

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім.Ю.В. Потебні

КАФЕДРА ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

рівень вищої освіти другий магістерський

на тему Підвищення енергоефективності індукційної тигельної печі ІЧТ – 2,5

Виконав: студентка 2 курсу, групи 8.1410-з

Заболотна Оксана Валеріївна

(ПІБ)

(підпис)

спеціальності

141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»

(шифр і назва)

освітньо-професійна програма

«Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»

(шифр і назва)

Керівник Башлій С.В.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Запоріжжя
2021 року

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра електротехніки та енергоефективності
Рівень вищої освіти другий магістерський
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(код та назва)
Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код та назва)
Спеціалізація _____
(код та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри В. А. Новачук
« 07 » 12 20 21 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ
«МАГІСТР»

Заболотній Оксані Валеріївні
(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи Підвищення енергоефективності індукційної тигельної печі ІЧТ-2,5

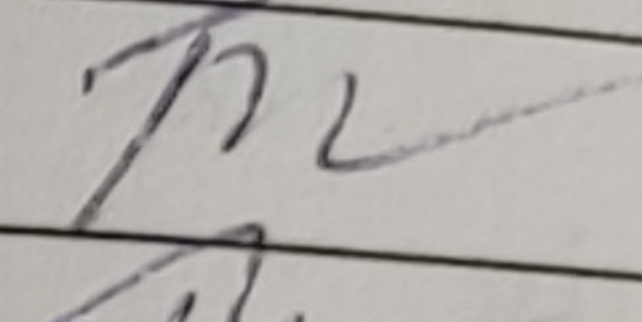
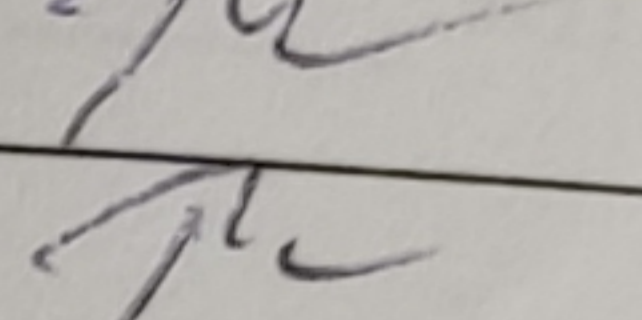
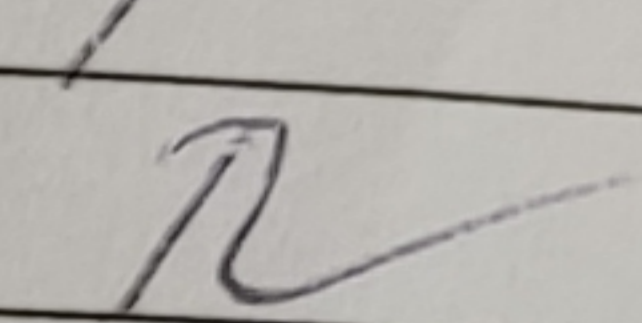
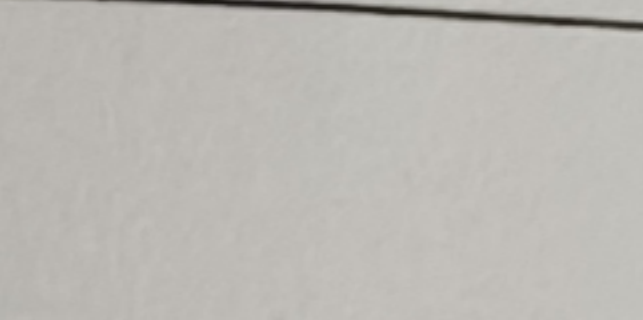
Керівник роботи Башлій Сергій Вікторович, канд. техн. наук, доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджено наказом ЗНУ від « 30 » 06 2021 року № 974-с

- 1 Строк подання студентом роботи 05.12.21
- 2 Вихідні дані до роботи параметри споживачів підприємства, план розташування електрообладнання, паспортні дані обладнання.
- 3 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Вступ; 2. Дослідження роботи пристрою автоматичного керування компенсацією реактивної потужності печі індукційного нагріву тигельного типу; 3. Техніко-економічне обґрунтування енергозберігаючого заходу; 4. Охорона праці; 5. Висновки; 6. Перелік посилань.

креслень) графічного матеріалу (з точним зазначенням обо

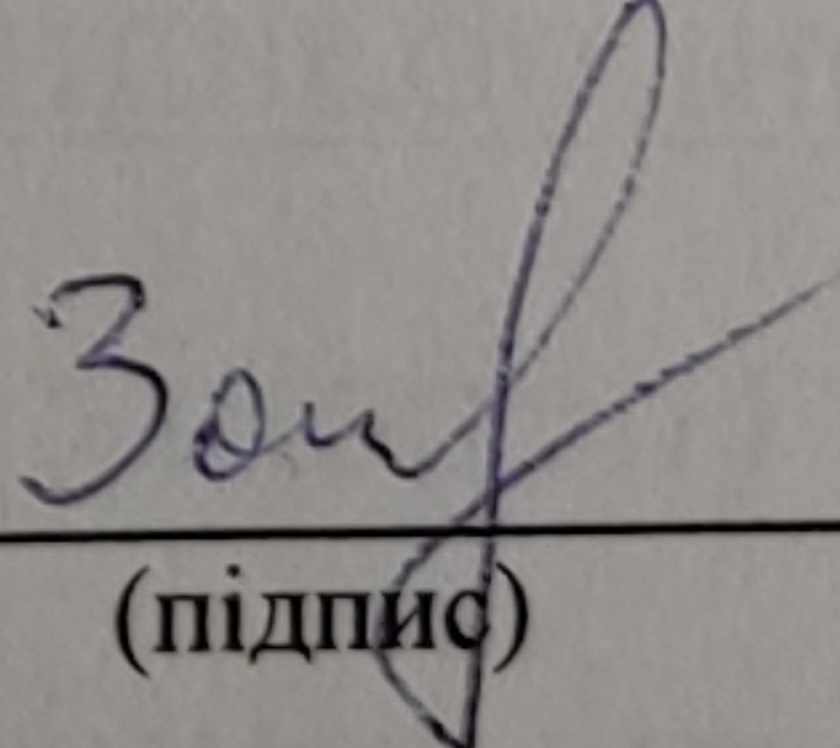
5 Консультанти розділів роботи

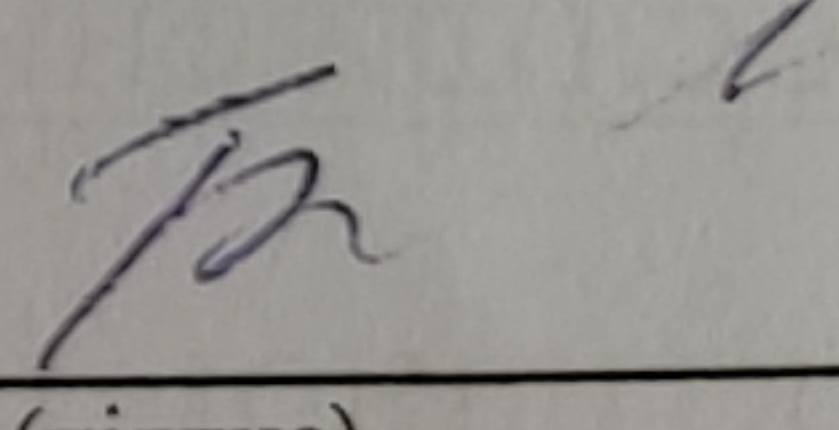
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	за
1	Башлій С.В.		
2	Башлій С.В.		
3	Башлій С.В.		
4	Башлій С.В.		

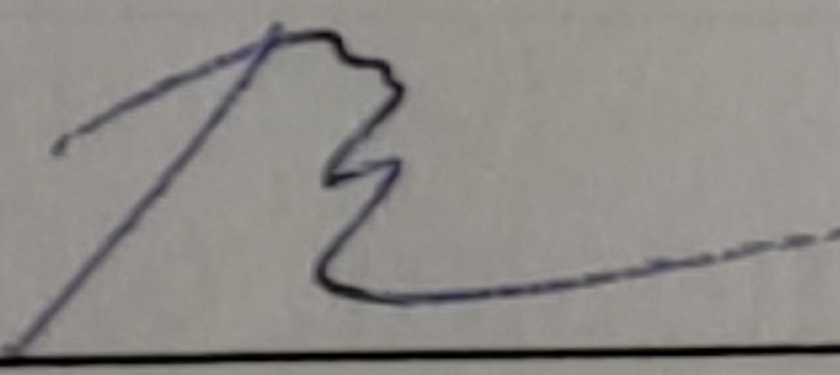
6 Дата видачі завдання 05 травня 2021 р

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	
1	Загальна характеристика ливарного цеху підприємства «Мотор Січ»	05.05.2021	
2	Дослідження роботи пристрою автоматичного керування компенсацією реактивної потужності печі індукційного нагріву тигельного типу	03.08.2021	
3	Техніко-економічне обґрунтування енергозберігаючого заходу	01.09.2021	
4	Охорона праці та техногенна безпека	05.11.2021	
5	Оформлення пояснювальної записки	01.12.2021	
6	Підготовка презентації	03.12.2021	

Студент 
(підпис)

Керівник роботи (проекту) 
(підпис)

Нормоконтроль здійснив 
(підпис)

О.В. Заболотна
(ініціали та прізвище)

С.В. Башлій
(ініціали та прізвище)

С.В. Башлій
(ініціали та прізвище)

Заболотна
ІЧТ – 2,5
діальністю
ковий кер
сенерний
ергоефектив
Стор. – 1
У магист
варному цех
Складен
авлення у
емпературні
У прог
изначені е
коєфіцієнт п
компенсуючи
конденсаторн
На осн
автоматично
обладнанні
енергоефект
ІНДУКЦІЙН
ПОТУЖНІС
КОНДЕНСА

АНОТАЦІЯ

Заболотна О.В. Підвищення енергоефективності індукційної тигельної печі ІЧТ – 2,5. Кваліфікаційна робота магістра на здобуття вищої освіти за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», науковий керівник С.В.Башлій. Запорізький національний університет, Інженерний науково-навчальний інститут, кафедра електротехніки та енергоефективності. Запоріжжя, 2021.

Стор. – 111; рис. – 28; табл. – 20; джерел – 40.

У магістерській роботі розглянута піч типу ІЧТ-2,5, яка встановлена у ливарному цеху на підприємстві «Мотор Січ».

Складена і проаналізована схема заміщення індукційної печі. Процес плавлення умовно поділено на температурні ділянки, і на кожній температурній ділянці проведено електричний розрахунок печі.

У програмі Microsoft Excel проведено електричний розрахунок печі: визначені еквівалентні електричні опори навантаженого індуктора, коефіцієнт потужності індуктора, обчислено необхідну ємність батареї компенсуючих конденсаторів та відповідну їй реактивну потужність конденсаторної батареї.

На основі розрахунків обраний найкращий режим роботи системи автоматичного керування компенсацією реактивної потужності при обладнанні індукційної тигельної печі ІЧТ-2,5 для підвищення її енергоефективності.

ІНДУКЦІЙНА ПІЧ, КОНТРОЛЕР, СХЕМА ЗАМІЩЕННЯ, РЕАКТИВНА ПОТУЖНІСТЬ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, ІНДУКТОР, БАТАРЕЯ КОНДЕНСАТОРІВ, ШИХТА, ЕЛЕКТРИЧНИЙ ОПІР

ANNOTATION

Zabolotna O.V. Improving the energy efficiency of the ICT induction crucible furnace - 2.5. Qualifying work of the master for higher education in the specialty 141 "Electric power, electrical engineering and electromechanics", supervisor S.V. Bashliy. Zaporizhzhya National University, Engineering Research and Training Institute, Department of Electrical Engineering and Energy Efficiency. Zaporozhye, 2021.

P. - 111; Fig. - 28; table - 20; sources – 40.

In the master's thesis the furnace of type ICT-2,5 which is established in foundry shop at the Motor Sich enterprise is considered.

The substitution scheme of the induction furnace is made and analyzed. The melting process is conditionally divided into temperature sections, and an electrical calculation of the furnace is performed at each temperature section.

In Microsoft Excel, the electric calculation of the furnace was performed: the equivalent electrical resistances of the loaded inductor, the inductor power factor, the required capacity of the compensating capacitor bank and the corresponding reactive power of the capacitor bank were determined.

Based on the calculations, the best mode of operation of the automatic control system of reactive power compensation at the equipment of the induction crucible furnace ICT-2.5 was selected to increase its energy efficiency.

INDUCTION OVEN, CONTROLLER, SUBSTITUTION SCHEME, REACTIVE POWER, ENERGY EFFICIENCY, INDUCTOR, CAPACITOR BATTERY, BATCH, ELECTRIC

АННОТАЦИЯ

Заболотная О.В. Повышение энергоэффективности индукционной тигельной печи ИЧД – 2,5. Квалификационная работа магистра на соискание высшего образования по специальности 141 «Электроэнергетика, электротехника и электромеханика», научный руководитель С.В.Башлий. Запорожский национальный университет, Инженерный научно учебный институт, кафедра электротехники и энергоэффективности. Запорожье, 2021.

Стр. – 111; рис. – 28; табл. – 20; источников – 40.

В магистерской работе рассмотрена печь типа ИЧД-2,5, установленная в литейном цехе на предприятии «Мотор Сич».

Составлена и проанализирована схема замещения индукционной печи. Процесс плавления условно разделен на температурные участки, и на каждом температурном участке произведен электрический расчет печи.

В программе Microsoft Excel произведен электрический расчет печи: определены эквивалентные электрические сопротивления груженого индуктора, коэффициент мощности индуктора, вычислена необходимая емкость батареи компенсирующих конденсаторов и соответствующая ей реактивная мощность конденсаторной батареи.

На основе расчетов выбран наилучший режим работы системы автоматического управления компенсацией реактивной мощности при оборудовании индукционной печи ИЧД-2,5 для повышения ее энергоэффективности.

ИНДУКЦИОННАЯ ПЕЧЬ, КОНТРОЛЕР, СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ,
РЕАКТИВНАЯ МОЩНОСТЬ, ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ, ИНДУКТОР,
БАТАРЕЯ КОНДЕНСАТОРОВ, ШИХТА, ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ
СОПРОТИВЛЕНИЕ

ЗМІСТ

Вступ.....	9
1 Загальна характеристика ливарного цеху підприємства «Мотор Січ»...12	
1.1 Коротка інформація про підприємство «Мотор Січ».....12	
1.2 Опис технологічного процесу ливарного цеху.....13	
1.3 Аналіз енергоспоживання ливарного цеху. Затрати на енергетичні ресурси.....19	
1.3.1. Розрахунок витрат електроенергії.....19	
1.3.2 Розрахунок витрат стиснутого повітря.....21	
1.3.3 Розрахунок витрат води.....22	
1.3.4 Розрахунок витрат пари.....22	
1.4 Опис основного технологічного обладнання ливарного цеху. Визначення потужності та річного споживання електроенергії кожною одиницею обладнання.....24	
2 Дослідження роботи пристрою автоматичного керування компенсацією реактивної потужності печі індукційного нагріву тигельного типу.....33	
2.1 Опис конструкції та принципу дії індукційної тигельної печі.....33	
2.2 Контролер керування компенсацією реактивної потужності індукційної печі промислової частоти.....36	
2.2.1 Обґрунтування необхідності впровадження пристрою автоматичного керування компенсацією реактивної потужності при роботі індукційної печі.....36	
2.2.2 Опис контролера.....38	
2.2.3 Технічні характеристики контролера.....41	
2.2.4 Схемна реалізація контролера при обладнанні ним індукційної тигельної печі для плавки алюмінію ІАТ-1.....44	
2.3 Розрахунок режиму роботи системи автоматичного керування компенсацією реактивної потужності індукційної тигельної печі ІЧТ-2,5.....48	

2.3.1	Опис роботи контролера при компенсації змінної у часі реактивної потужності індуктора індукційної тигельної печі.....	48
2.3.2	Опис послідовності електричного розрахунку індукційної тигельної печі.....	50
2.3.3	Вихідні данні для проведення електричного розрахунку індукційної тигельної печі для плавки чавуну ІЧТ-2,5.....	63
2.3.4	Проведення електричного розрахунку індукційної тигельної печі.....	64
2.3.5	Визначення режиму роботи контролера в системі автоматичного керування компенсацією реактивної потужності на кожному етапі процесу плавлення.....	72
2.4	Розрахунок та вибір конденсаторних батарей для компенсації реактивної потужності.....	79
3	Техніко-економічне обґрунтування енергозберігаючого заходу.....	83
4	Охорона праці та техногенна безпека.....	89
4.1	Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів.....	89
4.2	Заходи з поліпшення умів праці.....	92
4.3	Виробнича санітарія.....	95
4.4	Електробезпека. Розрахунок захисного заземлення.....	97
4.5	Пожежна безпека.....	101
4.6	Засоби індивідуального захисту.....	103
	Висновки.....	106
	Перелік посилань.....	108

ВСТУП

Актуальність теми. Енергозбереження в промисловості організувати можна за допомогою багатьох способів. Успішно використовується автоматизація проведених технологічних процесів, а також самої структури конкретних підприємств. Ефективний результат приносить і реконструкція систем енергопостачання підприємств і окремих промислових об'єктів. Вибір шляху, що дозволяє організувати ефективне енергозбереження в промисловості, залежить від індивідуальних особливостей конкретних підприємств, енергозберігаючої політики регіону, положень програми про енергозбереження, зацікавленості керівництва підприємств і властей. Головною мотивацією енергозбереження виступають грошові кошти та енергія. При лімітованому доступі до електроенергії додатково виникає мотив економії. Дана проблема повинна розглядатися комплексно та енергозбереження в промисловості повинно сприйматися як один з основних напрямів щодо скорочення витрат.

Об'єкт дослідження – плавильний комплекс, оснащений індукційною тигельною піччю ІЧТ-2,5.

Предмет дослідження – компенсація реактивної потужності, що споживає плавильний комплекс, оснащений індукційною тигельною піччю ІЧТ-2,5.

Мета дослідження. Підвищення енергоефективності індукційної тигельної печі ІЧТ-2,5 шляхом компенсації споживаної нею реактивної потужності.

Методи дослідження – теорія, статистичний аналіз з використанням математичного апарату.

Основні завдання магістерської роботи:

1. Виявити місце плавильної індукційної тигельної печі ІЧТ-2,5 серед технологічного обладнання ливарного цеху за споживанням електричної енергії;
2. Проаналізувати процес споживання активної та реактивної електричної енергії у ході індукційної плавки;

3. Скласти та проаналізувати схему заміщення індукційної плавильної установки;

4. На основі вихідних технологічних даних провести електричний розрахунок індукційної тигельної печі;

5. Виявити потрібні режими роботи системи автоматичної компенсації реактивної потужності на кожному етапі процесу плавлення для покращення величини коефіцієнту потужності індукційної установки;

6. Вибрати відповідне обладнання для впровадження системи автоматичної компенсації реактивної потужності печі ІЧТ-2,5.

Наукова новизна. Запропоновано алгоритм впровадження та подальший розвиток дослідження методів впровадження системи автоматичного керування компенсацією споживаної реактивної потужності для підвищення енергоефективності печі ІЧТ-2,5.

Практичне значення отриманих результатів. Практичним значенням отриманих результатів є проведене технічне переоснащення електричного обладнання цеху, що дозволить знизити витрати потужності та електроенергії підприємства.

Особистий внесок. Розроблено алгоритм керування змінного навантаження компенсаційної конденсаторної установки. Запропоновано спеціалізований контролер імпу АРМ/Ш.

Апробація. Основні положення і результати магістерської роботи доповідалися і обговорювалися на I Всеукраїнській науково – практичній конференції здобувачів вищої освіти, аспірантів та молодих вчених «Актуальні питання сталого науково – технічного та соціально – економічного розвитку регіонів України» (19-21 жовтня 2021р., м.Запоріжжя); доповіли на наукованому семінарі кафедри електротехніки та енергоефективності Інженерного науково-навчального інституту імені Ю.М.Потебні Запорізького національного університету (2021р., м. Запоріжжя).

Структура роботи. Робота складається з вступу, 4 розділів, висновків, переліку посилань (36 найменувань).

Загальний обсяг текстової частини – 109 сторінок, 20 таблиць, 28 рисунків.

1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ЛИВАРНОГО ЦЕХУ ПІДПРИЄМСТВА «МОТОР СІЧ»

1.1 Коротка інформація про підприємство «Мотор Січ»

Повна назва підприємства: акціонерне товариство «Мотор Січ».

Чисельність працівників підприємства: 21860 чоловік.

Спеціалізація: розробка і виробництво газотурбінних двигунів для військової і цивільної авіації, промислових установок наземного застосування (газотурбінні електростанції, газоперекачуючі агрегати, теплоенергокомплекси).

«Мотор Січ» - найбільший виробник авіадвигунів в СНД. Компанія робить двигуни для літаків, вертольотів, а також промислове устаткування і газотурбінні приводи. Запорізьке акціонерне товариство «Мотор Січ» - одне з найбільших у світі і єдине на Україні підприємство з виробництва, випробування, супроводу в експлуатації і ремонту 55 типів і модифікацій економічних і надійних двигунів для 61 виду літаків і вертольотів різного призначення, що експлуатуються в 106 країнах світу .

Високопрофесійні кадри, унікальна виробнича база в поєднанні з передовими технологіями дозволяють з повним правом сказати, що сьогодні АТ «Мотор Січ» впевнено посідає гідне місце у світовому співтоваристві провідних авіадвигунобудівних фірм. Тісна співпраця з розробниками і численними партнерами з Росії і України дозволяють підприємству створювати двигуни, за якими майбутнє повітряних трас.

Продукція підприємства:

- авіадвигуни для літаків;
- авіадвигуни для гелікоптерів;
- допоміжні силові установки;
- наземні газотурбінні двигуни;
- товари народного споживання.

1.2 Опис технологічного процесу ливарного цеху

На Запорізькому моторобудівному заводі АТ «Мотор Січ» виробничі цеха розділяють на: основні, механічні та допоміжні. Ливарний цех відноситься до цехів основного виробництва, з якого починається процес виготовлення продукції.

У ливарному цеху №10 виготовляються вироби та деталі з чавуну, які призначені для товарів народного споживання, складові частини корпусів наземної техніки та запасні частини для механічного парку підприємства. Перелік декотрих відливок представлено у таблиці 1.1

Таблиця 1.1 – Специфікація відливок

Найменування виробу	Марка металу	Маса, кг			Габаритні розміри деталі, мм
		Відливка	Деталь	Літникова система	
Перехід 80-50	СЧ20	12,0	11,6	3,0	195x195x40
Перехід 100-50	СЧ20	14,0	13,6	3,7	215x215x50
Корпус ВМХ-100	СЧ20	92,0	87,0	24,0	500x480x200
Корпус МЗВ-80	СЧ20	13,0	12,0	9,0	211x183x200
Корпус МЗВ-50	СЧ20	9,3	8,9	9,0	171x156x165
Кришка	СЧ20	1,63	1,4	1,5	120x97x96
Перехід 80-65	СЧ20	11,0	10,5	3,5	195x195x400
Перехід 100-50	СЧ20	14,0	13,6	3,7	215x215x50
Корпус ВПД-65	СЧ20	95,1	90,6	27,5	550x500x200
Перехід 80-50	СЧ20	12,0	11,6	3,0	195x195x400

Ливарний цех має у своєму складі наступні відділення: плавильне, формувально-заливне, ділянка обробки лиття, ділянка ґрунтовки відливок. План цеху зі схемою вантажних потоків наведено на рисунку 1.1

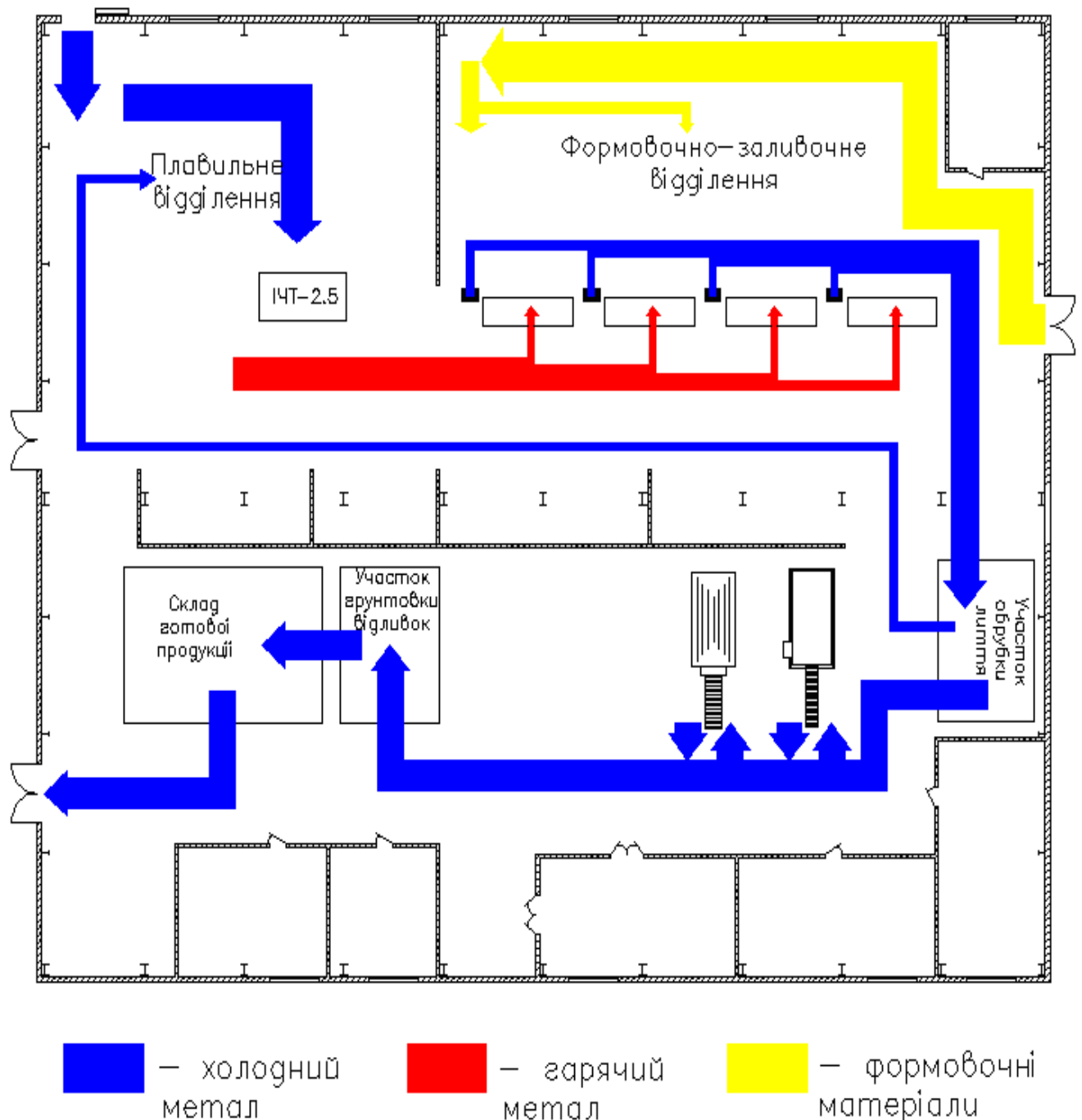


Рисунок 1.1 - План цеху зі схемою вантажних потоків

Схема технологічного процесу та перелік задіяного на кожному етапі основного технологічного обладнання наведено на рисунку 1.2.

