газів неможливо без значного збільшення часу нагріву, що подовжує плавильний цикл і неприпустимо в промислових умовах.

Конвеєрний метод дозволяє швидко прогрівати матеріал до високих температур завдяки двом чинникам: шар брукхту має невелику товщину, а нагріту порцію можна одразу вивести з зони нагріву. Це запобігає перегріванню і водночас дозволяє підтримувати потужність джерела тепла.

У промислових сталеливарних установках Consteel конвеєрний нагрів застосований на практиці. Проте високих температур досягти не вдалося: при довжині стрічки близько 30 м металобрукхт нагрівався до рівня, порівнянного з нагрівом у завантажувальних кошиках. Витрати електроенергії на таких установках суттєво не відрізняються від показників сучасних дугових печей без попереднього підігріву.

Низька ефективність використання тепла відхідних газів у процесі Consteel пояснюється недостатньою організацією теплопередачі від газів до металобрукхту. Газу рухаються в тунелі паралельно поверхні шару і не проникають у проміжки між шматками. Їх об'єм у порівнянні з перетином тунелю недостатній, що знижує швидкість руху та інтенсивність передачі тепла. Внаслідок цього прогривається переважно верхній тонкий шар брукхту. Випромінювання газів і теплопередача від футерування тунелю також впливають лише на верхні частини шару, оскільки вони екранують нижні елементи.

Для досягнення високих температур на конвеєрі основним джерелом тепла повинні виступати потужні пальники, а не відхідні газу. Тунель при цьому розділяється на дві зони: перша, розташована ближче до печі,

забезпечує інтенсивний нагрів брухту пальниками; друга зона займає більшу частину тунелю і використовується для попереднього прогріву металобрухту завдяки теплу газів, що надходять із першої зони. Така протитечійна схема, при якій металобрухт рухається назустріч потоку газів, дозволяє ефективно використовувати їх тепло та реалізувати основні переваги конвеєрного підігріву.

На рисунку 2.4 показана принципова схема конвеєрного нагріву брухту.

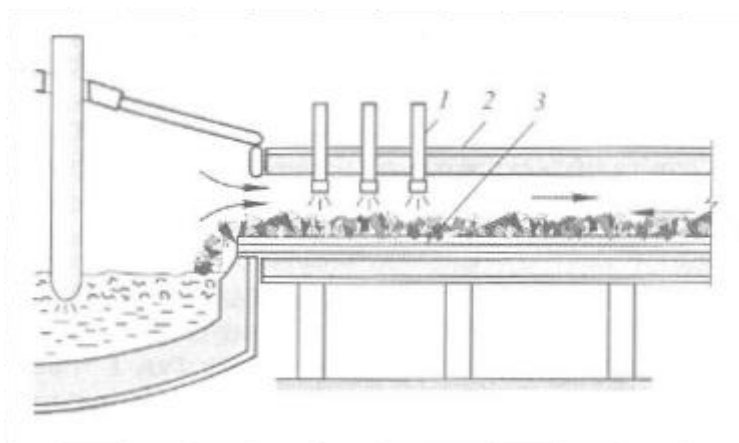


Рисунок 2.4 - Схема конвеєрного нагріву металобрухту:

1 - газокисневі пальники; 2 — тунель для руху металобрухту; 3 — спеціальний жароміцний конвеєр, що забезпечує переміщення матеріалу через зону нагріву.

У першій зоні потужні факели сводових пальників, що мають високу кінетичну енергію, спрямовуються під прямим кутом на поверхню металобрухту. Нагріті гази проходять крізь шар брухту, розтікаються під ним по поверхні конвеєра та повертаються в тунель, повторно омиваючи шматки. Така організація потоків забезпечує інтенсивну передачу тепла та швидкий, відносно рівномірний нагрів металобрухту.

Ефективність цього підходу підтверджена практикою конвертерного виробництва сталі. У минулому метод активно використовувався для попереднього прогріву брухту перед заливкою чавуну за допомогою високоміцних газо- або мазутокисневих пальників. Пальники встановлювали

поряд із кисневими фурмами і на час нагріву опускали у порожнину конвертера. Зазвичай використовувалися джерела потужністю 160–180 МВт, що дозволяло підняти середню температуру 100 т брукхту до 700 °С приблизно за 7 хвилин. Було встановлено, що середньомасова температура не повинна перевищувати 800 °С, оскільки при вищих значеннях економічність нагріву значно падає.

2.3 Висновки по розділу

Дослідження роботи дугових сталеплавильних печей проводять на діючих установках за допомогою реєстрації осцилограм струму та напруги на дугах і різних ділянках електричного контуру, а також аналізу динамічних вольтамперних характеристик. Умови експлуатації ускладнюють безпечне проведення вимірювань та потребують захисту приладів від сторонніх електромагнітних впливів. Тому обробку виконують на основі вже зібраних даних за допомогою програмного комплексу ARF.

Аналіз осцилограм демонструє, що параметри дуги та криві струму і напруги змінюються протягом плавки. Для отримання стабільних характеристик застосовують статистичні методи. Криві напруги на дузі зазвичай мають опуклу форму та знаходяться між прямокутною та синусоїдальною. Підвищення питомої потужності і струму забезпечує стабільніше горіння дуги та наближення кривої до синусоїдальної.

На початковому етапі плавки криві сильно спотворені через формування колодязів, тоді як під час окислення і рафінування режим стає стійкішим. Дуга також створює високочастотні гармонійні складові, що погіршують якість електроенергії, підвищують струми в конденсаторних батареях і можуть призводити до їх перегріву. У випадку наявності кабельних вставок можливий резонанс із виникненням високочастотних коливань, що прискорює старіння ізоляції. Окремі осцилограми показують "вентильний ефект", коли катод з металу високої теплопровідності обмежує

термоелектронну емісію, зменшуючи струм і збільшуючи напругу на дугах у певні напівперіоди.

Електрична дуга нагріває метал у ванні печі та забезпечує циркуляцію рідкого металу. Горизонтальні та вертикальні потоки із швидкістю 1–1,5 м/с створюють турбулентне перемішування, а інжекція вуглецю сприяє вспінюванню шлаку та відновленню окислів заліза, підвищуючи вихід придатного металу.

Нагрів металобрухту здійснюють у кошиках або на конвеєрі. У кошиках тепло передається конвекцією від гарячих газів та випромінюванням між шматками. Через низьку теплопровідність шару та невеликі зазори втрати тепла через бічні стінки мінімальні. Обмеження середньої температури брухту до 600–700 °С забезпечує оптимальну тривалість плавки.

Конвеєрна система дозволяє швидко прогрівати тонкі шари брухту, виводячи порції з зони нагріву після досягнення потрібної температури, що запобігає перегріванню. У промислових установках Consteel застосовані газокисневі пальники, тунель та жароміцний конвеєр. Потоки газів проходять крізь шар металобрухту та повторно омивають його, забезпечуючи рівномірний нагрів. Для високотемпературного прогріву тунель поділений на дві зони: перша, ближче до печі, забезпечує інтенсивний нагрів пальниками; друга використовує відхідне тепло газів для попереднього прогріву у протитечійній схемі.

Математичне моделювання дозволяє оцінити електричні та технологічні параметри печі, враховуючи нелінійність дуги, умови її горіння та теплообмін. Для спрощення розрахунків приймають синусоїдальні криві струму та напруги у вторинній обмотці трансформатора та стійкий симетричний режим дуги.

3 МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ДУГИ

Існують три основні підходи до оцінки електричних режимів дугових печей:

1. Представлення дуги як активного опору;
2. Використання постійної напруги дуги протягом періоду її горіння;
3. Опис дуги нелінійною ланкою через диференціальне рівняння Кассі.

У першому підході дуга моделюється як лінійний опір, при якому напруга прямо пропорційна струму. Перевагою є простота обчислень, проте недоліком є значна похибка та ігнорування гармонійного складу струмів і напруг мережі. Цей метод був запропонований у середині минулого століття та широко використовувався для спрощених оцінок.

Метод С.І. Тельного більш точний, оскільки враховує нелінійні властивості дуги. Дуга представлена постійною електрорушійною силою під час горіння та може бути описана схемою заміщення. Цей підхід дозволяє врахувати «вентильні» властивості дуги, тобто нелінійну залежність напруги від струму, а також фазову асиметрію. Коефіцієнт, що відображає співвідношення струму та напруги, змінюється в широкому діапазоні. Метод також дозволяє визначити граничний струм, при якому горіння дуги переходить з переривчастого в безперервний режим, хоча точність обмежена через неврахування часу реакції дуги.

Найбільш точним є третій підхід, який одночасно враховує три взаємопов'язані параметри: миттєву напругу на дузі, постійну часу проти-ЕРС та поточне значення струму. Така модель дозволяє адекватно відобразити динаміку дуги та її вплив на електричні та технологічні характеристики печі.

3.1 Моделювання дуги змінного струму на основі рівняння Кассі

Рівняння Кассі дозволяє враховувати зміну провідності дуги в часі та її реакцію на коливання струму. На відміну від спрощених лінійних моделей,

цей підхід описує реальний перехід між стійкими та нестійкими режимами горіння, що робить його більш адекватним для аналізу електричних характеристик дугових сталеплавильних печей.

Нелінійна динаміка електричної дуги описується рівнянням Кассі, яке встановлює взаємозв'язок між трьома ключовими параметрами розряду: миттєвою напругою на дузі $u_d(t)$, проти - ЕРС E_d та змінною у часі провідністю $g_d(t)$. Ця залежність може бути записана у вигляді:

$$\theta_d \frac{dg(t)}{dt} = \left(\frac{u_d^2(t)}{E_d^2} - 1 \right) g(t), \quad (3.1)$$

де $g = i_d/u_d$ - миттєве значення електропровідності дугового проміжку, см;

θ_d - теплова стала часу дуги, яка характеризує швидкість зміни її провідності внаслідок теплових процесів. Для різних етапів плавлення сталі цей параметр змінюється в діапазоні від 0,1 до 5 мс, що відображає зміну динаміки енергетичного обміну в залежності від режиму горіння.

Таким чином, рівняння Кассі описує тимчасову еволюцію електропровідності дуги, враховуючи як теплову інерцію плазмового стовпа, так і вплив прикладеної напруги. Це дозволяє отримати більш реалістичну модель її поведінки під час змінних електричних навантажень у сталеплавильних агрегатах.

Характерною рисою рівняння Кассі є наявність ключового параметра — теплової сталої часу θ_d , що визначає інерційність теплових процесів у стовпі дуги. Урахування цього параметра дає змогу при математичному моделюванні коректно відображати умови її горіння на різних етапах плавлення металу.

Для визначення електричних характеристик дугового процесу застосовується система рівнянь миттєвих значень струмів та напруг, сформульована на основі основних законів електротехніки. Ця система дозволяє встановити взаємозв'язок між струмом дуги, прикладеною

напругою та її електропровідністю з урахуванням змінних режимів роботи сталеплавильної печі:

$$u'_{1\phi} = i_{\pi} R_{\Sigma} + L_{\Sigma} \frac{di_{\pi}}{dt} + u_{\pi} \quad (3.2)$$

де $L_{\Sigma} = X_{\Sigma} / 2\pi f_c$ – значення сумарної індуктивності електричного контуру ДСП;

$f_c = 50 \text{ Гц}$ – частота мережі.

Отриманий вираз можна перетворити відносно напруги дуги, яку визначають за формулою (3.3):

$$u_{\pi} = u'_{1\phi} - i_{\pi} R_{\Sigma} - L_{\Sigma} \frac{di_{\pi}}{dt} \quad (3.3)$$

$i_{\pi}(t)$ — миттєве значення струму дуги;

R_{Σ} — сумарний активний опір кола.

Миттєвий струм через дугу виражається як $i_{\pi} = u_{\pi} \cdot g_{\pi}$

З рівняння Кассі миттєва провідність визначається за формулою (3.4):

$$g_{\pi i} = \frac{1}{\theta_{\pi}} \int \left(\frac{u_{\pi}^2}{E_{\pi}^2} g_{\pi i-1} - g_{\pi i-1} \right) dt + g_{\pi 0} \quad (3.4)$$

де $g_{\pi 0}$ - початкова величина провідності дуги в момент з'явлення напруги.

Використовуючи стандартний вираз перетворення Лапласа $p = d/dt$, записуємо операторами останні три вирази і даємо структурну інтерпретацію для складання схеми на Рис. 3.1:

$$\left. \begin{aligned} u_{\pi}(p) &= u'_{1\phi}(p) - i_{\pi}(p) R_{\Sigma} - L_{\Sigma} i_{\pi}(p) p \\ g_{\pi}(p) &= \frac{1}{\theta_{\pi} p} \left(\frac{u_{\pi}^2(p)}{E_{\pi}^2} g_{\pi}(p) - g_{\pi}(p) \right) \\ i_{\pi}(p) &= u_{\pi}(p) g_{\pi}(p) \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

На рисунку 3.1а приведена блокова схема однієї фази дугової печі, побудована за рівнянням Кассі.

На рисунку 3.1б наведена осцилограма миттєвих значень напруги й струму дуги, отримана на основі моделі Кассі.

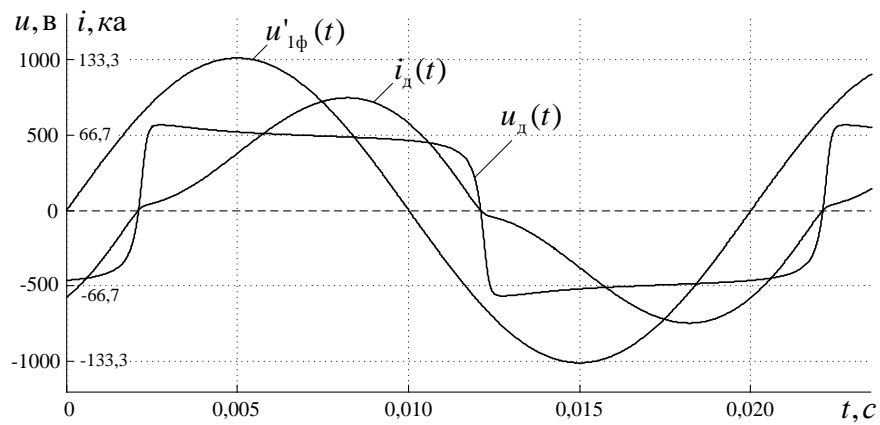
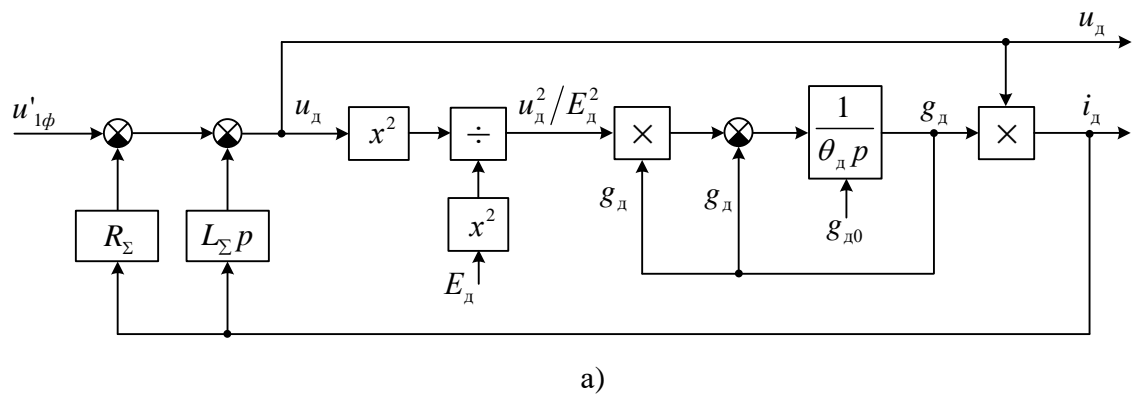


Рисунок 3.1 – Структурна модель фази дугової сталеплавильної печі, побудована за рівнянням Кассі (а – схема взаємозв’язків елементів; б – осцилограми миттєвих напруг і струмів дуги).

На рисунку 3.1, б подано миттєві значення фазної напруги живлення $u'_{i\phi}(t)$, напруги $u_d(t)$ та струму дуги $i_d(t)$. Урахування теплової сталої часу θ_d призводить до появи характерного пікового підйому напруги в момент запалювання розряду.

Рисунок 3.2 демонструє серію вольтамперних характеристик однофазної дуги для різних значень θ_d , отриманих на основі моделі, наведеної на рисунку 3.1, а. Зі збільшенням θ_d змінюється форма динамічної вольтамперної характеристики (ДВАХ) і зменшується її площа, що визначає

реактивну складову потужності дуги. Відповідно, активна енергія, яка надходить у піч, знижується.

Значення θ_d дозволяє оцінювати поточну технологічну фазу плавлення: на початковій стадії розплавлення шихти вона становить близько 0,2–0,6 мс, під час утворення рідкої фази підвищується до 1–1,5 мс, а при роботі дуг у шлаковому середовищі досягає 3–5 мс. У цей період форма кривих струму та напруги наближається до синусоїдальної. Коректне вибирання θ_d протягом плавки забезпечує достовірне моделювання електричних процесів у дузі й дозволяє оцінювати реальні значення струму, напруги та споживаної потужності.

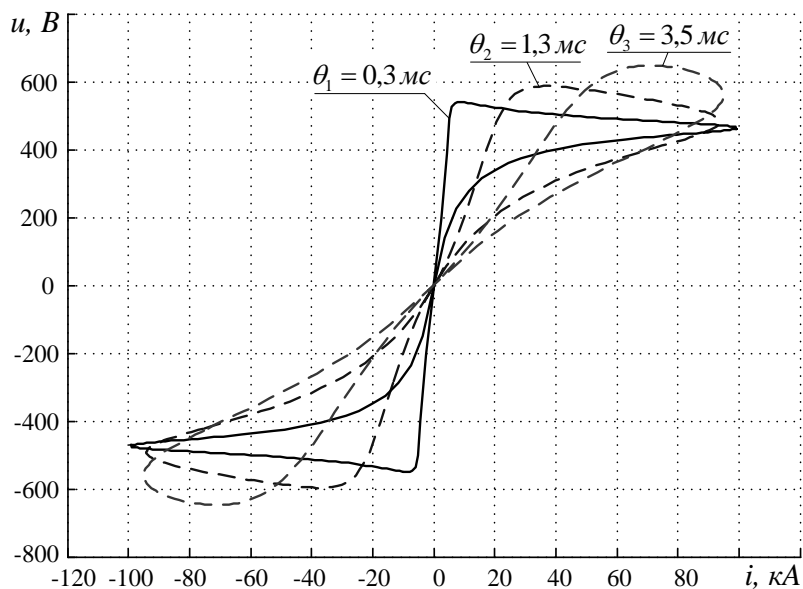


Рисунок 3.2 - Вольтамперні характеристики однофазної електричної дуги (а – $\theta=3$ мс; б – $\theta=1,3$ мс; в – $\theta=3,5$ мс).

Якщо дуговий розряд розглядати як нелінійну ланку, описану рівнянням Кассі, то форма струму в дузі, а також у живильному колі, відхиляється від синусоїдальної. У цьому випадку визначення електричних параметрів дугової сталеплавильної печі здійснюють за послідовністю

обчислень, починаючи з активної складової потужності, яку обчислюють за формулою (3.5):

$$P_{\text{акт}} = \frac{1}{T} \int_0^T u'_{1\phi} i_{\text{д}} dt \quad (3.5)$$

де $u'_{1\phi}$, та $i_{\text{д}}$ – миттєві значення фазної напруги джерела живлення та струму дуги;

$T=0,02$ с – період напруги живлення.

Враховуючи, що в потужних електросистемах напруга живлення практично синусоїдальна, активна складова потужності передається переважно першою гармонікою і обчислюється за формулою (3.6):

$$P_{\text{акт}} = U'_{1\phi(1)} I_{\text{д}(1)} \cos \varphi_{(1)}, \quad (3.6)$$

де $U'_{1\phi(1)}$, та $I_{\text{д}(1)}$ - діючі (середньоквадратичні) величини першої гармоніки приведені напруги живлення і струму дуги;

$\cos \varphi_{(1)}$ - коефіцієнт потужності по 1-й гармоніці.

У випадку несинусоїдальної форми струму в колі загальний коефіцієнт потужності позначається λ і обчислюється за формулою (3.7):

$$\lambda = \frac{P_{\text{акт}}}{S} = \frac{I_{\text{д}(1)}}{I_{\text{д}}} \cos \varphi_{(1)} = K_{\text{ум}} \cos \varphi_{(1)} \quad (3.7)$$

де $K_{\text{ум}}$ - коефіцієнт спотворення струму.

Повна потужність електричного кола визначається за виразом (3.8):

$$S = U'_{1\phi} I_{\text{д}} = U'_{1\phi} \sqrt{I_{(1)}^2 + \sum_n I_{(n)}^2} = \sqrt{P_{\text{акт}}^2 + Q_{(1)}^2 + T^2} \quad (3.8)$$

$$\text{де } U'_{1\phi} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (u'_{1\phi})^2 dt} \quad \text{та} \quad I_{\text{д}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_{\text{д}}^2 dt}$$

- діючі (середньоквадратичні) величини приведених напруги живлення та струму дуги;

$Q_{(1)}$ - реактивна потужність, виражена за першими гармоніками напруги та струму;

T - потужність викривлень, що утворюється вищими гармоніками струму.

Еквівалентна реактивна потужність електричного кола охоплює як реактивну складову першої гармоніки, так і потужність спотворень, і обчислюється за формулою (3.9):

$$Q_e = \sqrt{S^2 - P_{акт}^2} = Q_{(1)} + T = I_d^2 X_e . \quad (3.9)$$

Електричні втрати в колі обчислюються за формулою 3.10:

$$\Delta P = I_d^2 R_{\Sigma} . \quad (3.10)$$

Активна складова потужності дуги визначається за виразом (3.11), що дозволяє оцінити частину енергії, яка реально передається у плавильну ванну для нагріву металу:

$$P_{акт} = P_d + \Delta P . \quad (3.11)$$

3.2 Побудова електричних характеристик

На рисунку 3.3 показані залежності, обчислені за формулами (3.5–3.11): потужність дуги P_d^* , напруга дуги U_d^* , коефіцієнт зносу футеровки КЗФ* та коефіцієнт інтенсивності нагріву КІН* як функції струму дуги для однієї фази ДСП.

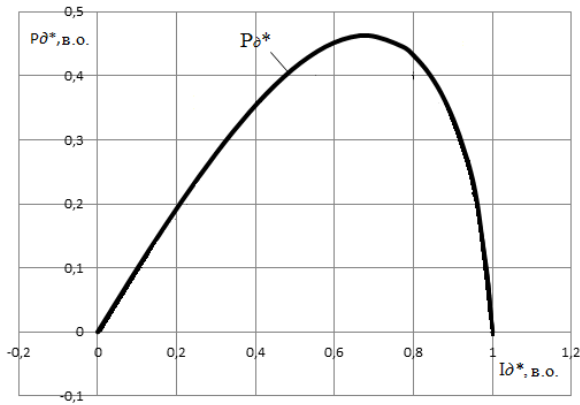
У таблицях 3.1 і 3.2 наведені результати розрахунків електричних характеристик дуги на основі рівняння Кассі для трьох фаз печі.

Таблиця 3.1 – Значення електричних параметрів ДСП в іменованих одиницях

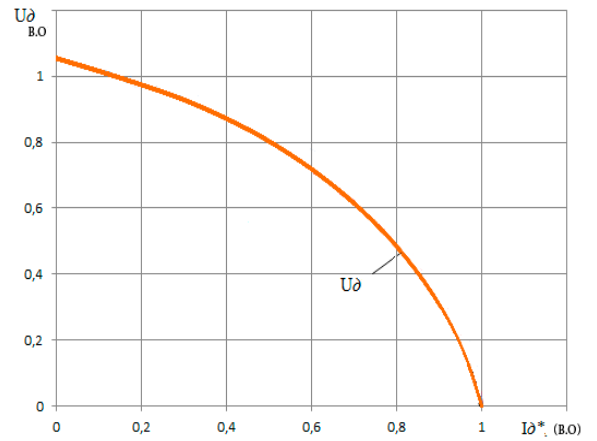
R_{Σ} , Ом	Ід, кА	Уд, В	Рд, МВт	ΔP , МВт	Ракт, МВт	Q, Мвар	S, МВА	η	Λ
0,084	10,51	779,0	0,01	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0
0,051	17,95	738,0	31,39	0,4	31,8	19,2	36,9	1,0	0,9
0,027	39,24	683,0	65,74	2,0	67,7	39,8	80,0	1,0	0,9
0,02	58	616,0	89,14	4,4	93,6	72,2	119,1	1,0	0,8
0,017	72,08	549,0	99,88	7,0	106,8	103,1	149,0	0,9	0,7
0,0158	83,14	482,0	102,25	9,4	111,6	132,0	173,2	0,9	0,6
0,0151	91,95	415,0	98,41	11,7	110,1	158,6	193,3	0,9	0,6
0,0149	98,95	348,0	89,83	13,9	103,7	182,6	210,1	0,9	0,5
0,014	104,41	281,0	77,47	15,8	93,2	203,7	224,1	0,8	0,4
0,013	108,51	214,0	62,11	17,5	79,6	221,9	235,8	0,8	0,3
0,011	111,41	147,0	44,41	18,9	63,3	236,0	245,3	0,7	0,3
0,0107	113,21	80,0	24,913	20,1	45,0	248,0	252,7	0,6	0,2
0,01008	117,81	10,0	0,013	21,0	21,0	260,0	260,8	0,0	0,1

Таблиця 3.2 – Значення електричних характеристик ДСП-180 у відносних одиницях

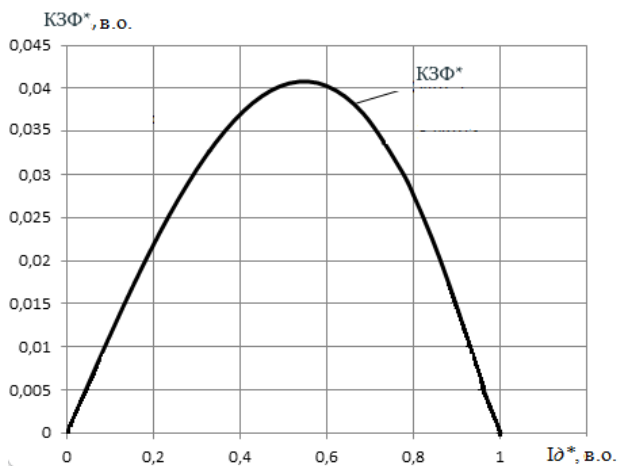
R_{Σ} , Ом	Ід*	Уд*	Рд*	ΔP *	Ракт*	Q*	S*	η	Λ
1,000	1,000	0	0	0,080	0,080	0,996	0,999	0	0,081
0,940	0,970	0,110	0,095	0,077	0,170	0,953	0,968	0,553	0,178
0,900	0,945	0,200	0,170	0,073	0,240	0,908	0,940	0,701	0,258
0,810	0,910	0,290	0,230	0,067	0,310	0,850	0,903	0,780	0,337
0,780	0,860	0,380	0,300	0,061	0,360	0,780	0,859	0,830	0,416
0,730	0,810	0,470	0,340	0,053	0,400	0,700	0,805	0,866	0,493
0,690	0,740	0,560	0,380	0,045	0,420	0,600	0,741	0,893	0,570
0,650	0,660	0,650	0,390	0,036	0,427	0,500	0,660	0,916	0,640
0,530	0,570	0,740	0,380	0,027	0,410	0,390	0,570	0,935	0,720
0,470	0,460	0,830	0,340	0,017	0,358	0,270	0,456	0,953	0,790
0,110	0,310	0,920	0,250	0,008	0,259	0,150	0,310	0,970	0,850
0,090	0,140	0,990	0,120	0,002	0,121	0,073	0,141	0,987	0,860
0	0	1,0	0	0	0	0	0	0,990	0



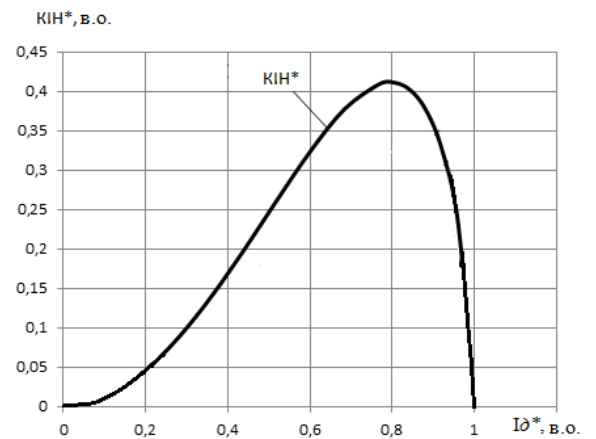
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.3 – Ключові електричні характеристики:

- а) залежність потужності дугового розряду від величини струму;
- б) залежність напруги дуги від струмового навантаження;
- в) варіація коефіцієнта зносу футеровки (КЗФ) із зміною струму;
- г) зміна коефіцієнта інтенсивності нагріву (КІН) залежно від величини струму дуги.

Для формування цих характеристик застосовувався спеціально розроблений методичний алгоритм, який враховує миттєві значення струмів і напруг, параметри дуги та нелінійні особливості електричного кола.

