

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет автоматики та енергетики
Кафедра “Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент”

“Допущено до захисту”
Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ
к.т.н., професор
_____Петро ПЛЄШКОВ
“ ____ ” _____2021р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої
освіти
на тему
“ Оптимізація режимів роботи дугових
сталеливарних печей з розробкою методів та
заходів з енергозбереження”

Виконав здобувач вищої освіти
6 курсу, групи ЕЕ-20М
ОПП «Електротехнічні системи
електроспоживання»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
_____Богдан ОЛЕНЕНКО
« ____ » _____20 р.
Керівник роботи
к.т.н., професор
_____Петро ПЛЄШКОВ
« ____ » _____2021р.
Рецензент _____

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет ФАЕ

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма Електротехнічні системи електроспоживання

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

Плешков П.Г.

«_____» _____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Олененка Богдана Вікторівна

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) Оптимізація режимів роботи дугових
сталеливарних печей з розробкою методів та заходів з енергозбереження

Optimization of operating modes of arc steel furnaces with development of
methods and measures for energy saving

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 30.11.2021 р.

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту) Вступ; Характеристика дугових сталеливарних печей; Загальні відомості
про дугу та аналіз основних факторів, що впливають на споживання
електроенергії ДСП; Методи розрахунку електричної дуги; Аналіз
результатів розрахунку електричної дуги змінного струму, отриманих
робочих та технологічних характеристик; Оптимізація електричних
режимів ДСП за рахунок переміщення робочої точки; Визначення питомої
витрати електроенергії дугової сталеплавильної печі; Економія
електроенергії в дугових печах; Охорона праці та безпека життєдіяльності;
Висновок

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
<i>Економічна частина</i>	<i>к.е.н., доц. Журило І.В.</i>		
<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>	4.10.21	
2	<i>Характеристика дугових сталеливарних печей</i>	9.11.21	
3	<i>Загальні відомості про дугу та аналіз основних факторів, що впливають на споживання електроенергії ДСП</i>	14.10.21	
4	<i>Методи розрахунку електричної дуги</i>	21.10.21	
5	<i>Аналіз результатів розрахунку електричної дуги змінного струму, отриманих робочих та технологічних характеристик</i>	28.10.21	
6	<i>Оптимізація електричних режимів ДСП за рахунок переміщення робочої точки</i>	5.11.21	
7	<i>Визначення питомої витрати електроенергії дугової сталеплавильної печі</i>	10.11.21	
8	<i>Економія електроенергії в дугових печах</i>	15.11.21	
9	<i>Охорона праці та безпека життєдіяльності</i>	21.11.21	
	<i>Висновок</i>	25.11.21	
10	<i>Оформлення пояснювальної записки КР</i>	27.11.21	
11	<i>Оформлення презентаційної частини КР</i>	29.11.21	

Дата видачі завдання

«___» _____ 2021 р.

Підпис керівника _____

Завдання прийнято до виконання

«___» _____ 2021 р.

Підпис здобувача _____

АНОТАЦІЯ

Олененко Б.В. Оптимізація режимів роботи дугових сталеливарних печей з розробкою методів та заходів з енергозбереження.

Спеціальність 141 - «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». - ОПП «Електротехнічні системи електроспоживання». - Центральноукраїнський національний технічний університет. - м.Кропивницький, 2021р.

Об'єктом дослідження в кваліфікаційні роботі є дугова сталеплавильна піч. В роботі проаналізовано електричні режими дугової сталеплавильної печі, виявлено оптимальне положення робочих точок, які відповідають зменшенню споживання електроенергії при збереженні заданої продуктивності.

Під час проведення досліджень з використанням математичних моделей були отримані основні характеристики ДСП. Аналіз залежностей засвідчив, що існуючі положення робочих точок по плавках не відповідають сучасним вимогам виплавки сталі: підтримка максимальної потужності протягом запалювання дуг і переплавлення металу, максимуму коефіцієнту інтенсивності нагріву – на стадіях нагріву рідкого металу.

В роботі розраховані та рекомендовані методи щодо робочих точок, які оптимізують роботу існуючих електричних режимів. В результаті, в рамках запропонованих заходів досягається зниження споживання електроенергії (у порівнянні з початковим режимом) .

Ключові слова: ДУГОВА СТАЛЕЛИВАРНА ПІЧ, ЕЛЕКТРИЧНІ РЕЖИМИ, РОБОЧІ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ЕЛЕКТРИЧНА ДУГА, ЕНЕРГООЩАДЖЕННЯ, СТАДІЯ, ОПТИМІЗАЦІЯ.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	6
ВСТУП.....	7
1 ХАРАКТЕРИСТИКА ДУГОВИХ СТАЛЕЛИВАРНИХ ПЕЧЕЙ.....	10
1.1. Типи та область застосування ДСП.....	10
1.2. Електричні характеристики ДСП.....	11
1.3. Вплив ДСП на якість електроенергії.....	18
2 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ДУГУ ТА АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ФАКТОРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ДСП	21
2.1. Аналіз факторів, які впливають на споживання електроенергії	21
2.2. Загальні відомості про електричну дугу, про технології ведення плавки і про інновації при плавлі металу дугових сталеливарних печей	22
3. МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ДУГИ	34
3.1. Розрахунок дуги змінного струму з використанням нелінійного рівняння Кассі	35
3.2. Побудова електричних характеристик	40
4. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ РОЗРАХУНКУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ДУГИ ЗМІННОГО СТРУМУ, ОТРИМАНИХ РОБОЧИХ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК	43
4.1. Розрахунок робочих та технологічних характеристик.....	43
4.2. Експериментальна перевірка адекватності математичної моделі	44
4.3. Шляхи оптимізації плавки	46
5. ОПТИМІЗАЦІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ РЕЖИМІВ ДСП ЗА РАХУНОК ПЕРЕМІЩЕННЯ РОБОЧОЇ ТОЧКИ.....	58
5.1. Електричні, технологічні та робочі характеристики до і після оптимізації	60
5.2. Розрахунок споживання електроенергії ДСП-180 до і після оптимізації.....	65

6 ВИЗНАЧЕННЯ ПИТОМОЇ ВИТРАТИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ДУГОВОЇ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЇ ПЕЧІ.....	71
7. ЕКОНОМІЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ДУГОВИХ ПЕЧАХ	80
7.1. Загальні положення	80
7.2. Збільшення маси садки і вдосконалення підготовки шихти.....	81
7.3. Зниження електричних втрат	85
7.4 Зниження теплових втрат.....	92
7.5 Скорочення часу простоїв печі.....	96
7.6 Оптимізація електричних та технологічних режимів роботи електропечей.....	99
7.7 Робочі характеристики і явища переносу потужності.....	101
7.8 Оптимальний електричний режим розплавлення. Добова продук- тивність.....	102
7 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ.....	106
ВИСНОВОК	113
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	115
ДОДАТКИ.....	117
ДОДАТОК А. Розрахунок заземлення.....	118
ДОДАТОК Б. Звіт подібності.....	121

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ДСП – дугова сталеливарна піч змінного струму;

ДППС – дугова піч постійного струму;

ВДП – вакуумна дугова піч;

СТК – статичний тиристорний компенсатор;

Е/Е – електроенергія;

КЗФ – коефіцієнт зносу футерування;

КІН – коефіцієнт інтенсивності нагріву;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

ДВАХ – динамічні вольт-амперні характеристики;

ЕРС – електрорушійна сила;

ЕО – енергоощадження

ВСТУП

Енергозаощадження – ефективне використання існуючих енергетичних ресурсів, в тому числі і електричної енергії, – є одним з пріоритетних напрямків економічного розвитку в усьому світі. Але безперервне зростання попиту на вуглеводневу сировину є складною умовою функціонування підприємств. До таких споживачів, безумовно, відносять надпотужні дугові сталеплавильні печі. Потужність трансформатора печі перевищує 150 МВА, а маса рідкої сталі на випуску досягає 180 т. Сумарний обсяг печі може вміщати до 210 т розплавленого металу. Час виплавки одного циклу плавлення варіюється від 40 до 50 хвилин.

Основні технічні дані пічного трансформатора «TAMINI» ДСП-180

Найменування параметрів	Значення параметрів
1. Номінальна потужність трансформатора $S_{\text{ном}}$, МВА	150,2
2. Номінальна частота живлячої напруги $f_{\text{ном}}$, Гц	50
3. Номінальна первинна напруга $U_{1\text{ном.л}}$, В	35000
4. Номінальна вторинна напруга $U_{2\text{ном.л}}$, В	1236
5. Номінальний первинний струм $I_{1\text{ном.л}}$, А	2478
6. Номінальний вторинний струм $I_{2\text{ном.л}}$, А	70200
7. Група з'єднання обмоток трансформатора	$\Delta/\Delta - 0$
8. Діапазон зміни вторинної напруги $U_{2\text{л}}$, В	800÷1400
9. Кількість ступенів РПН трансформатора	23
10. Номінальна потужність вбудованого реактора $Q_{\text{ном}}$, Мвар	45,9
11. Номінальна напруга реактора $U_{\text{р.ном}}$, В	28 800
12. Номінальний струм реактора $I_{\text{р.ном}}$, А	531,9
13. Кількість ступенів РПН реактора	20

Робоча напруга на електродах змінюється від 800 В до 1400 В, реактор, встановлений у третинній обмотці трансформатора, має таку керовану індуктивність, що є можливість змінювати загальний опір вторинного контуру у діапазоні від 50 до 100%.

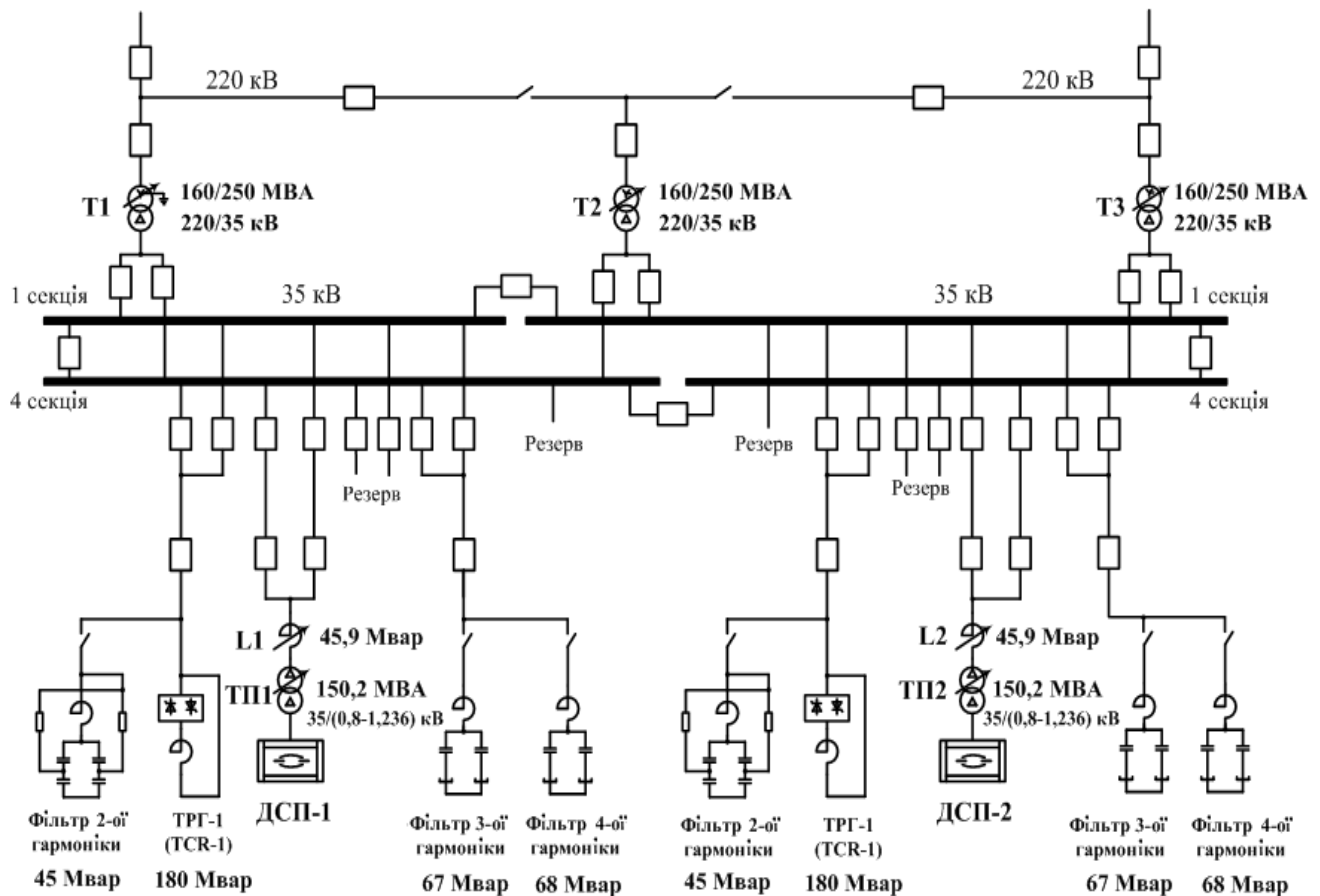


Схема електропостачання досліджуваного об'єкту

Дугова сталеливарна піч - це складний технологічний агрегат, що характеризується нелінійним, різкозмінним навантаженням, а також несиметричним режимом роботи. Для того, щоб грамотно експлуатувати ДСП, необхідно знати характеристики її роботи. Вони поділяються на електричні, технологічні та робочі. При побудові електричних, робочих і технологічних характеристик потрібно знати параметри схеми заміщення ДСП: напругу на вторинній обмотці трансформатора, активні та індуктивні опори трансформатора, реактора та короткої мережі. Електричні залежності

характеризують безпосередньо схему заміщення мережі: потужність дуги, втрати потужності та коефіцієнт потужності. Головним завданням даної магістерської роботи є оптимізація електричних режимів ДСП для основних технологічних стадій з **метою** зниження електроспоживання при збереженні заданої продуктивності.

Для досягнення поставленої задачі необхідно виконати наступні **завдання**:

- 1) проаналізувати основні фактори, що впливають на електроспоживання ДСП;
- 2) виявити резерви зменшення споживання електроенергії за рахунок підбору оптимальних робочих точок на електричних характеристиках;
- 3) розробити математичну модель електричного контуру ДСП адекватно визначаючої електричні процеси, що відбуваються у печі;
- 4) відкорегувати опори по кожній фазі;
- 5) провести розрахунки економічного ефекту від енергоощадження та додаткових капітальних вкладень.

1. ХАРАКТЕРИСТИКА ДУГОВИХ СТАЛЕЛИВАРНИХ ПЕЧЕЙ

1.1. Типи та область застосування ДСП

У дуговій печі основна енергія виділяється в електричних дугах, що горять у внутрішньому просторі ванни печі. Висока температура дуги (до 4000 °С) дозволяє розплавляти будь-які метали і сплави. За способом перетворення електричної енергії в теплову і передачі тепла розплавленому матеріалу розрізняють електродугові печі прямої, непрямої і змішаної дії.

Печі прямої дії (рис.1.1,а) працюють при відкритій дузі, що горить між електродами і металом. Ці печі широко застосовуються для виплавки сталі з металевго скрапу. Основний тип установок прямої дії - дугові сталеливарні печі (ДСП). Висока температура процесу сприяє кращому видаленню з розплаву шкідливих домішок (фосфору, сірки). Тому в дугових сталеплавильних печах виплавляють високоякісні сталі: кулькопідшипникові, нержавіючі, інструментальні. Процес виплавки характеризується значною енергоємністю: залежно від марки сталі і характеру процесу витрачається від 500 до 1200 кВт-год на тонну металу. Температура процесу 1500 - 2000 С.

ДСП характеризується номінальною ємкістю (у тоннах), яка входить в позначення печі, наприклад ДСП-100. Друга важлива характеристика - встановлена потужність пічного трансформатора (МВА). У Україні експлуатуються печі з трансформаторами 45,150 МВА.

У дугових печах непрямої дії дуга горить між двома електродами (рис.1.1,б); тепло металу, що розплавляється, передається випромінюванням. Внаслідок цього температура сплаву нижча, ніж в ДСП. У таких печах плавлять кольорові метали і сплави (цинк, латунь, нікель), деякі марки чавуну. Плавильний простір печі має форму циліндра, і випуск металу здійснюється шляхом її нахилу. Потужність трансформатора дугових печей

непрямої дії не перевершує, як правило, 500 - 630 кВА.

Печі змішаної дії (рис.1.1,в). У цих печах тепло виділяється як в електричній дузі, так і частково у вигляді тепла при проходженні струму $I_{ш}$ від електродів до розплаву через шихту.

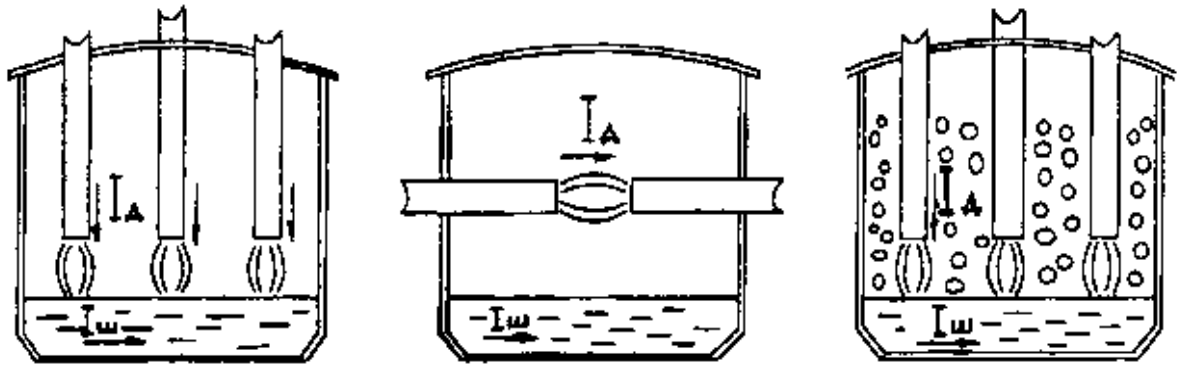


Рисунок 1.1.- Основні види електродугових печей:

а) - електроди розташовані вертикально; б) - електроди в горизонтальному положенні; в) - електроди розташовані вертикально, дуги горять в газі.

На початку 1970-х років в промисловості з'являються принципово нові електропечі для виплавки сталі – плазмено-дугові сталеливарні печі (ПДСП). Перетворення електричної енергії в теплову в цих печах здійснюється не в звичайній дузі, а в стислому плазмоутворюючому газі. Як плазмоутворюючий газ використовуються аргон та азот.

1.2. Електричні характеристики ДСП

Вимірювання параметрів ДСП необхідний для підтримки заданого режиму роботи печі, і деяких інших функцій. При експлуатації печі контролюються струми і напруга (фазні і лінійні), потужність (активна і реактивна) і витрата енергії. У деяких спеціальних режимах можуть контролюватися і інші параметри. Контроль виконується безперервно або дискретно.

Електричні вимірювання в ДСП мають ряд особливостей і вимагають в деяких випадках застосування особливих способів вимірювання. Це визначається умовами роботи печі, яка характеризується різкими і частими коливаннями навантаження окремих фаз печі, великими величинами струму печі, несинусоїдальністю напруги і струмів дуг, критичними умовами приєднання вимірювальних приладів. Крім того, коливання струмів печі мають негативний вплив на роботу інших споживачів. Виникає необхідність контролю цих коливань, для чого застосовуються спеціальні пристрої і прилади.

Струми потужних електропічних установок достатньо великі (десятки кілоампер) і викликають виникнення сильних магнітних полів і негативних е.р.с. у вимірювальних ланцюгах і приладах. Потрібне застосування спеціальних схем (рис. 1.3) і приладів для усунення перешкод у вимірюваннях. Струми і напруга печі несинусоїдальні і містять гармонійні складові вищих порядків, що також викликає необхідність застосування спеціальних приладів. За деяких умов в напрузі і струмі дуги з'являється постійна складова, що збільшує втрати електроенергії в установці [4].

Вимірювання струмів печі вимагає установки вимірювальних трансформаторів струму, що на потужних електропечах з боку вторинної напруги пічного трансформатора викликає складність. Тому вимірювання струму у ряді багатьох випадків проводиться тільки на високі стороні.

Для постійного технічного контролю роботи печі і для роботи автоматичних регуляторів електричного режиму зазвичай вимірюється напруга між шинопроводами короткої мережі і поду печі, що відрізняється від напруги на дузі на величину падіння напруги в електроді, гнучкому струмопроводі і частини шинопроводу до точки приєднання вольтметра.

Використання обчислювальної техніки істотно вплинуло на техніку контролю і управління. З'явилася можливість фіксації миттєвих значень параметрів. Звичайна схема вимірювання, базується на використанні електродинамічних і магнітоелектричних способів, достатньо інерційна і має

додаткові погрішності, зв'язані з несинусоїдальністю струмів. Прилади цих серій фіксують діючі значення струмів і напруг.

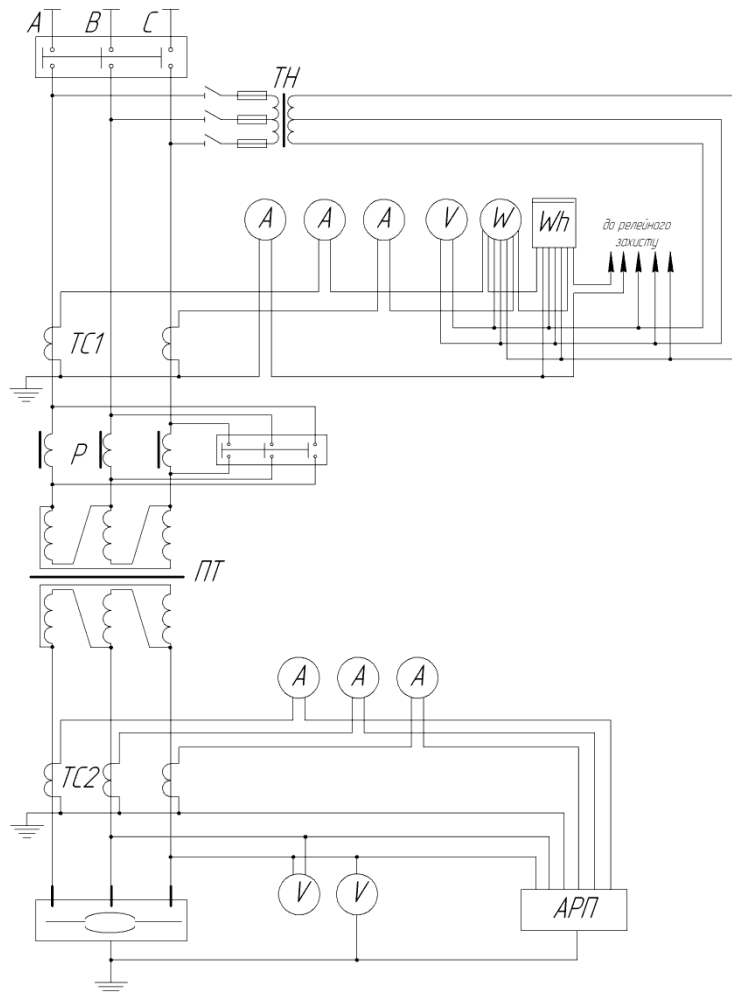


Рисунок. 1.3. - Схема контролювання параметрів роботи та обліку електроенергії ДСП.

Для розрахунку і побудови електричних характеристик печі повинні бути проведені наступні вимірювання:

- Запис струмів, напруги і потужності при уставках струмів: $0,5I_n$; $1I_n$; $2I_n$ і зняття показників напруги по схемах, рис.1.4 і 1.5.
- Запис струмів, напруги і втрат потужності по схемі рис.1.6.
- Проведені досліди 3-х фазного короткого замикання із записом на трьох ватметрах (рис. 1.4) і по схемі Арона (рис. 1.5)

Всі вимірювання (окрім п. «в».) проводяться протягом всієї плавки. Тривалість записів 3 хв. з інтервалами 10-15 хв, в період розплавлення і 20-30

хв. в решту періодів. При струмі $1,5I_n$ тривалість запису повинна бути зменшена до 1 хв.

Вимірювальні трансформатори струму включалися послідовно в розрив струмових ланцюгів вбудованих трансформаторів струму ТВДМ-35 з коефіцієнтом трансформації 300/5. напруга на вимірювальні прилади подавалася з виводів пічного трансформатора ЕТЦНК 24000/35, з електродів і трансформатора .напруги ТН 35000/100.

Вимірювання електричних параметрів печі проводилися за допомогою наступних самописних приладів: амперметрів Н 343 кл 2,5; вольтметрів Н 340 кл 1,5; ватметра Н 317 кл 2,5.

Прилади збиралися в різні схеми за допомогою спеціального комутатора.

Побудова електричних характеристик ДСП здійснюється по методу робочих точок и по досліді трифазного короткого замикання.

По досліді трифазного короткого замикання, проведенному по схемам рис. 2, 3, розраховуються середньофазні активні і реактивні опори електропічної установки.

Середньофазне значення активного опору струмопроводу визначається по формулі:

$$R_{cp.\phi} = \frac{\Sigma P}{3 \cdot I_{ск}^2} \quad (1.1)$$

де: ΣP - сумарна потужність активних втрат в струмопроводі;

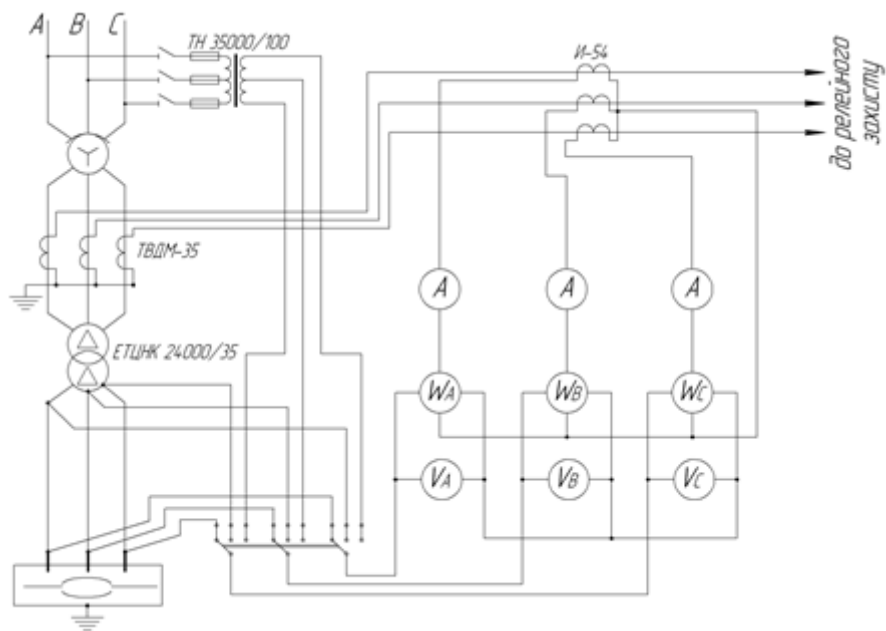


Рисунок 1.4. - Схема трьох ватметрів.

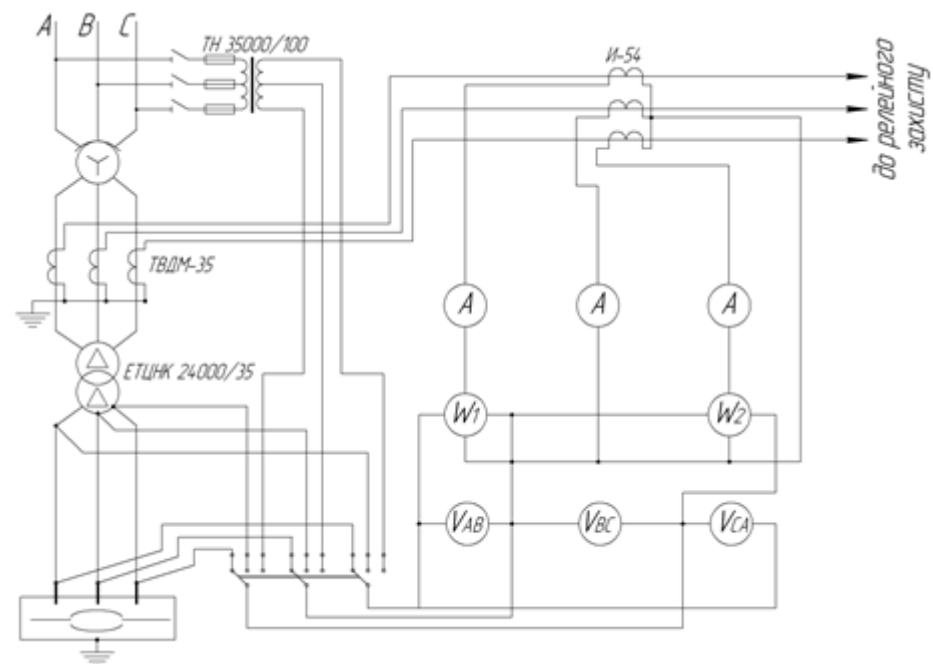


Рисунок 1.5. - Схема Арона.

I_{CK} - середньоквадратичне значення струму електропічної установки на стороні низької напруги трансформатора, рівне:

$$I_{CK} = \sqrt{\frac{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2}{3}} \quad (1.2)$$

де: I_A ; I_B ; I_C ; - струми в електродах.

Середній реактивний опір визначається по формулі:

$$X_{cp.\phi} = \sqrt{\left(\frac{U_{2Лср}}{\sqrt{3} \cdot I_{CK}}\right)^2 - R_{cp.\phi}^2} \quad (1.3)$$

де: $U_{2Лср} = \frac{U_{AB} + U_{BC} + U_{AC}}{3}$; U_{AB} ; U_{BC} ; U_{AC} ; - лінійна напруга на низькій стороні трансформатора.

Опір пічного трансформатора визначається по формулі:

$$R_{mp} = \frac{P_{кз}}{3 \cdot I_{2н}^2} \quad (1.4)$$

де: $P_{кз}$ - потужність втрат короткого замикання пічного трансформатора;

$I_{2н}$ - струм на низькій стороні пічного трансформатора.

$$X_{mp} = \sqrt{\left(\frac{U_{кз} \% \cdot U_{2Л}}{\sqrt{3} \cdot 100 \cdot I_{2Л}}\right)^2 - R_{mp}^2} \quad (1.5)$$

де: $U_{кз} \%$ - напруга короткого замикання трансформатора;

$U_{2Л}$ - лінійна напруга на низькій стороні трансформатора.

Повний опір електропічної установки визначається як сума опорів пічного трансформатора і короткої мережі:

$$R_{cp.\phi.n.y} = R_{cp.\phi.км} + R_{mp} \quad (1.7)$$

$$X_{cp.\phi.n.y} = X_{cp.\phi.км} + X_{mp} \quad (1.8)$$

Так як активний і реактивний опір пічного трансформатора змінює значення на кожній ступені регулювання, то і значення опору електропічної установки буду відрізнятися одне від одного по ступенях напруги.