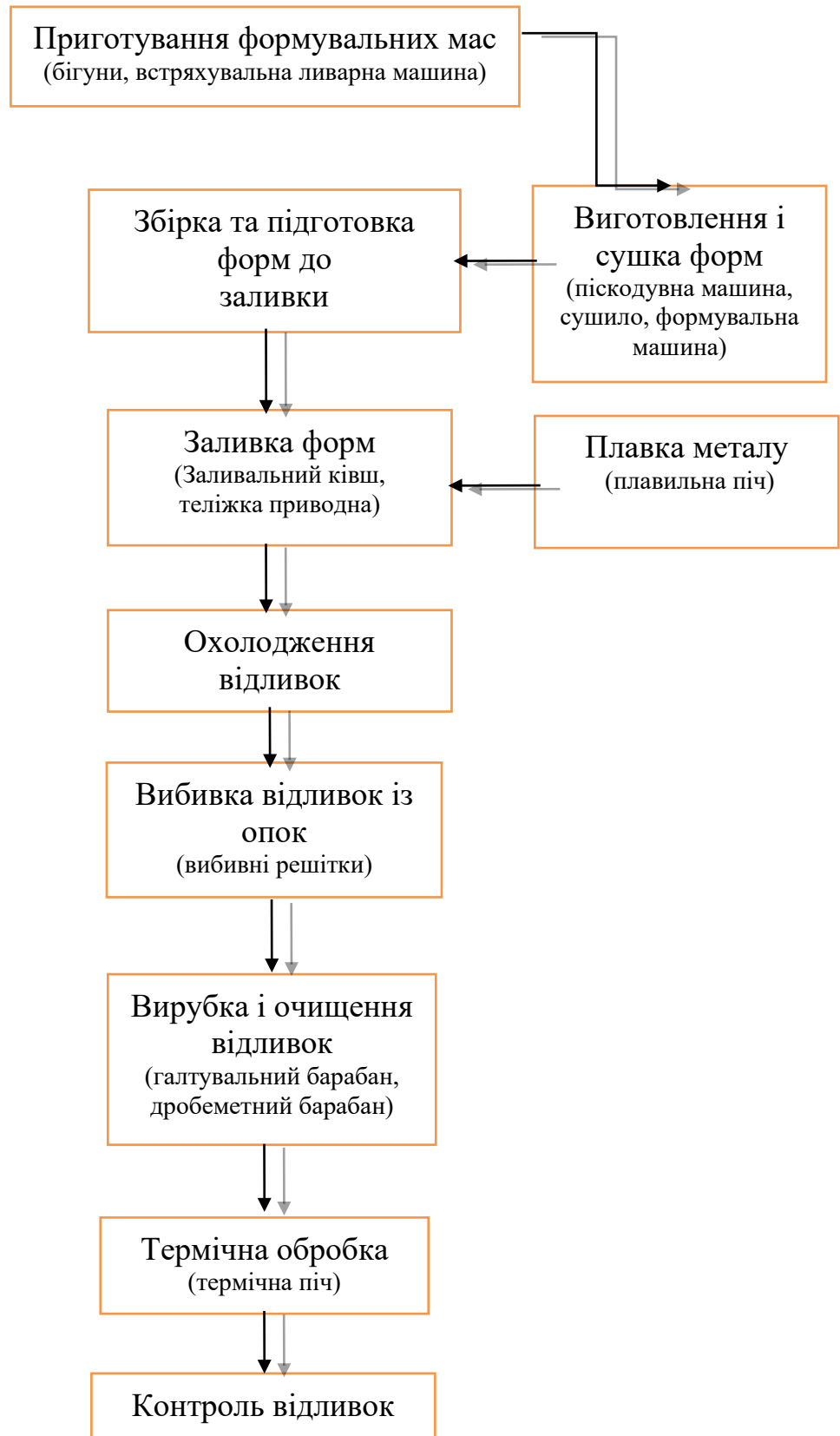


Рисунок 1.2 - Технологічний процес та основне технологічне обладнання ливарного цеху АТ «Мотор Січ»

Для виплавки чавуну у плавильному відділенні використовується наступне устаткування:

- індукційна піч ІЧТ-2,5 з кислим футеруванням;
- ківш розливний;
- стенд для підігріву ковша;
- форма для заливки проб для випробування механічних властивостей;
- кокіль для відливання проб для визначення хімічного складу;
- ложка для відбору і заливки проб;
- скребок для видалення шлаку;
- короб для шлаку.

Шихтові матеріали завантажуються з окремих контейнерів за допомогою вагових дозаторів і стрічкового конвеєра в баддю. Баддя на візку пересувається в пічний проліт. Після підігріву шихти баддю за допомогою крана поміщають над відкритим тиглем печі, низ бадді розкривається і шихта завантажуються в піч.

Завантажувати тигель вище за рівень індуктора не рекомендується, оскільки це уповільнює плавку.

Після закінчення завантаження тигель слід закрити керамічною кришкою і включити струм.

Для контролю якості і коректування металу по хімічному складу проводять:

- відбір проби на хімічний аналіз;
- скачування шлаку графітовою ложкою;
- вимір температури металу.

Коректування чавуну по хімічному складу здійснюють шляхом введення відповідного компонента шихти.

Для випуску металу з печі в ківш і його доведення потрібно:

- заміряти температуру металу в печі за допомогою термопар занурення.

Температура розплаву повинна складати 1450...1470 °С;

- прогріти до почервоніння ківш на стенді підігріву;
- підвести ківш до плавильної печі за допомогою крана;
- зняти напругу з індуктора;

- включити механізм повороту печі і здійснити випуск металу з печі в ківш.

Нахил тигля печі проводити без ривків і поштовхів;

- після зливу металу піч повернути в початкове положення, очистити тигель і шкарпетку печі від залишків шлаку;

- за допомогою крана транспортувати ківш з металом до місця скачування шлаку;

- за допомогою скребка видалити шлак з поверхні розплаву з ковша в шлаковий короб;

- за допомогою ложки узяти пробу і відлити зразок для визначення механічних властивостей;

- за допомогою крана транспортувати ківш з металом до місця його розливання у форми;

- перед заливкою ливарних форм зміряти температуру розплаву в ковші за допомогою термометри занурення. Температура розплаву повинна бути не нижче 1300...1320 °С.

У формувально-заливальному відділенні здійснюють процес виготовлення піщаних форм і заливку металу в них.

Нагріта пластикна плівка накладається на модель, яка встановлена в закритому коробі, де потім створюється вакуум. Далі плівка, фанерована на модель, піддається забарвленню. На короб з моделлю встановлюється опока. У форму засипається дрібнозернистий, незв'язаний кварцовий пісок, який ущільнюється за допомогою вібрації.

Після накладення покривної плівки з піску відкачується повітря, і таким чином форма ущільнюється. Для знімання форми вакуум на моделі замінюється невеликим надмірним тиском.

До, в час і після заливки сама форма залишається під вакуумом. Для відділення відливки вакуум, підтримуваний у формі, забирається. Пісок і відливка випадають з опоки без якої-небудь сторонньої дії.

Вибівка відливок відбувається на інерційних ґратах з трибічним верхнебоковим шатровим зонтом, двостороннім відсмоктуванням і подачею

компенсуючого повітря. Далі пісок потрапляє в систему піскообороту. Спочатку пісок зсипається за допомогою віброжолобу в установку охолодження піску в киплячому шарі, потім вже охолоджений пісок перфорованим пластинчастим конвеєром транспортується в завантажувальний лоток елеватора. Через розвантажувальний лоток, готовий до повторного використання пісок, поступає в бункер установки вакуумно-плівкового формування.

Якщо через шар зернистого матеріалу продувати знизу повітря, то досягши деякої швидкості повітря частинки матеріалу починають дуже швидко і хаотично переміщатися, утворюючи якби киплячу рідину. Це схожість не тільки зовнішня: такий так званий киплячий шар матеріалу підкоряється законам гідростатики і володіє текучістю.

Наявність великої поверхні контакту твердих частинок з газовим середовищем і інтенсивне перемішування частинок обумовлюють ефективний теплообмін і масообмін між частинками і газовим потоком. Це дозволяє ефективно використовувати киплячий шар для охолодження піску.

У відділенні фінішних операцій (ділянці обрубубання литва) проводять очищення відливок в галтувальному та дробеметному барабанах.

Видалення заливів, що залишилися після вибійки, швів і інших нерівностей на зовнішніх і внутрішніх поверхнях відливок, а також вирубку дефектів для заварки, технологічних (помилкових) ребер у відливках виконують пневматичними рубальними молотками із зубилами (моделі МР-4).

Далі відливання піддаються штучному старінню в камерних термічних печах опору.

Для зачистки живильників, прибутків і інших дрібних нерівностей на зовнішніх поверхнях чавунних відливок застосовують спеціальні установки, забезпечені абразивними корундовими кругами. Задирки, гострі кромки і інші подібні нерівності відливань видаляють на спеціальних вібраційних машинах і на заточувальних шліфувальних верстатах.

Основними методами виправлення дефектів відливок є декоративне закладення дрібних поверхневих раковин пастами - мастиками і замазками,

просочення спеціальними складами (водним розчином амонія) для усунення пористості відливань, газова або електрична сварка.

Грунтовку застосовують для захисту відливок від корозії при їх тривалому зберіганні або транспортуванні. Забарвленню піддають зовнішні і внутрішні поверхні відливок, що не підлягають обробці різанням, спеціальною густою фарбою (грунтом). Перед грунтовкою відливки її поверхню очищають від піску і пилу у мийних установках струменем їдкового натра.

Відливки грунтують у прохідних камерах забарвлення на підвісних конвеєрах зануренням в бак з фарбою. Після грунтовки відливки сушать в прохідній сушильній камері.

Контроль відливок здійснюється на двох етапах: після зачистки (проміжний) і остаточний.

Брак власного виробництва (літники і браковані відливки) після різання доставляється у шихтове відділення електронавантажувачем в контейнерах, для подальшої переплавки.

Готові відливки зберігаються на цеховому складі відливок, обладнаним уніфікованою оборотною тарою і штабелером, що забезпечує багаторівне механізоване укладання продукції.

1.3 Аналіз енергоспоживання ливарного цеху. Затрати на енергетичні ресурси

1.3.1. Розрахунок витрат електроенергії

Електроенергія поступає в цех по кабелях від головної знижувальної підстанції при напрузі 6 кВ.

У ливарних цехах спожива електроенергія витрачається на наступні цілі:

а) технологічні – плавка металу, обробка виливків, електроприводи двигунів технологічного обладнання та інші;

б) освітлення приміщень.

Річна витрата електроенергії на технологічні потреби розраховується на основі встановленої потужності технологічного обладнання та кількості годин його роботи.

Укрупнений розрахунок ведуть за нормами витрат електроенергії на 1т придатного литва за формулою:

$$W_T = \sum P_T \cdot G, \quad (1.1)$$

де W_T – річні витрати електроенергії на технологічні потреби, кВт·год;

$\sum P_T$ - питома витрата технологічної електроенергії на 1т придатного литва за один рік (згідно даних ливарного цеху підприємства), $\sum P_T = 3800$ кВт·год/т;

G – випуск придатних виливків, згідно цехових даних $G = 2000$ т/рік.

$$W_T = 3800 \cdot 2000 = 7600000 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

Розрахунок електроенергії на освітлення проводиться за формулою:

$$W_0 = 0,001 \cdot \rho \cdot F \cdot T_0, \quad (1.2)$$

де W_0 – річна витрата електроенергії на освітлення, кВт·год;

ρ – середні витрати електроенергії за годину на 1м² освітленої площі ($\rho = 18$ Вт/м² - нормативні дані витрати електроенергії на освітлення для виробничих приміщень та $\rho = 8$ Вт/м² - нормативні дані витрати електроенергії на освітлення невиробничих приміщень);

F – освітлювана площа, площа виробничих приміщень складає 2419 м², невиробничих приміщень - 1037 м²;

T_0 - річний фонд роботи освітлювального обладнання, $T_0 = 2300$ год.

$$W_0 = 0,001 \cdot (1 \cdot 18 \cdot 2419 + 8 \cdot 1037) \cdot 2300 = 239,03 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

Загальні річні витрати електроенергії W у ливарному цеху знаходяться за формулою:

$$W = k (W_T + W_O), \quad (1.3)$$

де k - коефіцієнт втрат електроенергії в мережі, $k = 1,05$.

$$W = 1,05 \cdot (7600000 + 236812) = 8228652 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

1.3.2 Розрахунок витрат стиснутого повітря

Стиснуте повітря поступає із заводської компресорної станції під тиском 6 атмосфер.

У ливарному цеху на стиснутому повітрі працюють пневмоінструмент, обдувальний інструмент та інше обладнання.

Укрупнений розрахунок витрати повітря на 1т придатного литва ведеться за формулою:

$$Q_{\text{в.р.}} = 1,5 \cdot q \cdot G, \quad (1.4)$$

де $Q_{\text{в.р.}}$ - річні витрати стиснутого повітря, м³;

коефіцієнт 1,5 враховує втрати повітря при витіканні та виконанні непередбачених робіт;

q - витрати стислого повітря на 1т придатного литва за один рік - дані ливарного цеху підприємства, $q=1200 \text{ м}^3/\text{т}$;

G – випуск придатних виливків, згідно цехових даних $G = 2000 \text{ т/рік}$.

$$Q_{\text{в.р.}} = 1,5 \cdot 1200 \cdot 2000 = 3600000 \text{ м}^3.$$

1.3.3 Розрахунок витрат води

Вода у ливарному цеху використовується для охолодження обладнання та на інші цілі.

Укрупнений розрахунок витрат води проводимо на 1т придатного литва за формулою:

$$V_{\text{в}} = H_{\text{в}} \cdot GT, \quad (1.5)$$

де $V_{\text{в}}$ – річні витрати води, м³;

$H_{\text{в}}$ – витрати води на 1т придатного литва, $H_{\text{в}}=115$ м³ - цехові дані;

GT – випуск придатних виливків, згідно цехових даних $GT = 2000$ т/рік.

$$V_{\text{в}} = 115 \cdot 2000 = 230000 \text{ м}^3.$$

1.3.4 Розрахунок витрат пари

Річна потреба пари на опалення та вентиляцію у тонах складає:

$$Q_n = \frac{q_T \cdot m \cdot V}{i \cdot 10^6} \quad (1.6)$$

де q_T – витрати теплоти на 1м³ будівлі, $q_T=103,4$ Дж/м³;

m – кількість годин в опалювальному періоді, $m=4320$ год;

V – об'єм будівлі, $V = 28123$ м³;

i – теплота випарення, $i = 2235$ Дж.

$$Q_n = \frac{1 \cdot 0 \cdot 3}{2 \cdot 12 \cdot 0} = 5^4 \cdot 0 \cdot 6.$$

Таким чином маємо:

- загальні витрати (технологічні та освітлення) електроенергії по цеху – 8228652 кВт·год;

- витрати стиснутого повітря – 3600000 м³;

- витрати води – 230000 м³;

- витрати пару – 56207 т.

Структура витрат на споживання енергії розглянута в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Структура витрат на споживання енергії у ливарному цеху

Вид енергії	Одиниці вимірювання	Величина	Тариф розрахунковий, грн.	Витрати цеху, грн.
Електрична енергія	кВт·год	8228652	3,61	29705435
(освітлення)	кВт·год	236812	3,61	854892
Стиснуте повітря	м ³	3600000	5,88	21168000
Вода	м ³	230000	24,168	5558640

Пара	т	56207	31,48	1769397
Теплова енергія	—	—	—	1023240

Графічно структура витрат на споживання електричної енергії, стиснутого повітря, води, пари та теплової енергії, за допомогою діаграми, зображена на рисунку 1.3.

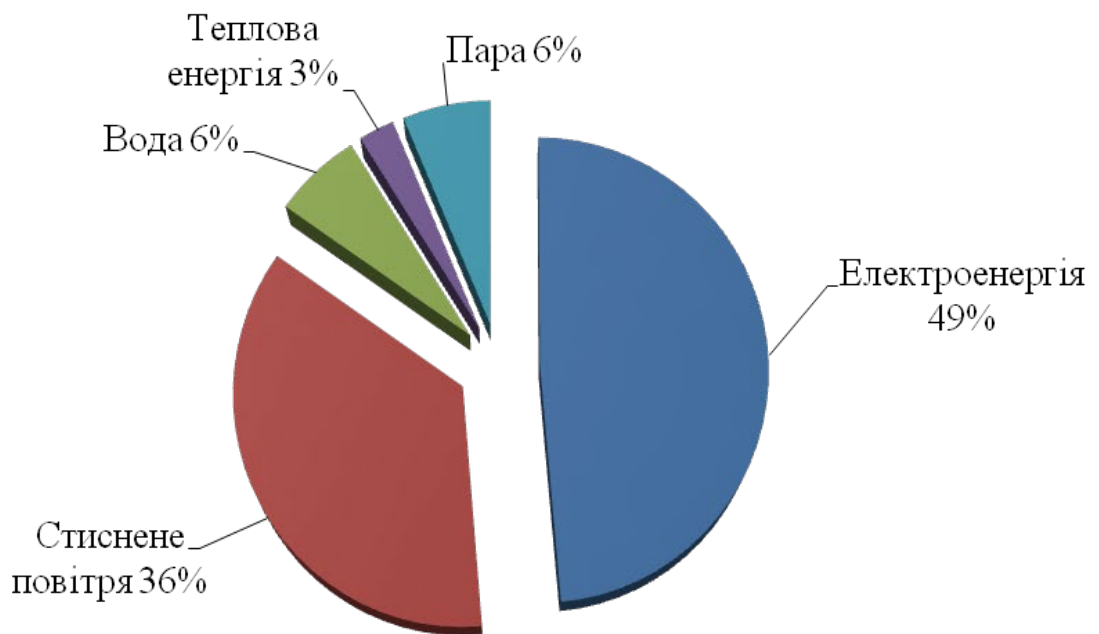


Рисунок 1.3 - Структура витрат ливарного цеху на енергоресурси

Діаграма, яка наведена на рисунку 1.3, дає можливість зробити висновок, що що найбільший відсоток витрат ливарного цеху приходить на електроенергію.

1.4 Опис основного технологічного обладнання ливарного цеху. Визначення потужності та річного споживання електроенергії кожною одиницею обладнання.

Технологічне обладнання ливарного цеху споживає у процесі своєї роботи електричну енергію, теплову енергію, використовує стиснуте повітря і воду (таблиця 1.2).

Для приготування формувальних сумішей служать змішувальні бігуни типу 115М. Бігуни інтенсивно перемішують складові частини сумішей, обертаючись на горизонтальних валиках (пальцях), з'єднаних з головкою, посадженою на вертикальному валу, внаслідок тертя о матеріали, завантажених в чашу. Змішувальні матеріали невідривно направляються під катки плужками, що обертаються разом з ними навколо вертикальної осі. Технічні характеристики змішувальних бігунів типу 115М наведені у таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 - Технічні характеристики змішувальних бігунів типу 115М

Параметри	Одиниці вимірювання	Величина
Швидкість обертання вала	об/хв.	28
Потужність електродвигуна	кВт	75
Витрати води	м ³ /год	0,45
Стиснуте повітря	м ³ /год	0,5
Тиск в мережі стиснутого повітря	кг/см ²	5

Встряхувальна формувальна ливарна машина – це машина, що ущільнює формувальну суміш встряхуванням. Основним вузлом формувальної машини є встряхувальний механізм з пневмоприводом, яким опока з сумішшю підіймається на деяку висоту. Після скидання повітря з циліндра стіл встряхувального механізму падає, і кінетична енергія, одержувана сумішшю під час її руху вниз, переходить в роботу ущільнення. Технічні параметри формувальної машини типу 232М наведені в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 - Технічні параметри формувальної машини типу 232М

Параметри	Одиниці вимірювання	Величина
Вантажопідйомність	кг	200
Сила притиску	кгс	4200
Висота карнизу	мм	160
Продуктивність	шт /год	40...60
Тиск повітря	МПа	0,63...0,05
Споживання повітря, м ³ (на одне завантаження)	м ³	0,21
Витрати води	м ³ /год	12...20

Піскодувні машини працюють за принципом інтенсивного змішування потоку повітря зі стрижневою сумішшю. На процес ущільнення стрижня витрачається дуже багато повітря, що є недоліком цих машин. Крім того, для їх роботи потрібна стрижнева суміш з малою сирої міцністю, що в свою чергу обмежує розмір виготовляються стержнів. Під час роботи в машині створюється тиск 5 кг/м².

При сушці матеріалу у сушилі типу СОБУ–2 протікають три основних процеси:

- випарювання вологи з поверхні матеріалу, супроводжуване поглинанням тепла;

- переміщення утворюється на поверхні матеріалу пара в навколишнє середовище;

- переміщення вологи всередині матеріалу від центральних шарів до поверхні випарювання.

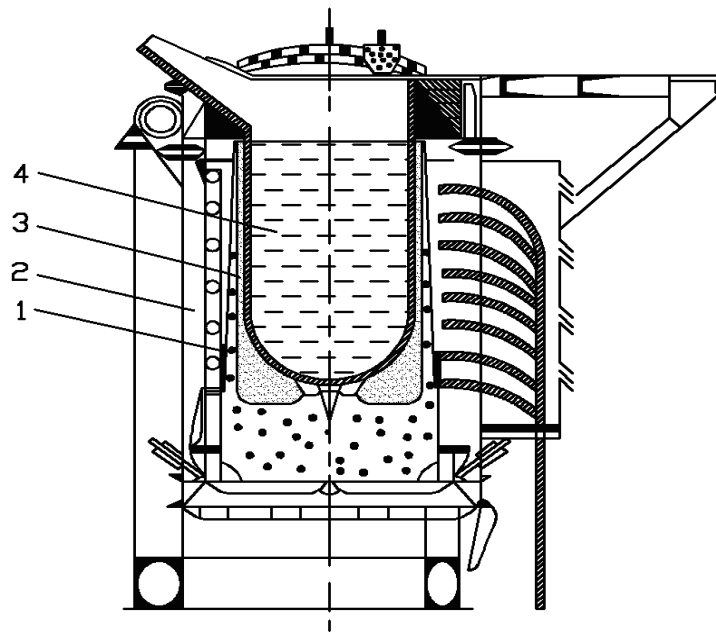
Технічні характеристики сушила СОБУ–2 наведені в таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 - Технічні характеристики сушила СОБУ-2

Параметри	Одиниці вимірювання	Величина
Встановлена потужність	кВт	5...16
Витрата стиснутого повітря	м ³ /год	2,5...3,4
Температурний режим сушки	°С	35...90

Індукційна піч тигельного типу ІЧТ-2,5 складається з керамічного вогнетривкого тигля, в якому плавиться метал, поміщеного всередину індуктора і підключеного до джерела змінного струму [1].

Вихрові струми, які виникають в металі, є причиною його розплавлення. В печах великої ємності для екранування і зменшення втрат енергії використовується зовнішній магнітопровід. Конструктивне виконання індукційної тигельної печі для плавлення чавуну приведено на рисунку 1.4.



1 – індуктор; 2 – зовнішній магнітопровід; 3 – футерування;
4 – метал, що розплавляється

Рисунок 1.4 - Конструктивне виконання індукційної тигельної печі для плавлення чавуну

Звичайно індуктор виконується в вигляді порожнистої мідної трубки круглого, овального чи прямокутного перерізу, всередині трубки пропускається вода для охолодження.

В індукційних печах має місце інтенсивне перемішування розплавленого металу за рахунок взаємодії електромагнітного поля індуктора і наведених у металі вихрових струмів.

Технічні характеристики індукційної тигельної печі ІЧТ-2,5 наступні:

- ємність тигля печі - 2,5 т;
- тривалість процесу плавки - 2,1 год;
- потужність, що споживає піч - 950 кВт;
- питомі витрати електроенергії на розплавлення і перегрів - 605 кВт·год/т;
- середній коефіцієнт потужності без компенсації $\cos\varphi = 0,18$;
- середній коефіцієнт потужності з компенсацією $\cos\varphi_k = 0,8$;
- кількість фаз - 1;
- частота струму мережі - 50 Гц;
- значення діючої напруги на індукторі - 1050 В.

Очищення відливань робиться на першій стадії в галтувальному барабані періодичної дії моделі 41114. Очищення робиться шляхом взаємного тертя і зіткнення відливань один об одного при обертанні. Відливання, завантажені у барабан, захоплюються поверхнею, що обертається, піднімаються на деяку висоту і вільно перекочуючись по відливаннях, що пролягають нижче, очищають один одного - галтують. При цьому для підвищення продуктивності процесу частота обертання барабана вибирається досить високою, але так щоб відцентрова сила не могла нейтралізувати силу тяжіння, оскільки в цьому випадку процес очищення припиняється. Для посилення ефекту очищення у барабан разом з відливаннями можуть завантажуватися зірочки, відлиті з білого чавуну, які своїми гострими кутами додатково скребуть відливання.

Технічні характеристики очисного галтувального барабана періодичної дії приведена в таблиці 1.6.

Таблиця 1.6 - Технічні характеристики галтувального барабана типу 41114

Параметри	Одиниці вимірювання	Значення
Об'єм завантаження	м ³	0,8
Найбільша маса завантаження	кг	1800
Продуктивність по чавуну	т/год	1,4
Діаметр циліндричної частини барабана	мм	900
Довжина робочої частини барабана	мм	1400
Швидкість обертання барабана	об/хв.	30
Встановлена потужність	кВт	70

Далі очищення відливань здійснюється в очисних дробеметних барабанах моделі 42223 для дрібного і середнього литва. Технічна характеристика дробеметного барабана безперервної дії приведена в таблиці 1.7.

Таблиця 1.7 - Технічні характеристики дробеметного барабана моделі 42223

Параметри	Одиниці вимірювання	Значення
Найбільша маса відливки	кг	100
Продуктивність по чавуну	т/год	2,0...5,6
Маса завантаження	кг	800
Об'єм завантаження	м ³	0,3
Потужність	кВт	14
Маса	т	17

Далі відливання піддаються штучному старінню в камерних термічних печах опору з висувним подом ПАП-3М. Технічні характеристики камерної термічної печі представлені в таблиці 1.8.

Таблиця 1.8 - Технічні характеристики термічної печі ПАП-3М

Параметри	Одиниці вимірювання	Значення
Висота робочого простору печі	мм	1300
Розміри завантажувальних вікон	мм	1200x1400
Умовна площа пода	м ²	2,4
Максимальна маса садки	т	1,6
Споживаєма потужність	кВт	200

Організація виробничого процесу в ливарному цеху обумовлена прийнятим режимом роботи - двозмінним паралельним режимом роботи, при якому усі технологічні операції по виготовленню виливків виконуються одночасно на різних виробничих дільницях, а також при якому третя зміна відводиться для профілактики і ремонту обладнання.

Таблиця 1.9 містить перелік технологічного обладнання ливарного цеху яке є головним споживачем електроенергії, в таблиці також наведені номінальна потужність, коефіцієнт попиту, фонд часу роботи та споживання електричної енергії кожною одиницею обладнання за рік.

Таблиця 1.9 – Енергетичні характеристики обладнання цеху. Витрати на споживання електроенергії за рік

Найменування обладнання, тип	Кількість, шт	Номинальна потужність, кВт	Коефіцієнт потужності $\cos\varphi$	Сумарна потужність усього обладнання, кВт	Коефіцієнт попиту, K_{II}	Річний фонд часу роботи обладнання, год	Річне споживання енергії, кВт·год	Витрати на споживання електроенергії грн/рік
Плавильна піч ІЧТ-2,5	2	950	0,8	1900	0,68	3975	4531500	5255960
Термічна піч ПАП-3М	3	200	0,9	600	0,65	3975	1550250	1798000
Бігуни 115М	2	75	0,75	150	0,7	3975	506812	586960
Галтувальний барабан 41114	2	70	0,85	140	0,75	3975	417375	483720
Сушило СОБУ-2	2	16	0,8	31,5	0,8	3975	100170	116000
Дробеметний барабан 42223	2	14	0,75	27,5	0,75	3975	81985	93960
Мостовий кран	1	30	0,65	30	0,15	3975	17887	19720
Кран-балки	2	15	0,65	30	0,3	3975	35775	40600
Усього	22	-	-	3584	-		7241754	8400435

Як видно з таблиці, обладнання ливарного цеху відрізняється не тільки потужністю, але і коефіцієнтом попиту, що обумовлює споживання електричної енергії.