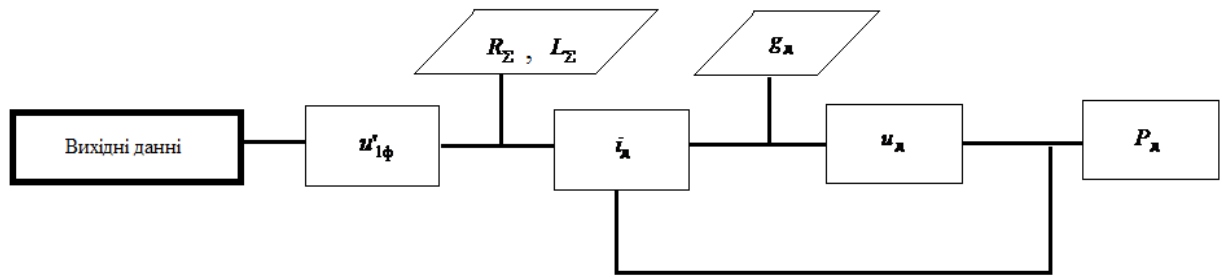


Рисунок 3.4 – Алгоритм формування основних характеристик, який враховує миттєві значення струмів і напруг, параметри дуги та нелінійні особливості електричного кола

3.3 Висновки по розділу

Застосування диференціального рівняння Кассі дозволяє враховувати три взаємопов'язані параметри дугового розряду: миттєву напругу на дузі, проти-ЕРС дуги та поточне значення струму.

Електричні характеристики, представлені на рисунку 3.3, демонструють наявність екстремальних точок, що створює передумови для оптимізації режимів плавки.

Моделювання дуги за допомогою рівняння Кассі виконувалося в середовищі MATLAB. Незважаючи на наявність певної похибки порівняно з експериментальними даними, результати демонструють достатню адекватність математичних моделей.

Дослідження дуги за цим підходом забезпечує найбільш точне відтворення електротехнічних процесів, що відбуваються в дуговій сталеливарній печі.

4 АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДУГИ ЗМІННОГО СТРУМУ ТА ОТРИМАНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

4.1 Обчислення робочих і технологічних показників

Робочі характеристики дугової сталеплавильної печі можна визначити у спрощеній формі, застосовуючи наступні математичні вирази [9]:

$$W = P_{\text{акт}} / G \quad (4.1)$$

$$G = P_{\text{пол}} / 340 = (P_{\text{д}} - P_{\text{м.п}}) / 340 \quad (4.2)$$

$$T = 1/G = 340 / (P_{\text{д}} - P_{\text{м.п}}) \quad (4.3)$$

$$\eta_{\text{дсп}} = \eta_{\text{т}} \cdot \eta_{\text{ел}} = 340/W = 340G/P_{\text{акт}} \quad (4.4)$$

де 340 кВт·год/т – розрахункова потреба електроенергії для розплавлення однієї тонни металу (без урахування додаткових джерел тепла); $P_{\text{акт}}$ – активна потужність електричного кола дугової печі; $P_{\text{д}}$ – сумарна потужність усіх фаз дуг; $P_{\text{м.п}}$ – теплові втрати печі, кВт; $\eta_{\text{ел}}$ – електричний коефіцієнт корисної дії дугової печі.

Крива продуктивності печі g^* досягає свого піку при струмі, що відповідає максимуму потужності дуг. Найвищий тепловий ККД спостерігається на початку формування колодязів, коли майже вся теплова енергія поглинається шихтою.

Технологічні показники визначаються за формулами 4.5 та 4.6:

$$\text{КЗФ} = P_{\text{д}} \cdot U_{\text{д}} / a^2 \quad (4.5)$$

$$\text{КІН} = I_{\text{д}} \cdot P_{\text{д}} \quad (4.6)$$

де U_d – напруга дугового розряду; P_d – енергетична потужність дуги; I_d – струм дуги; a – відстань між колом, що проходить через центри електродів, та стінкою печі.

На рисунках 4.1–4.10 представлені графічні зіставлення основних параметрів дугової сталеливарної печі, отриманих у процесі розрахунку електричного розряду змінного струму за допомогою рівняння Кассі.

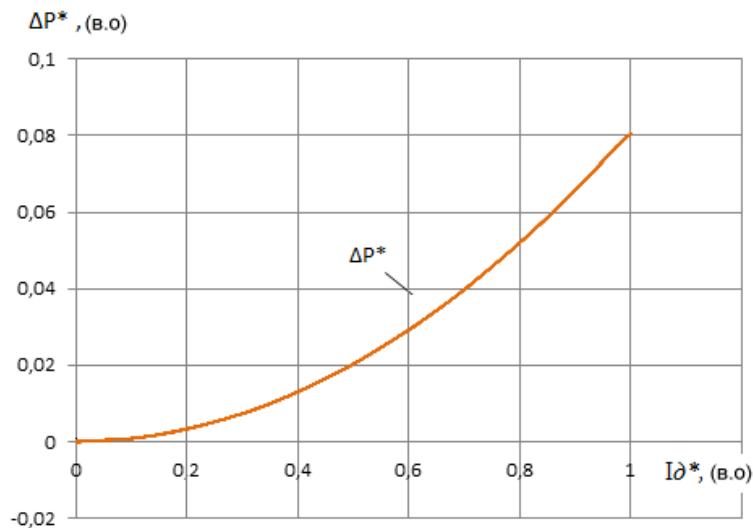


Рисунок 4.1 – Залежність втрат активної потужності від величини струму дуги

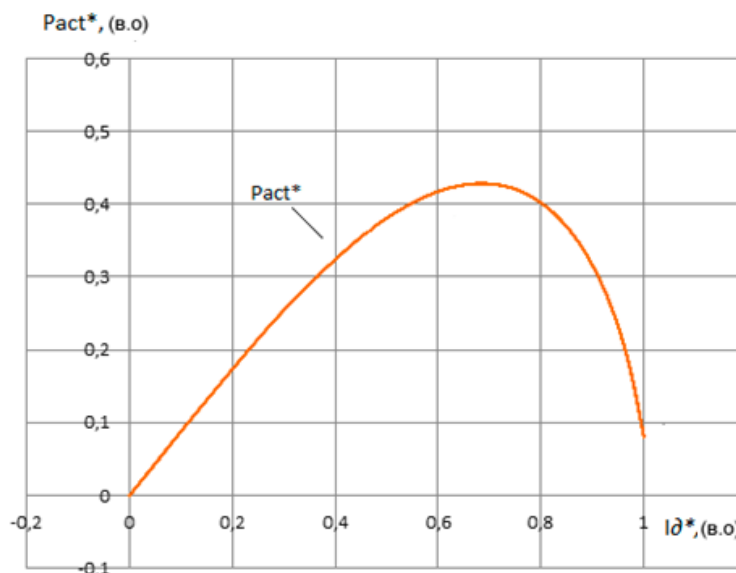


Рисунок 4.2 – Зміна активної потужності в залежності від струму дуги

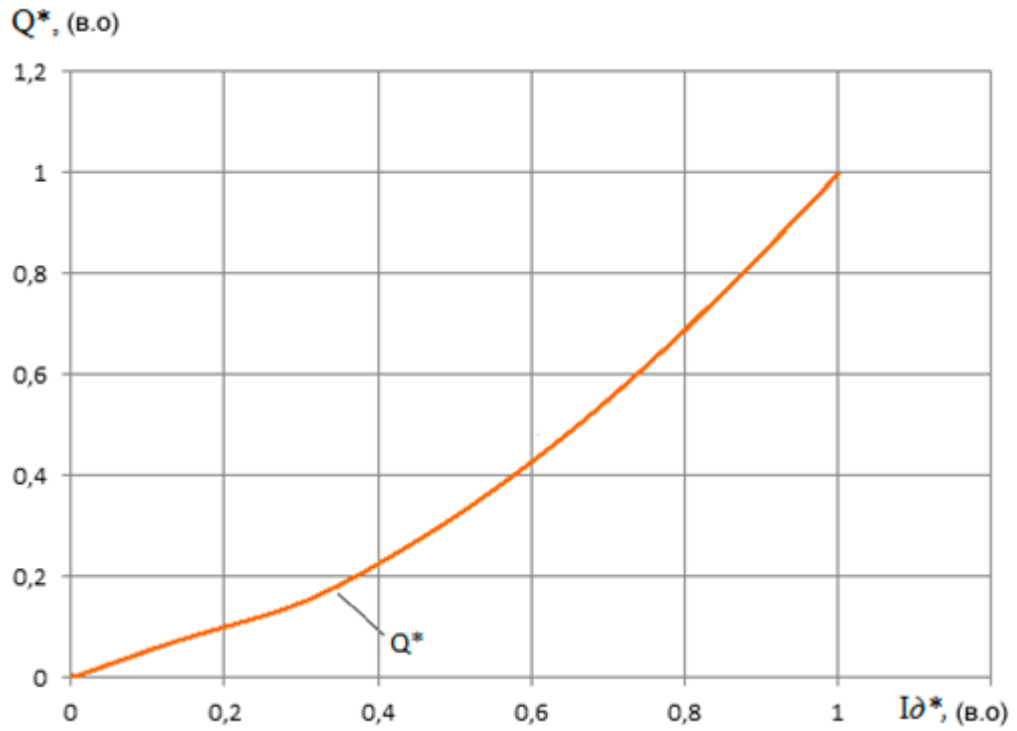


Рисунок 4.3 – Реактивна потужність у функції струму дуги

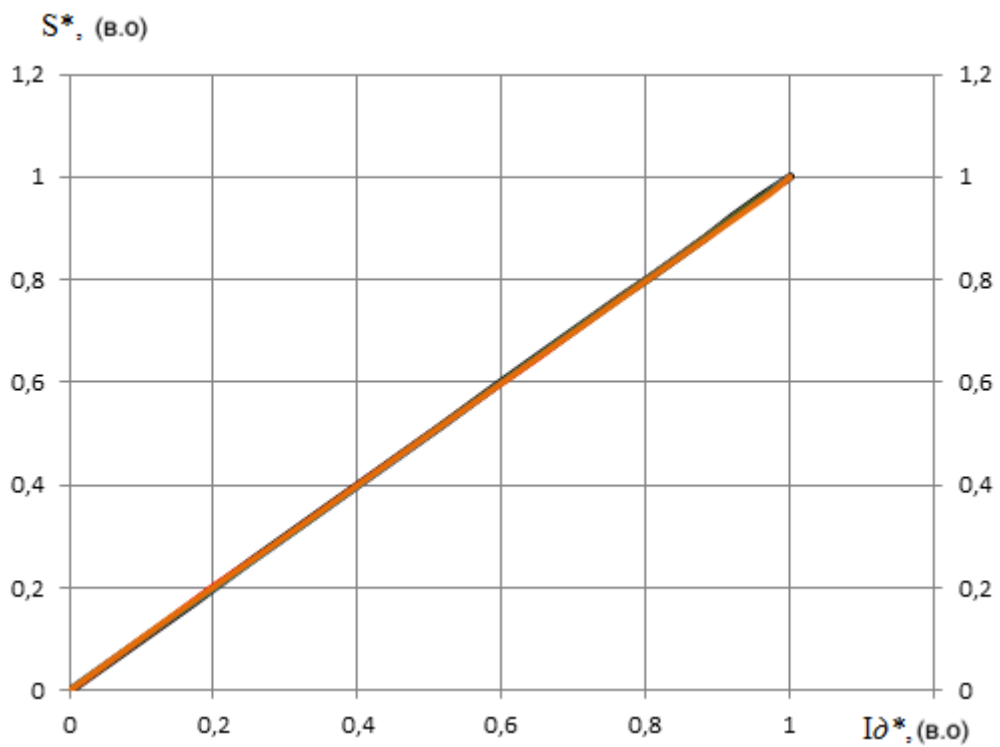


Рисунок 4.4 – Повна потужність як функція струму дуги

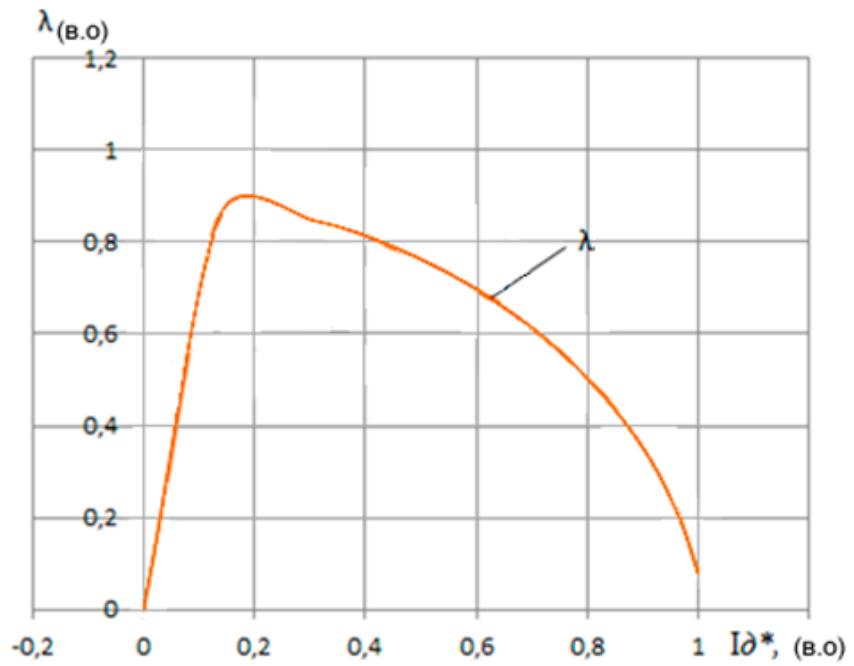


Рисунок 4.5 – Зміна коефіцієнта потужності від струму дуги

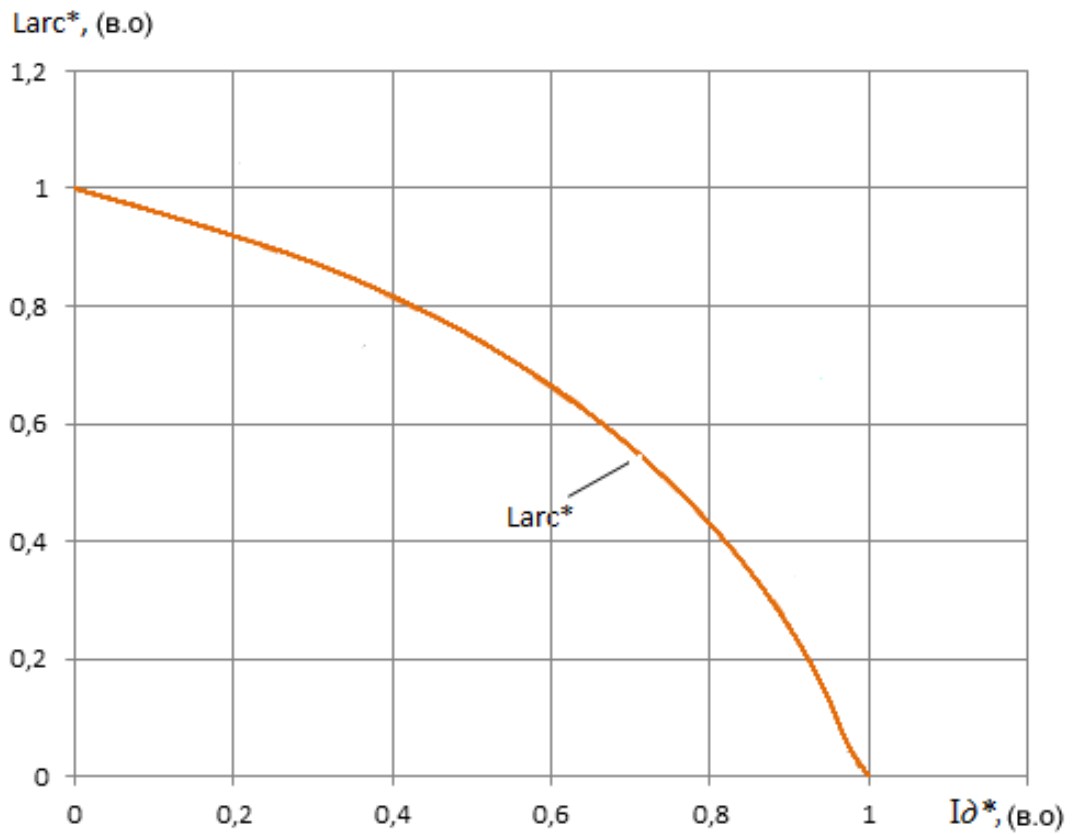


Рисунок 4.6 – Залежність довжини дуги від сили струму

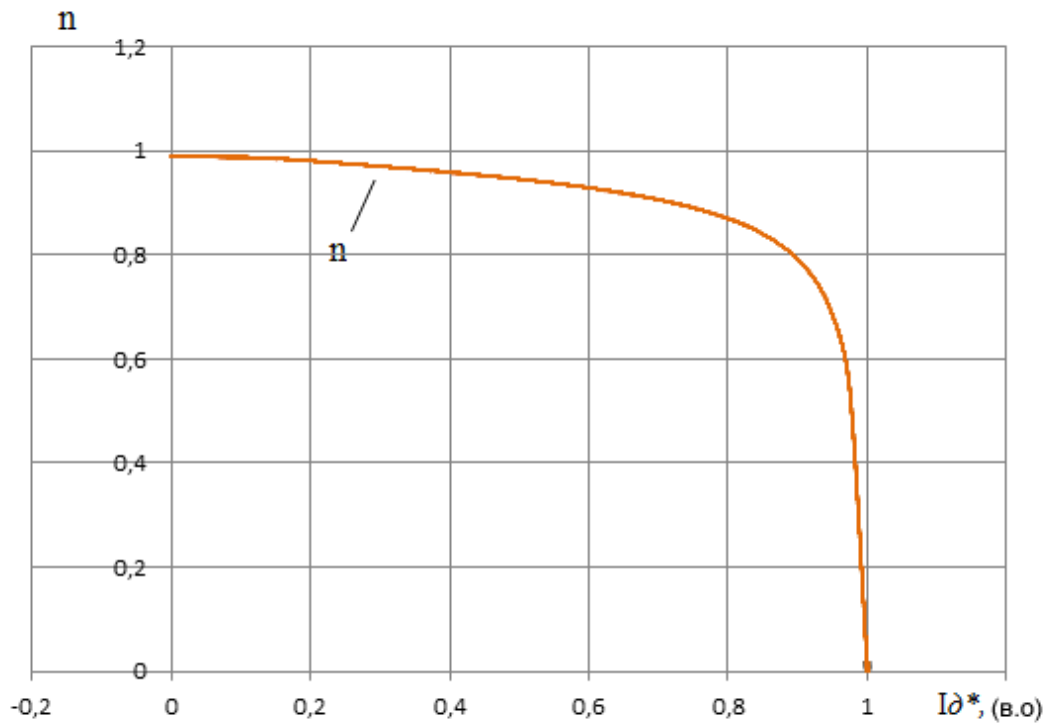


Рисунок 4.7 – ККД печі у залежності від струму дуги

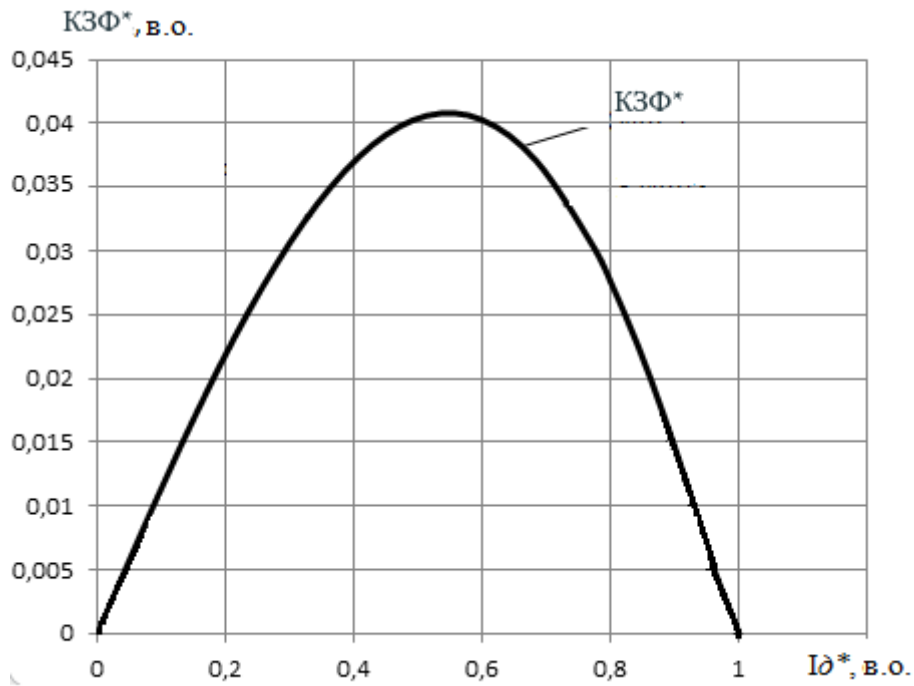


Рисунок 4.8 – Коефіцієнт зносу футеровки в залежності від струму дуги

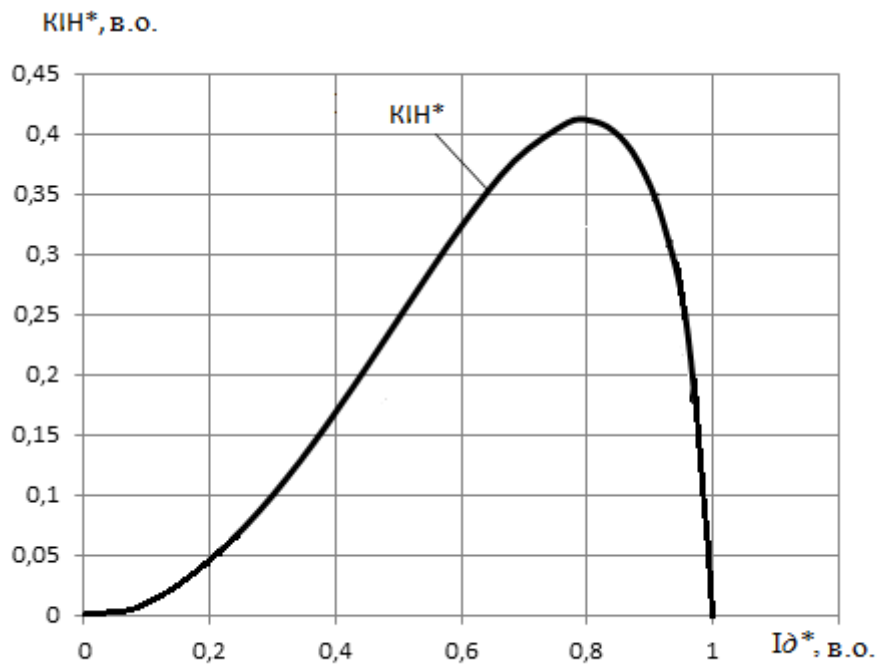


Рисунок 4.9 – Інтенсивність нагріву металу у функції струму дуги

Рисунок 4.10 показує основні електричні ($P_{акт}$), технологічні ($K3\Phi$, KIH) та робочі (W , t , $\eta_{ел}$, g) характеристики, розраховані за формулами 4.1–4.10.

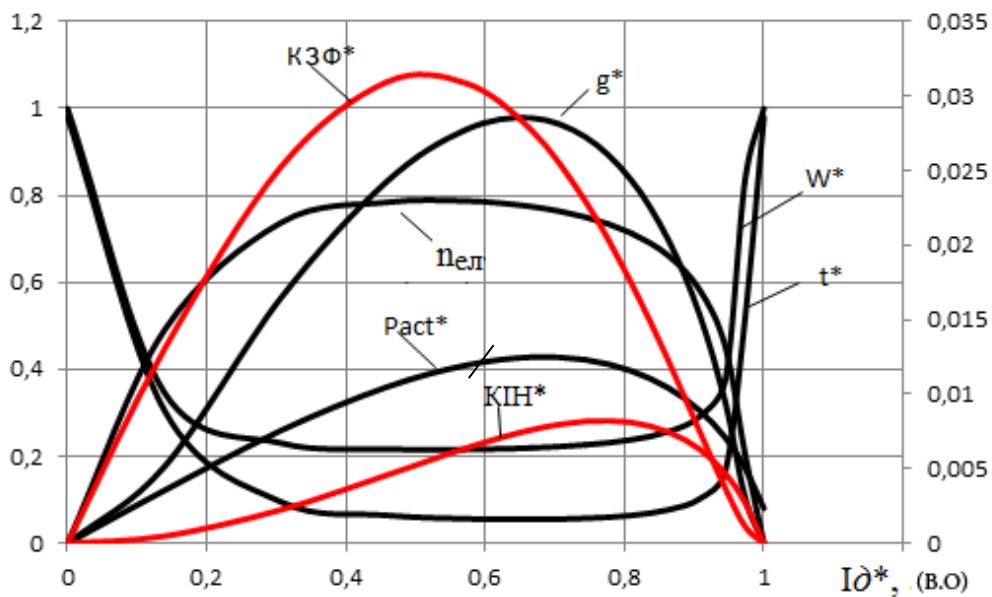


Рисунок 4.10 – Комплексні електричні, технологічні та робочі характеристики

З рисунка 4.10 видно, що коефіцієнт інтенсивності нагріву КІН досягає свого максимуму при струмі 0,7 у відносних одиницях. Робочий діапазон досліджуваної печі знаходиться в межах 0,47–0,75.

На рисунку 4.11 представлені робочі точки, які змінюються відповідно до стадії розплавлення металу. Наприклад, точка 1 відповідає максимальній потужності, що виділяється на дугах. У міру проплавлення колодязів робоча точка 2 зміщується вниз по характеристиці: дуга подовжується та зменшує свою потужність. Зменшується струм дуги, а разом із ним і щільність струму, що прямо впливає на витрати електродів. Точка 2 також відповідає максимуму коефіцієнта зносу футеровки. Точки 3 і 4 відповідають роботі на подовжених дугах.

Під час доплавлення металу (точка 5) спостерігається збільшення струму та потужності дуги. Безпосередньо перед зливом рідкої сталі переходять на точку 6, де метал нагрівається до необхідної температури.

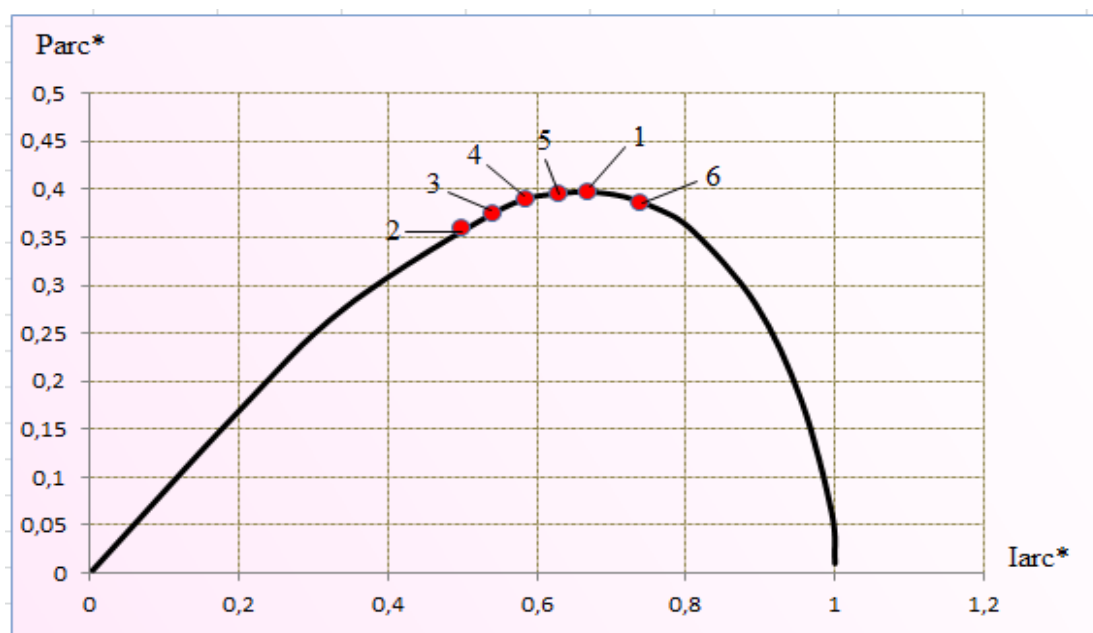


Рисунок 4.11 – Робочі точки дугової печі

4.2 Перевірка адекватності математичної моделі експериментальними даними

Для оцінки точності математичної моделі використовують дані про повну потужність трьох фаз та середній фазний струм, зафіксовані з кроком 1 секунда за допомогою програмного комплексу ARF. Функціональна залежність сумарної потужності від середнього струму відображається у вигляді «хмарки» експериментальних точок. На цей графік додатково накладаються розрахункові основні електричні та технологічні характеристики ДСП, що дозволяє перевірити відповідність моделі реальним процесам.

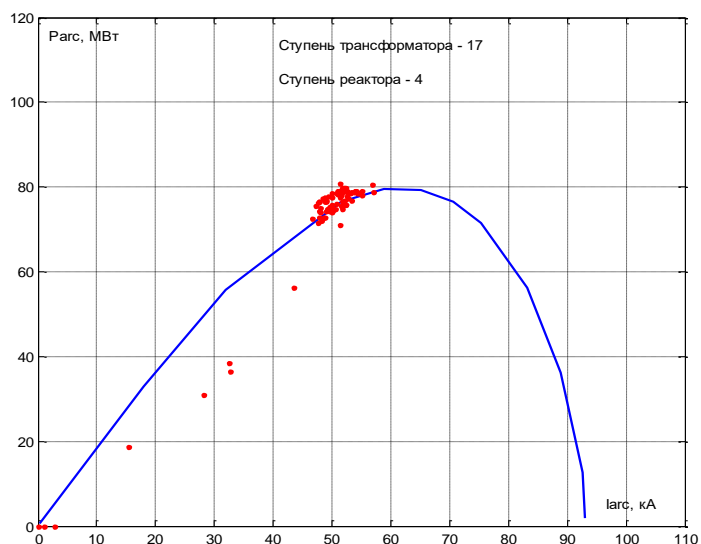
Розрахунки показують, що «хмарка» експериментальних точок на початковій стадії розташована приблизно в межах 0,48–0,7 по відносних величинах струму дуги. Такий розподіл свідчить про роботу на витягнутих дугах, що підвищує ймовірність міжфазового короткого замикання. Для уникнення цього слід підтримувати високу потужність дуг, зсуваючи «хмарку» вправо, щоб забезпечити повне проплавлення та поглиблення дуг у колодязях. Цей процес за тривалістю займає кілька хвилин і характеризує початковий етап плавки.