По величинах активного і реактивного опорів пічної установки, визначених за даними дослідів 3-х фазних коротких замикань, розраховуються електричні характеристики ДСП, тобто залежність потужності, що вводиться в піч, електричних втрат, коефіцієнта потужності, коефіцієнта корисної дії від струму (рис. 1.6)

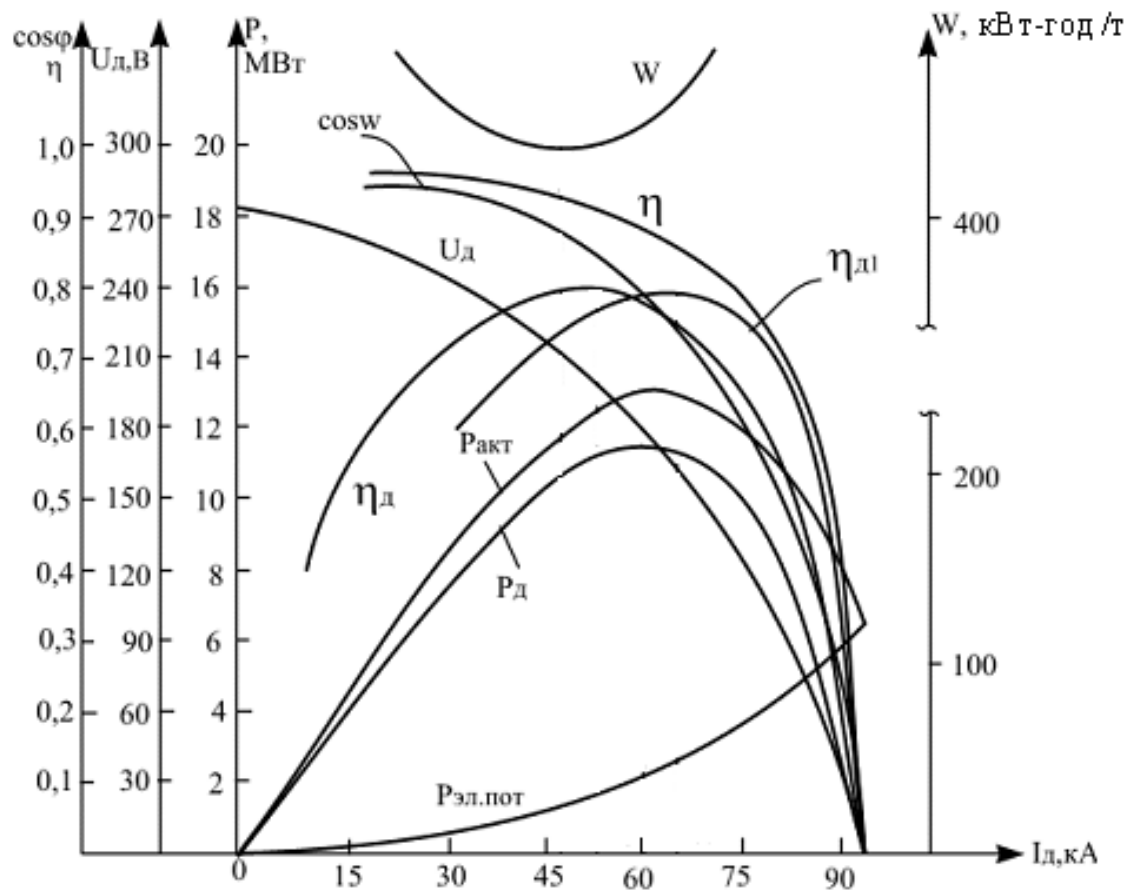


Рисунок 1.6. - Електричні характеристики ДСП.

Розрахунок і побудову електричних характеристик проводять по формулах:

Активна потужність пічної установки:

$$P_c = 3 \cdot I_{\text{л}} \cdot \sqrt{U_{\text{ф}}^2 - (I_{\text{л}} \cdot X_{\text{ср.ф}})^2} \quad (1.9)$$

Потужність електричних втрат:

$$P_{\text{е.в}} = 3 \cdot I_{2\text{л}}^2 \cdot R_{\text{ср.ф}} \quad (1.10)$$

Потужність дуги:

$$P_o = P_c - P_{e.в} \quad (1.11)$$

Коефіцієнт потужності пічної установки:

$$\cos \varphi = \sqrt{1 - \left(\frac{I_{\text{л}} \cdot X_{\text{ср.}\phi}}{U_{\phi}} \right)^2} \quad (1.12)$$

Коефіцієнт корисної дії пічної установки:

$$\eta = \frac{P_o}{P_c} \quad (1.13)$$

У приведених аналітичних виразах прийняті наступні позначення:

$I_{\text{л}}$ - струм електроду пічної установки, змінюється, від $I=0$, до $I=I_{\text{кз}}$

$R_{\text{ср.}\phi}$ - відповідно активне і реактивне середньофазні опори пічної

установки, визначені з досвіду 3-х фазного короткого замикання;

U_{ϕ} - фазна напруга пічного трансформатора.

З розгляду робочих характеристик роблять наступні висновки:

1. Одне і теж значення P_o і P_c може бути получено при двох значеннях I ; відповідно на лівій вихідній або на правій низхідній гілках кривих: $P_o = \varphi(I)$ і $P_c = \varphi(I)$

Очевидно, що потрібно працювати на лівій вихідній гілці цих кривих, оскільки цій гілці відповідають вищі значення η і $\cos \varphi$ і менша $P_{e.в}$, чим в правій гілці.

2. У енергетичні періоди, зокрема в період розплавлення, робочою областю повинна бути область між максимумом η_0 і максимумом корисної потужності.

1.3. Вплив ДСП на якість електроенергії

Робота дугових сталеливарних печей - певним чином позначається на якості електроенергії в мережах загального призначення, від яких отримують

живлення інші споживачі. Порушуються вимоги до допустимих рівнів коливань напруги, присутністю вищих гармонік (виникають унаслідок не лінійності вольт-амперної характеристики електричної дуги печі), степені несиметрії напруги. Це приводить до різких коливань світлового потоку освітлення, зниження навантажувальної здатності електродвигунів, нестійкої роботи систем автоматики і релейного захисту, збільшення втрат в мережах і ряду інших наслідків, в цілому погіршуючи техніко-економічні показники виробництва.

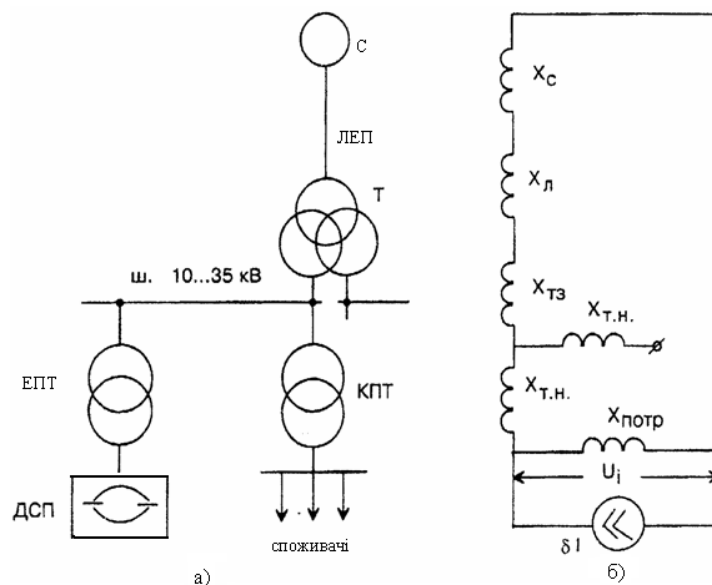


Рисунок 1.7.- Схема електропостачання ДСП і «спокійного» навантаження а), і схема заміщення б).

Коливання напруги обумовлені падінням напруги на елементах живлячої мережі від шин підприємства до енергосистеми (рис. 1.7) і викликані поштовхами струмів КЗ і обривами дуги в період розплавлення.

Для ДСП характерні нерегулярні поштовхи струму унаслідок замикань і обривів дуги, що відбуваються з частотою 0,1-1 Гц [5] і нерегулярні зміни навантаження з частотою до 25 Гц, виникаючих із-за пружних і нелінійних властивостей механічних і електромагнітних ланок системи електрод - шихта, а також динамічних якостей регулятора потужності печі. У регулярних коливань рівень перепадів струму істотно менший, ніж у

нерегулярних.

Наявність магнітної несиметрії між фазами мережі обумовлює зростання гармонік, кратних трьом, до 13 5, 5-ї – до 11 %, 11-ї – до 4 %. Випрямляюча дія електричної дуги являється причиною появи постійної складової струмів, що також збільшує долю вищих гармонік в струмі печі; це збільшення пов'язане також із зростанням вищих гармонік намагнічуючого струму пічного трансформатора. Оскільки нелінійність дуги ДСП проявляється по-різному в залежності від потужності печі, матеріалів електродів, складу і особливостей підготовки шихти, системи керування режимом горіння дуг і багатьох інших факторів, прогнозування рівнів вищих гармонік на основі лише теоретичних міркувань є досить важким; коректність відповідних результатів невелика. Тому для оцінки вищих гармонік струму, що генеруються ДСП, рекомендується користуватися в якості аналога результатами вимірювань значень I_v / I_1 , %, проведених на діючих ДСП.

2. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ДУГУ ТА АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ФАКТОРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ДСП

2.1. Аналіз факторів, які впливають на споживання електроенергії

Дугові сталеливарні печі є дуже великими споживачами електроенергії. Сучасні надпотужні ДСП умовно характеризуються так, що на 1т розплавленого металу витрачається 1 МВА. Основними факторами, що впливають на споживання E/E_e , є: потужність дуги, напруга дуги, струм дуги, коефіцієнт потужності і втрати потужності в електричному контурі.

Залежно від вихідного складу шихти, що визначається процентним вмістом брухту та рідкого чавуну, визначається профіль плавки. У процесі плавки піч переходить з однієї робочої стадії на іншу. Критерієм переходу служить питома витрата сумарною електричної енергії дуг, що розраховується щодо ваги металеві шихти, що припадає на поточну "корзину".

В даний час при експлуатації дугової сталеплавильної печі використовуються п'ять профілів плавки. Вони відрізняються процентним вмістом металу і чавуну, які завантажуються в піч безпосередньо перед розплавленням:

- Профіль № 1: включення ДСП після тривалих перерв або ремонтів;
- Профіль № 2: 100% металобрухту;
- Профіль № 3: 75% металобрухту, 25% чавуну;
- Профіль № 4: 60% металобрухту, 40% чавуну;
- Профіль № 5: робота ДСП без СТК.

Профілі плавок № 1 і № 5 є неосновними. Їх використання вкрай рідко, тому що продуктивність печі в цьому випадку мала. Основними профілями плавки є № 2, № 3 та № 4. Найбільше споживання потужності та електроенергії припадає на профіль № 2, т.к. в цьому випадку 100% завантаження печі металом для розплавлення якого витрачається більше значення питомого споживання e/e_e , ніж для чавуну.

В даний час сформульовані нові підходи до оптимізації дугової сталеплавильної печі, засновані на кореляційному зв'язку електротехнологічної ефективності плавки (у період розплавлення - швидкість розплавлення шихти, в періоді рідкого металу – швидкість нагрівання металу) з параметрами її електричного режиму.

Таким чином, за цикл плавки можна виділити наступні способи оптимізації:

- 1) режим проплавлення колодязів, має на увазі під собою підтримку максимально можливих значень довжин дуг;
- 2) режим розплавлення шихти, у великих печей найенергоємніший і тривалий. У цей період плавлення найбільш близьким до максимального значення ККД і випромінювальною здатністю дуги є режим з максимальним коефіцієнтом зносу футеровки КЗФ. Коефіцієнт зносу футеровки визначається відношенням множення потужності дуги на напругу дуги до квадрату відстані між стінкою печі та електродом;

$$КЗФ = P_d \cdot U_d / a^2 \rightarrow \max$$

- 3) режим нагріву рідкого металу. У цьому випадку підтримують максимальне значення коефіцієнта інтенсивності нагріву КІН, що відображає швидкість нагріву металу. КІН визначається добутком потужності дуги на струм дуги.

$$КІН = P_d \cdot I_d \rightarrow \max$$

Оптимізація електричних режимів ДСП способами зазначеними вище дозволяє економити Е/Е, скорочувати цикл плавки і, як наслідок, збільшувати продуктивність печі, коли це буде необхідно.

2.2. Загальні відомості про електричну дугу, про технології ведення плавки і про інновації при плавлі металу дугових сталеливарних печей.

Електрична дуга за своєю природою може мати різні форми динамічних вольтамперних характеристик: ламані, прямі або вигнуті лінії. У більшості випадків дуга може бути представлена так, як показано на рисунку 2.1.

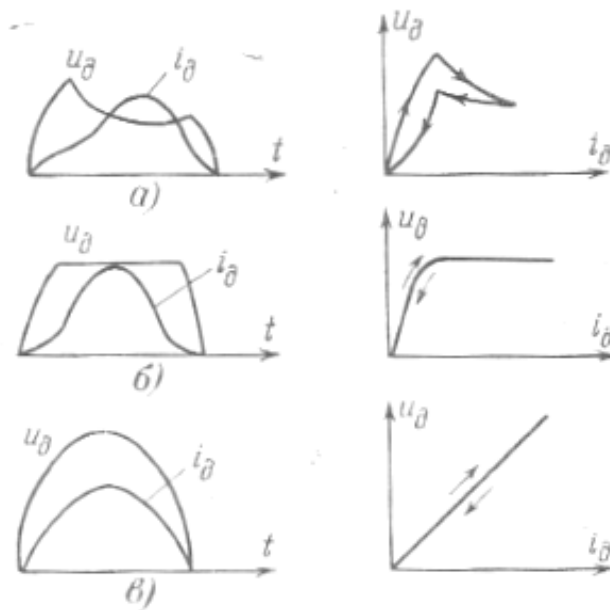


Рисунок 2.1 - Типові ДВАХ дуг: а) малопотужна дуга, б) дуга, характерна для ДСП на початку і середині плавки; в) дуга, характерна для ДСП наприкінці плавки (стійкий режим горіння)

На рисунку 2.1,а приведена характеристика дуги змінного струму на відкритому повітрі, тобто в умовах сильного охолодження, а також осцилограма її струму і напруги. При кожному проходженні струму через нуль газовий проміжок охолоджується і деіонізується; опір його зростає, виникнення струму вимагає підвищеного значення напруги - виникає пік напруги (напруга запалювання). По мірі зростання струму напруга на дузі знижується і досягає мінімуму при максимумі струму. Зниження струму викликає новий підйом напруги, зазвичай менший за амплітудою, ніж перший (напруга затухання дуги).

Чим більше потужність дуги, чим гірше її охолодження, тим менше піки запалювання і затухання, тим ближче форма кривої напруги до трапеційдальної, а її вольтамперная характеристика - до ламаної лінії (рисунок 2.1, б). Така форма кривих напруги та струму характерна для дуг сталеливарних печей.

Якщо дуга настільки добре теплоізолювана і потужна, що її провідність протягом періоду практично не змінюється, то форми кривих

напруги та струму близькі до синусоїдальних а динамічна характеристика дуги являє собою похилу пряму (рисунок 2.1, в).

Таким чином, в більшості випадків для дуг змінного струму криві напруги на дузі і струму відрізняються від синусоїди, а протягом деякої частини періоду через дуговий проміжок струму взагалі не проходить.

При синусоїдальній формі напруги джерела дуга може горіти безперервно: струм плавно і без перерв переходить через нульове значення. Може мати місце переривчастий нестійкий режим, коли дуга в деякі періоди взагалі не запалюється і зрештою взагалі гасне. Форми кривих напруги та струму, безперервний або переривчастий режими її горіння і стійкість залежать від багатьох факторів. Головними з них є характер джерела живлення (значення і частота живлячої напруги), потужність дуги, тепловий стан газового проміжку (ступінь теплоізоляції дуги), параметри контуру з дугою.

Основне призначення дугової сталеливарної печі - виплавка сталі з металевго брукхту (скрапу). У ДСП отримують, як правило, високолеговані сорти стали, для яких потрібні ретельне очищення використовуємого металу від шкідливих домішок (а особливо сірки), видалення неметалевих включень і газів.

Виплавка легованої сталі включає в себе такі операції: плавлення металу, видалення різних шкідливих домішок і газів, проведення розкислення металу, введення в нього потрібних легуючих і злив в розливний ківш.

Хід плавлення шихти дугової сталеплавильної печі ілюструється на рисунку 3.2.

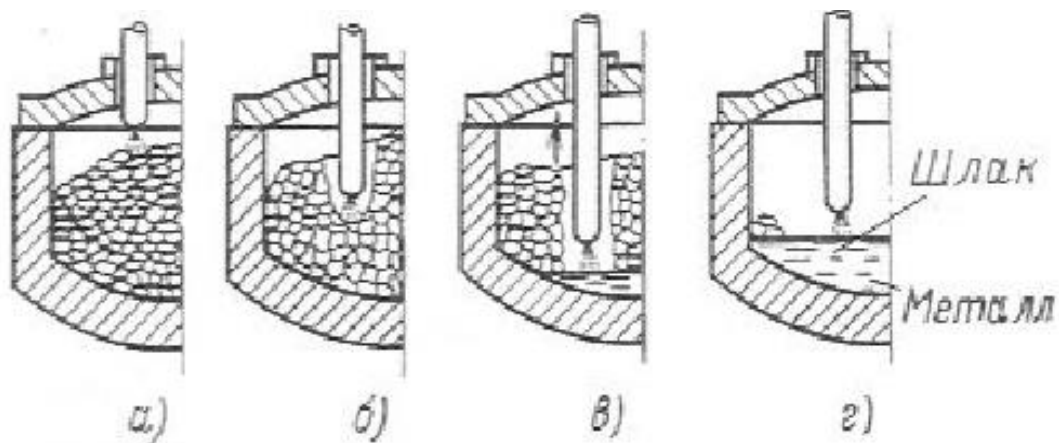


Рисунок 2.2 - Хід плавлення шихти

Дуга загоряється спочатку між одним кінцем електрода і поверхнею шихти (рисунок 2.2,а), далі в шихті виникають колодязі, в які заглиблюються знижуються електроди. Вони знижуються (2.2,б) до тих пір, поки не досягнуть дна ванни. Дуга, яка палає між електродом і розплавленим металом, розігріває метал до максимуму, починаються розмив і розплавлення навколишньої шихти у колодязі (2.2,в). Колодязі збільшуються в ширину, рівень рідкого металу починає підвищуватися у ванні, а електроди починають підніматися. Наприкінці цього періоду майже весь метал знаходиться в розплавленому стані, режим горіння дуги спокійний, стійкий (2.2,г). Далі відбувається злив розплавленого металу і завалка скрапу для початку наступної плавки.

Умови теплообміну, що визначають нагрівання ванни дугової сталеливарної печі, відрізняються значною складністю. Тепло підводиться до ванни від зовнішніх джерел через її поверхню, покриту шлаком, і виділяється в самій ванні внутрішніми джерелами енергії. Зовнішніми джерелами є електричні дуги, паливокислородні пальники та гази, які заповнюють робочий простір печі, якщо їх температура істотно вище температури розплаву. Такі умови створюються при допалюванні оксиду вуглецю двовалентного поблизу поверхні ванни. Внутрішніми джерелами є хімічні реакції окислення вуглецю, а також заліза і його домішок: кремнію, марганцю і т.д.

Ванна втрачає тепло шляхом виділення з неї бульбашок двовалентного оксиду вуглецю, теплопровідністю через кладку подини і укосів, випромінюванням поверхні шлаку на охолоджуючи водою панелі стін і склепіння (свод). Велика кількість тепла, отримане у ванній, витрачається на нагрів зануреного в неї брухту. Основними тепловими втратами ванни є втрати випромінювання та тепло, втрачене з утворенням бульбашок. Інші втрати в інженерних розрахунках можна не враховувати.

Головним джерелом тепла є електричні дуги, які нагрівають скрап зверху. За останні 30 - 40 років потужність дуг збільшилася більш ніж у чотири рази. Слід зазначити, що тепловий потік, що випромінюється дугами, розподіляється нерівномірно. Основна його частина йде на центральну область. У даному випадку відбувається нагрів металу зверху.

Як відомо, раціональним способом є нагрів рідини знизу, тому що менш щільні рідкі маси піднімаються вгору, а холодні тверді шматки брухту опускаються вниз. Відбувається перемішування вмісту без використання зовнішніх джерел енергії, таке перемішування називається гравітаційним. Гравітаційне перемішування володіє великою інтенсивністю, яка зростає пропорційно збільшенню потужності джерела нагрівання.

Ванна ДСП нагрівається зверху. У цьому випадку гравітаційне перемішування відсутнє, крім цього рідка сталь порівняно з неметалевими рідинами має високу теплопровідність. Рідкий метал у цьому випадку вдається перемішувати за допомогою спливаючих бульбашок чадного газу, який у свою чергу виходить при окисленні киснем вуглецю ванни. Для печей великої потужності для збільшення інтенсивності перемішування застосовується донне продування інертним газом, в більшості випадків цим газом служить аргон.

У дугових сталеливарних печах перемішування металу називають циркуляційним. Візуальні спостереження доводять, що вміст ванни постійно знаходиться в русі. Рух носить горизонтальний характер, лінійні швидкості якого досить невеликі 1 - 1,5 м/с, але завдяки великій щільності металу (7830

кг/м³) це відповідає вельми великим значенням критерію Re : 100000 - 1000000, що вказує на яскраво виражений турбулентний характер руху. Крім горизонтальних потоків, у ванні присутні ще і вертикальні потоки, які володіють приблизно такими ж швидкостями і рівнем турбулентності. Всі ці потоки, як уже говорилося вище, створюють циркуляційне перемішування металу у ванні.

Інжекція вуглецю в ванну - це технологічна операція, вирішивши два різні завдання: вспінення шлаку і відновлення окислів (оксидів) заліза з метою збільшення виходу придатного [15]. Шлаки вспінюють для занурення в нього електричних дуг, при цьому витрачається невелика кількість вуглецю.

В даний час для економії електроенергії на нагрів брухту виробляють його попереднє підігрівання зникаючими димовими газами.

Перший спосіб був орієнтований на широко використовуване завантаження брухту в піч кошиками. Ємностями для нагріву брухту за цим способом зазвичай служили самі корзини. Іноді у якості ємностей для нагріву брухту до більш високих температур використовувалися корзини або бадді спеціальної конструкції. Такі бадді виконувалися з жароміцної сталі і забезпечувалися пальниками.

Для реалізації конвеєрного способу нагрівання використовувалися пристрої двох різних типів: стрічкові конвеєри особливої конструкції і секціоновані шахтні підігрівачі. На конвеєрі лом переміщається до печі по горизонталі, як у процесі Consteel. Секціонування шахтний підігрівач - це теж особливий конвеєр, встановлений вертикально над піччю. У ньому лом по мірі нагрівання послідовно змішується з верхніх секцій в нижні за рахунок гравітації.

Принципова схема пристрою для такого нагріву показана на рисунку 2.3. Ємність 1, встановлена в камері нагрівання 2, забезпечена верхньою камерою 3, в яку надходять гази з високою температурою. Це можуть бути гази, що йдуть з печі, або гази, отримані від сжигання палива в пальниках 4.

Камера 3 забезпечує рівномірний розподілення газів по перетину шару брухту 5. Проходячи через ємність, заповнену ломом, зверху вниз, гази віддають тепло лому, остигають і залишають ємність 1 через отвори 6 в її нижній частині. З допомогою відкриваючого днища 7 нагрітий лом завантажується у піч.

Розглянемо основні теплотехнічні закономірності нагріву брухту за схемою рис. 2.3, не вдаючись до досить складних розрахунками цього нестационарного процесу. На відміну від окремих шматків брухту, теплопровідність самого шару, як по висоті, так і в поперечному напрямку, обумовлена зіткненням шматків один з одним, настільки мала, що в розрахунках її можна не враховувати. Тому втрати тепла через бічні стінки ємності теж малі і ємність можна охолоджувати повітрям і навіть водою без істотного збитку для ефективності нагріву брухту. Так само можна знехтувати і передачею тепла випромінюванням від гріючих газів, оскільки зазори між шматками невелики і гази в них мають малу ступінь чорноти.

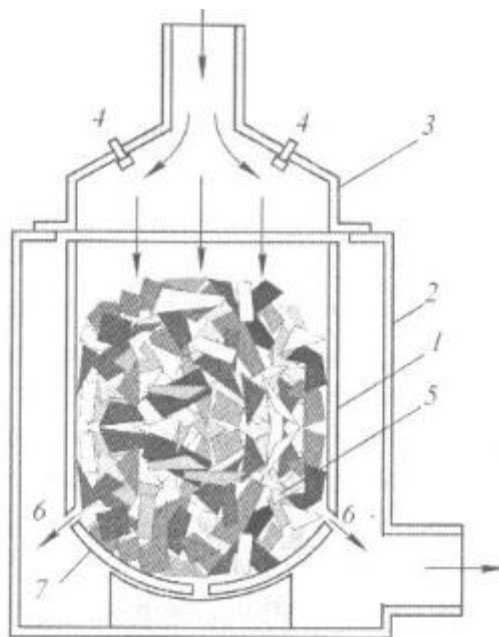


Рисунок 2.3 - Схема нагріву брухту в завантажуючому кошику:

1 - ємність; 2 - камера нагріву; 3 - верхня камера; 4 - пальники; 5 - металобрухт; 6 - отвори для виходу остивших газів; 7 - спадне днище при завантаженні брухту в кошик.

Основними видами теплопередачі в шарі брукхту є: конвективна тепловіддача від високотемпературних газів, що омивають поверхню шматків, а також теплове випромінювання між нагрітими кусками. Випромінювання стає істотним при температурі шматків вище 300 ... 350 ° С.

Недоліком даного способу є те, що неможливо нагріти лом газами що виходять до середнемассової температури 600 - 700 градусів, тому що для цього необхідно витратити більше часу, іншими словами збільшити час плавки, чого не можна допускати категорично.

На відміну від нагрівання у великій ємності, лом на конвеєрі можна нагрівати до дуже високих температур і з дуже великою швидкістю. Це пояснюється двома перевагами конвеєрного нагріву: по-перше, він дозволяє працювати з шаром брукхту невеликої товщини і, по-друге, дає можливість видаляти із зони нагрівання чергову порцію брукхту, як тільки вона досягне максимальної температури. Це дозволяє уникнути перегріву брукхту, не знижуючи потужності джерела теплової енергії.

Конвеєрний нагрів брукхту в промислових масштабах реалізований в сталеливарних агрегатах Consteel. Однак всупереч очікуванням і першим рекламним повідомленням здійснити на конвеєрі Consteel високотемпературний нагрів брукхту не вдалося. При довжині конвеєрів близько 30 м температура нагріву не перевищила тих показників, які досягалися при нагріванні брукхту в завантажувальних кошиках. Витрати електроенергії на печах Consteel суттєво не відрізнялися від витрат на сучасних ДСП, працюючих без попереднього підігріву брукхту.

Основна причина такої низької ефективності використання тепла відхідних газів в процесі Consteel - незадовільна організація процесу теплопередачі від газів до лому. Гази в тунелі рухаються паралельно поверхні шару брукхту і не проникають глибоко в простір між його шматками. Кількість газів в порівнянні з прохідним перетином тунелю замала. Тому їх швидкість, отже, і інтенсивність передачі тепла від газів до лому набагато нижче, ніж при просоченні газів через шар брукхту у великій ємності. У

результаті в основному нагрівається тільки самий верхній тонкий шар брухту. Випромінювання газів і футерування тунелю також нагріває тільки верхній шар брухту, оскільки шматки брухту, розташовані зверху, екранують шматки, що лежать нижче. Щоб реалізувати на конвеєрі високотемпературний нагрів лома, необхідно використовувати в якості основного джерела тепла НЕ відхідні газы, а потужні пальники. При цьому тунель ділиться на дві зони. Першою з боку печі є зона високотемпературного нагріву брухту пальниками. Друга зона, яка займає решту, більшу частину тунелю, служить для попереднього підігріву брухту за рахунок утилізації тепла газів, що йдуть з першої зони. Така протизустрічна схема теплопередачі, при якій лом рухається назустріч потоку відхідних газів, дозволяє найбільш повно використовувати їх тепло і принципові переваги конвеєрного нагріву. На рисунку 2.4 приведена схема конвеєрного нагріву брухту.

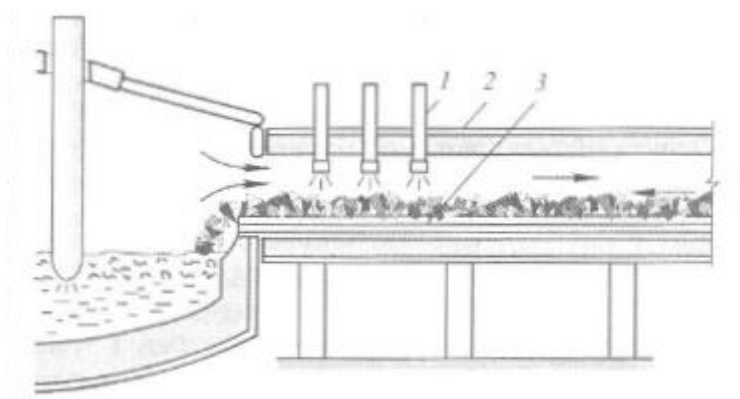


Рисунок 2.4 - Схема конвеєрного нагріву брухту:

1 - газокисневі пальники; 2 - тунель; 3 - спеціальний жаростійкий конвеєр.

У першій зоні факели сводових пальників, що володіють великою кінетичною енергією, атакують поверхню брухту під прямим кутом. Газы, нагріті до високої температури, проходять через шар брухту, розтікаються під ним по поверхні конвеєра і повертаються в тунель, повторно омиваючи

шматки брухту. Така аеродинаміка потоків забезпечує інтенсивну тепловіддачу від газів до лому, швидкий і відносно рівномірний його нагрів.

Ефективність такого способу нагрівання лома підтверджується досвідом, накопиченим в конвертерному виробництві сталі. У минулому такий спосіб отримав досить широке поширення попередній підігріву брухту в конвертерах до заливки чавуну за допомогою високомогутніх газо-або мазутокислородних пальників. Пальники встановлювали поруч з кисневими фурмами і на час нагріву брухту опускали у порожнину конвертера. Зазвичай використовувалися пальники потужністю 160...180 МВт. Вони забезпечували нагрів 100 т брухту до середньомасової температури 700°C приблизно за 7 хвилин. Було встановлено, що середньомасова температура нагріву брухту в даних умовах не повинна перевищувати 800°C. При більш високій температурі економічність нагріву різко знижується.

Висновки

Дослідження електричних ланцюгів дугових сталеплавильних печей здійснюється на діючих печах шляхом зняття осцилограм струмів і напруг на дугах і різних ділянках контурів печей, а також динамічних вольтамперних характеристик дуг. В умовах діючих дугових сталеплавильних печей вельми скрутно провести таку роботу, виконуючи всі правила і норми техніки безпеки. Крім того потрібні заходи для надійного захисту вимірювальних приладів від дії сторонніх електромагнітних полів.

Тому розрахунок та аналіз буде проводитися з вже знятих значень по одинадцятьох стадіях плавок за допомогою програми ARF.