На рисунку 1.5 графічно зображені розрахункові витрати на споживання електричної енергії технологічним обладнанням ливарного цеху АТ «Мотор Січ».

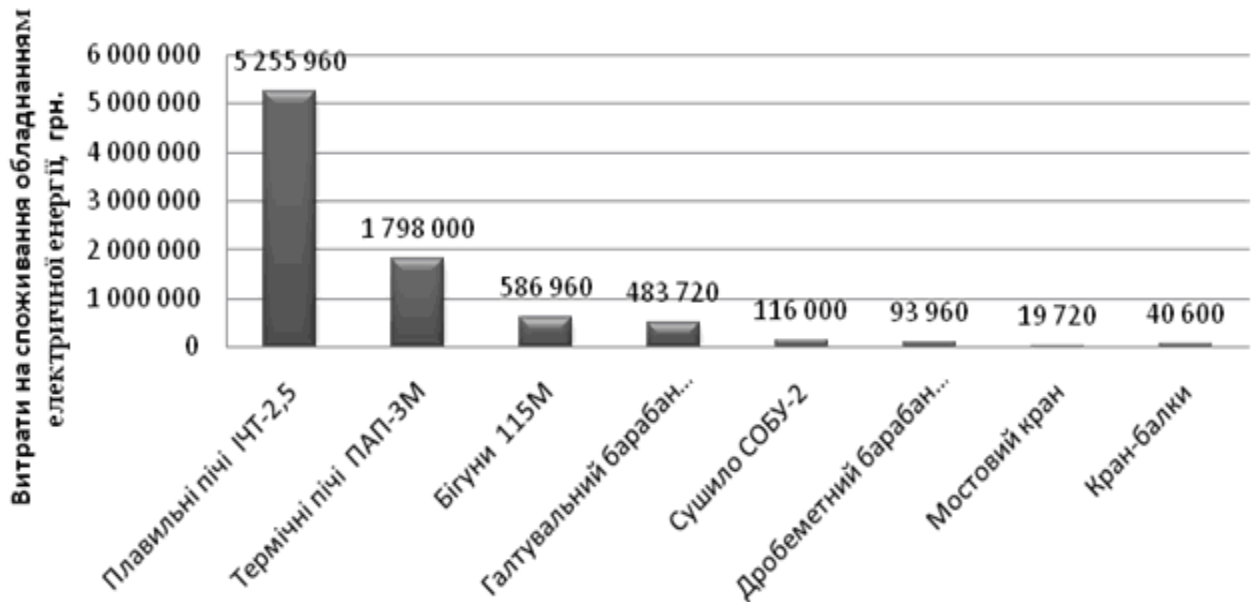


Рисунок 1.5 – Розрахункове споживання електричної енергії технологічним обладнанням

З діаграми, наведеної на рисунку 1.5, можна зробити висновок: головними споживачами електричної енергії серед технологічного обладнання, є плавильні індукційні тигельні печі ІЧТ-2,5.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ПРИСТРОЮ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ КОМПЕНСАЦІЄЮ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ПЕЧІ ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВУ ТИГЕЛЬНОГО ТИПУ

2.1 Опис конструкції та принципу дії індукційної тигельної печі

Печі індукційного нагріву промислової частоти (тигельні і каналні) широко застосовуються на промислових підприємствах для плавки чорних і кольорових металів і їх сплавів [2].

Принцип індукційного нагріву полягає у перетворенні в тепло електромагнітної енергії, яка поглинається металом, який нагрівається. Фізично цей процес полягає в збудженні в металі, який нагрівається, електрорушійної сили, яка створює в ньому змінний струм; теплова енергія, яка виділяється цим струмом, і є причиною нагріву металу.

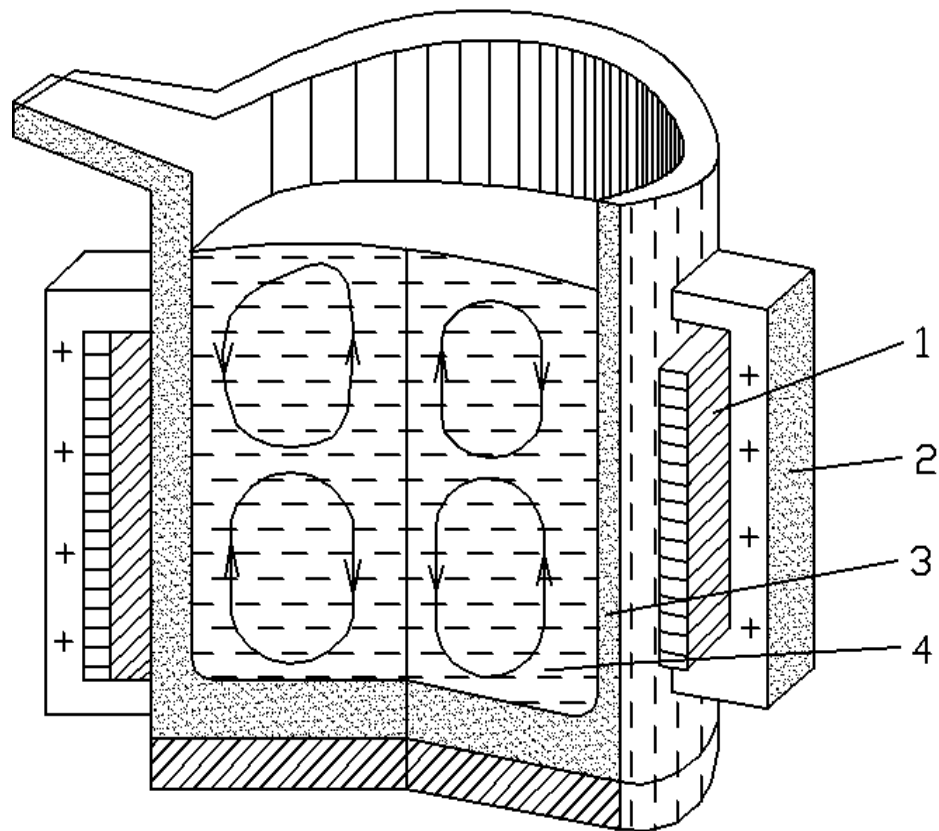
Джерелом електромагнітного поля в установках індукційного нагріву служить індуктор, частіше всього він має вигляд соленоїда (циліндричної котушки із суцільного чи трубчастого мідного дроту).

Індукційна піч тигельного типу складається з керамічного вогнетривкого тигля, в якому плавиться метал, поміщеного всередину індуктора і підключеного до джерела змінного струму.

Звичайно індуктор виконується в вигляді порожнистої мідної трубки круглого, овального чи прямокутного перерізу, всередині трубки пропускається вода для охолодження.

Вихрові струми, які виникають в металі, є причиною його розплавлення. В печах великої ємності для екранування і зменшення втрат енергії використовується зовнішній магнітопровід.

Конструктивне виконання індукційної тигельної печі для плавлення чавуну приведено на рисунку 2.1. В індукційних печах має місце інтенсивне перемішування розплавленого металу за рахунок взаємодії електромагнітного поля індуктора і наведених у металі вихрових струмів.



1 – індуктор; 2 – зовнішній магнітопровід; 3 – футерування;
4 – метал, що розплавляється

Рисунок 2.1- Схема конструкції індукційної тигельної печі

Частота змінного струму роботи печі вибирається з умов оптимального режиму плавлення [3]. Орієнтовно мінімальну частоту живильної мережі f (Гц) вибирають в залежності від внутрішнього діаметра тигля d (м) зі врахуванням питомого опору ρ і магнітної проникності μ розплавленого металу за виразом:

$$f_{min} \geq \frac{25 \cdot 10^6 \cdot \rho}{\mu \cdot d^2}. \quad (2.1)$$

Тигельні печі для плавки чавуну типу ПЧТ ємністю більше 2 тон мають робочу частоту 50 Гц, тому для них джерелом живлення є електрична мережа напругою 6...10 кВ.

Для печей потужністю до 2500 кВт передбачаються однофазні і трифазні електропічні трансформатори, при потужності 4000 кВт і вище – трифазні.

За надійністю живлення індукційні установки належать до споживачів другої категорії.

Електрична схема силових кіл однофазної індукційної установки (тигельної печі) невеликої потужності наведена на рисунку 2.2.

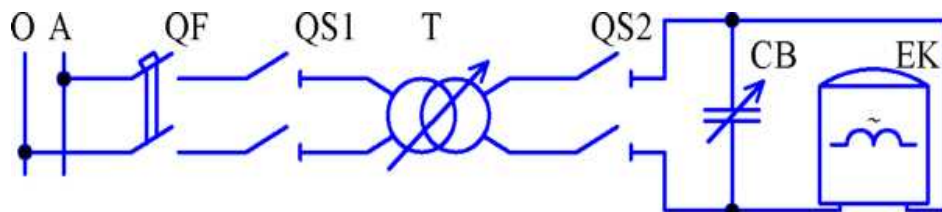


Рисунок 2.2 - Електрична схема силових кіл однофазної індукційної тигельної печі невеликої потужності

На індуктор тигельної печі ЕК напруга подається від вторинної обмотки регульовального трансформатора (або автотрансформатора) Т. Необхідність регулювати напругу на індукторі в певному діапазоні зумовлена тим, що електричний опір печі змінюється у міру розплавлення металу, а також для забезпечення необхідного температурного режиму при плавленні певних металів та сплавів. Для підвищення коефіцієнта потужності установки використовується регульована конденсаторна установка СВ.

При плавленні в індукційних печах ярко проявляються переваги індукційного нагрівання, такі як висока густина енергії і продуктивність, гомогенізація розплаву завдяки його перемішуванню, точний енергетичний і температурний контроль, а також простота автоматичного управління процесом, легкість ручного управління і більша гнучкість [4].

У відповідності з енергетичним балансом тигельної печі (рисунок 2.3) рівень електричного ККД практично для всіх типів печей складає 0,8. Приблизно 20 % вихідної енергії втрачається в індукторі у вигляді джоулевої теплоти. Відношення теплових втрат через стінки тигля до індукованої у розплаві

електричної енергії досягає 10 %, тому повний к.к.д. печі складає коло 0,7. Треба відмітити, що невід’ємною частиною економіки плавки є компенсація загальної реактивної потужності.

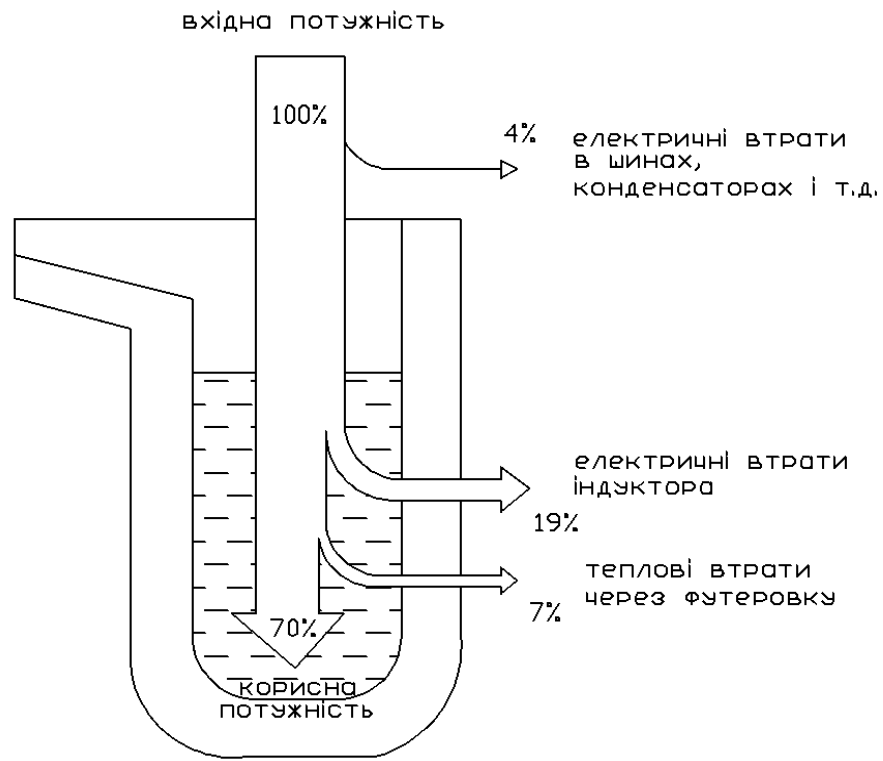


Рисунок 2.3 - Енергетичний баланс індукційної тигельної печі

Високий електричний і тепловий ККД в поєднанні з низькими втратами розплаву, і, як наслідок, економією сировини, обумовлюють низьку питому витрату енергії і екологічну конкурентоздатність. Індукційний метод нагріву, у більшості випадків, дозволяє підвищити продуктивність праці і значно поліпшити санітарно–гігієнічні умови виробництва.

2.2 Контролер керування компенсацією реактивної потужності індукційної печі промислової частоти

2.2.1 Обґрунтування необхідності впровадження пристрою автоматичного керування компенсацією реактивної потужності при роботі індукційної печі

Печі індукційного нагріву промислової частоти (тигельні і каналні) широко застосовуються на промислових підприємствах для плавки чорних і кольорових металів і їх сплавів. Вони також використовуються для перегріву металів і сплавів перед розливанням, вирівнювання їх хімічного складу, легування і підтримки постійних температурних умов при литві (міксери), а також для послідовного виконання плавильного і міксерного режимів.

Регульованим технологічним параметром печі індукційного нагріву є температура металу [5]. Її зміна або стабілізація проводиться шляхом регулювання величини активної потужності, що підводиться до індуктора печі індукційного нагріву. Як кероване джерело електроенергії печі індукційного нагріву використовується силовий пічний трансформатор. Він забезпечує ступінчасту зміну (9...23 ступенів) напруги на його вторинній обмотці і, отже, на індукторі печі індукційного нагріву.

Регульованим електричним параметром є реактивна потужність, споживана індукційною установкою. Це пояснюється тим, що піч індукційного нагріву є активно-індуктивним навантаженням, що змінюється. Причому індуктивна складова значна, що відповідає мінімальному значенню коефіцієнта потужності, рівного 0,1...0,4.

Отже, необхідною вимогою є компенсація реактивній потужності безпосередньо на зажимах індуктора печі індукційного нагріву. Відсутність компенсації реактивній потужності приводить до істотного збільшення потужності силового трансформатора печі індукційного нагріву, втрат електроенергії, збільшення перетину силових струмопроводів і характеристик комутаційно-захисної апаратури [6].

Враховуючи широкий діапазон зміни реактивної потужності при плавці металів, потрібна компенсуюча потужність джерела реактивної енергії, що змінюється у часі.

Таким джерелом є батарея статичних конденсаторів, що включає n секцій, які комутуються в різних поєднаннях паралельно індуктору печі індукційного

нагріву. Комутація секцій повинна проводитися в автоматичному режимі, а в деяких випадках і в ручному, наприклад при наладці.

Таким пристроєм автоматичного регулювання реактивної потужності у вузлі підключення індукційної установки до живлячої мережі або на вторинній обмотці силового трансформатора печі індукційного нагріву може бути спеціалізований контролер. Повною мірою цю функцію виконує спеціалізований контролер типу АРМ/ІП, який розробило, освоїло випуск і застосувало для печей індукційного нагріву типу ІАТ-1 науково-дослідне виробниче підприємство «Параметр» (місто Донецьк).

2.2.2 Опис контролера

Контролер за допомогою комутаційних апаратів здійснює автоматичний вибір кількості коматованих секцій батареї конденсаторів з метою підтримки заданої реактивної потужності або коефіцієнта потужності індукційної установки. Він забезпечує автоматичний і ручний режим управління до шести секцій батареї конденсаторів із заданим співвідношенням ємкостей. Кількість секцій може бути меншою.

Контролер може змінювати задану величину і напрям реактивної потужності у вузлі підключення печі індукційного нагріву. Отже підтримується як нульова реактивна потужність, так і потужність із заданим індуктивним або ємнісним характером.

При зміні навантаження печі індукційного нагріву контролер автоматично стабілізує заданий рівень і знак реактивної потужності шляхом ступінчастої комутації певного числа секцій конденсаторної батареї.

Структура контролера типу АРМ/ІП є аналого-цифровою системою автоматичного регулювання з негативним зворотним зв'язком по реактивній потужності печі індукційного нагріву (рисунок 2.4). При відхиленнях і

коливаннях реактивної потужності інтегральний регулятор контролера послідовно збільшує або зменшує ємність, підключену до індуктора так, щоб реактивна потужність в контрольованому вузлі навантаження досягла близького до заданого значення.

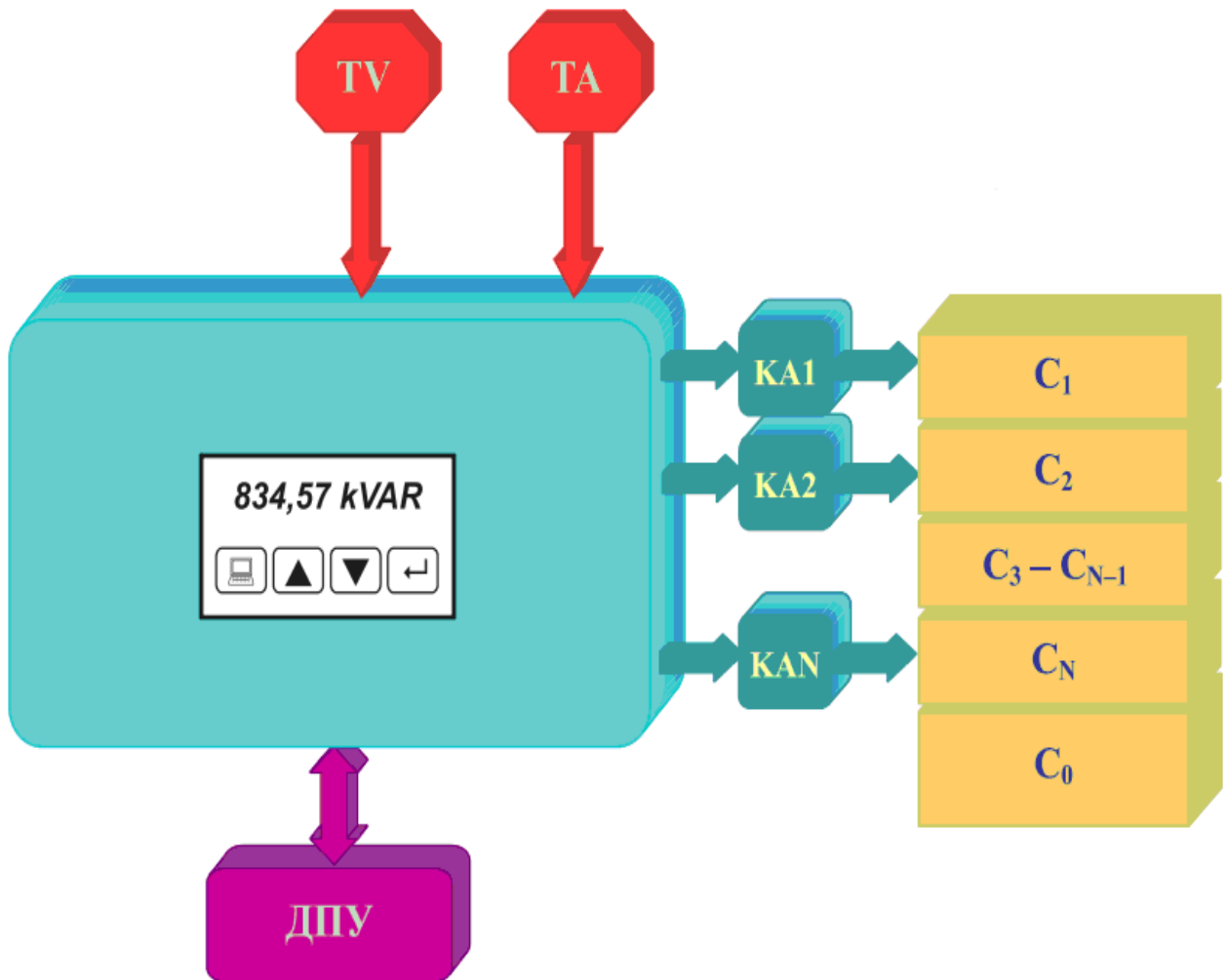


Рисунок 2.4 – Функціональна схема контролера

Контролер складається з наступних основних модулів: датчиків струму і напруги (ДС і ДН); дискримінатора реактивної потужності (ДРП); суматора (С); компаратора (К); послідовного логічного пристрою (ПЛП); електронних ключів (КА1...КА8) і блоку живлення.

Розглянемо його принцип дії. Вхідними сигналами є напруга і струм первинної або вторинної обмотки силового трансформатора печі індукційного нагріву. Напруга до дводіпазонного ДН може подаватися з вимірювального

трансформатора напруги або з вторинної обмотки пічного трансформатора. Струм до ДС подається від вторинної обмотки вимірювального трансформатора струму, включеного в ланцюг первинної або вторинної обмоток силового трансформатора із стандартним виходом 5 А. У датчику сигнали гальванічно ізолюються і нормалізуються для правильного функціонування системи регулювання.

На основі інформації про струм і напругу в ДРП утворюється сигнал, пропорційний реактивній потужності, із знаком, що визначає характер навантаження: індуктивний або ємнісний. Далі цей сигнал поступає в суматор, який здійснює вибір уставки регулювання по реактивній потужності:

- повна компенсація реактивній потужності - уставка дорівнює нулю, тобто регулятор повинен забезпечити нульову реактивну потужність в контрольованому вузлі;

- часткова компенсація реактивній потужності - уставка реактивної потужності варіюється в межах від -60% до +60% номінального значення повної вимірювальної потужності, визначуваної як добуток номінального вимірювального струму на номінальну вимірювальну напругу.

Сигнал з виходу суматора поступає на компаратор, в якому порівнюється з шириною зони нечутливості. При виході сигналу за верхню межу зони нечутливості компаратор формує команду на відключення секцій силових конденсаторів, а при виході сигналу за нижню межу - команду включення секцій конденсаторів.

Послідовний логічний пристрій здійснює розподіл команд управління по восьми каналах із затримкою часу 5...600 секунд. При цьому залежно від команди комутується ємність або нарощується, або знижується. Якщо команди відсутні, то ємність не змінюється.

Час затримки слід обирати з міркувань, що чим він коротший, тим частіше контролер робить перемикання компенсуючих ємностей, точніше підтримується заданий коефіцієнт реактивної потужності, але посилюється навантаження на силові елементи схеми: контактори, конденсатори, блоки розряду конденсаторів, що приводить до їх швидшого зносу та необхідності частішої заміни. Електронні

комутатори реалізують перетворення потенційних команд управління, що поступають з вихідних каналів ПЛП.

Комутатори безпосередньо управляють потужними проміжними реле, контакти котрих включені в ланцюг котушок силових контакторів які комутують секції конденсаторних батарей. Аналого-цифрова система управління реалізована на сучасній мікроелектронній базі із застосуванням мікроконтролера.

На пульті АРМ/ІІ є світлодіодний цифровий дисплей для відображення режиму роботи, уставок, значення вимірюваної реактивної потужності, коефіцієнта потужності, струму, напруги, часу обробки ступеня. Спрацювання проміжних реле супроводжується світловою індикацією на дисплеї контролера. Контролером можна управляти з дистанційного пульта управління (ДПУ).

2.2.3 Технічні характеристики контролера

Контролер типу АРМ/ІІ призначений для роботи під навісом і в закритих приміщеннях при дотриманні наступних умов:

- висота над рівнем моря не більше 1000 м;
- температура навколишнього повітря від мінус 10 °С до плюс 40 °С;
- відносна вологість повітря до 80 % при 15 °С;
- допускається використання для роботи в середовищі, насиченим пилом;
- робоче положення у просторі - вертикальне.

Контролер експлуатується при дії кліматичних чинників, відповідно виконання УХЛ, категорії розміщення 4, тип атмосфери ІІ по ГОСТ 15150-69. Контролер функціонує і зберігає свої параметри при дії механічних чинників, відповідних умов експлуатації ГОСТ 17516-90. Контролер є стаціонарним пристроєм і призначений для установки в електротехнічній шафі з комутаційною апаратурою. Основні технічні характеристики приведені в таблиці 2.1

Електронна частина пристрою виконана на двох друкованих платах з поверхневим монтажем і розташовується в герметичному пластмасовому боксі, захищеному від попадання пилу і вологи. Бокс за допомогою універсальних кронштейнів може кріпитися до будь-якої поверхні, наприклад у шафі або до внутрішньої сторони дверець шафи.

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики контролера АРМ/ІП

Параметри	Одиниці вимірювання	Величина
Номінальна напруга живлення регулятора	В	220
Частота мережі живлення	Гц	50
Допустиме відхилення напруги живлення	%	-20...+20
Потужність, яка споживається контролером по мережі живлення, не більше	В·А	5
Номінальне значення вимірювальної напруги	В	100 та 660
Номінальне значення вимірювального струму	А	5
Потужність, яка споживається у ланцюзі вимірювання напруги та струму, не більше	В·А	1
Діапазон уставки реактивної потужності	%	-60...+60
Дискретність уставки реактивної потужності	%	0,1
Діапазон ширини зони нечуттєвості реактивної потужності	%	2...25
Дискретність уставки зони нечуттєвості	%	0,1
Інтервал часу обробки на комутацію секцій конденсаторної батареї	с	5...600
Дискретність уставки часу	с	1
Похибка при вимірі реактивної потужності, не більше	%	2,5
Максимальна комутувана напруга вихідних контактів контролера	В	380
Максимальний комутований струм вихідних контактів контролера	А	5
Габаритні розміри	мм	200x150x55
Маса	кг	0,7
Термін служби контролера, не менше	років	10

2.2.4 Схемна реалізація контролера при обладнанні ним індукційної тигельної печі для плавки алюмінію ІАТ-1

Розглянемо приклад використання контролера АРМ/ІІ при реалізації компенсації реактивної потужності печі індукційного нагріву ІАТ-1, яка встановлена у ливарному цеху №24 АТ «Мотор Січ» і використовується для плавки алюмінію і його сплавів. Печі індукційного нагріву є досить енергоємними електротехнологічними установками. Потужність силового трансформатора печі індукційного нагріву рівна 400 кВ·А. При плавці металу частка реактивної потужності, споживаної з мережі, досягає більше 50% від повної потужності. Залежно від завантаження печі індукційного нагріву, режиму плавки і типу металу реактивна потужність змінюється у широких межах. Відповідно змінюється час плавки і істотно зростає навантаження на силовий трансформатор печі індукційного нагріву і систему електропостачання.

У більшості випадків підключення конденсаторів до індуктора печі індукційного нагріву проводиться вручну шляхом комутації необхідної кількості секцій конденсаторів [7]. При цьому оператор з кнопочового поста послідовно включає або відключає контактори і за свідченнями косинусметра і ватметра прагне досягти якнайкращих енергетичних показників печі індукційного нагріву. Досвід експлуатації печі показує, що ручний спосіб регулювання реактивної потужності дуже незручний.

Для підтримки постійності реактивної потужності, що компенсується, потрібно часто удаватися до комутації секцій. Тому ручне регулювання реактивної потужності проводиться не постійно, а це приводить до неефективного режиму плавки металу, підвищеного споживання і додаткових втрат електроенергії.

Силова схема печі індукційного нагріву побудована по типовій однофазній схемі. Принципова електрична схема печі індукційного нагріву типу ІАТ-1 приведена на рисунку 2.5.