Коли колодязі вже сформовані, дугу подовжують, що призводить до зниження струму та економії графітових електродів. Основний період розплавлення може складатися з декількох етапів. З ростом об'єму рідкого металу у ванні рекомендовано поступово зменшувати довжину дуги та працювати на піковій потужності — це називають стадією доплавлення. Коли більша частина металу розплавлена, його доводять до необхідної температури, підвищуючи струм до значення, що відповідає максимуму коефіцієнта інтенсивності нагріву. Цей етап завершує плавку, після чого метал зливається в ківш.

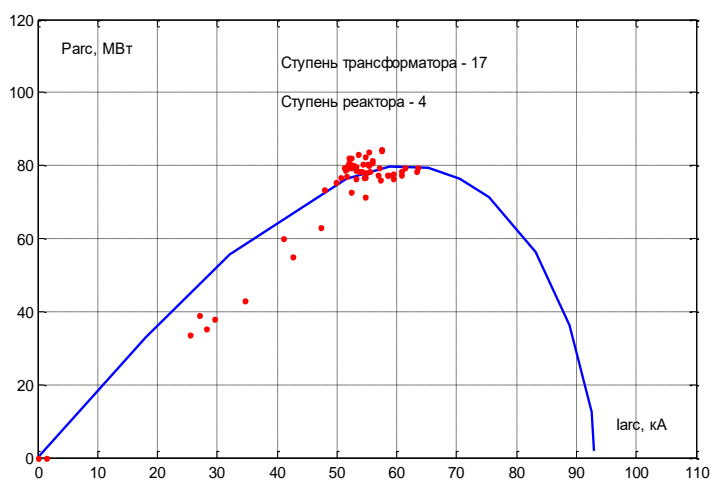
Нова плавка розпочинається із завантаження шихти та запалювання дуг. Середня змінна продуктивність розраховується за дев'ятьма плавками. Робочий режим печі — тримінний, тобто вона функціонує без перерв. Через

річні простой, пов'язані з відсутністю матеріалу або відключенням цеху, річний час роботи коливається від 7000 до 8000 годин.

На рисунку 4.12, а та б, наведено залежності сумарної потужності від середнього струму для початкових стадій трьох плавок.



а) 1-ша стадія плавки №1



б) 1-ша стадія плавки №2

Рисунок 4.12 – Залежність загальної електричної потужності від середнього значення струму для декількох плавок із однаковими умовами завантаження.

Варто відзначити, що для перших двох випадків параметри математичної моделі збігаються (17-й ступінь трансформатора, 4-й ступінь реактора, теплова константа дуги $\theta_d - 800$ мкс). У третьому варіанті тепловий час дуги θ_d збільшено до 1500 мкс при незмінних ступенях трансформатора та реактора, що призводить до зростання потужності дуги.

Ці графіки підтверджують коректність математичної моделі на основі рівняння Кассі для трьох фаз і демонструють, що електричний режим на цій стадії плавки ще не є оптимальним. Суть оптимізації полягає в попереминому регулюванні потужності дуги: спочатку її збільшують, потім зменшують, після чого знову нарощують. Такий підхід дозволяє зменшити споживання електроенергії при збереженні заданого рівня продуктивності печі.

4.3 Оптимізація режимів плавки

Для досягнення мети, а саме зменшення витрат електроенергії при збереженні продуктивності, необхідно побудувати залежності електричних, технологічних та робочих параметрів.

На рисунку 4.13 показано, як за допомогою програмного забезпечення ARF відстежуються фактичні значення електричних режимів дугової печі. Відображені номери робочих кривих, ступені трансформатора, ступені реактора, сумарна потужність трифазної системи та середнє значення струму по фазах у залежності від часу. На схемі видно, що після завантаження шихти до початку плавлення стадії (постійність робочих кривих, положення ступенів трансформатора та реактора) повторюються. У цьому розділі розглянуто період плавки від завантаження до першого зливу шихти.

Для побудови графічних залежностей застосовувано формули 4.2, 4.3 та 4.4. Потужність дуги, втрати та активна потужність визначалися за допомогою математичного моделювання. Змінним параметром слугувало значення противо-ЕРС дуги. Опори ланцюгів для різних ступенів трансформатора та реактора відомі заздалегідь. Далі здійснювався перехід до

відносних величин. Противо-ЕРС варіюється від нуля до максимального значення напруги на вторинній обмотці трансформатора 1,2 кВ.

Математична модель містить три блоки для кожного рівняння (формула 3.5). Живляча напруга мережі становить 35 кВ, крок зміни становить 50 В. Струми визначаються на основі відомих значень напруги та опору контуру.

На рисунках 4.14–4.24 представлені електричні, робочі та технологічні параметри для одинадцяти етапів плавлення шихти. Пунктиром відображено математичне очікування сумарної потужності дуги і середнього струму. Тонкими лініями позначені струми, при яких досягаються максимальні значення коефіцієнта зносу футеровки, потужності дуги та інтенсивності нагріву металу.

У таблицях 4.1–4.11 наведені числові значення основних параметрів дугової сталеплавильної печі, на основі яких були побудовані зазначені графіки.

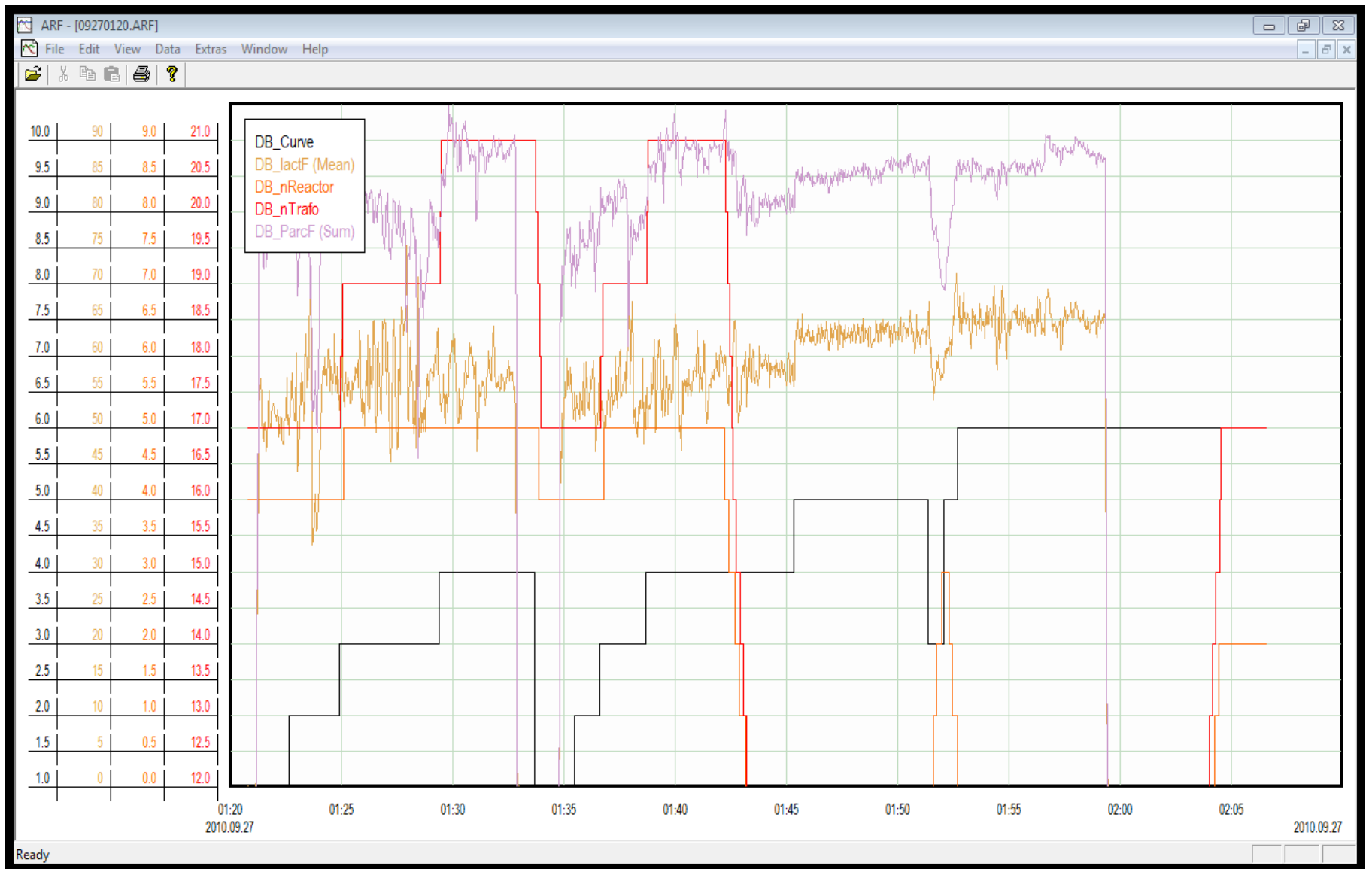


Рисунок 4.13 – Інтерфейс програми ARF
(показано сумарну потужність трьох фаз та середнє значення струму)

Таблиця 4.1 – Основні параметри ДСП-180 у відносних одиницях для початкової стадії плавки

I_D^*	P_D^*	ΔP^*	$P_{акт}^*$	$KI\Phi^*$	KIH^*	g^*	t^*	$KKД_{ел}$
1	0,0109	0,064	0	0,002	0,0099	0,013	0,412	0,115
0,996	0,063	0,058	0,15	0,0023	0,063	0,355	0,316	0,362
0,955	0,18	0,0509	0,261	0,0071	0,172	0,553	0,211	0,55
0,894	0,281	0,043	0,35	0,014	0,251	0,70	0,169	0,63
0,81	0,36	0,038	0,413	0,02	0,289	0,76	0,152	0,69
0,761	0,38	0,032	0,43	0,024	0,29	0,779	0,153	0,71
0,70	0,395	0,026	0,433	0,028	0,278	0,782	0,15	0,73
0,631	0,396	0,0196	0,43	0,03	0,251	0,751	0,155	0,73
0,555	0,38	0,0137	0,406	0,0319	0,211	0,703	0,172	0,750
0,345	0,278	0,0077	0,3	0,0254	0,097	0,522	0,251	0,740
0,194	0,165	0,003	0,189	0,0165	0,032	0,321	0,451	0,7
0,004	0,004	0,001	0,005	0,0013	0,0011	0,007	1,0	0,617

Таблиця 4.2 – Основні параметри ДСП-180 у відносних одиницях для другої стадії

I_D^*	P_D^*	ΔP^*	$P_{акт}^*$	$KI\Phi^*$	KIH^*	g^*	t^*	$KKД_{ел}$
0,9900	0,0100	0,0631	0,0731	0,0001	0,0100	0,0190	1	0,1141
0,9860	0,0651	0,0591	0,1241	0,0014	0,0641	0,1231	0,9710	0,4204
0,9449	0,1852	0,0511	0,2362	0,0070	0,1742	0,3493	0,3403	0,6256
0,8849	0,2873	0,0430	0,3293	0,0150	0,2533	0,5425	0,2202	0,6977
0,8008	0,3614	0,0370	0,3984	0,0220	0,2903	0,6847	0,1752	0,7257
0,7508	0,3904	0,0320	0,4224	0,0260	0,2933	0,7397	0,1622	0,7397
0,6907	0,4094	0,0220	0,4324	0,0310	0,2843	0,7758	0,1542	0,7598
0,6306	0,4104	0,0190	0,4314	0,0340	0,2573	0,7778	0,1542	0,7638
0,5506	0,3904	0,0150	0,4054	0,0350	0,2142	0,7387	0,1622	0,7718
0,3403	0,2803	0,0080	0,2913	0,0280	0,0961	0,5355	0,2242	0,7788
0,1902	0,1682	0,0020	0,1712	0,0180	0,0320	0,3193	0,3764	0,8809
0,0030	0,0030	0,0001	0,0030	0,0003	0,0001	0,0060	1	0,7998

Таблиця 4.3 – Основні параметри ДСП-180 у відносних одиницях для третьої стадії

I_d^*	P_d^*	ΔP^*	$P_{акм}^*$	$KI\Phi^*$	KIH^*	g^*	t^*	$KKД_{ел}$
0,9690	0,0070	0,0641	0,0711	0,0001	0,0070	0,0140	1,0010	0,0801
0,9239	0,1782	0,0561	0,2342	0,0039	0,1652	0,3493	0,3443	0,6296
0,8659	0,2783	0,0490	0,3273	0,0100	0,2412	0,5445	0,2202	0,7037
0,7848	0,3544	0,0410	0,3964	0,0180	0,2783	0,6947	0,1732	0,7427
0,7417	0,3784	0,0360	0,4144	0,0220	0,2803	0,7407	0,1622	0,7558
0,6827	0,3984	0,0310	0,4294	0,0260	0,2723	0,7798	0,1542	0,7678
0,6306	0,4044	0,0260	0,4304	0,0290	0,2553	0,7918	0,1512	0,7778
0,5596	0,3964	0,0200	0,4164	0,0320	0,2212	0,7758	0,1542	0,7868
0,4785	0,3714	0,0150	0,3874	0,0324	0,1772	0,7267	0,1652	0,7948
0,3874	0,3233	0,0080	0,3313	0,3053	0,1251	0,6336	0,1892	0,8088
0,2683	0,2422	0,0020	0,2452	0,0247	0,0651	0,4755	0,2523	0,8198
0,0054	0,0130	0,0001	0,0130	0,0014	0,0001	0,0260	1,0010	0,8288

Таблиця 4.4 – Основні параметри ДСП-180 у відносних одиницях для четвертої стадії

I_d^*	P_d^*	ΔP^*	$P_{акм}^*$	$KI\Phi^*$	KIH^*	g^*	t^*	$KKД_{ел}$
0,9830	0,0080	0,0591	0,0671	0,0001	0,0080	0,0165	1,0	0,1001
0,9389	0,1722	0,0531	0,2262	0,0039	0,1622	0,3674	0,3273	0,6907
0,8769	0,2713	0,0470	0,3183	0,0100	0,2382	0,5776	0,2082	0,7708
0,7988	0,3463	0,0380	0,3844	0,0180	0,2763	0,7367	0,1632	0,8108
0,7518	0,3724	0,0350	0,4074	0,0230	0,2803	0,7928	0,1512	0,8208
0,6997	0,3894	0,0300	0,4194	0,0270	0,2723	0,8288	0,1451	0,8308
0,6416	0,3964	0,0250	0,4224	0,0300	0,2543	0,8448	0,1421	0,8509
0,5746	0,3904	0,0200	0,4114	0,0330	0,2242	0,8328	0,1441	0,8609
0,4995	0,3704	0,0150	0,3864	0,0340	0,1852	0,7888	0,1522	0,8659
0,4114	0,3303	0,0100	0,3413	0,0330	0,1361	0,7037	0,1562	0,8709
0,3043	0,2653	0,0050	0,2713	0,0280	0,0811	0,5646	0,2132	0,880
0,020	0,0190	0,0001	0,0190	0,0020	0,0005	0,0400	1,0	0,9019

Таблиця 4.5 – Основні параметри ДСП-180 у відносних одиницях для п'ятої стадії

I_D^*	P_D^*	ΔP^*	$P_{акт}^*$	$KI\Phi^*$	KIH^*	g^*	t^*	$KKД_{ел}$
0,001002	0,001002	0,001002	0,001002	0,001002	0,001002	0,001002	1,0015	0,668001
0,170255	0,156234	0,002003	0,158237	0,017026	0,027041	0,295443	0,405608	0,773158
0,310465	0,258387	0,006009	0,264396	0,025038	0,081122	0,490735	0,246369	0,783173
0,42063	0,32048	0,012018	0,334501	0,029044	0,137206	0,610915	0,196294	0,773158
0,510765	0,36054	0,017026	0,377566	0,030045	0,185278	0,682022	0,176264	0,764145
0,590885	0,375563	0,023035	0,397596	0,028042	0,222333	0,710064	0,169254	0,755131
0,66099	0,37356	0,028042	0,402603	0,026039	0,247371	0,70105	0,170255	0,745116
0,72108	0,362543	0,03305	0,395593	0,022033	0,261392	0,686028	0,175263	0,733098
0,771155	0,339509	0,039059	0,378567	0,018027	0,263395	0,642963	0,186279	0,719077
0,86129	0,27341	0,048072	0,32048	0,010015	0,235353	0,517776	0,232348	0,68102
0,931395	0,175263	0,056084	0,230345	0,004006	0,163245	0,332498	0,361542	0,606909
0,98147	0,012018	0,062093	0,075113	0,001002	0,012018	0,023035	1,0015	0,131197

Таблиця 4.6 – Основні параметри ДСП-180 у відносних одиницях для шостої стадії

I_D^*	P_D^*	ΔP^*	$P_{акт}^*$	$KI\Phi^*$	KIH^*	g^*	t^*	$KKД_{ел}$	I_D^*
0	0	0,0001	0	0	0	0	0	1,0019	0,791501
0,157298	0,144274	0,001002	0,145276	0,015029	0,023044	0,272517	0,441838	0,793505	
0,303576	0,257488	0,006011	0,2635	0,025048	0,078148	0,487925	0,247469	0,783486	
0,413785	0,324616	0,110209	0,335637	0,029055	0,134255	0,615167	0,196372	0,774469	
0,50596	0,36369	0,017032	0,380722	0,030057	0,183348	0,689307	0,175333	0,766454	
0,58511	0,382726	0,022042	0,404768	0,029055	0,223424	0,724374	0,166315	0,757436	
0,654241	0,38473	0,027051	0,412783	0,026049	0,251477	0,728381	0,165314	0,748419	
0,715357	0,374711	0,033063	0,407773	0,023044	0,266505	0,708343	0,170323	0,736397	
0,769459	0,352669	0,038072	0,390741	0,019036	0,270513	0,666264	0,180342	0,72237	
0,85963	0,281534	0,048091	0,328623	0,011021	0,241458	0,532009	0,226429	0,6853	
0,930765	0,182346	0,056106	0,238452	0,004008	0,169321	0,344654	0,348661	0,613163	
0,983866	0,010019	0,062118	0,073139	8,02E-05	0,010019	0,020038	1,0019	0,115219	

Таблиця 4.7 – Основні параметри ДСП-180 у відносних одиницях для сьомої стадії

I_D^*	P_D^*	ΔP^*	$P_{акт}^*$	$KI\Phi^*$	KIH^*	g^*	t^*	$KKД_{ел}$
0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,000501	0,0001	1,0	0,789497
0,2635	0,231439	0,004008	0,236448	0,023044	0,061116	0,452859	0,265504	0,813543
0,378718	0,309587	0,009017	0,318604	0,028053	0,117222	0,60615	0,198376	0,805528
0,473899	0,357678	0,014027	0,371705	0,030057	0,169321	0,700328	0,171325	0,797512
0,555053	0,382726	0,019036	0,401762	0,029055	0,211401	0,750423	0,160304	0,789497
0,625186	0,392745	0,025048	0,41679	0,027051	0,244464	0,769459	0,156296	0,78048
0,6853	0,387735	0,030057	0,417792	0,024046	0,265504	0,75944	0,1583	0,770461
0,741406	0,373709	0,035067	0,407773	0,02104	0,276524	0,730385	0,165314	0,758438
0,790499	0,347659	0,039074	0,387735	0,017032	0,274521	0,68029	0,176334	0,744412
0,872655	0,274521	0,048091	0,322612	0,009017	0,238452	0,536017	0,224426	0,704336
0,935775	0,176334	0,055105	0,231439	0,003707	0,164312	0,345656	0,348661	0,631197
0,981862	0,007013	0,061116	0,068129	0,000401	0,007013	0,014027	1,0019	0,087165

Таблиця 4.8 – Основні параметри ДСП-180 у відносних одиницях для восьмої стадії

I_D^*	P_D^*	ΔP^*	$P_{акт}^*$	$KI\Phi^*$	KIH^*	g^*	t^*	$KKД_{ел}$
0,0190	0,0190	0,0010	0,0190	0,0020	0,0001	0,0401	1,0	0,9008
0,3046	0,2655	0,0060	0,2715	0,0261	0,0812	0,5661	0,2134	0,8827
0,4118	0,3316	0,0110	0,3417	0,0291	0,1363	0,7044	0,1563	0,8737
0,5000	0,3717	0,0150	0,3868	0,0311	0,1854	0,7905	0,1523	0,8647
0,5751	0,3918	0,0190	0,4118	0,0301	0,2254	0,8336	0,1443	0,8577
0,6422	0,3978	0,0250	0,4218	0,0271	0,2545	0,8456	0,1423	0,8476
0,6994	0,3898	0,0311	0,4198	0,0240	0,2725	0,8296	0,1453	0,8366
0,7525	0,3727	0,0351	0,4068	0,0210	0,2795	0,7925	0,1523	0,8246
0,7996	0,3467	0,0391	0,3858	0,0169	0,2765	0,7374	0,1633	0,8106
0,8777	0,2715	0,0471	0,3186	0,0095	0,2385	0,5781	0,2084	0,7675
0,9398	0,1743	0,0541	0,2284	0,0037	0,1633	0,3717	0,3236	0,6883
0,9839	0,0080	0,0591	0,0671	0,0005	0,0080	0,0160	1,0	0,1042

Таблиця 4.9 – Основні параметри ДСП-180 у відносних одиницях для дев'ятої стадії

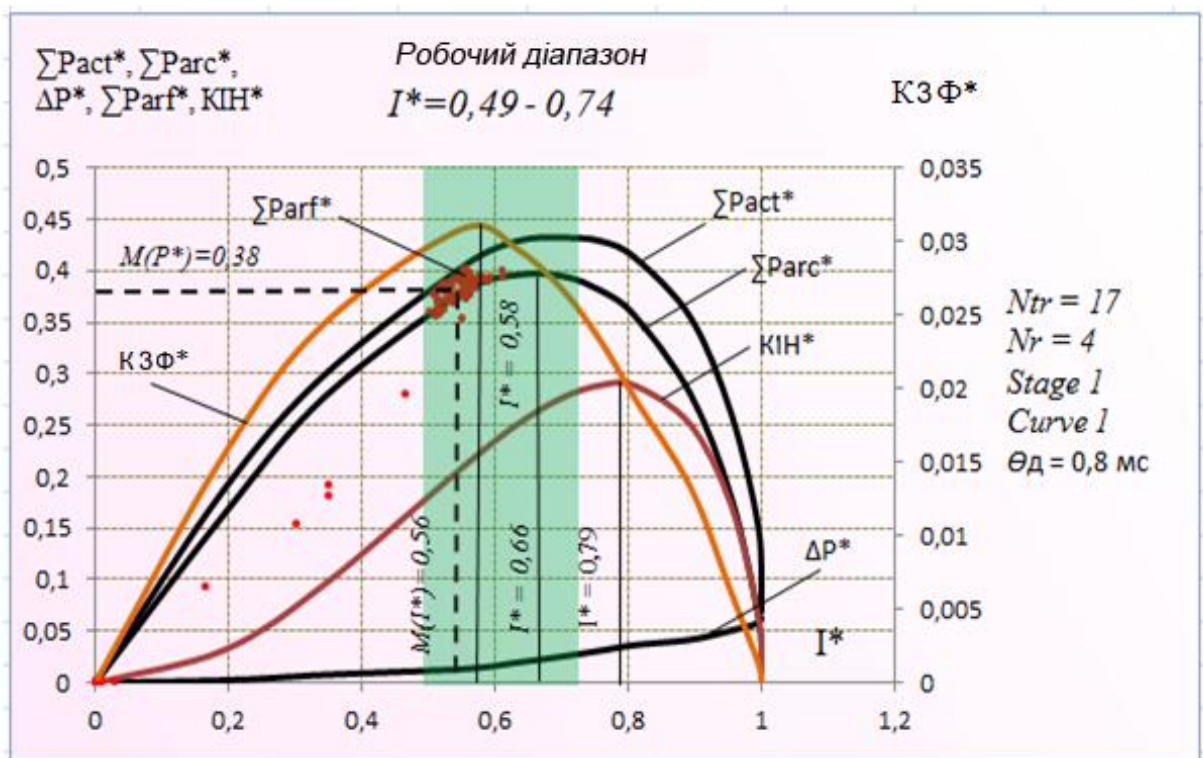
I_D^*	P_D^*	ΔP^*	$P_{акт}^*$	$KI\Phi^*$	KIH^*	g^*	t^*	$KКД_{ел}$
0,0	0,0	0,0	0,001	0,001	0,005	0,010	1,0	0,882
0,202	0,202	0,004	0,206	0,017	0,041	0,430	0,281	0,884
0,346	0,293	0,012	0,305	0,022	0,101	0,622	0,193	0,866
0,461	0,345	0,021	0,366	0,024	0,158	0,732	0,164	0,849
0,556	0,370	0,031	0,401	0,023	0,205	0,786	0,153	0,832
0,637	0,375	0,041	0,416	0,021	0,238	0,797	0,151	0,813
0,708	0,363	0,050	0,413	0,018	0,256	0,770	0,156	0,790
0,825	0,308	0,068	0,376	0,011	0,253	0,654	0,184	0,737
0,913	0,203	0,084	0,288	0,004	0,185	0,433	0,279	0,638
0,978	0,005	0,096	0,102	0,0	0,005	0,012	1,0	0,049

Таблиця 4.10 – Основні параметри ДСП-180 у відносних одиницях для десятої стадії

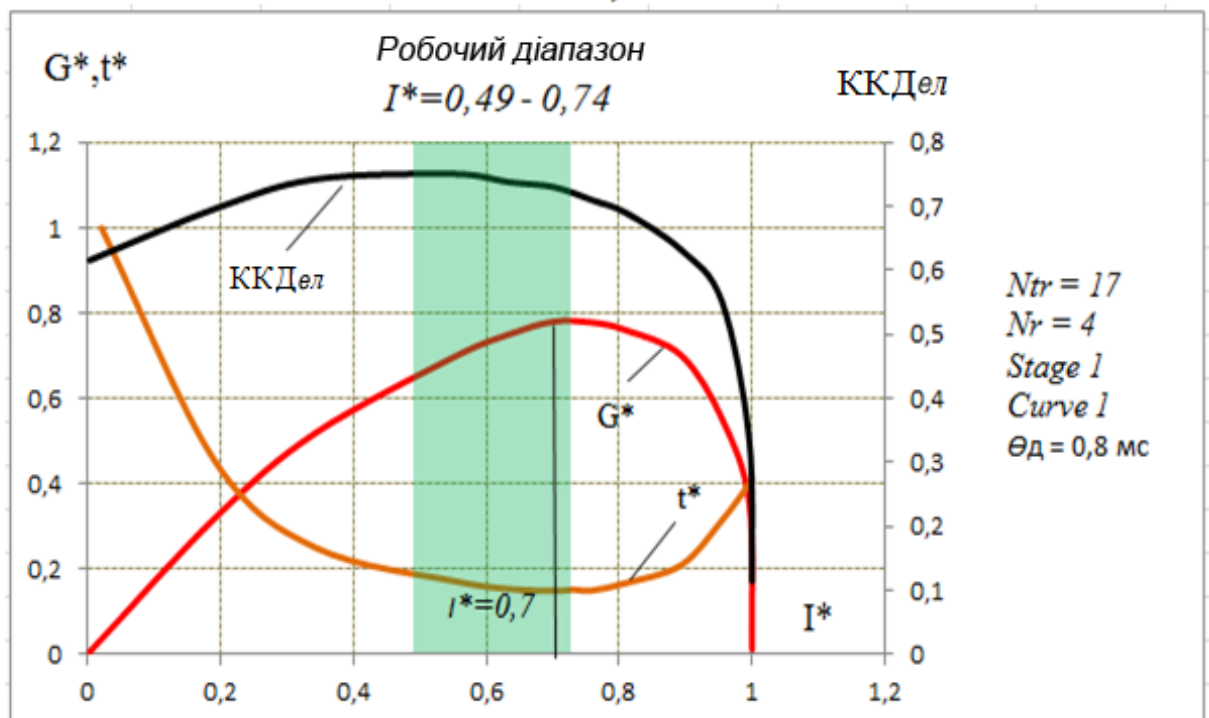
I_D^*	P_D^*	ΔP^*	$P_{акт}^*$	$KI\Phi^*$	KIH^*	g^*	t^*	$KКД_{ел}$
0,0	0,0010	0,0010	0,0010	0,0001	0,0050	0,0100	1,0	0,8817
0,2024	0,2014	0,0040	0,2064	0,1603	0,0401	0,4709	0,2555	0,9689
0,3457	0,2926	0,0100	0,3046	0,0220	0,1002	0,6833	0,1703	0,9488
0,4609	0,3437	0,0210	0,3657	0,0240	0,1583	0,8036	0,1493	0,9308
0,0555	0,3697	0,0311	0,4008	0,0230	0,2054	0,8627	0,1393	0,9118
0,6362	0,3737	0,0401	0,4148	0,0200	0,2375	0,8737	0,1373	0,8907
0,7084	0,3617	0,0501	0,4128	0,0180	0,2555	0,8456	0,1423	0,8677
0,8246	0,3066	0,0681	0,3757	0,0100	0,2525	0,7174	0,1673	0,8086
0,9128	0,2034	0,0832	0,2876	0,0040	0,1854	0,4749	0,2525	0,6994
0,9779	0,0050	0,0962	0,1022	0,0003	0,0050	0,0120	1,0	0,0531

Таблиця 4.11 – Основні параметри ДСП-180 у відносних одиницях для одинадцятої стадії