Аналіз осцилограми які були зняті під час плавок говорить про наступне:

а) умови горіння дуги і форми кривих струму і напруги на дугах безперервно змінюються; тому для отримання стійких даних проводять статистичну обробку, отримуючи середнє значення;

б) форма кривих напруги на дузі відрізняється від прямокутної, вона має, як правило, опуклість і тому є проміжною між прямокутної і синусоїдальної. Чим вище питома потужність печі, чим вище її струм, тим стійкіше горить дуга, тим ближче форма кривої напруги на дузі до синусоїдальної;

в) форми кривих напруги та струму дуг сильно змінюються по ходу плавки. У той час як у період розплавлення, особливо в початковий його період, коли проплавляються колодязі, форма кривих сильно спотворена; в періоди окислення і рафінування режим горіння дуг стає більш стійкий і їх форма наближається до синусоїдальної;

г) електрична дуга є джерелом вищих гармонійних складових. Проникаючи в живильну мережу, вони шкідливо впливають на споживачів тим, що погіршують якість електроенергії. Наявність їх збільшує індуктивність у ланцюзі, а також струми, що протікають в конденсаторних батареях, викликаючи перегрів і навіть вихід батарей з ладу, що викликає необхідність захисту їх реакторами або фільтрами. При наявності в контурі печі кабельних вставок, можливий резонанс між їх ємністю і індуктивністю ланцюга і поява високочастотних коливань, що прискорюють старіння ізоляції високовольтного обладнання.

д) на деяких осцилограмах виразно видно "вентильний ефект". У тому випадку, коли катод є металом, який має високу теплопровідність і меншою в порівнянні з графітом температурою катодної плями, термоелектронна емісія скрутна (маловірогідна), і миттєві значення струму в цей напівперіод менше, а напруга дуги більше, ніж у кожних попередніх і наступних напівперіодах, коли катодом є електрод.

В даний час в багатьох галузях науки і техніки видатні результати дає застосування математичних моделей. Відомі різні підходи до побудови математичних моделей і моделювання сталеливарних процесів. Незалежно від цілого ряду інших особливостей принципів переваги і недоліки моделі визначаються насамперед її програмним забезпеченням, тобто тією інформацією, на якій вона базується. Варто відзначити, що програмні

технології відкривають практично необмежені можливості при моделюванні. За допомогою математичних моделей можна розрахувати електричні, технологічні та робочі характеристики дугової сталеплавильної печі, враховуючи нелінійність дуги, умови її горіння і теплообмін. Але всі процеси, що відбуваються у ванні печі, врахувати неможливо, тому не можна буде провести подальший розрахунок. Для вирішення даної проблеми проводиться ряд спрощень: синусоїдальна форма кривих струму і напруги безпосередньо в ланцюзі вторинної обмотки трансформатора, симетричний і стійкий режим горіння дуг.

3. МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ДУГИ

Відомо три типи розрахунку електричних режимів:

- 1) подання дуги у вигляді активного опору;
- 2) подання напруги дуги за час її горіння постійним значенням $U_d = \text{const}$;
- 3) подання дуги нелінійною ланкою, яка описанна нелінійним диференціальним рівнянням Кассі.

При розрахунку електричних і технологічних характеристик за першим методом електрична дуга має властивості активного опору, тобто напруга знаходиться в лінійній залежності від струму дуги. Перевагами даного способу розрахунку є простота і легкість математичних обчислень, недоліком - велика похибка. Також до недоліків цього методу розрахунку відноситься те, що не враховується гармонійний склад струмів та напруг мережі. Даний спосіб розрахунку електричної дуги був вперше запропонований в середині минулого століття.

Подання електричної дуги за способом С.І. Тельного дає більш точні результати в порівнянні з спрощеною методикою, тому що враховуються властивості дуги, що носять нелінійний характер. Заснований на представленні дуги за час її горіння постійним значенням ЕРС. Електрична дуга при цьому може бути представлена у вигляді схеми заміщення. Цей спосіб дозволяє врахувати "вентильні" властивості дуги (нелінійну залежність напруги на діодах від струму дуги), а також несиметрію струмів по фазах. Якщо в першому випадку струм дуги відрізняється від напруги на дугі в деякий коефіцієнт, що називається активним опором, то за способом Тельного цей коефіцієнт може змінюватися в широких межах. Крім того є можливість визначення граничне значення струму, що характеризує перехід горіння дуг з переривчастого режиму в безперервний режим, але цей режим також має велику похибку розрахунків так як не враховується постійна часу.

Саме третій тип розрахунку є більш точний, а пояснюється це тим, що враховуються три взаємозалежних параметри: миттєва напруга на дузі, постійна часу проти-ЕРС дуги і миттєве значення струму дуги.

3.1. Розрахунок дуги змінного струму з використанням нелінійного рівняння Кассі

Рівняння Кассі пов'язує три основних електричних параметри дугового розряду: миттєва напруга на дузі $u_d(t)$, противо-ЕРС дуги E_d та миттєву провідність дуги $g_d(t)$ (3.1):

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

де $g = i_d / u_d$ - миттєва провідність дуги, см;

θ_d - теплова постійна часу дуги, для різних стадій плавки змінюється в межах від 0,1 до 5 мс.

Відмінною особливістю даного рівняння є наявність у ньому дуже важливого параметра - теплової постійної часу θ_d . Його використання дає можливість при математичному моделюванні враховувати умови горіння дуги на різних стадіях плавки.

Для отримання характеристик параметрів складають систему рівнянь миттєвих значень струмів і напруг, записаних відповідно до законів електротехніки (формула 3.2):

$$u'_{1\phi} = i_d R_{\Sigma} + L_{\Sigma} \frac{di_d}{dt} + u_d, \quad (3.2)$$

де $L_{\Sigma} = X_{\Sigma} / 2\pi f_c$ – сумарна індуктивність електричного контуру ДСП;

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

Отриманий вираз перетворимо відносно напруги дуги, який визначається за формулою (3.3):

$$u_d = u'_{1\phi} - i_d R_{\Sigma} - L_{\Sigma} \frac{di_d}{dt}. \quad (3.3)$$

Струм дуги виражаємо через електричну провідність і напругу дуги $i_d = u_d \cdot g_d$.

З рівняння Кассі виражаємо миттєву провідність, що визначається за формулою 3.4:

$$g_{di} = \frac{1}{\theta_d} \int \left(\frac{u_d^2}{E_d^2} g_{di-1} - g_{di-1} \right) dt + g_{d0}, \quad (3.4)$$

де g_{d0} - початкова величина провідності дуги в момент появи напруги.

Використовуючи стандартне перетворення Лапласа $p = d/dt$, останні три вирази запишемо в операторній формі і на їх основі складемо структурну схему, наведену на малюнку 3.1, а [18]:

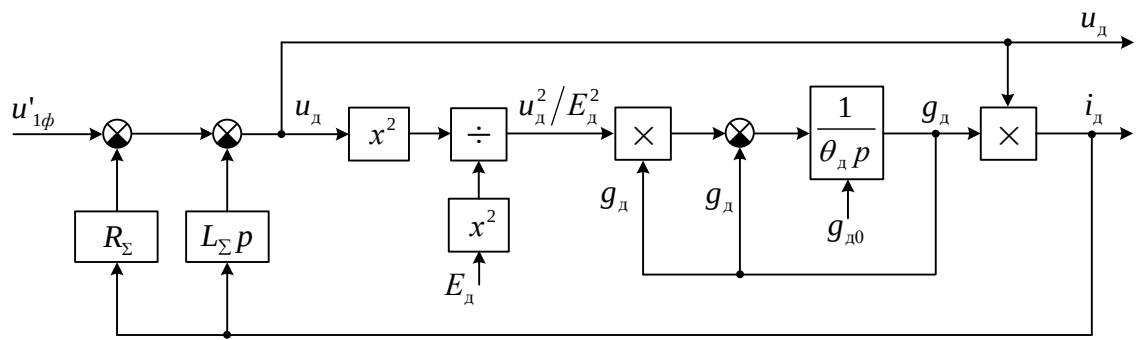
$$\left. \begin{aligned} u_d(p) &= u'_{1\phi}(p) - i_d(p)R_\Sigma - L_\Sigma i_d(p)p \\ g_d(p) &= \frac{1}{\theta_d p} \left(\frac{u_d^2(p)}{E_d^2} g_d(p) - g_d(p) \right) \\ i_d(p) &= u_d(p)g_d(p) \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

На рисунку 3.1а приведена структурна схема однієї фази ДСП на основі рівняння Кассі.

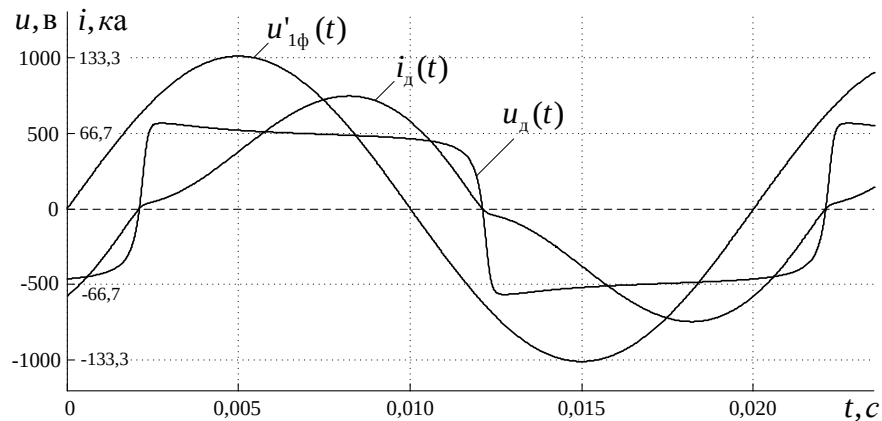
На рисунку 3.1б наведена осцилограма напруги та струму ДСП на основі рівняння Кассі.

На рисунку 3.1, б наведені миттєві значення живлячої фазної напруги $u'_{1\phi}(t)$, напруги $u_d(t)$ та струму дуги $i_d(t)$. Введення постійної часу θ_d виявляється в тому, що напруга дуги приймає характерний пік в момент запалювання.

На рисунку 3.2 представлена серія вольтамперних характеристик однофазної дуги для різних значень теплової постійної часу, отриманих на основі схеми (рис. 3.1, а).



а)



б)

Рисунок 3.1- Структурна схема однієї фази ДСП на основі рівняння Кассі (а - структурна схема, б - осцилограми напруги та струму).

Зміна постійної часу θ_d суттєво позначається на динамічній вольт-амперній характеристиці (ДВАХ) та її площі, яка характеризує величину реактивної потужності дуги. Тому, із збільшенням θ_d , активна потужність, що вводиться в піч, знижується. За величиною θ_d , а значить, за формою ДВАХ можна припустити про поточну технологічну стадію плавки. На початку розплавлення шихти величина θ_d знаходиться в межах $0,2 \div 0,6$ мс, по мірі виникнення рідкої фази її значення збільшується до $1 \div 1,5$ мс, при роботі дуг на рідкий розплав під шлаком θ_d істотно зростає до $3 \div 5$ мс. При цьому форма струму і напруги дуги близькі до синусоїди.

Вибір коректних значень θ_d в ході плавки дозволяє адекватно судити про електричні процеси, що відбуваються в дузі, і разом з тим реально оцінювати поточні значення струмів, напруг і потужності.

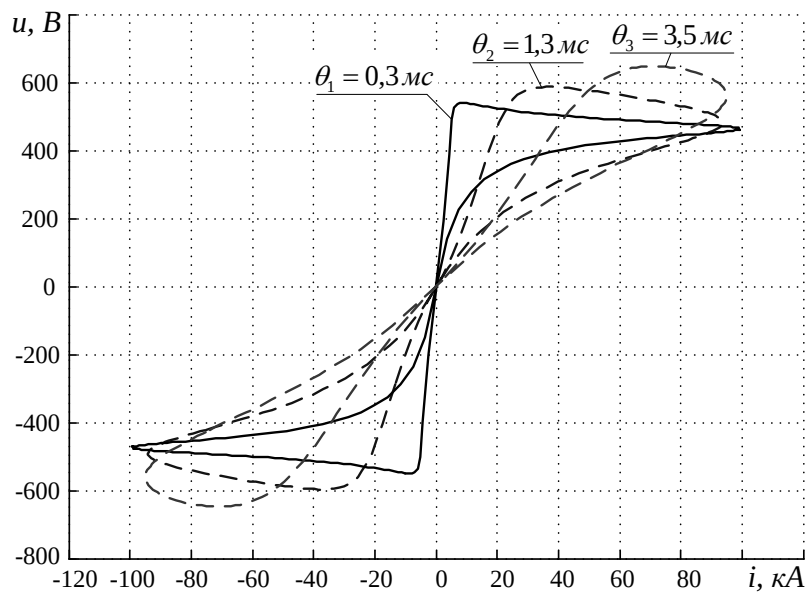


Рисунок 3.2-Вольтамперні характеристики однофазної дуги
(а – $\theta = 0,3$ мс; б – $\theta = 1,3$ мс; в – $\theta = 3,5$ мс)

У разі подання дуги за допомогою нелінійною ланкою, описуваному рівнянням Кассі, струм дуги, також як і струм, споживаний з мережі, стають несинусоїдальними. При цьому розрахунок основних параметрів електричного контуру ДСП виконують наступним чином:

Розраховується активна потужність електричного контуру за формулою, визначаємо за формулою 3.5:

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

де $u'_{1\phi}$ та i_d – миттєві значення фазної напруги джерела живлення і струму дуги;

$T = 0,02$ с – період живлячої напруги.

З урахуванням того, що живильна напруга в потужних електричних системах практично синусоїдально, то активна потужність передається по першій гармоніці, визначається за формулою 3.6:

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

де $U'_{1\phi(1)}$ та $I_{д(1)}$ - діючі (середньоквадратичні) значення перших гармонік приведеної напруги живлення і струму дуги;

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

У загальному випадку в ланцюзі з несинусоїдальним струмом коефіцієнт потужності позначають λ та визначають за формулою 3.7:

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

де K_{um} - коефіцієнт спотворення струму.

Повна потужність електричного контуру розраховується за формулою 3.8:

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

де $U'_{1\phi} = \sqrt{1/T \int_0^T (u'_{1\phi})^2 dt}$ та $I_{д} = \sqrt{1/T \int_0^T i_{д}^2 dt}$ - діючі (середньоквадратичні)

значення приведеної напруги живлення і струму дуги;

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

T - потужність спотворень, обумовлена вищими гармоніками струму.

Еквівалентна реактивна потужність контуру включає реактивну потужність по першій гармоніці та потужність спотворення і визначається за формулою 3.9:

$$Q_{\Sigma} = \sqrt{S^2 - P_{акт}^2} = Q_{(1)} + T = I_{д}^2 X_{\Sigma}. \quad (3.9)$$

Електричні втрати в контурі визначаються за формулою 3.10:

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

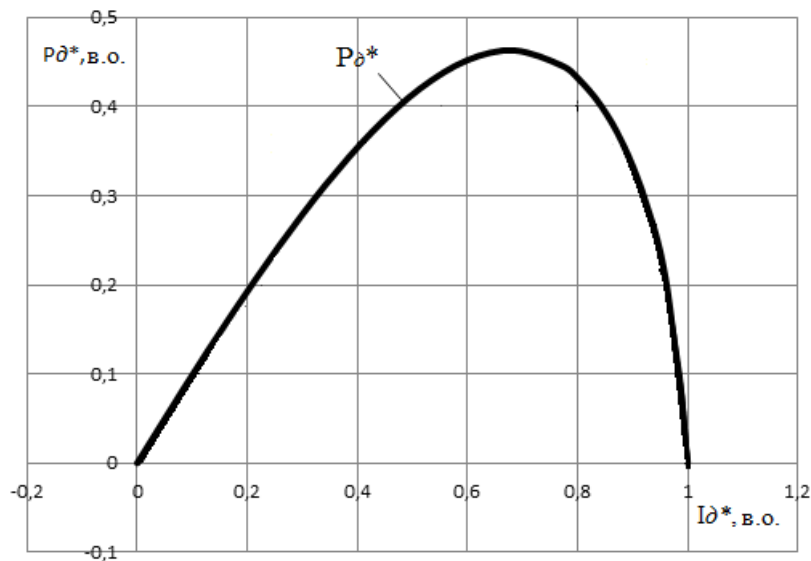
Активна потужність дуги обчислюється за виразом 3.11:

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

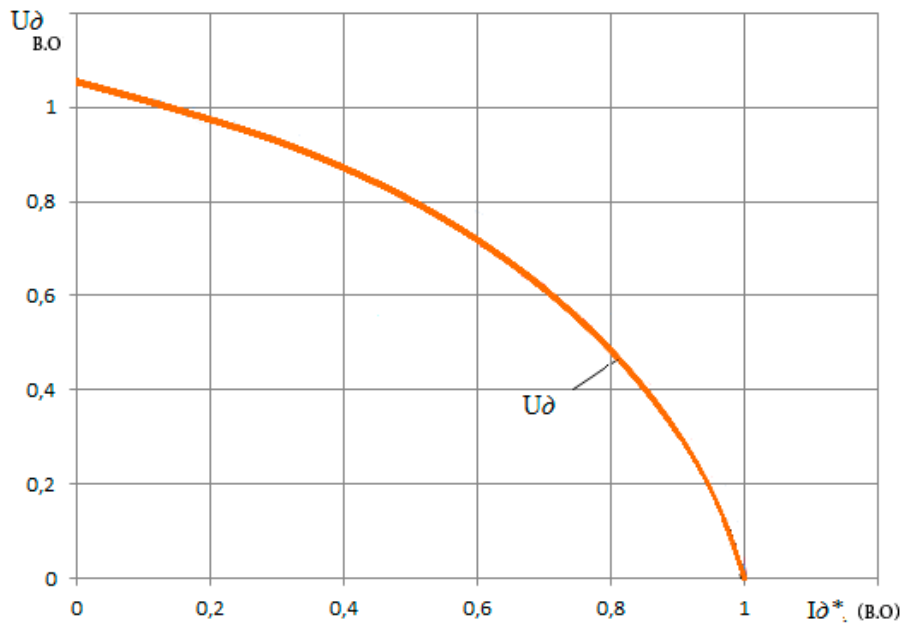
3.2. Побудова електричних характеристик

На рисунку 3.3 представлені залежності, розраховані за формулами 3.5-3.11: потужності дуги P_d^* , напруги дуги U_d^* , коефіцієнта зносу футеровки $KЗФ^*$ та коефіцієнта інтенсивності нагріву $КІН^*$ від струму дуги для однієї фази ДСП.

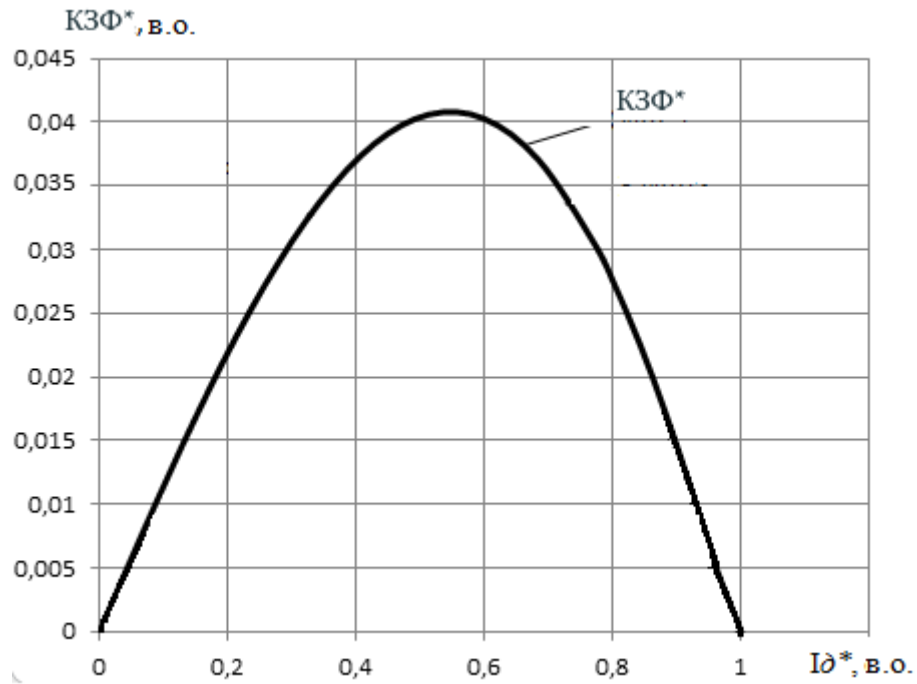
У таблицях 3.1 і 3.2 наведені значення, отримані в результаті розрахунку дуги з використанням рівняння Кассі для трьох фаз.



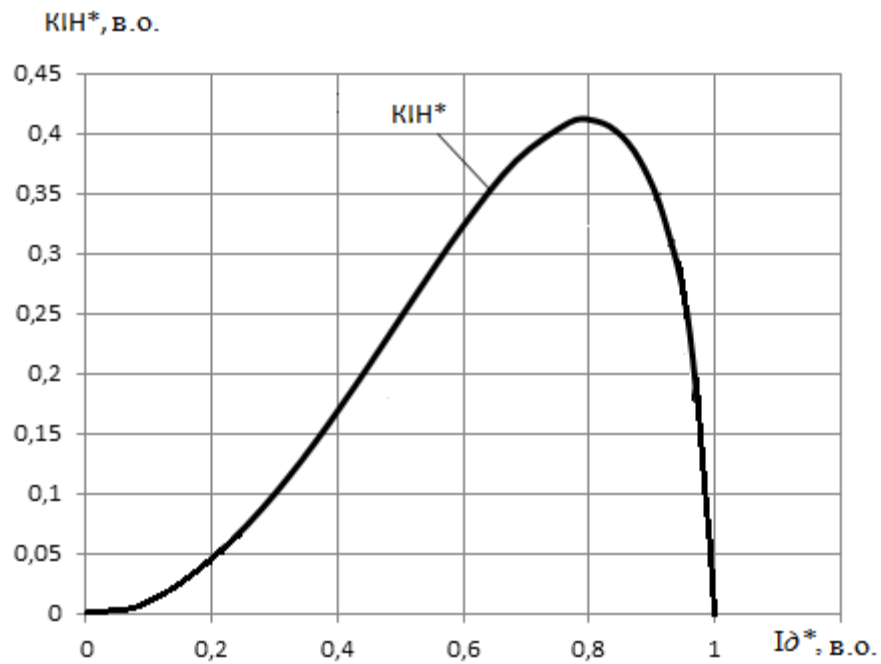
а)



б)



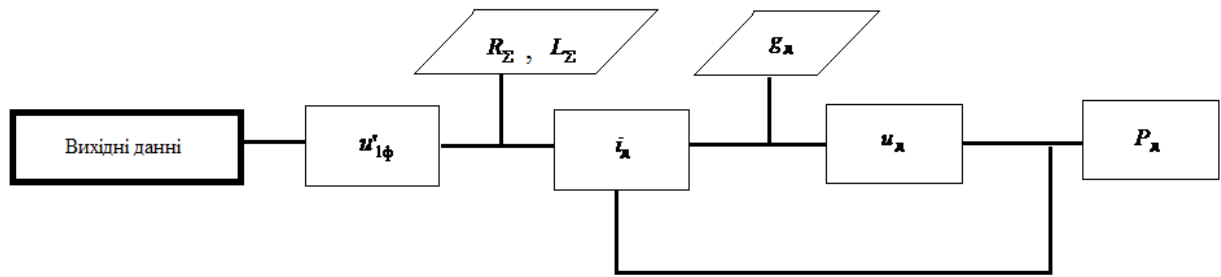
в)



г)

Рисунок 3.3 - Основні електричні характеристики: а) залежність потужності дуги від струму дуги; б) залежність напруги дуги від струму дуги; в) залежність $K3\Phi$ від струму дуги; г) залежність $KИН$ від струму дуги.

Для побудови основних електричних характеристик використовувався даний алгоритм розрахунку.



Висновки

Використанням диференціального рівняння Кассі враховує три взаємозалежні параметри: миттєва напруга на дузі, проти- ЕРС дуги і миттєве значення струму дуги.

Характеристики на рисунку 3.3 носять екстремальний характер, що слугує передумовою оптимізації режимів плавки.

Моделювання електричної дуги за рівнянням Кассі вироблялося в пакеті MATLAB. Отримані значення мають похибку в порівнянні з реальними даними, але в цілому адекватність математичних моделей підтверджується.

При дослідженні електричної дуги за рівнянням Кассі спостерігається найбільш точне уявлення про процеси, що протікають в ДСП.

4. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ РОЗРАХУНКУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ДУГИ ЗМІННОГО СТРУМУ, ОТРИМАНИХ РОБОЧИХ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

4.1. Розрахунок робочих та технологічних характеристик

Робочі характеристики ДСП можуть бути отримані в спрощеному вигляді за допомогою наступних виразів [19]:

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

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

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

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

Де 340 кВт·ч/т – теоретична кількість електроенергії, необхідна для розплавлення 1 т (без урахування додаткових джерел енергії); $P_{\text{акт}}$ – активна потужність електричного контуру дугового печі; $P_{\text{д}}$ – сумарна потужність дуг по фазах; $P_{\text{т.п}}$ – теплові втрати печі, кВт; $\eta_{\text{эл}}$ – електричний ККД дугового печі.

Графік кривої продуктивності продуктивності печі g^* набирає максимального значення при струмі, який відповідає максимуму потужності дуг. Максимальний тепловий ККД досягається в тому випадку, коли майже все тепло засвоюється шихтою. Це відповідає початку проплавлення колодязів.

Технологічні характеристики визначаються за формулами 4.5 та 4.6:

$$K3\Phi = P_{\text{д}} * U_{\text{д}} / a^2 \quad (4.5)$$

$$KIH = I_{\text{д}} * P_{\text{д}} \quad (4.6)$$

де $U_{\text{д}}$ – напруга дуги; $P_{\text{д}}$ – потужність дуги, $I_{\text{д}}$ – струм дуги; a – відстань між окружністю, що проходить через центри електродів і стінкою печі.

На рисунку 4.1 наведено графічні порівняння основних характеристик ДСП для розрахунків електричної дуги змінного струму за допомогою рівняння Кассі.

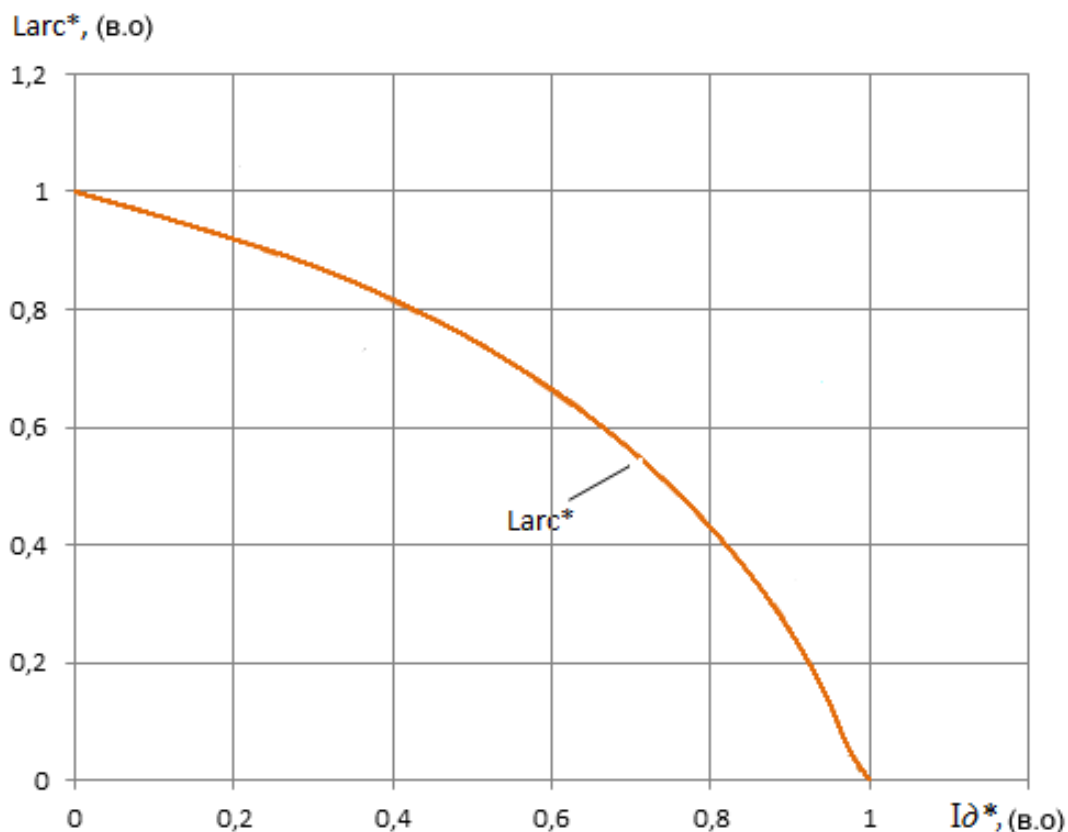


Рисунок 4.1. Залежність довжини дуги від струму дуги

4.2. Експериментальна перевірка адекватності математичної моделі

Для аналізу та перевірки даної математичної моделі на адекватність досить значень повної потужності трьох фаз і середнього струму по фазах, які фіксувалися за кроком у часі в 1 секунду за допомогою спеціальної програми ARF. При функціональній залежності сумарної потужності від середнього струму, яка відображається у вигляді деякої "хмарки" експериментальних точок, на графік додатково наносяться основні електричні та технологічні характеристики ДСП за допомогою яких проводиться перевірка математичної моделі на адекватність.

Як показують розрахунки, розташування "хмарки" знаходиться в межах 0,48-0,7 по прямій струму дуги у відносних одиницях на першій стадії.

Таке розташування точок відповідає роботі на довгих дугах, що може призвести до короткого замкнення між фазами. Щоб уникнути цього необхідно підтримувати максимальну потужність дуг (перемістити "хмарку" вправо) для проплавлення і подальшого поглиблення дуг в колодязі. За часом цей захід може зайняти кілька хвилин і відповідає першій стадії. Процес плавки металу при підтримці оптимальних параметрів розглянуто нижче.

Після того, як намітилися колодязі, необхідно збільшити довжину дуги, що призведе до зменшення струму, а також до економії витрати графітованих електродів на плавку. Даний період розплавлення є основним і може займати кілька стадій. У міру збільшення рідкого металу у ванні рекомендується зменшувати довжину дуги і переходити до роботи на максимальній потужності - даний період носить назву доплавлення. Після того, як більша частина металу знаходиться в розплавленому стані, його нагрівають до необхідної температури шляхом збільшення струму дуги до значення, відповідного максимуму КІН. Дана стадія закінчує весь процес плавлення. Далі рідкий метал зливається в ківш.

Наступна плавка починається з завалювання, запалювання дуг і т.д. Середня змінна продуктивність дорівнює 9-ти плавкам. Графік роботи ДСП тризмінний, тобто піч працює безперервно. Так як на протязі року виникають простої, які пов'язані з відсутністю металу для завалювання, знеструмлення цеху тощо, то час роботи печі на рік коливається від 7000 до 8000 годин.

Слід зазначити, що в перших двох випадках параметри математичної моделі однакові (17 - й ступінь трансформатора, 4 - й ступінь реактора, теплова постійна часу дуги $\Theta_d = 800$ мкс). У третьому ж випадку значення постійної часу дуги $\Theta_d = 1500$ мкс (при незмінних ступенях трансформатора і реактора) і це призводить до збільшення потужності дуги.