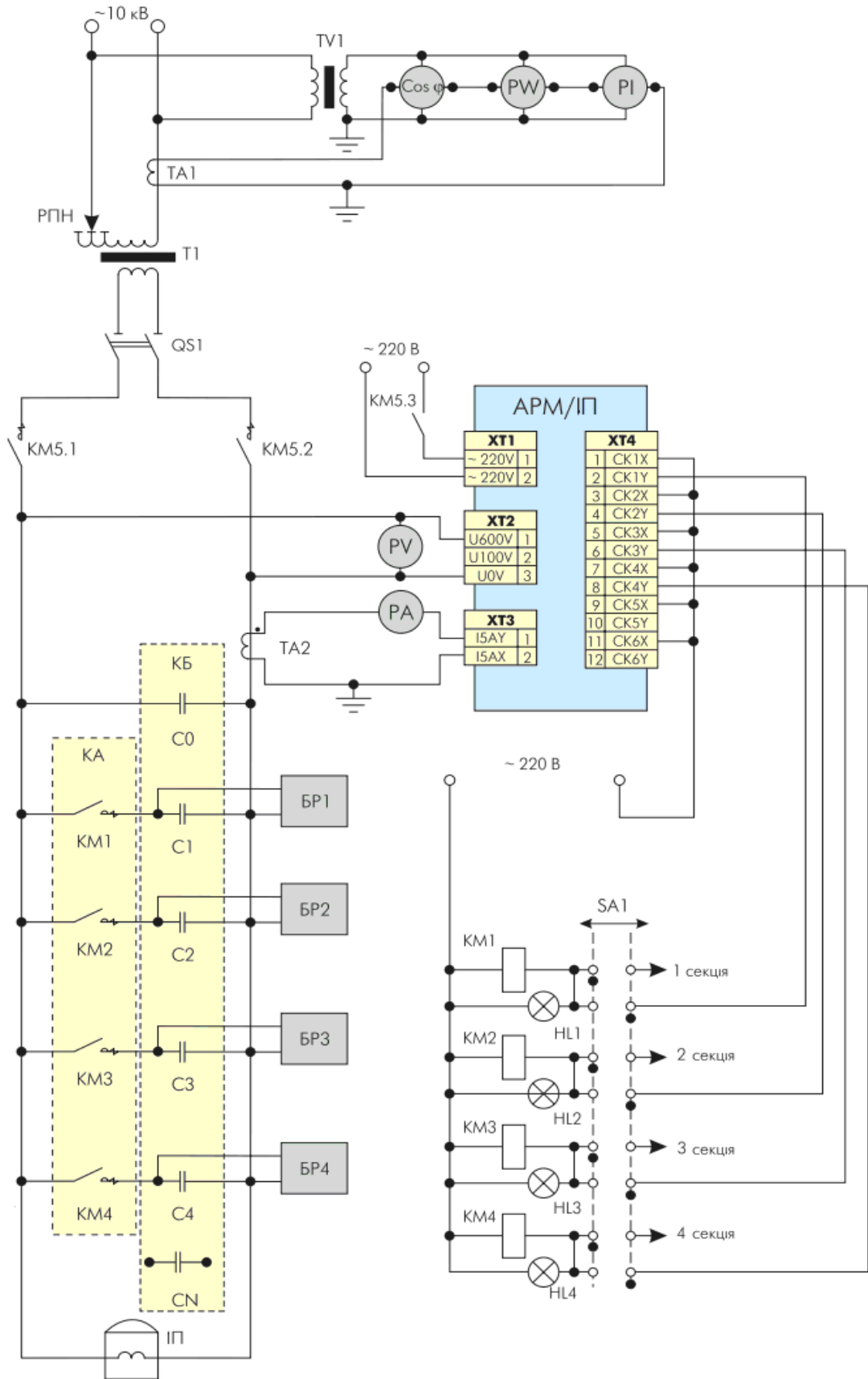


Рисунок 2.5 – Електрична схема індукційної печі ІАТ-1 з підключеним контролером АРМ/ІП

Живлення установки здійснюється від мережі напругою 10 кВ. На вході силового трансформатора печі індукційного нагріву Т1 встановлені елементи енергоконтролю: лічильник активної енергії РІ, ватметр РW і косинусметр $\text{Cos}\varphi$. Регулювання напруги на вторинній обмотці пічного трансформатора Т1 виконується регулятором під навантаженням РПН, встановленим на первинній обмотці Т1. Батарея конденсаторів включає декілька секцій (ІАТ-1 має 5 секцій).

Чотири секції конденсаторів С1...С4 комутуються відповідними контакторами КМ1...КМ4, а п'ята секція С0 постійно підключена до індуктора печі індукційного нагріву. Комутовані секції конденсаторів сполучені з блоками розряду конденсаторів БР1...БР4. Блоки БР1...БР4 функціонують після відключення С1...С4 від індуктора печі індукційного нагріву. Схема підключення приведена на рисунку 2.5.

Для детального дослідження режимів споживання реактивної потужності були проведені вимірювання енергетичних показників печі ІАТ-1 номінальною потужністю 220 кВ·А при різних значеннях компенсуючої ємності - таблиця 2.2.

Таблиця 2.2 – Результати виміру енергетичних показників печі ІАТ-1

Параметри	Одиниці вимірювання	Величина			
		460	467	468	475
Напруга на індукторі	В	460	467	468	475
Струм вторинної обмотки силового трансформатора	А	291	320	327	361
Повна споживаєма потужність з мережі	кВ·А	133	150	153	169
Активна споживаєма потужність з мережі	кВт	133	139	139	142
Реактивна споживаєма потужність з мережі	кВар	10	56	65	91
Значення $\text{Cos}\varphi$		-0,99	+0,92	+0,9	+0,85

Як видно з таблиці 2.2, найбільша активна потужність печі індукційного нагріву забезпечується при малому випереджаючому коефіцієнті потужності. При цьому споживана електроенергія найбільша, а час плавки найменший.

В результаті підключення більшої ємкості до індуктора сумарний опір навантаження силового трансформатора печі індукційного нагріву зменшується. По вторинній обмотці силового трансформатора печі індукційного нагріву протікає великий струм, який викликає підвищення напруги на батареї конденсаторів.

Відповідно, напруга на індукторі печі зростає і приводить до збільшення активної (що нагріває метал) потужності. У цьому режимі, хоча час плавки і найменший, з мережі споживається значна потужність. Наприклад, збільшення активної потужності всього на 12% приводить до двократного збільшення повної потужності печі індукційного нагріву.

Таким чином, для підтримки постійності реактивної потужності, що компенсується, потрібно часто вдаватися до комутації секцій. Тому ручне регулювання реактивної потужності проводиться не постійно, а це приводить до неефективного режиму плавки металу, підвищеного споживання і додаткових втрат електроенергії [8].

Для оптимального вибору необхідної ємкості конденсаторів необхідна система автоматичного управління реактивною потужністю на базі контролера. Експлуатація печі індукційного нагріву типу ІАТ-1 з контролером АРМ/ІІІ забезпечила енергозбереження при її роботі. Це досягнуто за рахунок двох основних чинників:

1 - компенсація реактивній потужності печі індукційного нагріву і мінімізація споживання потужності індукційною установкою;

2 - раціональне використання електроенергії на плавку металу відповідно до режиму роботи печі індукційного нагріву.

Отже, економічно доцільно застосування контролера типу АРМ/ІІІ для печей індукційного нагріву промислової частоти, що обумовлено зменшенням питомого електроспоживання на 1 т металу і часу плавлення.

2.3 Розрахунок режиму роботи системи автоматичного керування компенсацією реактивної потужності індукційної тигельної печі ІЧТ-2,5

2.3.1 Опис роботи контролера при компенсації змінної у часі реактивної потужності індуктора індукційної тигельної печі

У пункті 2.2.4 наведено приклад ефективної роботи контролера АРМ/ІІ у складі плавильного комплексу, який обладнаний піччю ІАТ-1 і використовується для плавки алюмінію та його сплавів.

Контролер системи автоматичного керування компенсацією споживаної реактивної потужності постійно відслідковує зміну значення $\cos\varphi$, тобто відношення активної та повної потужності, що споживає піч у процесі плавки, та розраховує і підключає таку комбінацію конденсаторів, сумарна ємність котрих необхідна для компенсації реактивної потужності індуктора і садки печі.

Проаналізувавши результати вимірів у таблиці 2.2, можна зробити висновок, що найкращі енергетичні показники плавильна установка, яка обладнана піччю ІАТ-1 має при уставці на контролері системи автоматичного керування компенсацією споживаної реактивної потужності $\cos\varphi$ близького до одиниці, тобто у процесі розігріву та плавки алюмінієвої загрузки, реактивний опір печі змінюється незначно і реактивна потужність індуктора є величиною більш-менш постійною у весь час плавки.

Контролер системи автоматичного керування компенсацією споживаної реактивної потужності може змінювати задану величину і напрям реактивної потужності у вузлі підключення печі індукційного нагріву, підтримуючи як нульову реактивну потужність, так і потужність із заданим індуктивним або ємнісним характером.

Визначимо який режим роботи контролера АРМ/ІІ найкраще використовувати при обладнанні їм індукційної тигельної печі для плавки чавуну ІЧТ-2,5 цеху 10 АТ «Мотор Січ» для підвищення її енергоефективності.

На рисунку 2.6 представлена схема заміщення індукційної плавильної установки, де:

- r_i - активний опір індуктора;
- X_i - реактивний опір індуктора;
- X_c - реактивний опір батареї компенсуючих конденсаторів;
- $r_{пр.м}$ - активний приведенний опір металу (завантаження);
- $X_{пр.м}$ - реактивний приведенний опір металу (завантаження);
- r_e - еквівалентний активний опір індукційної установки;
- X_e - еквівалентний реактивний опір індукційної установки.

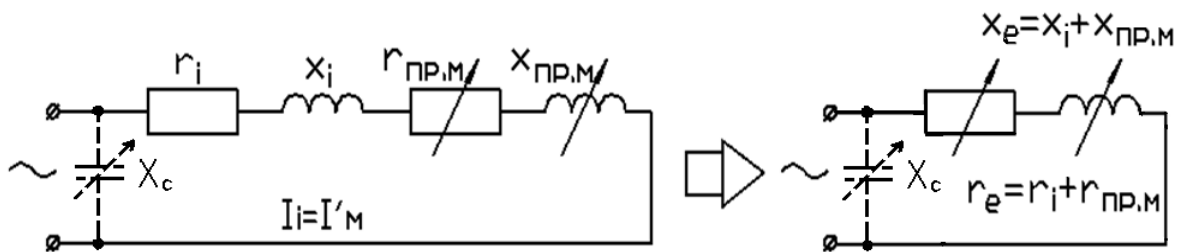


Рисунок 2.6 - Схема заміщення індукційної плавильної установки

Підключена паралельно індуктору батарея конденсаторів налаштовує нагрівальний контур в резонанс, при цьому коефіцієнт потужності установки близький до одиниці.

В умовах резонансу коливальний контур споживає від джерела лише активну потужність. При цьому джерело енергії та з'єднувальні шини розвантажуються від реактивної енергії, а контур має лише активний еквівалентний опір [9].

Умову резонансу можна з відомим припущенням записати в вигляді рівності індуктивного x_L і ємнісного x_C опорів кола:

$$x_L = x_C = 2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC}, \quad (2.2)$$

де f - частота струму мережі;

L і C – відповідно індуктивність (Гн) і ємність (Ф) контуру.

Звідки

$$L = \frac{1}{4\pi^2 f^2 C}; \quad (2.3)$$

$$C = \frac{1}{4\pi^2 f^2 L}. \quad (2.4)$$

З цих співвідношень видно, що умову резонансу струму при сталій частоті мережі ($f=50$ Гц) та змінному характері індуктивності (рисунок 2.6) можна забезпечити відповідним підбором ємності C .

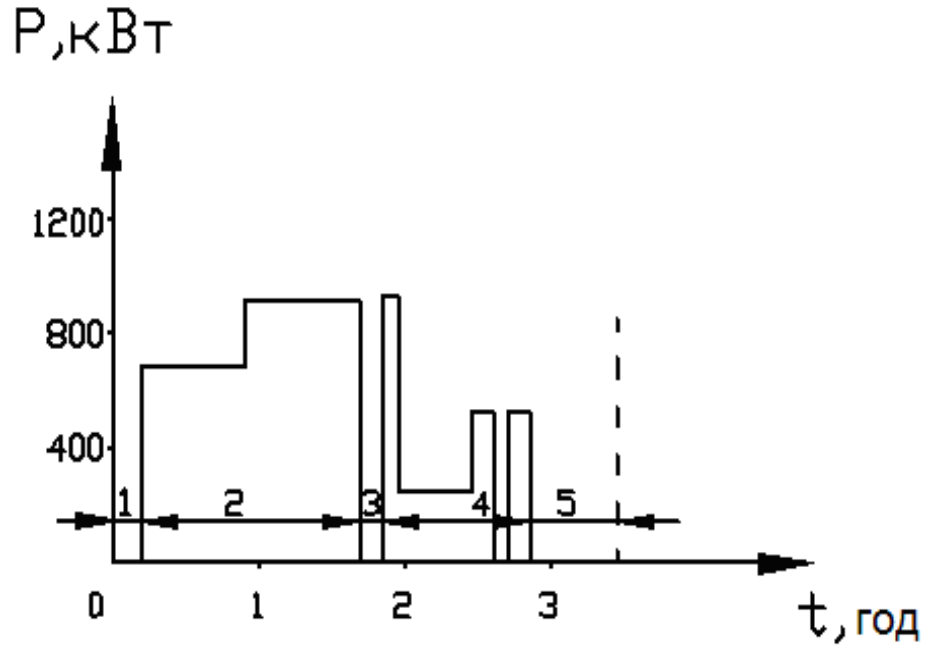
Таким чином визначивши характерну зміну значення реактивного струму завантаженого індуктора у кожний період роботи печі, можна обрати найкращий режим роботи контролера для забезпечення резонансу у контурі та збільшення коефіцієнта потужності установки.

Визначення еквівалентних опорів системи індуктор-завантаження в холодному і гарячому режимах, визначення струмів і напруги в схемі заміщення печі (рисунок 2.6), $\cos\varphi$ індуктора входить до завдання електричного розрахунку індукційної печі.

2.3.2 Опис послідовності електричного розрахунку індукційної тигельної печі

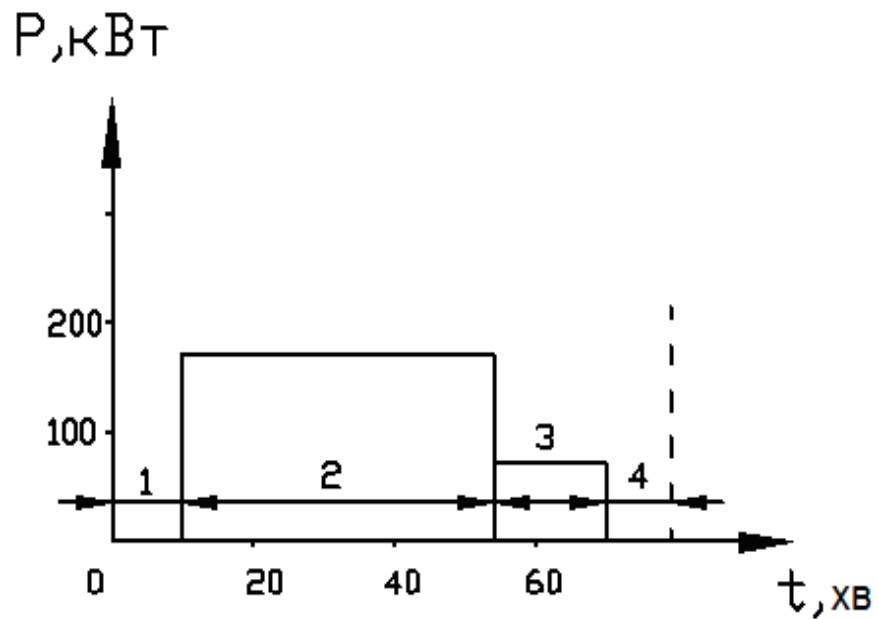
Графіки навантаження печей для плавлення чавуну та алюмінієвих сплавів приведені на рисунку 2.7 та 2.8 відповідно. Найбільшу потужність індукційна піч

споживає у процесі 2 – плавлення завантаження (шихти), як при плавці чавуну, так і при плавці алюмінієвих сплавів [10].



1 – завантаження; 2 – плавлення; 3 – викачування шлаку;
4 – рафінування; 5 – розливання металу

Рисунок 2.7 - Графік навантаження тигельної печі при плавленні чавуну



1 – завантаження; 2 – плавлення; 3 – рафінування; 4 – розливання металу

Рисунок 2.8 - Графік навантаження тигельної печі при плавленні
алюмінієвих сплавів

Так як найбільша потужність, що споживає індукційна піч при плавці чавуну, використовується у процесі 2 - плавлення завантаження (шихти), доцільно розрахувати миттєві значення реактивного опору завантаженого індуктора саме для цього періоду роботи печі, як такого, що має найбільший потенціал економії [11].

Процес плавлення включає у себе наступні етапи:

- розігрів завантаження від температури оточуючої середи до температури плавлення;
- розплавлення завантаження (шихти);
- перегрів розплавленого металу до температури розливу.

Визначення еквівалентних опорів системи індуктор-завантаження в холодному і гарячому режимах, визначення струмів і напруги в схемі заміщення печі (рисунок 2.7), $\cos\varphi$ індуктора входить до завдання електричного розрахунку індукційної печі.

Для проведення електричного розрахунку необхідно знати наступні вихідні дані:

- найменування металу, що розплавляється, або марку сплаву і його склад;
- конфігурацію і характерні розміри шматків шихти;
- геометричні розміри елементів печі ;
- початкову температуру завантажувальної шихти, температуру плавлення і температуру розливання, для феромагнітних матеріалів - температуру точки Кюрі;
- питомий електричний опір шихти для вищезгаданих температур;
- тепловміст або ентальпію, теплоємність і приховану теплоту плавлення металу або сплаву для вищезгаданих температур;
- ємність тигля;
- продуктивність печі;
- тривалість процесу плавки;
- параметри мережі живлення.

Геометричні розміри елементів тигельної печі, які необхідно використати у процесі проведенні її електричного розрахунку, зображені на рисунку 2.9, де:

- D_1 - внутрішній діаметр індуктора;
- D_2 - середній внутрішній діаметр тигля;
- D_m - внутрішній діаметр магнітопроводу;
- h_1 - висота індуктора;
- h_2 - висота металу (завантаження) у тиглі;
- h_m - висота індуктора;
- b_ϕ - товщина футерування печі.

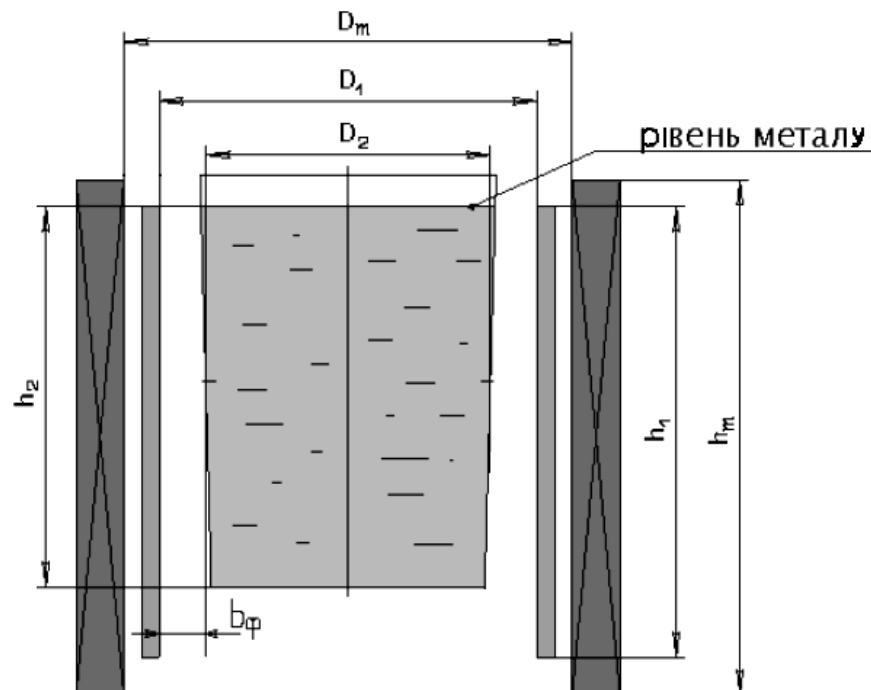


Рисунок 2.9 - Геометричні розміри елементів печі,
необхідні для електричного розрахунку

Магнітний потік в печі без осердя проходить по самій шихті. Тому для роботи цієї печі мають велике значення магнітні властивості а також розміри і форма шматків шихти. Між шматками шихти на початковій стадії плавки немає суцільного контакту, контактний опір між шматками шихти набагато більше внутрішнього опору самого шматка, крім того, між шматками існують повітряні проміжки, що створюють додаткові шляхи для магнітного потоку, тому розподіл напруженості магнітного поля наблизатиметься до напруженості в порожньому

індукторі [12]. Протягом плавки ця картина постійно змінюється із зміною властивостей шматків шихти, а отже, змінюється і внутрішній опір завантаження печі, що приведе до постійної зміни режиму роботи печі протягом плавки за інших рівних умов (незмінній величині напруги живлення, а також її частоти).

Таким чином при нагріві феромагнітних металів змінюються їх питомий опір і магнітна проникність (рисунок 2.10)

Коли у якості шихти застосовують феромагнітні метали, то до того моменту, поки їх температура ще не досягла точки Кюрі, тобто до $740^{\circ}\text{C} \dots 770^{\circ}\text{C}$, їх магнітна проникність зберігає свою величину. В цьому випадку шихта гратиме роль не тільки вторинної обмотки і навантаження, але і незамкнутого осердя. Інакше кажучи, при плавці в печі без осердя феромагнітних металів розігрівання шихти в перший період (до точки Кюрі) відбудеться не тільки за рахунок тепла, що виділяється від циркуляції в ній вихрових струмів, але і за рахунок втрат на перемагнічування, яке в цей період спостерігається в шихті. Після точки Кюрі феромагнітні тіла втрачають свої магнітні властивості, і робота індукційної печі стає аналогічній роботі повітряного трансформатора, тобто трансформатора без осердя [13].

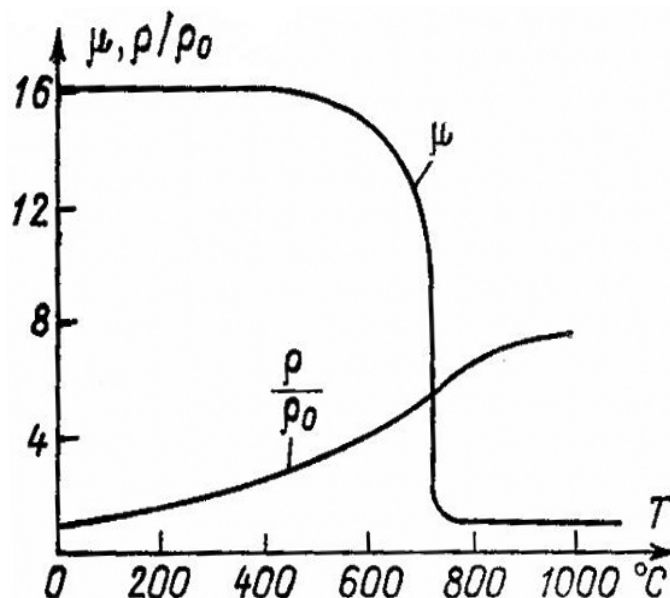


Рисунок 2.10 – Залежність відносної магнітної проникності та відносного питомого опору для середньоуглеродистого чавуну

Магнітна проникність слабо залежить від температури приблизно до $650^{\circ}\text{C} \dots 700^{\circ}\text{C}$, після чого швидко зменшується і досягає значення, приблизно рівного проникності вакууму (рисунок 2.10). У наближених розрахунках зазвичай вважається, що вона падає стрибком до $\mu = 1$ у точці магнітного перетворення (точці Кюрі), приблизно відповідній температурі $750^{\circ}\text{C} \dots 770^{\circ}\text{C}$.

На рисунку 2.10 початкове значення магнітної проникності прийнято рівним 16, що пояснюється застосуванням при індукційному нагріві дуже сильних магнітних полів.

Часто початкове значення магнітної проникності складає 20...30. Залежність питомого опору від температури для чавуну із змістом вуглецю 3,7%...4,2% приведена на тому ж рисунку 2.10. З кривій видно, що в проміжку $15^{\circ}\text{C} \dots 800^{\circ}\text{C}$ питомий опір зростає приблизно у 5 разів. Надалі зростання питомого опору сповільнюється, причому значення його для різних сортів чавунів стають майже рівними.

В середньому можна прийняти, що в інтервалі температур $800^{\circ}\text{C} \dots 900^{\circ}\text{C}$ питомий опір дорівнює 10^{-6} Ом·м. В результаті падіння магнітної проникності і зростання питомого опору в процесі нагріву, глибина проникнення струму зростає в 8...10 разів. На рисунку 2.11 приведені графіки залежностей зміни абсолютного питомого опору від температури для чистих металів. У даному розрахунку скористаємося графіком для заліза (*Fe*).

Розрахунок параметрів індуктора при нагріві кускової шихти заснований на складанні схеми заміщення індуктора з кусковим феромагнітним завантаженням (рисунок 2.7). Розрахунок схеми заміщення проводиться методом послідовних наближень до збіжності результатів в межах вибраної точності [14].

Кускова шихта в першому наближенні може бути представлена у вигляді сукупності еквівалентних циліндрів, розташованих вертикально в тиглі, причому діаметр кожного циліндра чисельно дорівнює характерному розміру середнього шматка шихти $d_{ш}$, а висота його дорівнює розрахунковій висоті завантаження h_2 . Передбачається, що електричний контакт між окремими еквівалентними циліндрами відсутній.

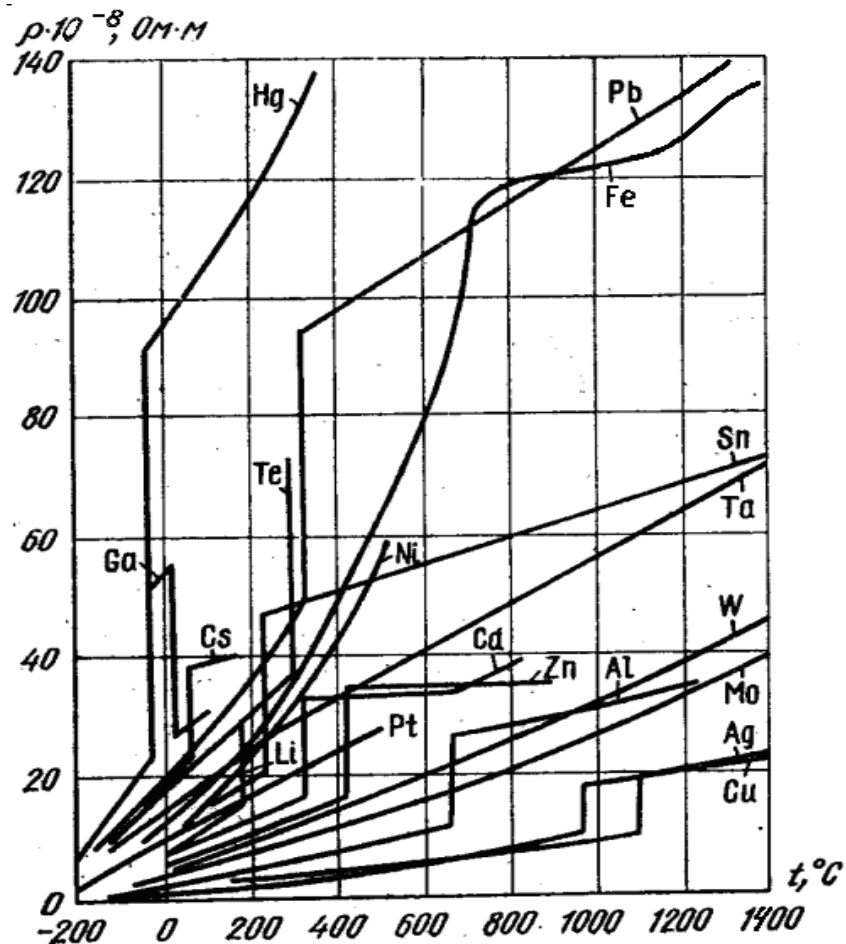


Рисунок 2.11 – Залежність абсолютного питомого електричного опору декотрих металів від температури

Число еквівалентних циліндрів N_u , що імітують шихту і що розміщуються в плавильному тиглі, приблизно можна визначити за формулою:

$$N_u = \frac{\pi D_2^2}{4d_{ш}^2}, \quad (2.5)$$

де D_2 - середній внутрішній діаметр тигля, м;

$d_{ш}$ - характерний діаметр середнього шматка шихти, м.