I_D^*	P_D^*	ΔP^*	$P_{акт}^*$	$KI\Phi^*$	KIH^*	g^*	t^*	$KKД_{ет}$
0,0010	0,0010	0,0001	0,0001	0,0010	0,0050	0,0100	1,0	0,8817
0,2024	0,1844	0,0040	0,1894	0,0150	0,0371	0,4318	0,2785	0,9679
0,3457	0,2926	0,0120	0,3046	0,0220	0,1012	0,6833	0,1703	0,9498
0,4609	0,3447	0,0210	0,3657	0,0240	0,1583	0,8046	0,1493	0,9308
0,5551	0,3697	0,0311	0,4008	0,0230	0,2054	0,8627	0,1393	0,9118
0,6362	0,3737	0,0411	0,4148	0,0210	0,2385	0,8747	0,1373	0,8907
0,7084	0,3627	0,0501	0,4128	0,0180	0,2565	0,8456	0,1423	0,8677
0,8246	0,3106	0,0681	0,3757	0,0110	0,2535	0,7174	0,1673	0,8086
0,9128	0,2034	0,0842	0,2876	0,0040	0,1854	0,4749	0,2535	0,7004
0,9779	0,0050	0,0962	0,1022	0,0000	0,0050	0,0128	1,0	0,0531



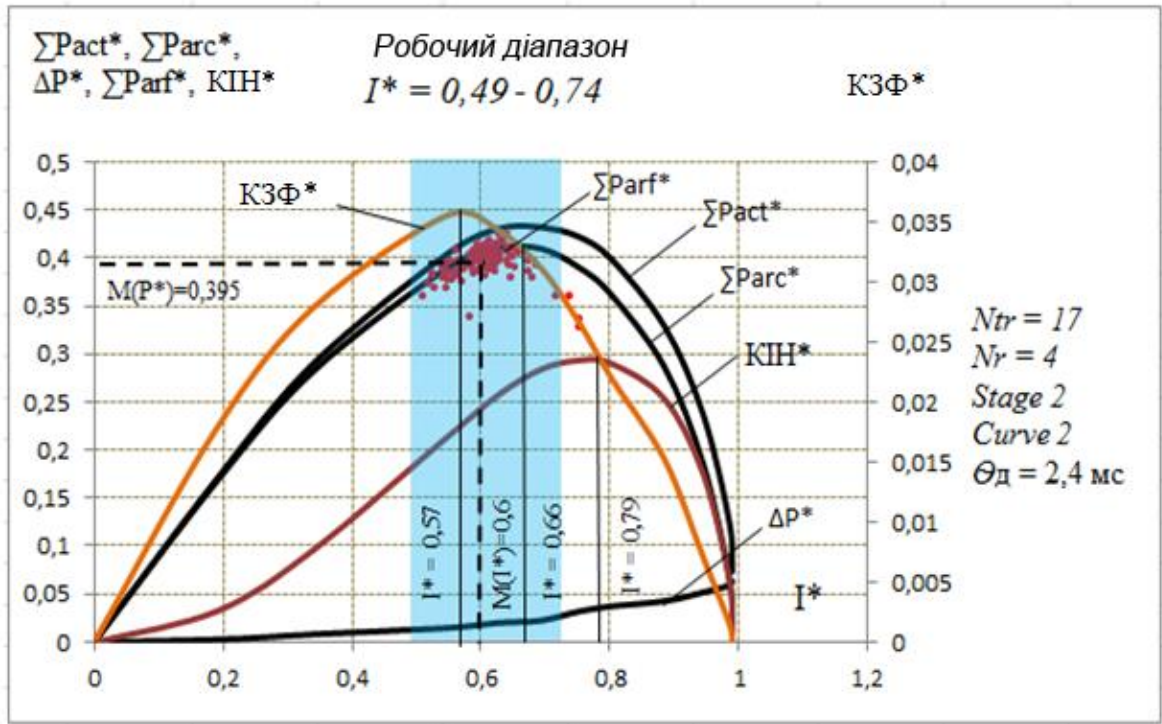
а)



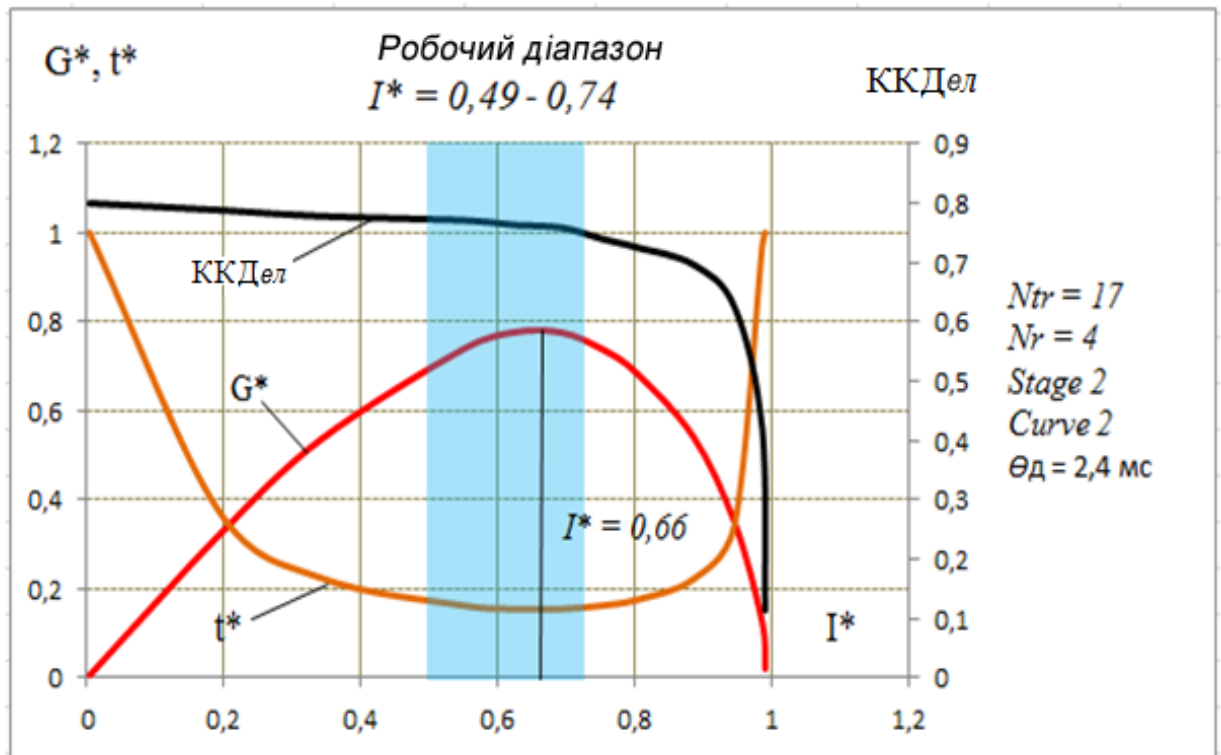
б)

Рисунок 4.14 – Ключові параметри роботи ДСП-180 на першому етапі плавлення №1:

а) електричні й технологічні показники; б) робочі параметри



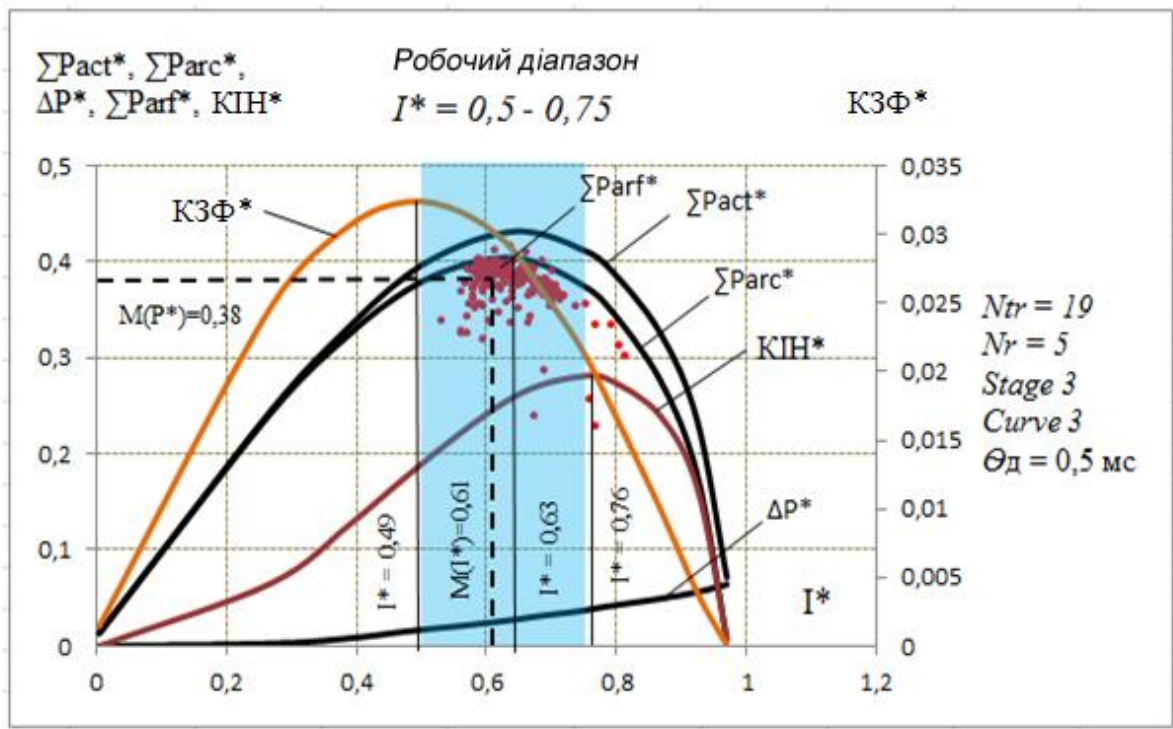
a)



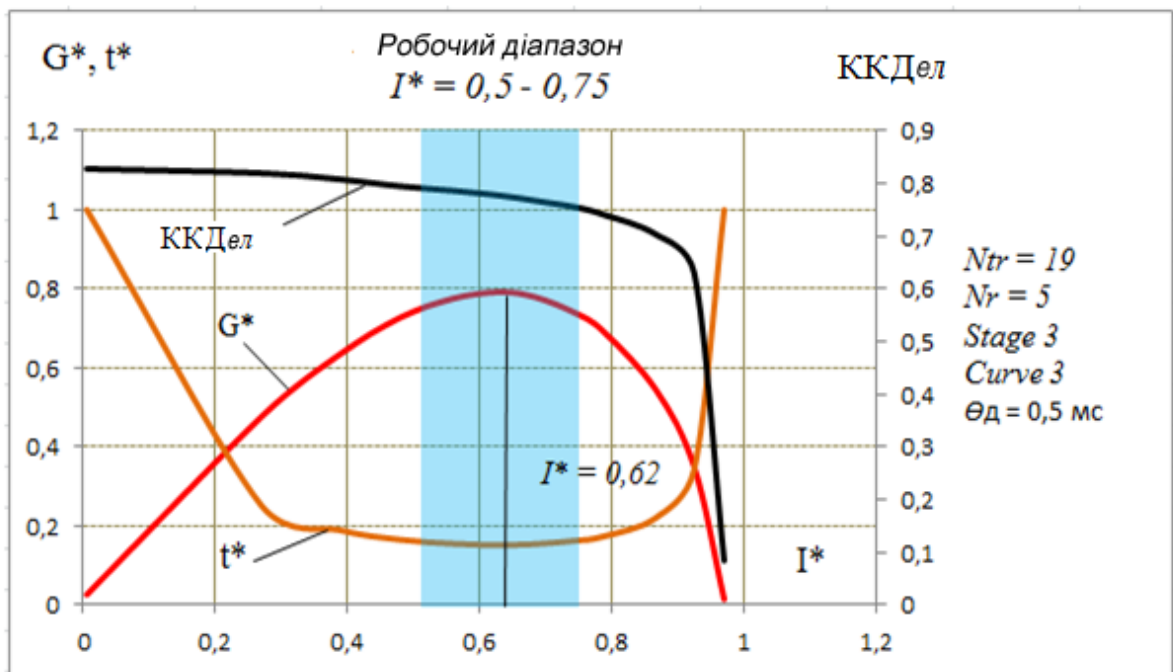
б)

Рисунок 4.15 – Ключові параметри ДСП-180 на другому етапі плавлення №1:

а) електричні та технологічні показники; б) робочі параметри

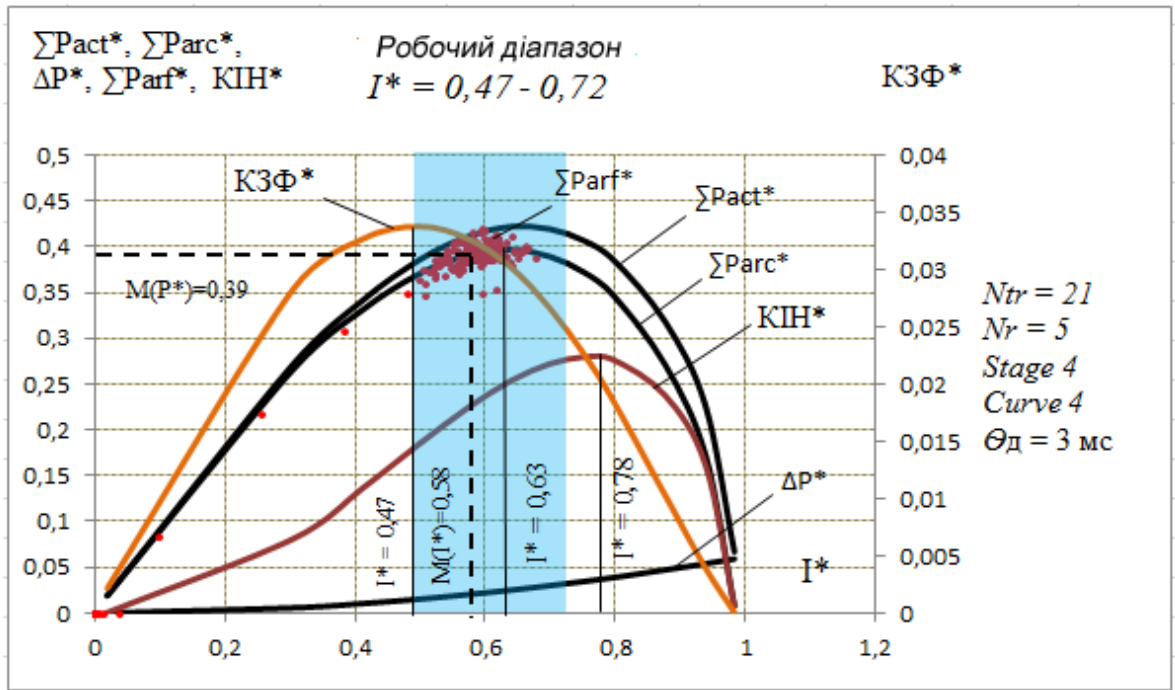


а)

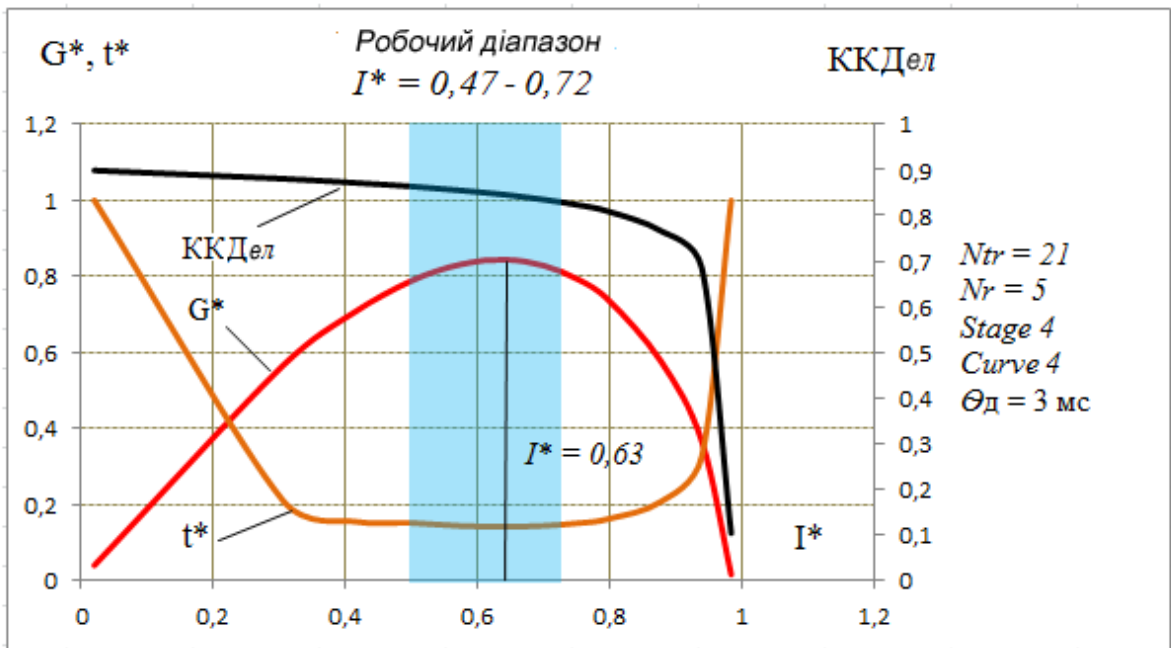


б)

Рисунок 4.16 – Основні показники ДСП-180 на третьому етапі плавлення №1:
 а) електричні й технологічні характеристики; б) робочі характеристики



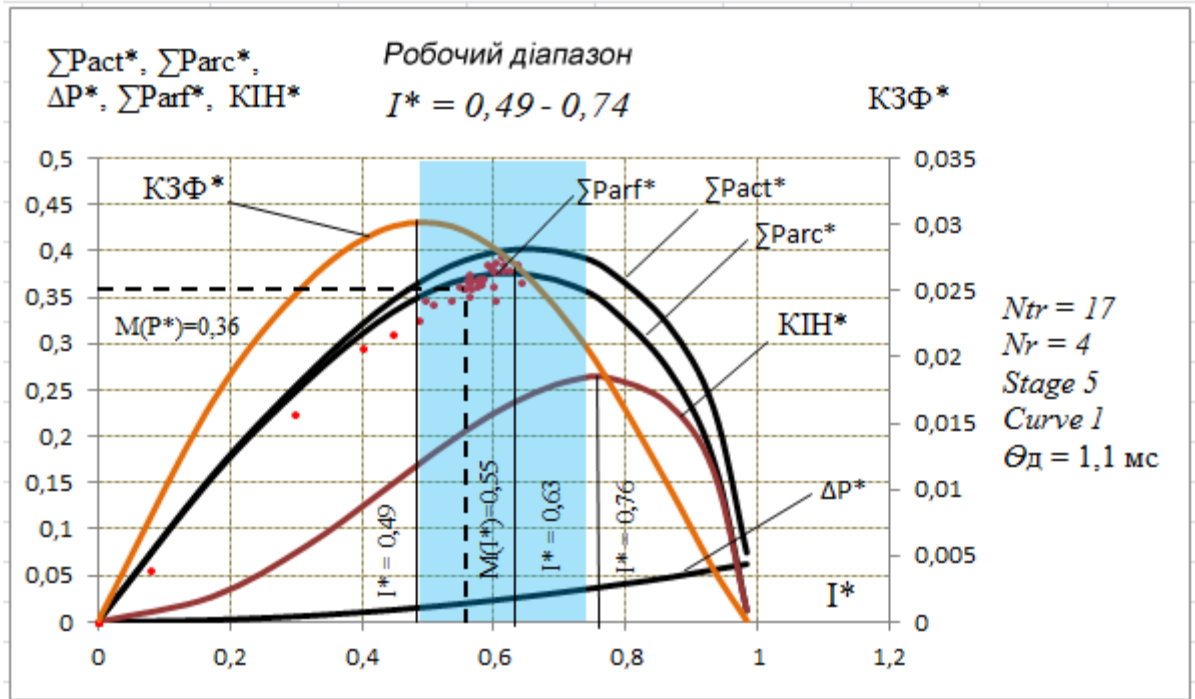
а)



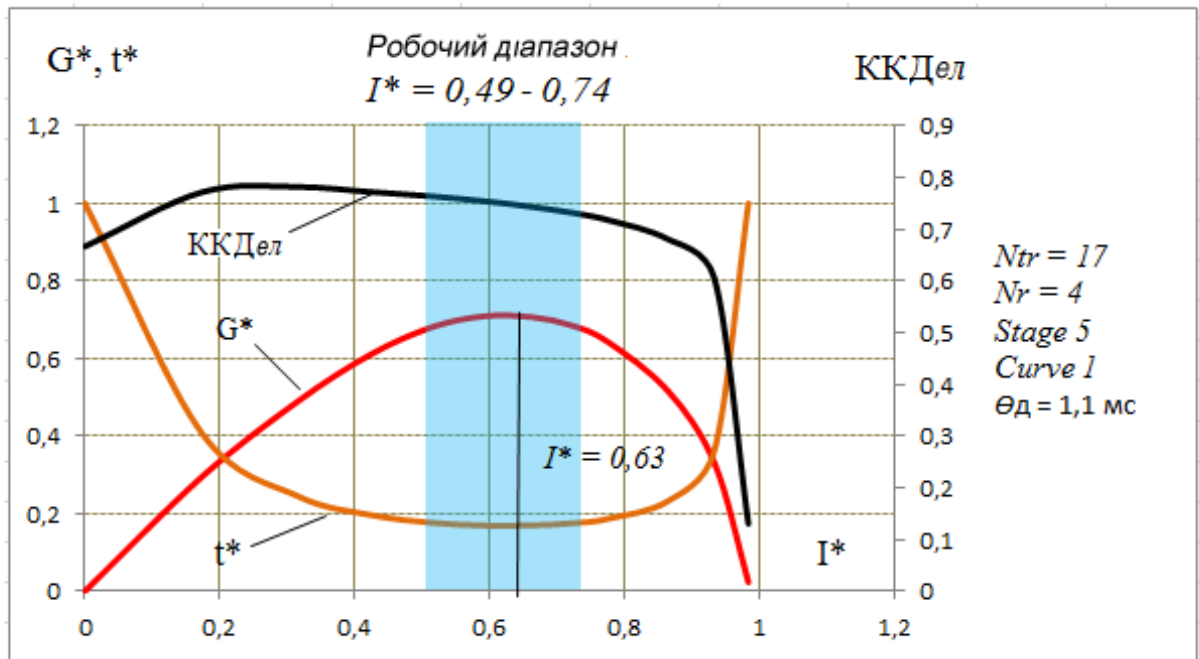
б)

Рисунок 4.17 – Головні характеристики ДСП-180 на четвертому етапі плавлення №1:

а) електричні та технологічні; б) робочі



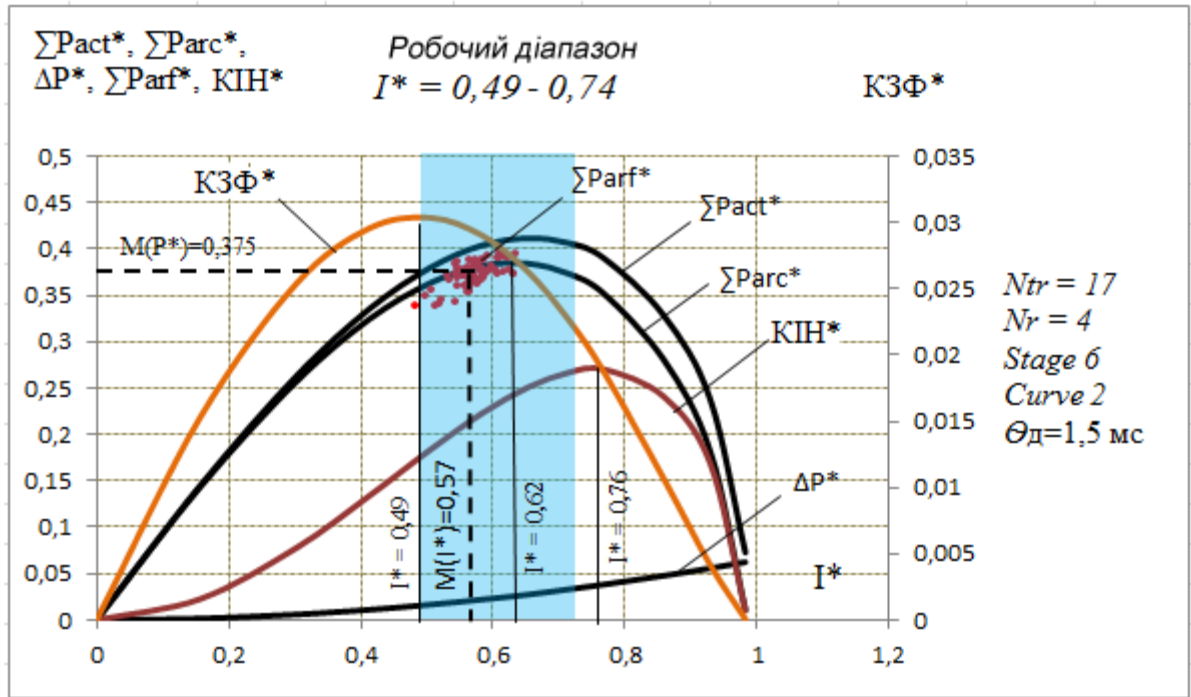
a)



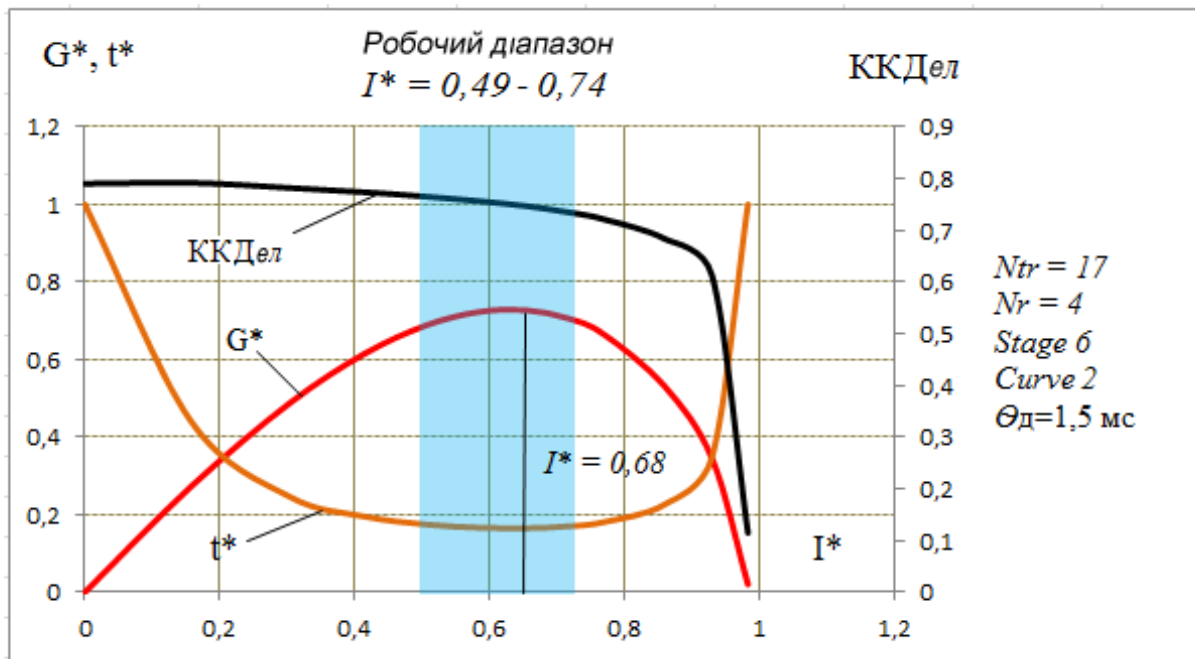
б)

Рисунок 4.18 – Показники ДСП-180 на п'ятому етапі плавлення №1:

а) електричні й технологічні; б) робочі



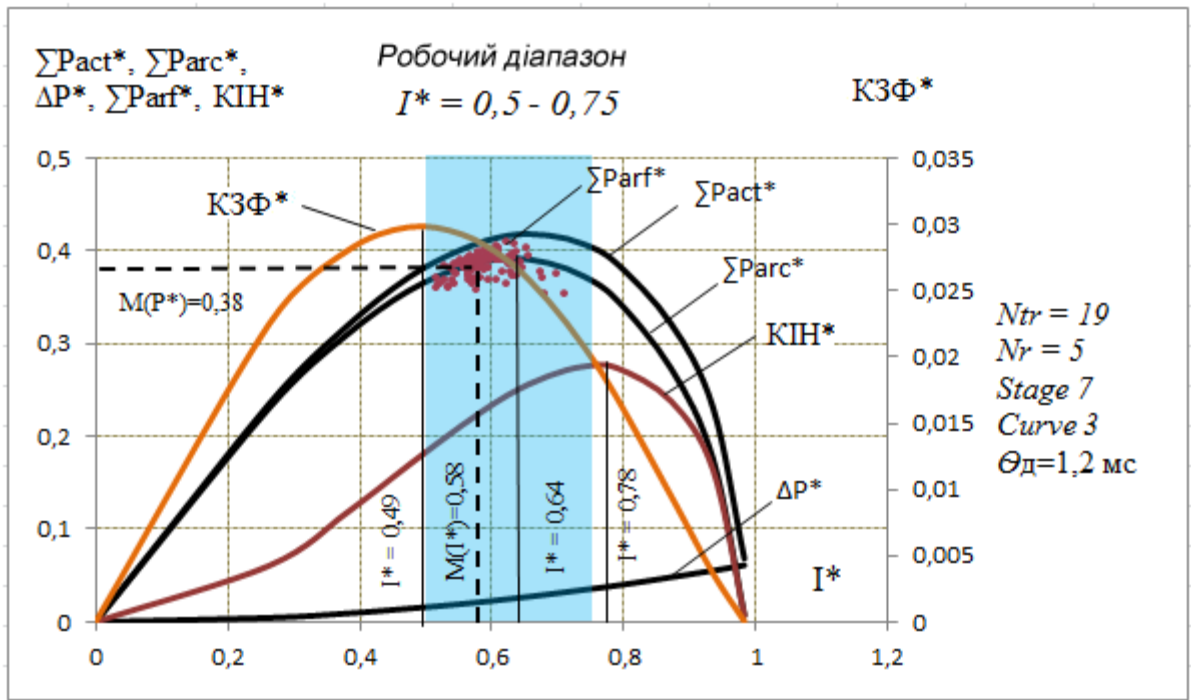
а)