Це є підтвердженням адекватності математичної моделі з використанням рівняння Кассі для трьох фаз, а також свідчать про те, що електричний режим у даній стадії плавки не оптимальний. Принцип оптимізації полягає в тому, що спочатку збільшують потужність дуги, потім

знижують, далі знову збільшують - в результаті спостерігається зниження споживання електроенергії з мережі при збереженні заданої продуктивності печі.

4.3 Шляхи оптимізації плавов

Для вирішення поставленого завдання - зниження споживання електричної енергії при незмінній продуктивності - необхідно побудувати графіки електричних, робочих і технологічних характеристик.

На рисунку 4.2 показано як за допомогою програми ARF фіксуються реальні значення електричних режимів ДСП. На ньому наведено номери робочих кривих, номери ступенів трансформатора, номери ступенів реактора, сумарна потужність трьох фаз і середній струм по фазах - залежно від часу. З малюнка чітко видно, що після завалювання шихти і до розплавлення, стадії (сталість робочої кривої, ступені трансформатора і ступені реактора) повторюються. Час плавлення від завалювання до першої підвалки шихти буде розглянуто в цьому розділі.

При побудові графіків використовувалися формули 4.2, 4.3, 4.4. Потужність дуги, втрати і активна потужність були розраховані за допомогою математичної моделі. В якості змінного параметра було значення противо-ЕРС дуги. Опори ланцюгів при різних ступенях реактора та трансформатора відомі. Далі здійснювався перехід до відносних одиниць. Противо-ЕРС задається від 0 до максимального значення напруги на вторинній обмотці трансформатора 1,2 кВ. Математична модель має 3 блоки для кожного з рівнянь (формула 3.5). Напруга мережі складає 35 кВ, шаг задається - 50В. Математична модель розраховує струми на основі відомих значень напруги та опору.

В презентації роботинаведені електричні, робочі та технологічні характеристики для одинадцятьох стадій розплавлення шихти. Пунктирною лінією показані математичне сподівання сумарної потужності дуги і математичне сподівання середнього струму. Тонкими лініями показані такі значення струму, при яких досягаються максимальне значення коефіцієнта

зносу футеровки, максимальне значення потужності дуги і максимальне значення коефіцієнта інтенсивності нагріву.

У таблицях 4.1-4.11 наведені значення основних характеристик дугової сталеплавильної печі, за якими побудовані вищезгадані малюнки.

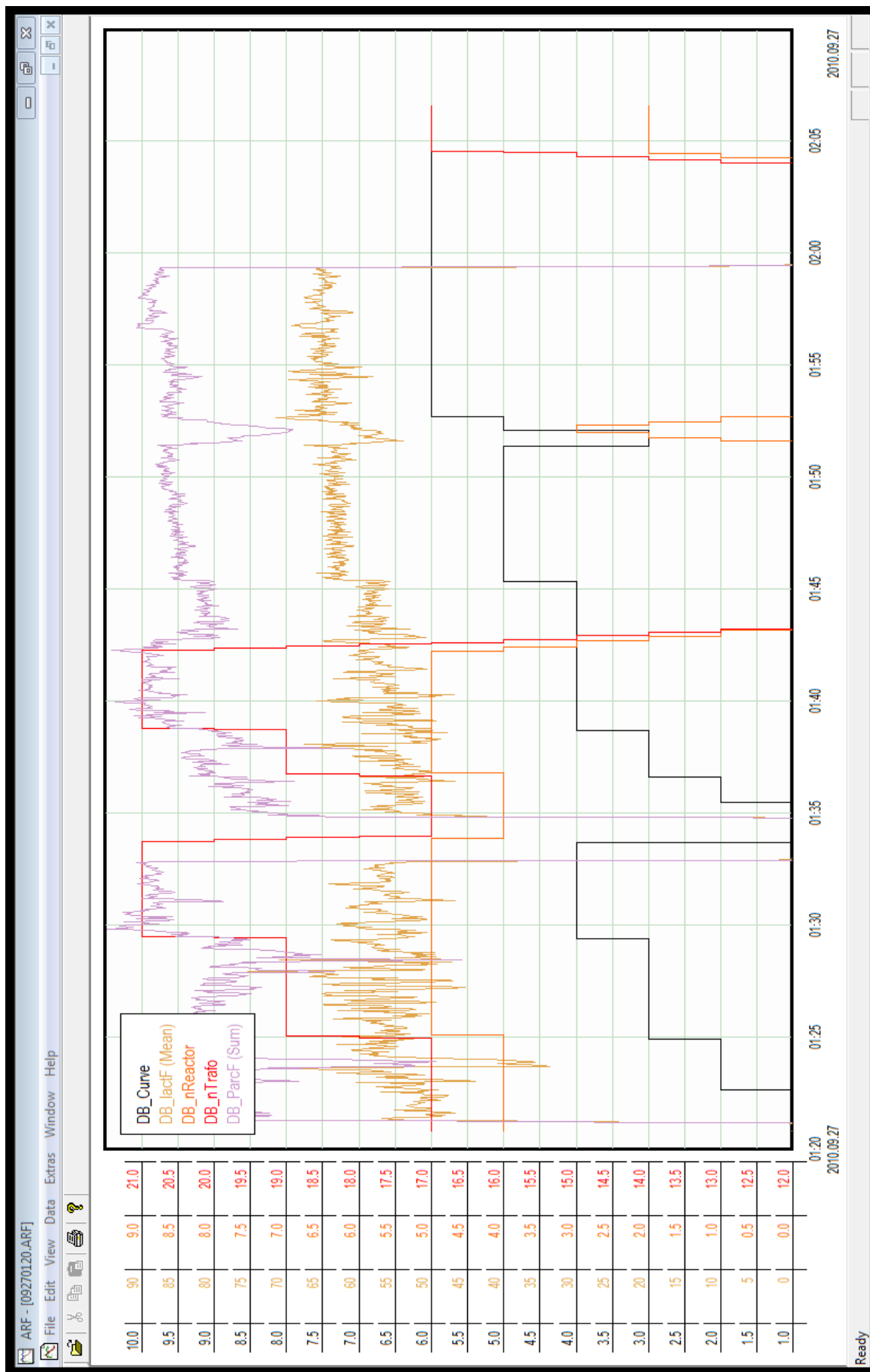


Рисунок 4.2 – Интерфейс программы ARF

(на рисунку зображено сумарну потужність 3-х фаз та середнє значення струму)

Таблиця 4.1 - Значення основних характеристик ДСП-180 у відносних одиницях на першій стадії

Ід*	Рд*	ΔР*	Ракт*	КИФ*	КИН*	G*	t*	КПДэл
1	0,0099	0,063	0	0,001	0,0099	0,012	0,41	0,114
0,995	0,062	0,057	0,149	0,0013	0,062	0,354	0,315	0,36
0,954	0,179	0,0507	0,26	0,0061	0,171	0,552	0,21	0,55
0,893	0,28	0,042	0,35	0,013	0,25	0,7	0,168	0,63
0,81	0,36	0,037	0,412	0,019	0,288	0,76	0,151	0,69
0,76	0,38	0,031	0,429	0,023	0,289	0,778	0,152	0,71
0,7	0,394	0,025	0,432	0,027	0,277	0,78	0,149	0,73
0,63	0,395	0,0195	0,429	0,029	0,25	0,75	0,154	0,73
0,554	0,38	0,0134	0,405	0,0309	0,21	0,7	0,171	0,75
0,344	0,277	0,0076	0,299	0,0244	0,096	0,52	0,25	0,74
0,193	0,164	0,002	0,188	0,0155	0,031	0,32	0,45	0,7
0,003	0,003	0,0001	0,004	0,0003	0,0001	0,006	1	0,616

Таблиця 4.2 – Значення основних характеристик ДСП-180 у відносних одиницях на другій стадії

Ід*	Рд*	ΔР*	Ракт*	КИФ*	КИН*	G*	t*	КПДэл
0,989	0,01	0,063	0,073	0,0001	0,01	0,019	1	0,114
0,985	0,065	0,059	0,124	0,0014	0,064	0,123	0,97	0,42
0,944	0,185	0,051	0,236	0,007	0,174	0,349	0,34	0,625
0,884	0,287	0,043	0,329	0,015	0,253	0,542	0,22	0,697
0,8	0,361	0,037	0,398	0,022	0,29	0,684	0,175	0,725
0,75	0,39	0,032	0,422	0,026	0,293	0,739	0,162	0,739
0,69	0,409	0,022	0,432	0,031	0,284	0,775	0,154	0,759
0,63	0,41	0,019	0,431	0,034	0,257	0,777	0,154	0,763
0,55	0,39	0,015	0,405	0,035	0,214	0,738	0,162	0,771
0,34	0,28	0,008	0,291	0,028	0,096	0,535	0,224	0,778
0,19	0,168	0,002	0,171	0,018	0,032	0,319	0,376	0,88
0,003	0,003	0,0001	0,003	0,0003	0,0001	0,006	1	0,799

Таблиця 4.3 – Значення основних характеристик ДСП-180 у відносних одиницях на третій стадії

Ід*	Рд*	ΔР*	Ракт*	КИФ*	КИН*	G*	t*	КПДэл
0,968	0,007	0,064	0,071	0,0001	0,007	0,014	1	0,08
0,923	0,178	0,056	0,234	0,0039	0,165	0,349	0,344	0,629
0,865	0,278	0,049	0,327	0,01	0,241	0,544	0,22	0,703
0,784	0,354	0,041	0,396	0,018	0,278	0,694	0,173	0,742
0,741	0,378	0,036	0,414	0,022	0,28	0,74	0,162	0,755
0,682	0,398	0,031	0,429	0,026	0,272	0,779	0,154	0,767
0,63	0,404	0,026	0,43	0,029	0,255	0,791	0,151	0,777
0,559	0,396	0,02	0,416	0,032	0,221	0,775	0,154	0,786
0,478	0,371	0,015	0,387	0,0324	0,177	0,726	0,165	0,794
0,387	0,323	0,008	0,331	0,305	0,125	0,633	0,189	0,808
0,268	0,242	0,002	0,245	0,0247	0,065	0,475	0,252	0,819
0,0054	0,013	0,0001	0,013	0,0014	0,0001	0,026	1	0,828

Таблиця 4.4 –Значення основних характеристик ДСП-180 у відносних одиницях на четвертій стадії

Ід*	Рд*	ΔР*	Ракт*	КИФ*	КИН*	G*	t*	КПДэл
0,982	0,008	0,059	0,067	0,0001	0,008	0,0165	1	0,1
0,938	0,172	0,053	0,226	0,0039	0,162	0,367	0,327	0,69
0,876	0,271	0,047	0,318	0,01	0,238	0,577	0,208	0,77
0,798	0,346	0,038	0,384	0,018	0,276	0,736	0,163	0,81
0,751	0,372	0,035	0,407	0,023	0,28	0,792	0,151	0,82
0,699	0,389	0,03	0,419	0,027	0,272	0,828	0,145	0,83
0,641	0,396	0,025	0,422	0,03	0,254	0,844	0,142	0,85
0,574	0,39	0,02	0,411	0,033	0,224	0,832	0,144	0,86
0,499	0,37	0,015	0,386	0,034	0,185	0,788	0,152	0,865
0,411	0,33	0,01	0,341	0,033	0,136	0,703	0,156	0,87
0,304	0,265	0,005	0,271	0,028	0,081	0,564	0,213	0,88
0,02	0,019	0,0001	0,019	0,002	0,0005	0,04	1	0,9

Таблиця 4.5 – Значення основних характеристик ДСП-180 у відносних одиницях на п'ятій стадії

Ід*	Рд*	ΔР*	Ракт*	КЗФ*	КІН*	G*	t*	ККДэл
0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	1	0,667
0,17	0,156	0,002	0,158	0,017	0,027	0,295	0,405	0,772
0,31	0,258	0,006	0,264	0,025	0,081	0,49	0,246	0,782
0,42	0,32	0,012	0,334	0,029	0,137	0,61	0,196	0,772
0,51	0,36	0,017	0,377	0,03	0,185	0,681	0,176	0,763
0,59	0,375	0,023	0,397	0,028	0,222	0,709	0,169	0,754
0,66	0,373	0,028	0,402	0,026	0,247	0,7	0,17	0,744
0,72	0,362	0,033	0,395	0,022	0,261	0,685	0,175	0,732
0,77	0,339	0,039	0,378	0,018	0,263	0,642	0,186	0,718
0,86	0,273	0,048	0,32	0,01	0,235	0,517	0,232	0,68
0,93	0,175	0,056	0,23	0,004	0,163	0,332	0,361	0,606
0,98	0,012	0,062	0,075	0,001	0,012	0,023	1	0,131

Таблиця 4.6 – Значення основних характеристик ДСП-180 у відносних одиницях на шостій стадії

Ід*	Рд*	ΔР*	Ракт*	КЗФ*	КІН*	G*	t*	ККДэл
0	0	0,0001	0	0	0	0	1	0,79
0,157	0,144	0,001	0,145	0,015	0,023	0,272	0,441	0,792
0,303	0,257	0,006	0,263	0,025	0,078	0,487	0,247	0,782
0,413	0,324	0,11	0,335	0,029	0,134	0,614	0,196	0,773
0,505	0,363	0,017	0,38	0,03	0,183	0,688	0,175	0,765
0,584	0,382	0,022	0,404	0,029	0,223	0,723	0,166	0,756
0,653	0,384	0,027	0,412	0,026	0,251	0,727	0,165	0,747
0,714	0,374	0,033	0,407	0,023	0,266	0,707	0,17	0,735
0,768	0,352	0,038	0,39	0,019	0,27	0,665	0,18	0,721
0,858	0,281	0,048	0,328	0,011	0,241	0,531	0,226	0,684
0,929	0,182	0,056	0,238	0,004	0,169	0,344	0,348	0,612
0,982	0,01	0,062	0,073	0,00008	0,01	0,02	1	0,115

Таблиця 4.7 – Значення основних характеристик ДСП-180 у відносних одиницях на сьомій стадії

Ід*	Рд*	ΔР*	Ракт*	КЗФ*	КІН*	G*	t*	ККДэл
0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0005	0,0001	1	0,788
0,263	0,231	0,004	0,236	0,023	0,061	0,452	0,265	0,812
0,378	0,309	0,009	0,318	0,028	0,117	0,605	0,198	0,804
0,473	0,357	0,014	0,371	0,03	0,169	0,699	0,171	0,796
0,554	0,382	0,019	0,401	0,029	0,211	0,749	0,16	0,788
0,624	0,392	0,025	0,416	0,027	0,244	0,768	0,156	0,779
0,684	0,387	0,03	0,417	0,024	0,265	0,758	0,158	0,769
0,74	0,373	0,035	0,407	0,021	0,276	0,729	0,165	0,757
0,789	0,347	0,039	0,387	0,017	0,274	0,679	0,176	0,743
0,871	0,274	0,048	0,322	0,009	0,238	0,535	0,224	0,703
0,934	0,176	0,055	0,231	0,0037	0,164	0,345	0,348	0,63
0,98	0,007	0,061	0,068	0,0004	0,007	0,014	1	0,087

Таблиця 4.8 – Значення основних характеристик ДСП-180 у відносних одиницях на восьмій стадії

Ід*	Рд*	ΔР*	Ракт*	КЗФ*	КІН*	G*	t*	ККДэл
0,019	0,019	0,001	0,019	0,002	0,0001	0,04	1	0,899
0,304	0,265	0,006	0,271	0,026	0,081	0,565	0,213	0,881
0,411	0,331	0,011	0,341	0,029	0,136	0,703	0,156	0,872
0,499	0,371	0,015	0,386	0,031	0,185	0,789	0,152	0,863
0,574	0,391	0,019	0,411	0,03	0,225	0,832	0,144	0,856
0,641	0,397	0,025	0,421	0,027	0,254	0,844	0,142	0,846
0,698	0,389	0,031	0,419	0,024	0,272	0,828	0,145	0,835
0,751	0,372	0,035	0,406	0,021	0,279	0,791	0,152	0,823
0,798	0,346	0,039	0,385	0,0169	0,276	0,736	0,163	0,809
0,876	0,271	0,047	0,318	0,0095	0,238	0,577	0,208	0,766
0,938	0,174	0,054	0,228	0,0037	0,163	0,371	0,323	0,687
0,982	0,008	0,059	0,067	0,0005	0,008	0,016	1	0,104

Таблиця 4.9 – Значення основних характеристик ДСП-180 у відносних одиницях на дев'ятій стадії

Ід*	Рд*	ΔР*	Ракт*	КЗФ*	КЗН*	G*	t*	ККДэл
0	0	0,0001	0,001	0,001	0,005	0,01	1	0,88
0,202	0,202	0,004	0,206	0,017	0,041	0,429	0,28	0,882
0,345	0,292	0,012	0,304	0,022	0,101	0,621	0,193	0,864
0,46	0,344	0,021	0,365	0,024	0,158	0,731	0,164	0,847
0,555	0,369	0,031	0,4	0,023	0,205	0,785	0,153	0,83
0,636	0,374	0,041	0,415	0,021	0,238	0,795	0,151	0,811
0,707	0,362	0,05	0,412	0,018	0,256	0,769	0,156	0,789
0,823	0,307	0,068	0,375	0,011	0,253	0,653	0,184	0,736
0,911	0,203	0,084	0,287	0,004	0,185	0,432	0,278	0,637
0,976	0,005	0,096	0,102	0,0003	0,005	0,012	1	0,049

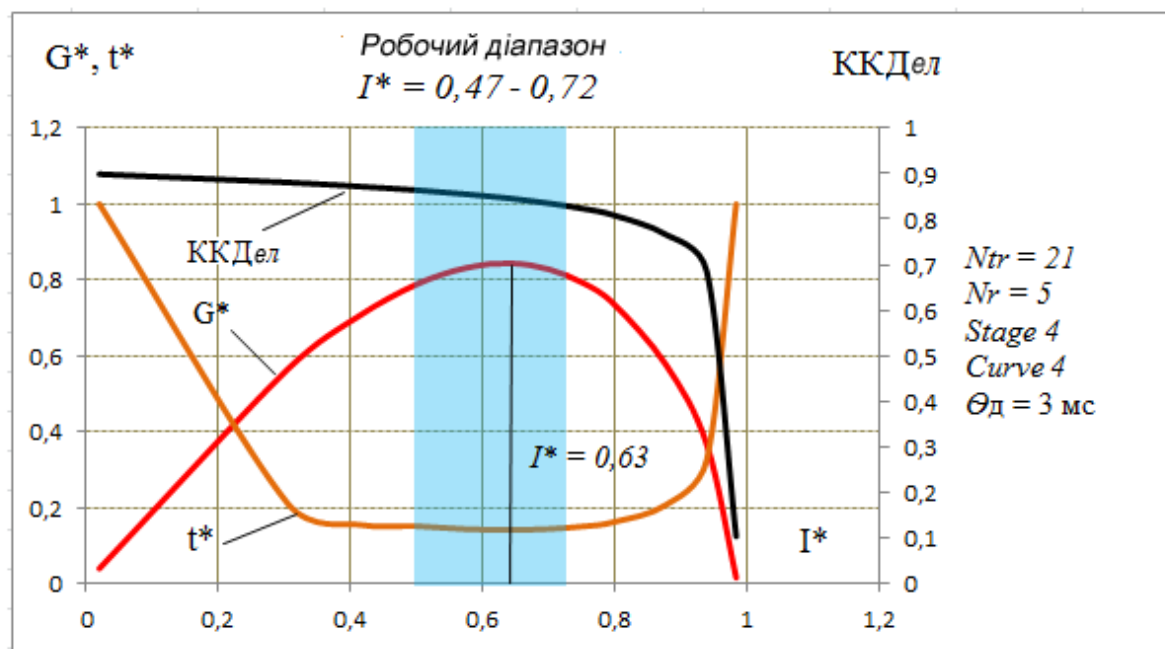
Таблиця 4.9 – Значення основних характеристик ДСП-180 у відносних одиницях на десятій стадії

Ід*	Рд*	ΔР*	Ракт*	КЗФ*	КІН*	G*	t*	ККДэл
0	0,001	0,001	0,001	0,0001	0,005	0,01	1	0,88
0,202	0,201	0,004	0,206	0,16	0,04	0,47	0,255	0,967
0,345	0,292	0,01	0,304	0,022	0,1	0,682	0,17	0,947
0,46	0,343	0,021	0,365	0,024	0,158	0,802	0,149	0,929
0,0554	0,369	0,031	0,4	0,023	0,205	0,861	0,139	0,91
0,635	0,373	0,04	0,414	0,02	0,237	0,872	0,137	0,889
0,707	0,361	0,05	0,412	0,018	0,255	0,844	0,142	0,866
0,823	0,306	0,068	0,375	0,01	0,252	0,716	0,167	0,807
0,911	0,203	0,083	0,287	0,004	0,185	0,474	0,252	0,698
0,976	0,005	0,096	0,102	0,0003	0,005	0,012	1	0,053

Таблиця 4.10 – Значення основних характеристик ДСП-180 у відносних одиницях на одинадцятій стадії

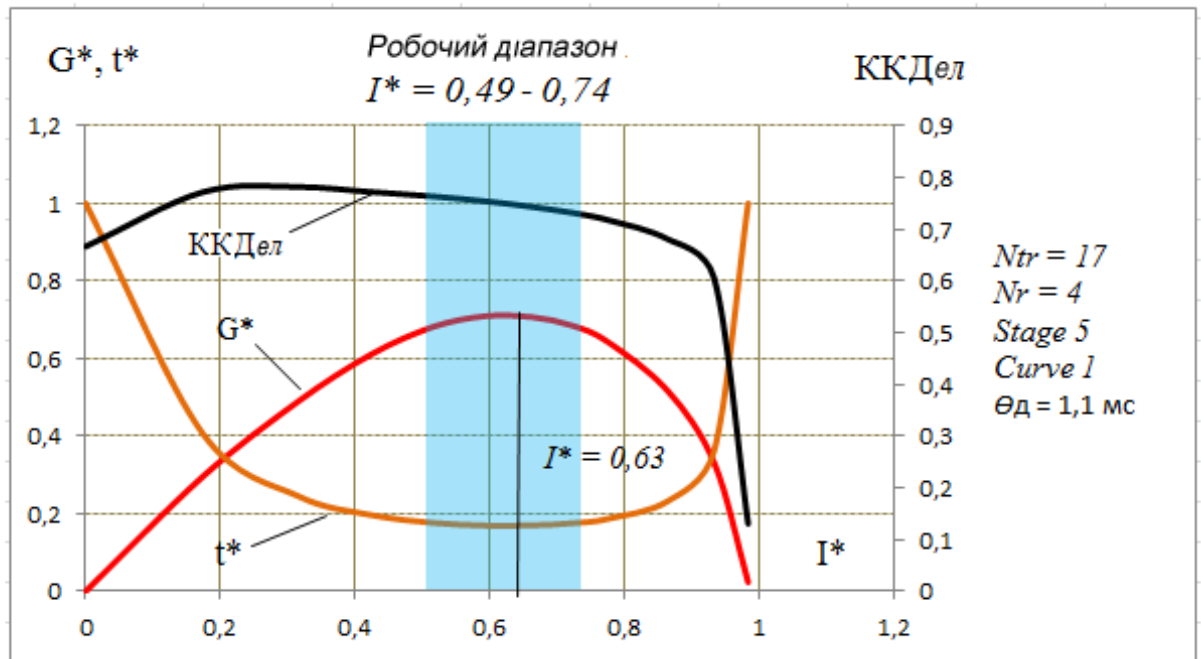
I_d^*	P_d^*	ΔP^*	$P_{акт}^*$	$KЗФ^*$	K_{IH}^*	G^*	t^*	$ККД_{эл}$
0,001	0,001	0,0001	0,0001	0,001	0,005	0,01	1	0,88
0,202	0,184	0,004	0,189	0,015	0,037	0,431	0,278	0,966
0,345	0,292	0,012	0,304	0,022	0,101	0,682	0,17	0,948
0,46	0,344	0,021	0,365	0,024	0,158	0,803	0,149	0,929
0,554	0,369	0,031	0,4	0,023	0,205	0,861	0,139	0,91
0,635	0,373	0,041	0,414	0,021	0,238	0,873	0,137	0,889
0,707	0,362	0,05	0,412	0,018	0,256	0,844	0,142	0,866
0,823	0,31	0,068	0,375	0,011	0,253	0,716	0,167	0,807
0,911	0,203	0,084	0,287	0,004	0,185	0,474	0,253	0,699
0,976	0,005	0,096	0,102	0,00001	0,005	0,0128	1	0,053

а)



б)

Рисунок 4.3 - Основні характеристики ДСП-180 на четвертій стадії плавки № 1: а) електричні та технологічні; б) робочі



б)

Рисунок 4.4 - Основні характеристики ДСП-180 на п'ятій стадії плавки № 1:

а) електричні та технологічні; б) робочі

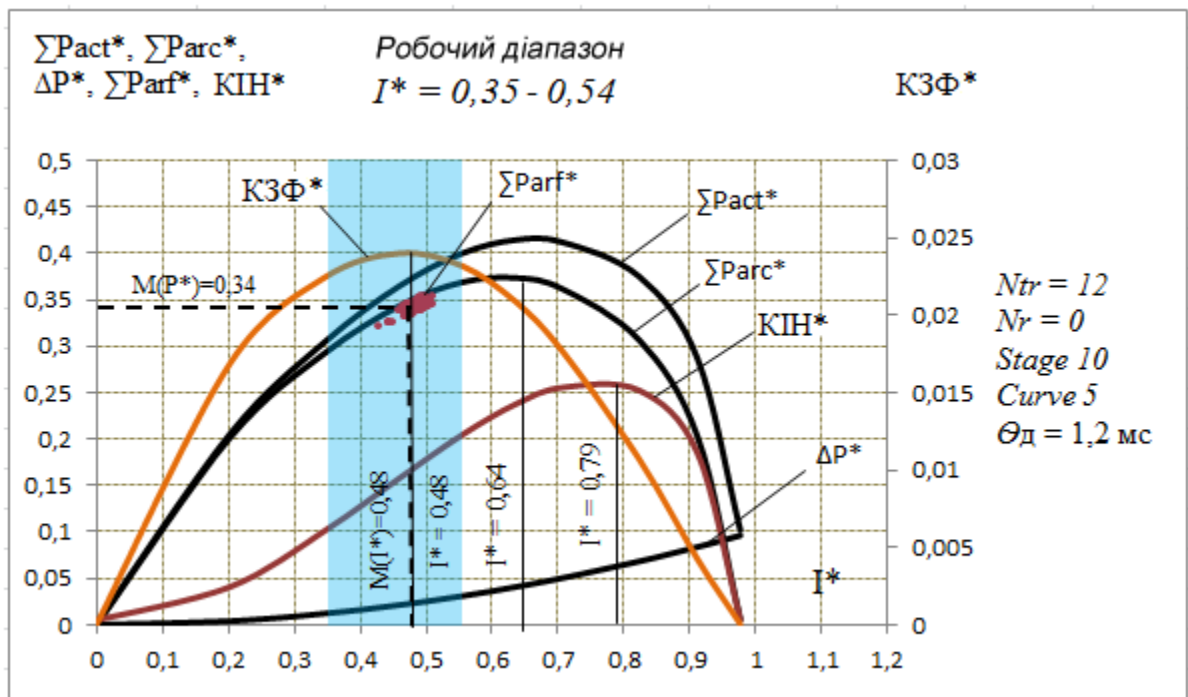


Рисунок 4.5 - Основні характеристики ДСП-180 на десятій стадії плавки № 1:

а) електричні та технологічні; б) робочі

Висновки

Для більш детального аналізу необхідно визначити робочий діапазон ДСП. Початком робочого діапазону буде перехід дуги від переривчастого режиму горіння до безперервного режиму. Кінцевим значенням буде допустиме значення струму ДСП, на досліджуваному об'єкті воно дорівнює 70 кА, перевищення якого викликає спрацювання релейного захисту. Електрична дуга горить безперервно при досягненні струмом значення 45 кА.

- 45 кА – нижня межа по струму дуги;

- 70 кА – верхня межа по струму дуги.

Знаючи діапазон роботи ДСП необхідно зробити вибір робочої точки. Для цього потрібно додатково розрахувати робочі та технологічні характеристики.

Таким чином, після побудови графічних залежностей, наведених на малюнках вище можна зробити висновок про необхідність оптимізації електричних режимів.

Так, наприклад, сучасні положення ведення плавки металу в дугових сталеливаних печах свідчать: в момент запалювання дуг потрібно підтримувати максимум потужності дуги, під час утворення колодязів - максимум коефіцієнта зносу футеровки КЗФ, наприкінці плавки - максимум коефіцієнта інтенсивності нагріву КІН. Слід відзначити наступне: найбільш стійкий і симетричний режим горіння дуг спостерігається наприкінці плавки.

У розглянутій плавці, дані положення не підтримуються. На першій стадії (рисунок 4.14) значення струму у відносних одиницях відповідає близькій до максимального значення КЗФ. На цій стадії запалюються електричні дуги і починають проплавлятися колодязі, тому для зменшення часу плавки доцільно підтримувати максимальне значення потужності дуги. Негативним моментом при цьому є збільшення втрат потужності.

На другій стадії (рисунок 4.15) утворюються і починають розмиватися колодязі, тому тут важливо використовувати тепло, що випромінюється електричною дугою не тільки в місці контакту з металом, але й уздовж її

стовбура, а це можливо при підтримці максимального значення коефіцієнта зносу футеровки КЗФ. Такий захід дозволяє підвищити ККД печі і знизити джоулеві втрати.

На третій стадії, як і на другій, слід підтримувати максимальне значення КЗФ з тих же міркувань.

На четвертій стадії, також як і на двох попередніх, слід підтримувати максимум КЗФ, т.я. тут розмиваються колодязі і збільшується кількість рідкого металу у ванні.

Для плавок 4-8 слід підтримувати максимальне значення коефіцієнта зносу футеровки КЗФ. Такий захід дозволяє підвищити ККД печі і знизити джоулеві втрати. Щодо стадій 9-11 то струми відповідають оптимальним значенням, тому аналізу щодо оптимізації немає.

Проаналізувавши вищенаведені залежності, робимо висновок, що електричні режими дугової сталеливарної печі не оптимальні. Оптимізацію електричних режимів можна зробити шляхом зміни повних опорів фаз. Зміна імпедансу дозволяє регулювати струм дуги і, тим самим, переміщати "хмарку" емпіричних значень в межах робочого діапазону, досягаючи необхідного результату. Але впровадження нового режиму потребує додаткових капітальних вкладень, які будуть розраховані у розділі №6.

У наступних розділах за допомогою математичної моделі, регулюючої імпеданс, будуть побудовані нові характеристики печі і проведено економічний ефект. Регулювання імпедансу полягає в наступному: фіксуються миттєві значення напруги і струму, далі по них обчислюється повний опір фаз (імпеданс).

Отримане число буде порівнюватися зі значеннями, що знаходяться в карті пам'яті автоматичної системи управління переміщенням електродів ARCOS – NT, яку планується встановити разом з програмним забезпеченням. А різниця між величинами усувається шляхом переміщення електродів до заданої відстані.

5. ОПТИМІЗАЦІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ РЕЖИМІВ ДСП ЗА РАХУНОК ПЕРЕМІЩЕННЯ РОБОЧОЇ ТОЧКИ

Оптимізацію електричних режимів зробимо на плавках, які детально розглянуті у розділах раніше. Для цього, як уже говорилося, потрібно підтримувати максимальні або близькі до них значення (робочі точки) КЗФ, потужності дуги і КІН в різні періоди плавки.