Глибина проникнення струму в шихту Δ_u , м:

$$\Delta_u = 503 \sqrt{\frac{\rho_u}{\mu'_u f}}, \quad (2.6)$$

де $\rho_{ш}$ – значення абсолютного питомого електричного опору шихти при заданій температурі (Ом·м) - скористаємося графіком для заліза (Fe) на рисунку 2.11;

$\mu'_{ш}$ — відносне значення магнітної проникності шихти. У початковій стадії розрахунку в умовах плавки можна прийняти $\mu'_{ш} = 15...20$ – рисунок 2.10;

f - частота струму мережі, $f = 50$ Гц.

Відносний радіус еквівалентного одиничного циліндра:

$$m_{ш} = \frac{d_{ш}}{\sqrt{2}\Delta_{ш}}, \quad (2.7)$$

де $d_{ш}$ - характерний діаметр середнього шматка шихти, м;

$\Delta_{ш}$ - глибина проникнення струму в шихту, м.

Активний опір всієї кускової шихти (сукупності циліндрів), приведений до одного вітка індуктора $r_{ш}$, Ом/віток²:

- при $\mu'_{ш} = 1,0$:

$$r_{ш} = \pi \frac{m_{ш}^2}{2h_2} \rho_{ш} A(m_{ш}) N_{ш}; \quad (2.8)$$

- при $\mu'_{ш} > 1,0$:

$$r_{ш} = (0,97 / \sqrt{2}) \pi \frac{m_{ш}^2}{h_2} \rho_{ш} A(m_{ш}) N_{ш}, \quad (2.9)$$

де h_2 - висота металу (завантаження) у тиглі, м;

$\rho_{ш}$ – значення абсолютного питомого електричного опору шихти при заданій температурі (Ом·м) - скористаємося графіком для заліза на рисунку 2.10;

$A(m_{ш})$ - значення допоміжного коефіцієнта $A(m)$, яке визначається для відповідного значення аргументу до ($m_{ш}$) і після (m_2) точки Кюрі;

$N_{ш}$ - кількість еквівалентних циліндрів (формула 2.5).

Реактивний опір кускового завантаження, приведений до одного вітка індуктора $x_{ш}$, Ом/віток²:

- при $\mu'_{ш} = 1,0$:

$$x_{ш} = \frac{r_{ш} B(m_{ш})}{A(m_{ш})}; \quad (2.10)$$

- при $\mu'_{ш} > 1,0$:

$$x_{ш} = 0,71r_{ш}, \quad (2.11)$$

де $A(m_{ш}), B(m_{ш})$ — значення допоміжних функції $A(m)$ і $B(m)$, які визначаються для відповідного значення $m_{ш}$.

Після сплавлення окремих шматків шихти треба повторити розрахунки по формулах 2.6 - 2.11, підставивши у формулу (2.7) замість значення характерного розміру середнього шматка шихти $d_{ш}$ значення середнього внутрішнього діаметру тигля печі D_2 .

Глибина проникнення струму в матеріал індуктора Δ_1 (м) визначається по формулі:

$$\Delta_1 = 503 \sqrt{\frac{\rho_1}{f}}, \quad (2.12)$$

де ρ_1 - значення питомого опору міді індуктора, що відповідає температурі охолодження індуктора (приблизно 60°C), $\rho_1 = 2 \cdot 10^{-8}$ Ом·м;

f - частота струму мережі, $f = 50$ Гц.

Активний R_1 і внутрішній реактивний опори X_{M1} умовного одновіткового індуктивного дроту визначаються по формулі:

$$R_1 = X_{M1} = \frac{\rho_1 \pi D'_1}{\Delta_1 h_1 k_{zi}}, \quad (2.13)$$

де ρ_1 - значення питомого опору міді індуктора, що відповідає температурі охолодження індуктора (приблизно 60°C), $\rho_1 = 2 \cdot 10^{-8}$ Ом·м;

D'_1 - розрахунковий діаметр індуктора;

h_1 - висота індуктора, м;

k_{zi} - коефіцієнт заповнення індуктора, рівний відношенню висоти індуктивного витка без ізоляції до кроку навивки [15]. Значення k_{zi} залежить від конструкції індуктора і виду ізоляції, $k_{zi} = 0,75 \dots 0,9$.

Реактивний опір розсіювання повітряного зазору умовного одновиткового індуктора x_s (Ом/віток²) розраховується по формулі:

$$x_s = 2\pi f \frac{(D_1^2 - \pi D_2^2 / 4)}{h_2} 10^{-7}. \quad (2.14)$$

Реактивний опір зворотного замикання x_e , Ом/віток²:

$$x_e = \frac{\pi^2 D_1^2}{h_1} 10^{-7} \frac{Kh_1}{h_1 - Kh_2}, \quad (2.15)$$

де K - поправочний коефіцієнт, що враховує магнітний опір зворотного замикання, відомий як коефіцієнт Нагаока [16]. Коефіцієнт K можна визначити як функцію відношення h_1/D_1 або D_1/h_1 при заданому співвідношенні D_m/d_1 по графіку на рисунку 2.12.

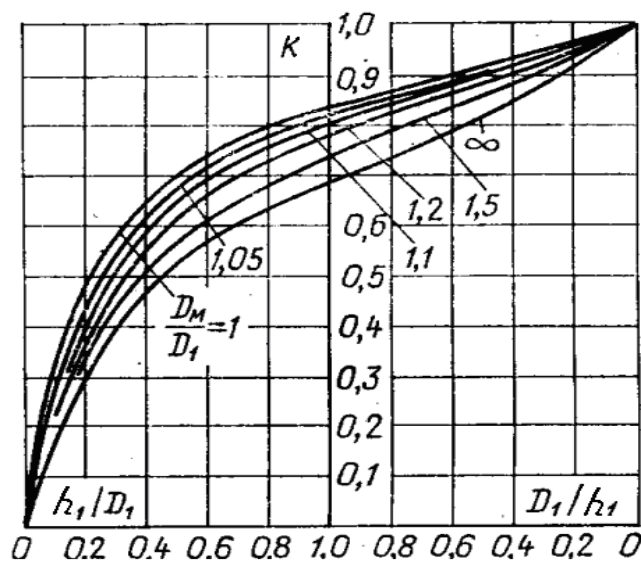


Рисунок 2.12 - Коефіцієнт самоіндукції соленоїда із зовнішнім магнітопроводом

Коефіцієнт приведення параметрів:

$$c = \frac{1}{\left(\frac{r_{uu}}{x_e}\right)^2 + \left[1 + \frac{(x_{uu} + x_s)}{x_e}\right]^2}, \quad (2.16)$$

де r_{uu} - активний опір всієї кускової шихти (сукупності циліндрів), приведений до одного вітка індуктора, Ом/віток² - формули 2.9, 2.10;

x_e - реактивний опір зворотного замикання, Ом/віток² (формула 2.15);

x_{uu} - реактивний опір кускового завантаження, приведений до одного вітка індуктора, Ом/віток² - формули 2.10, 2.11;

x_s - реактивний опір розсіювання повітряного зазору умовного одновиткового індуктора, Ом/віток² (формула 2.14).

Приведені активний r'_2 і реактивний x'_2 опори завантаження (Ом/віток²) визначаються за виразами:

$$r'_2 = c \cdot r_{uu}; \quad (2.17)$$

$$x'_2 = c \cdot (x_{uu} + x_s + (r_{uu}^2 + (x_{uu} + x_s)^2) / x_e), \quad (2.18)$$

де c - коефіцієнт приведення параметрів (формула 2.16);

r_{uu} - активний опір всієї кускової шихти (сукупності циліндрів), приведений до одного вітка індуктора, Ом/віток² (формули 2.9, 2.10);

x_{uu} - реактивний опір кускового завантаження, приведений до одного вітка індуктора, Ом/віток² (формули 2.10, 2.11);

x_s - реактивний опір розсіювання повітряного зазору умовного одновиткового індуктора, Ом/віток² (формула 2.14);

x_e - реактивний опір зворотного замикання, Ом/віток² (формула 2.15).

Еквівалентні активний R_i і реактивний X_i електричні опори навантаженого індуктора визначаються по формулах:

$$R_i = (R_l + r'_2) \cdot \omega_i^2, \quad (2.19)$$

$$X_i = (X_{m1} + x'_2) \cdot \omega_i^2, \quad (2.20)$$

де R_l , X_{m1} - активний і внутрішній реактивний опори умовного одновіткового індуктивного дроту (Ом/віток²) - визначені по формулі 2.13;

ω_i - кількість витків індуктора.

Повний еквівалентний електричний опір навантаженого індуктора Z_i , Ом:

$$Z_i = \sqrt{R_i^2 + X_i^2}. \quad (2.21)$$

Активна потужність на індукторі P_i , Вт:

$$P_i = U_i^2 / R_i, \quad (2.22)$$

де U_i - значення діючої напруги на індукторі, В.

Енергія, потрібна для розплаву та перегріву завантаження E_n , Дж:

$$E_n = c_n \cdot m / k_g, \quad (2.23)$$

де c_n - ентальпія чавуну при температурі перегріву 1450°C, $c_n = 1250 \cdot 10^3$ Дж/кг;

m - маса завантаження печі, $m = 2500$ кг;

k_g - коефіцієнт витрат (включає теплові витрати крізь стінку тигля та електричні витрати у струмопроводі – рисунок 2.3), $k_g = 0,7$.

Час плавки садки t_n , год:

$$t_n = E_n / (3600 \cdot P_i) \quad (2.24)$$

Виходячи з умови резонансу струму (формула 2.1) у контурі на рисунку 2.7, можна обчислити розрахункову ємність батареї конденсаторів C (Ф), яка забезпечить коефіцієнт потужності установки близький до одиниці:

$$C = \frac{1}{2\pi f X_i}, \quad (2.25)$$

де f - частота струму мережі, $f = 50$ Гц;

X_i - еквівалентний реактивний електричний опір навантаженого індуктора за формулою 2.20.

Реактивна потужність конденсаторної батареї $Q_{к.б.}$ (Вар) визначається по формулі:

$$Q_{к.б.} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot U_i^2 \cdot C, \quad (2.26)$$

де f - частота струму мережі, $f = 50$ Гц;

U_i – значення діючої напруги на індукторі, В;

C - ємність батареї конденсаторів (Ф).

Реактивна потужність на індукторі печі у базовому варіанті $Q_{б.}$, Вар:

$$Q_{б.} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot U_i^2 \cdot (C - C_{б.}), \quad (2.27)$$

де $C_{б.}$ – компенсувальна ємність батареї конденсаторів у базовому варіанті.

Реактивна потужність на індукторі печі у новому варіанті $Q_{н.}$, Вар:

$$Q_{н.} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot U_i^2 \cdot (C - C_{н.}), \quad (2.28)$$

де $C_{н.}$ – компенсувальна ємність батареї конденсаторів за новим варіантом.

Кількість реактивної енергії, що економиться за одну плавку $Q_{ек.}$, кВар·год:

$$Q_{ек.} = (Q_{б} - Q_{н}) \cdot t_n \cdot 10^{-3} \quad (2.29)$$

2.3.3 Вихідні данні для проведення електричного розрахунку індукційної тигельної печі для плавки чавуну ІЧТ-2,5

Для проведення електричного розрахунку індукційної тигельної печі для плавки чавуну ІЧТ-2,5 (формули 2.5 - 2.21) треба скористатися наступними вихідними даними [17]:

- ємність тигля печі $G = 2,5$ т;
- тривалість процесу плавки $t_p = 1,97$ год;
- потужність, що споживає піч $P_{in} = 950$ кВт;
- середній коефіцієнт потужності без компенсації $\cos\varphi = 0,18$;
- середній коефіцієнт потужності з компенсацією $\cos\varphi_k = 0,9$.

Вихідні данні індуктора печі:

- матеріал – мідна профільована труба;
- кількість витків індуктора $\omega_i = 55$ витків;
- коефіцієнт заповнення індуктора $k_{zi} = 0,9$;
- внутрішній діаметр індуктора $D_l = 0,90$ м;
- висота індуктора $h_l = 1,10$ м;
- температура охолодження індуктора $t_{i.охл.} = 50^\circ\text{C}$;
- значення питомого опору міді індуктора, що відповідає температурі охолодження індуктора (50°C) $\rho_l = 2 \cdot 10^{-8}$ Ом·м;
- внутрішній діаметр магнітопроводу $D_m = 1,05$ м.

Геометричні розміри тигля печі:

- середній внутрішній діаметр тигля $D_2 = 0,70$ м;
- висота метала (завантаження) у тиглі $h_2 = 1,0$ м;
- товщина футерування печі $b_\phi = 0,095$ м.

Вихідні данні завантаження печі:

- середній розрахунковий діаметр шматків шихти $d_{ш} = 0,08$ м;
- початкова температура завантажувальної шихти $t_{н.з.} = 20$ °C;

- температуру точки Кюрі феромагнітної шихти $t_K = 760$ °С;
- температура плавлення завантаження $t_{пл.} = 1200$ °С;
- температура розливання (перегріву) металу $t_{пер.} = 1450$ °С.

Параметри живлення індуктора печі:

- кількість фаз - 1;
- частота струму мережі $f = 50$ Гц;
- значення діючої напруги на індукторі, $U_i = 1000$ В.

2.3.4 Проведення електричного розрахунку ідукційної тигельної печі

Електричний розрахунок ідукційної печі виконано у програмі Microsoft Excel. Перевагою цієї програми є її простота і наглядність при роботі з великою кількістю однотипних формул, можливість побудови графіків для зручного компактного відображення кінцевих результатів розрахунків та її повна сумісність з текстовим редактором Word.

Для розрахунку еквівалентного реактивного опору навантаженого індуктора у певні моменти роботи печі, процес плавлення (тобто розігрів завантаження від температури оточуючої середовища (20°С) до втрати магнітних властивостей шихти (760°С), далі до температури плавлення (1200°С), розплавлення шихти та перегрів розплавленого металу до температури розливу (1450°С)) умовно поділено на 143 температурні ділянки з кроком 10°С кожна.

На кожній температурній ділянці визначені за допомогою формул 2.5 - 2.29 еквівалентні активний R_i і реактивний X_i електричні опори навантаженого індуктора, коефіцієнт потужності індуктора $\cos\phi_i$, обчислено необхідну ємність батареї компенсуючих конденсаторів C (згідно умови резонансу струму (формула 2.1) у контурі на рисунку 2.7) та відповідну їй реактивну потужність конденсаторної батареї.

Електричний розрахунок ідукційної печі виконаний у програмі Microsoft

Excel. Результируючі графіки, побудовані за допомогою тієї ж програми зображені на рисунках 2.13 - 2.16.

На рисунку 2.13 наведений графік залежності еквівалентного активного R_i і реактивного X_i електричних опорів навантаженого індуктора від температури у процесі плавлення.

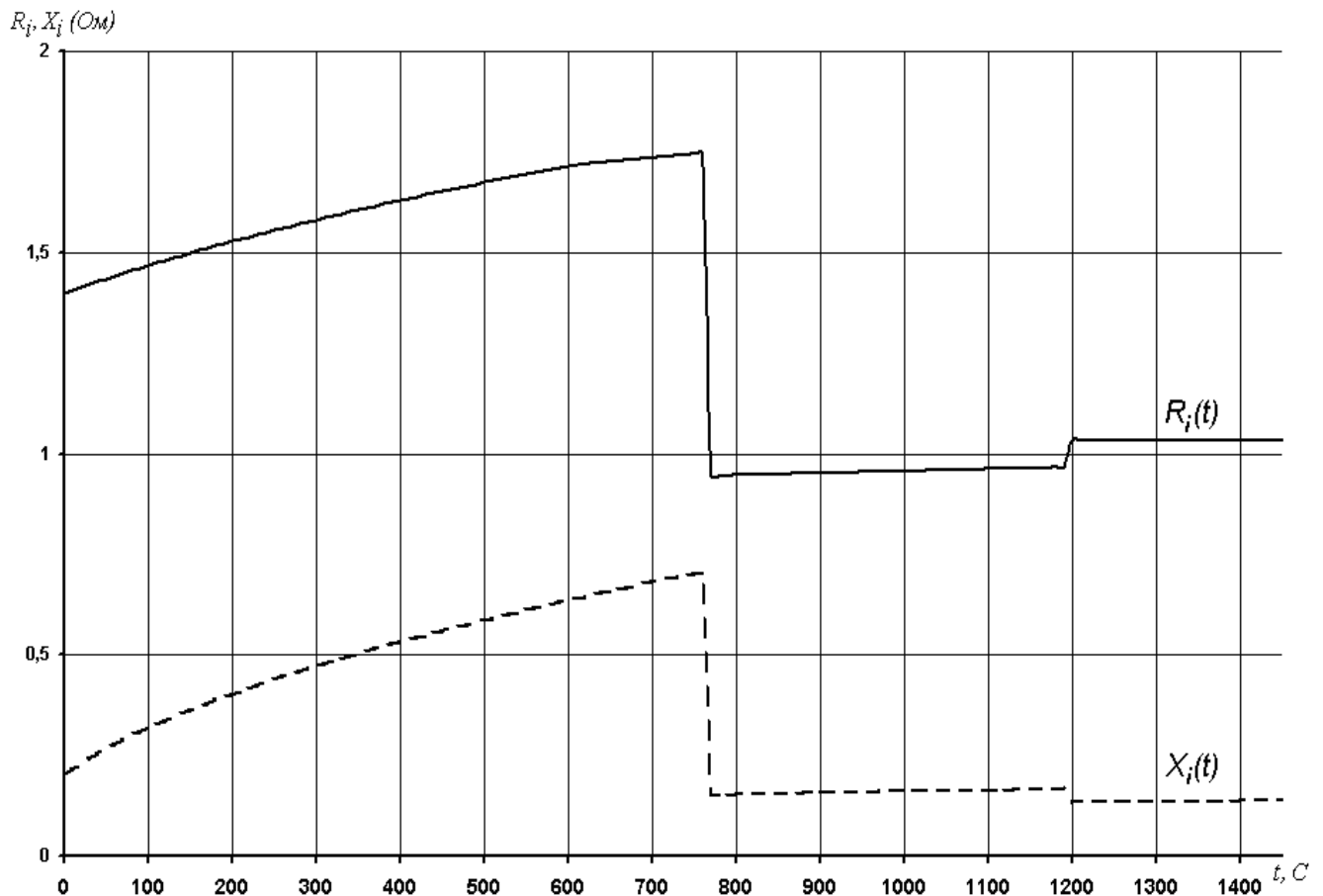


Рисунок 2.13 – Графік залежності еквівалентного активного R_i і реактивного X_i електричних опорів навантаженого індуктора від температури у процесі плавлення

Як видно, процес плавлення має три характерні зони:

- 1 зона - від початкової температури завантажувальної шихти ($t_{н.з.} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$) до температури точки Кюрі ($t_K = 760 \text{ }^\circ\text{C}$);

- 2 зона - від температури точки Кюрі до температури плавлення завантаження $t_{пл.} = 1200 \text{ }^\circ\text{C}$;

- 3 зона - від температури плавлення завантаження до температури розливання (перегріву) металу $t_{nep.} = 1450^{\circ}\text{C}$.

Значення активного опору росте від початкової температури завантажувальної шихти ($t_{n.z.} = 20^{\circ}\text{C}$) до температури точки Кюрі ($t_K = 760^{\circ}\text{C}$). Це пояснюється ростом абсолютного питомого електричного опору шихти з температурою - рисунки 2.10, 2.11 (з кривої на рисунку 2.10 видно, що в проміжку $15^{\circ}\text{C} \dots 800^{\circ}\text{C}$ питомий опір зростає. Надалі зростання питомого опору сповільнюється, причому значення його для різних сортів чавунів стають майже рівними).

Після температури точки Кюрі відбувається різкий спад еквівалентного активного електричного опору навантаженого індуктора, що можна пояснити втратою феромагнітними тілами (шматками шихти) своїх магнітних властивостей - рисунок 2.10 (робота індукційної печі стає аналогічній роботі повітряного трансформатора, тобто трансформатора без осердя).

Далі еквівалентний активний електричний опір індуктора незначно росте до температури плавлення завантаження $t_{nl.} = 1200^{\circ}\text{C}$ (тому що абсолютний питомий електричний опір чавуну продовжує трохи зростати).

При розплавленні шихти (1200°C) відбувається зміна агрегатного стану завантаження, його абсолютний питомий електричний опір різко зростає (рисунок 2.11), що відображається на кривій еквівалентного активного опору індуктора (рисунок 2.13).

Графік зміни еквівалентного реактивного електричного опору навантаженого індуктора X_i у процесі плавлення є схожим з графіком зміни еквівалентного активного електричного опору навантаженого індуктора, зображеного на рисунку 2.13. Відмінністю є те, що при температурі плавлення завантаження ($t_{nl.} = 1200^{\circ}\text{C}$) еквівалентний реактивний електричний опір індуктора не зростає, як еквівалентний активний електричний опір індуктора, а має характерний спад. Він пояснюється тим, що при сплавленні окремих шматків шихти в єдиний циліндр значно зростає відносний радіус еквівалентного одиничного циліндра m_l (у формулі 2.7 значення характерного розміру середнього

шматка шихти $d_{ш}$ стає значенням середнього внутрішнього діаметру тигля індукційної печі D_2).

На рисунку 2.14 наведено графік зміни у часі еквівалентного активного R_i і реактивного X_i електричних опорів навантаженого індуктора.

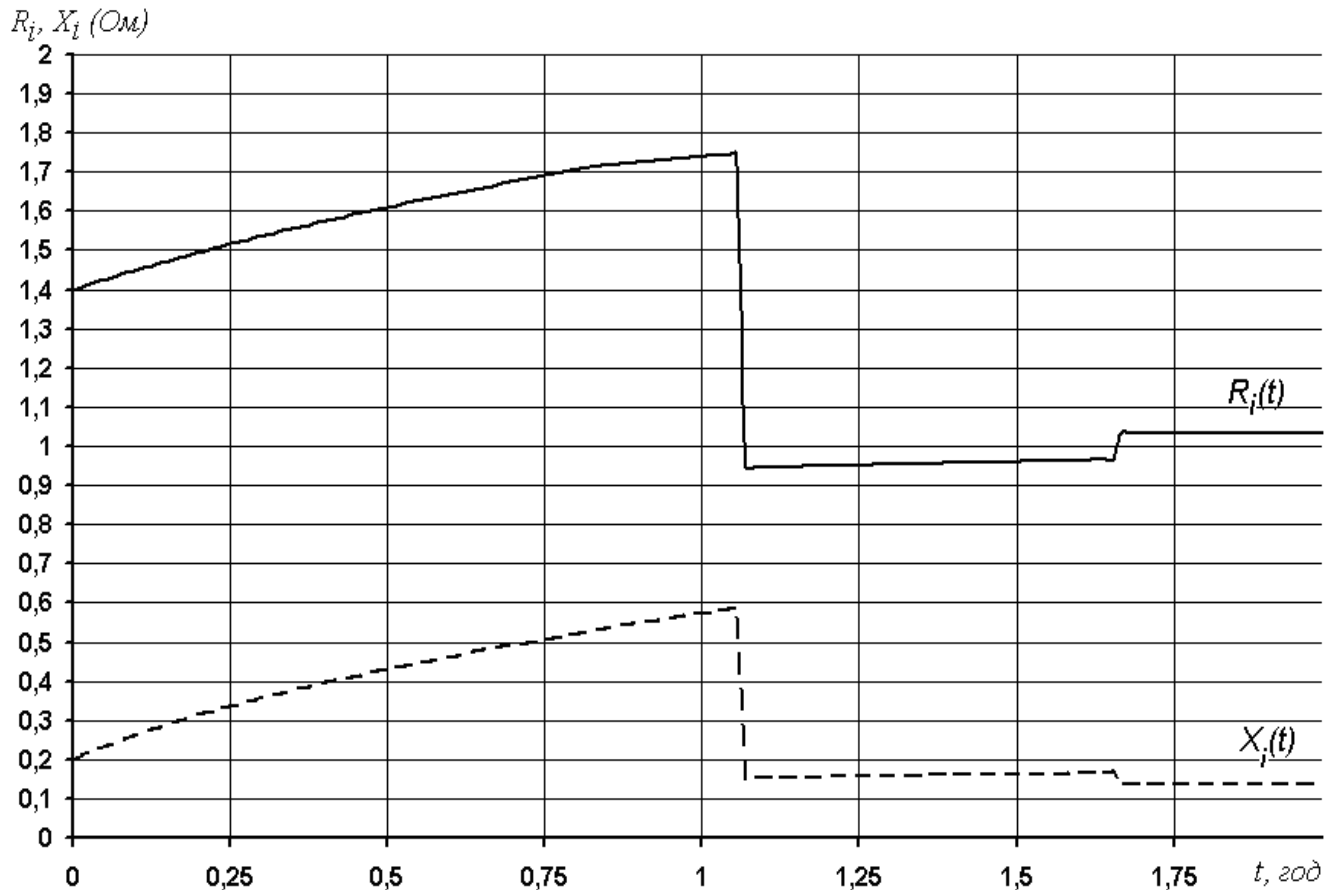


Рисунок 2.14 – Графік зміни у часі еквівалентного активного R_i і реактивного X_i електричних опорів навантаженого індуктора

Магнітний потік в печі без осердя проходить по самій шихті.. Між шматками шихти на початковій стадії плавки немає суцільного контакту, контактний опір між шматками шихти набагато більше внутрішнього опору самого шматка, тому розподіл напруженості магнітного поля наблизатиметься до напруженості в порожньому індукторі. Протягом плавки ця картина постійно змінюється із зміною властивостей шматків шихти, а отже, змінюється і внутрішній опір завантаження печі, що приведе до постійної зміни режиму роботи печі протягом плавки за інших рівних умов (незмінній величині напруги

живлення, а також її частоти). Інакше кажучи, при плавці в печі без осердя феромагнітних металів розігрівання шихти в перший період (до точки Кюрі) відбудеться не тільки за рахунок тепла, що виділяється від циркуляції в ній вихрових струмів, але і за рахунок втрат на перемагнічування, яке в цей період спостерігається в шихті. Після точки Кюрі феромагнітні тіла втрачають свої магнітні властивості.

Для забезпечення умови резонансу струму (формула 2.1) у нагрівальному контурі (рисунок 2.7) та наближення значення коефіцієнту потужності індукційної печі до одиниці паралельно індуктору треба підключити батарею компенсувальних конденсаторів, ємність яких знаходиться за формулою 2.25 (у формулу підставленні данні графіка на рисунку 2.13).

Графіки зміни ємності батареї компенсувальних конденсаторів для підтримання резонансу струму в контурі індуктора у процесі плавлення та графіки реактивної потужності цієї батареї конденсаторів (за формулою 2.26 - 2.27) наведені, відповідно, на рисунку 2.15 та 2.16, де:

- C_p - розрахункова ємність батареї конденсаторів (формула 2.25), яка забезпечить коефіцієнт потужності установки близький до одиниці;

- C_b – ємність батареї конденсаторів, яка використовується для компенсації реактивної потужності оператором при ручному регулюванні у процесі плавлення (використовуються 8 секцій батареї конденсаторів по 3010 мкФ кожна);

- C_n - ємність батареї конденсаторів, яка використовується для компенсації реактивної потужності при автоматичному режимі регулювання за допомогою контролера типу АРМ/ІІ у процесі плавлення (можлива ємність батареї конденсаторів складає 860мкФ...27520мкФ з кроком 860мкФ);

- Q_p - реактивна потужність батареї конденсаторів при розрахунковій ємності, яка необхідна для забезпечення коефіцієнта потужності установки близького до одиниці (формула 2.26);

- Q_b – реактивна потужність батареї конденсаторів, яка використовується оператором при ручному регулюванні у процесі плавлення (формула 2.27);

- Q_n - реактивна потужність батареї конденсаторів, яка використовується у автоматичному режимі [18] за допомогою контролера (формула 2.28).