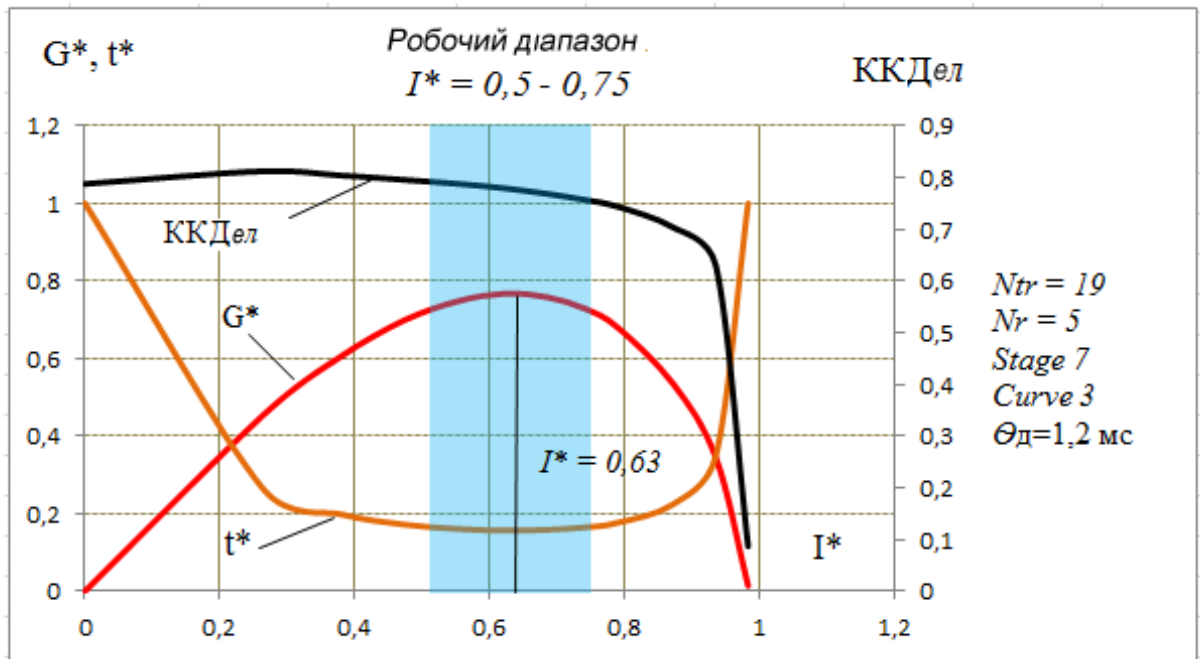
б)

Рисунок 4.19 – Основні характеристики ДСП-180 на шостому етапі плавлення №1:

а) електричні та технологічні; б) робочі



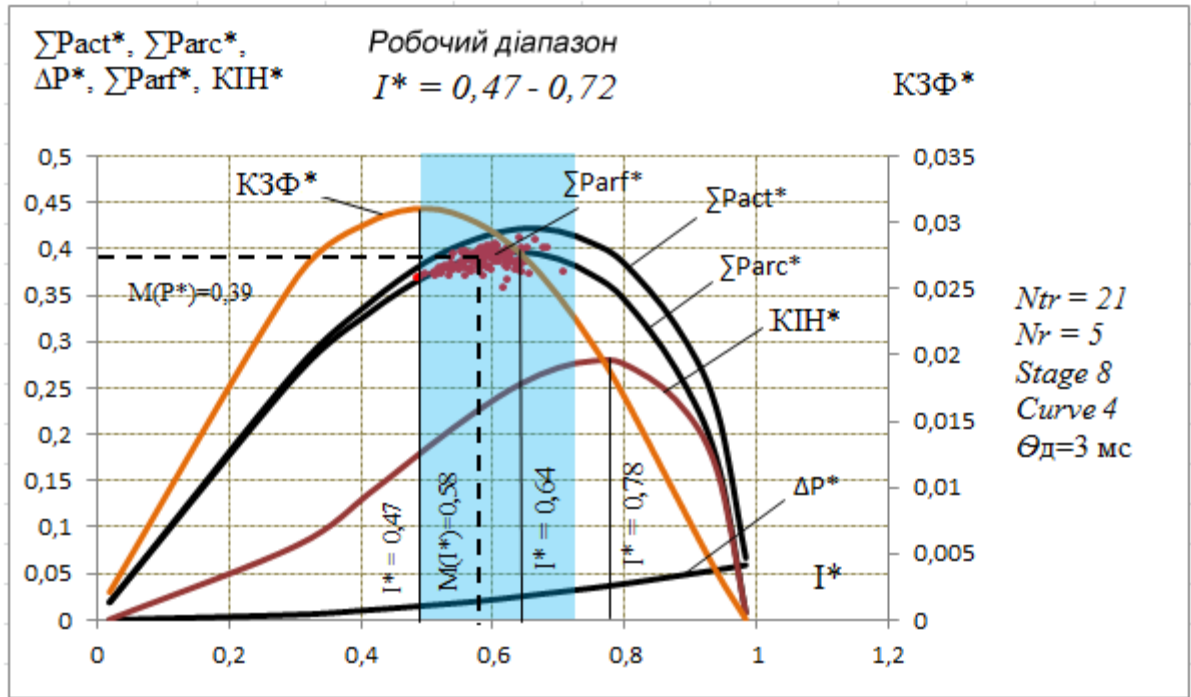
а)



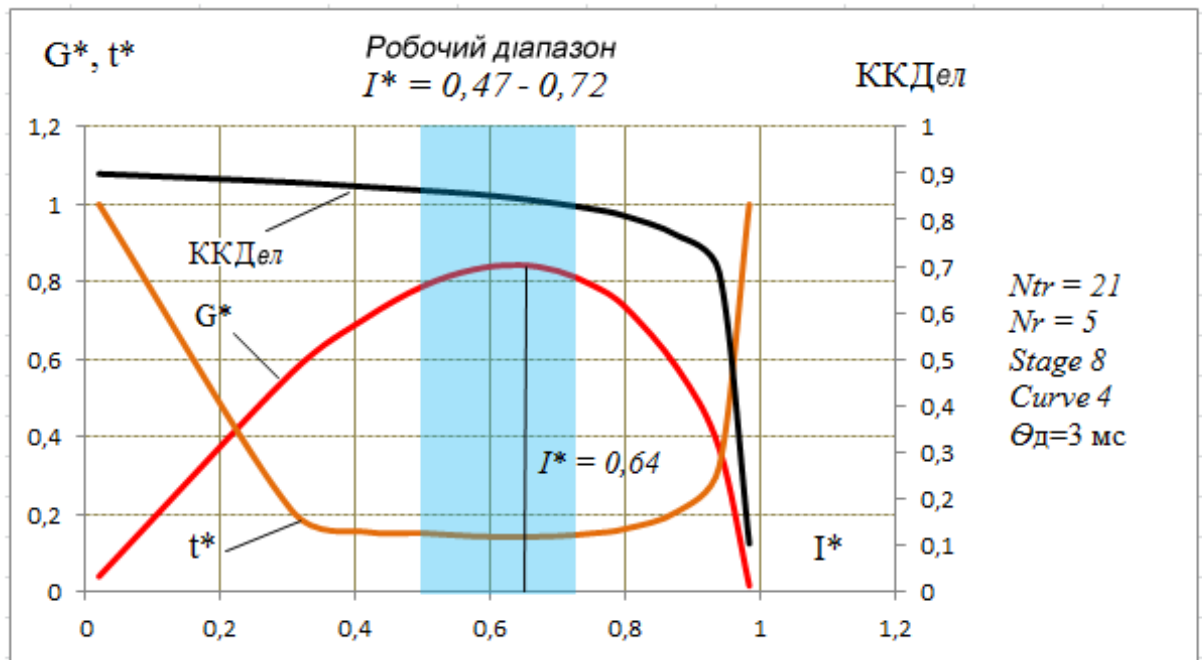
б)

Рисунок 4.20 – Ключові параметри ДСП-180 на сьомому етапі плавлення №1:

а) електричні та технологічні; б) робочі



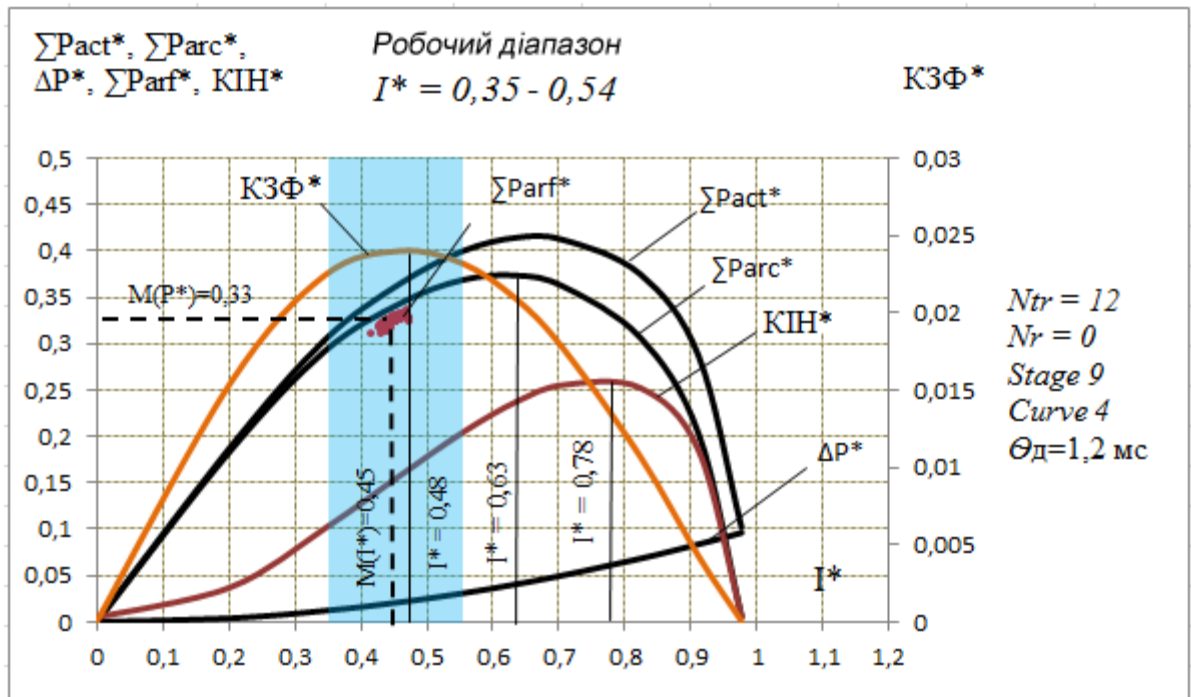
а)



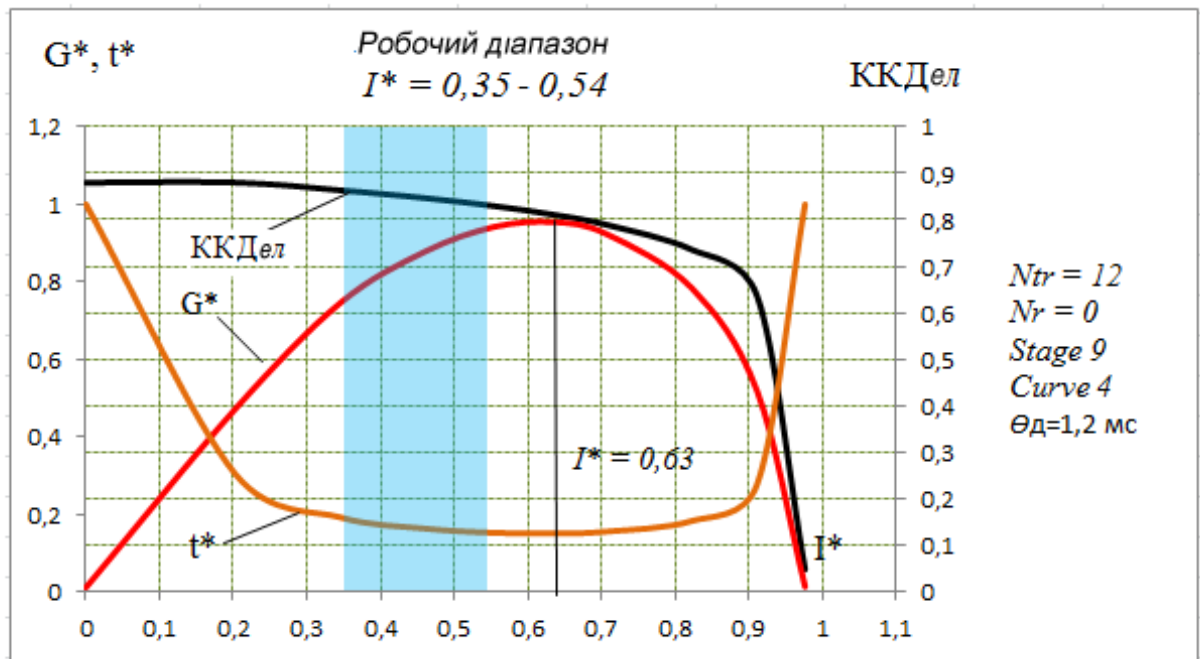
б)

Рисунок 4.21 – Основні характеристики ДСП-180 на восьмому етапі плавлення №1:

а) електричні та технологічні; б) робочі

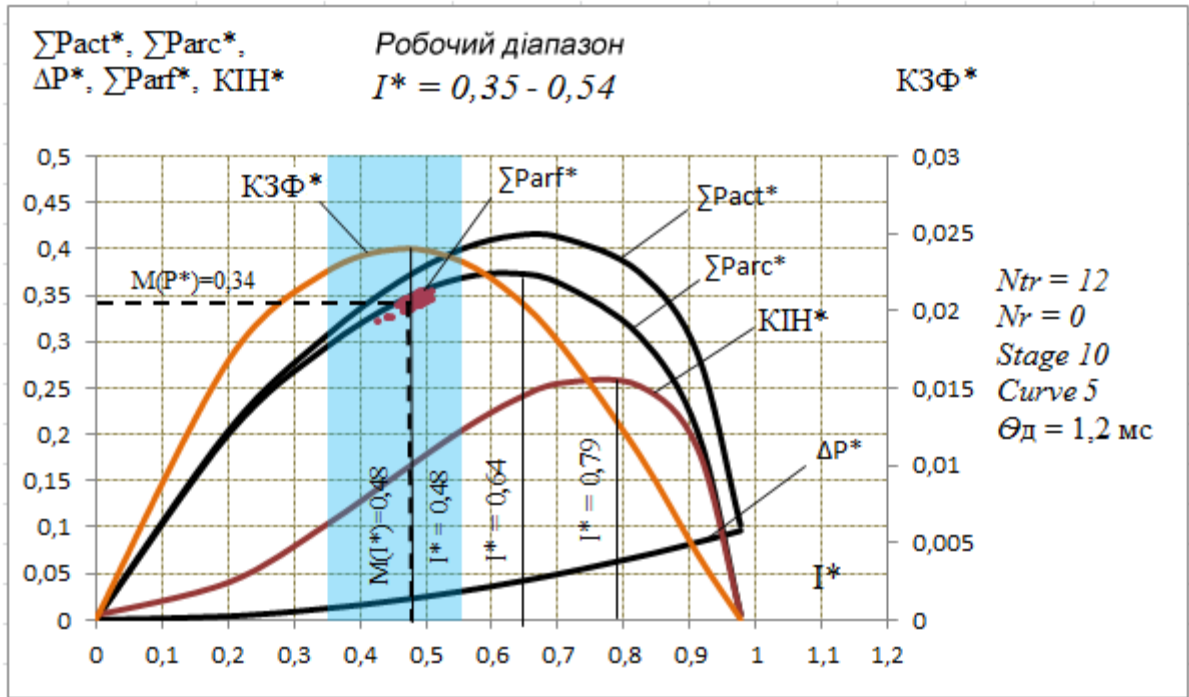


а)

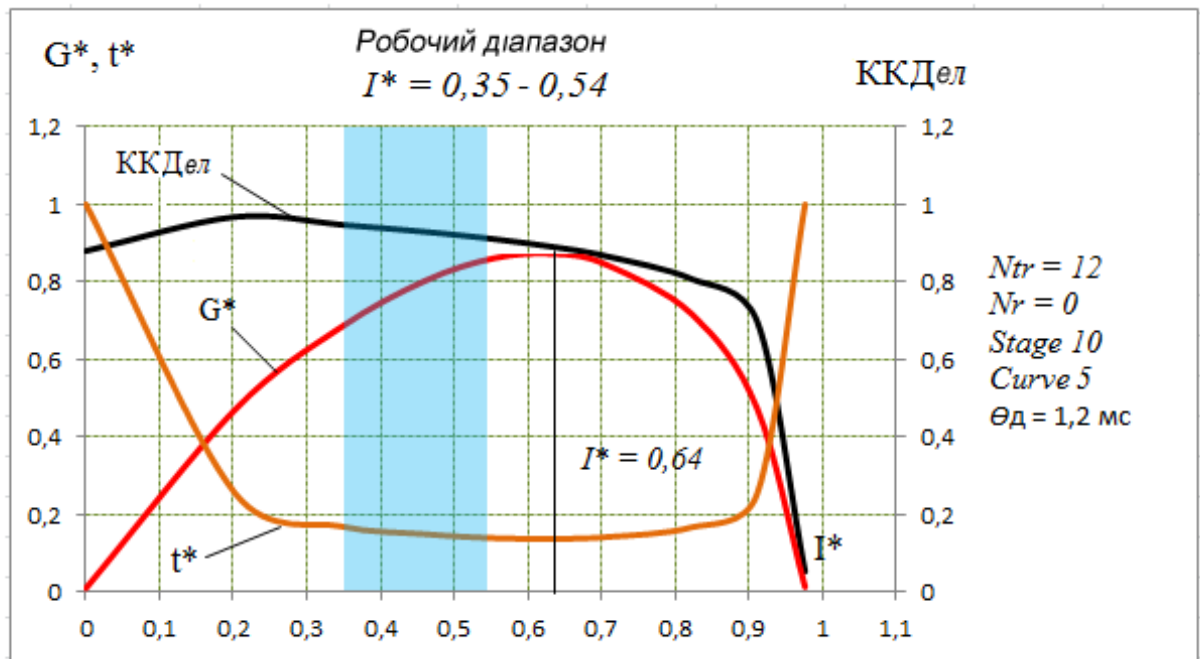


б)

Рисунок 4.22 – Ключові параметри ДСП-180 на дев'ятому етапі плавлення №1: а) електричні та технологічні; б) робочі



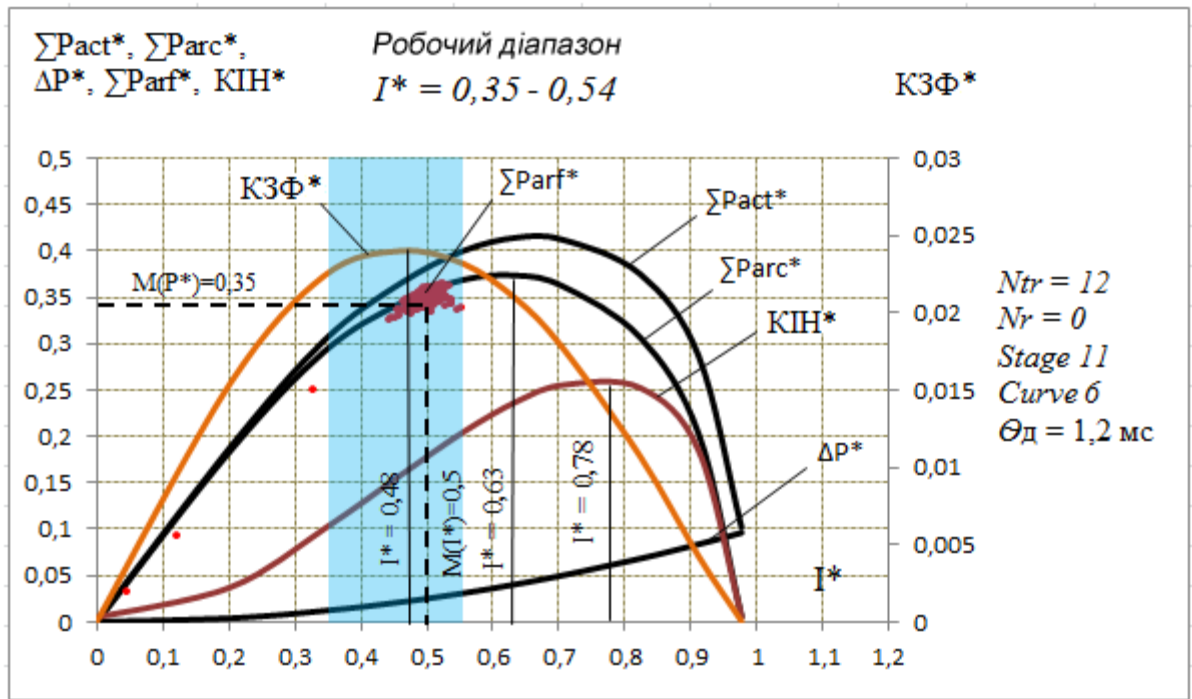
а)



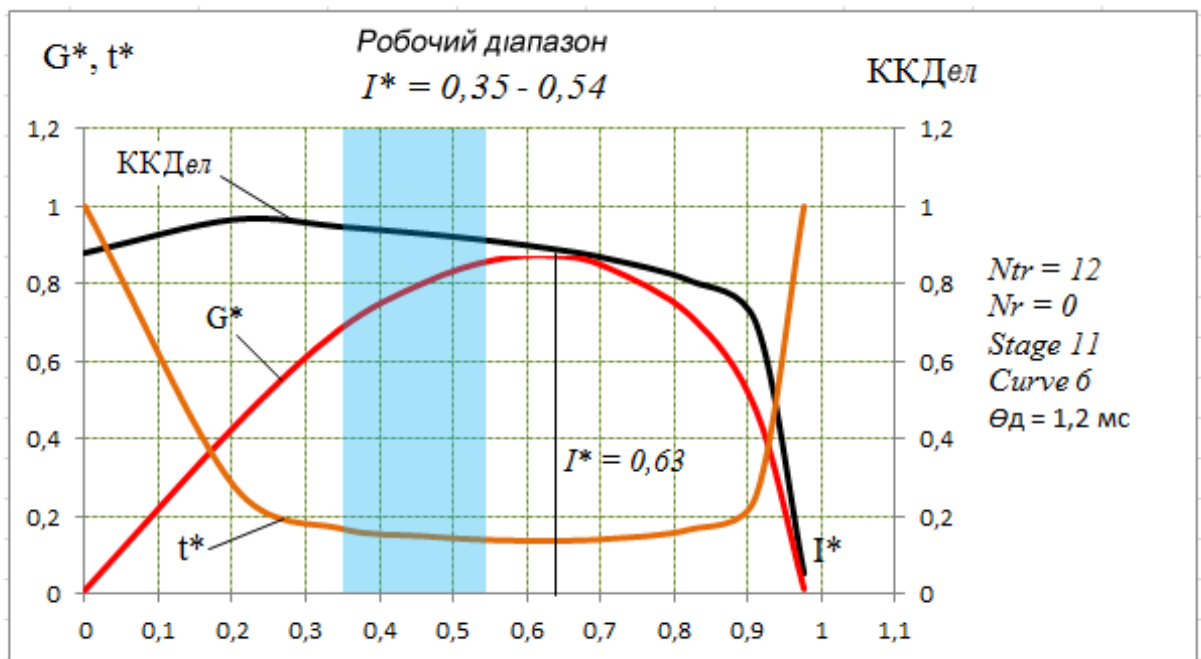
б)

Рисунок 4.23 – Основні показники ДСП-180 на десятому етапі плавлення №1:

а) електричні та технологічні; б) робочі



а)



б)

Рисунок 4.24 – Комплексні характеристики ДСП-180 на одинадцятому етапі плавлення №1:

а) електричні й технологічні; б) робочі

4.4 Висновки по розділу

Для більш глибокого аналізу необхідно встановити робочий інтервал функціонування дугової сталеплавильної печі. Початком цього діапазону вважається момент переходу електричної дуги з переривчастого режиму горіння у стабільний безперервний режим. Верхня межа визначається граничним допустимим струмом, що на досліджуваному об'єкті становить 70 кА. Перевищення даного значення спричиняє спрацювання релейного захисту. Стійке горіння дуги спостерігається при досягненні струмом рівня 45 кА.

- 45 кА — мінімальна межа робочого струму дуги;
- 70 кА — максимально допустиме значення струму печі.

Визначивши робочий діапазон, потрібно обрати оптимальну робочу точку, яка забезпечить ефективність процесу. Для цього додатково обчислюються робочі та технологічні параметри печі.

Аналіз побудованих раніше графічних залежностей показує необхідність оптимізації електричних режимів роботи. Згідно з сучасними підходами до ведення плавки в дугових печах, на початковій стадії запалювання дуг потрібно забезпечити максимальну електричну потужність, під час формування колодязів — максимальне значення коефіцієнта зносу футеровки (КЗФ), а на завершальному етапі — найбільший коефіцієнт інтенсивності нагріву металу (КІН). Найбільш стабільний і симетричний режим горіння дуг, як правило, спостерігається саме наприкінці плавки.

У проаналізованому випадку ці вимоги дотримані не повністю. На початковій стадії (рис. 4.14) струм у відносних одиницях близький до максимального значення КЗФ. У цей момент відбувається запалювання дуг і початок проплавлення колодязів, тому доцільно підтримувати найвищу потужність дуги для скорочення часу плавлення. Недоліком є збільшення активних втрат енергії.

На другому етапі (рис. 4.15) формується і розширюється зона колодязів, тож необхідно максимально використовувати теплове

випромінювання дуги по всій її довжині, підтримуючи підвищене значення КЗФ. Це сприяє покращенню енергетичної ефективності печі та зниженню джоулевих втрат.

Третій (рис. 4.16) і четвертий етапи (рис. 4.17) також потребують підтримання високого рівня КЗФ, тому що саме тоді відбувається активне плавлення металу та збільшення об'єму розплаву у ванні.

На наступних стадіях (рис. 4.18–4.24) — з п'ятої по восьму — доцільно продовжувати роботу в режимі максимального КЗФ, що забезпечує найкраще співвідношення між енерговитратами й ефективністю теплопередачі. Для дев'ятої — одинадцятої стадій параметри дуги відповідають оптимальним, тому подальша оптимізація не потрібна.

Отже, аналіз отриманих характеристик показує, що поточні електричні режими роботи дугової сталеплавильної печі не можна вважати оптимальними. Підвищення ефективності можливе шляхом регулювання повного опору фаз (імпедансу), що дозволяє коригувати струм дуги та переміщати «хмару» експериментальних точок у межах робочого діапазону для досягнення кращих показників.

Реалізація такого підходу потребує додаткових інвестицій, розрахунок яких буде наведено в розділі 6. У подальших розділах, на основі математичної моделі з можливістю зміни імпедансу, буде побудовано оновлені характеристики печі та проведено оцінку економічного ефекту.

Суть регулювання імпедансу полягає в тому, що фіксуються миттєві значення напруги та струму, за якими визначається повний опір фаз. Отримане значення порівнюється з даними, збереженими в пам'яті системи автоматичного керування рухом електродів ARCOS–NT, яка планується до впровадження разом із відповідним програмним забезпеченням. Виявлені відхилення компенсуються автоматичним коригуванням положення електродів до необхідної відстані.

5 ОПТИМІЗАЦІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ РЕЖИМІВ ДУГОВОЇ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЇ ПЕЧІ ШЛЯХОМ ЗМІЩЕННЯ РОБОЧОЇ ТОЧКИ

Оптимізацію режимів роботи ДСП проведено для плавок, розглянутих у попередніх розділах. Як зазначалося раніше, для підвищення ефективності процесу необхідно забезпечувати максимальні або наближені до них значення коефіцієнта зносу футеровки (КЗФ), потужності дуги та коефіцієнта інтенсивності нагріву (КІН) на різних етапах плавки.

Відомо, що електрична дуга характеризується переважно активною потужністю, тому струм дуги також має активну природу. Процес розплавлення металу, споживання електроенергії з мережі та регулювання положення електродів було змодельовано у середовищі MATLAB. У межах цієї моделі фіксується падіння напруги в короткій мережі й безпосередньо на дузі, а також визначається струм дуги. На основі отриманих даних обчислюється повний опір електричного контуру (коротка мережа – дуга), з якого виділяється активна складова. Цей параметр може бути скоригований шляхом зміни напруги на відповідній ділянці.

Оскільки напруга прямо пропорційна довжині дуги, зменшення відстані між електродами та металом призводить до скорочення довжини дуги. Отже, зміщення робочої точки досягається шляхом регулювання цієї відстані. Процес є повністю автоматизованим у системі керування електродами ARCOS–NT, впровадження якої дозволить знизити витрати на виробництво сталі.