Як відомо, електрична дуга - це чисто активна потужність, а, отже, струм дуги також носить лише активний характер. Процес розплавлення металу, споживання енергії з мережі і переміщення електродів був представлений у вигляді математичної моделі програмного пакета MATLAB. За допомогою моделі фіксується падіння напруги в короткій мережі і безпосередньо на дузі, а також струм дуги. Далі розраховується повний опір ділянки контуру (коротка мережа - дуга), виділяється активна складова, яку можна змінювати при зміні напруги на даній ділянці. Напруга прямо пропорційно довжині дуги, тому зменшуючи відстань між електродами і металом, зменшується і довжина дуги.

Таким чином, переміщення робочої точки можливо при зміні відстані між електродами і металом. Даний процес повністю автоматизований, у системі управління електродами ARCOS – NT, яку необхідно впровадити для зниження витрат на виплавку сталі. У цій системі міститься матриця уставок опорів, кожне з яких відповідає певній стадії (сталість ступенів трансформатора, ступені реактора і робочої кривої) розплавлення металу. При порівнянні опору протягом плавки з опором матриці уставок різниця компенсується шляхом зміни довжини дуги і як наслідок напруги. У підсумку робоча точка встановлюється на заданому значенні струму дуги. Шляхом зміни імпедансу (повного опору фаз) прагнуть таких значень струму, при яких спостерігається найбільш оптимальне плавлення.

З аналізу рис. 4.14 слідує, що положення робочої точки при струмі 0,56 в.о. та опорі 11,1 мОм не відповідає максимуму потужності дуги, тому

змінюючи значення активного опору на 8,8 мОм отримаємо оптимальне значення струму - 0,64 в.о.

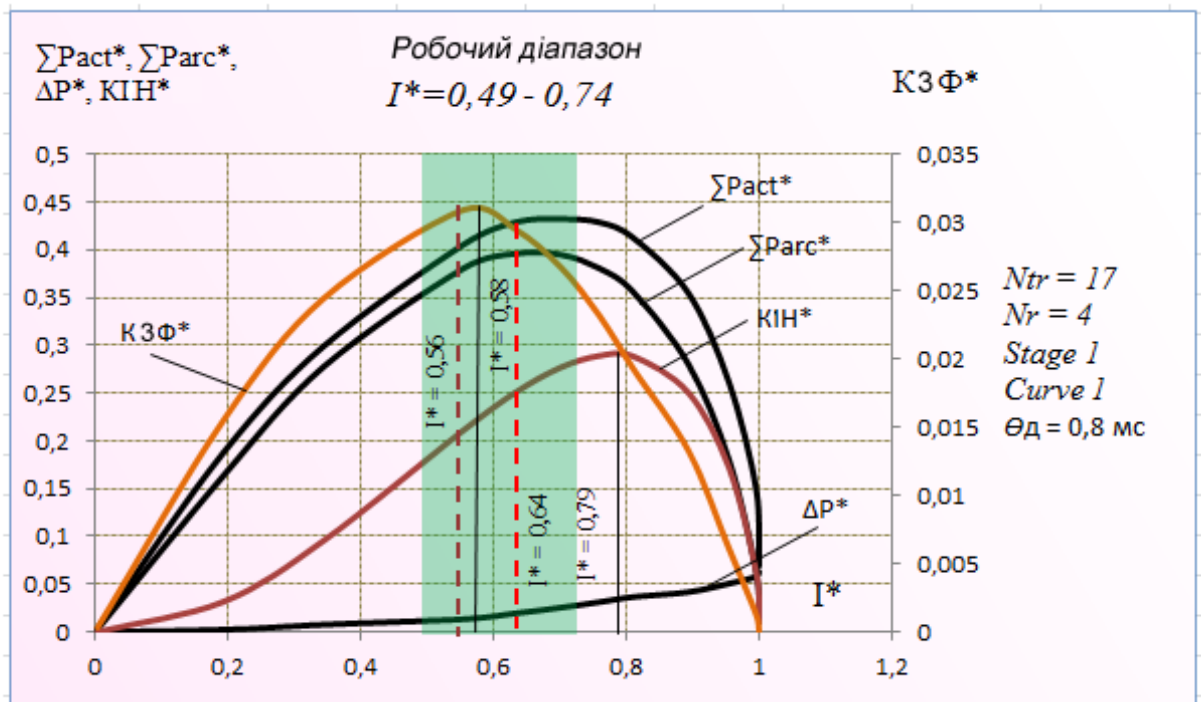
У таблиці 5.1 наводяться значення струмів і активних опорів до і після оптимізації.

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

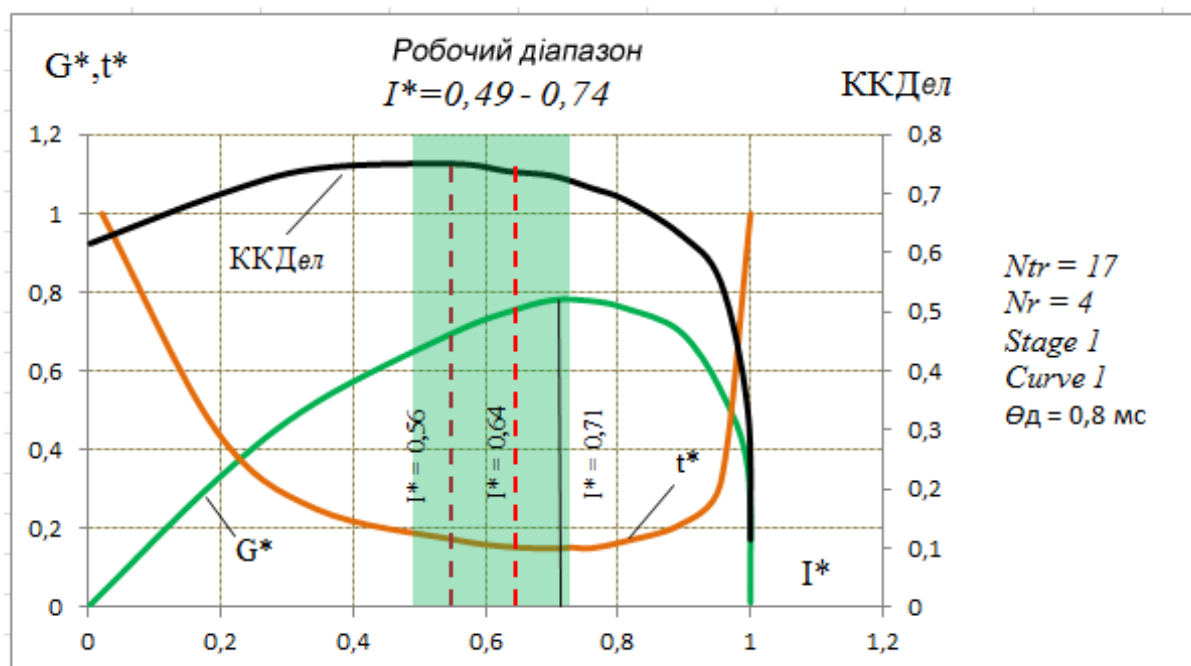
Параметри стадії	Параметри електричного режиму			
	До оптимізації		Після оптимізації	
	Активний опір R, мОм	Математичне сподівання струму I, о.е.	Активний опір R, мОм	Математичне сподівання струму I, о.е.
N _{ст} =1 n _{рк} =1 n _{тр} =17 n _р =4	11,1	0,56	8,8	0,64
N _{ст} =2 n _{рк} =2 n _{тр} =17 n _р =4	9,8	0,6	10,8	0,57
N _{ст} =3 n _{рк} =3 n _{тр} =19 n _р =5	10,6	0,61	12,6	0,52
N _{ст} =4 n _{рк} =4 n _{тр} =21 n _р =5	10,4	0,58	10,8	0,54
N _{ст} =5 n _{рк} =1 n _{тр} =17 n _р =4	11,4	0,55	9,2	0,63
N _{ст} =6 n _{рк} =2 n _{тр} =17 n _р =4	10,8	0,57	12,6	0,51
N _{ст} =7 n _{рк} =3 n _{тр} =19 n _р =5	10,6	0,58	12,6	0,51
N _{ст} =8 n _{рк} =4 n _{тр} =21 n _р =5	10,4	0,58	12,6	0,51
N _{ст} =9 n _{рк} =4 n _{тр} =12 n _р =0	10	0,45	10	0,45
N _{ст} =10 n _{рк} =5 n _{тр} =12 n _р =0	7	0,48	7	0,48
N _{ст} =11 n _{рк} =6 n _{тр} =12 n _р =0	6,6	0,5	6,6	0,5

5.1. Електричні, технологічні та робочі характеристики до і після оптимізації

На рисунках 5.1 - 5.11 наведені електричні, технологічні та робочі характеристики з двома вертикальними прямими, що відповідають режимам до і після оптимізації для одинадцяти стадій, робочій діапазон струмів позначений зеленим або синім кольором.



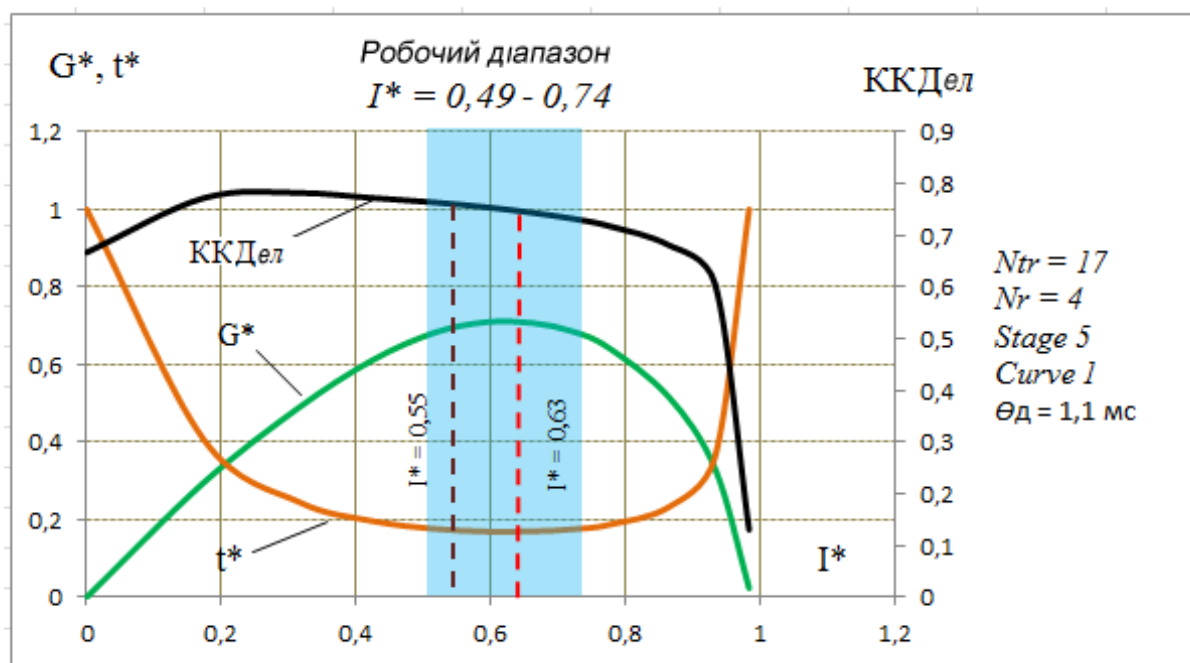
a)



б)

Рисунок 5.1 - Характеристики ДСП-180 із зазначенням робочої точки до (0,56) і після (0,64) оптимізації (1 стадія):

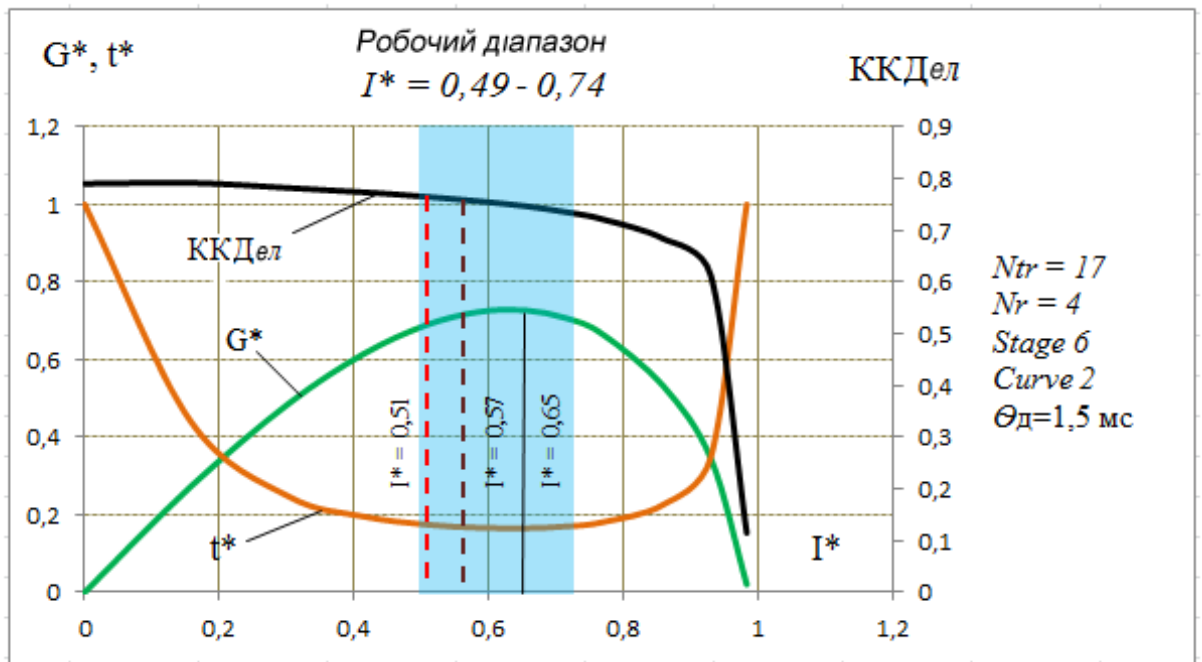
а) електричні та технологічні; б) робочі



б)

Рисунок 5.5 - Характеристики ДСП-180 із зазначенням робочої точки до (0,55) і після (0,63) оптимізації (5 стадія):

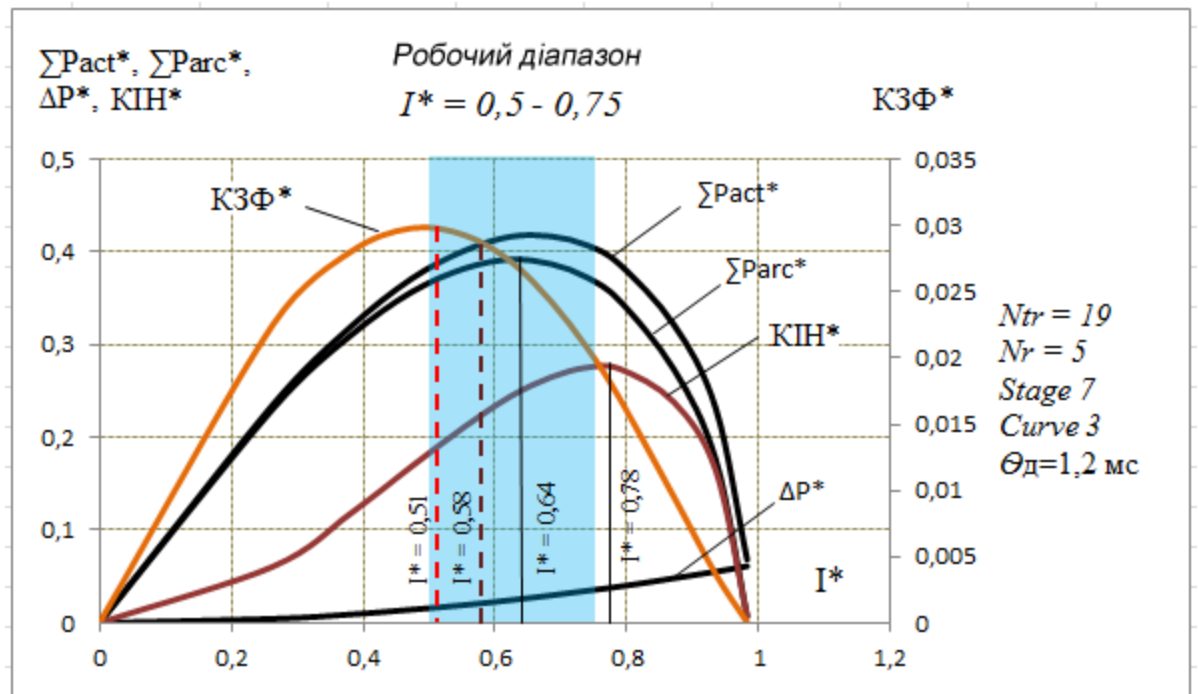
а) електричні та технологічні; б) робочі



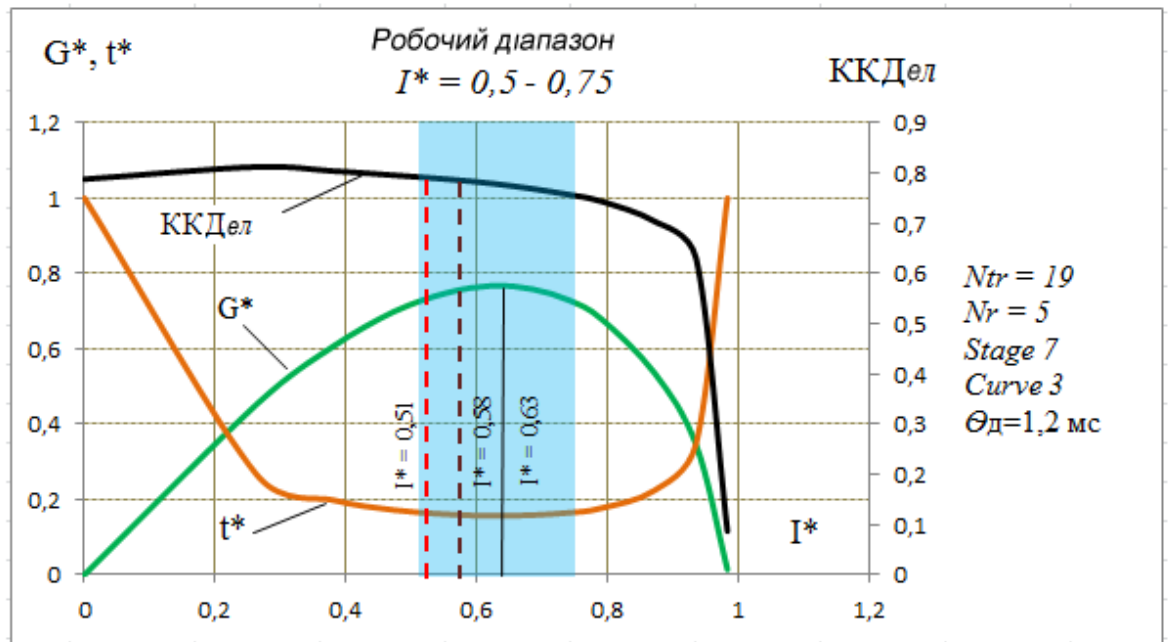
б)

Рисунок 5.6 - Характеристики ДСП-180 із зазначенням робочої точки до (0,57) і після (0,51) оптимізації (6 стадія):

а) електричні та технологічні; б) робочі



а)



б)

Рисунок 5.7 - Характеристики ДСП-180 із зазначенням робочої точки до (0,58) і після (0,51) оптимізації (7 стадія): а) електричні та технологічні; б) робочі

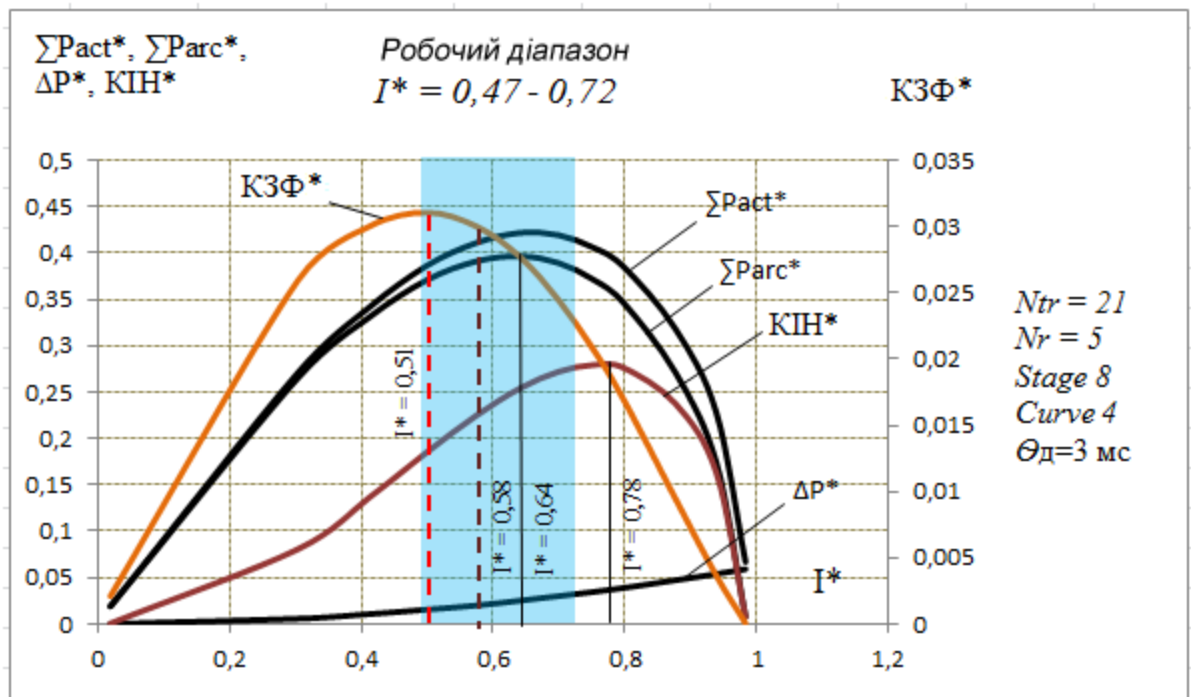


Рисунок 5.8 - Характеристики ДСП-180 із зазначенням робочої точки до (0,58) і після (0,51) оптимізації (8 стадія): електричні та технологічні;

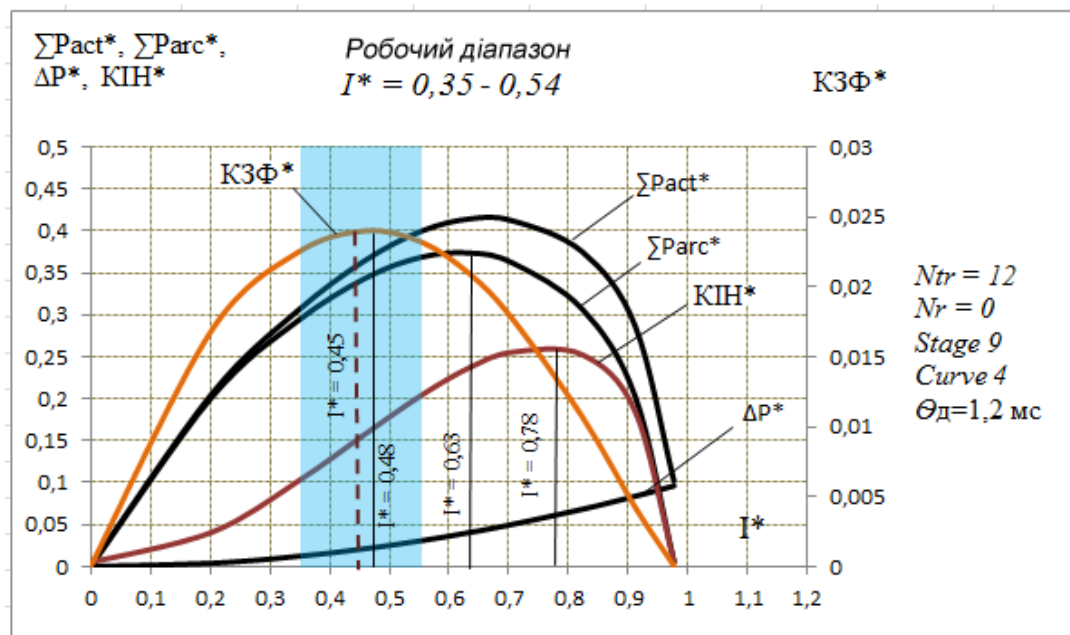


Рисунок 5.9 - Характеристики ДСП-180 із зазначенням робочої точки до і після оптимізації (9 стадія): електричні та технологічні;

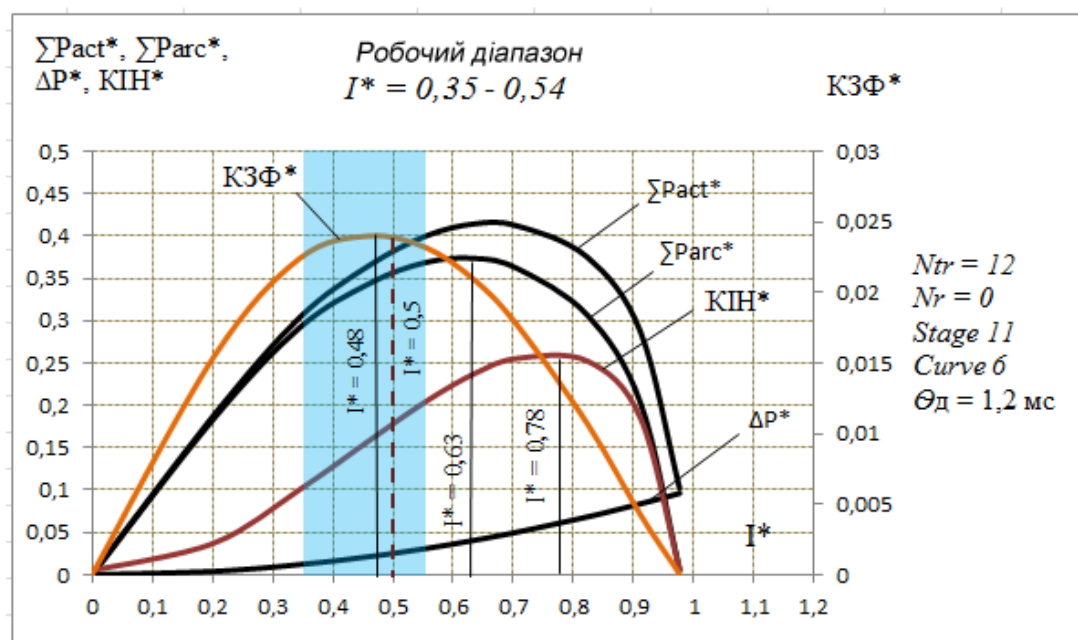


Рисунок 5.11 - Характеристики ДСП-180 із зазначенням робочої точки до і після оптимізації (11 стадія): електричні та технологічні;

На рисунку 5.1 положення робочої точки при струмі 0,56 в.о. не відповідає максимуму потужності дуги, рекомендоване значення - 0,64 в.о.

На рисунку 5.2 положення робочої точки при струмі 0,6 в.о. не відображає максимум КЗФ - рекомендоване значення - 0,57 в.о. Положення робочої точки при струмі 0,61 в.о. (малюнок 5.3) теж не досягає максимального значення КЗФ - рекомендоване значення - 0,52 в.о. На рисунку 5.4 приведена четверта стадія, де також слід підтримувати максимальне значення КЗФ ($I^* = 0,5$ в.о.), але наблизитися до цього максимуму не вдається тому, що максимальне значення імпедансу відповідає струму в 0,54 в.о., якого і необхідно дотримуватися.

На рисунку 5.5 положення робочої точки ($I^* = 0,55$) потрібно змістити до струму, при якому досягається максимум потужності дуги ($I^* = 0,63$), тому що на даній стадії запалюються дуги і, отже, необхідно забезпечити їх стійкий режим горіння. Розташування робочої точки (рисунок 5.6) потрібно змістити з струму 0,57 в.о. до струму, який дорівнює 0,51 в.о. (у цьому випадку досягається максимум КЗФ). Завдяки цьому переміщенню збільшується ККД дуги, і зменшуються втрати на нагрів проводів.

Рисунок 5.7: також як і на шостій стадії слід підтримувати максимальне значення КЗФ. На восьмій стадії, як і на двох попередніх, теж слід підтримувати максимум КЗФ з тих же міркувань (рисунок 5.8). На рисунках 5.9 - 5.11 рекомендацій щодо оптимізації дано не було, струм відповідає максимуму КЗФ.

5.2. Розрахунок споживання електроенергії ДСП-180 до і після оптимізації

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

$$W_i = P_{актi} * t_i, \quad (5.1)$$

де W_i – кількість електроенергії, спожите піччю на конкретній стадії, кВт*год;

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

t_i – тривалість стадії, год.

Для визначення кількості розплавленого металу необхідно визначити час розплавлення однієї тонни сталі. Воно визначається за формулою 5.2:

$$T_i = 1/G_i, \quad (5.2)$$

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

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

Кількість розплавленого металу на певній стадії можна визначити за формулою 5.3:

$$m = k_{об} * t_i / T_i, \quad (5.3)$$

де t_i – тривалість стадії, год;

T_i – час розплавлення тонни сталі, год/т;

$k_{об}$ – узагальнений коефіцієнт, що враховує тепло від паливно-кисневих пальників, тепло хімічних реакцій, тепло "болота". Приблизно дорівнює 1,57. Розрахунки проводяться за вихідними даними до проекту [20].

1. Розрахунок електроспоживання до оптимізації.

Перша стадія

Час плавки – $t_1 = 110с = 0,03$ год;

Ракт1 = 82900 кВт, $G_1 = 182$ т/год, $T_1 = 0,0055$ год/т;

$W_1 = 82900 * 0,03 = 2487$ кВт*год, $m_1 = 1,57 * 0,03 / 0,0055 = 8,563$ т.

Друга стадія

Час плавки – $t_2 = 129с = 0,0358$ год;

Ракт2 = 84420 кВт, $G_2 = 190$ т/год, $T_2 = 0,00526$ год/т;

$W_2 = 84420 * 0,0358 = 3022,236$ кВт*год, $m_2 = 1,57 * 0,0358 / 0,00526 = 10,685$ т.

Третя стадія

Час плавки – $t_3 = 258с = 0,0716$ год;

Ракт3 = 85984 кВт, $G_3 = 190$ т/год, $T_3 = 0,00524$ год/т;

$W_3 = 85984 * 0,0716 = 6156,48$ кВт*год, $m_3 = 1,57 * 0,0716 / 0,00524 = 21,45$ т.

Четверта стадія

Час плавки – $t_4 = 249с = 0,069167$ год;

Ракт4 = 93790 кВт, $G_4 = 208,75$ т/год, $T_4 = 0,00479$ год/т;

$W_4 = 93790 * 0,069167 = 6487,17$ кВт*год, $m_4 = 1,57 * 0,069167 / 0,00479 = 22,67$ т.