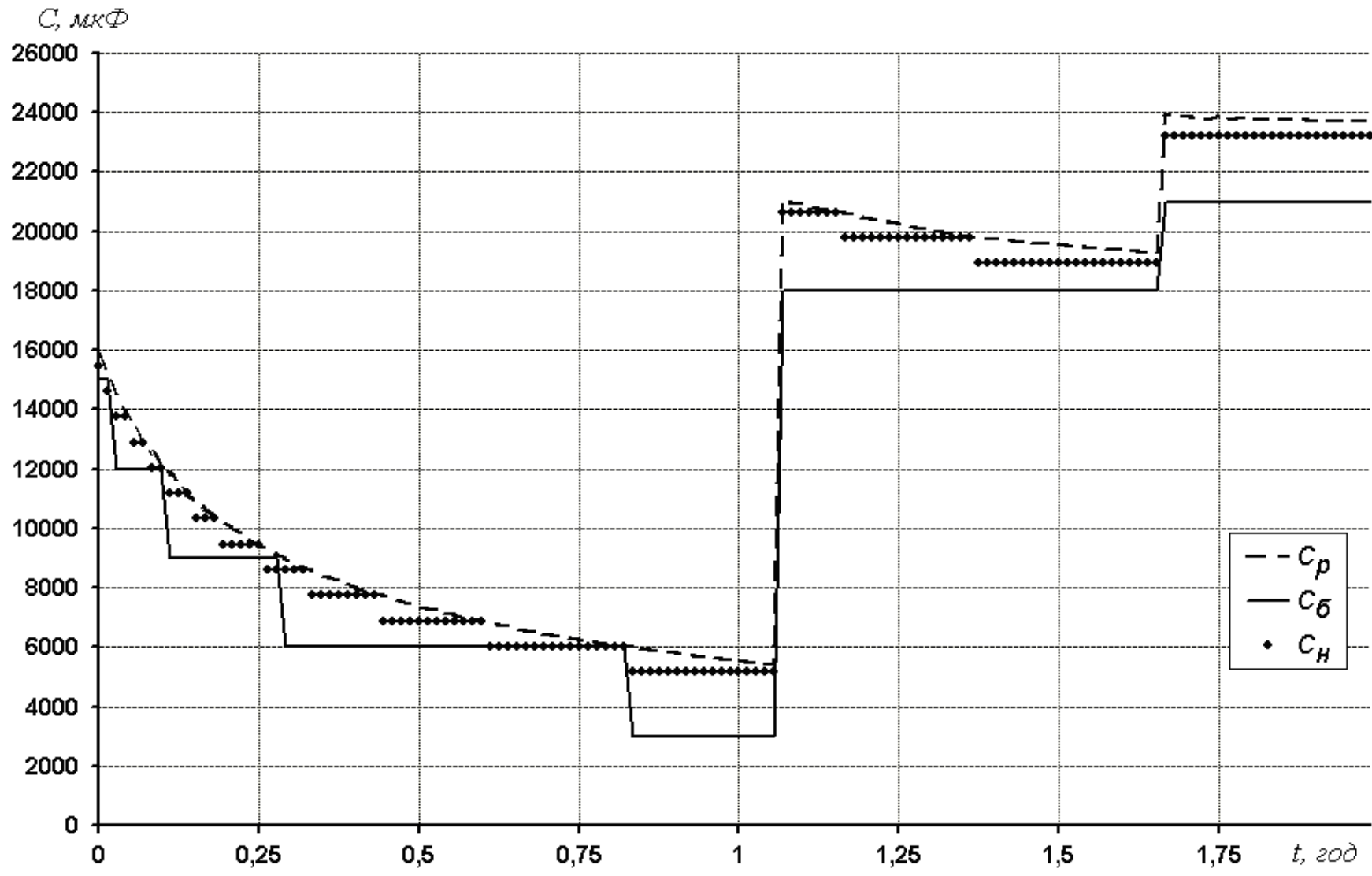


Рисунок 2.15 – Графік зміни ємності батареї компенсувальних конденсаторів для підтримання резонансу струму в контурі індуктора у процесі плавлення

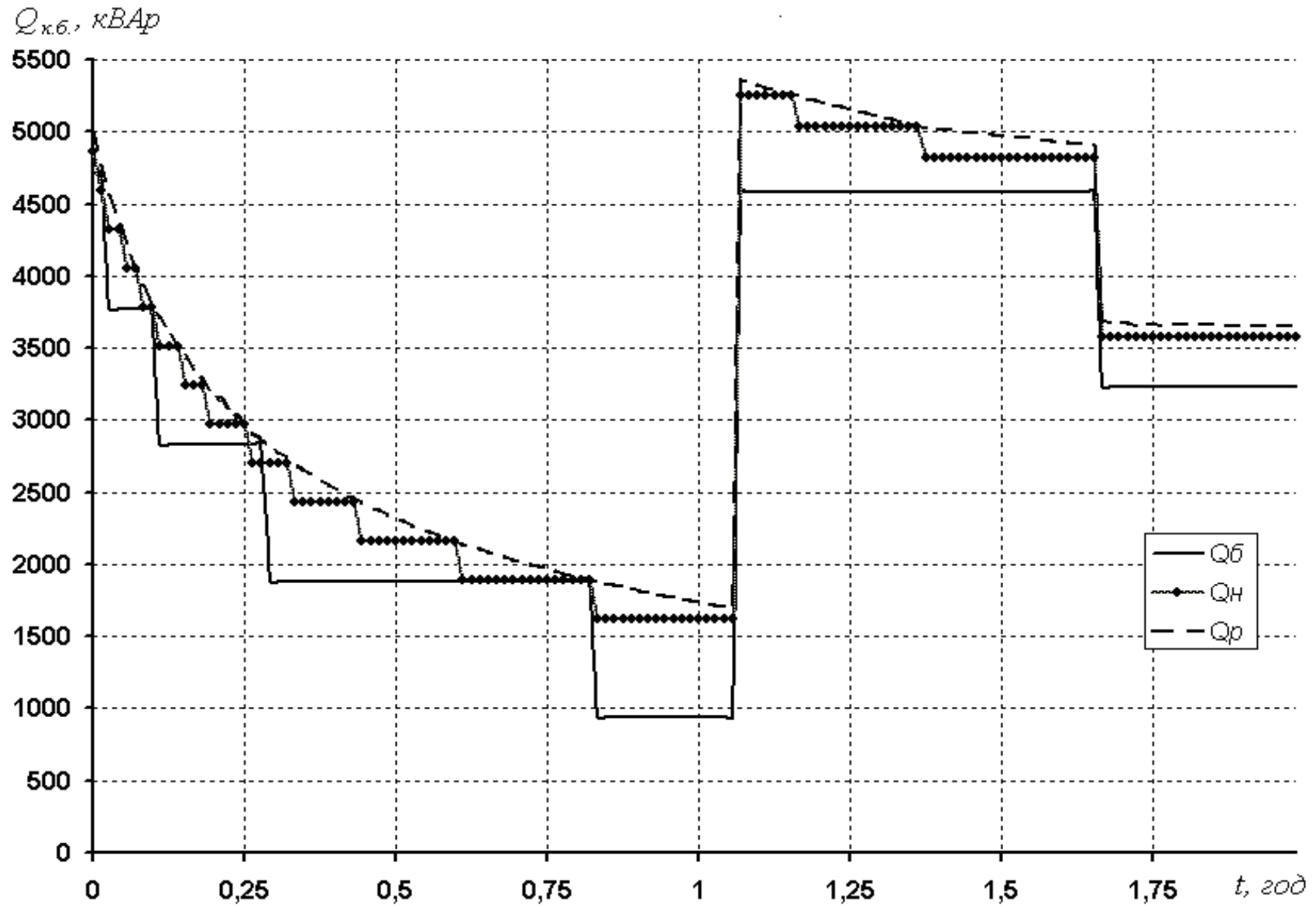


Рисунок 2.16 – Графік зміни реактивної потужності батареї компенсувальних конденсаторів у процесі плавлення

2.3.5 Визначення режиму роботи контролера в системі автоматичного керування компенсацією реактивної потужності на кожному етапі процесу плавлення

Значення еквівалентного активного опору навантаженого індуктора змінюється у процесі плавлення (рисунки 2.13, 2.14). Як видно, процес плавлення має три характерні етапи:

- 1 - від початкової температури завантажувальної шихти ($t_{п.з.} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$) до температури точки Кюрі ($t_K = 760 \text{ }^\circ\text{C}$);
- 2 - від температури точки Кюрі до температури плавлення завантаження $t_{пл.} = 1200 \text{ }^\circ\text{C}$;
- 3 - від температури плавлення завантаження до температури розливання (перегріву) металу $t_{пер.} = 1450 \text{ }^\circ\text{C}$.

Графік зміни коефіцієнту навантаження трансформатора β у процесі плавлення наведено на рисунку 2.17.

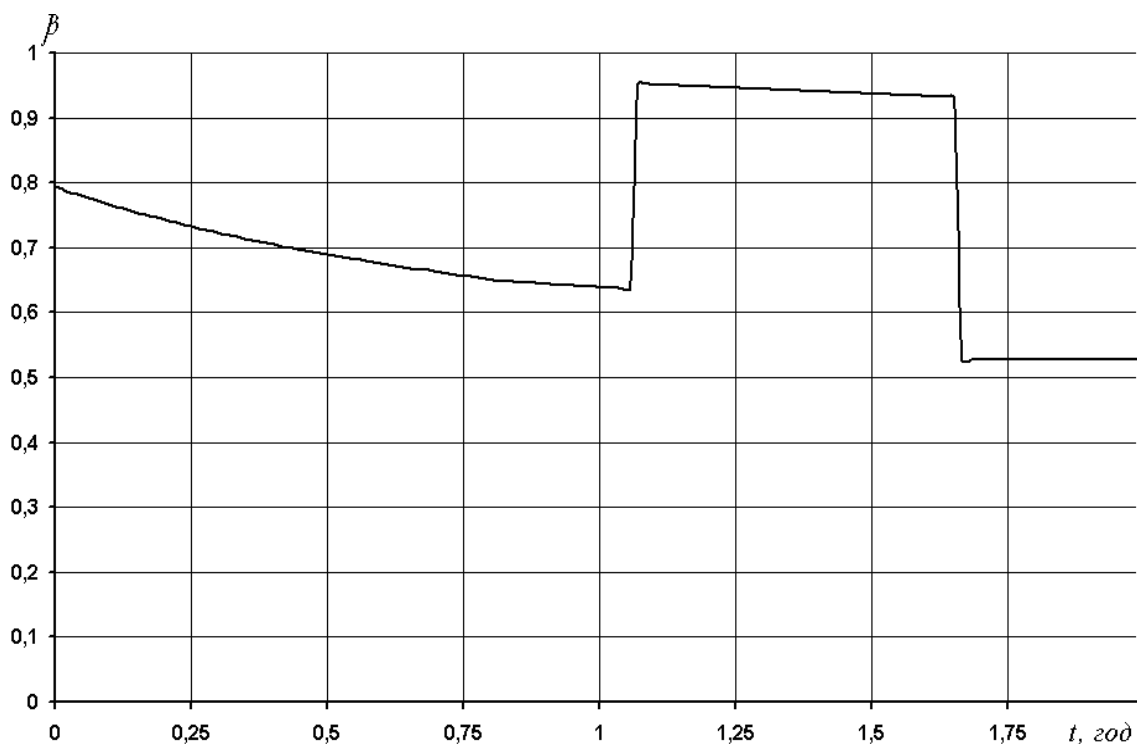
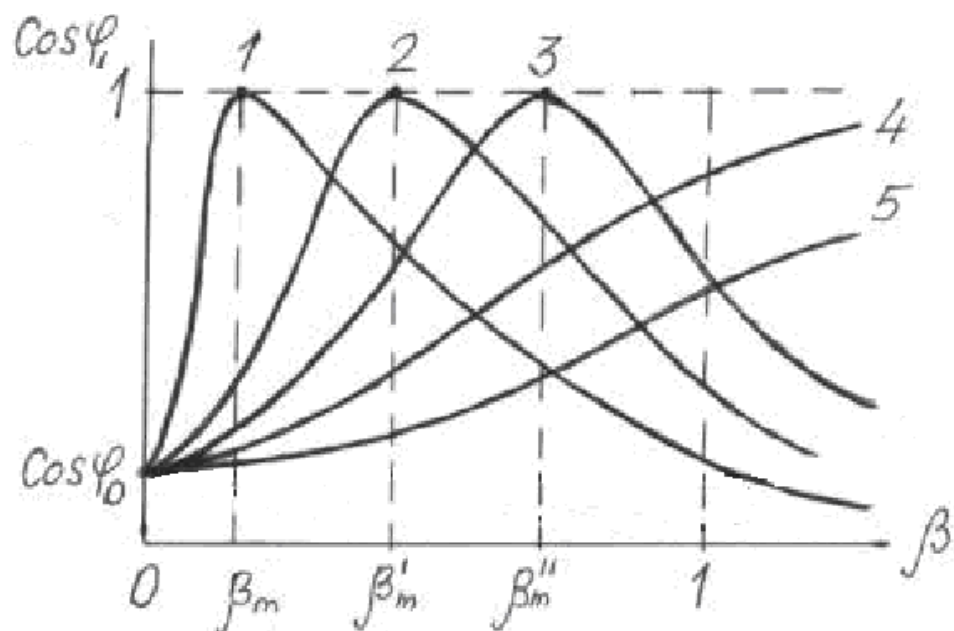


Рисунок 2.17 - Зміна коефіцієнту навантаження пічного трансформатора у процесі плавлення

На першому та другому етапах для найшвидшого розплавлення шихти потрібно передати у садку велику потужність, тому на індуктор печі подають найбільш можливу напругу з обмоток пічного трансформатора. На третьому етапі, після розплавлення завантаження, для викачування шлаку і рафінування потрібно обмежити потужність на індукторі, щоб перегріти розплавлений метал до температури розливу (рисунок 2.7).

На рисунку 2.18 показана залежність коефіцієнту потужності трансформатора $\cos\varphi_1$ від коефіцієнту навантаження β при різних значеннях коефіцієнтів потужності навантаження $\cos\varphi_2$.



1, 2, 3 – активно-емнісний характер навантаження: при збільшенні $\cos\varphi_2$, максимум зміщується вправо ($-1 < \cos\varphi_2 < 0$); 4 – RLC навантаження, $\cos\varphi_2$ близький до 1; 5 – активно-індуктивне навантаження ($0 < \cos\varphi_2 < 1$).

Рисунок 2.18 – Залежність коефіцієнту потужності трансформатора $\cos\varphi_1$ від коефіцієнту навантаження β при різних значеннях коефіцієнту потужності навантаження $\cos\varphi_2$

Таким чином, трансформатор індукційної тигельної печі є нерівномірно навантажений на кожному етапі плавлення [19].

На рисунку 2.17 видно, що на першому та третьому етапах плавлення потужність, яку видає пічний трансформатор значно менше за номінальну.

Це пояснюється тим що на першому етапі активний електричний опір навантаженого індуктора є дуже великий (рисунок 2.14), а на третьому етапі потрібно зменшити напругу на індукторі, щоб перегріти розплавлений метал до температури розливу (рисунок 2.7).

У такому режимі роботи трансформатор має низький коефіцієнт потужності на первинній обмотці $\cos\varphi_1$, що негативно впливає на електричну мережу підприємства.

Для знаходження величини коефіцієнту потужності $\cos\varphi_2$, який потрібно підтримувати у навантаженні, щоб отримати на вході трансформатора $\cos\varphi_1$ близький до номінального, використаємо формулу:

$$\cos\varphi_2 = \frac{I_{xx} (\cos\varphi_1 - \cos\varphi_0)}{I_{1n}\beta} - 1, \quad (2.30)$$

де I_{xx} – величина струму холостого ходу трансформатора, для трансформатора типу ЭОМП-1000 складає приблизно 15 А [20];

$\cos\varphi_1$ – потрібна величина коефіцієнту потужності на первинній обмотці пічного трансформатора, прийmemo $\cos\varphi_1 = 0,95$;

$\cos\varphi_0$ - величина коефіцієнту потужності холостого ходу трансформатора, для трансформатора типу ЭОМП-1000 складає приблизно $\cos\varphi_0 = 0,2$;

I_{1n} - номінальне значення струму первинної обмотки трансформатора – формула 2.31;

β - коефіцієнт навантаження трансформатора, прийmemo середні значення для кожного етапу плавлення (рисунок 2.17): $\beta_1=0,7$, $\beta_2=0,95$, $\beta_3=0,52$.

Номінальне значення струму первинної обмотки трансформатора:

$$I_{1n} = S_n / U_{1n}, \quad (2.31)$$

де S_n - номінальна потужність трансформатора, $S_n = 1000000 \text{ В} \cdot \text{А}$;

U_{1n} - номінальна напруга на первинній обмотці трансформатора $U_{1n} = 6000 \text{ В}$.

$$I_{IH}=1000000/6000=166,6 \text{ А.}$$

За формулою 2.30 знайдемо величини коефіцієнтів потужності $\cos\varphi_2$ на кожній ділянці плавлення (рисунок 2.17), які потрібно підтримувати у навантаженні, щоб отримати на вході трансформатора $\cos\varphi_1$ близький до заданого:

$$\cos\varphi_2^{(1)} = 15 \cdot (0,95 - 0,2) / (166,6 \cdot 0,7) - 1 = -0,903;$$

$$\cos\varphi_2^{(2)} = 15 \cdot (0,95 - 0,2) / (166,6 \cdot 0,95) - 1 = -0,929;$$

$$\cos\varphi_2^{(3)} = 15 \cdot (0,95 - 0,2) / (166,6 \cdot 0,52) - 1 = -0,870.$$

Величину додаткової ємності, яку треба підключати на навантаженні, щоб отримати на вході трансформатора $\cos\varphi_1$ близький до заданого можна знайти за формулою:

$$C_{\text{доп}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{\cos^2\varphi_2} - 1}}{2\pi f R_i}, \quad (2.32)$$

де R_i - активний електричний опір навантаженого індуктора (рисунок 2.14), прийнемо насупні середні значення на кожній ділянці: $R_i^{(1)} = 1,65 \text{ Ом}$, $R_i^{(2)} = 0,95 \text{ Ом}$, $R_i^{(3)} = 1,05 \text{ Ом}$.

За формулою 2.32 знайдемо величини додаткових ємностей на кожному етапі плавлення, які треба підключати на навантаженні, щоб отримати на вході трансформатора $\cos\varphi_1$ близький до заданого: $C_{\text{доп}}^{(1)} = 916 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$, $C_{\text{доп}}^{(2)} = 1338 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$, $C_{\text{доп}}^{(3)} = 720 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$.

Таким чином на кожному етапі плавлення бажано збільшити ємність конденсаторної батареї для покращання величини коефіцієнту потужності на

первинній обмотці пічного трансформатора.

Таким чином, як було зазначено вище, на першому та другому етапах плавлення для найшвидшого розплавлення шихти потрібно передати у садку велику потужність, тому на індуктор печі подають найбільш можливу напругу з обмоток пічного трансформатора. На третьому етапі, після розплавлення завантаження, для викачування шлаку і рафінування потрібно обмежити потужність на індукторі, щоб перегріти розплавлений метал до температури розливу. Тобто, трансформатор індукційної тигельної печі є нерівномірно навантажений на кожному етапі плавлення: на першому та третьому етапах плавлення потужність, яку видає пічний трансформатор значно менша за номінальну. Це пояснюється тим що на першому етапі активний електричний опір навантаженого індуктора є дуже великий, а на третьому етапі потрібно зменшити напругу на індукторі, щоб перегріти розплавлений метал до температури розливу (рисунок 2.7). У такому режимі роботи трансформатор має низький коефіцієнт потужності на первинній обмотці $\cos\varphi_1$, що негативно впливає на електричну мережу підприємства. Щоб збільшити показник коефіцієнту потужності пічного трансформатора, запропоновано використання додаткової ємності на навантаженні.

На рисунку 2.19 зображений графік зміни ємності батареї компенсувальних конденсаторів у ході плавки при підтриманні контролером реактивної потужності на навантаженні з заданим ємнісним характером, де:

- C_p - розрахункова ємність батареї конденсаторів (формула 2.25);
- C_k - ємність батареї конденсаторів, яка використовується для компенсації реактивної потужності в автоматичному режимі регулювання за допомогою контролера типу АРМ/ІІ при підтриманні ним нульової реактивної потужності на навантаженні;
- $C_{пер}$ - ємність батареї конденсаторів, яка використовується для компенсації реактивної потужності в автоматичному режимі регулювання за допомогою контролера типу АРМ/ІІ при підтриманні ним реактивної потужності на навантаженні з заданим ємнісним характером.

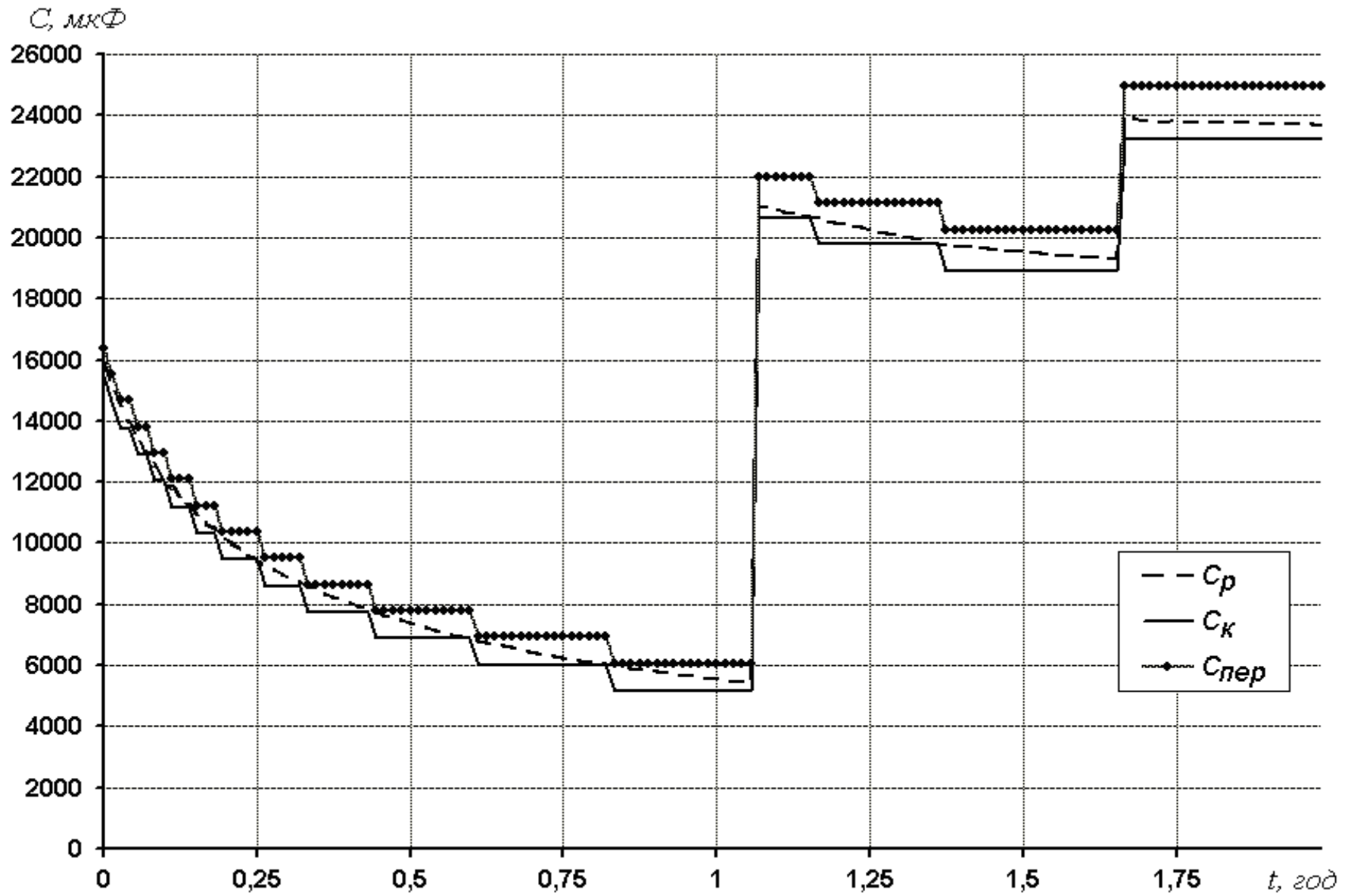


Рисунок 2.19 – Графік зміни ємності батареї компенсувальних конденсаторів у ході плавки.

Приклад зміни коефіцієнту потужності трансформатора $\text{Cos}\varphi_1$ зображений на рисунку 2.20, де:

- коефіцієнт потужності навантаження $\text{Cos}\varphi_2$ близький до 1 - скомпенсоване RLC -навантаження;

- коефіцієнт потужності навантаження має активно-ємнісний характер, $\text{Cos}\varphi_2 = -0,87$ (графік побудовано для третього етапу плавлення).

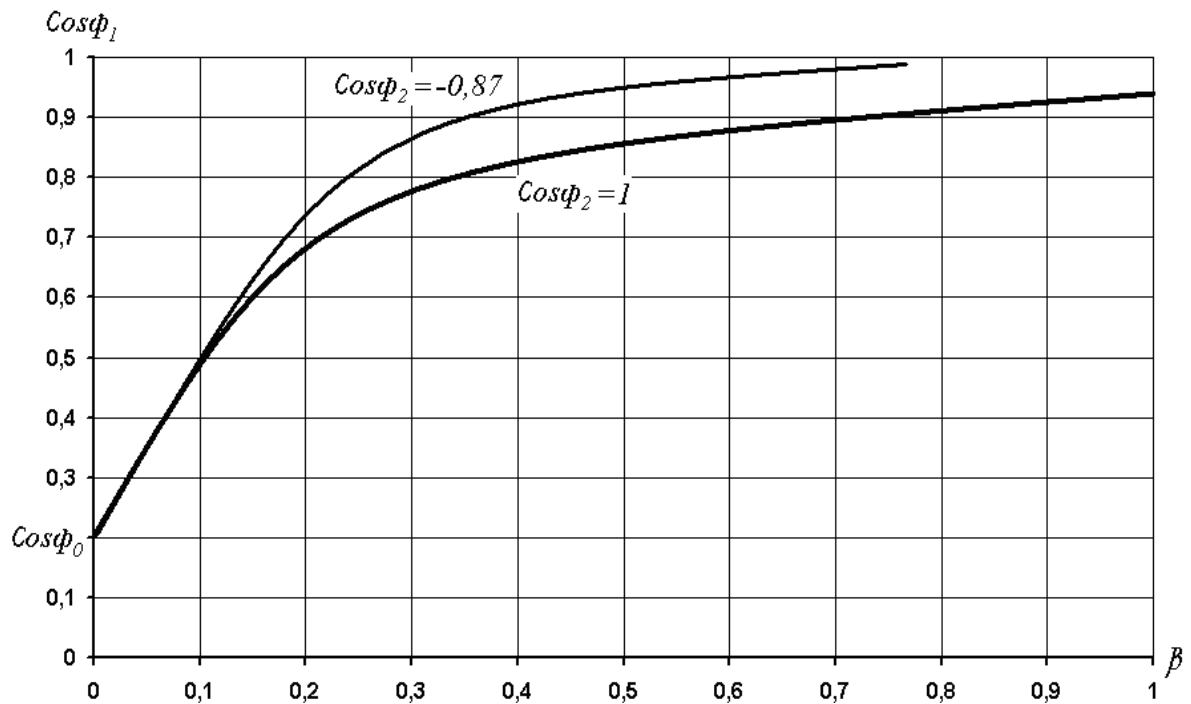


Рисунок 2.20 – Залежність коефіцієнту потужності трансформатора $\text{Cos}\varphi_1$ від коефіцієнту навантаження β

Як показано на рисунку, при малому коефіцієнті навантаження $\beta=0,5$ пічного трансформатора використання додаткової ємності на навантаженні дозволяє збільшити коефіцієнт потужності трансформатора $\text{Cos}\varphi_1$ від 0,85 до 0,95, що приведе до зменшення споживаної реактивної потужності плавильним комплексом. Також має місце зменшення витрат активної енергії за рахунок зниження температури у електричній силовій частині плавильного комплексу при його розвантаженні від реактивних струмів. Таким чином раціональне використання електроенергії на плавку металу дозволяє зменшити електроспоживання індукційної плавильної установки.