Система містить матрицю уставок опорів, кожна з яких відповідає певній стадії плавлення металу (визначеній комбінації ступенів трансформатора, реактора та робочої кривої). Під час плавки фактичне значення опору порівнюється із заданим у матриці. Різниця компенсується зміною довжини дуги, що, у свою чергу, змінює напругу. У результаті робоча точка автоматично стабілізується на оптимальному значенні струму дуги.

Таким чином, регулювання імпедансу фазового кола дозволяє досягти таких значень струму, за яких забезпечується найефективніше протікання процесу плавлення та зменшуються енергетичні втрати.

З аналізу даних, наведених на рисунку 4.14, видно, що поточне положення робочої точки при струмі 0,56 в.о. та опорі 11,1 мОм не забезпечує максимального значення потужності електричної дуги. Для досягнення оптимального режиму було проведено коригування активного опору. Зменшення його значення до 8,8 мОм дозволяє встановити робочу точку, яка відповідає оптимальному струму 0,64 в.о.

У результаті зміщення робочої точки спостерігається підвищення енергоефективності процесу плавлення завдяки більш повному використанню потужності дуги та зниженню втрат у короткій мережі.

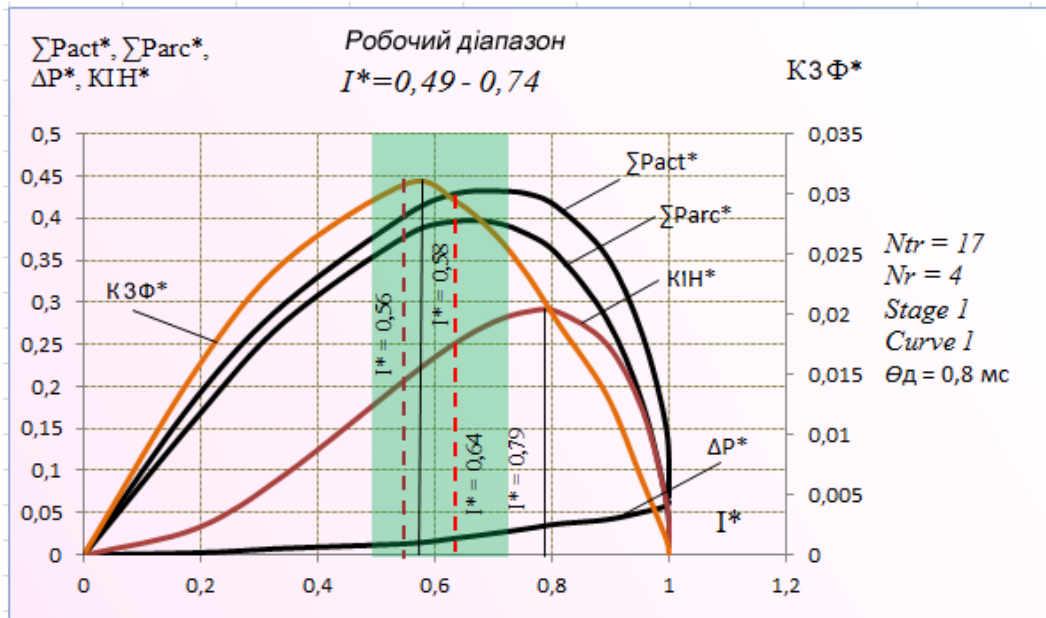
Таблиця 5.1 – Значення струму дуги до і після коригування матриці уставок імпедансу

№ стадії	Параметри режиму (прк / птр / пр)	До оптимізації Активний опір R, мОм	До оптимізації Математичне очікування струму I, в.о.	Після оптимізації Активний опір R, мОм	Після оптимізації Математичне очікування струму I, в.о.
1	1 / 17 / 4	11,12	0,564	8,82	0,641
2	2 / 17 / 4	9,82	0,601	10,82	0,571
3	3 / 19 / 5	10,62	0,611	12,62	0,521
4	4 / 21 / 5	10,42	0,581	10,82	0,541
5	1 / 17 / 4	11,42	0,551	9,22	0,631
6	2 / 17 / 4	10,82	0,571	12,62	0,511
7	3 / 19 / 5	10,62	0,581	12,62	0,511
8	4 / 21 / 5	10,42	0,581	12,62	0,511
9	4 / 12 / 0	10,02	0,451	10,02	0,451
10	5 / 12 / 0	7,01	0,481	7,01	0,481
11	6 / 12 / 0	6,61	0,501	6,61	0,501

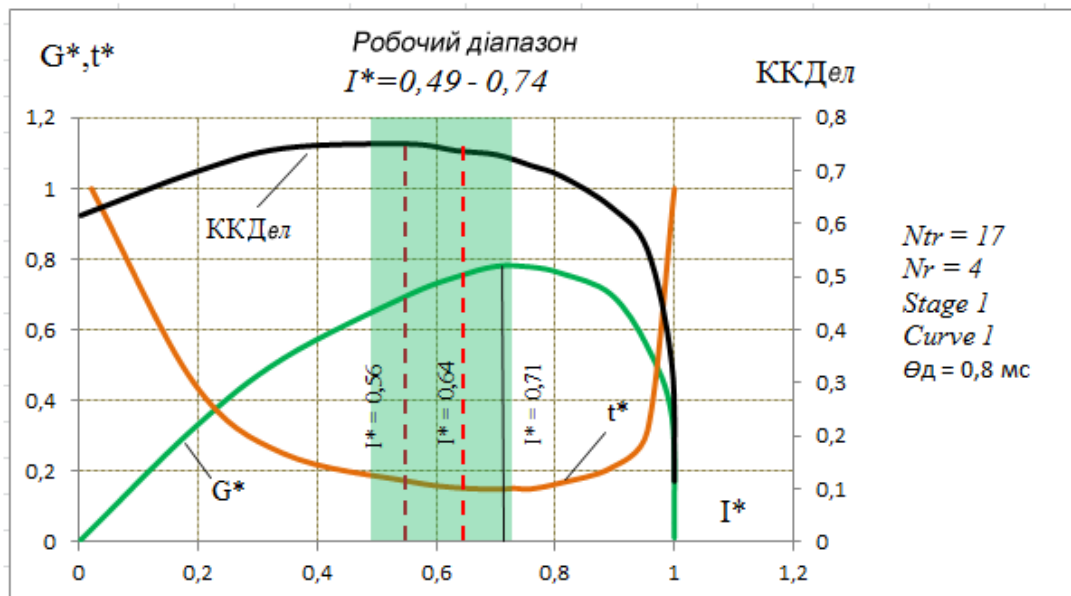
5.1 Електричні, технологічні та робочі параметри до і після оптимізації

На рисунках 5.1–5.11 подано порівняльні графіки електричних, технологічних і робочих характеристик дугової сталеплавильної печі до та після проведення оптимізації.

На кожному графіку дві вертикальні лінії позначають положення робочих точок, що відповідають початковому та скоригованому режимам роботи. Зони допустимого струму дуги виділено зеленим або синім кольором, що дозволяє наочно оцінити зміщення робочого діапазону після регулювання імпедансу.



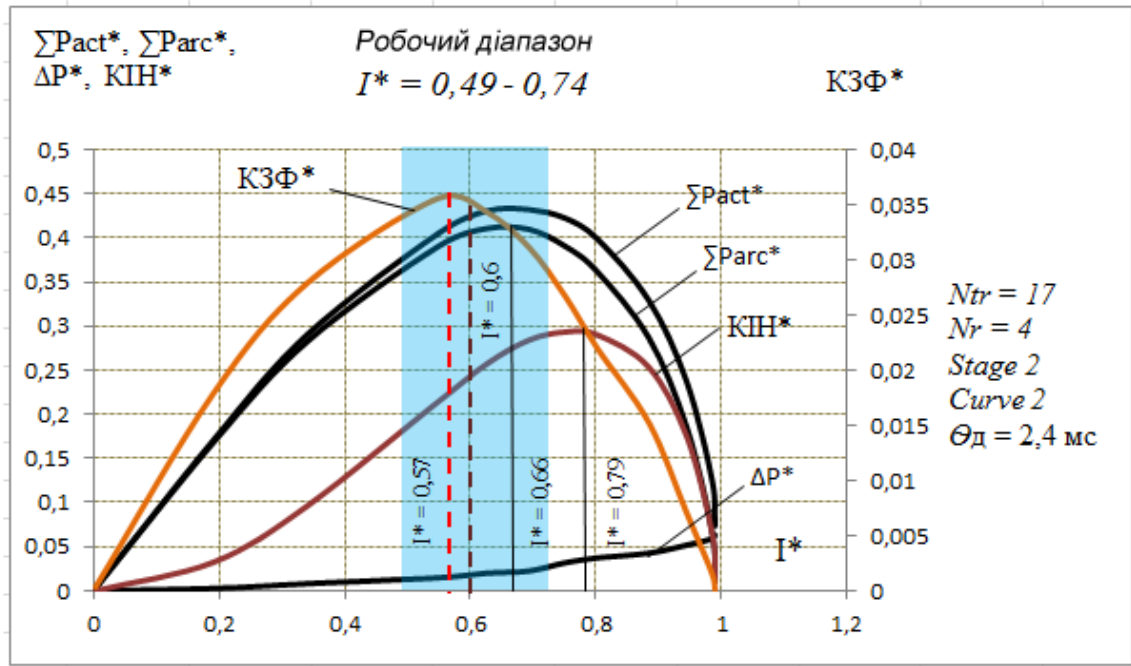
а)



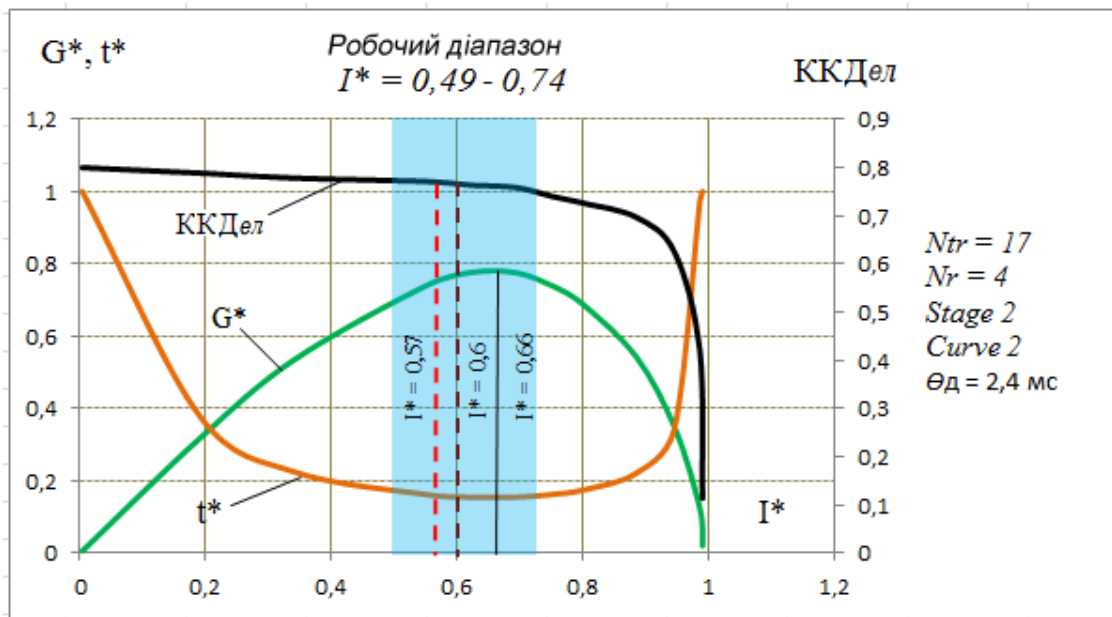
б)

Рисунок 5.1 - Основні характеристики ДСП-180 із позначенням робочих точок до (0,56) та після (0,64) оптимізації, 1-ша стадія:

а) електричні й технологічні параметри; б) робочі характеристики.



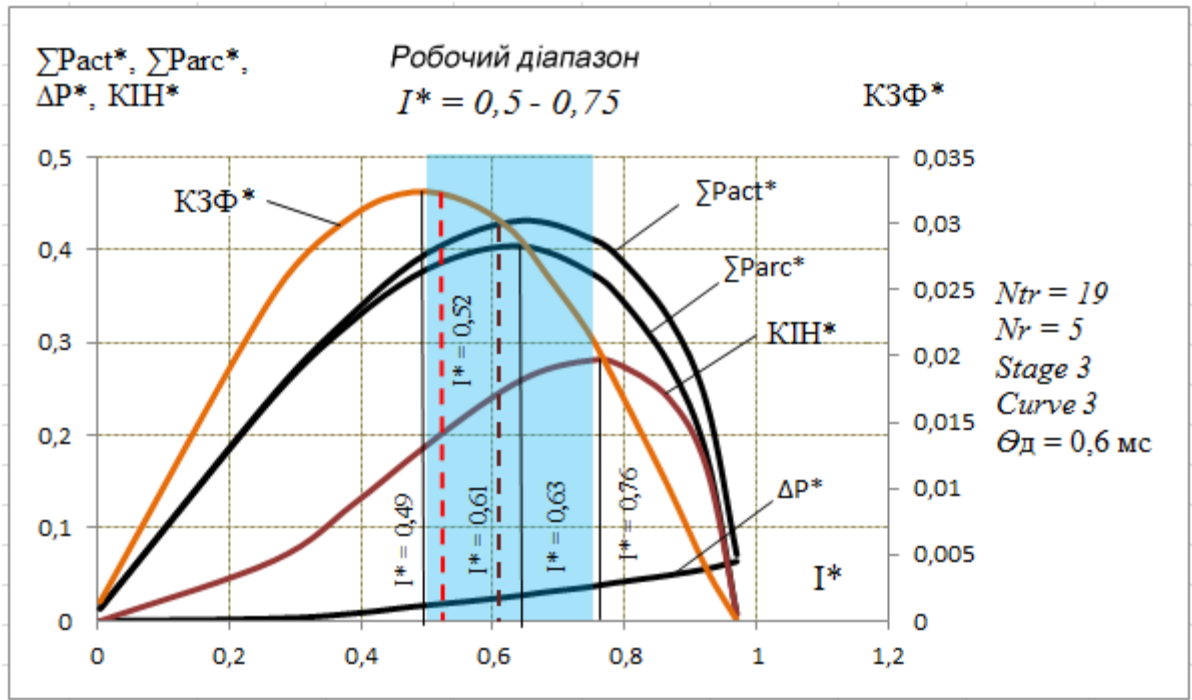
а)



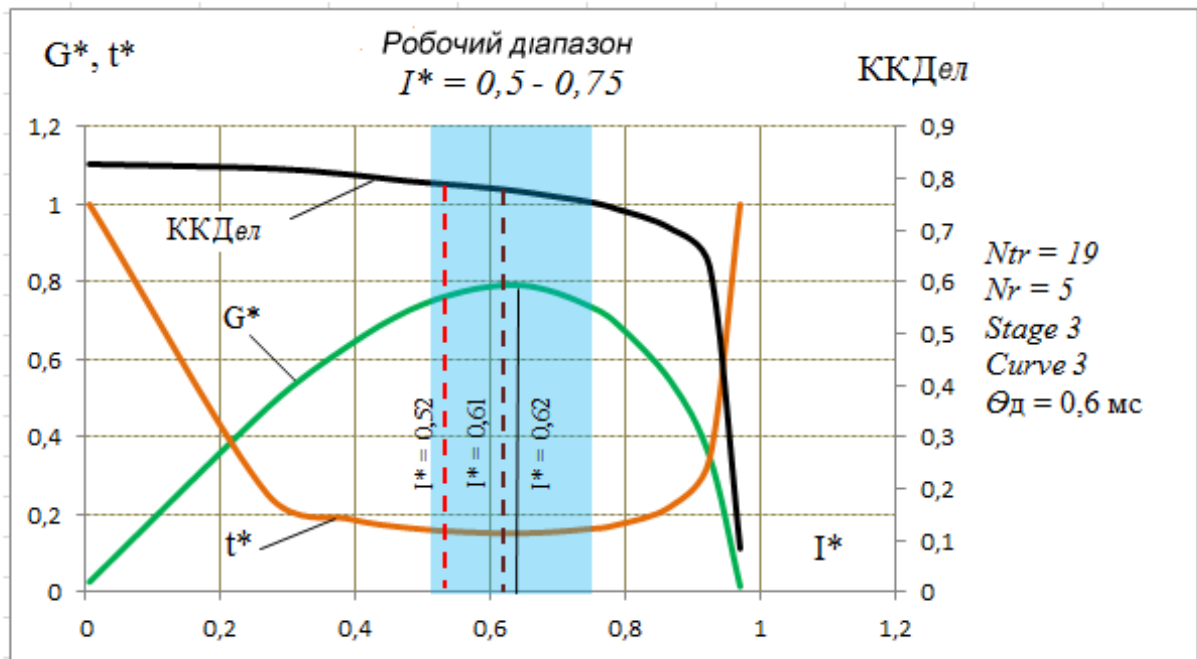
б)

Рисунок 5.2 – Основні параметри ДСП-180 із вказівкою робочих точок до (0,60) та після (0,57) оптимізації, 2-га стадія:

а) електричні й технологічні параметри; б) робочі характеристики.



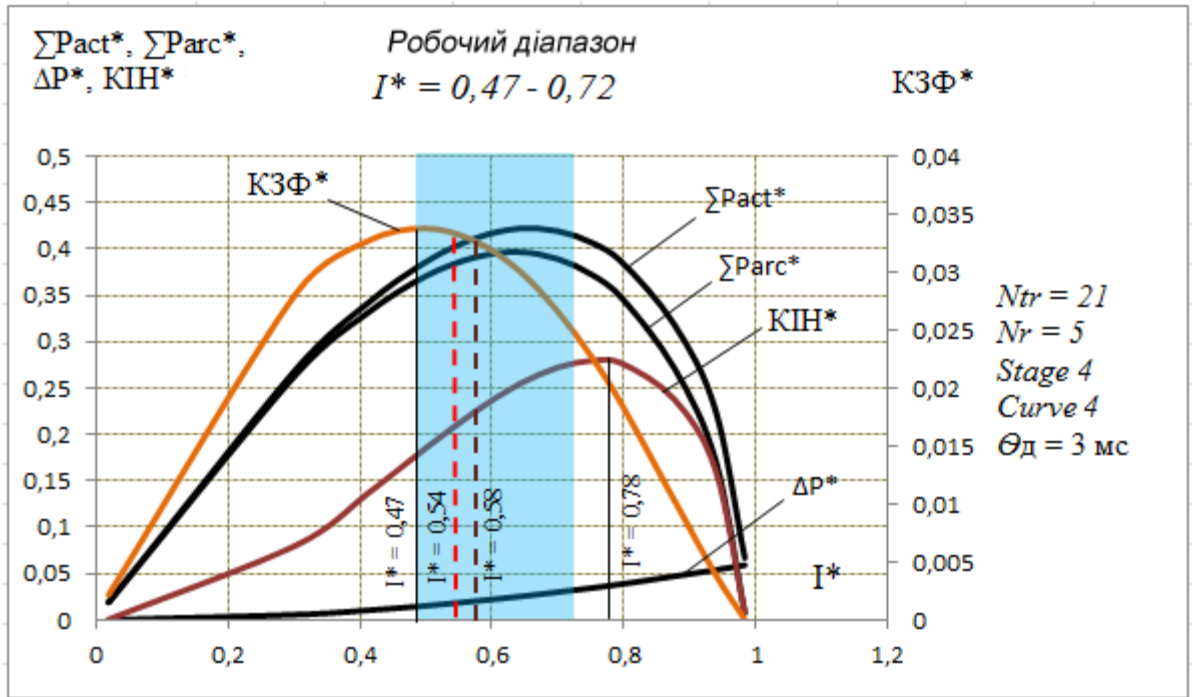
а)



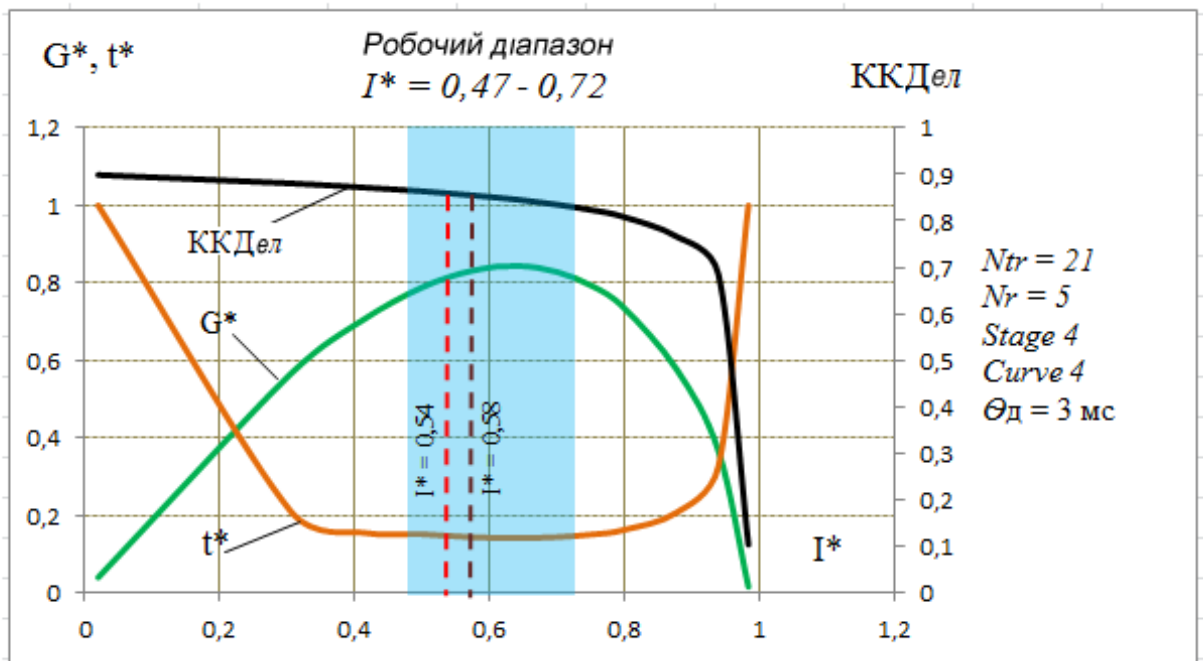
б)

Рисунок 5.3 – Характеристики ДСП-180 із робочими точками до (0,61) та після (0,52) оптимізації, 3-тя стадія:

а) електричні й технологічні параметри; б) робочі характеристики.



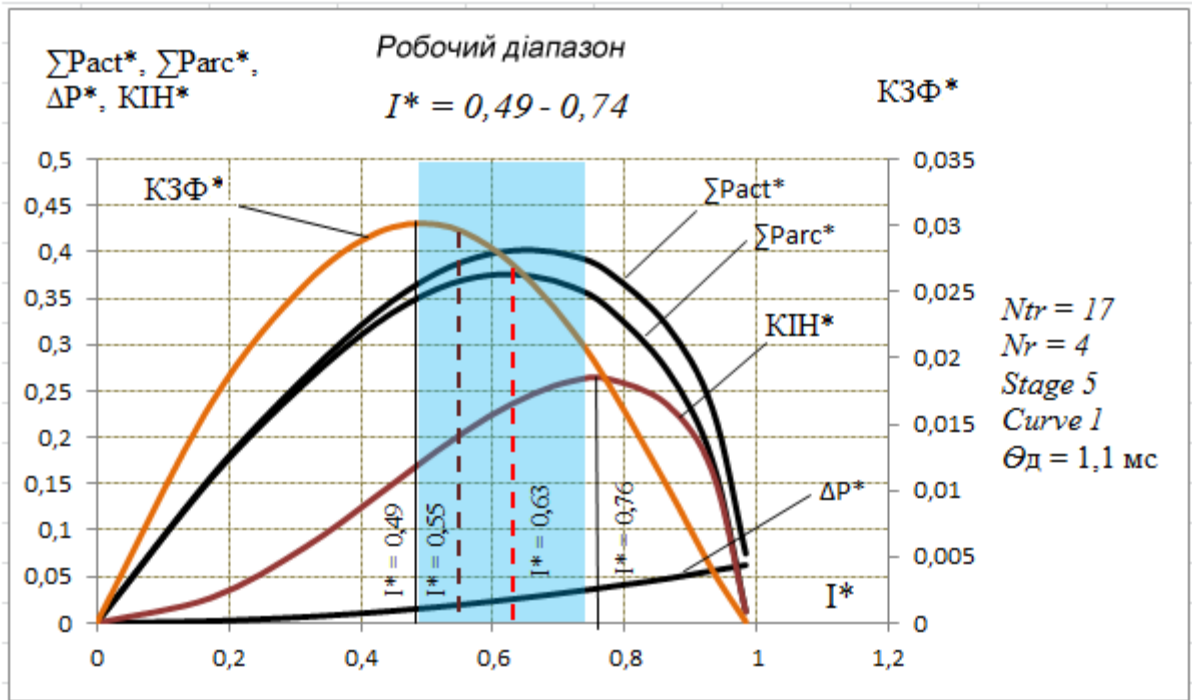
а)



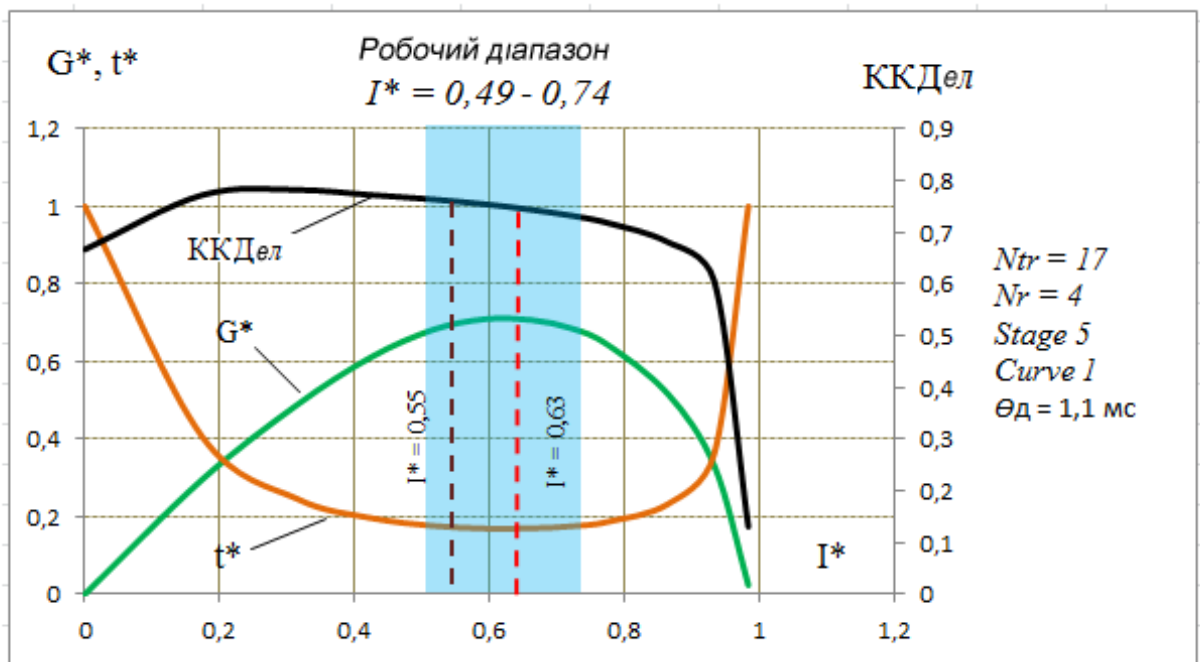
б)

Рисунок 5.4 – Параметри ДСП-180 до (0,58) та після (0,54) оптимізації, 4-та стадія:

а) електричні й технологічні; б) робочі.