П'ята стадія

Час плавки – $t_5 = 42\text{с} = 0,0116 \text{ год}$;

$\text{Ракт}_5 = 77988 \text{ кВт}$, $G_5 = 175 \text{ т/год}$, $T_5 = 0,0057 \text{ год/т}$;

$W_5 = 77988 * 0,0116 = 904,66 \text{ кВт*год}$, $m_5 = 1,57 * 0,0116 / 0,0057 = 3,195 \text{ т}$.

Шоста стадія

Час плавки – $t_6 = 70\text{с} = 0,019 \text{ год}$;

$\text{Ракт}_6 = 82090 \text{ кВт}$, $G_6 = 185 \text{ т/год}$, $T_6 = 0,0054 \text{ год/т}$;

$W_6 = 82090 * 0,019 = 1559,76 \text{ кВт*год}$, $m_6 = 1,57 * 0,019 / 0,0054 = 5,524 \text{ т}$.

Сьома стадія

Час плавки – $t_7 = 110\text{с} = 0,03 \text{ год}$;

$\text{Ракт}_7 = 86700 \text{ кВт}$, $G_7 = 193 \text{ т/год}$, $T_7 = 0,00517 \text{ год/т}$;

$W_7 = 86700 * 0,03 = 2601,04 \text{ кВт*год}$, $m_7 = 1,57 * 0,03 / 0,00517 = 9,11 \text{ т}$.

Восьма стадія

Час плавки – $t_8 = 201\text{с} = 0,055 \text{ год}$;

$\text{Ракт}_8 = 94466,4 \text{ кВт}$, $G_8 = 211 \text{ т/год}$, $T_8 = 0,00473 \text{ год/т}$;

$W_8 = 94466,4 * 0,055 = 5195,65 \text{ кВт*год}$, $m_8 = 1,57 * 0,055 / 0,00473 = 18,256 \text{ т}$.

Дев'ята стадія

Час плавки – $t_9 = 124\text{с} = 0,034 \text{ год}$;

$\text{Ракт}_9 = 90330,3 \text{ кВт}$, $G_9 = 192 \text{ т/год}$, $T_9 = 0,0052 \text{ год/т}$;

$W_9 = 90330,3 * 0,034 = 3071,23 \text{ кВт*год}$, $m_9 = 1,57 * 0,034 / 0,0052 = 10,265 \text{ т}$.

Десята стадія

Час плавки – $t_{10} = 360\text{с} = 0,1 \text{ год}$;

$\text{Ракт}_{10} = 93000 \text{ кВт}$, $G_{10} = 178,6 \text{ т/год}$, $T_{10} = 0,0056 \text{ год/т}$;

$W_{10} = 93000 * 0,1 = 9300 \text{ кВт*год}$, $m_{10} = 1,57 * 0,1 / 0,0056 = 28,035 \text{ т}$.

Одинадцята стадія

Час плавки – $t_{11} = 530\text{с} = 0,147 \text{ год}$;

$\text{Ракт}_{11} = 94487,8 \text{ кВт}$, $G_{11} = 183 \text{ т/год}$, $T_{11} = 0,00547 \text{ год/т}$;

$W_{11} = 94487,8 * 0,147 = 13889,7 \text{ кВт*год}$, $m_{11} = 1,57 * 0,147 / 0,00547 = 42,12 \text{ т}$.

2. Розрахунок електроспоживання після оптимізації.

Перша стадія

Час плавки – $t_{1/} = 110\text{с} = 0,03 \text{ год}$;

$\text{Ракт}_{1/} = 86580 \text{ кВт}$, $G_{1/} = 228 \text{ т/год}$, $T_{1/} = 0,00438 \text{ год/т}$;

$W_{1/} = 86580 * 0,03 = 2597,4 \text{ кВт*год}$, $m_{1/} = 1,57 * 0,03 / 0,00438 = 10,75 \text{ т}$.

Друга стадія

Час плавки – $t_{2/} = 129\text{с} = 0,0358 \text{ год}$;

$\text{Ракт}_{2/} = 82611 \text{ кВт}$, $G_{2/} = 189 \text{ т/год}$, $T_{2/} = 0,0053 \text{ год/т}$;

$W_{2/} = 82611 * 0,0358 = 2957,47 \text{ кВт*год}$, $m_{2/} = 1,57 * 0,0358 / 0,0053 = 10,6 \text{ т}$.

Третя стадія

Час плавки – $t_{3/} = 258\text{с} = 0,0716 \text{ год}$;

$\text{Ракт}_{3/} = 83818 \text{ кВт}$, $G_{3/} = 190 \text{ т/год}$, $T_{3/} = 0,00526 \text{ год/т}$;

$$W3/ = 83818 \cdot 0,0716 = 6001,387 \text{ кВт*год}, m3/ = 1,57 \cdot 0,0716 / 0,00526 = 21,35 \text{ т.}$$

Четверта стадія

$$\text{Час плавки} - t4/ = 249 \text{ с} = 0,069167 \text{ год};$$

$$\text{Ракт}4/ = 91078 \text{ кВт}, G4/ = 206 \text{ т/год}, T4/ = 0,00486 \text{ год/т};$$

$$W4/ = 91078 \cdot 0,069167 = 6299,6 \text{ кВт*год}, m4/ = 1,57 \cdot 0,069167 / 0,00486 = 22,34 \text{ т.}$$

П'ята стадія

$$\text{Час плавки} - t5/ = 42 \text{ с} = 0,0116 \text{ год};$$

$$\text{Ракт}5/ = 80801 \text{ кВт}, G5/ = 178,6 \text{ т/год}, T5/ = 0,0056 \text{ год/т};$$

$$W5/ = 80801 \cdot 0,0116 = 937,3 \text{ кВт*год}, m5/ = 1,57 \cdot 0,0116 / 0,0056 = 3,23 \text{ т.}$$

Шоста стадія

$$\text{Час плавки} - t6/ = 70 \text{ с} = 0,019 \text{ год};$$

$$\text{Ракт}6/ = 76780 \text{ кВт}, G6/ = 172 \text{ т/год}, T6/ = 0,0058 \text{ год/т};$$

$$W6/ = 76780 \cdot 0,019 = 1458,8 \text{ кВт*год}, m6/ = 1,57 \cdot 0,019 / 0,0058 = 5,14 \text{ т.}$$

Сьома стадія

$$\text{Час плавки} - t7/ = 110 \text{ с} = 0,03 \text{ год};$$

$$\text{Ракт}7/ = 80704 \text{ кВт}, G7/ = 185 \text{ т/год}, T7/ = 0,00544 \text{ год/т};$$

$$W7/ = 80704 \cdot 0,03 = 2421,12 \text{ кВт*год}, m7/ = 1,57 \cdot 0,03 / 0,00544 = 8,656 \text{ т.}$$

Восьма стадія

$$\text{Час плавки} - t8/ = 201 \text{ с} = 0,055 \text{ год};$$

$$\text{Ракт}8/ = 88592 \text{ кВт}, G8/ = 202,5 \text{ т/год}, T8/ = 0,00494 \text{ год/т};$$

$$W8/ = 88592 \cdot 0,055 = 4872,56 \text{ кВт*год}, m8/ = 1,57 \cdot 0,055 / 0,00494 = 17,47 \text{ т.}$$

У таблиці 5.2 наведено дані про масу розплавленого металу і споживанні електроенергії за стадіями до і після оптимізації.

На рисунку 5.12 наведені залежності потужності дуги від часу розплавлення до оптимізації і після. На рисунку 5.13 наведено залежності спожитої електроенергії за цикл плавки від часу розплавлення металу також до і після оптимізації.

Таблиця 5.2 – Порівняння параметрів плавки ДСП-180 до і після оптимізації

№ стадії, паузи	Параметри плавки					
	До оптимізації			Після оптимізації		
	t _{ст} , с	m, т	W, кВт*год	t _{ст} , с	m, т	W, кВт*год
П1	48	0	0	48	0	0
Ст1	110	8,563	2487	110	10,75	2597,4

Ст2	129	10,685	3022,23	129	10,6	2957,47
Ст3	258	21,45	6156,48	258	21,35	6001,38
Ст4	249	22,67	6487,17	249	22,34	6299,6
П2	63	0	0	63	0	0
Ст5	42	3,195	904,66	42	3,23	937,3
Ст6	70	5,524	1559,76	70	5,14	1458,8
Ст7	110	9,11	2601,04	110	8,656	2421,12
Ст8	201	18,256	5195,65	201	17,47	4872,56
Ст9	124	10,265	3071,23	124	10,265	3035,52
Ст10	360	28,035	9300	360	28,035	9300
Ст11	530	42,12	13889,7	530	42,12	13889,7
П3	200	0	0	200	0	0
Итого	2683	180	54674,93	2683	180	53770,8

Р_{акт}, кВт*год

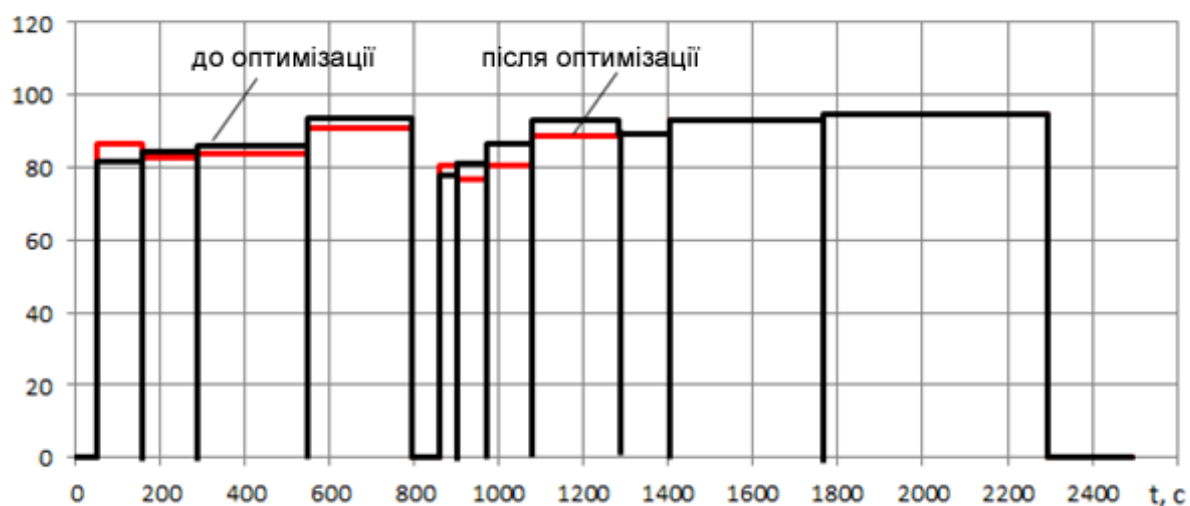


Рисунок 5.12 - Залежності потужності дуг від часу плавки

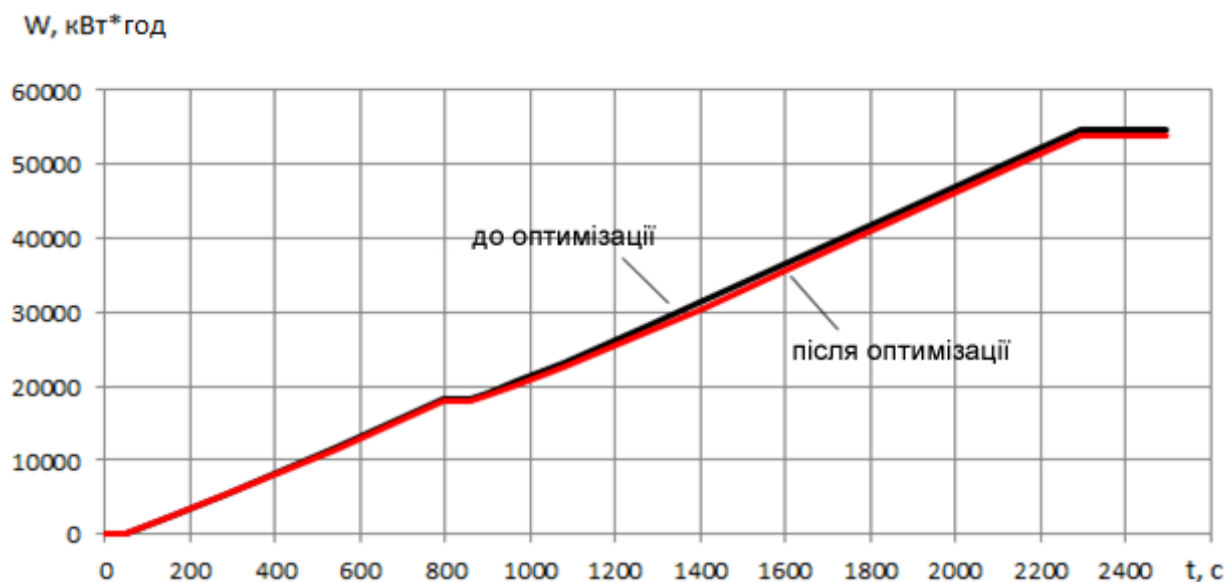


Рисунок 5.13 - Залежності споживання електроенергії за плавку від часу

Висновки

Незважаючи на те, що на трьох останніх стадіях плавки робочі точки залишилися на колишніх місцях, сумарне зниження споживання електроенергії за рахунок оптимізації на перших восьми знизилося приблизно на 1,5%. Продуктивність дугової сталеливарної печі і час циклу плавки залишилися колишніми.

Таким чином, в ході дослідів параметрів плавки ДСП та застосування емпіричних залежностей, був запропоновано новий електричний режим, що дозволяє підвищити економічну ефективність роботи ДСП.

Варто відзначити, що в даній кваліфікаційній роботі розглядається оптимізація тільки електричної складової плавки в дугової сталеливарної печі. Крім розплавлення металу дугою, в печі присутні паливно- кисневі пальники (7 штук) сумарною потужністю 24,5 МВт, які плавлять метал в так званих "мертвих зонах", між електродами. Застосування таких пальників має ряд переваг: дозволяє скоротити час плавки і знизити собівартість сталі.

Вплив паливно-кисневих пальників, плавка металу під струмом при перемиканнях ступенів трансформатора і реактора, хімічних реакцій, що відбуваються у ванні печі при продувці і вспіненні - враховувалося у вигляді узагальненого коефіцієнта $K_{об}$, рівного 1,57.

6. ВИЗНАЧЕННЯ ПИТОМОЇ ВИТРАТИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ДУГОВОЇ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЇ ПЕЧІ

Методика визначення норм питомих витрат енергії при плавленні сталі в дугових птчах повинна базуватися на матеріальних та енергетичних балансах, проведених при нормальних технологічних та організаційних умовах експлуатації печей та при досить задовільному технічному стані самої електропечі та її електрообладнання.

При складанні теплового або енергетичного балансу в прибуткову частину теоретично слід включати:

- а) електричну енергію, що потрапляє в піч;
- б) тепло, що вноситься шихтою;
- в) тепло від екзотермічних реакцій;
- г) тепло від згорання електродів.

Великого практичного значення останні три складові при роботі на твердій шихті не мають. Зазвичай на долю електроенергії припадає 85-90 % всього прибутку тепла, а тепло екзотермічних реакцій в значній мірі компенсує тепло, що необхідне для ендотермічних реакцій.

Витратна частина балансу складається з корисних витрат та покриття електричних та теплових втрат.

Корисні витрати складаються з:

- а) енергії, що поглинається завантаженим металом при розплавленні (фізичне тепло плюс теплота плавлення);
- б) енергії, що поглинається присаджуємими матеріалами при їх нагріві та розплавленні;
- в) енергії, що поглинається розплавленою ванною при подальшому нагріві при рафінуванні.

Згідно до загальноприйнятих даних теоретична кількість тепла, що необхідна для розплавлення сталевого брухту, приймається рівною 340 кВт·год/т, а шлаку 630 кВт·год/т.

Електричні втрати складаються з втрат в трансформаторному агрегаті, в короткій мережі, в електродах та в усіх контактах. При нормальній експлуатації електричний к.к.д. дорівнює 0,86-0,92, а коефіцієнт потужності – від 0,8 до 0,85.

Теплові втрати складаються з втрат тепла через футеровку печі, з відходячими газами, з охолоджуючою водою, через відкрите завантажувальне вікно та електроди.

Кількісна оцінка теплових втрат може бути виражена через потужність теплових втрат печі. Під потужністю теплових втрат розуміють потужність, що вводиться в електричну піч для компенсації втрат тепла.

При встановленні норм питомих витрат електроенергії та інших показників роботи печі слід приймати та встановлювати втрати нормальні, нормальні умови експлуатації та нормальний технічний стан печі.

При нормальному технічному стані печі на протязі всього робочого часу печі неприпустима наявність щілей та отворів у своді як між окремими цеглинами, так і між кладкою та електродами в місці вводу окремих в піч, для чого повинні бути встановлені добре діючі ущільнення.

Заслінки повинні достатньо щільно прилягати до напрямляючи та до порогу робочого вікна. Механізм підйому заслінки повинен безвідказно дозволяти залишати її у підвішеному стані в будь-якому положенні, а не примушувати відчиняти завжди на повну висоту.

Теплоізоляція бокових стін повинна відповідати проектним вимогам та бути виконана з ефективних теплоізоляційних матеріалів, якими є діатолитова цегла або порошок, зоноліт, легковажний шамот та ін..

Водоохолодження повинне бути підведене до тих частин печі, які в цьому потребують.

Електричні печі – одні з найбільших енергоємних споживачів, тому досить суттєво, щоб питомі витрати електроенергії характеризували роботу саме електропічної установки.

Витрати електроенергії повинні враховуватися індивідуально для кожної окремої електросталеплавильної печі навіть в тому випадку, коли в цеху є декілька електросталеплавильних печей. Цей індивідуальний облік енергії дуже просто здійснити, тим більше, що кожна дугова сталеплавильна піч має свій індивідуальний лічильник.

Звичайно, для показників роботи цеха, заводу, тим більше цілої галузі промисловості досить важливий кінцевий результат, тобто питомі витрати електроенергії на 1т випускаємої продукції (на 1т гідних злитків або на 1т гідного фасонного лиття). Але чим більш загальний характер має величина питомих витрат енергії, тим більшою кількістю незалежних змінних вона визначається й тим складніше оцінювати й порівнювати роботу різних електропіч них установок.

Універсальною величиною для порівняння й для оцінки роботи електропічної установки є питомі витрати електроенергії, що необхідна для 1т гідної рідкої сталі в ковші.

Саме на цьому етапі, тобто при випуску з печі в ківш гідної сталі, закінчується робота сталеварів, саме ця операція підводить підсумок роботи самої печі, характеризує ступінь технічної досконалості обладнання, кваліфікацію обслуговуючого персоналу та рівень організації виробництва на самому металургійному агрегаті.

Зазвичай відправною для всіх розрахунків є вага металеві шихти, що потрапляє в піч. Ця вага конкретно встановлюється зваженням, перевіряється та записується до журналу по кожній плавці.

В наслідок великих незручностей безпосереднє зважування ковша з рідким металом практикується вкрай рідко, переважно для експериментальної мети. Однак значення ваги рідкої сталі в ковші є дуже важливим, бо для установки саме ця величина визначає вихід гідної продукції з електропечі.

Вага рідкої сталі в ковші теоретично дорівнює вазі завантаженої в піч металевої частини шихти плюс відновлення з присадженої руди частина заліза мінус угар елементів в процесі плавки.

Для кожної марки сталі, для шихтових матеріалів, що використовуються по технологічним інструкціям та при даній технології плавки величину результуючого угару визначають по фактичному зважуванню 12-12 подібних плавок. В подальшому використовують розрахункові дані з отриманими поправочними коефіцієнтами. Якщо кожна плавка при інших рівних умовах декілька відрізняється від іншої по вазі рідкої сталі, то ці несуттєві відхилення взаємно компенсуються при достатньо великій кількості подібних плавок.

При плавленні на твердій завалці угар в електропечі складає 4-6%.

Визначення ваги рідкої сталі по об'єму ковша дає менш точні результати, в зв'язку з чим цей метод не може бути рекомендований.

Вага рідкої сталі може бути визначена, виходячи з ваги відлитих злитків, або по чорновому басоновому литтю перед обробкою, але при цьому треба враховувати ще щільність металу на центрівці, проводки, літники та ін..

В якості технічно обґрунтованої норми питомих витрат електроенергії на плавлення сталі в ДСП приймається величина, що досягається при правильному обслуговуванні електропічного обладнання, сучасному рівні організації виробничого процесу.

Плановим показником витрат електричної енергії у виробництві сталі на одиницю продукції встановленої є норма витрат електричної енергії на плавлення сталі.

Технологічна норма витрат електричної енергії на плавлення рідкого металу складається з:

- Норми витрат електричної енергії на нагрів шихти та плавлення металу, ω_{en} ;
- Норми витрат електричної енергії в технологічний період, ω_{tex} ;

- Норми витрат електричної енергії в період заправки печі, завантаження шихти та випуску металу, $\omega_{дон}$;
- Норми витрат електричної енергії на горячі пристрої печі, $\omega_{з.п.}$.

$$\omega = \omega_{ен} + \omega_{мех} + \omega_{дон} + \omega_{з.п.} \quad (6.1)$$

Витрати електричної енергії на нагрів шихти та плавлення металу визначаються з виразу:

$$\omega_{ен} = \omega_{кор} + \omega_{втр1} \quad (6.2)$$

де $\omega_{кор}$ - корисні питомі витрати електричної енергії на нагрів шихти та плавлення металу, кВт·год/т; $\omega_{втр1}$ - питомі витрати електричної енергії на теплові та електричні втрати енергії в період нагріву шихти та плавлення металу, кВт·год/т.

корисні питомі витрати електричної енергії визначаються за формулою:

$$\omega_{кор} = \frac{1000 \cdot i_m}{860} \quad (6.3)$$

де i_m – тепловміст металу, ккал/кг:

$$i_m = \sum_{i=1}^n a_i \cdot [c_i \cdot t_{пл.i} + q_{пл.i} + c_{ж.і} \cdot (t_{кін} - t_{пл.i})] \cdot \frac{1}{1 - a_{пов}} \quad (6.4)$$

де $a_{пов}$ – доля повертання в метало завалці;

a_i – доля вмісту кожного компонента в метало завалці;

c_i – теплоємність кожного компонента метало завалки, ккал/кг·°С, береться з додатку 1 [28];

$t_{пл.i}$ – температура плавлення кожного компонента метало завалки, °С, береться з додатку 1 [28];

$t_{кін}$ – температура металу в кінці енергетичного періоду, °С.

Питомі витрати електроенергії на теплові та електричні втрати енергії в період нагріву шихти та плавлення металу визначається з виразу:

$$\omega_{втр1} = \frac{\omega_{насп} - \omega'_{кор}}{\tau_{насп}} \cdot \tau_{пл} \quad (6.5)$$

де $\omega_{насп}$ – розрахункова норма витрат електричної енергії на нагрів шихти та плавлення металу кВт·год/т, береться з паспорту печі;

$\omega_{кор}$ – корисні питомі витрати електричної енергії, прийняті конструкторами при розрахунку електропечей, кВт·год/т (для сталі – 330 кВт·год/т);

$\tau_{насп}$ - розрахунковий час нагріву шихти та плавлення металу, год, береться з паспорту печі або додатку 2 [28];

$\tau_{пл}$ - технологічний час нагріву шихти та плавлення металу, год.

При повному циклі плавлення сталі (наявність окислювального та відновлювального періоду) норма витрат електричної енергії в технологічний період плавлення визначається з виразу:

$$\omega_{тех} = \omega_{шл} + \omega_{енд} + \omega_{під} + \omega_{втр2} - \omega_{екз} \quad (6.6)$$

де $\omega_{шл}$ - питомі витрати електричної енергії на наведення спеціального шлаку в технологічний період, кВт·год/т;

$\omega_{енд}$ - питомі витрати електричної енергії на ендотермічні реакції (можна приймати 42 кВт·год/т);

$\omega_{під}$ - питомі витрати електричної енергії на підігрів металу в технологічний період, кВт·год/т;

$\omega_{втр2}$ - питомі витрати електричної енергії на електричні витрати енергії в технологічний період плавлення, кВт·год/т;

$\omega_{екз}$ - компенсація питомих витрат електричної енергії за рахунок тепла, що виділяється в результаті екзотермічних реакцій окислення елементів металу, кВт·год/т.

$$\omega_{шл} = K \cdot i_{ш} \quad (6.7)$$

де K – кратність шлаку (відношення маси шлаку до маси рідкого металу), в окислювальний період $K = 0,02-0,04$, у відновлювальний період $K = 0,04-0,06$; $i_{ш}$ – тепловміст шлаку, в середньому складає 580-750 кВт·год/т шлаку.

$$\omega_{нід} = \frac{1000 \cdot C_{ж} \cdot \Delta t}{860} \quad (6.8)$$

де $C_{ж}$ - теплоємність рідкого металу, ккал/кг ·°C, розраховується за формулою $C_{ж} = \frac{i_m}{t_{кін}}$;

Δt – перепад температур на початку та кінці технологічного підігріву, °C.

$$\Delta t = t_{вип} - t_{кін} \quad (6.9)$$

де $t_{вип}$ - температура випуску металу, °C.

Як правило, підігрів рідкої сталі в технологічний період виробництва сталі здійснюється на 100-150 °C.

$$\omega_{втр2} = \frac{0,75 \cdot (\omega_{насп} - \omega'_{кор})}{\tau_{насп}} \cdot \tau_m \quad (6.10)$$

де 0,75 – коефіцієнт, що враховує зменшення електричних втрат за рахунок роботи печі на знижених ступенях потужності; τ_m - тривалість технологічного періоду, год.

$$\omega_{екз} = 7,5 \cdot y_{si} + 2 \cdot y_{Mn} + 2,8 \cdot y_c + 1,3 \cdot y_{Fe} \quad (6.11)$$

де $y_{si}, y_{Mn}, y_c, y_{Fe}$ - угар елементів кремнію, марганцю, вуглецю, заліза, кг/т рідкої сталі.

До допоміжного періоду належать очищення та заправка печі, завантаження шихти в піч та випуск металу.

$$\omega_{дон} = \frac{0,5 \cdot (\omega_{насп} - \omega'_{кор})}{\tau_{насп}} \cdot \tau_{дон} \quad (6.12)$$

де $\tau_{\text{дон}}$ - тривалість допоміжного періоду:

$$\tau_{\text{дон}} = \tau_{\text{оч}} + \tau_3 + \tau_6 \quad (6.13)$$

де $\tau_{\text{оч}}$ - тривалість періоду очищення та заправки печі, год; τ_3 - тривалість завантаження шихти в піч, год; τ_6 - тривалість випуску металу, год.

Питомі витрати електричної енергії на гарячі простой печі визначаються за формулою:

$$\omega_{\text{з.п.}} = 0,5 \cdot \frac{\omega_{\text{насп}} - \omega'_{\text{кор}}}{\tau_{\text{насп}}} \cdot \tau_{\text{з.п.}} \quad (6.14)$$

де 0,5- коефіцієнт, що враховує відсутність електричних втрат за рахунок відключення печі; $\tau_{\text{з.п.}}$ - питомий час гарячих простойв печі, год/плавка:

$$\tau_{\text{з.п.}} = \tau_{\text{ф}} - \tau_n \quad (6.15)$$

де $\tau_{\text{ф}}$ - фактична тривалість між плавильного періоду, год; τ_n - технологічна тривалість між плавильного періоду, год.

За наведеною вище методикою складена програма для визначення технологічних норм витрат електроенергії на плавлення сталі на ЕОМ. Програма написана на мові програмування QBASIK; текст програми наводиться в додатку 2.

По даній програмі визначені питомі витрати електроенергії на виробництво рідкого металу в печі типу ДСП-50 (сталь марки 20Л та 110Г13Л).

Як правило, на виробництво вуглецевої сталі марки 20Л затрачується на 19 кВт · год/т більше електричної енергії, чим на виробництво марганцевистої сталі марки 110Г13Л.

Важлива роль періоду розплавлення полягає в тому. Щоб за можливо короткий строк розплавити всю шихту і нагріти метал до заданої температури. Після чого можна приступати до процесу розливу металу.

Велике значення для скорочення процесу розплавлення має вибір оптимального режиму.

7. ЕКОНОМІЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ДУГОВИХ ПЕЧАХ

7.1 Загальні положення

Визначення питомої витрати електроенергії на виплавку 1 т сталі в ДСП:

$$\Delta E = \frac{P \cos \varphi T_2}{q} + \frac{\Delta P_3 T_3}{q \eta_{\text{ел}}} + \frac{\Delta P_1 T_1}{q \eta_{\text{ел}}} = \frac{P \cos \varphi \Delta E_T}{P \cos \varphi \eta_{\text{ел}} - \Delta P_a} + \frac{\Delta P_3 T_3}{q \eta_{\text{ел}}} + \frac{\Delta P_1 T_1}{q \eta_{\text{ел}}}$$

Де P - потужність, що підведена до трансформатора (зі сторони ВН , кВт;

T_1 - період простою: злив металу, очистка печі, заварювання поду і стін, завантаження металу, год.;

T_2 - період розплавлення металу, год.;

T_3 - період кипіння і рафінування, год.;

q - маса садки, т;

ΔP_1 – значення потужності теплових втрат в період простою, кВт;

ΔP_2 - потужність теплових втрат печі в період плавлення металу, кВт; ΔP_3 - потужність теплових втрат в період закипіння та рафінування, кВт;

$$\eta_{\text{ел}} = \frac{P_d}{P} 100 = \frac{P - p}{P} 100$$

P_d . потужність дуги, кВт; p — втрати електричної потужності в дроселі, трансформаторі, провідниках, в електродах, кВт; ΔE - теоретично необхідна витрата електроенергії на розплавлення 1 т металу, кВт·год. Із аналізу приведеного виразу можливо зробити наступні висновки:

а) перший доданок - витрата електроенергії на розплавлення 1 т сталі, який залежить від ККД печі і теплових втрат печі;

б) значення витраченої енергії на кипіння і рафінування обернено пропорційне масі садки;

в) витрата енергії, обумовлена простоєм печі, також обернено пропорційна масі садки і прямо пропорційна часу простою печі, тобто

істотно залежить від способу завантаження печі.

Таким чином, заходи по економії енергії повинні в першу чергу передбачати: збільшення маси садки і вдосконалення підготовки шихти; зниження електричних і теплових втрат печі; скорочення простоїв печі; оптимізацію електричних і технологічних режимів роботи печі.

7.2 Збільшення маси садки і вдосконалення підготовки шихти

Збільшення маси садки. Величина питомих витрат електроенергії залежать від маси садки, із-за цього доцільно перевантажувати печі по ємності, збільшуючи порівняно з номінальною масу завалки. Можливий варіант перевантаження печі по масі залежить від величини потужності пічного трансформатора, габаритів ванни печі, стійкості футерівки. Відповідно до цих факторів для кожної печі обирається оптимальне значення перевантаження (Табл. 7.1).

Таблиця 7.1 Оптимальна маса завалки, т, дугових сталеплавильних печах

Номінальна ємність печі, т	При плавке рядових сталей	При плавке сталей підвищеної
0,5	0,8-0,9	0,7-0,8
1,5	2,3-2,5	2,0-2,2
*'	4,4-5,0	3,8-4,2
5,0	7,5-8,0	6,0-7,0
8,0	11,0-13,0	9,6-11,0
10,0	14-16	12-13
.	20-23	18-20
20,0	28-31	24-28
30,0	40-42	35-38
40,0	50-55	46-50

Щоб визначити ефективність перевантаження печі можливо використовувати залежність зміни питомих витрат електричної енергії від

маси плавки (Рис 7.1).