2.4 Розрахунок та вибір конденсаторних батарей для компенсації реактивної потужності

Найбільш поширеними видами компенсуючих пристроїв, що виконують роль місцевих генераторів реактивної потужності на підприємствах, є батареї статичних конденсаторів та синхронні двигуни. Конденсаторні батареї встановлюють на цехових загальнозаводських трансформаторних підстанціях з боку низької або високої напруги.

Чим ближче пристрій, що компенсує, до приймачів реактивної енергії, тим більше ланок системи електропостачання розвантажується від реактивних струмів. Однак при централізованій компенсації, тобто при встановленні конденсаторів на трансформаторних підстанціях, конденсаторна потужність використовується повніше.

Потужність конденсаторних батарей може бути визначена діаграмою

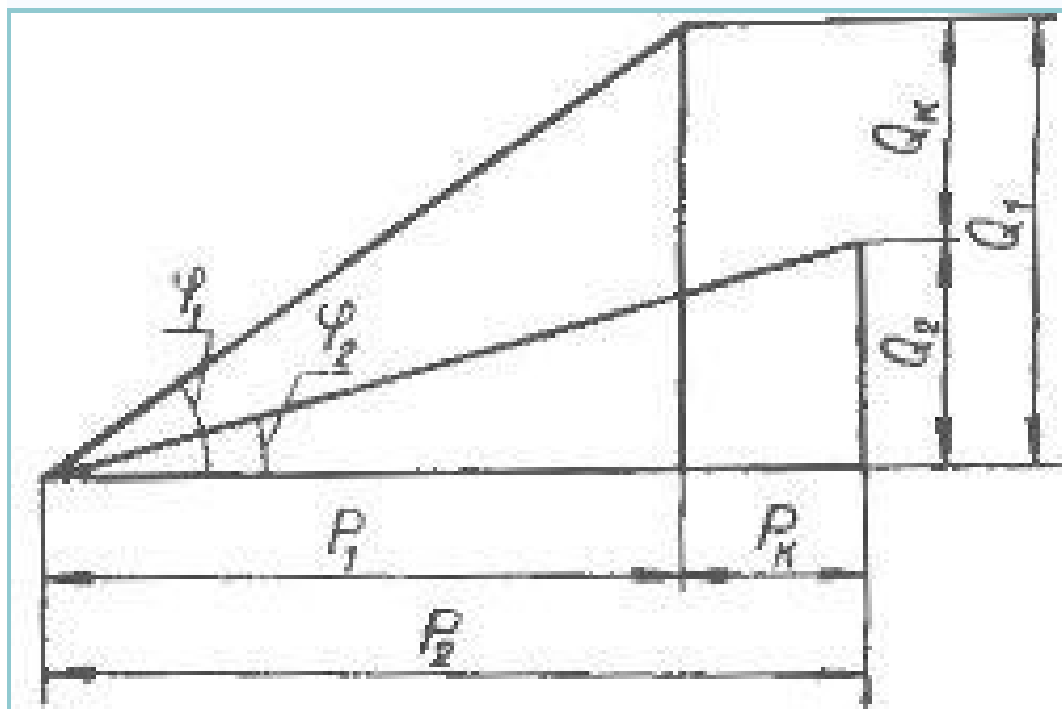


Рисунок 2.21 – Діаграма потужностей

$$Q_k = P_1 \cdot \operatorname{tg} \varphi_1 - P_2 \cdot \operatorname{tg} \varphi_2, \quad (2.32)$$

де P_1 і P_2 – навантаження до і після компенсації;

φ_1 і φ_2 – відповідні кути зсуву фаз.

Реактивна потужність, що віддається компенсує установкою,

$$Q = Q_1 - Q_2, \quad (2.33)$$

де Q_1 і Q_2 - реактивна потужність до і після компенсації.

Активна потужність, споживана з мережі компенсує пристроєм,

$$P_k = P_2 - P_1, \quad (2.34)$$

Величину необхідної потужності конденсаторної батареї можна визначити наближено без урахування втрат в конденсаторах, які складають 0,003 - 0,0045 кВт / кВар

$$Q_k = P(\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2), \quad (2.35)$$

Приклад розрахунку і вибір конденсаторних батарей для компенсації реактивної потужності.

Необхідно визначити номінальну потужність Q_k конденсаторної батареї, необхідної для підвищення коефіцієнта потужності до значення 0,95 на підприємстві з тризмінним рівномірним графіком навантаження. Середньодобова витрата електроенергії $A_a = 9500$ кВт·год; $A_p = 7600$ кВар·год. Конденсатори встановлені на напругу 380В.

Середньодобове навантаження:

$$P_{cp} = \frac{A_a}{24} = \frac{9500}{24} = 396 \text{ кВт}, \quad (2.35)$$

Потужність конденсаторних батарей:

$$Q_k = 396(0,8 - 0,32) = 190 \text{ кВар},$$

де $tg\varphi_1 = A_p / A_a = 7600/9500 = 0,8$, $tg\varphi_2 = (1 - 0,952) / 0,95 = 0,32$

Вибираємо трифазні конденсатори типу КМ1-0,38-13 кожен номінальною потужністю 13 кВар на напругу 380В. Число конденсаторів в батареї:

$$n = \frac{Q_k}{13} = \frac{190}{13} = 14$$

Потужність різних конденсаторних установок для середньодобової навантаження можна знайти в електротехнічних довідниках і каталогах виробників.



Рисунок 2.22 – Блок – схема алгоритму розрахунку конденсаторної установки необхідної для компенсації

3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧОГО ЗАХОДУ

Для підвищення енергоефективності дві індукційні печі ІЧТ-2,5 запропоновано обладнати контролером автоматичного керування компенсацією реактивної потужності типу АРМ/ІІІ. Характеристика запропонованого заходу наведена в таблиці 3.1 [21].

Таблиця 3.1 - Характеристики запропонованого заходу модернізації

Параметри		Одиниці вимірювання	Величина
Споживання електроенергії до модернізації	Витрати активної енергії на одну плавку	кВт·год	1620
	Витрати реактивної енергії на одну плавку	кВар·год	1170
модернізації	Витрати активної енергії на одну плавку	кВт·год	1580

	Витрати реактивної енергії на одну плавку	кВар·год	490
Затрати на модерізацію	Вартість контролеру автоматичного керування компенсацією реактивної потужності типу АРМ/ІІІ	грн	15500
	Вартість силових контакторів ІОР-2100СС (6 штук)	грн	63000
однієї печі	Вартість монтажних робіт	грн	22500

Термін окупності проекту [22] розраховується за формулою:

$$T_{ок} = K_{сум} / E, \quad (3.1)$$

де $K_{сум}$ - вартість обладнання та монтажних робіт, згідно таблиці 3.1 для двох печей $K_{сум} = 202000$ грн;

E – річна економія від реалізації проекту.

Для розрахунку річної економії від реалізації проекту використаємо формулу:

$$E = (E_a + E_p) \cdot n_{пл}, \quad (3.2)$$

де E_a – зниження витрат на споживання активної енергії піччю на одну плавку;

E_p – зниження витрат на споживання реактивної енергії піччю на одну плавку;

n_{nl} – кількість плавки на рік.

Зниження витрат на споживання активної енергії піччю на одну плавку:

$$E_a = W_e \cdot T, \quad (3.3)$$

де W_e - зниження споживання активної енергії піччю на одну плавку, згідно таблиці 3.1 $W_e = 40$ кВт·год;

T - тариф за 1 кВт·год споживаної активної енергії, $T = 3,61$ грн/кВт·год.

$$E_a = 40 \cdot 3,61 = 144,40 \text{ грн.}$$

Зниження витрат на споживання реактивної енергії піччю на одну плавку:

$$E_p = Q_e \cdot T_q \cdot D, \quad (3.4)$$

де Q_e – зниження споживання реактивної енергії піччю на одну плавку, згідно таблиці 3.1 $Q_e = 680$ кВар·год;

T_q - тариф за 1 кВар·год, згідно договору з енергопостачальною організацією $T_q = 1,31$ грн/кВар·год;

D – сумарний економічний еквівалент реактивної потужності, згідно договору з енергопостачальною організацією $D = 1,12$ кВт/кВар.

$$E_p = 680 \cdot 1,31 \cdot 1,12 = 250,30 \text{ грн.}$$

Кількість плавки на рік розраховується за формулою:

$$n_{nl} = n_n \cdot \Phi_{\psi} \cdot K_n / t_{nl}, \quad (3.5)$$

де n_n – кількість печей, $n_n = 2$;

Φ_q – фонд роботи обладнання, $\Phi_q = 3975$ год;

K_n – коефіцієнт попиту обладнання, $K_n = 0,68$;

$t_{пл}$ - час однієї плавки, $t_{пл} = 1,97$ год.

$$n_{пл} = 2 \cdot 3975 \cdot 0,68 / 1,97 = 2744 \text{ плавки.}$$

Річна економія від реалізації проекту за формулою 3.2 складе:

$$E = (144,40 + 250,30) \cdot 2744 = 196745 \text{ грн.}$$

Термін окупності проекту за формулою 3.1:

$$T_{ок} = 202000 / 196745 = 1,027 \text{ роки.}$$

Економічна ефективність капітальних вкладень розраховується за формулою:

$$E_{ек} = 1 / T_{ок}; \quad (3.6)$$

$$E_{ек} = 1 / 1,027 = 0,974.$$

Чиста приведена вартість проекту (ЧПВ) – це різниця між величиною грошового потоку, дисконтованого за прийнятою ставкою дохідності і сумою інвестицій [23]. Для розрахунку ЧПВ проекту необхідно визначити ставку дисконту, використати її для дисконтування потоків витрат та вигод і підсумувати дисконтовані вигоди і витрати.

В економічному аналізі ставка дисконту являє собою закладену вартість капіталу, тобто прибуток, який міг би бути одержаний при інвестуванні найприбутковіших альтернативних проектів [24]. Якщо ЧПВ позитивна, то проект можна рекомендувати для фінансування. Якщо ЧПВ дорівнює нулю, то надходжень від проекту вистачить лише для відновлення вкладеного капіталу.

Якщо менше нуля – проект не приймається. Таблиця 3.2 містить розрахунок чистої теперішньої вартості при ставці дисконту 10%.

Таблиця 3.2 - Розрахунок чистої теперішньої вартості

Роки	Доходи, грн	Грошовий потік, грн	Коефіцієнт дисконтування, K_0	Дисконтований грошовий потік, грн	Кумулятивний дисконтований грошовий потік, грн
0		-202000	1	-202000	-202000
1	196745	196745	1,1	178859,09	-23140,91
2	196745	196745	1,21	162599,17	139458,26
3	196745	196745	1,33	147928,57	287386,84
4	196745	196745	1,46	134756,85	422143,69
5	196745	196745	1,61	122201,86	544345,55

Згідно таблиці 3.2 ЧПВ дорівнює 544345,55 грн., тобто проект вважається ефективним (ЧПВ>0).

Внутрішня норма рентабельності (ВНР) – це рівень ставки дисконтування, при якому теперешня вартість проекту за його життєвий цикл дорівнює нулю [25]. ВНР проекту дорівнює ставці дисконту, при якій сумарні дисконтовані вигоди дорівнюють сумарним дисконтованим витратам, тобто внутрішня норма рентабельності є ставкою дисконту, при якій чиста теперешня вартість проекту проекту дорівнює нулю.

В таблиці 3.3 приведений розрахунок внутрішньої норми рентабельності проекту при ставці дисконту 320%.

Таблиця 3.3 – Чиста приведена вартість проекту при ставці дисконту 320%

Роки	Доходи, грн	Грошовий потік, грн	Коефіцієнт дисконтування, K_0	Дисконтований грошовий потік, грн	Кумулятивний дисконтований грошовий потік, грн
0		-202000	1	-202000	-202000
1	196745	196745	4,2	46844,05	-155155,95
2	196745	196745	17,64	11153,34	-144002,61
3	196745	196745	74,09	2655,48	-141347,12
4	196745	196745	311,2	632,21	-140714,91
5	196745	196745	1306,9	150,54	-140564,36

Внутрішня норма рентабельності проекту графічно визначена на рисунку 3.1. Дисконтований термін окупності проекту за допомогою графіка зображений на рисунку 3.2.

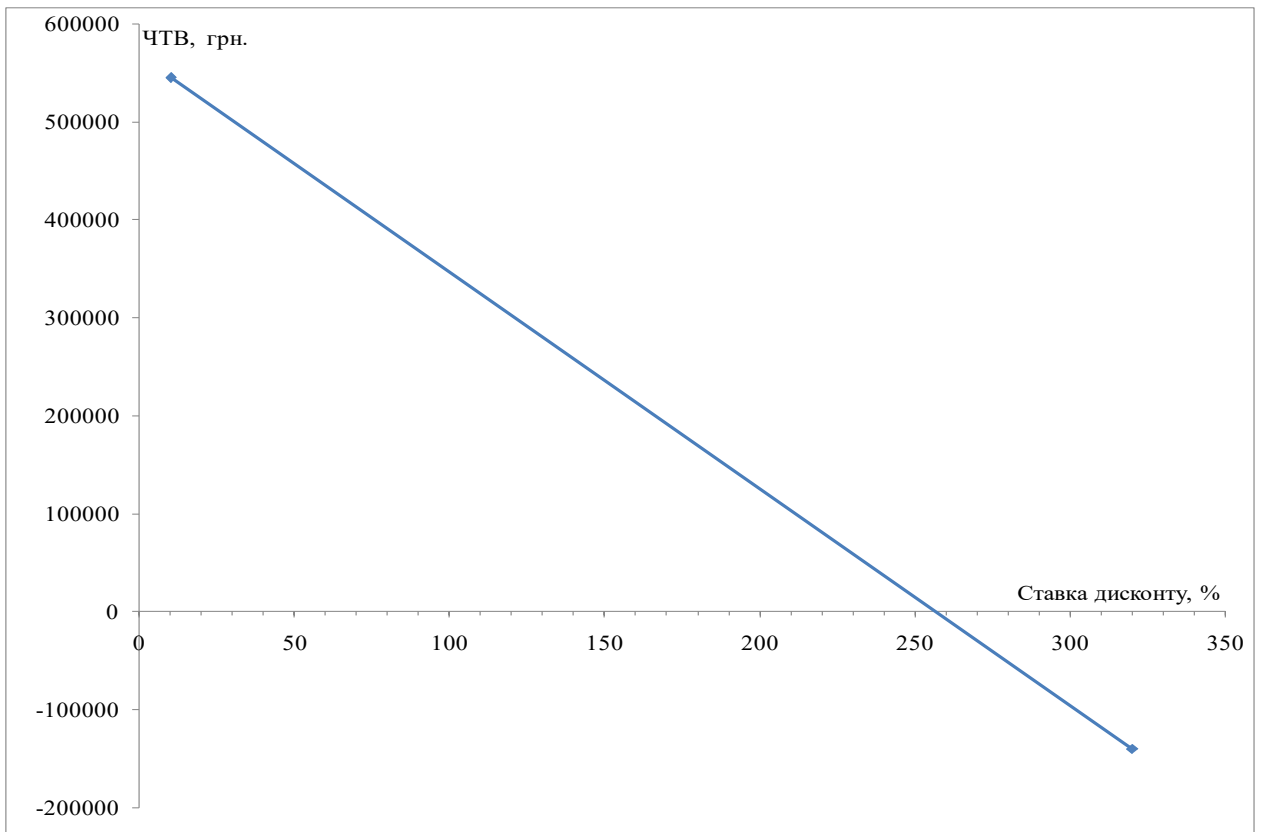


Рисунок 3.1 – Внутрішня норма рентабельності проекту

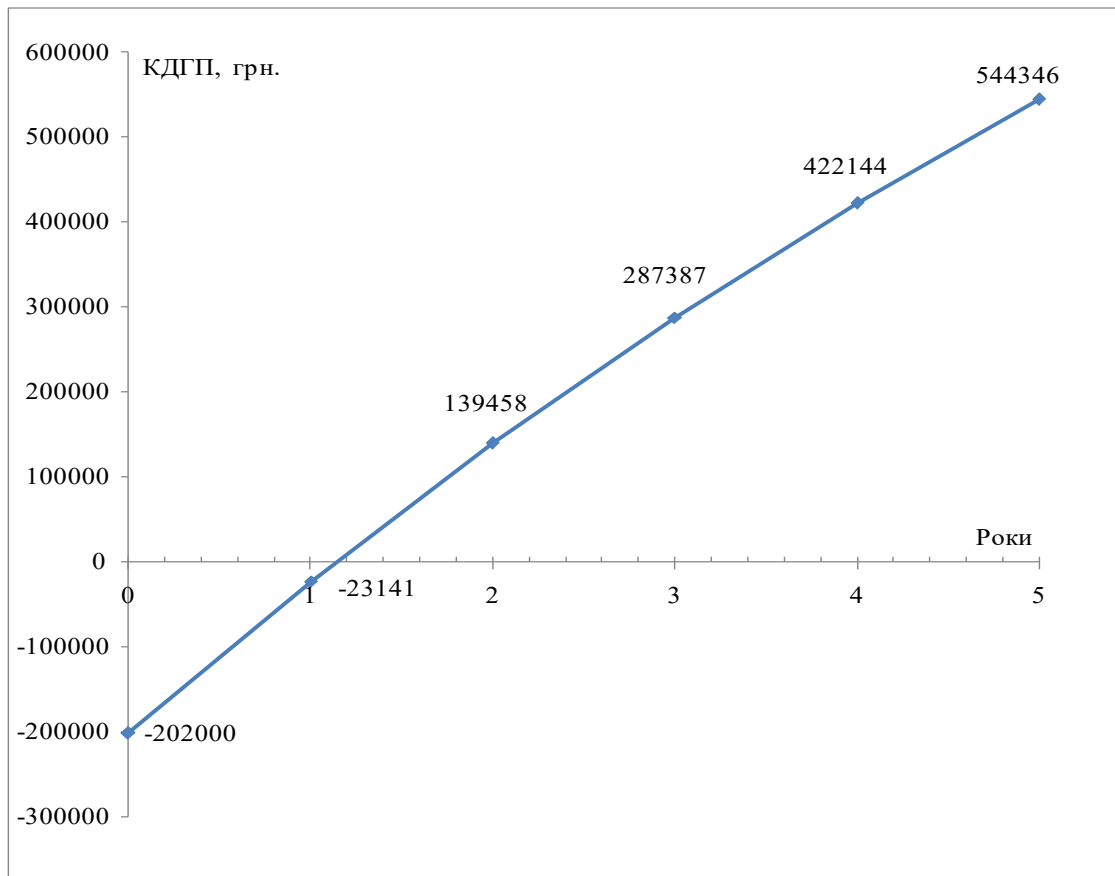


Рисунок 3.2 – Дисконтований термін окупності проекту

Із графіка на рисунку 3.1 видно, що внутрішня норма рентабельності проекту складає 255 %. В економічному аналізі ставка дисконту являє собою закладену вартість капіталу, тобто прибуток, який міг би бути одержаний при інвестуванні найприбутковіших альтернативних проектів [26]. Якщо ЧПВ позитивна, то проект можна рекомендувати для фінансування. Розглядаємий проект є ефективний, так як показник внутрішньої норми рентабельності більше прийнятої ставки дисконту, яка дорівнює 10 %.

Величина дисконтового терміну окупності (рисунок 3.2) дорівнює 1,2 роки, що більше, ніж простий термін окупності, який складає 1,027 роки.

Таким чином проект можна рекомендувати для реалізації. Високі показники ефективності дозволяють залучати для фінансування цього проекту сторонні організації (зовнішні фінансові ресурси).

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

4.1 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Технологічний процес плавки чавуну в індукційних печах включає наступні операції: завантаження шихти, нагрів і розплавлення металу при температурі 1260 °С, перегрівання, вуглецювання і доведення хімічного складу до заданого, а також його витримка. Готовий розплав переливають в міксер. Заливку форм роблять ковшом, який по монорейці підходить до міксера і заповнюється металом [27].

На ділянці плавильного відділення є наступні шкідливі і небезпечні виробничі чинники:

- підвищена запиленість і загазованість робочої зони;
- підвищена температура теплового випромінювання вища за допустиму;
- машини, що рухаються, механізми, вироби, що транспортуються;
- виробничий шум;
- вібрація (загальна, локальна);
- переміщувані і складовані вантажі;
- небезпечний рівень напруги в електричному ланцюзі, замикання якого може статися через тіло людини;
- електромагнітне випромінювання;
- недостатня освітленість робочої зони.

Підвищена загазованість повітря робочої зони - шкідливі речовини в повітряному середовищі утворюються від розжарених форм, розплавленого металу, пилу, що осів на устаткуванні [28]. Гази також утворюються при виділенні легкоплавких і легкокипаровуваних елементів в процесі плавки заливки.

Небезпека цих виділень в тому, що при тривалій дії на організм вони можуть привести до отруєнь, до хронічних змін в організмі, що проявляються в

ушкодженнях внутрішніх органів, кровоносної системи, нервової системи; можуть мати канцерогенну дію, чинити задушливу і дратівливу дію на дихальні шляхи: перепочинок, запальні реакції, набряки.

Підвищена температура повітря робочої зони і поверхні устаткування - виникає від нагрітих частин устаткування, а також при переміщенні заливального ковша від печі до форми, що заливається. Джерелами тепловиділення на ділянці є: установка для підігрівання шихти; індукційні печі тиглів; стенд для сушки ковшів; рідкий метал [29]. На організм людини вплив чинника підвищеної температури робочої зони полягає в зниженні працездатності, послабленні опірності організму - до підвищення захворюваності, до теплового виснаження або удару. Підвищена температура поверхні устаткування може привести до опіків різного ступеня тяжкості.

Машини, що рухаються, механізми, вантаж, піднятий на висоту - плавильна ділянка розташована в центральному прольоті цеху, особливу небезпеку представляють мостові крани, які пересуваються з вантажами над центральним прольотом. Джерелами небезпеки є: установки для підігрівання шихти; механічні і автоматизовані пристрої для заливки, мостові крани; кран балки; монорейковий шлях. Транспорт, що рухається, може привести до травм різного ступеня тяжкості: забиття, вивихи, переломи, а також до летального кінця [30].

Небезпечний рівень напруги в електричному ланцюзі – у ливарному цеху електричний струм використовується майже в усіх установках, агрегатах, машинах і в освітленні. Рівні напруги 220, 380, 1050В. На плавильній ділянці є струмопровідні поли, пил, хімічні речовини, які при тривалій дії можуть зруйнувати ізоляцію дротів.

Головна причина поразки електричним струмом - необережність роботи з устаткуванням і не дотримання правил роботи з устаткуванням що знаходиться під напругою. Поразка струмом може бути через оголені дроти, металевий корпус устаткування, металеву підлогу. Поразка людини електричним струмом може привести до опіків, електричних ударів, електроофтальмії, металізації шкіри, до припинення роботи серця і зупинки дихання [31].

Аналіз шкідливих і небезпечних факторів та карта умов праці для робочого місця працівника цеху по професії обрубувач металу представлені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Технологічна карта умов праці по професії обрубувач металу

№ п/п	Фактори виробничого середовища та трудового процесу	Нормативне значення	Фактичне значення	Шкідливі та небезпечні умови, характер праці			Час дії фактора, %
				I ступінь	II ступінь	III ступінь	
1	Вібрація (загальна і локальна), дБ	92	94	2			30
2	Шум, дБА	80	94		14		75
3	Мікроклімат в приміщенні:						
	- температура повітря, °С	15...23	18				100
	- швидкість руху повітря, м/с	не більше 0,3	0,2				100
	- відносна вологість повітря, %	не більше 75	75				100
4	Важкість і напруженість праці	категорія важкості праці – середньої важкості ІІа, категорія напруженості праці – помірно напружена ІІ.					

На підставі проведеного аналізу і визначення небезпечних і шкідливих виробничих чинників можна зробити висновок, що умови праці є несприятливими і необхідно прийняти технічні рішення, що забезпечують захист від небезпечних і шкідливих виробничих чинників.

4.2 Заходи з поліпшення умів праці

Підвищена температура повітря робочої зони і поверхні устаткування - виникає від нагрітих частин устаткування, а також при переміщенні заливального ковша від печі до форми, що заливається. Джерелами тепловиділення на ділянці є: установка для підігрівання шихти; індукційні печі тиглів; стенд для сушки ковшів; рідкий метал.

Для захисту від теплових потоків печей застосовують водоохолоджувані тепловідвідні екрани, а також загальнообмінну вентиляцію. Екрани розташовуються між пічним агрегатом і робочими місцями з метою локалізації теплового джерел випромінювання. Оскільки водоохолоджувані екрани розташовуються на деякій відстані від стінки печі, то тепло, передаване випромінюванням, сприймається водою повністю, а конвективна складова незначна, з огляду на те, що гаряче повітря в прошарку відноситься.

Загальнообмінна вентиляція в плавильному відділенні забезпечується природним припливом повітря. Приплив повітря спрямовується до робочих місць у вигляді повітряних душей.

Для захисту від теплових випромінювань передбачена автоматизація виробництва - це безперервне розливання за допомогою ливарної машини, дозування металу з плавильної печі в роздавальну піч за допомогою магнітодинамічного дозатора, оснащені електроприводом. Усі описані заходи дозволяють значно збільшити дистанцію між оператором і джерелом теплових

Підвищена загазованість повітря робочої зони - шкідливі речовини в повітряному середовищі утворюються від розжарених форм, розплавленого металу, пилу, що осів на устаткуванні. Гази також утворюються при виділенні легкоплавких і легковипаровуваних елементів в процесі плавки заливки.

Захист від пилегазових виділень забезпечує загальнообмінна вентиляція в плавильному відділенні витягом повітря через шахти на даху. Приплив повітря спрямовується до робочих місць у вигляді повітряних душей. Кількість

припливного повітря компенсує витяг загальнообмінної і місцевої вентиляції. Для виключення попадання в атмосферу газу і пилу передбачається відсмоктування газів у момент завантаження шихти в індукційну піч. Для видалення забрудненого повітря над місцем, де переливається метал з печей в роздавальні ковши, передбачена витяжна парасолька. Шкідливі гази віддаляються через систему місцевої витяжної вентиляції. Для очищення газів, що відходять, від пилу проектується система пиловилловлювання з використанням циклонів. При охолодженні форм також виділяються гази. Але оскільки охолодження відбувається на автоматичній лінії під кожухом, то в місцях входу і виходу форм з під кожуха проектується місцева витяжна вентиляція.

Процес витягання відливань з форм супроводжується виділенням пилу. Щоб локалізувати ці виділення так само застосовується місцева вентиляція.

На ділянці обрубвання, заточування і фінішних операцій усі шкідливі виділення віддалятимуться через систему місцевої вентиляції. Кожне робоче місце має бути ізольоване в окремі камери.