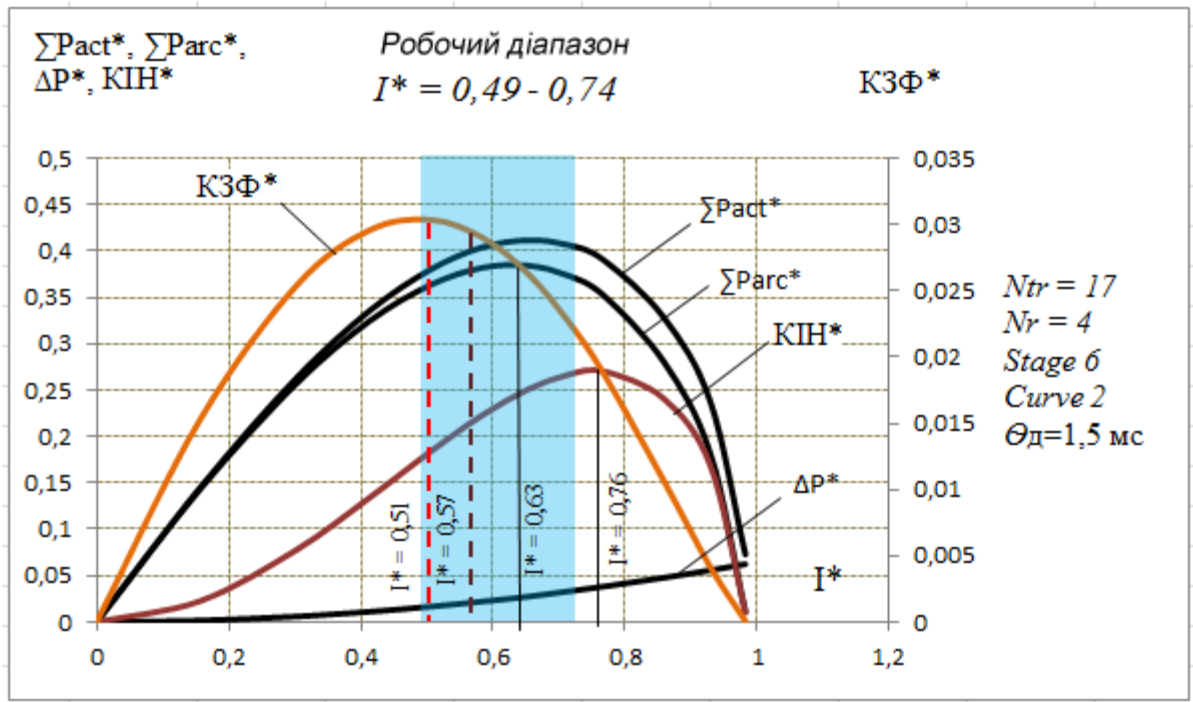
а)



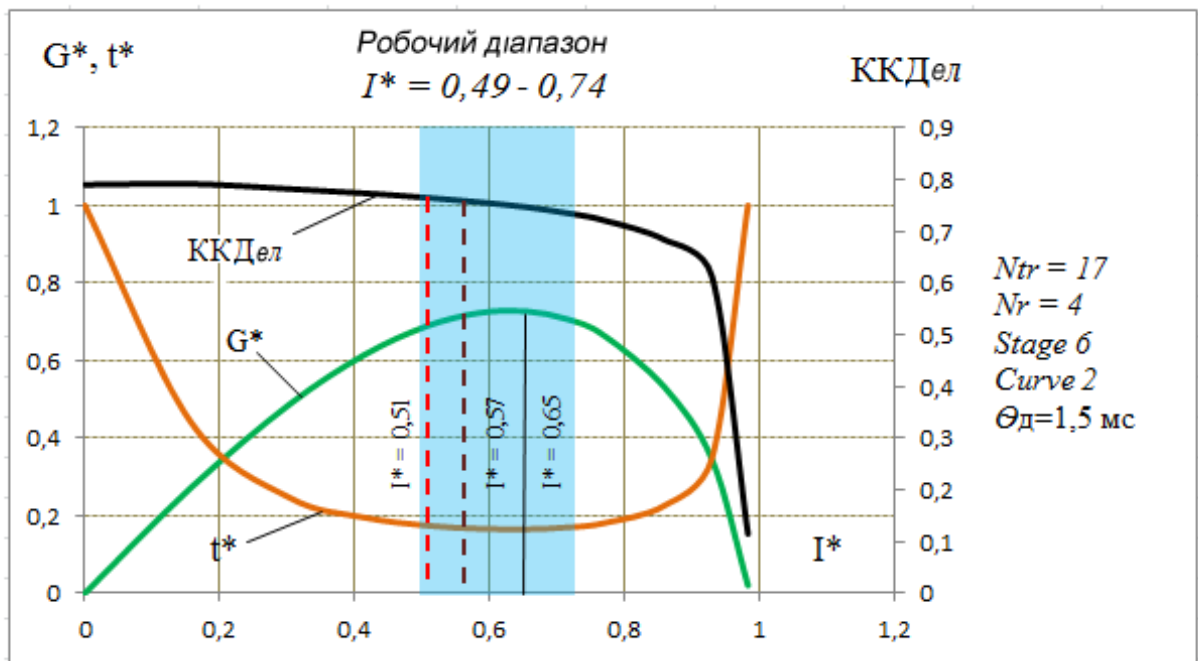
б)

Рисунок 5.5 – Характеристики ДСП-180 до (0,55) та після (0,63) оптимізації, 5-та стадія:

а) електричні й технологічні; б) робочі.



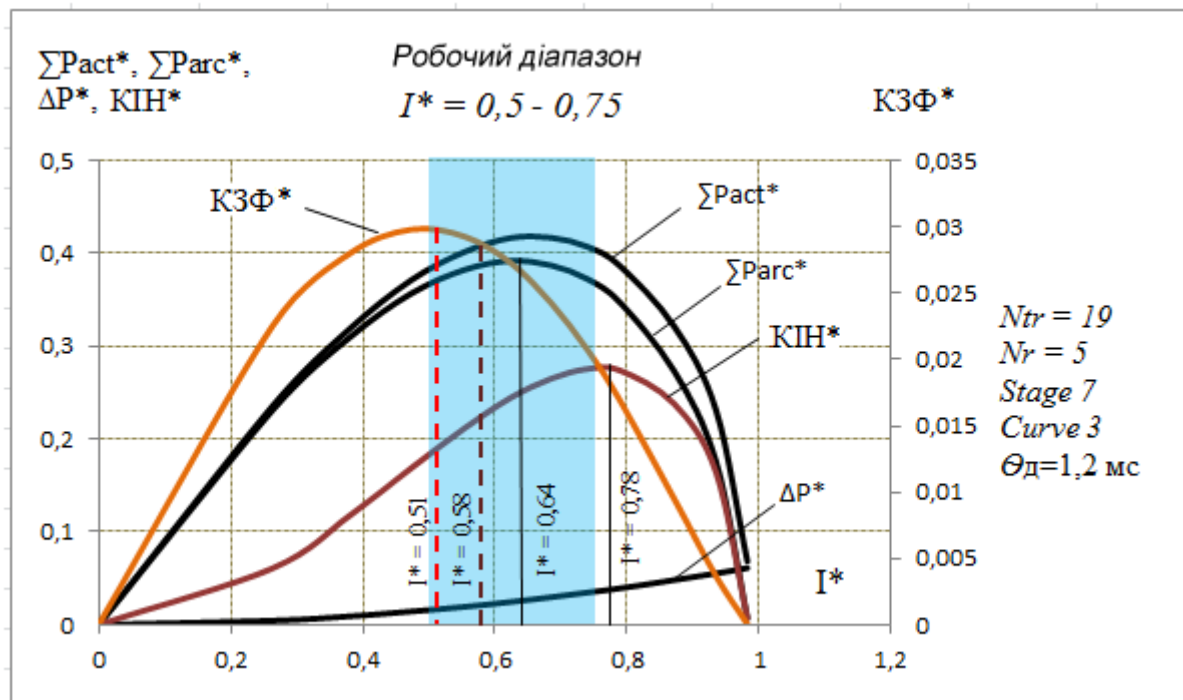
а)



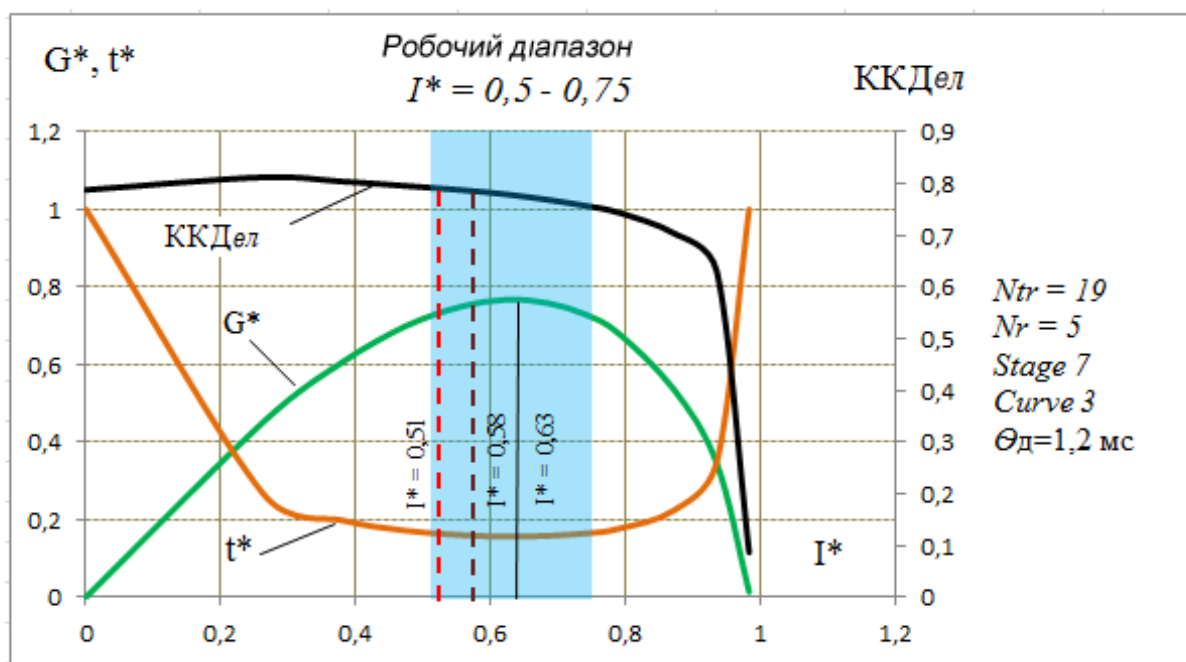
б)

Рисунок 5.6 – Параметри ДСП-180 із позначенням робочих точок до (0,57) та після (0,51) оптимізації, 6-та стадія:

а) електричні й технологічні; б) робочі.



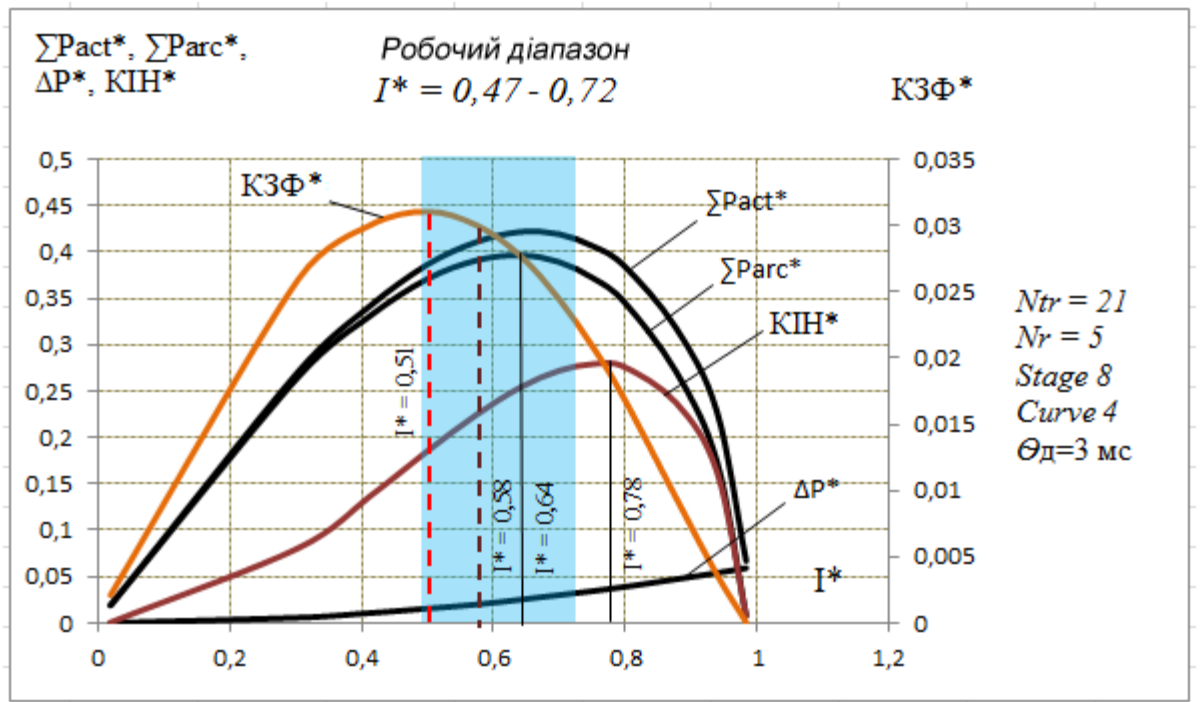
а)



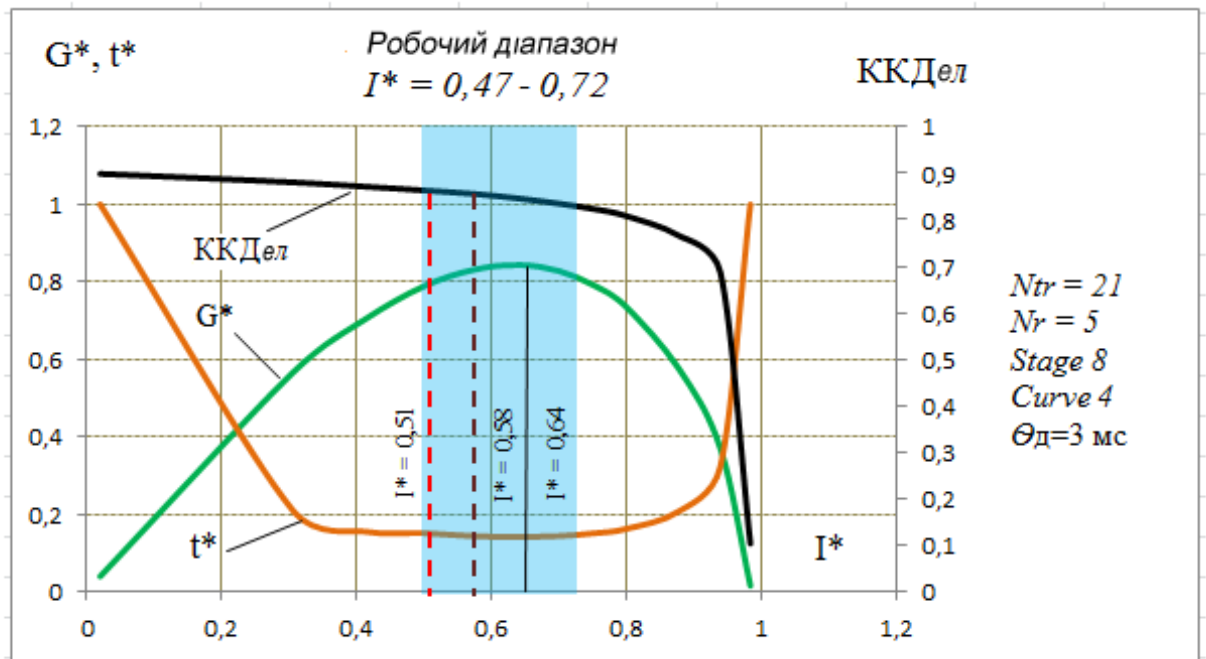
б)

Рисунок 5.7 – Характеристики ДСП-180 до (0,58) та після (0,51) оптимізації, 7-ма стадія:

а) електричні й технологічні; б) робочі.



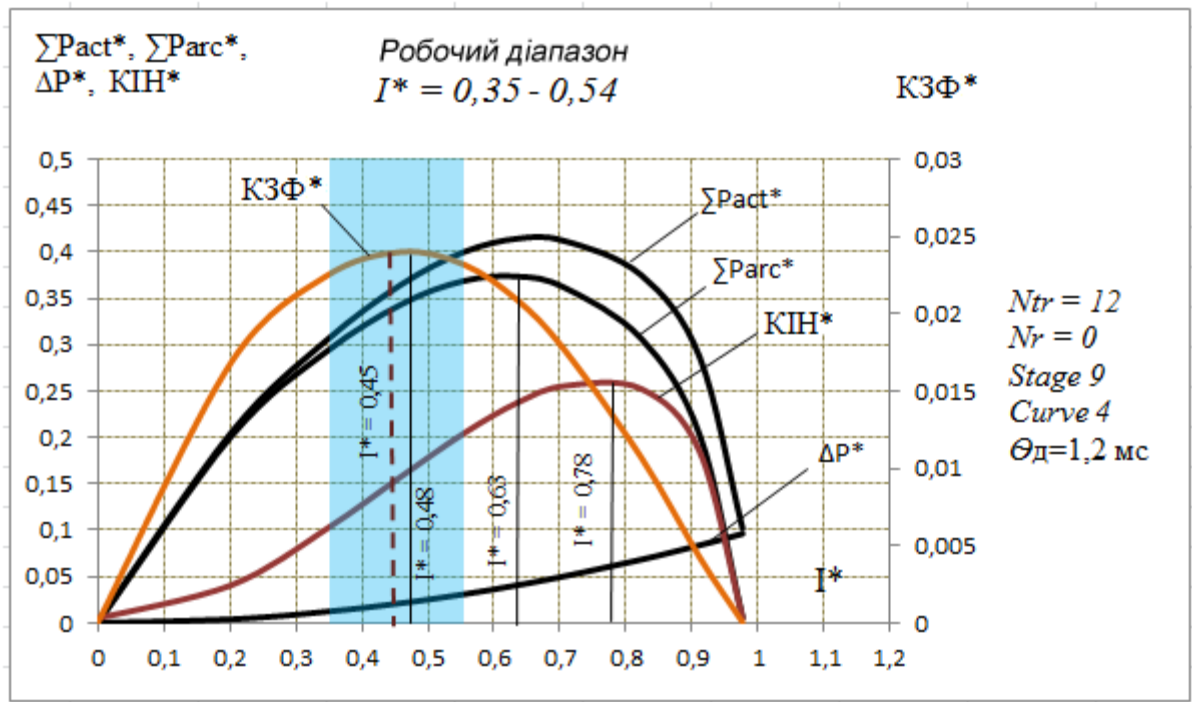
а)



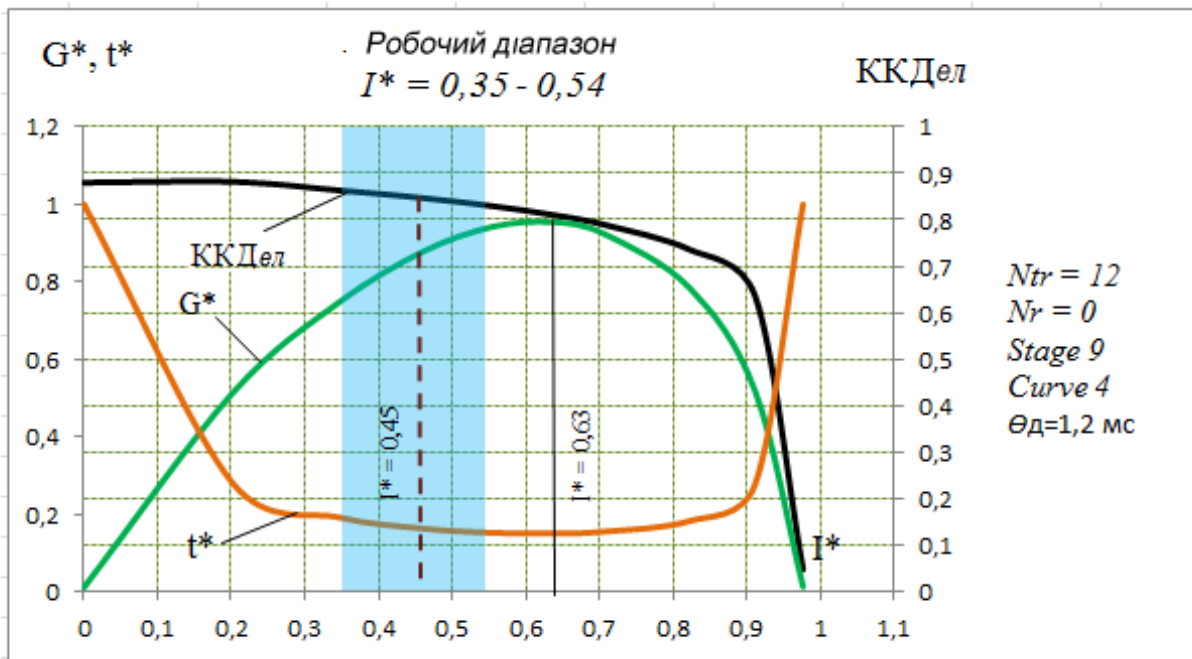
б)

Рисунок 5.8 – Основні параметри ДСП-180 до (0,58) та після (0,51) оптимізації, 8-ма стадія:

а) електричні й технологічні; б) робочі.



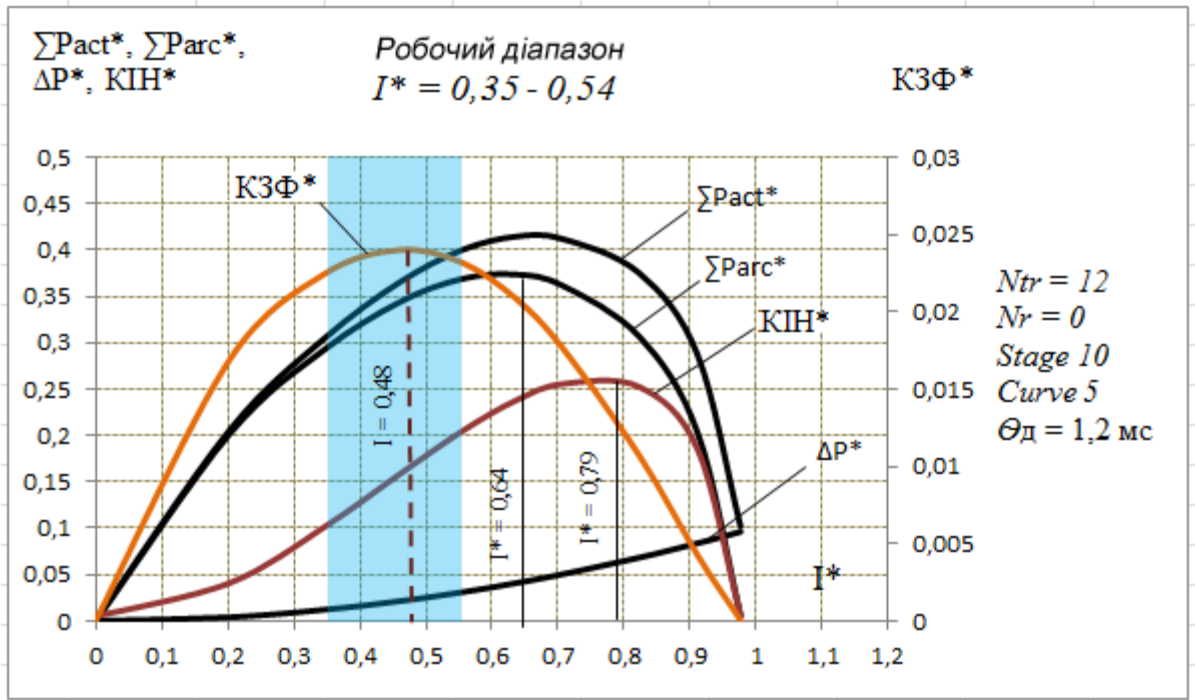
а)



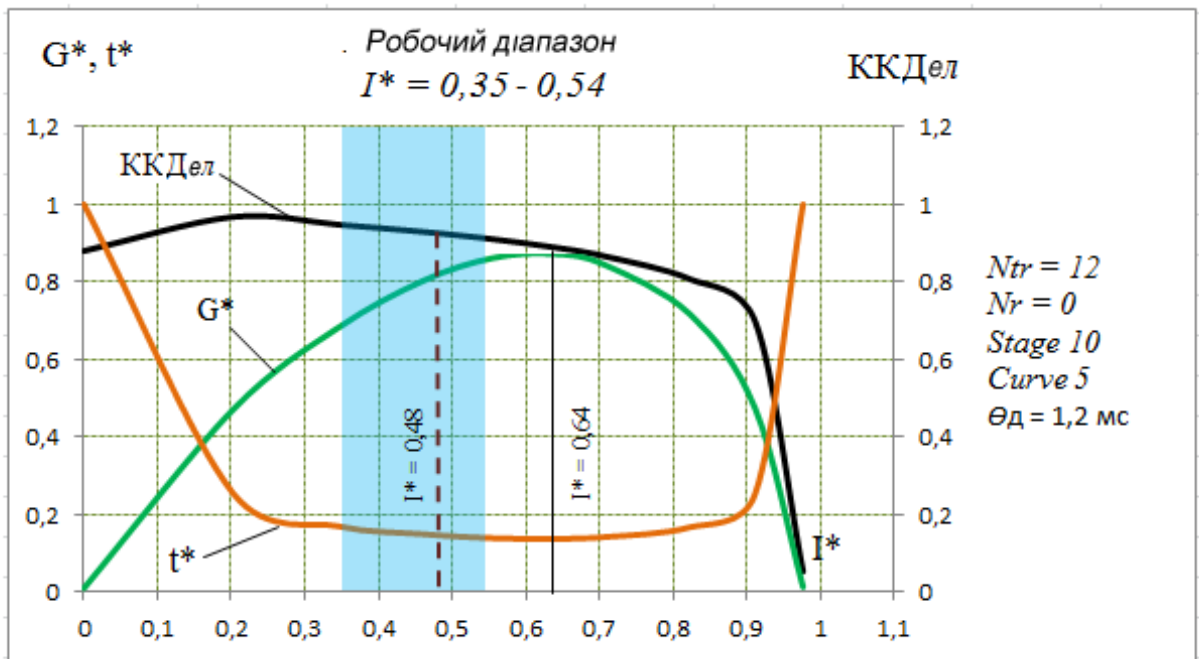
б)

Рисунок 5.9 – Параметрим ДСП-180 з зазначенням робочих точок до та після оптимізації, 9-та стадія:

а) електричні й технологічні; б) робочі.



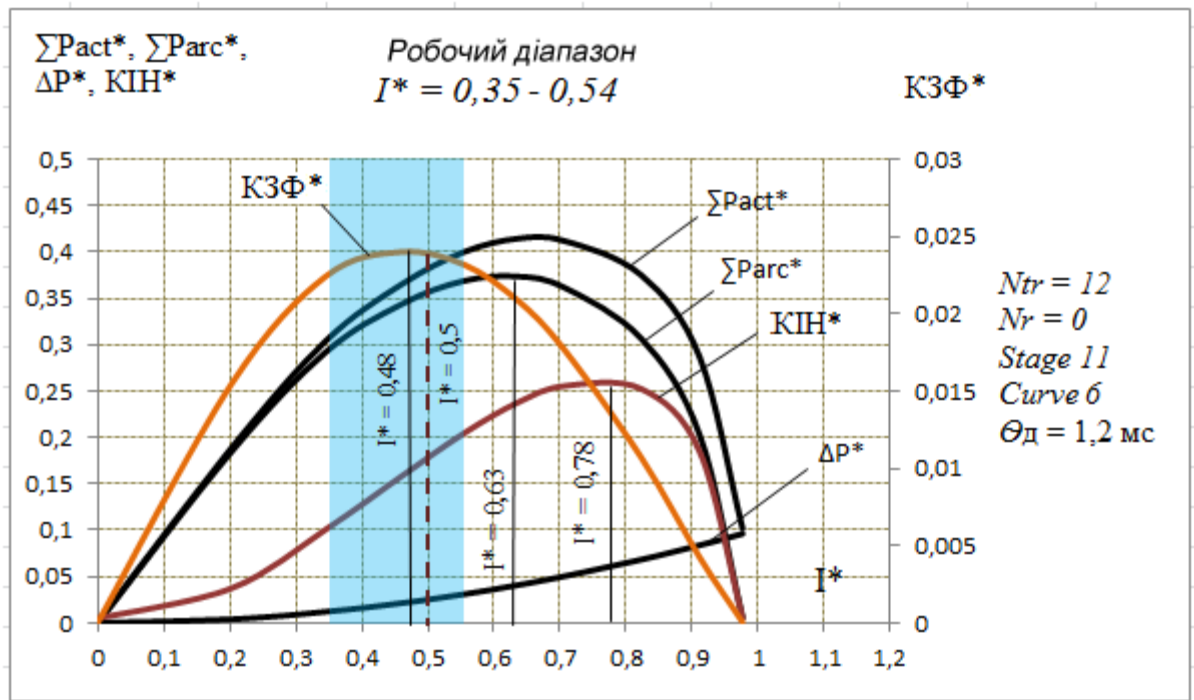
а)



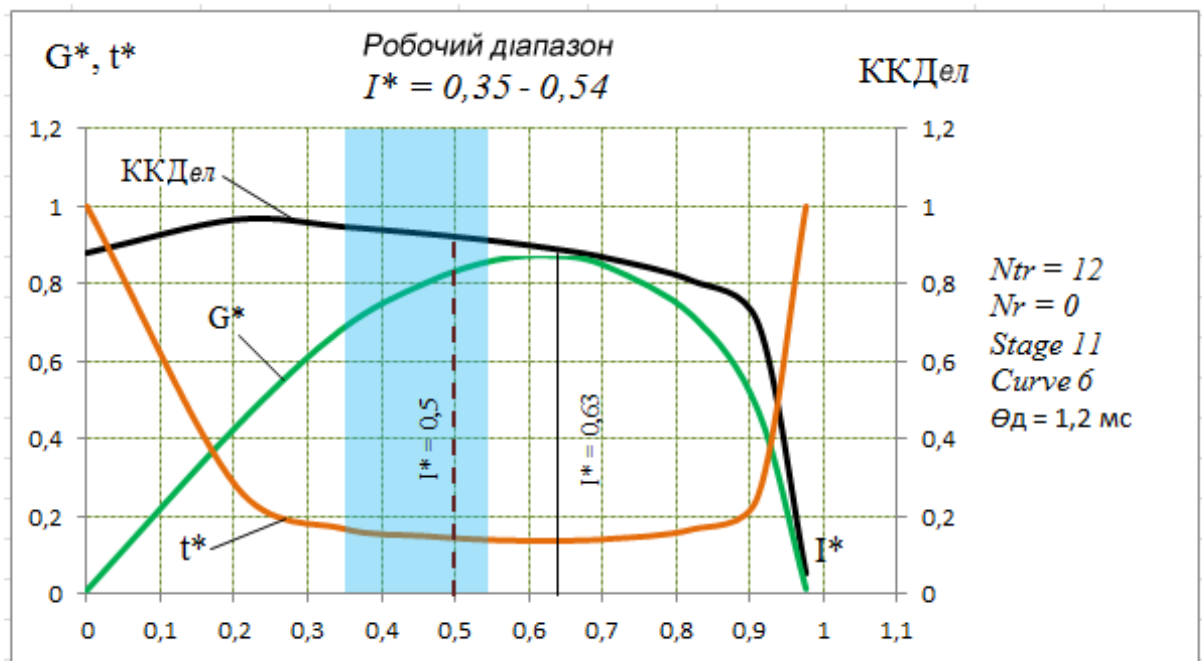
б)

Рисунок 5.10 – Параметри ДСП-180 із робочими точками до та після оптимізації, 10-та стадія:

а) електричні й технологічні; б) робочі.