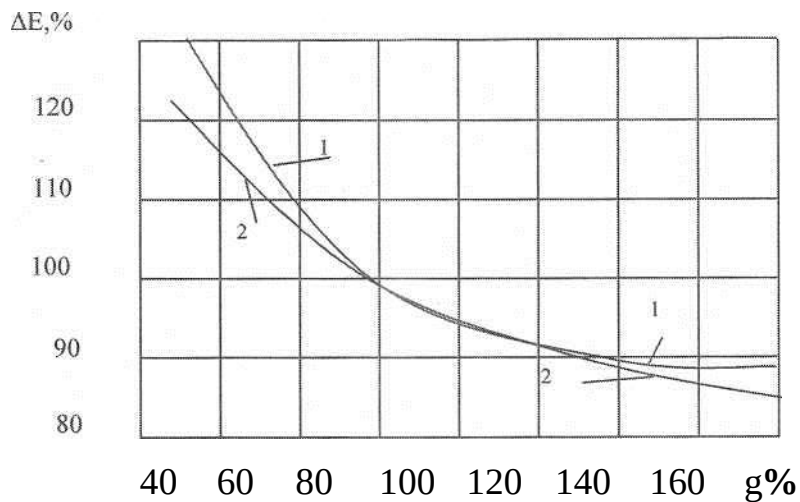


Рисунок 7.1 Графік зміни питомих витрат електричної енергії від маси плавки.

Приклад. Електропіч номінальною ємністю 5 т при середньому завантаженні 4,5 т має питому витрату енергії 750 кВт·год/т.

Розроблені заходи дозволяють довести масу завалки до 7 т, тобто до 140 % номінальної ємності. По Рис 7.1 (крива 2) визначаємо питомі витрати електроенергії до здійснення заходів по збільшенню завантаження і після, які в даному випадку складають відповідно 102 і 89 % від питомої витрати енергії при повному використанні об'єму печі.

Визначимо економічний ефект розроблених заходів:

$$\Delta E_1 = 1,02 \Delta E_n = 1,02 \cdot 750 = 765 \text{ кВт·год};$$

$$\Delta E_2 = 0,89 \Delta E_n = 0,89 \cdot 750 = 667,5 \text{ кВт·год}.$$

Економія енергії яка, досягається, віднесена до 1 т виплавленої сталі, складає:

$$\Delta E = \Delta E_1 - \Delta E_2 = 97,5 \text{ кВт·год/т}.$$

Попередня підготовка шихти. До завантаження в піч шихта повинна підготовлюватись таким чином, щоб при процесі її плавки не виникала необхідність додаткових „підвалок”. Це отримується

використанням оптимальної об'ємної маси шихти, яка для печі ємністю 1-5 т повинна складати 3-4,5 т/м³. Щоб отримати оптимальне значення: об'ємної маси шихти, вторинний лом і відходи підбирають в певних поєднаннях. Так. Для печі ємністю 10-40 т рекомендується співвідношення: 20 % дріб'язок, 40 % великого лому і 40 % середнього лому. Можна рахувати оптимальним: співвідношення між крупною і дрібною шихтою біля 60- 70:40-30 %.

Правильний підбір шихти не обмежується тільки підбором по габаритам, досить важливий і якісний склад шихти яка підбирається. Належне використання відходів і скрапу легованої сталі дозволяє при виплавці окремих сортів сталі різко скоротити тривалість окислювального періоду, знизити витрату легуючих елементів і розкислювачів і знизити питомі витрати електроенергії.

Нарівні з підбором шихти повинно бути забезпечено правильне розміщення шихти в робочому просторі печі: на под укладається половина мілкового лому, в центрі печі під електродами щільно розташовуються найбільш великі куски лому, і в подальшому все це закривається спочатку середніми кусками, а потім дріб'язком. Під кожен електрод з метою спрощення запалювання і впевненого горіння електричних дуг завантажуються кокс.

Економія енергії за рахунок підбору шихти, яка забезпечує плавку без додаткових „подвалок”, складає 5-10 % загальної витрати електричної енергії на плавку. Якщо при цьому буде скорочена тривалість окислювального періоду, то економія електроенергії складе 10-16 % загальної витрати електроенергії на плавку.

Приклад 1. На одному із підприємств підбір габаритної шихти скоротив час плавки 15-тонної печі з 11 год. 10 хв. до 8 год., що забезпечило зниження питомої витрати електроенергії з 1179 до 985 кВт·год/т.

Приклад 2. Відповідний якісний підбір шихти на машинобудівному

заводі дозволив проводити плавки без окислення. Це дало змогу скоротити час плавки на 4-тонній печі з 8 год. 20 хв. до 5 год. 50 хв. і питому витрату електроенергії з 1186 до 993 кВт·год/т, а на 5-тонній печі - знизити питому витрату електроенергії з 1026 до 819 кВт·год/т.

При складанні плану організаційно-технічних заходів з метою економії енергії можна орієнтовно оцінити економічний ефект від впровадження заходів щодо вдосконалення підбору шихти в розмірі 5-15 % фактичних питомих витрат на виплавку металу, які утворилися в попередньому оформленню плану на рік.

Попереднє підігрівання шихти. Найбільш енергоємними функціями в електропечах є нагрівання і розплавлення твердої завалки. Діапазон плавлення займає близько половини часу всієї плавки, в цей період витрачається 60-70 % всієї електроенергії, яка йде на плавку. Питома витрата електроенергії в цей період складає 380-420 кВт·год/т. Із-за цього попередній підігрів шихти значно впливає на знижені питомих витрат електроенергії. Крім того, попередній підігрів шихти до 600-700 °С вдосконалює умови роботи пічного трансформатора шляхом значного зниження стрибків струму, поліпшує якісний склад шихти шляхом видалення вологи і вигорання вуглецю із забруднюючої шихту змазки, надає можливість проводити увесь період плавлення при ввімкненому дроселі.

Найбільш ефективний попередній нагрів шихти за рахунок тепла відхідних газів з температурою біля 1000 °С від різних термічних установок в випадку їх наявності в цеху. Можна також використовувати тепло охолоджувальних колодязів і інших джерел вторинних енергоресурсів. Можливі спеціальні установки попереднього нагріву з мазутними або газовими пальниками. Використання спеціальних установок повинно бути обґрунтовано техніко-економічними розрахунками, які оправдують додаткові капітальні вклади і додаткові витрати палива. Попередній нагрів шихти до 600-700 °С забезпечує

зменшення питомих витрат електроенергії на 20 %.

Коли температура попереднього нагріву шихти відрізняється від 600-700 °С можна користуватися наступною приблизною залежністю:

$$\Delta E = 0,243t_1^0,$$

де ΔE - економія електроенергії в розрахунку на 1 т виплавленого металу, кВт·год/т.; t_1^0 — температура попереднього нагріву шихти, °С.

7.3. Зниження електричних втрат.

Оптимальні щільності струму в частинах вторинного струмопроводу. Досвід роботи дугових сталеплавильних печей дозволяє рекомендувати економічні щільності струму в частинах вторинного струмопроводу:

мідні шини при площі перерізу пакету на фазу до 5000 мм² 1,5-2 А/мм², вище 5000 мм² 1-1,5 А/мм²;

мідні гнбкі кабелі при площі перерізу на фазу до 4000 мм² - 1,8-2,5 А/мм², вище 4000 мм² 1,2-1,8 А/мм²;

мідні водоохолоджуємі труби - 4-6 А/мм².

При вказаних в Табл. 7.2 економічні щільності струму у відсотках до витрати електроенергії на плавку приведені в Табл. 7.3.

Таблиця 7.2 Величини економічної щільності струму в електродах

Діаметр електроду, мм	Вугільні електроди		Графітізовані електроди	
	Щільність струму, А/мм ²	Струм навантаження, А	Щільність струму, А/мм ²	Струм навантаження, А
100	—	—	0,3	1,7-2,9
150	0,12	2,1	0,25	3,2-5,3
200	0,11	3,4	0,22	5,3-9,1
250	0,1	4,0	0,2	7,8-12,2
300	0,10	7,0	0,18	11,3-16,9
350	0,10	9,6	0,17	15,4-20,2
400	0,09	11,3	0,16	18,8-23,8
450	—	—	0,15	23,8-28,6
500	0,09	17,7	0,14	27,5-33,3
550	—	—	0,14	28,4-38,0
600	0,07	25,0	—	—

При збільшенні щільності струму в елементах вторинного струмопроводу збільшаються втрати електроенергії, а також питомі витрати на плавлення. Приблизно для попередніх розрахунків можна використовувати умовні коефіцієнти (Табл. 7.4) зростання втрат електроенергії в частинах вторинного струмопроводу, віднесеного до 1 т розплавленого металу при зростанні щільності струму вище економічного.

Таблиця 7.3 Втрати електроенергії при економічних щільностях струму в електродах

Частини вторинного струмопроводу	Втрати електроенергії, %, для печей ємністю	
	0,5-5 т	8-20 т
Шини, кабелі і труби на низькій стороні	3,5-4,5	3-4
Вугільні електроди	6-8	3-4
Графітізовані електроди	4-5	3-4

Втрати електроенергії визначаються із виразу

$$\Delta E = \kappa \left(\frac{j_{\Phi}}{j_e} - 1 \right)$$

де ΔE - втрати електроенергії кВт·год/т; κ - коефіцієнт збільшення втрат (із Табл. 7.4); j_{Φ} - фактична щільність струму А/мм²; j_e - економічна щільність струму, А/мм².

Таблиця 7.4 Коефіцієнти зростання втрат електроенергії в частинах вторинного струмопроводу на 1 т перелавленого металу при зростанні щільності струму.

Часимни вторинного струмопроводу	Основний процес		Кислий процес	
	Фасонне лиття	Лиття злитків	Фасонне лиття	Лиття злитків
Печі ємністю 0,5-5 т				
Шини, кабелі і труби НН	25	28	23	26
Вугільні електроди	43,8	49	40,5	45,5
Графітізовані електроди	28,1	31,5	25,8	29,3
Печі ємністю 8-20 т				
Шини, кабелі і труби НН, електроди	21,9	24,5	20,1	22,8

Приклад. Електропіч ємністю 5 т працює з щільністю струму в мідних шинах на стороні НН 2,2 А/мм², на основному процесі для виплавки низьколегованої сталі в злитках.

Для цього випадку економічна щільність струму $i_e = 2$ А/мм², а коефіцієнт збільшення втрат $\kappa = 28$ (Табл. 7.4).

Відповідно,

$$\Delta E = 28 \left(\frac{2,2}{2} - 1 \right) = 2,8 \text{ кВт·год/т.}$$

Зменшення опору електричних контактів. Електричний перехідний опір в контактах залежить від роду матеріалу і від способу виконання контакту (роз'ємний або нероз'ємний). Нероз'ємні контакти, як

правило, виконуються зварні.

В роз'ємних контактах перехідний опір визначається станом контактних поверхонь і тиском в контакті, Ом,

$$R_k = \frac{C}{p^m},$$

де С- розрахунковий коефіцієнт, відповідно до матеріалу контакту; m - показник степені (приймається рівним: 0,5-1); p^m - тиск в контакті, для мідних шин дорівнює 60 МПа (600 кгс/см²).

Значення розрахункових коефіцієнтів С в залежності від матеріалу контакту приведені нижче:

Матеріал контакту	$C \cdot 10^4$
Мідь-мідь	0,8-1,4
Мідь-мідь (луженні)	0,9-1,1
Мідь-сталь	30
Мідь-алюміній	10
Сталь-сталь	75-80

Збірка контакту перевіряється щупом товщиною 0,02-0,03 мм. Якщо щуп входить в контакт не глибше 5 мм, то збірка вважається доброю.

Для нормальної роботи контактної з'єднання: рекомендуються наступні щільності струму, А/мм²:

Мідь-мідь	0,3
Алюміній-алюміній	0,16
Мідь-алюміній	0,13
Мідь-сталь	0,1
Алюміній -сталь	0,08

Опір контактів періодично перевіряється; при цьому опір контакту не повинен перевищувати опору цілої ділянки шин той же довжини, що і контактне з'єднання, більш: чим на 20 %.

Зростання опору контакту призводить до додаткових втрат потужності, які можна визначити за формулою, кВт,

$$\Delta P_k = 3I^2 (R_k - R_{k,\phi}) \cdot 10^{-3},$$

де I- струм, що проходить через контакт (середній), А; R_k - опір контакту, який відповідає цілій ділянки шини той же довжини, що і контактне з'єднання, Ом; $R_{k,\phi}$ - фактичний опір контакту, Ом.

Зменшення опору контакту електрод-електродотримач. Опір контакту електрода з електродотримачем залежить від степені затиску електрода в електродотримачу і від матеріалу електрода і електродотримача.

Зусилля затяжки електрода в електродотримачу рекомендується приймати рівним (4 - 5)G, де G- повна маса електродної свічі, кг.

Опір контакту електрод-електродотримач не повинен перевищувати значень, які указані в Табл. 7.5. Збільшення опору контакту електрод-електродотримач порівняно з рекомендованими значеннями приводить до збільшення втрат електроенергії. Визначення цих додаткових втрат проводиться по указаній вище формулі.

Таблиця 7.5 Опір контакту електрод-електродотримач

Електрод	Електродотримач	Опір контакту , мОм
Графітизований	Латунний	0,08
Вугільний	»	0,42
Графітизований	Стальний	0,35

Зменшення опору електродної свічі. Опір електродної свічі залежить від матеріалу електрода і якості контактів. Для отримання доброго щільного стику при скручуванні свічі рекомендується прикладати наступні зусилля в залежності від діаметру електрода:

Діаметр електрода, мм	100	200	250	300	355
Зусилля яке прикладається, (кгс-м)	Н-м 70(7)	280(2 8)	590(5 9)	830(8 3)	1460(14 6)

З метою зменшення опору контакту вугільних електродів рекомендується використання графітової пасти.

При дотриманні указаних умов нормальними опорами стику вважається; для графітизованих електродів 0,065 мОм; для вугільних електродів 0,2 мОм, При цьому приблизно можна сказати, що втрати в стиках від загальної витрати електроенергії за період плавки складає: для графітизованих електродів 0,4 %; для вугільних електродів 0,2 %.

Для попереднього визначення додаткових втрат електроенергії, які викликані збільшенням опору контактів на стиках, достатньо збільшити ці втрати пропорційно збільшенню опору в порівнянні з нормальними.

Приклад. Опір стиків вугільних електродів складає 0,3 мОм. Це значить, що втрати загальної витрати електроенергії за період плавки $\Delta E = 0,3 - 1,1/0,2 = 1,65$ %, тобто збільшаться в порівнянні з нормальними на 0,55%.

Зміна схеми короткої мережі. Найбільш поширеною схемою короткої мережі є схема трикутним на шинах трансформатора, зірка на електродах (Рис. 7.2, а). Ця схема володіє великою індуктивністю, несиметричністю розподілення навантаження по фазам, що негативно відбивається на роботі печі.

Кращими параметрами володіють схеми: несиметричний трикутник на електродах [двохбіфілярна коротка мережа (Рис 7.2, б)] і симетричний трикутник на електродах з четвертим рукавом [трьохбіфілярна коротка мережа (Рис 7.2, в)].

При виконанні двох останніх схем збільшується витрата міді на 15-20 % в порівнянні з першою схемою, так як в цих схемах струмопровід розраховується не на лінійний струм, а на подвійний фазний (прямий і зворотній). Але при цьому усуваються недоліки першої схеми - зменшується індуктивність, розподілення навантаження по фазам вирівнюється, що збільшує коефіцієнт потужності і дозволяє збільшити середню активну потужність печі.

В результаті використання трьохбіфілярної короткої мережі в порівнянні з першою схемою для подачі ємністю 5 т тривалість плавки скоротилася на 15-20 %, витрата електроенергії знизилась на 9 кВт-год/т. В попередніх розрахунках можна приймати, що подібна зміна короткої мережі забезпечить економію енергії в розмірі 1,4-1,5 % фактичних питомих витрат електроенергії за минулий звітний рік.

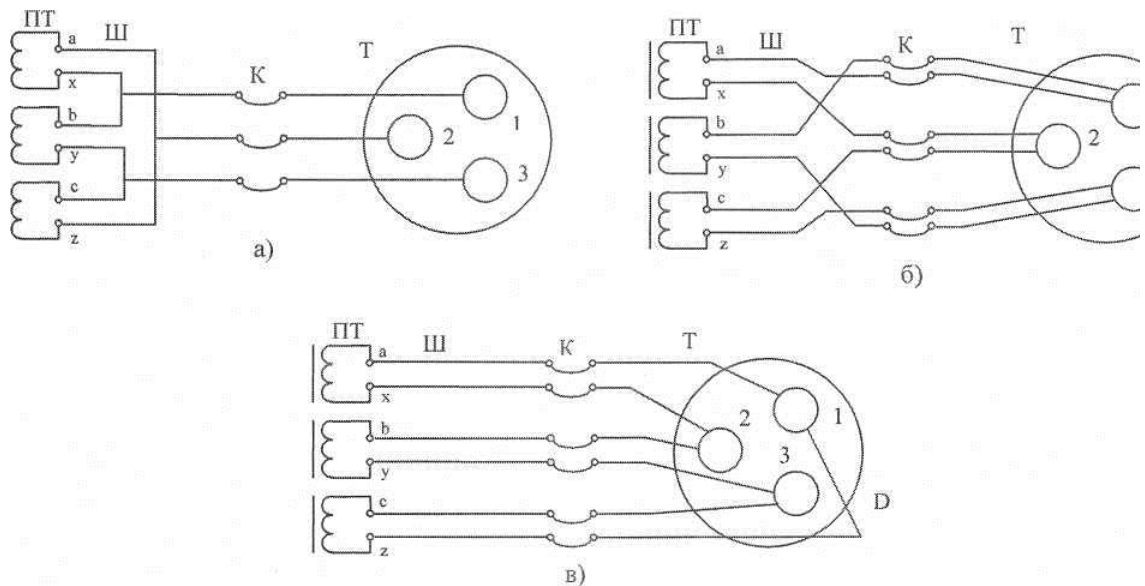


Рис. 7.2 Схеми короткої мережі.

а - трикутник на шинах трансформатора і зірка на електродах; б - несиметричний трикутник на електродах; в- симетричний трикутник на електродах з четвертим рукавом; ПТ- пічний трансформатор; Ш - ділянка шин; К - ділянка гнучких кабелів; Т - струмопроводи по рукавам; D - четвертий рукав; 1,2,3— електроди.

7.4 Зниження теплових втрат.

Збільшення стійкості футерівки. Загальні теплові втрати печі залежать від стійкості футерівки (частоти її змінювання при ремонтах), так як при цьому втрачається велика кількість тепла, яка акумулюється кладкою.

Стійкість футерівки може бути підвищена за рахунок: а) використанням високоякісних футерувальних матеріалів; б) вибору і підтримання оптимальної висоти зводу над рівнем металу в період рафінування;

в) зменшення тривалості рафінування;

г) здійснення швидких ремонтів теплоізоляції стін (використання великоблочної футерівки).

Використання цих заходів збільшує стійкість футерівки печі в 1,5-3 рази і зменшує теплові втрати на 10-15 %. Потужність теплових втрат в залежності від ємності печі і стану футерівки приведена в Табл. 7.7.

При цьому втрати з зовнішніх поверхонь печі можна прийняти в процентах загальних теплових втрат: печі до 5 т-40 %; печі вище 5 т-49 %.

Таблиця 7.6 Потужність теплових втрат в залежності від ємності печі і стану футерівки

Ємність печі, т	Потужність теплових вірах, кВт	
	Нова футерівка	Зношена футерівка
2	250	350
3	350	400
5	375	500
10	425	625

Розрахунок ефективності яка очікується при здійсненні вказаних заходів можна вести наступним чином: за відповідною потужністю теплових втрат ΔP_T (Табл. 7.6) визначається потужність теплових втрат з зовнішніх поверхонь печі, кВт,

$$\Delta P_{T,\Phi} = (0,4 - 0,49) \Delta P_T$$

Як відомо, збільшення стійкості футерівки забезпечує зниження теплових втрат на 10-15 %. Приймаючи середнє значення, можна вважати, що це забезпечує зниження потужності, кВт, теплових втрат: для печі до 5 т $\Delta P = 0,05 \Delta P_T$; для печей вище 5 т $\Delta P = 0,06 \Delta P_T$. Помноживши отримане значення на час роботи печі на рік, отримаємо економію електроенергії яка очікується.

Покращення якості футерівки печі. Для теплоізоляції стін і поду печі доцільне використання діатомової засипки шаром біля 50 мм, яка одночасно слугує демпфером, який сприймає зусилля при тепловому розширенні вогнетривкого шару. Для запобігання засипки від висипання

через щілини в кожуху і для додаткової теплоізоляції зовнішню поверхню кожуху печі вистеляють листовим: азбестом шаром 10-20 мм.

При добрій теплоізоляції печі температура на поверхні кожуха при середньому зносу футерівки не повинні перевищувати: у стін 170; у поду 140; у зводу 300 °С. Підтримання цих температур забезпечує збільшення стійкості стін в 1,5 разу, зниження втрат тепла з поверхні кожуха в 1,5-2 разу.

При визначені ефективності заходів по вдосконаленню теплоізоляції можна користуватися указаною вище формулою. В цьому випадку зниження потужності теплових втрат, кВт: для печі до 5 т $\Delta P = 0,2\Delta P_T$; для печей вище 5 т $\Delta P = 0,25\Delta P_T$.

Економія електроенергії визначається множенням зменшення потужності теплових втрат на час роботи печі за рік.

Пофарбування зовнішніх поверхонь кожуха печі алюмінієвою фарбою дозволяє зменшити теплові втрати через стіни і под печі на 3-5 %, що при умові систематичного підтримування якості пофарбування забезпечує зниження питомої витрати електроенергії на 1-1,5 кВт·год/т.

Виготовлення конічної футерівки з відповідною зміною кожуху печі. Виготовлення конічної футерівки з кутом нахилу 7-10 ° дозволяє збільшити ємність печі на 30-40 %, скоротити час плавки на 5-10 %, підвищити стійкість футерівки в 1,5-2 рази. За рахунок цього питома витрата електроенергії в середньому знижується на 5-7 %.

В розрахунку ефективності здійснення цього заходу можна приймати можливе скорочення питомих витрат електроенергії в порівнянні з фактичними питомими витратами до реконструкції для печей з загальною футерівкою на 6-7 % і для печей з кислою футерівкою на 5-6 %.

Зниження втрат тепла з водою охолодження. Втрати тепла з водою охолодження можуть бути визначені, кВт·год,

$$\Delta E_{\text{о.в.}} = \frac{Q(t_1 - t_2)}{860},$$

де Q- кількість води (зазвичай від 800 до 1800 л на 1 т виплавленої сталі), л; t_1 , t_2 - температура води, яка поступає для охолодження і яка відводиться від печі.

Для скорочення витрати охолоджуючої води і підтримання її оптимальної температури доцільно встановлювати в гілках охолодження автоматичні регулятори температури з установкою визначеного діапазону температур.

Як правило, в печах малої і середньої ємності цей захід забезпечує економію електроенергії до 50 тис, кВт·год на рік.

Зменшення втрат тепла з відхідними газами. Джерелом цих втрат є "просмоктування" повітря через піч. Зменшення його досягається створюванням добрих ущільнень в місцях прилягання двері робочого вікна до арки., в з'єднанні своду з кожухом, ущільнення отворів своду в місцях проходження електродів. Виконання цих заходів дозволяє знизити втрати електроенергії до 3-5 % загальної витрати на плавку.

Враховуючи складність визначення втрат з відхідними газами, в попередніх розрахунках можна приймати економію електроенергії після проведення комплексу заходів по створенню надійного ущільнення електропечі в наступних розмірах:

Ємність печі, т	Економія електроенергії кВт·год/т
0,5-1,5	8,5
3-8	7,5
10-20	7,2
25-40	7,0

Зменшення втрат тепла через вікна і отвори печі. Ці втрати можуть бути визначені, кВт,

$$\Delta p_H = C\alpha \left[\left(\frac{t_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_1}{100} \right)^4 \right] \frac{FT_1}{860},$$

Де $C = 4,95$ - коефіцієнт випромінювання футерівки, кал/(м·год); α - коефіцієнт діафрагмування, який залежить від співвідношення розмірів вікон і товщини стінки; t_1 - температура оточуючого піч повітря, К; t_2 - температура пічного простору, К; F - площа відкритого вікна (дверці), м²; T_1 - тривалість відкривання вікна, год.

Втрати тепла відкритої дверці визначається по рекомендованим температурам для періоду завантаження ($t_2 = 1000-1200$ °С), розплавлення твердої шихти до стану появи рідкого металу ($t_2 = 1500$ °С), підігріву розплавленого металу ($t_2 = 1780$ °С), очищення печі від шламу, заправка поду ($t_2 = 1700$ °С).

к показала практика, потужність теплових втрат через відкрите вікно в період плавлення складає біля 450 кВт/м², а в період кипіння і рафінування 600- 800 кВт/м²,

Розрахунок ефективності заходів по скороченню тривалості всіх операцій при роботі печі, зв'язаних з відкриттям робочого простору, можна вести по вище вказаній формулі.

7.5 Скорочення часу простоїв печі

Інтервал простою печі в нормальних умовах зумовлюється часом, який необхідно на злив металу, очищення печі, та завантаження шихти. Час простою печі залежить від ступеню механізації завантаження, зливу металу і вдосконалення експлуатації. Електроенергія в період завалки шихти в піч не поступає, але збережене в кладці печі тепло розсіюється кожухом і сводом, в зв'язку з чим при включенні печі в мережу частина енергії іде на нагрівання футерівки. Втрати на нагрівання футерівки після нормальної перерви в роботі печі складають до 15- 20 % всієї підведеної електроенергії для чергового плавлення. Таким чином, скорочення часу

завалки шихти, залежить від ступеню механізації, в значній мірі визначається збільшенням продуктивності печі і зменшення питомої витрати електроенергії.

Тривалість завантаження шихти в піч визначається способом завантаження. При ручному завантаженні (для печей ємністю до 15 т) вона складає:

Ємність печі, т	1,5-2	3-4	5-6	10-12
Тривалість завантаження, хв.,	8-12	12-20	20-25	35-45

Тривалість механізованого завантаження значно скорочується: при мульдовому завантаженні печі ємністю 25-35 т вона дорівнює 30-35 хв., а при механізованому завантаженні зверху не перевищує 5-10 хв. Найкращим методом є спосіб механізованого завантаження зверху, який забезпечує економію питомої витрати електроенергії до 7-8 %.

Дію простоїв і затримок на величину питомої витрати електроенергії можна визначити в залежності від інтервалу простою з ввмкненням печі, при цьому враховуючи втрати холостого ходу печі, кВт·тод/т,

$$\Delta E_{y,\Phi} = \frac{[P_0 t + P_{\text{ном}} (24 - t)] E_{\text{ном}}}{P_{\text{ном}} (24 - t)},$$

Де $P_{\text{ном}}$ - номінальна потужність печі, кВт; P_0 - потужність холостого ходу (втрати холостого ходу), кВт; t - кількість годин простою печі на протязі доби; $E_{\text{ном}}$ - номінальна витрата електроенергії кВт·тод/т.

На Рис 7.3 приведені криві питомих витрат енергії в залежності від тривалості відключення печі.

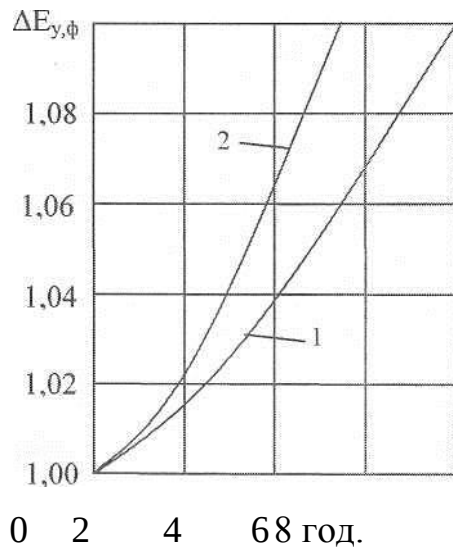


Рис 7.3 Графік залежності питомих витрат електроенергії від тривалості простоїв печі. (1 - при $P_0 = 0,2P_n$; 2 – при $P_0 = 0,3P_n$)

Приклад. Піч ємністю 5 т з фактичною витратою електроенергії 930 кВт·год/т працює з добовим простоєм 6,5 год. Після механізації завантаження печі час простою скоротився: до 1,5 год. Втрати холостого ходу даної печі $P_0 = 0,3P_n$.

Номінальна питома витрата

$$\Delta E_{y, \text{ном}} = \frac{E''_{\phi}}{1,075} = \frac{930}{1,075} = 865,1 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{т}.$$

Фактична питома витрата енергії після здійснення заходів по зниженню простою печі до 1,5 год/добу визначається за виразом:

$$\Delta E''_{y, \phi} = 1,01 \cdot 865,1 = 873,8 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{т}.$$

тут 1,075 і 1,01 - коефіцієнти збільшення питомих витрат енергії в залежності від простою печі по кривій 2 Рис 7.3.

Отримана економія енергії, віднесена до 1 т метала який виплавляється:

$$\Delta E = E'_{\phi} - E''_{\phi} = 930 - 873,8 = 56,2 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{т}.$$

7.6 Оптимізація електричних та технологічних режимів роботи електропечей

Робота печі при раціональних електричних режимах.

Раціональний електричний режим печі визначається оптимальною активною потужністю пічної установки для кожного технологічного режиму.

Значення середньої активної потужності $P_{\text{ср}}$, яка визначає раціональний електричний режим, орієнтовно визначаються:

$$\text{плавлення } P_{\text{ср}} = 500G^{3/4} \text{ кВт};$$

$$\text{окислення } P_{\text{ср}} = 380G^{3/4} \text{ кВт};$$

$$\text{відновлення } P_{\text{ср}} = 205G^{3/4} \text{ кВт},$$

де G - маса завалки, т.

Робота печі при раціональних режимах скорочує тривалість плавки на 10-25 % і зменшує питому витрату електроенергії на 8-15 %.

Плавка в печах з кислою футерівкою. Доволі ефективним заходом по зниженню питомих витрат енергії є перевід електроплавлення (в першу чергу вуглецевої сталі для фасонного лиття) з основного процесу на кислий. Печі з кислою футерівкою в порівнянні з основною крім значної економії електроенергії мають наступні переваги: більш високу продуктивність; меншу витрату і вартість вогнестійкий матеріалів, флюсів і розкислювачів; швидкий нагрів рідкого металу і отримання сталі з більш високою текучістю; меншу собівартість сталі.

Ці переваги окупають додаткові витрати на використання відбірної металічної шихти з низьким вмістом сірки і фосфору.

Перехід з основного процесу на кислий може дати при однакових умовах 15- 20 % економії електроенергії і електродів.

Використання кисню. Використання продувки кисню веде до зниження витрати електроенергії і до збільшення продуктивності печі за рахунок скорочення періоду плавлення і окислення. При цьому використання продувки кисню в період плавлення скорочує тривалість

роботи і витрату електроенергії в наступних періодах плавки за рахунок більш високого нагріву металу к кінцю періоду плавлення. Ефективність використання кисню залежить від способу його отримання і марок сталі яка виплавляється. В середньому використання кисню знижує питому витрату електроенергії на 5-15 %.