Для зниження рівня шуму кожне шумне устаткування (наприклад, формувальна машина і так далі) ізольоване. Звукоізоляція джерел шуму досягається шляхом установки звукоізолюючих перешкод у вигляді стін, перегородок, кожухів, кабін, екранів. Зменшується механічний шум при вдосконаленні технологічного устаткування (амортизація ударів вибивних грат). Рациональним шляхом зниження шуму є використання устаткування, в яких удари відсутні.

Для робітників, працюючих в цих відділеннях, передбачені організаційні заходи: скорочення часу перебування людей в умовах з підвищеним шумом, лікувально-профілактичні заходи і так далі.

Запобігання утворенню вибухонебезпечного середовища при попаданні води на працююче устаткування (заливальні ковши, міксер і так далі), яке пов'язане з розплавленим металом, забезпечується герметизацією устаткування і контролем за технічними і технологічними процесами. Також ведеться безперервний контроль за станом шихтових і формувальних матеріалів (пісків,

глин) щоб уникнути контакту води з розплавленим металом. Самі ж робітники, які працюють з устаткуванням, яке може привести до пожежі і вибуху, повинні мати відповідний досвід роботи. Якщо повинні працювати робітники, що не мають необхідного стажу роботи з таким устаткуванням, то вони обов'язково мають бути ретельно проінструктовані майстром.

Пожежовибухонебезпечні ділянки (плавильне відділення, стержневе відділення і так далі), оснащені автоматичними установками пожежогасіння і автоматичною сигналізацією. На ділянках цеху, в якості засобів сповіщення про пожежу, застосовані електрична кнопкова пожежна сигналізація та телефони внутрішнього зв'язку.

В цілях профілактики випадків виробничого травматизму, профзахворювань і поліпшенню умов праці щорічно здійснюються різного роду заходи, передбачені колективним договором і угодою по охороні праці, техніці безпеки і промислової санітарії.

В цілях постійного контролю за станом охорони праці на виробничих ділянках і ремонтних службах працюють комісії адміністративно-громадського контролю, результати перевірки фіксуються в журналах, а так само складаються акти-приписи з виявленими порушеннями і термінами їх усунення.

Відповідно до вимог правил безпеки при експлуатації небезпечних виробничих об'єктів знову прийняті робітники проходять навчання за фахом, по безпечних методах виробництва робіт, стажування на робочому місці, перевірку знань отриманих за час навчання в комісії і тільки після цього допускаються наказом (розпорядженням) до самостійної роботи на виробничих небезпечних об'єктах [32]:

- вантажопідйомні крани;
- газове устаткування;
- кислоти і луги;
- плавильне устаткування;
- технологічні трубопроводи;
- електроустаткування.

4.3 Виробнича санітарія

Суттєвий вплив на стан організму працівника, його працездатність здійснює мікроклімат (метеорологічні умови) виробничого приміщення, який визначається температурою, відносною вологістю та рухом повітря.

Виходячи з категорій виконуваних в цеху робіт, відповідно до вимог санітарних норм, в таблиці 4.2 приведені показники мікроклімату для робочої зони (величини температури, відносної вологості і швидкості руху повітря).

Таблиця 4.2 - Показники мікроклімату для робочої зони

Період року	Категорія робіт	Температура, °С			Відносна вологість, %		Швидкість руху, м/с	
		Оптимальна	Допустима		Оптимальна	Допустима, не більше	Оптимальна	Допустима, не більше
			Постійна верхня межа	Постійна нижня межа				
Холодний	Важка	19...21	23	17	40...60	75	0,2	не більше 0,3
Теплий	Важка	21...23	27	18	40...60	65 (при 26°С)	0,3	0,2...0,4

Під оптимальними мікрокліматичними умовами розуміють поєднання параметрів мікроклімату, які при тривалому та систематичному впливі на людину забезпечують зберігання нормального теплового стану організму без активізації

механізмів терморегуляції. Вони забезпечують відчуття теплового комфорту та створюють передумови для високого рівня працездатності.

Для створення заданих кліматичних умов, у цеху застосована загальнообмінна вентиляцію.

Для провітрювання відділень цеху застосовується аерація. Повітря поступає через отвори в зовнішніх стінах, а видалення робиться через аераційні ліхтарі.

Система опалювання цеху підключена до заводської тепломережі. Опалювання цеху здійснюється в холодну пору року, в теплу пору року - перекривається підведення гарячої води до батарей опалювання.

Суттєвий вплив на працездатність здійснює освітлення виробничого приміщення. Для робіт, що виконуються в цеху прийнятий VII розряд зорових робіт. З урахуванням прийнятого розряду зорових робіт нормоване значення освітленості дорівнює 200 лк.

У цеху використовується комбіноване освітлення - природне і штучне. Природне освітлення здійснюється через віконні отвори. Штучне освітлення здійснюється за допомогою дугових ртутних ламп (ДРЛ) розташованих на фермах будівлі.

До штучного освітлення ливарного цеху пред'являються наступні вимоги:

- достатня освітленість робочого місця;
- висока якість освітлення (спектральний склад, близький до природного освітлення і відсутність яскравих частин в поле зору, відсутність коливань);
- економічність усієї системи освітлення;
- зручність в обслуговуванні;
- електробезпека і пожежобезпека;

Окрім робочого освітлення передбачимо аварійне освітлення, для якого використовуються окремі світильники із загальної кількості по лінії основних проходів.

4.4 Електробезпека. Розрахунок захисного заземлення

У ливарному цеху електричний струм використовується майже в усіх установках, агрегатах, машинах і в освітленні. Рівні напруги 220, 380, 1050В. На плавильній ділянці є струмопровідні поли, пил, хімічні речовини, які при тривалій дії можуть зруйнувати ізоляцію дротів.

Приміщення цеху згідно ПУЕ [33] можна віднести до І класу - з підвищеною небезпекою ураження струмом (струмопровідний пил; температура понад 35°C або короткочасно 40°C незалежно від пори року; можливість одночасного дотикання людини до металевих корпусів електрообладнання і заземлених металевих конструкцій будівлі; наявність струмопровідних підлог земляних, залізобетонних, цегляних та ін.).

Головна причина поразки електричним струмом - необережність роботи з устаткуванням і не дотримання правил роботи з устаткуванням що знаходиться під напругою. Поразка струмом може бути через оголені дроти, металевий корпус устаткування, металеву підлогу. Поразка людини електричним струмом може привести до опіків, електричних ударів, електроофтальмії, металізації шкіри, до припинення роботи серця і зупинки дихання. Для захисту робітників від поразки струмом використовуються наступні заходи захисту:

- ізоляція струмопровідних частин (робоча, додаткова, посилена, подвійна);
- захисне заземлення корпусів устаткування;
- недоступне розташування частин устаткування, що знаходяться під напругою (захисні оболонки, захисні огорожування – тимчасові, стаціонарні);
- проведення ремонтних робіт при відключеній напрузі;
- використання індивідуальних засобів захисту (прогумованих рукавичок, захищеного від поразки струмом інструменту і так далі).

Щоб запобігти поразки струмом в ливарному цеху усі люди, працюючі з електричними приладами, агрегатами і так далі повинні знати техніку безпеки по цьому устаткуванню і працювати тільки зі струмоізолюваним інструментом.

Заземлені стойки з приладами управління, корпуса електроустановок і трансформаторів. Тип заземлення - стержневий, трубчастий, розташування вертикальних заземлювачів - по контуру [34].

Зробимо розрахунок захисного заземлення для індукційного плавильного комплексу, до складу якого входить тигельна піч ІЧТ-2,5.

Згідно ПУЕ для установок з діючим значенням напруги вище 1000 В нормативний опір виносного заземлюючого пристрою не повинен перевищувати 4 Ом.

Заземлювач передбачається виконати з вертикальних труб довжиною $l=2$ м із зовнішнім діаметром $d=0,03$ м, верхні кінці яких з'єднуються між собою за допомогою горизонтального електрода - сталеві смуги перетином 4x40 мм, прокладеної в землю на глибині $t=0,7$ м. Питомий електричний опір ґрунту $\rho=100$ Ом·м (суглинок). Коефіцієнт сезонності ψ для вертикального заземлювача у кліматичній зоні України дорівнює $\psi=1,3$.

Визначаємо розрахунковий питомий опір ґрунту для вертикального заземлювача:

$$\rho_{розр} = \psi \cdot \rho, \quad (4.1)$$

$$\rho_{розр} = 1,3 \cdot 100 = 130 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Опір розтіканню струму одиночного вертикального заземлювача заглибленого землю:

$$R_0 = \frac{\rho_{розр}}{2\pi l} \left(\ln \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t+l}{4t-l} \right), \quad (4.2)$$

де l – довжина вертикальних труб заземлювача, $l=2$ м;

d – зовнішній діаметр вертикальних труб заземлювача, $d=0,03$ м;

t – глибина закладання горизонтального електрода, $t=0,7$ м.

$$R_0 = 15,18 \text{ Ом}.$$

Орієнтовна кількість вертикальних заземлювачів складає:

$$n = \psi \cdot R_o / R_n, \quad (4.3)$$

де R_n - нормативний опір виносного заземлюючого пристрою, $R_n = 4$ Ом.

$$n = 1,3 \cdot 15,18 / 4 = 5 \text{ шт.}$$

Знаходимо відношення відстані між заземлювачами до їх довжини:

$$A = a / l, \quad (4.4)$$

де a – прийнята відстань між заземлювачами, $a = 2$ м.

$$A = 2 / 2 = 1.$$

Прийmemo коефіцієнт використання вертикальних заземлювачів $\eta_v = 0,7$, горизонтальних заземлювачів - $\eta_g = 0,75$.

Опір розтіканню струму групи вертикальних заземлювачів:

$$R_g = R_o / (n \cdot \eta_v), \quad (4.5)$$

$$R_g = 15,18 / (5 \cdot 0,75) = 4,3 \text{ Ом.}$$

Довжина горизонтальної сполучної смуги:

$$L_2 = a \cdot (n - 1), \quad (4.6)$$

$$L_2 = 2 \cdot (5 - 1) = 8 \text{ м.}$$

Коефіцієнт сезонності для горизонтального заземлювача при довжині смуги 8м дорівнює $\psi_z=2,5$.

Розрахунковий питомий опір ґрунту для горизонтального заземлювача:

$$\rho_z = \psi_z \cdot \rho, \quad (4.7)$$

$$\rho_z = 2,5 \cdot 100 = 250 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Опір горизонтальної смуги R_z , поглибленої в землю на 0,7 м становить:

$$R_z = \frac{\rho_z}{2\pi l} \ln \frac{2l^2}{bt}, \quad (4.8)$$

де l – довжина вертикальних труб заземлювача, $l=2$ м;

b – ширина сталеві смуги горизонтального електрода, $b=0,04$ м;

t – глибина закладання горизонтального електрода, $t=0,7$ м.

$$R_z = 56,65 \text{ Ом}.$$

Опір заземлювачів в цілому:

$$R_3 = (R_6 \cdot R_z) / (R_6 + R_z), \quad (4.9)$$

$$R_3 = (4,3 \cdot 56,65) / (4,3 + 56,65) = 3,99 \text{ Ом}.$$

Отриманий опір заземлювачів не перевищує номінальний (4 Ом), що відповідає вимогам ПБЕ.

Розташуємо 5 заземлювачів в ряд на відстані 2 метри один від одного.

4.5 Пожежна безпека

Оскільки у ливарному цеху в основному знаходяться матеріали в гарячому, розжареному і в розплавленому стані, а так само тверді речовини, то приміщення по вибухобезпечності належить до категорії Г.

Ділянки цеху відносяться до наступних категорій по вибуховій і пожежній небезпеці:

- плавильно-заливальна - категорія Г;
- термообробка - категорія Г;
- виготовлення форм - категорія Г;
- склади шихти і формувальних матеріалів - категорія Д;
- побутові приміщення - категорія В;
- регенерація - категорія Д.

За конструктивними характеристиками будівлю можна віднести до будівель переважно з каркасною конструктивною схемою. Елементи каркаса - з металевих незахищених конструкцій. Огороджувальні конструкції - з негорючих листових матеріалів з негорючим утеплювачем або утеплювачем груп низької та помірної горючості (ступінь вогнестійкості будівлі - Ша).

В потенційних джерелах вибуху встановлюються пости і крани водопостачання. Пости комплектуються пожежним інструментом, ящиками з піском, ручними хімічними вогнегасниками. Витрата води виходячи з категорії виробництва на зовнішню пожежогасінню приймається не менше 20 л/с.

У цеху є джерела вибуху і пожеж [35], такі як балони стислого газу, апарати працюючі під тиском, розплавлений метал і мережі, що живлять природним газом плавильну піч і пальник конвеєра. Для запобігання виникненню надзвичайних ситуацій пов'язаних з вибухом передбачається розробка і реалізація норм і правил вибухової та пожежної безпеки, навчання персоналу, організація порядку зберігання речовин, запобігання утворенню вибухонебезпечного середовища, локалізація вибухів.

На ділянках, де застосовується устаткування з силовими гідроприводами, що використовують індустріальні олії як робочу рідину, проектується

стаціонарні установки пожежогасінні і вогнегасники, пожежні крани, і інші установки. Типи стаціонарних установок і засобу пожежогасінні (вода, піна, газ або порошок) визначені виходячи з вимог технічного процесу виробництва, що захищається.

У місцях протікань олії з гідросистем устаткування повинна передбачені піддони, що періодично спорожняються.

У закритих приміщеннях встановленні газосигналізатори на метан, що реєструють його концентрацію в повітрі приміщення до 20% від нижньої межі займання.

У місцях, призначених для зберігання меленого графіту, передбачені локальні автоматичні установки газового гасіння. Місткості для зберігання меленого вугілля, транспортні пристрої і приміщення для його зберігання, приготування і використання відповідають вимогам діючих правил техніки безпеки і виробничої санітарії в ливарному виробництві.

Вогнебезпечні і зварювальні роботи проводяться після оформлення наряду-допуску погодженого з пожежною частиною і контрольно-наглядовими службами.

Усі знову прийняті на роботу керівники і фахівці проходять атестацію по пожежній безпеці в комісії підприємства.

На ділянках цехів розташовується устаткування і оснащення засобами пожежогасінні, пожежні щити. Паління дозволяється в спеціально відведених місцях.

У цеху є засоби пожежогасіння:

- для гасіння електроустаткування - вуглекислотні вогнегасники типу ВВ, азбестові і повстяні полотна;

- на плавильній ділянці є пісок для гасіння металів;

- для гасіння займання газу застосовують вуглекислий газ і порошкові вогнегасники типу ОХП-10;

- у приміщеннях передбачаються первинні засоби пожежогасіння: пінні вогнегасники типу ОХП-10, ОП-М і ОП-9ММ (густопінні хімічні), ОХВП-10

(повітряно-пінний хімічний), азбестові ковдри, ящики з піском, протипожежні щити.

4.6 Засоби індивідуального захисту

Для захисту робітників від дії небезпечних і шкідливих виробничих чинників усі робітники основних і допоміжних професій забезпечуються сертифікованими засобами індивідуального захисту, спецодягом і взуттям [36].

Для індивідуального захисту передбачається спецодяг: куртка і брюки з грубошерстного сукна, спеціальне взуття, стійке проти підвищеної температури, з підошвою хромового дублення, брезентові рукавиці з внутрішньої сторони з грубої шкіри. Для захисту обличчя використовуються щитки з органічного скла. Перелік спецодягу для робітників основних професій наведено у таблицях 4.3-4.6.

Таблиця 4.3 - Перелік спецодягу для професії чистильник металу, відливань

№	Найменування засобу індивідуального захисту	Норма видачі на рік
1.	Костюм брезентовий	2 шт.
2.	Рукавиці брезентові	12 пара
3.	Респіратор	До зносу
4.	Окуляри захисні типу ЗН	До зносу
5.	Черевики з металевим мисом	1 пара
6.	Скафандр, шолом МІОТ	До зносу

Таблиця 4.4 - Перелік спецодягу для професії плавильник металу

№	Найменування засобу індивідуального захисту	Норма видачі на рік
1.	Костюм суконний або бавовняний з вогнезахисним просоченням	1 шт.
2.	Черевики шкіряні або валянки	1 пара
3.	Рукавиці брезентові або х/б	12 пара
4.	Капелюх повстяний або каска захисна з захисним щитком з прозорим екраном	1 на 2 роки
5.	Окуляри захисні	До зносу
6.	Респіратор типу ШБ – 1	До зносу

Таблиця 4.5 - Перелік спецодягу для професії обробувач металу

№	Найменування засобу індивідуального захисту	Норма видачі на рік
1.	Костюм брезентовий або х/б	1 на 9 місяців
2.	Рукавиці антивібраційні	12 пара
3.	Черевики шкіряні з металевим носком	1 пара
4.	Окуляри захисні типу ЗН	До зносу
5.	Протишумові навушники	До зносу
6.	Рукавиці комбіновані	12 пара
7.	Респіратор "Пелюстка" або "ЗМ"	До зносу

Таблиця 4.6 - Спецодяг для професії формувальник

№	Найменування засобу індивідуального захисту	Норма видачі на рік
1.	Костюм бавовняний	1 шт.
2.	Рукавиці комбіновані	12 пара
3.	Черевики шкіряні з металевим носком	1 пара
4.	Рукавиці антивібраційні	12 пара
5.	Респіратор "Пелюстка"	До зносу
6.	Протишумові вкладиші	До зносу

При видачі засобів індивідуального захисту проводиться інструктаж по правильному користуванню і способам перевірки придатності до експлуатації. Працівники не повинні допускатися до роботи без передбачених в нормах засобів індивідуального захисту (у несправних, невідремонтованих, забруднених). Адміністрація підприємства (цеху) повинна своєчасно забезпечувати ремонт, прання і видачі засобів індивідуального захисту.

За результатами атестації робочих місць на напруженість і тяжкість трудового процесу адміністрація цеху разом з компенсаціями за роботу в тяжких умовах праці безкоштовно видає молоко (0,5л) або кефір (0,5л) і фруктовий сік (300гр) за зміну.

ВИСНОВКИ

Піч індукційного нагріву є активно-індуктивним навантаженням, що змінюється. Причому індуктивна складова значна, що відповідає мінімальному значенню коефіцієнта потужності, рівного 0,1...0,4. Необхідною вимогою є компенсація реактивній потужності безпосередньо на зажимах індуктора печі індукційного нагріву. Відсутність компенсації реактивній потужності приводить до істотного збільшення потужності силового трансформатора печі індукційного нагріву, втрат електроенергії, збільшення перетину силових струмопроводів і силових характеристик комутаційно-захисної апаратури.

Для підвищення енергоефективності печі ІЧТ-2,5, її обладнано пристроєм автоматичного керування компенсацією реактивної потужності - спеціалізованим контролером типу АРМ/П. Контролер постійно відслідковує зміну значення реактивного струму у колі та розраховує і підключає таку комбінацію конденсаторів, сумарна ємність котрих необхідна для компенсації реактивної потужності індуктора і садки печі.

Контролер може змінювати задану величину і напрям реактивної потужності у вузлі підключення печі індукційного нагріву, підтримуючи як нульову реактивну потужність, так і потужність із заданим індуктивним або ємнісним характером (режим підтримання нульової реактивної потужності, режим підтримання потужності із заданим індуктивним характером або режим підтримання потужності із заданим ємнісним характером), що обумовлено наявністю декотрого часу затримки, який необхідний для комутації секцій батарей конденсаторів.

У магістерській роботі процес плавлення (тобто розігрів завантаження від температури оточуючої середовища (20°C) до втрати магнітних властивостей шихти (760°C), далі до температури плавлення (1200°C), розплавлення шихти та перегрів розплавленого металу до температури розливу (1450°C)) умовно поділено на 143 температурні ділянки з кроком 10°C кожна. На кожній температурній ділянці

проведено електричний розрахунок індукційної печі: визначені еквівалентні активний R_i , реактивний X_i і повний Z_i електричні опори навантаженого індуктора, коефіцієнт потужності індуктора $\cos\varphi_i$, обчислено необхідну ємність батареї компенсувальних конденсаторів C та відповідну їй реактивну потужність конденсаторної батареї.

Електричний розрахунок індукційної печі виконаний у програмі Microsoft Excel. Результуючі графіки, побудовані за допомогою тієї ж програми зображені на рисунках 2.13 - 2.17.

На основі розрахунків обраний найкращий режим (режим підтримання нульової реактивної потужності, режим підтримання потужності із заданим індуктивним характером або режим підтримання потужності із заданим ємнісним характером) роботи контролера автоматичного керування компенсацією реактивної потужності типу АРМ/ІП при обладнанні їм індукційної тигельної печі ІЧТ-2,5 для підвищення її енергоефективності.

Визначено, що трансформатор індукційної тигельної печі є нерівномірно навантажений на кожному етапі плавлення. На третьому етапі плавлення потужність, яку видає пічний трансформатор значно менше за номінальну. У такому режимі роботи трансформатор має низький коефіцієнт потужності на первинній обмотці $\cos\varphi_1$, що негативно впливає на електричну мережу підприємства. Для збільшення коефіцієнту потужності пічного трансформатора на цьому етапі запропоновано використання додаткової ємності на навантаженні та визначено її значення, що дозволяє збільшити коефіцієнт потужності трансформатора $\cos\varphi_1$ від 0,85 до 0,95, приводить до зменшення споживаної реактивної потужності плавильним комплексом.

Рациональне використання електроенергії на плавку металу дозволяє зменшити питоме електроспоживання плавильної установки на 1 т металу і час плавлення.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Альтгаузен А.П. Электрооборудование и автоматика электротермических установок: справочник. Москва, 1978. 304 с.
2. Свенчанский А.Д. Электрические промышленные печи: учеб.пособие для вузов в 2-х ч.-2е изд. Москва, 1975. 384 с.
3. Егоров А.В. Расчёт мощности и параметров электроплавильных печей: учеб. пособие для вузов. Москва, 1990. 280 с.
4. Рустем С.Л. Оборудование термических цехов: учебное пособие. Москва, 1971. 288 с.
5. Каленик Д. В. Технология материалов электроники: учебное пособие. Челябинск, 2002. 139 с.
6. Кабышев А. В. Компенсация реактивной мощности в электроустановках промышленных предприятий: учебное пособие. Томск, 2012. 234 с.
7. Альтгаузена А.А. Электротермическое оборудование: справочник. Москва, 1980. 416 с.
8. Долотов Г.П., Кандаков Е.А. Печи и сушила литейного производства: ученик для техникумов. Москва, 1978. 192 с.
9. Соколов М.М., Грасевич В.Н. Электрооборудование механизмов электротермических установок: учебное пособие. Москва, 1983. 300 с.
10. Сокунов Б. А., Грובהва Л. С. Электротермические установки: учебное пособие. Екатеринбург, 2004. 122 с.
11. Кечин В.А., Корогодов Ю.Д. Технологическое оборудование для производства отливок из сплавов черных и цветных металлов: учебное пособие. Владимир, 2012. 231 с.
12. Кручинин А. М., Махмудинов К. М., Миронов Ю. М, Рубцов В. П., Свенчанский А.Д. Автоматическое управление электротермическими установками: учебник для вузов. Москва, 1990. 496 с.
13. Слухоцкий А.Е., Немков В.С., Павлов Н.А., Бамунэр А.В. Установки

индукционного нагрева: учебное пособие для вузов / Под ред. А.Е. Слухоцкого. Ленинград, 1981. 328 с.

14. Иванова Л.И., Сокунов Б.А., Грובה Л.С., Сарапулов С.Ф.. Индукционные тигельные печи: учебное пособие. Екатеринбург, 2002. 87 с.

15. Бакута В. П., Копырин В. С. Автоматическое управление реактивной мощностью в узле нагрузки системы электроснабжения предприятия: справочник. Москва, 2002. С 23-27.

16. Копырин А.А., Ткачук А.Н. Контроллер управления компенсацией реактивной мощности печи индукционного нагрева: справочник. Москва, 2005. С 96-99.

17. Лаборатория №1 «Электротехнологических электромеханических систем» НИПКИ «Параметр» ДонГТУ. Атоматизация производства. Индукционный нагрев и плавка металлов.: <http://www.dmmi.edu.ua>

18. Альтгаузен А.П., Бершицкий И.М, Смелянский М.Я. Электрооборудование и автоматика электротермических установок: справочник / под ред. А.П.Альтгаузена, М.Д.Бершицкого, М.Я.Смелянского, В.М.Эдемского. Москва, 1978. 304 с.

19. Каталог комплектующих для низковольтных, высоковольтных статических и автоматических установок компенсации реактивной мощности.: <http://www.elprom-rit.kharkov.com>

20. Батенко Л.П., Загородніх О.А., Ліщинська В.В. Управління проектами: навч. посібник. – Київ, 2003. 231 с.

21. Тянь Р.Б., Холод Б.І., Ткаченко В.А. Управління проектами: підручник. Київ, 2004. 224 с.

22. Ковшун Н.Е. Аналіз та планування проектів: навчальний посібник. Київ, 2008. 344с.

23. Тарасюк Г.М. Управління проектами: навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів 2-е вид. Київ, 2006. 320с.

24. Бауман Б.В., Балашова Н.П. Технологические основы литейного производства: учебное пособие. Москва, 2003. 156 с.

25. Колтыгин А.В. Экологические проблемы литейного производства: учебное пособие. Москва, 2003. 98 с.
26. Стрижко Л.С. Безопасность жизнедеятельности в металлургии: учебное пособие. Москва, 1996. 416 с.
27. Мастрюков Б.С. Безопасность жизнедеятельности: учебное пособие. Москва, 2003. 331 с.
28. Алиев И.И. Справочник по электротехнике и электрооборудованию: учебное пособие. Ростов-на-Дону, 2003. 331 с.
29. Долин П.А. Основы техники безопасности в электроустановках: учебное пособие. Москва, 1984. 448 с.
30. Стрижко Л.С. Безопасность жизнедеятельности в металлургии: учебное пособие. Москва, 1996. 416 с.
31. . Астерина Л. А, Балдесов В. В., Бекашов В. К. Технично-економичеcкое обоснование дипломных проектов: учебное пособие для втузов / Под ред. В. К. Бекашова. Москва, 1991. 176 с.
32. Фурсанов, М.И. Определение и анализ потерь электроэнергии в электрических сетях энергосистем: учебное пособие. Минск, 2005. 208 с.
33. Федоров А.А., Каменева В.В. Основы электроснабжения промышленных предприятий: учебное пособие. Москва, 1984. 78 с.
34. Указания по проектированию компенсации реактивной мощности в электрических сетях промышленных предприятий: пособие к РТМ 36.18.32.6 – 92. Москва, 1984. 30 с.
35. Циганенко Б. В. Ефективність роботи розподільних електричних мереж при підвищенні їх класу напруги: дис. ... кандидата техн. наук: 05.14.02 / Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського». Київ, 2017. 271 с.
36. Зорин В.В., Тисленко В.В. Системи електроснабження общего назначения: учеб. для студ. высш. уч. зав. Чернигов, 2005. 341 с.

37. Ching-Tzong Su, Cheng-Yi Lin, Ji-Jen Wong Optimal size and location of capacitors placed on a distribution system. Wseas transactions on power systems. 2008. No 4. Pp. 247-256.

38. Aleksander Kot, Wiesław Nowak, Waldemar Szpyra, Rafał Tarko Efficiency improvement of reactive power compensation in power distribution networks. Przegląd elektrotechniczny. 2013. No 6. Pp. 190-195.

39. Juan Dixon, Luis Moran, Jose Rodriguez, Ricardo Domke Reactive Power Compensation Technologies: State-of-the-Art Review. Proceedings of the IEEE. 2005. No 12. Pp. 2144-2164.

40. Заболотна О.В. Підвищення енергоефективності індукційної тигельної печі ІЧТ – 2,5 шляхом впровадження системи автоматичного керування компенсацією споживаної реактивної потужності: матеріали I Всеукраїнської науково – практичної конференції здобувачів вищої освіти, аспірантів та молодих вчених. Запоріжжя : ІННІ ЗНУ, 2021. С 41-42.