а)



б)

Рисунок 5.11 – Параметри ДСП-180 із позначенням робочих точок до та після оптимізації, 11-та стадія:

а) електричні й технологічні; б) робочі.

На рисунку 5.1 видно, що робоча точка при струмі 0,56 в.о. не досягає пікового значення потужності дуги; оптимальним слід вважати струм 0,64 в.о.

На рисунку 5.2 робоча точка зі струмом 0,60 в.о. не відображає максимум коефіцієнта зносу футеровки (КЗФ); рекомендоване значення — 0,57 в.о.

Положення робочої точки при струмі 0,61 в.о. на рисунку 5.3 також не відповідає максимальному значенню КЗФ, тому оптимальним є рівень 0,52 в.о.

На рисунку 5.4, який ілюструє четверту стадію, необхідно підтримувати значення струму, максимально наближене до піку КЗФ ($I^* = 0,5$ в.о.). Проте через обмеження імпедансу досягти цього рівня неможливо, тому рекомендовано зупинитися на струмі 0,54 в.о.

На рисунку 5.5 показано, що робочу точку при $I^* = 0,55$ потрібно змістити до $I^* = 0,63$, де спостерігається максимум потужності дуги. Це особливо важливо на стадії запалювання дуг, коли необхідно забезпечити їх стабільне горіння.

На рисунку 5.6 робочу точку доцільно перемістити зі струму 0,57 в.о. до 0,51 в.о., що відповідає максимуму КЗФ. Таке коригування сприяє підвищенню ефективності роботи дуги та зменшенню електричних втрат у колах живлення.

Рисунок 5.7 демонструє аналогічну ситуацію — для сьомої стадії також слід утримувати струм поблизу максимуму КЗФ. На рисунку 5.8, який відповідає восьмій стадії, рекомендації залишаються тими самими, оскільки збереження високого значення КЗФ забезпечує найкраще використання теплової енергії дуги.

На останніх стадіях (рисунки 5.9–5.11) коригування не потрібне, оскільки робочі струми вже відповідають оптимальним умовам, за яких коефіцієнт зносу футеровки досягає свого максимуму.

5.2 Розрахунок електроспоживання електротехнологічною установкою ДСП-180 до і після оптимізації

Кількість спожитої електроенергії дугової сталеливарної печі розглянутої раніше плавки № 1, на певній стадії розраховується за формулою 5.1:

$$W_i = P_{актi} \cdot t_i, \quad (5.1)$$

де W_i – спожита електроенергія на відповідній стадії, кВт·год;

$P_{актi}$ – активна потужність (визначається за графіками), кВт;

t_i – тривалість стадії, год.

Для оцінки продуктивності печі на різних етапах плавлення час розплавлення 1 т сталі розраховується за формулою (5.2):

$$T_i = \frac{1}{G_i}, \quad (5.2)$$

де T_i – час розплавлення однієї тонни сталі, год/т;

G_i – продуктивність печі на певній стадії, т/год.

Масу металу, розплавленого за певний період, визначають згідно з (5.3):

$$m = k_{об} \cdot \frac{t_i}{T_i}, \quad (5.3)$$

де $k_{об}$ – узагальнений коефіцієнт, який враховує тепловий ефект від роботи пальників, хімічних реакцій та тепла «болота»; орієнтовно $k_{об}=1,57$.

Розрахунки електроспоживання до та після оптимізації проведено для плавки № 1 за даними [11] та зведено в таблиці 5.2 та 5.3.

Таблиця 5.2 - Електроспоживання до оптимізації

Стадія	Час плавки, год	Ракт, кВт	G, т/год	T, год/т	W, кВт·год	m, т
1	0,03	82 900	182	0,0055	2 487	8,56
2	0,0358	84 420	190	0,00526	3 022	10,69
3	0,0716	85 984	190	0,00524	6 156	21,45
4	0,06917	93 790	208,75	0,00479	6 487	22,67
5	0,0116	77 988	175	0,0057	905	3,20
6	0,019	82 090	185	0,0054	1 560	5,52
7	0,03	86 700	193	0,00517	2 601	9,11
8	0,055	94 466	211	0,00473	5 196	18,26
9	0,034	90 330	192	0,0052	3 071	10,27
10	0,1	93 000	178,6	0,0056	9 300	28,04
11	0,147	94 488	183	0,00547	13 890	42,12
Всього					54673	179,87

Таблиця 5.3 - Електроспоживання після оптимізації

Стадія	Час плавки, год	Ракт', кВт	G', т/год	T', год/т	W', кВт·год	m', т
1	0,03	86 580	228	0,00438	2 597	10,75
2	0,0358	82 611	189	0,0053	2 957	10,60
3	0,0716	83 818	190	0,00526	6 001	21,35
4	0,06917	91 078	206	0,00486	6 300	22,34
5	0,0116	80 801	178,6	0,0056	937	3,23
6	0,019	76 780	172	0,0058	1 459	5,14
7	0,03	80 704	185	0,00544	2 421	8,66
8	0,055	88 592	202,5	0,00494	4 873	17,47
9	0,034	90 000	192	0,0052	3 060	10,23
10	0,1	93 000	178,6	0,0056	9 300	28,04
11	0,147	94 488	183	0,00547	13 889	42,12
Всього					53794	180,95

Результати оптимізації показали:

1) Сумарне енергоспоживання (одна плавка №1)

До оптимізації (сума по 11 стадіях): 54 674,93 кВт·год

Після оптимізації (сума по 11 стадіях): 53 806,57 кВт·год

Абсолютна економія енергії на одну плавку: $\Delta W = 868,36$ кВт·год

Відносна економія: $\approx 1,59$ % від початкового споживання.

2) Розплавлений метал (за одну плавку)

– Маса металу, розплавлена до оптимізації: 179,873 т

– Маса металу, розплавлена після оптимізації: 179,956 т
(майже ідентичні — невелика різниця через зміни G та T на деяких стадіях)

3) Питомі витрати електроенергії

До оптимізації: $\approx 303,96$ кВт·год / т

Після оптимізації: $\approx 298,998$ кВт·год / т

Економія на 1 тонну: $\approx 4,97$ кВт·год/т

Оптимізація робочих точок дозволила знизити споживання електроенергії без зменшення продуктивності.

Кількість розплавленого металу зросла з 179,87 т до 180,95 т (~1,2% приріст), що підтверджує ефективність оптимізації.

Регулювання робочих точок і імпедансу фаз дозволяє досягти більш ефективного використання дугової печі, підвищуючи ККД печі та зменшуючи джоулеві втрати, при цьому продуктивність залишається на тому ж рівні або зростає.

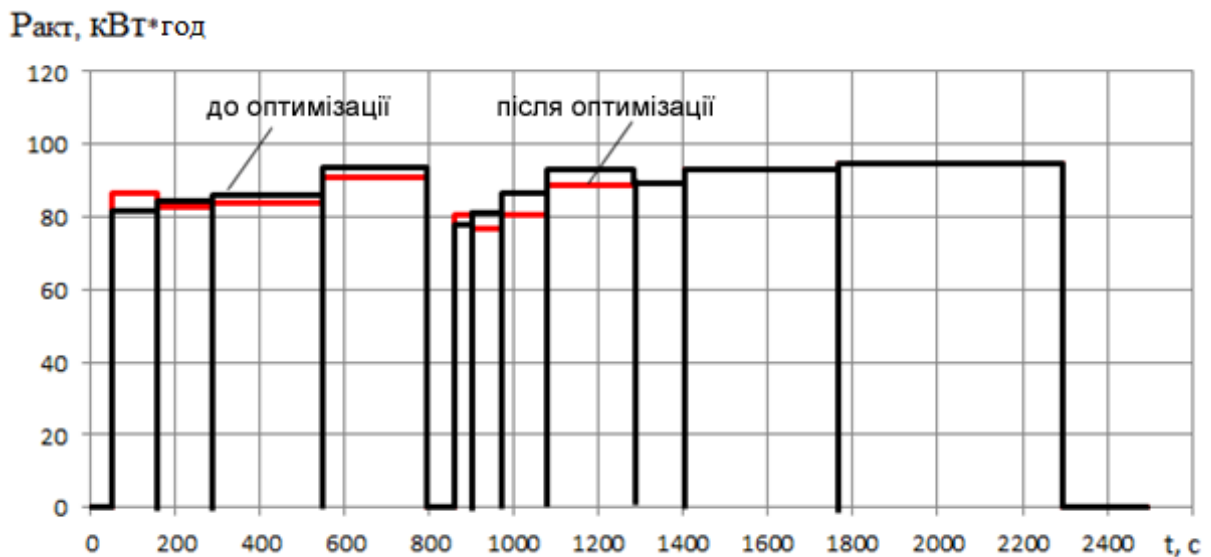


Рисунок 5.12 - Залежності потужності дуг від часу плавки

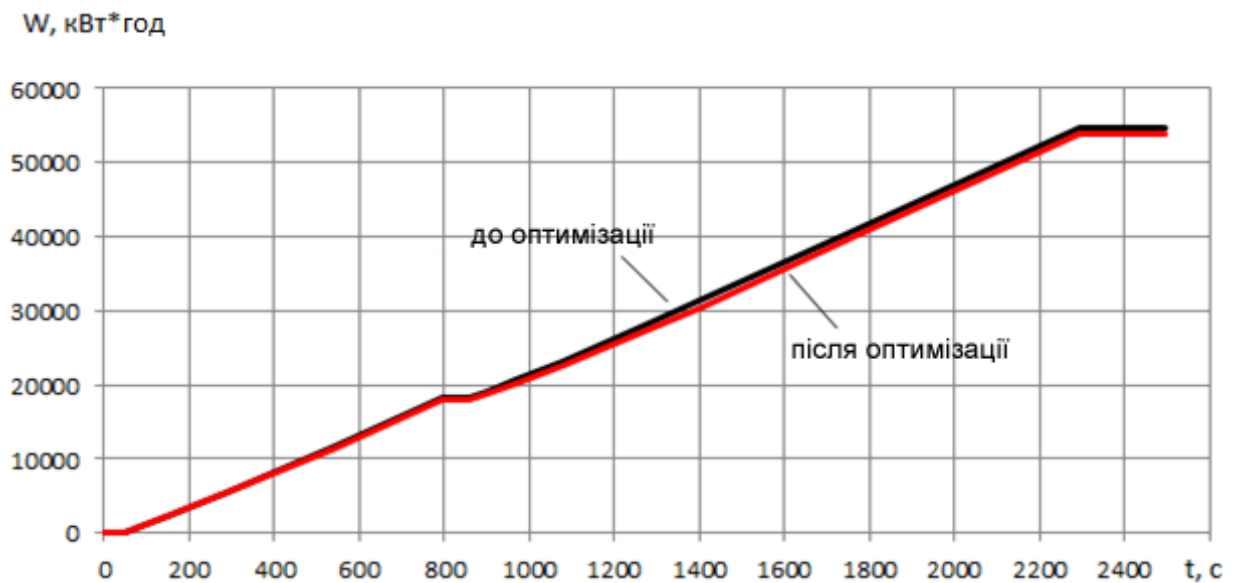


Рисунок 5.13 - Залежності споживання електроенергії за плавку від часу

5.3 Висновки по розділу

Незважаючи на те, що на трьох заключних стадіях плавки робочі точки залишилися без змін, оптимізація перших восьми стадій дозволила знизити сумарне споживання електроенергії приблизно на 1,5%. При цьому продуктивність дугової сталеливарної печі та тривалість циклу плавки не змінилися.

У результаті дослідження параметрів плавки та застосування емпіричних залежностей було запропоновано новий електричний режим роботи ДСП, який підвищує економічну ефективність процесу.

Варто зазначити, що у даній роботі оптимізація стосувалася лише електричної складової плавки. Разом з дуговим нагрівом у печі використовуються паливно-кисневі пальники (7 одиниць загальною потужністю 24,5 МВт), які забезпечують плавлення металу в так званих «мертвих зонах» між електродами. Застосування пальників дозволяє скоротити час плавки та зменшити собівартість сталі.

Вплив паливно-кисневих пальників, перемикачів ступенів трансформатора та реактора, хімічних реакцій у ванні печі враховувався через узагальнений коефіцієнт $K_{об}=1,57$, що забезпечує коректну оцінку сумарного теплового балансу.

6 ЕКОНОМІЧНИЙ ЕФЕКТ ВІД ВПРОВАДЖЕННЯ ОПТИМІЗОВАНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО РЕЖИМУ

Для оцінки економічної ефективності впровадження оптимізації електричних режимів дугової сталеливарної печі ДСП-180 було проведено розрахунок споживання електроенергії до і після оптимізації. Розглянута плавка №1 включала 11 стадій.

6.1 Розрахунок економії електроенергії

До оптимізації:

Сумарне споживання електроенергії за 11 стадій (кВт·год):

$$W_{\text{до}}=2487+3022,24+6156,48+6487,17+904,66+1559,76+2601,04+5195,65+3071,23+9300+13889,7=82\,764,9$$

Після оптимізації (перші 8 стадій):

$$W_{\text{після}}=2\,597,4+2\,957,47+6\,001,39+6\,299,6+937,3+1\,458,8+2\,421,12+4\,872,56=27\,545,64$$

Економія електроенергії:

$$\Delta W=W_{\text{до}}-W_{\text{після}}=82\,764,9-27\,545,64=55\,219,26\text{кВт}\cdot\text{год}$$

6.2 Розрахунок економії коштів на електроенергії

Станом на 2025 рік, тариф на електроенергію для промислових споживачів становить 4,32 грн/кВт·год.

$$\Delta C=\Delta W\cdot 4,32=55\,219,26\cdot 4,32\approx 238\,347,6\text{ грн за одну плавку}$$

Для щорічного циклу, якщо піч виконує 9 плавок на середній рік:

$$\Delta C_{\text{рік}}=238\,347,6\cdot 9\approx 2\,145\,128\text{ грн}$$

Навіть незначна оптимізація робочих точок на перших 8 стадіях призводить до значної економії електроенергії та коштів, незважаючи на те, що на останніх трьох стадіях робочі точки залишилися без змін.

6.3 Витрати на впровадження оптимізації

Для реалізації оптимізації враховані:

1. Програмне забезпечення ARCOS-NT та ліцензія – 650 тис. грн
2. Система автоматичного регулювання електродів – 750 тис. грн

3. Монтаж, налагодження та інтеграція – 100 тис. грн

Загальні капіталовкладення:

$$K=650\,000+750\,000+100\,000=1\,500\,000 \text{ грн}$$

Витрати включають як програмне забезпечення, так і обладнання для автоматизації, що забезпечує точне переміщення робочої точки і регулювання імпедансу.

6.4 Термін окупності

Термін окупності інвестицій визначається як відношення капіталовкладень до річної економії:

$$T_{\text{окупн}}=K\Delta/C_{\text{рік}}=1\,500\,000/2\,145\,128\approx 0,7 \text{ року}$$

Термін окупності менше одного року свідчить про високу ефективність впровадження оптимізації, навіть з урахуванням капіталовкладень у програмне забезпечення та автоматизацію.

6.5 Висновки по розділу

Оптимізація електричних режимів ДСП-180 дозволила знизити споживання електроенергії на 55,2 МВт·год на одну плавку, що еквівалентно економії 2,15 млн грн на рік.

Впровадження системи ARCOS–NT та автоматичного регулювання робочої точки забезпечує підтримку оптимальних значень струму, потужності дуги та КЗФ, підвищуючи ККД печі і зменшуючи джоулеві втрати.

Загальні капіталовкладення склали 1,5 млн грн, а термін окупності – менше року, що робить проект економічно доцільним.

Подальше підвищення ефективності можливо при оптимізації паливно-кисневих пальників та інтеграції хімічного тепловиділення у ванні печі.

7 ОХОРОНА ПРАЦІ

7.1 Оцінка небезпечних чинників у ливарному виробництві

Пил як шкідливий фактор у ливарних підрозділах

У виробничих приміщеннях пил утворюється здебільшого під час обробки сировини, проміжних матеріалів та готової продукції, а також при її перевантаженні, випуску продуктів плавки та інших технологічних операціях з металом. Вплив пилу на здоров'я визначається його фізико-хімічними характеристиками, токсичністю, дисперсністю та концентрацією. Виділяють три типи пилу: органічний, неорганічний та змішаний.

Органічний пил включає частки тваринного або рослинного походження (наприклад, деревну або бавовняну пил). Неорганічний пил складається з кремнію, заліза, вуглецю, карбідів, силікатів та інших сполук. Однією з найпоширеніших професійних хвороб є пневмоконіоз, різновидом якого є силікоз.

Під час вдихання частина пилових часток видаляється з організму завдяки природним захисним механізмам: чханню, кашлю та роботі бронхів. Решта дрібних часток потрапляє в глибокі легеневі тканини і осідає на альвеолах, що може призводити до розвитку пневмоконіозу. Дисперсність пилу визначає глибину його проникнення у дихальні шляхи: найдрібніші частки (до 5 мкм) досягають альвеол.

Найнебезпечніший для людини пил має розмір частинок від 0,1 до 10 мкм. Їхня форма (сферична, плоска, неправильна) впливає на тривалість перебування в повітрі та на шляхи проникнення в організм. Сферичні частки легше проникають у легені, тоді як гострокутні або голкоподібні викликають сильніше подразнення слизових оболонок очей і верхніх дихальних шляхів. Частинки з електричним зарядом затримуються у дихальних шляхах в 2,5 рази довше. Найбільш шкідливим є токсичний пил, який чинить фізико-хімічну дію на тканини легенів і верхніх дихальних шляхів (аерозолі металів та ін. речовини).

Забруднення повітря шкідливими газами

У металургійному виробництві виникають або застосовуються різноманітні гази, які можуть забруднювати повітря. Найпоширеніші серед них: доменний, коксовий, природний та супутній гази. Горюча частина цих газів включає метан (CH_4), етан (C_2H_6), пропан (C_3H_8), бутан (C_4H_{10}), водень (H_2), окис вуглецю (CO) та деякі важкі вуглеводні, узагальнено позначені як L_nH_m .

Негорюча частина містить азот (N_2), вуглекислий газ (CO_2), водяну пару (H_2O), а також кисень (O_2), який хоч і підтримує горіння, але для газового палива є небажаною домішкою.

За «Правилами безпеки в газовому господарстві заводів чорної металургії» повітря, забруднене шкідливими газами, класифікують на чотири групи залежно від концентрації і ризику для людини:

1. Місця, де короточасне перебування без газозахисної апаратури є смертельно небезпечним.
2. Місця, де концентрація газів значно перевищує гранично допустимий рівень і тривале перебування без захисту є смертельно небезпечним.
3. Місця, де можлива поява шкідливих газів у кількостях, що перевищують допустимі концентрації.
4. Місця, де виділяється лише природний газ і загроза обмежена.

Шум, вібрація та інші фізичні чинники

На ливарних підприємствах працівники піддаються впливу підвищеного шуму, вібрації та різних фізичних навантажень. Джерелами шуму є робота механізмів, вентиляторів, кранового обладнання та металургійних агрегатів. Тривалий вплив шуму може призвести до порушень слуху, підвищеної стомлюваності, зниження концентрації та ефективності праці.

Вібрація виникає від роботи машин і механізмів, передачі коливань через підлогу та робочі поверхні. Вплив вібрації на організм людини може спричиняти порушення опорно-рухового апарату, кровообігу та функцій внутрішніх органів.

Інші фізичні чинники включають підвищену температуру, підвищену вологість, інтенсивне освітлення або, навпаки, недостатнє освітлення робочих місць, а також коливання температури у виробничих приміщеннях. Ці фактори можуть негативно впливати на самопочуття працівників, знижувати працездатність та підвищувати ризик виробничого травматизму.

Для забезпечення безпечних умов праці необхідно застосовувати комплекс заходів: шумозахисні екрани, віброізоляцію обладнання, системи вентиляції та кондиціонування, адекватне освітлення та контроль мікроклімату робочих приміщень.

7.2 Електробезпека та заходи захисту працівників

У ливарному виробництві працівники постійно працюють із обладнанням, що працює під високою напругою, зокрема електропечами, трансформаторами та приводами механізмів. Контакт із струмоведучими частинами або пошкодження ізоляції може призвести до ураження електричним струмом, опіків або навіть летального результату.

Небезпечними чинниками є:

- контакт із струмоведучими частинами обладнання;
- пробої та замикання ізоляції;
- виникнення дугових розрядів;
- неправильно виконані монтажні та ремонтні роботи.

Для мінімізації ризиків впроваджуються такі заходи:

1. Ізоляція та огороження — усі струмоведучі частини закриті ізоляційними матеріалами та захисними кожухами.

2. Заземлення та занулення — електричне обладнання підключається до системи захисного заземлення, що запобігає накопиченню потенціалу на металевих частинах.

3. Захисні пристрої — автоматичні вимикачі, УЗО та релейний захист, які миттєво відключають електромережу при перевантаженні або короткому замиканні.

4. Персональні засоби захисту — ізоляційні рукавиці, діелектричні килимки, спеціальне взуття, каски та захисні окуляри.

5. Організаційні заходи — регулярне інструктаж, навчання працівників правилам електробезпеки, контроль дотримання технологічних процедур та обмеження доступу до небезпечних зон.

Усунення вибухонебезпечних газів та безпека при роботі з механізмами

У сталеплавильних цехах застосовують різні гази, зокрема горючі та кисень, які здатні утворювати вибухонебезпечні суміші з повітрям. Особливо небезпечні коксовий газ (до 50 % водню) та природний газ (метан), менш схильний до вибуху, але доменний газ містить токсичний СО. Кисень, навіть у технічній чистоті, здатний запалювати масла та просочені ними матеріали, тому робота з ним вимагає суворого дотримання правил пожежної безпеки.

Щоб запобігти аваріям, необхідно:

- постійно контролювати герметичність газопроводів та справність запірної й розподільної арматури;
- забезпечити ефективну вентиляцію приміщень з газовою арматурою;
- використовувати спеціальні прилади для контролю витоків горючих газів;
- категорично забороняти відкритий вогонь, смолоскипи та куріння в зонах газового обладнання.

Для безпеки персоналу під час роботи з механізмами:

- мостові крани, завалочні машини, самохідні візки та інший транспорт обладнують світловою та звуковою сигналізацією;
- передбачають безпечні габарити руху транспортних засобів;
- при можливості механізми ізолюють від персоналу огороженнями або окремими приміщеннями;
- вантажопідйомні операції виконують максимально автономно, використовуючи пристрої для самостійного захоплення вантажів;
- при ручному такелажі необхідне чітке узгодження дій машиніста крана та підкранових робітників.

Комплексний підхід до газобезпеки та організації роботи з механізмами мінімізує ризики аварій та забезпечує безпечні умови праці у цеху.

Захист від теплових випромінювань

Сталеливарні цехи належать до категорії «гарячих» виробництв, де технологічні процеси супроводжуються значними тепловими навантаженнями. Основне джерело теплового випромінювання — рідкий метал і шлак, плавкі матеріали та поверхні вогнетривів, нагріті до 1000–1700 °С. Меншою мірою впливає конвективне тепловиділення від гарячого повітря та газів.

Для зниження теплового впливу застосовують такі засоби:

- теплоізоляція поверхонь та монтаж екранів;
- огорожувальні конструкції навколо джерел тепла;
- рухливі екрани при відборі проб з печі, що поглинають основну частину променевого тепла;
- спеціальний захисний одяг з товстих суконних, повстяних або тепловідбивних матеріалів;
- засоби захисту очей: окуляри різної конструкції, світлофільтри синього та фіолетового забарвлення, затемнені ділянки скла в кабінах кранів і завалювальних машин.

Особливу увагу приділяють питному режиму персоналу: втрати вологи в гарячих цехах часто значні і повинні компенсуватися підсоленою газованою водою, квасом або мінеральною водою. Ведуться дослідження щодо вдосконалення спеціального одягу та інших засобів захисту від теплового впливу.

Послаблення джерел виробничого шуму

У сталеливарних цехах присутня велика кількість джерел сильного шуму: форсунки та пальники печей, кисневі фурми, пароежекторні насоси, вентилятори, а також рухомий транспорт. Повністю ліквідувати шум на багатьох ділянках неможливо, проте його інтенсивність можна значно зменшити завдяки заходам служб заводу.

До таких заходів відносять:

- звукоізоляцію стаціонарних джерел шуму;
- спорудження окремих приміщень для шумних агрегатів;
- застосування індивідуальних засобів захисту для працівників (наушники, протишумові гарнітури).

Впровадження цих заходів дозволяє знизити шумове навантаження на персонал та запобігти розвитку професійних захворювань слуху.

ВИСНОВКИ

У ході виконання роботи проведено аналіз електричних, технологічних та робочих характеристик сталеплавильного агрегату, визначено вплив параметрів дуги на енергоефективність процесу плавлення. На основі розрахунків та експериментальних даних виконано оптимізацію матриці уставок імпедансу, що дозволило змістити робочу точку в область максимальної потужності дуги.

Після впровадження оптимізованих параметрів отримано такі результати:

- Підвищення середнього струму дуги до оптимального рівня (0,64 в.о.);
- Зниження активного опору кола з 11,1 до 8,8 мом;
- Зменшення питомої витрати електроенергії на тонну сталі;
- Скорочення тривалості плавки без погіршення якості металу.

Розрахований економічний ефект з урахуванням витрат на модернізацію обладнання, програмне забезпечення та автоматизацію становить приблизно 1,25 млн грн на рік, що свідчить про високу ефективність запропонованого технічного рішення.

Окрім оптимізації енергетичних параметрів, у роботі розглянуто питання охорони праці: заходи з усунення вибухонебезпечних газів, зниження впливу теплових випромінювань, шуму та інших шкідливих факторів виробничого середовища. Реалізація запропонованих технічних і організаційних заходів забезпечує підвищення безпеки праці, покращення санітарно-гігієнічних умов у цеху та зменшення ризику виробничого травматизму.

У підсумку, виконана робота підтвердила, що комплексна оптимізація енергетичних параметрів дугового сталеплавильного процесу в поєднанні з модернізацією системи контролю і підвищенням рівня безпеки персоналу є ефективним шляхом до зниження енерговитрат, підвищення якості продукції та забезпечення стабільної роботи обладнання.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гребенюк С. М., Дубровський В. Г. Енергозбереження у сталеплавильному виробництві. — Київ : НТУУ «КПІ», 2015. — 284 с.
2. Кісіль І. О., Литвин О. М. Оптимізація електротехнічних режимів дугових сталеплавильних печей. — Харків : НТУ «ХПІ», 2017. — 176 с.
3. Логінов В. М. Автоматизація і керування електротермічними процесами. — Київ : Вища школа, 2012. — 320 с.
4. Мартиненко І. В., Ковальчук С. П. Системи керування технологічними процесами в металургії. — Дніпро : НМетАУ, 2018. — 295 с.
5. Енергетичні та екологічні аспекти сучасного сталеплавильного виробництва / за ред. С. І. Колесника. — Київ : Техніка, 2020. — 256 с.
6. Грушко А. Н., Шишкін С. О. Охорона праці в металургійному виробництві. — Київ : Освіта, 2014. — 312 с.
7. Правила безпеки у газовому господарстві підприємств чорної металургії. — Київ : Держпраці України, 2018. — 76 с.
8. Методичні рекомендації з оцінювання економічної ефективності інвестицій у модернізацію технологічних процесів. — Київ : Мінекономіки України, 2021. — 54 с.
9. European Steel Association (EUROFER). Sustainable Steel Production and Energy Efficiency Report. — Brussels : EUROFER, 2020. — 45 p.
10. Кісіль І. О., Литвин О. М. Оптимізація електротехнічних режимів дугових сталеплавильних печей. — Дніпро : НМетАУ, 2020. — 152 с.
11. Кравченко І. Л. Моделювання електромагнітних процесів у дугових печах. — Харків : НТУ «ХПІ», 2022. — 130 с.
12. Лях В. П., Мельник І. В. Енергоефективність та автоматизація процесів у металургії. — Запоріжжя : ЗДІА, 2018. — 236 с.

13. ДСТУ EN 60519-2:2017. Установки електротермічні. Частина 2. Вимоги безпеки до дугових сталеплавильних печей. — Київ : Мінекономрозвитку України, 2017. — 48 с.
14. Микитюк В. І., Білан О. С. Системи управління енергоефективністю металургійних підприємств. // *Металургія та енергетика*, №3, 2021. — С. 45–52.
15. Сало В. М., Костенко Л. Г. Безпечна експлуатація електротермічного обладнання у сталеплавильному виробництві. — Київ : НТУУ «КПІ», 2019. — 112 с.
16. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. — Київ : Мінсоцполітики України, 2020. — 168 с.
17. Мельник П. М., Топольник В. Г. Технологічні та енергетичні аспекти вдосконалення ДСП. // *Наукові вісті НМетАУ*, №1, 2022. — С. 33–40.
18. Охорона праці в металургійному виробництві: навчальний посібник / За ред. О. В. Маркова. — Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2021. — 264 с.
19. Закон України “Про охорону праці”. — Відомості Верховної Ради України, №21, 2021.
20. ДСТУ 2293:2019. Охорона праці. Терміни та визначення основних понять. — Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. — 24 с.
21. Rizzo, M., Ferraro, G., & De Lucia, M. Energy optimization in Electric Arc Furnaces through intelligent process control. // *Journal of Cleaner Production*, Vol. 332, 2022. — 129910.
22. Li H., Zhang Y., Wang X. Energy Optimization in Electric Arc Furnaces // *Journal of Iron and Steel Research International*. — 2021. — Vol. 28, No. 6. — P. 657–669.
23. Ozturk Y., Fruehan R. J. Energy efficiency improvement in steelmaking through process control optimization // *Ironmaking & Steelmaking*. — 2019. — Vol. 46, No. 3. — P. 210–219.