Скорочення тривалості окремих періодів плавки в печах з основною футерівкою. Окислювальний період може бути скорочений на 50-60 % за рахунок часткового поєднання процесів окислення і відновлення. Для цього вапно і частину всієї руди подають в запалку разом з шихтою. Питома витрата енергії при цьому знижується на 80 кВт·год/т.

Також скорочується відновлювальний період за рахунок:

- безпосереднього розкислення сталі кусковим розкислювачем. Тривалість відновлювального періоду скорочується на 70 кВт·год (в порівнянні з звичайним розкислювачем через шлак молотими розкислювачами);
- використання пристрою для електромагнітного перемішування сталі в ванні.

Електромагнітне перемішування прискорює процеси розкислення, розчинення в розплаві легуючих добавок і забезпечує вирівнювання складу і температури сталі в відновлювальний період. Це в свою чергу скорочує період відновлення на 25-40 хв. і зменшує витрату електроенергії на плавку на 40-50 кВт·год/т. Якщо врахувати, що пристрій електромагнітного перемішування вимагає для своєї роботи 12-24 кВт·год/т, то чиста економія складе біля 27 кВт·год/т.

Встановлення автоматичного керування рухом електродів. Автоматичного керування призначено для забезпечення заданої по періодам плавки активної потужності, яка підводиться до печі.

Робота дугових печей з використанням сучасної апаратури для автоматичного регулювання рухом електродів приводить до зниження питомої витрати електроенергії в середньому на 8-10 %.

7.7 Робочі характеристики і явища переносу потужності.

Робочими характеристиками називаються залежності основних параметрів печі в функції від вторинного струму I_2 , кА.

Вони будуються за формулами:

1. Загальна активна потужність печі, кВт

$$P_a = I_2 U_{2\phi} \cos \varphi$$

2. Потужність електричних втрат, кВт

$$\Delta P_{\text{п.ел}} = 3 I_{2\text{л}}^2 R 10^3$$

3. Потужність на дузі, кВт

$$P_d = P_a - \Delta P_{\text{п.ел}}$$

4. Коефіцієнт потужності

$$\cos \varphi = \sqrt{1 - \left(\frac{I_{\text{л}} X_{\text{ср}}}{U_{\phi}} \right)^2}$$

5. Коефіцієнт корисної дії

$$\eta = \frac{P_d}{P_a}$$

Як відомо з курсу ТОЕ в трифазній системі активна складова фазної напруги дорівнює

$$U_{\text{ф.а}} = I \left(R + \frac{\sqrt{3}}{2} \omega M_{12} + \frac{\sqrt{3}}{2} \omega M_{13} \right)$$

Де M_{12} , M_{13} - відповідно коефіцієнти взаємоіндуктивності між першою і другою і першою і третьою фазами; R - активний опір першої фази.

Два інших члени рівняння мають смисл активних опорів, які викликані електромагнітними зв'язками між фазами.

Таким чином взаємна індуктивність впливає не тільки на індуктивний, але і на активний опір.

При магнітній несиметрії взаємоіндуктивність між крайньою і середньою фазою більше, ніж взаємоіндуктивність між крайніми фазами. (Особливо для електродів які розташовані в одну лінію). При цьому маємо:

для першої фази $M_{12} - M_{13} > 0$

для другої фази $M_{21} - M_{23} = 0$

для третьої фази $M_{31} - M_{32} < 0$.

Таким чином активний опір першої фази збільшується, а третьої зменшується.

При симетричних напругах на пічному трансформаторі струми в фазах есиметричні: в першій фазі струм менший, а в третій найбільший („мертва” і „дика” фази).

Збільшення потужності на одній фазі печі не компенсує продуктивність у електрода „мертвої” фази що знижує техніко-економічні показники печі.

Це явище названо явищем переносу потужності із однієї фази в іншу.

7.8. Оптимальний електричний режим розплавлення. Добова продуктивність

Важлива задача періоду плавлення полягає в тому, щоб за можливо

короткий строк розплавити всю шихту і нагріти метал до заданої температури. Після цього можна приступати до процесу розливу металу.

Важливе значення для скорочення процесу розплавлення має вибір оптимального режиму. Знаходження оптимальної величини струму на даній ступені напруги проводиться порівнянням швидкості зміни питомої витрати електроенергії і часу розплавлення в функції від струму.

При рівнянні приросту цих величин приймається оптимальною величина струму, тобто

$$\frac{dT_p}{dI} = -\frac{d\omega}{dI}$$

де T_p - час розплавлення; ω - питома витрата електроенергії.

З цією метою розрахуємо і побудуємо графіки залежності $\omega = f(I)$ і $T_p = f(I)$

$$T_p^* = \frac{P_{д.макс} - \Delta P_{тепл}}{P_{д} - \Delta P_{тепл}} ; \text{ в/о}$$

$$\omega^* = \frac{\Delta P_{тепл} + \Delta P_{ел}}{P_{д} - \Delta P_{тепл}} + 1 ; \text{ в/о}$$

де $P_{д}$ - потужність на дузі для значення струму який розглядається; $\Delta P_{тепл}$ - середня потужність теплових втрат за час плавки; $P_{д.макс}$ - максимальна потужність, яка виділяється на дузі для відповідної ступені напруги; $\Delta P_{ел}$ - потужність електричних втрат для значення струму яке розглядається.

Залежність питомого часу плавлення $T_p\%$ і питомої витрати електроенергії на 1 тону придатного металу в в/о в функції від струму представлені на Рис 7.4.

Добова продуктивність печі може бути представлена виразом, яке використовується при аналізі економічності її роботи, т

$$G = \frac{24}{\frac{\omega}{S \cos \varphi \eta_{\text{ел}} - \Delta P_{\text{тепл}}} + \frac{t_{\text{пл, раф}}}{g} + \frac{t_{\text{пр}}}{g}}$$

де ω - оптимальна питома витрата на розплавлення 1 т металу, кВт·год/т; g - ємність печі, т; S - потужність трансформатора, кВА; $t_{\text{пл, раф}}$ - час розплавлення і рафінування, год.; $t_{\text{пр}}$ - час простою.

Вплив простоїв і затримок на питому витрату енергії, можна визначити за формулою:

$$\omega_{\text{факт}} = \omega_{\text{ном}} \left[\frac{\Delta P_{\text{хх}} t + P_{\text{ном}} (24 - t_{\text{пр}})}{P_{\text{ном}} (24 - t_{\text{пр}})} \right]$$

де $\omega_{\text{факт}}$ - питома витрата при фактичному завантаженні з урахуванням простою;

$\omega_{\text{ном}}$ - питома витрата при номінальному завантаженні; $t_{\text{пр}}$ - час простою на протязі доби.

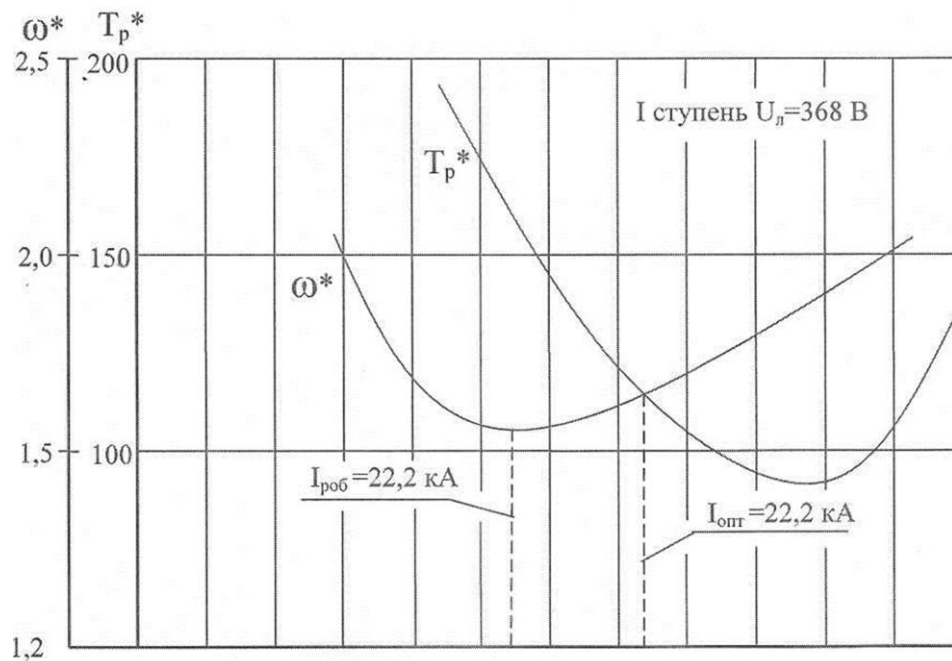


Рисунок 7.4 Залежність T_p^* і ω^* від струму для печі ДСП-80.

Таким чином основні заходи по економії електроенергії в дугових сталеплавильних печах можна коротко сформулювати наступним чином:

- покращення теплоізоляції;
- швидкі плавки;
- плавка при оптимальних режимах;
- автоматизація управління печами;
- забезпечення мінімальної вологості шихти і її обігрів;
- робота печей на повну потужність;
- підбір схеми короткої мережі;
- організаційні заходи: цілодобова робота, підготовка форм для розливу, чітка робота експрес-лабораторії, недопущення гарячих простоїв і т.п.

7. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

По умовам електробезпеки електроустановки ділять на електроустановки напругою до 1000 В і напругою вище 1000 В. При цьому мається на увазі діюче значення напруги. Вимоги техніки безпеки і технологічні вимоги, пропоновані до конструкції, пристрою, розміщенні і експлуатації електричних установок вище 1000 В, істотно більш жорсткі, чим вимоги до електроустановок до 1000 В.

Досвід експлуатації показує, що для забезпечення безвідмовної, безаварійної і високопродуктивної роботи електроустановок необхідно разом із бездоганним їх виконанням і спорядженням засобами захисту так виконувати їх експлуатацію, щоб анулювати всяку можливість помилок з боку обслуговуючого персоналу.

Схема такої організації експлуатації розроблена протягом тривалого досвіду роботи багатьох електроустановок і викладена в "Правилах по техніці безпеки при експлуатації електроустановок" - ПТБ і "Правилах технічної експлуатації електричних станцій та мереж" - ПТЕ.

Базою для організації безпечної експлуатації електричних установок є висока професійна технічна грамотність і жорстка дисципліна обслуговуючого персоналу, який зобов'язаний насторого дотримуватись особливі організаційні і технічні заходи, а також правильні прийоми і черговість виконання експлуатаційних дій згідно вказівкам Правил.

Особи, обслуговуючі електроустановки, не повинний мати каліцтв або хвороб, які заважають роботі і посилюють небезпеку впливові стума на організм.

Персонал, який несе чергування в електроустановках та приймаючий безпосередньо участь в оперативних перемиканнях, а також виконує ремонтні, монтажні, налагоджувальні та інші роботи в працюючих електричних установках, здійснює медичний огляд при прийомі на роботу, а

потім періодично раз в два роки; особи, які працюють з ртутними випрямлячами і перетворювачами, виконують роботи на висоті або пов'язані з підйомом на висоту, а також обслуговуючі підйомні спорудження, проходять медичний огляд щорічно.

Весь заново прийнятий на роботу персонал перед отриманням дозволу для знаходження їх на даному підприємстві повинен пройти вступний інструктаж, після цього для отримання дозволу на знаходження на робочому місці - первинний інструктаж.

Особи із числа чергуючого і оперативно-ремонтного персоналу до призначення на самостійну роботу зобов'язані, крім того, пройти необхідну теоретичну підготовку; навчання на робочому місці; перевірку знань ПТБ і ПТЕ, виробничих і посадових інструкцій в об'ємі, обов'язковому для даної посади; дублювання, тобто виконання обов'язків чергуючого по місцю роботи.

Вступний інструктаж проводить інженер інспектор по техніці безпеки даного підприємства. Мета цього інструктажу є в тому, щоб дати особі, яка заново поступає на роботу, загальні уявлення проосновні правила техніки безпеки, гігієни та виробничої санітарії і пожежної безпеки. При цьому роз'яснюються правила внутрішнього трудового розпорядку; правила поведінки на території підприємства, у виробничих і побутових приміщеннях; основні види небезпек при знаходженні на території в цехах підприємства; значення запобіжних надписів, плакатів, звукової та світлової сигналізації, а також вказуються номери телефонів, по яким потрібно телефонувати в екстрених випадках (пожежа, нещасливий випадок, аварійний стан обладнання тощо).

Ремонтні, монтажні, налагоджувальні, будівельні роботи, які виконуються в діючих електроустановках, в тому ж числі на повітряних і кабельних лініях, у відношенні до мір безпеки поділяються на три категорії: роботи без напруги; роботи без знімання напруги; роботи під напругою.

Роботи із зняттям напруги виконують виконують при повній або частковому відключенні електроустановки.

При роботах із частковим відключенням робочий не повинен наближуватись до струмоведучих частин, які знаходяться під напругою. В електричних установках електростанцій і електричних підстанцій 6 - 110 кВ при роботі біля неогорожених струмоведучих частин забороняється розміщуватись так, щоб ці частини знаходилися ззаді або з двох бокових сторін.

Роботи в установках без напруги виконують без вимкнення електроустановки. При цьому дозвол на роботу надається за умови наявності постійних і тимчасових огорожень струмаведучих частин, на корпусах обладнання, на поверхні оболочок кабелів, а також на відстанні від неогорожених струмоведучих частин, які знаходяться під напругою більше допустимого.

Роботи під напругою виконують безпосередньо на струмоведучих частинах, які знаходяться під діючою напругою, із використанням електрозахисних засобів, а також на відстанні від струмоведучих частин менше допустимого.

Умови для виконання робіт.

В електричних установках всі роботи слід виконувати при обов'язковому виконанні наступних умов:

- 1) роботу дозволяється виконувати тільки з наявності дозволу уповноваженої офіційної особи у відповідності із завданням, яке оформлено в виді наряду або розпорядження;
- 2) дії з електроустановками повинні проводити, як правило, не менше чим дві особи;
- 3) необхідно, щоб були виконані організаційні і технічні заходи, які забезпечували б персоналу безпеку робіт.

Організаційні заходи мають за мету забезпечити безпечну організацію виконання робіт в електроустановках для виключення нещасливих випадків з людьми при високій продуктивності праці і хорошою якістю робіт. Такими заходами є:

- а) видача нарядів і розпоряджень на хід робіт;
- б) допуск певної бригади до роботи;
- в) нагляд за бригадою протягом роботи;
- г) оформлення переривів в роботі і закінчення робіт.

Технічні заходи за метою забезпечити безпеки персонала при здійсненні робіт з повним або частковим виключенням напруги від електроустановки.

Ці заходи включають:

- а) хід необхідних відключень і прийняття мір для запобігання помилкового або мимовільного вмикання комутаційної апаратури (блокування, механічний запір приводів, зняття запобіжників тощо);
- б) вивішування переносних плакатів по техніці безпеки і при необхідності установки тимчасових огорожень;
- в) перевірка відсутності напруги на струмоведучих установках, призначених для роботи;
- г) накладання тимчасових заземлювачів.

Відповідальними за організацію і виконання високопродуктивного і безпечного процесу робіт в діючих електроустановках є:

- 1) особа, яка видає наряд або розпорядження на хід робіт в діючих електроустановках;
- 2) керівник робіт, які виконуються по наряду;
- 3) особа, яка видає відповідний дозвіл на підготовку робочого місця і допуск бригади робітників до роботи;
- 4) особа, яка підготовляє робоче місце;
- 5) особа, яка допускає бригаду до роботи;

б) наглядч.

В електроустановках вище 1000 В при роботах із зняттям напруги на місці ходу робіт повинні бути відключені:

- струмоведучі частини, на яких будуть про водитись роботи;
- неогорожені струмоведучі частини, до яких потрібно наближатися людям на відстанях менше допустимого або механізмам на відстанях менше приведених в таблиці 15.1.

Таблиця 15.1.

Найменші допустимі відстані від механізмів і вантажопід'ємних машин, а також від стропів, вантажозахватних пристроїв і вантажів до струмоведучих частин електричних установок, що знаходяться під напругою.

Напруга електроустановки, кВ	До 1	1-35	60-110	150	220	330	400-500	750	800 постійного струму
Найменша допустима відстань, м	1	1	1,5	2	2,5	3,5	4,5	6	4,5

Відключення повинно проводитися так, щоб виділені для роботи частини електроустановки або електрообладнання були відокремлені з усіх сторін від струмоведучих частин, які знаходяться під напругою. При цьому з кожної сторони, звідки комутаційним апаратом може бути подано напруга на робоче місце, повинний бути видимий розрив, утворений відключенням роз'єднувачів, зняттям запобіжників, відокремленням або зняттям шин і проводів. Видимий розрив може бути створений відключенням відокремлювачів і вимикачів навантаження, крім тих, у яких автоматичне включення проводиться пружинами, установленими на самих апаратах.

Для запобігання мимовільного або помилкового включення ручних приводів роз'єднувачів, відокремлювачів і вимикачів навантаження, якими може бути подано напругу до місця роботи, повинні бути заперті на замок у відключеному положенні. Якщо ж апарати мають дистанційне управління, то у їх приводів повинні бути вимкнені кола силового і оперативного струму, а в пневматичних приводах, крім того, повинен бути закритий і запертий на замок вентиль на підвідному трубопроводі зжатого повітря і випущене зжате повітря.

Для виключення можливості з'явлення напруги на відключеному частині внаслідок зворотної трансформації трансформатори напруги і силові трансформатори, пов'язана із цією частиною, необхідно відключити і зі сторони напруги до 1000 В, а також вивісити плакат "Не вмикати - працюють люди" (на рубильнику, автоматі, запобіжнику тощо). При цьому приводи відключаючих апаратів слід запирати механічно або встановлювати накладки між їх контактами.

В електроустановках до 1000 В із струмоведучих частин, на яких буде проводитись робота, напруга із всіх сторін повинна бути знята вимкненням комутаційних апаратів з наявністю ручного привода, а при присутності в схемі запобіжників - зняття останніх. Якщо відсутні в схемі запобіжники, то запобіжне помилкове включення комутаційних апаратів повинно бути забезпечено такими заходами, як запирання рукояток або дверець шафи, захист кнопок, спорудження між контактами ізолюючих накладок тощо. Якщо комутаційний апарат має дистанційне управління, то після його відключення повинні бути відокремлені кінці проводів від вмикаючої котушки цього апарата.

Якщо ж конструктивне виконання устаткування і характер електричних робіт дозволяє, перераховані вище заходи можуть замінюватися розшиновкою або відокремленням кінців кабеля, проводів від комутаційного апарата або від обладнання, на якому повинна проводитись робота.

Плакати по техніці безпеки вивішує персонал, який проводить відключення, відразу після відключення відповідного апарата, а також при підготовці робочого місця.

Тимчасові огороження встановлюють у сусідніх і протилежачих місцю робіт комірок РП, не маючих огорожень, в проходах до сусідніх приміщень електроустановки, в які не слід входити персоналу, а також у тих частин електроустановки, які близько розміщені до місця робіт і до непідключених частин яких можливе випадкове наближення на небезпечну відстань.

Для тимчасового огороження струмоведучих частин, які залишилися під напругою, можна застосовувати щити, ширми, екрани і т. п., виготовлені із дерева або інших ізоляційних матеріалів.

Плакати і огороження, які встановлюються при організації робочих місць, забороняється знімати або переставляти до повного закінчення робіт.

Відключені для роботи струмоведучі частини повинні бути тимчасово заземлені із всіх сторін, звідки може бути подано напруга, а провода повітряних ліній електропередачі, крім того, - на місці виконання робіт. Додатково заземлити відключені струмоведучі частини, тобто на робочому місці, необхідно і в інших електроустановках, якщо можливе виникнення на цих частинах наведеного потенціалу від впливу сусідніх частин, які залишилися під напругою.

Розрахунок заземлення приведено в Додатку А.

ВИСНОВКИ

У ході виконання магістерської роботи проаналізовано існуючі електричні режими дугової сталеливарної печі. Було розглянуто різні дугові сталеливарні печі та запропоновано проведення оптимізації електричного режиму саме дугової сталеливарної печі змінного струму.

На підставі рівнянь розрахунку електричної дуги змінного струму, за допомогою диференціального рівняння Кассі, була розроблена математична моделі в програмному пакеті MATLAB. За допомогою математичних моделей розраховано електричні, технологічні та робочі характеристики дугової сталеплавильної печі, враховуючи нелінійність дуги, умови її горіння і теплообмін для всіх стадій розплавлення металу. При дослідженні електричної дуги за рівнянням Кассі спостерігається найбільш точне уявлення про процеси, що протікають в ДСП.

Аналіз основних залежностей показав, що розміщення робочих точок не відповідає сучасним вимогам ведення плавки. Так, наприклад, сучасні положення ведення плавки металу в дугових сталеливарних печах свідчать: в момент запалювання дуг потрібно підтримувати максимум потужності дуги, під час утворення колодязів - максимум коефіцієнта зносу футеровки КЗФ, наприкінці плавки - максимум коефіцієнта інтенсивності нагріву КІН. Слід відзначити наступне: найбільш стійкий і симетричний режим горіння дуг спостерігається наприкінці плавки.

За допомогою математичної моделі, змінюючи опори по кожній фазі, шляхом зміни ступеней реактора та трансформатора, були отримані нові координати робочих точок, які відповідають оптимальним параметрам.

Запропоновано комбінований спосіб регулювання режиму плавки, оснований на дискретній зміні опору в колі дуги та плавному дорегулюванні автоматичною зміною відстані між електродом та розплавом. В ході дослідів параметрів плавки ДСП та застосування емпіричних залежностей, був запропоновано новий електричний режим, що дозволяє підвищити

економічну ефективність роботи ДСП та отримати значний економічний ефект.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Губинский В.И. Metallургические печи: Учеб. пособие. - Днепропетровск: НМетАУ, 2006. – 85 с.
2. Пат. 2216883 РФ, МПК Н 02 М 7/162, Н 05 В 7/144. Источник питания дуговой печи постоянного тока/ Нехамин С.М., Фарнасов Г.А., Филиппов А.К. и др. - Оpubл. 20.11.2003. - Бюл. №. 32.
3. Электродуговые печи постоянного тока. Попов А.Н., Крутянский М.М., Долгов В.В., Филиппов А.К.// Электromеталлургия. 1998. №2. С.11-15.
4. Филиппов А.К., Крутянский М.М., Фарнасов Г.А. Использование электропечей постоянного тока в металлургии// Сталь. 2002. №1. С.33-41.
5. Никольский Л. Е., Зинуров И.Ю. Оборудование и проектирование электросталеплавильных цехов. М.: Металлургия. 1993. 272 с.
6. Нехамин С.М., Крутянский М.М., Стомахин А.Я., Тимошенко С.Н., Черняк А.И. Пути улучшения показателей выплавки стали в малотоннажных дуговых печах. //Электromеталлургия. 2007. №7. С.2-7.
7. Никифоров Г.В., Олейников В.К., Заславец Б.И. Энергосбережение и управление энергопотреблением в металлургическом производстве//М.: Энергоатомиздат. 2003. 480 с.
8. Электрические промышленные печи: Дуговые печи и установки специального нагрева: Учебник для вузов / Свенчанский А.Д., Жердев И.Т., Кручинин А.М. и др.; под ред. Свенчанского А.Д.. 2-е изд., перераб. и доп. // М.: Энергоиздат. 1981. 296 с.
9. Миронов Ю.М. Закономерности электрических режимов дуговых сталеплавильных печей // Электричество. № 6. 2006. С. 56 – 62
10. Миронова А.М., Миронов Ю.М. Энерготехнологическая эффективность дуговых сталеплавильных печей: Учеб. пособие / Под ред. Ю.М. Миронова. Чебоксары: Изд-во Чуваш.ун-та.1999. 154 с.

11. Инновации для дуговых сталеплавильных печей. Научные основы выбора: монография / Ю.Н. Тулуевский, И.Ю. Зинуров. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. – 347с.
12. Игнатов И.И., Хаинсон А.В. Математическое моделирование электрических режимов дуговых сталеплавильных печей // Электричество. № 8. 1985. С. 69-72
13. Игнатов И.И., Хаинсон А.В. Расчет электрических параметров и режимов дуговых сталеплавильных печей // Электричество. № 8. 1983. С. 62-65
14. Кнооп М., Кёлле З.. Расчет трехфазных дуговых печей с высоким реактансом и высоким напряжением // Черные металлы. 1996. № 11. С. 20-21.
15. Середа Б.П. Обробка металів тиском. Навчальний посібник. – Запоріжжя: Видавництво Запорізької державної академії, 2009. – 343 с.
16. Воскобойников В.Г. и др. Общая металлургия - 6-изд., перераб. и доп. - М.: ИКЦ «Академкнига», 2005 - 768 с.
17. П.Г.Плешков, Ю.І.Казанцев, А.Ю.Орлович. Основи енергозбереження та енергозберігаючі режими в системах електропостачання промислових підприємств. – Кіровоград: РВЛ КНТУ 2007.
18. П.Г.Плешков, А.Ю.Орлович, Котиш А.І. Електропостачання промислових підприємств. Навчальний посібник. – Кіровоград: РВЛ КНТУ, 2007.
19. Методичні вказівки до виконання магістерських робіт на здобуття освітньо-кваліфікаційного рівня – магістр електротехніки за фахом 8.090603 «Електротехнічні системи електроспоживання». /Укл.: П.Г.Плешков, Н.Ю.Гарасьова – Кіровоград: КДТУ, 2002-44 с.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А. Розрахунок заземлення.

У відповідності із ПУЕ, всі металеві частини електроустановок, які в процесі роботи не мають з'єднання з струмопровідними частинами, але можуть потрапити під напругу, повинні бути заземлені.

Трансформаторні підстанції напругою 10/0,4 кВ на стороні 0,4 кВ мають глухозаземлену нейтраль. З'єднання обмоток цехових трансформаторів - Δ/Y з нулем. Струм замикання на землю 27 А. Для цехового обладнання використовують заземлення. Цехові підстанції отримують живлення від двох кабелів, що прокладені в одній траншеї. Грунт - чорнозем, другий кліматичний район. Розрахунок зводиться до визначення вертикальних заземлювачів і довжин з'єднувальної смуги з розміщенням на плані.

Визначимо норму на опір заземлення R_3^H . Якщо заземлюючий пристрій застосовується одночасно для електричних установок напругою до 1000 В та вище:

$$R_3 = U_p / I_3 = 125 / 27 = 4,63 \text{ Ом};$$

Згідно ПУЕ, так як сумарна потужність струмоприймачів більше 100 кВА то R_3 повинен бути не більше 4 Ом.

Визначимо розрахунковий питомий опір ґрунту:

$$\rho_p = \rho_{\text{табл}} \cdot \Psi = 200 \cdot 1,3 = 260 \text{ Ом}\cdot\text{м},$$

де $\rho_{\text{табл}}$ - табличне значення, для чорнозему $\rho_{\text{табл}} = 200 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ (табл.7.15.[5]; Ψ - підвищуючий коефіцієнт для стержньових заземлювачів. Для України $\Psi = 1,2 \dots 1,4$.

Опір одинарного вертикального заземлювача:

$$R_0 = 0,366 \cdot (\rho_p / l) \cdot (\lg(2 \cdot l / d) + (1/2) \cdot \lg((4 \cdot t + 1) / (4 \cdot t - 1))) = 0,366 \cdot (260 / 5) \cdot (\lg(2 \cdot 5 / 2,5 \cdot 10^{-3}) + (1/2) \cdot \lg((4 \cdot 3 + 1) / (4 \cdot 3 - 1))) = 53,19 \text{ Ом},$$

де l - довжина заземлювача, приймаємо 5 м; d - діаметр заземлювача (приймаємо стрижні діаметром 2,5 см).

$$t = h + l/2 = 0,5 + 5/2 = 3\text{ м};$$

де h - глибина прокладки смуг (згідно ПУЕ - 0,5...0,8 м).

Приймаємо електроди прокладені по замкнутому контуру згідно плану знаходимо орієнтовну кількість заземлювачів:

$$n_0 = R_B / (R_3^H \cdot \eta_0) = 53,19 / (4 \cdot 0,59) = 22,54 \approx 23 \text{ шт.}$$

Де η_0 - коефіцієнт використання ряду заземлювачів, для $a/l = 4/5 = 0,8$, $\eta_0 = 0,59$ (рис. 7.5[5], де $a = 4$ м - відстань між електродами згідно ПУЕ.

Довжина горизонтальної з'єднувальної смуги:

$$l_n = 1,05 \cdot a \cdot n = 1,05 \cdot 4 \cdot 23 = 96,6 \text{ м.}$$

Опір смуги з урахуванням екранування:

$$R_n = 0,366 \cdot ((\rho_p) / (l_n \cdot \eta_n)) \cdot \lg((2 \cdot l_n^2) / (b \cdot n)) = 0,366 \cdot ((260) / (96,6 \cdot 0,51)) \cdot \lg((2 \cdot 96,6^2) / (0,01 \cdot 23)) = 9,48 \text{ Ом};$$

Де η_n - коефіцієнт використання з'єднувальної смуги шириною $b = 10$ мм та товщиною 5 мм.

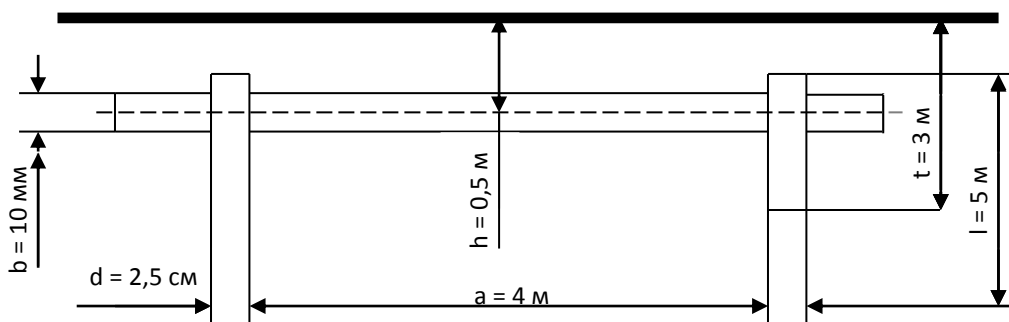


Рис.15.1. Схема прокладки заземлення.

Необхідний опір вертикальних заземлювачів з урахуванням опору з'єднувальної смуги:

$$R_{тр} = (R_n \cdot R_3^H) / (R_n - R_3^H) = (9,48 \cdot 4) / (9,48 - 4) = 6,92 \text{ Ом}$$

Остаточна кількість заземлювачів:

$$n = R_0 / (R_{тр} \cdot \eta_0) = 53,19 / (6,92 \cdot 0,59) = 13,02 \approx 13 \text{ шт.}$$

Виконаємо перевірку опору заземлювача і порівняємо отримане значення з нормуємим:

$$R_3 = 1 / ((1/R_{тр}) + (1/R_n)) = 1 / ((1/6,92) + (1/9,48)) = 3,74 \text{ Ом.}$$

Таким чином, розрахункове значення заземлювача задовольняє заданій умові.

ДОДАТОК Б. Звіт подібності.